

통신해양기상위성 개발사업(II)
COMS Development Project(II)

통신해양기상위성 해양자료처리시스템 개발사업(II)
**COMS Ocean Data Processing Systems Development
Project(II)**

한국해양연구원

해양수산부

주 의

1. 이 보고서는 해양수산부에서 시행한 통신해양기상위성 개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 해양수산부에서 시행한 통신해양기상위성 개발 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

제 출 문

해양수산부 장관 귀하

본 보고서를 “통신해양기상위성 해양자료처리시스템 개발 사업 (II)” 과제의 보고서로 제출합니다.

2005. 4.

주관연구기관명 : 한국해양연구원

주관연구책임자 : 안 유 환

연 구 원 : 한국해양연구원
" : 유주형 유홍룡 석봉출
" : 유신재 이재학 산무감
" : 문정언 민지은 이윤경
" : 이누리
" : 연세대학교
" : 최규홍 박상영 박재익
" : 송영주 김영록
" : 남서울대학교
" : 정종철 양희범 김동춘
" : 파리 6 대학교
" : André Morel
" : Bernard Gentili
" : David Antoine

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2004. 5. ~ 2005. 4	단계 구분	2차년도 / 1단계
연구사업명	중 사업명				
	총괄사업명	통신해양기상위성 개발사업 (II)			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	통신해양기상위성 해양자료처리시스템 개발 사업 (II)			
연구책임자	안 유 환	해당단계 참여연구원수	총 : 22 명 내부 : 11 명 외부 : 11 명	해당단계 연구비	정부: 500,000 천원 기업: 천원 계: 500,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양연구원 해양위성사업단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 : 연세대학교		연구책임자 : 최 규 홍		
	연구기관명 : 남서울대학교		연구책임자 : 정 중 철		
	연구기관명 : 파리 6 대학교		연구책임자 : André Morel		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
<ul style="list-style-type: none"> ● 태양반사점의 시공간 분포 파악 <ul style="list-style-type: none"> - TLE를 이용한 저궤도 위성의 궤도 예측 프로그램을 개발하였음 - 태양의 위치 계산 프로그램을 개발하였음 - 지구-태양-위성을 고려한 태양광반사 위치예측 프로그램을 개발하였음 - 미국 AGI 사의 프로그램인 STK (Satellite-Tool-Kit)와 데이터 비교를 통해 알고리즘을 검증하였음 ● 정지궤도 위성 영상의 질 검정 연구 <ul style="list-style-type: none"> - 정지궤도 위성의 경도 위치에 따른 지형왜곡 프로그램 개발 - 관측방식의 차이에 따른 해석관측의 차이 비교하였음 ● 연중 태양 및 대기 신호의 변화 크기 연구 <ul style="list-style-type: none"> - 태양 디스크를 자동 추적하여 태양광세기를 측정할 수 있는 시스템 설치 및 관측 - 대기 신호를 실측할 수 있는 야외 스펙트로미터 시스템 설치 및 관측 - 대기권 밖의 신호와 관측된 지표 값을 이용한 대기의 투과도 및 확산감쇠계수 계산 ● 대기 신호의 성분별 크기 추정 모델 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 파장대별 시간에 따른 대기 신호의 변화를 알아보았음 - 대기 성분에 따른 대기 신호의 크기를 추정할 수 있는 알고리즘을 개발하였음 - 위치에 따른 대기 신호의 공간적 변화를 모델화 하였음. - 정지궤도 위성의 위치/시간/계절/밴드별에 따른 대기 신호의 변화를 종합적으로 파악하였음 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	통신해양기상위성, 자료처리시스템, 태양반사점, 지형적 왜곡, 대기 신호, 에어로졸, 대기보정			
	영 어	COMS, Data Processing System, Sun-glint, Geometric Distortion, Atmospheric Signal, Aerosol, Atmospheric Correction			

요 약 문

I. 제 목

통신해양기상위성 해양자료처리시스템 개발 사업 (II)

II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구과제는 정지궤도의 통신해양기상위성에 탑재되는 해양 탑재체의 자료처리 시스템을 개발하기 위한 과제이다. 지구 관측위성의 개발에 있어 가장 중요한 것은 하드웨어적으로 신뢰성 있는 관측 탑재체를 개발하는 것이며 둘째는 이 탑재체로부터 얻어진 자료로부터 지구환경 요인을 정량적/정성적으로 분석할 수 있는 기술을 개발하는 것이다. 본 사업은 통신해양기상위성이 궤도에 올려지는 2008년까지 통신해양기상위성 해양탑재체용 해양환경 분석 알고리즘을 개발하고, 이를 전용 소프트웨어로 개발하는데 그 목적이 있다. 우선적으로 1-2차년도 연구개발의 목적은 크게 4가지로 구분될 수 있다. 첫째, 정지궤도 해양위성의 위치 및 하루/연중 태양의 위치에 따른 해수면 태양광반사 (sun-glint) 영역의 위치를 파악하는 예측 알고리즘 개발하고자 한다. 둘째, 위성의 위치에 따른 영상의 질 검정과 위도에 따른 지형왜곡 및 해상도 감소를 파악하고자 한다. 세 번째는 대기신호의 성분 별 크기 추정 모델을 개발하고자 한다. 네 번째는 현장관측을 통하여 연중 태양 및 대기신호의 변화를 측정하여 시간별/일별/계절별 차이를 파악하고 개발되는 센서에 적합한 대기보정 방법을 개발하고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 정지궤도 해양위성에서 본 지표면 태양광반사의 시공간 분포 연구
 - 정지궤도 위성의 태양광반사 위치 예측 알고리즘 및 SW 개발
 - 연중 태양의 위치 계산 SW 개발
 - 정지궤도 위성의 태양광반사 위치 예측 시각화 SW 개발
 - 정지궤도 위성에서 full disk 스캐닝 시 보이는 태양광반사점 1년간 분포 분석
- COMS 위성에 의한 해양환경 관측시 공간해상력 비교
 - 극궤도인 SeaWiFS와 MODIS 자료를 정지궤도 위성인 GOES-9 가시광 영역 자료와 특성을 비교
 - 극궤도 해색센서의 자료 획득 방법과 정지궤도의 해색자료 취득 방법에 관한 비교
 - 공간해상력의 차이에 의해 발생하는 해양환경관측의 변화를 Landsat 자료를 가지고 시뮬레이션하여 공간해상력 변화에 의한 해양환경관측 특성 차이를 제시
 - 정지위성이 얻게 되는 해상력의 자료가 해양환경관측에서 발생하는 한반도 주변의 지형적인 곡면 왜곡 추정
- 태양과 대기의 광특성 연구 및 변화 모니터링
 - 격자태양광측정기와 대기분광측정기를 이용하여 태양과 대기의 신호를 매일 10분 간격으로 관측

- 관측된 태양의 방사도 ($E_{\text{sun}}(\lambda)$)와 대기권 밖에서의 태양 방사도를 이용하여 대기의 투과도와 광학적 두께를 계산
- 대기의 광특성 연구를 위하여 에어로졸 샘플러를 구입/자체제작
- 해양과 도시 등의 대기 성분을 샘플하여 흡광계수를 측정하고 크기 분포 파악
- 스펙트럴 형태 매칭 방법이라는 새로운 대기보정 기법에 대한 개념 정립 및 기존의 대기보정 방법들과의 비교 연구
- 대기 신호의 성분별 크기 추정 모델 개발
- 우리나라 주변부에 대한 해양 신호인 $E_u(\lambda)$, $L_w(\lambda)$, $L_{\text{Nw}}(\lambda)$ 와 $R_{\text{rs}}(\lambda)$ 등의 시뮬레이션 알고리즘 개발
- 대기+해양 신호인 $L_{\text{TOA}}(\lambda)$ 를 계산하는 알고리즘 개발 및 $L_{\text{TOA}}(\lambda)$ 의 dynamic range 계산
- 한반도를 포함하는 북반구에 대해 위성에서 받는 전체 신호 중 해양신호의 비에 대한 공간적 분포를 구함

IV. 연구개발결과

- 정지궤도 해양위성에서 본 지표면 태양광반사의 시공간 분포 연구
 - 태양-지구-위성의 기하학적 형상을 고려한 구면 삼각법과 Newton-Raphson 수치 해석적 방법을 이용하여 정지궤도 위성의 태양반사점 계산 알고리즘을 개발하였음
 - 위성의 궤도 정보인 위성 직하점 값과, 위치를 예측하고자 하는 날짜를 입력값으로 태양의 위치를 계산하고 태양반사점의 위치를 계산함
 - 시각화 프로그램은 포트란, C++, QT 라이브러리를 이용하여 작성하였음
 - 본 연구에서 개발된 알고리즘을 이용하여 인도의 정지위성인 INSAT1-D 위성의 결과값과 미국 AGI사의 STK (Satellite Tool Kits)로 시뮬레이션한 결과와 비교하여 개발된 알고리즘을 검증하였음
- COMS 위성에 의한 해양환경 관측시 공간해상력 비교
 - 극궤도와 정지궤도의 관측되는 영상에 따른 기하학적 그리고 질적인 영향으로 구분하여 분석
 - 공간해상력 측면에서 해양환경을 관측할 때 왜곡현상이 발생하고 이로 인하여 공간적 분포 특성을 비교하는 해석자료의 공간분해능이 감소하는 결과 해석
 - 한반도의 주변해역의 GOCI 관측지점에 의한 시뮬레이션 영상을 생성하는 IDL 프로그램을 완성하고 이를 통해 GOES 가시광 채널을 이용한 가상의 이미지 생성
 - 적조 및 부유사의 공간적인 분포는 100 - 500 m의 공간해상력 관측 범위에서 분포패턴의 미세관측이 구분되게 나타나며, 1000 m 공간해상력의 경우 구분이 어렵게 됨
 - 지구곡률에 의해 정지궤도의 한반도 영상은 관측 각도에 의한 왜곡이 발생하는데 이를 화소단위로 산출
- 태양과 대기의 광특성 변화 및 광특성 연구
 - 2004년 3월에 설치된 격자태양광측정기와 분광측정기를 이용하여 매일 오전 8시부터 오후 18시까지 10분 간격으로 $E_{\text{sun}}(\lambda)$, $L_{\text{sky}}(\lambda)$ 와 $E_d(\lambda)$ 를 현재까지 지속적으로 측정중이며, ASD 분광측정기를 사용하여 이들 기기 자료의 신뢰성을 검증하였음

- 지표에서 측정된 $E_{\text{sun}}(\lambda)$ 과 대기권 밖의 $F_0(\lambda)$ 값을 이용하여 대기의 투과도와 광학적 두께를 계산하여 시간/일/월/계절별 변화를 파악하였음
- 대기 특성을 파악하기 위하여 에어로졸 샘플러를 구매/자체제작 하였으며, 이들을 이용하여 2005년 2월부터 해양연구원 옥상에서 매일 대기 입자를 샘플하고 있으며 안면도에서 1회 샘플하였음. photospectrometer를 이용하여 에어로졸의 흡광계수를 측정하는 방법과 coulter counter를 이용하여 에어로졸의 입자 사이즈 분포를 측정하는 방법을 정립하였음. 대기의 광특성 연구는 지속적으로 수행되어질 예정이므로 자료가 충분히 축적되면 시간별/계절별 경향이나 특성을 파악할 수 있을 것으로 생각됨
- 현장에서 얻어진 해수의 스펙트럴 형태를 이용하여 위성자료의 대기효과를 보정하는 방법을 개발하였으며, 이를 이용하여 Landsat과 SeaWiFS등의 위성 자료에 적용하여 기존의 대기보정 방법보다 우수함을 입증하였음
 - 정지궤도 위성의 대기+해양 신호 모델 개발
 - 8개의 밴드 영역에 대해 3개의 에어로졸 모델과 클로로필 농도를 각각 달리하며 매시간 간격으로 bidirectional 함수를 이용하여 $L_w(\lambda)$ 값을 모사할 수 있는 모델을 개발하였으며, 북반구에 대해 공간적 분포 값을 파악하였음
 - 대기+해수 신호 모델에 의해 대기권 밖(위성)에서 얻어지는 $L_{\text{TOA}}(\lambda)$ 값을 성공적으로 모사하고 dynamic range을 파악하였음
 - 통해기 관측영역을 포함하는 북반구에 대해 다양한 대기-해양 조건에 따른 대기권 밖의 신호 중 해양신호의 신호 퍼센트의 공간적 분포를 파악하였음

V. 연구개발결과의 활용계획

2008년까지 수행될 본 연구는 크게 대기 분야, 해양 분야, SW 개발 분야로 나누어지며 본 연구는 대기광학모델 개발의 2차년 연구로서 크게 4가지 분야로 나누어 연구되었다. 1차 년도에서 연구된 극궤도 위성자료의 태양반사점 위치 계산 알고리즘을 바탕으로 2차 년도에 정지궤도 위성자료의 태양반사점 위치 계산 알고리즘이 개발되었으며 사용의 편의를 위하여 GUI로 구현되었다. 이 SW는 위성의 설계시 태양반사점을 미리 고려할 수 있음으로 앞으로 우리나라에서 개발될 위성 자료의 질을 향상시키는데 도움이 될 것이다. 즉, 우리나라 중장기 우주개발 계획에 의한 다목적 위성과 통해기 시리즈 등의 계획/설계시 적극 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 정지궤도 위성 영상 자료의 질 검정 연구는 정지궤도 위성의 위치와 관련하여 영상의 지형적 왜곡과 함께 자료 질의 변화를 파악할 수 있는 알고리즘이 개발된다면 통해기 자료에서 나타날 수 있는 문제점을 사전에 파악함으로써 대처할 수 있을 것으로 생각된다. 정지궤도 위성의 특성상 태양과 대기의 신호 크기가 변하기 때문에 이의 실측 및 모델 개발의 결과는 정량적인 대기보정을 위한 필수적 항목이다. 따라서 실측에 의한 연중 태양 및 대기 신호의 변화 크기 연구와 대기 신호의 성분별 크기 추정 모델이 개발되면 매시간 관측되는 통해기 자료의 대기 보정과 통해기 자료 전처리 시스템 (Level 1.5) 개발에 적극 활용이 가능하다. 또한 새롭게 개발된 대기 보정 방법은 해색위성과 육상위성에 적용되어온 대기보정 방법들의 장점을 살린 것으로 기존의 위성이나 새롭게 개발될 위성자료에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

이와 같이 연구된 대기광학모델 연구는 3-4차년도에 수행될 해양광학 모델 개발의 기본이 되는 연구로 이번 연구에서 설치된 sunphotometer과 야외 스펙트로미터 자료의 시간/일/월/계절/연별 측정 결과는 정지궤도의 통해기 시리즈는 물론 현재와 미래의 극궤도 위성 자료의 대기 보정 등에 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 2007-2008년에 개발된 자료처리 시스템 SW는 NASA의 "SeaDAS"와 같은 기능을 갖는 정지궤도 통신해양기상 위성 탑재체의 해양 분야의 공식적인 분석 활용 기술과 SW로 학계, 국가연구기관, 환경관련 기업 및 일반 이용자에게 공급할 예정이다. 동시에 일반인 사용을 위한 기본 교육과 국가 연구/활용기관에 대한 기술 이전도 수행하여 위성자료 활용의 저변확대에 기여할 것이다. 이와 같은 통해기 자료의 수신/처리/배포 등의 기능을 담당할 수 있는 해양위성센터 건립 사업이 앞으로 한국해양연구원에서 수행될 예정이다.

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	17
제 1 절 연구개발의 목적	17
제 2 절 연구의 필요성	17
제 3 절 연구 범위	19
제 2 장 국내외 기술개발 현황	21
제 1 절 국내의 경우	21
제 2 절 국외의 경우	21
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	23
제 1 절 정지궤도 해양위성에서 본 지표면 태양광반사의 시공간 분포연구(Ⅱ)	23
1. 서론	23
2. 관측위성	25
가. 정지궤도 관측 위성	26
3. 시간계와 좌표계	35
가. 시간계의 정의	35
나. 좌표계의 정의	39
4. 태양광반사 위치예측	41
가. 가정 Model	42
나. 태양광반사 영역 위치예측 구현 방법	43
5. 태양광반사 위치 계산 결과	53
6. 결론	62
제 2 절 정지궤도 해양위성에 의한 해양환경관측 시 공간해상력의 비교	64
1. 서론	64
2. 연구방법 및 자료	65
가. 극궤도 위성과 정지궤도 위성자료	66
나. 지구곡률과 지형왜곡에 의한 자료	80
다. 공간해상도 변화에 의한 GOCI 자료 비교	86
3. 연구결과 및 고찰	92
가. 정지궤도와 극궤도의 해석관측	92
나. 정지궤도에서 GOCI의 경도위치에 따른 해석관측	94
다. 해양관측 시 공간해상력 비교	103
4. 결론	115
제 3 절 대기의 광 특성 및 광 변화 연구	117
1. 서론	117

가. 태양복사 스펙트럼과 태양상수	117
나. 대기 밖의 복사량	120
다. 대기의 구성 성분	122
라. 에어로졸	125
2. 연구방법	126
가. 태양광 모니터링	126
나. 대기광 모니터링	131
다. 에어로졸 입자의 광 특성 연구	132
3. 연구결과	139
가. 대기 투과도 모니터링	139
나. 대기의 광학적 두께 모니터링	150
다. 에어로졸의 광 특성	156
라. downwelling irradiance(E_d) 모니터링	160
4. 결론	167
제 4 절 대기보정 기술 연구	169
1. 서론	169
2. 연구방법	171
가. CZCS 알고리즘	171
나. SeaWiFS 알고리즘 (NASA 표준 대기보정 알고리즘)	173
다. OCTS 알고리즘	174
라. 육상관측 위성에서 주로 사용되는 radiative transfer model	175
마. 영상에 기초한 알고리즘	176
바. 새로운 대기보정 방법	177
3. 연구결과	186
가. Landsat TM/ETM+ 영상의 대기보정	186
나. 해상위성 자료의 대기보정	191
4. 결론	194
제 5 절 Assessing the Atmospheric and Marine Signal from a Geostationary Orbit	195
1. Theoretical background	195
가. Marine signal	195
나. General conditions for the computations	198
다. Computation of BF	199
라. Computation of the chl_a -fluorescence contribution	199
2. Results	200
가. Summary of the results	200
나. Attached documents and brief comments	201
다. Figures and tables	203

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	229
제 1 절 연구개발 목표의 달성도	229
제 2 절 관련분야의 기술발전예의 기여도	230
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	232
제 6 장 참고문헌	233
부 록	238

표 차례

표 3.1.1 GOES 위성의 주요 제원 및 궤도 특징 (GSFC, 1996)	27
표 3.1.2 GMS 위성의 역사 (Suzuki, 1997)	29
표 3.1.3 GMS 위성의 주요 제원 (Suzuki, 1997)	30
표 3.1.4 GMS 위성센서의 특징 (Suzuki, 1997)	31
표 3.1.5 MTSAT 위성의 주요 제원 (Uekiyo, 2002)	33
표 3.1.6 FY-2 위성의 주요 제원 (Liu cheng, 2002)	33
표 3.1.7 VISSR의 채널 특징 (Liu cheng, 2002)	34
표 3.1.8 표준 좌표계의 정의 (최규홍, 1997)	40
표 3.1.9 INSAT-1D 계산 결과 테이블	56
표 3.1.10 통신해양기상위성 계산 결과 테이블(동경 116.2°E)	57
표 3.1.11 통신해양기상위성 계산 결과 테이블(동경 128.2°E)	58
표 3.2.1 극궤도 해석센서의 Maximum radiance값(Nadir 방향)과 GOCI 비교	69
표 3.2.2 GOES-9 imager의 채널과 해상력	74
표 3.2.3 GOES-9 images의 종류와 생산주기	74
표 3.2.4 GOES-9 Imager의 관측방식과 관측시간	75
표 3.2.5 동경 155도 GOES-9 자료를 동경 113도로 시뮬레이션 하는데 사용된 GOES-9 영상자료	94
표 3.2.6 투영 관련 상수	95
표 3.2.7 극궤도 육상센서의 직하점 화소와 가장자리 화소의 왜곡을	103
표 3.3.1 The gaseous composition of the atmosphere	122
표 3.3.2 Gases present in standard amounts in a dry atmosphere (Bohren, 1991)	123
표 3.3.3 PREDE사의 Grating sunphotometer PGS-100 주요 사양	127
표 3.3.4 TirOS사의 Hyperspectral radiometer 주요 사양	132
표 3.3.5 MetOne사의 Portable Airborne Particle Counter Model 237B 주요 사양	138
표 3.4.1 ETM+ Spectral Radiance Range (unit: $mW/cm^2/\mu m/ster$)	187
표 3.4.2 Landsat 위성의 band 별 E_o (unit: $mW/cm^2/\mu m$)	187
표 3.4.3 Earth-Sun Distance in Astronomical Units	188
표 3.5.1 Korean target: range of L_{TOA}	214
표 3.5.2 Northern Hemisphere: range of L_{TOA}	215
표 3.5.3 $L_{TOA}(\lambda)/L_{TOA}(865)$ at noon	216

그림 차례

그림 3.1.1 세계의 관측 위성 망 (기상청, 2003)	25
그림 3.1.2 GOES-M 위성체 형상 (GSFC, 1996)	28
그림 3.1.3 GMS-5 위성체 형상 (Suzuki, 1997)	29
그림 3.1.4 GMS-5 위성센서의 구조 (Suzuki, 1997)	30
그림 3.1.5 MTSAT 위성체 형상 (Uekiyo, 2002)	32
그림 3.1.6 FY(FENG-YUN)-2 위성 형상	34
그림 3.1.7 ECI 좌표계	40
그림 3.1.8 GMS-5 기상위성이 찍은 전 지구 모습, 붉은 원안이 태양광 반사 (이희훈, 2003)	42
그림 3.1.9 태양광반사점 형상도	42
그림 3.1.10 태양광반사의 기하학적 형상 (Prakash, 1994)	43
그림 3.1.11 태양의 고도각과 방위각을 유도하기 위한 기하도	48
그림 3.1.12 인공위성의 고도각을 계산하기 위한 기하도	49
그림 3.1.13 인공위성의 방위각을 구하기 위한 구면 삼각형	51
그림 3.1.14 정지궤도위성의 태양광반사 영역 위치예측 흐름도	55
그림 3.1.15 인도의 정지궤도위성 INSAT-1D (경도 83.5°E)에서 관측한 낮 동안과 계절에 따른 태양광반사 영역 (Prakash <i>et al</i> , 1994)	55
그림 3.1.16 본 보고서의 알고리즘을 이용하여 계산해본 INSAT-1D 위성의 태양광 반사영역 (경도 83.5°E)	56
그림 3.1.17 통신해양기상위성에서 관측 시 예상되는 태양광반사 영역 예측 결과 (동경 116.2°E)	57
그림 3.1.18 통신해양기상위성에서 관측 시 예상되는 태양광반사 영역 예측 결과 (동경 128.2°E)	58
그림 3.1.19 통신해양기상위성에서 관측 시 예상되는 태양광반사 영역의 연중분포 변화 예측 결과, 2008년 1월부터 12월까지, 시간은 10:00부터 17:00(L.T) (동경 116.2°E)	59
그림 3.1.20 통신해양기상위성에서 관측 시 예상되는 태양광반사 영역의 연중분포 변화 예측 결과(동경 128.2°E)	59
그림 3.1.21 태양광반사 위치예측 프로그램 실행 윈도우	60
그림 3.1.22 태양광반사 위치예측 시각화 프로그램 윈도우	60
그림 3.1.23 태양광반사 위치예측 시각화 프로그램 결과 윈도우	61
그림 3.1.24 태양광반사 위치예측 시각화 프로그램 결과 윈도우 2	61
그림 3.2.1 EOSQV에 의한 MODIS 자료 읽기	67
그림 3.2.2 MODIS 자료를 Level 1A 자료로 Export 하는 과정	68
그림 3.2.3 GOES 자료를 지구좌표로 투영하고 자료 처리하는 프로그램	68
그림 3.2.4 GMS-5와 GOES-9의 임무교대에 따른 관측지역	73

그림 3.2.5 관측영역은 모두 3영역으로 아시아, 반구, 전구영역이 있다.	76
그림 3.2.6 GOES-East와 GOES-West coverage	77
그림 3.2.7 극궤도와 정지궤도의 궤도 특성	77
그림 3.2.8 Satscape 프로그램을 이용하여 지구 주변의 극궤도 위성과 정지궤도 (GOES-9)의 계산된 궤도 위치를 나타낸 그림으로 작은 점들은 다른 위성의 위치를 나타낸 것이다.	78
그림 3.2.9 지구 주변의 극궤도 위성	79
그림 3.2.10 지구 주변의 극궤도 위성과 GOES-9의 관측범위 (회색의 둥근 원은 달의 위치를 나타냄)	79
그림 3.2.11 한반도의 위치에 의한 지구곡률 왜곡	82
그림 3.2.12 직하방향에서 멀어질수록 나타나는 지형왜곡	82
그림 3.2.13 파노라믹 왜곡(a)과 지구곡률에 의한 왜곡(b)를 비교하여 모식적으로 나타낸 것으로 극궤도 위성과 정지궤도위성에서 관측할 때의 지형왜곡 관측	83
그림 3.2.14 GOCI가 동경 127도에 위치하는 것을 가정한 한반도의 위치	84
그림 3.2.15 GOCI가 동경 155도에 위치하는 것을 가정한 한반도의 위치	84
그림 3.2.16 nadir 방향에서의 화소별 왜곡	85
그림 3.2.17 Off-nadir 방향에서의 화소별 왜곡	85
그림 3.2.18 Ortho-rectification의 원리를 이용한 왜곡률 계산	86
그림 3.2.19 극궤도와 정지궤도에 동일하게 optical path에 영향을 미치는 범위	93
그림 3.2.20 극궤도와 정지궤도에 동일하게 적용되는 optical path	93
그림 3.2.21 지구 투영점에 대한 좌표 결정 과정	97
그림 3.2.22 동경 155도 GOES-9 자료를 동경 113도로 시뮬레이션한 영상(GOCI의 관측자료를 동경 116도와 동경 127도의 위치 변경에 따라 관측자료의 비교를 위해 GOES-9 자료를 처리하는 IDL 작성)	98
그림 3.2.23 Off-nadir일 때의 도식적인 모습	99
그림 3.2.24 지구 곡면에 위한 왜곡을 직하점과 외각점에 대한 비교	100
그림 3.2.25 GOCI의 관측영역을 동경 114도 적도상공에서 관측할 때 화소별 왜곡	101
그림 3.2.26 동경 127도 적도상공에서 관측할 때 화소별 왜곡 (적도상의 점이 GOCI의 위치)	101
그림 3.2.27 동경 133도 적도상공에서 관측할 때 화소별 왜곡 (적도상의 점이 GOCI의 위치)	102
그림 3.2.28 GOCI의 관측영역을 동경 114도 적도상공에서 관측할 때 화소별 왜곡	102
그림 3.2.29 적조와 부유사의 공간적 분포와 양식장의 위치	105
그림 3.2.30 Lansat ETM+영상에 의한 낙동강 하구와 부산 앞바다의 해양환경 관측	105
그림 3.2.31 Lansat ETM+영상에 의한 남해 해역의 적조와 부유사 분포	106

그림 3.2.32 Lansat ETM+영상에 100m 해상력	106
그림 3.2.33 Lansat ETM+영상에 100m 해상력	107
그림 3.2.34 Lansat ETM+영상에 100m 해상력	107
그림 3.2.35 Lansat ETM+영상에 300m 해상력	108
그림 3.2.36 Lansat ETM+영상에 300m 해상력	108
그림 3.2.37 Lansat ETM+영상에 300m 해상력	109
그림 3.2.38 Lansat ETM+영상에 500m 해상력	109
그림 3.2.39 Lansat ETM+영상에 500m 해상력	110
그림 3.2.40 Lansat ETM+영상에 500m 해상력	110
그림 3.2.41 Lansat ETM+영상에 1000m 해상력	111
그림 3.2.42 Lansat ETM+영상에 1000m 해상력	111
그림 3.2.43 Lansat ETM+영상에 1000m 해상력	111
그림 3.2.44 분석영상과 동일시점의 조사 선박에 의한 적조분포도	114
그림 3.2.45 Lansat ETM+영상에 적조의 공간적 분포와 양식어장 벡터지도를 중첩	114
그림 3.3.1 태양복사 스펙트럼의 분포도	117
그림 3.3.2 대기의 구조와 광학적 특성	124
그림 3.3.3 Prediction chart for Ozone	124
그림 3.3.4 태양과 대기의 광학적 특성을 측정하기 위해 한국해양연구원 제3연구동 옥상에 함께 설치된 Sunphotometer와 Hyperspectral radiometer	126
그림 3.3.5 한국해양연구원에 설치된 PREDE사의 Grating sunphotometer PGS-100	127
그림 3.3.6 PREDE사에서 제공하는 TOA에서의 solar irradiance와 RReDC (Renewable Resource Data Center)에서 제공하는 2000 ASTM Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00과 1985 Wehrli Standard Extraterrestrial Solar Irradiance Spectrum과의 비교	128
그림 3.3.7 ASD사의 Field Spectroradiometer Model FieldSpec Pro Dual VNIR	129
그림 3.3.8 PGS-100 Sunphotometer 자료의 신뢰도 검정을 위해 ASD사의 Field spectroradiometer를 이용하여 solar irradiance(E_{sun})를 측정하는 모습	130
그림 3.3.9 PGS-100에서 측정한 E_{sun} , transmittance 값과 ASD에서 측정한 E_{sun} , transmittance 값의 비교	130
그림 3.3.10 한국해양연구원에 설치된 TirOS사의 Hyperspectral radiometer	131
그림 3.3.11 대기 입자를 채취하기 위하여 자체 제작한 대형 에어 샘플러(A)와 SIBATA사의 AC-10 에어 샘플러와 LV-20 유량계(B)	133
그림 3.3.12 대기 입자의 size distribution($F(d)$)를 분석하기 위해 사용된 Beckman Coulter사의 Multisizer™ 3 Coulter Counter	134
그림 3.3.13 대기 입자의 흡수 계수(absorption coefficient, $a(\lambda)$)와 소산 계수 (attenuation coefficient, $c(\lambda)$)를 측정하기 위해 사용된 Perkin Elmer사의 Lambda	

19 UV/VIS/NIR Spectrophotometer	134
그림 3.3.14 에어로졸 광특성 연구에 대한 도식화	137
그림 3.3.15 MetOne사의 Portable Airborne Particle Counter Model 237B	138
그림 3.3.16 PGS-100에서 측정한 solar irradiance(E_{sun})의 2004년 3월부터 2005년 4월까지 월별 변화	140
그림 3.3.17 PGS-100에서 측정한 solar irradiance(E_{sun})를 이용하여 계산된 Transmittance의 2004년 3월부터 2005년 4월까지 월별 변화	142
그림 3.3.18 PGS-100에서 측정한 solar irradiance(E_{sun})의 2005년 4월 일별 변화	146
그림 3.3.19 PGS-100에서 측정한 solar irradiance(E_{sun})를 이용하여 계산된 Transmittance의 2005년 4월 일별 변화	148
그림 3.3.20 PGS-100 Sunphotometer를 이용하여 계산된 파장 550nm, 660nm, 745nm에 대한 대기 광학적 두께의 2004년 3월부터 2005년 4월까지 시간에 따른 월별 변화	151
그림 3.3.21 PGS-100 Sunphotometer를 이용하여 계산된 파장 550nm, 660nm, 745nm에 대한 대기 광학적 두께(optical thickness)의 2005년 4월 시간에 따른 일별 변화	153
그림 3.3.22 파장 550nm에 대한 대기 광학적 두께(optical thickness, τ)의 월별(A), 일별(B) 변화	155
그림 3.3.23 2005년 3월부터 5월까지 에어 샘플러를 통해 관측된 대기 입자의 농도	156
그림 3.3.24 2005년 3월, 4월, 5월에 SIBATA사의 AC-10 에어샘플러를 이용하여 관측된 파장 250 - 1050nm에 대한 대기 입자의 흡수 스펙트럼들	157
그림 3.3.25 2005년 3월, 4월, 5월에 SIBATA사의 AC-10 에어샘플러를 이용하여 관측된 파장 250 - 1050nm에 대한 단위 농도당 대기 입자의 흡수 스펙트럼들	158
그림 3.3.26 파장 400nm에서 normalization하여 대기 입자의 흡수 스펙트럼 형태를 2가지로 분류하여 나타낸 그래프들	159
그림 3.3.27 2005년 4월 - 5월동안 MetOne사의 Portable Airborne Particle Counter Model 237B를 이용하여 측정한 시간에 따른 대기 입자의 size distribution ..	161
그림 3.3.28 TriOS사의 Hyperspectral radiometer에서 측정한 downwelling irradiance (E_d)의 시간에 따른 2004년 3월부터 2005년 4월까지 월별 변화	163
그림 3.3.29 TriOS사의 Hyperspectral radiometer에서 측정한 downwelling irradiance (E_d)의 2005년 4월 한달 동안 시간에 따른 일별 변화	165
그림 3.4.1 위성자료의 대기효과 모식도	170
그림 3.4.2 Clear water spectrum	178
그림 3.4.3 Turbid water spectrum	178
그림 3.4.4 Lawn spectrum	179

그림 3.4.5 Asphalt spectrum	179
그림 3.4.6 Path radiance를 구하기 위한 개념도	182
그림 3.4.7 Band-3 (555nm)에서 규격화 된 기준점 spectrum ($\tilde{L}_{w-ref}(\lambda)$)의 예	183
그림 3.4.8 Band-3 (555nm)에서 규격화 된 기준점 path radiance ($\tilde{L}_{path-ref}(\lambda)$)의 예	185
그림 3.4.9 Maps showing total reflectance at the top of the atmosphere (R_{TOA}) in the centerwavebands (nm), 485, 560, 660 and 830, respectively, of the Landsat-7 ETM+ imagery acquired on 16 April 2001, over the southwest coastal waters of Korea	188
그림 3.4.10 Comparative performance of three aerosol models (a) and comparison of the atmospheric path reflectance estimated from the 6S radiative transfer code, developed by Vermote <i>et al.</i> (1997), path-extraction and SSMM methods (b). Note that the path reflectance R_{path} is normalized at ETM+ band 4	189
그림 3.4.11 Schematic representation of the total (at the TOA), path and path-corrected reflectance spectra, obtained from the 6S model and SSMM method, for relatively clear and turbid waters	190
그림 3.4.12 Comparison of the atmospherically corrected remote sensing reflectance (R_{rs}) spectrum, obtained from 6S model, path-extraction and SSMM, with the <i>in situ</i> R_{rs} spectrum	191
그림 3.4.13 Variation of the atmospheric path signal ($mW\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}\ sr^{-1}$) over clear and turbid waters, assessed from total radiance recorded at the TOA by SeaWiFS ocean sensor, flown on 21 October 1998 over the south sea, using the standard SeaWiFS atmospheric correction algorithm and SSMM	192
그림 3.4.14 Comparison of in-situ water-leaving radiance spectra ($mW\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}\ sr^{-1}$), obtained from ASD measurements in highly turbid waters of the Jin-do and Wan-do bays on 21 October 1998 at 11:45 a.m, with coincident spectra from the SeaWiFS image acquired at 11:31 a.m. and processed with the standard SeaWiFS AC algorithm and SSMM method. The concentrations of chlorophyll (Chl), suspended sediments (SS) and dissolved organic matter (DOM) at stations B2 and B3 are as follows: St. B2: <Chl> 1.1 $mg\ m^{-3}$ <SS> 24 $g\ m^{-3}$ <DOM> 0.11 m^{-1} . St. B3: <Chl> 0.7 $mg\ m^{-3}$ <SS> 20 $g\ m^{-3}$ <DOM> 0.21 m^{-1}	193
그림 3.5.1 geometry at sea level	195
그림 3.5.2a L_w 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 0.1\ mg\ m^{-3}$ $\lambda = 443nm$..	204
그림 3.5.2b L_w 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 1\ mg\ m^{-3}$ $\lambda = 443nm$	205
그림 3.5.2c L_w 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 10\ mg\ m^{-3}$ $\lambda = 443nm$	206
그림 3.5.2d L_w 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 0.1\ mg\ m^{-3}$ $\lambda = 555nm$..	207
그림 3.5.2e L_w 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 1\ mg\ m^{-3}$ $\lambda = 555nm$	208
그림 3.5.2f L_w 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 10\ mg\ m^{-3}$ $\lambda = 555nm$	209
그림 3.5.3a L_{TOA} 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 0.1\ mg\ m^{-3}$	

$\lambda = 443\text{nm}$	210
그림 3.5.3b L_{TOA} 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.50$) $Chl = 0.1 \text{ mg m}^{-3}$	
$\lambda = 443\text{nm}$	211
그림 3.5.4a L_{TOA} 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 10 \text{ mg m}^{-3}$	
$\lambda = 555\text{nm}$	212
그림 3.5.4b L_{TOA} 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.50$) $Chl = 10 \text{ mg m}^{-3}$	
$\lambda = 555\text{nm}$	213
그림 3.5.5 wavelength dependency of L_{TOA} (equinox)	217
그림 3.5.6a % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 0.1 \text{ mg m}^{-3}$	
$\lambda = 443\text{nm}$	218
그림 3.5.6b % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.50$) $Chl = 0.1 \text{ mg m}^{-3}$	
$\lambda = 443\text{nm}$	219
그림 3.5.6c % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 10 \text{ mg m}^{-3}$	
$\lambda = 443\text{nm}$	220
그림 3.5.6d % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.50$) $Chl = 10 \text{ mg m}^{-3}$	
$\lambda = 443\text{nm}$	221
그림 3.5.6e % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 0.1 \text{ mg m}^{-3}$	
$\lambda = 555\text{nm}$	222
그림 3.5.6f % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.50$) $Chl = 0.1 \text{ mg m}^{-3}$	
$\lambda = 555\text{nm}$	223
그림 3.5.6g % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 10 \text{ mg m}^{-3}$	
$\lambda = 555\text{nm}$	224
그림 3.5.6h % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.50$) $Chl = 10 \text{ mg m}^{-3}$	
$\lambda = 555\text{nm}$	225
그림 3.5.7a % of fluorescence signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.03$) $Chl = 10 \text{ mg m}^{-3}$	
$\lambda = 681\text{nm}$	226
그림 3.5.7b % of fluorescence signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 10 \text{ mg m}^{-3}$	
$\lambda = 681\text{nm}$	227
그림 3.5.7c % of fluorescence signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.50$) $Chl = 10 \text{ mg m}^{-3}$	
$\lambda = 681\text{nm}$	228

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 목적

본 연구과제는 정지궤도의 통신해양기상위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite, 이하 COMS)에 탑재되는 해양 탑재체의 자료처리 시스템을 개발하기 위한 과제이다. 지구 관측위성의 개발에 있어 가장 중요한 것은 하드웨어적으로 신뢰성 있는 관측 탑재체를 개발하는 것이며 둘째는 이 탑재체로부터 얻어진 자료로부터 지구환경 요인을 정량적/정성적으로 분석할 수 있는 기술을 개발하는 것이다. 위성개발에서 상기 두 분야는 어느 것 하나 소홀히 되어서는 안 된다. 일반적으로 위성개발의 초기단계에 있는 국가일수록 위성의 하드웨어적 개발에 치중하여 막상 위성자료가 생산될 무렵에는 이들 자료를 활용할 수 있는 기술이 개발되지 못하여 관측된 자료가 사장되는 경우가 있었다. 일본의 예를 들면 1997년 ADEOS-1의 OCTS 해양관측위성이 궤도에 올려졌으나 활용할 수 있는 분석 기술이 개발되지 못하여 미국에 의뢰하여 자료가 분석된 적이 있었으며, 국내의 경우 1998년 다목적 실용위성 1호에 탑재된 OSMI 해양센서 역시 수년이 지난 지금도 이 자료를 일반인이 활용할 수 있는 공식적인 해양 알고리즘이나 소프트웨어 하나 없어 거의 이용되지 못하고 있는 실정이다. 본 사업은 COMS가 궤도에 올려지는 2008년까지 해양환경 분석을 위한 기술을 개발하고 최종적으로는 개발된 해양환경 분석 알고리즘을, 그리고 해양 탑재체로부터 얻어진 위성자료를 분석하는 공식적인 전용 소프트웨어를 개발하는데 그 목적이 있다. 우선적으로 1-2차년도에 해당하는 1단계 연구개발의 목적은 크게 4가지로 구분될 수 있다. 첫째, 정지궤도 해양위성의 위치 및 하루/연중 태양의 위치에 따른 해수면 태양광반사 (sun-glint) 영역의 위치를 찾아주는 예측 알고리즘 개발하고자 한다. 둘째, 위성의 위치에 따른 영상의 질 검정과 위도에 따른 지형왜곡 및 해상도 감소를 파악하고자 한다. 세 번째는 대기신호와 해수의 성분 별 크기 추정 모델을 개발하고자 한다. 네 번째 현장관측을 통하여 연중 태양 및 대기신호의 변화를 측정하여 시간별/일별/계절별/연별 차이를 파악하고자 한다.

제 2 절 연구의 필요성

정지궤도상의 COMS는 해색 센서(Geostationary Ocean Color Imager, 이하 GOCI)를 탑재하며 Local mode로 500 m × 500 m의 공간해상도를 갖고 관측 영역은 약 2500 km × 2500 km 이상 관측 폭의 자료를 얻어 연안 및 mesoscale 해양을 관측할 예정이다. 이러한 정지궤도 해양 탑재체는 세계 최초로 개발되는 것으로 현재 선진국에서도 실용화되지 못하고 준비단계에 있다. 따라서 지금까지 정지궤도 해양 탑재체 활용을 위한 자료처리 시

시스템은 전무한 실정이므로 모든 활용기술은 우리나라 자체적으로 개발되어야만 한다.

해수에서 반사된 태양복사광이 위성센서의 시야각 (Field of view)의 범위 내에 들어온다면 센서에 의해 촬영된 이미지의 해양 표면은 매우 밝게 보일 것이다. 이렇게 촬영된 영상의 밝게 반사된 부분을 태양광반사 (Sun-glint)라 부른다. 위성원격탐사를 통해 해색의 특성을 파악하기 위해서는 태양광반사의 제거가 필요하다. 그렇지만 센서가 받은 총 복사량으로부터 태양광반사의 복사량 계산이 어렵기 때문에 지금까지 일반적으로 위성 센서의 기울기 변화를 이용해 태양광반사를 피해왔다. 태양과 위성의 기하학적인 배열은 태양광반사의 패턴을 결정하기 때문에, 대부분의 지구 관측 위성들은 위성센서에 의해 얻어지는 영상에서 태양광반사효과를 최소화하기 위해 의도적으로 궤도를 결정하였다. 해양의 근해를 연구하기 위한 Nimbus-7에 탑재된 Coastal Zone Colour Scanner (CZCS) 센서는 태양광반사를 피하기 위해 위성의 피치 축으로 센서의 기울기를 조절 할 수 있는 기능을 가지고 있다. 하지만 기름 유출과 같은 현상을 검출하려 했을 경우 반대쪽으로 센서가 이동하여 태양광반사 효과가 영상에 검출이 되었다. 이러한 방식은 복잡하고 상당한 영상의 왜곡이 발생되며 영상 왜곡의 보정을 위해서는 매우 복잡한 계산이 요구된다 (Gordon *et al.* 1983). 그러므로 정지궤도 해양 탑재체 데이터의 효과적인 사용을 위해서는 태양광반사의 위치와 범위에 대한 정보가 위성이 개발되기 이전에 파악되어야 한다.

기존의 극궤도 해색위성의 센서에서 갖고 있는 광학적 상황이 정지궤도 위성의 센서에서는 전혀 일치하지 못한다. 즉, 센서의 한반도 viewing angle이 Nadir방향이 아니고 수평선에서 약 44도의 각으로 보인다. 그리고 위성의 위치가 한반도 적도 상공 127°E가 아니고 서편 116°E으로 치우쳐질 가능성이 높다. 이로 인한 위성영상의 pixel foot print의 모양이 심하게 왜곡될 것이며 증가된 광학적 경로는 영상의 질을 떨어뜨리게 될 것이다. 따라서 이와 같은 문제점에 의해 영상이 어떻게 지형적으로 왜곡되며 영상의 질은 얼마나 감소되는지를 미리 연구하는 것은 추후 자료처리 결과의 신뢰도를 높이는데 크게 기여할 것으로 보인다.

정지궤도 해색위성자료는 지금까지 개발된 극궤도용 해수환경 알고리즘을 사용할 수 없다. 그 이유는 극궤도 위성은 거의 매일 같은 시각에 자료를 수신하여 광학적 환경이 크게 변하지 않지만, 정지궤도 위성은 매 시간마다 자료를 수신하게 됨으로서 그때마다 태양의 위치가 시간에 따라 변하고 이에 따른 해색도 변하여 기존의 환경 분석 알고리즘의 사용이 어렵기 때문이다. 따라서 계속적으로 변하는 태양의 위치에 따른 태양광과 대기신호의 변화와 시간에 따른 특성 변화를 파악하여야 하므로 sunphotometer와 야외 스펙트로미터를 설치하여 모니터링 하고자 한다. 또한 시시각각 변하는 태양광과 대기의 특성을 모사하기 위한 bi-directional 대기 모델을 개발하는 것이 필수적이다.

위와 같이 정지궤도 해색영상이기 때문에 발생할 수 있는 문제를 사전에 파악하고 연구함으로써, 추후 경제적이고 효과적인 위성해양모니터링 시스템 구축과 관련 국내기술 제고를 위해 우리의 독자적 기술을 활용한 첨단 위성 활용기술을 확보할 수 있을 것이다. 해양관측기술 개발의 궁극적인 목적은 해양을 통하여 인류의 평화, 복지와 미래의 안녕을 구현하기 위함이다. 특히 최근 연안역의 활용가치가 증대되고 있는 21 세기에는 효율적으로 연안 수질을 관리하는 기술 확보가 절대적으로 필요하다. 그리고 해양 원격관

측 기술을 통한 연안역의 효율적 관리와 환경보존으로 어민소득 증가와 국민에게 다양한 연안 해양 정보를 신속하게 제공할 수 있는 위성 관측기술 개발을 위하여 본 사업이 요구된다.

제 3 절 연구 범위

1. 태양광반사점의 시공간 분포 파악

가. 정지궤도 위성의 태양광반사 위치 예측 알고리즘 개발

- 태양-지구-위성의 기하학적 형상을 고려한 구면 삼각법과 Newton-Raphson 수치 해석적 방법을 이용하여 정지궤도위성의 Sun-glint 계산 알고리즘 개발

나. 연중 태양의 위치 계산 S/W 개발

- Meeus(1997)의 알고리즘을 이용한 비 정밀 태양 위치 계산 알고리즘 개발

- JPL DE403, DE405를 이용한 정밀한 태양 위치 계산 알고리즘 개발

다. 정지궤도위성의 태양광반사 위치 예측 S/W 개발

- 위성의 궤도 정보인 위성 직하점 값과, 위치를 예측하고자 하는 날짜를 입력값으로 태양의 위치를 계산하고, Sun-glint의 위치를 계산

라. 정지궤도위성의 태양광반사 위치 예측 시각화 S/W 개발

- 시각화 프로그램은 포트란, C++, QT 라이브러리를 이용하여 작성

마. 정지궤도위성에서 full disk scanning시 보이는 Sun-glint의 1년간(1-365일) 분포 분석

2. 정지위성 영상 자료의 질 검정

가. 현재 정지해양위성의 적도상 위치는 동경 116° 로 예상되고 있으며, 한반도 상공 (130°)보다 서쪽으로 많이 편기되어 있어 수평선에서 보이는 각도와 지형 왜곡이 더 크게 발생할 수 있다. 또한, 한반도 위치(북위 36°)에 따른 공간해상도 감소가 발생할 수 있다. 따라서 좌표 0°N, 130°E(nadir 방향)에서 위성이 동서로 옮겨갈 때 위도에 따른 한반도 pixel foot print geometry의 변형을 분석하였다. 그리고 현재 예정지인 동경116도로 위성 위치가 옮겨질 때 영상의 질에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 왜곡은 위성 센서의 관측방식에 의한 파노라믹 왜곡과 지구곡률의 변화에 따른 왜곡이 동시에 발생하는데 한반도 중심과 GOCI에 의해 관측되는 주변해역의 지형적 왜곡에 의한 영상자료의 특성 변화를 분석하였다.

나. 전 구를 스캐닝할 경우 foot print의 위도에 따른 지형왜곡 및 해상도 감소 (Nadir상의 해상도를 1 이라 가정할 때)를 파악하는 것이 요구되며, 실제 정지궤도의 GOES-9 band 1 가시영상과 같은 영역의 극궤도의 MODIS band 1(1 km) 영상을 비교하여 이미지의 질의 차이가 어떻게 나는지 왜 나는지 그 원인을 규명하였다. 현재 한반도를 관측하는 정지궤도 위성은 GOES-9으로 GMS-5의 수명이 다함에 따라 기상관측 목적의 정지궤도 위성이 운영되고 있다. 하지만, GOES-9은 해색관측 채널이 아니고 공간해상력도 GOCI와는 다르기 때문에 극궤도의 해색관측센서인 MODIS, SeaWiFS와 GOES-9 자료를 상호

비교하여 한반도 주변해역 관측 시 나타날 수 있는 자료의 특성을 비교하였다.

다. Landsat 자료에서 관측된 적조, 부유사, 양식어장, 연안도서 지역의 해양관측 요소들을 50m, 100m, 300m, 500m, 1000m의 공간해상력으로 리샘플링하여 각각의 해상력에서 관측되는 해양환경관측 요소의 자료 특성을 비교하였다.

3. 연중 태양 및 대기신호의 변화 크기 연구

가. 태양광과 대기신호 측정 시스템 설치 및 모니터링

- 한국해양연구원 제3연구동 옥상에 Grating Sunphotometer (PGS-100)와 야외스펙트로미터를 설치하여 $E_{sun}(\lambda)$, $E_d(\lambda)$ 과 $L_{sky}(\lambda)$ 값을 측정하여 태양광과 대기 신호의 시간별/일별/월별/계절별 변화를 파악하고자 한다.

나. 한반도 연중 투과도 및 대기 광학적 두께 변화 모니터링

- 지표에서 측정된 $E_{sun}(\lambda)$ 과 대기권 밖의 $F_0(\lambda)$ 값을 이용하여 대기의 투과도와 광학적 두께를 계산하여 시간/일/월/계절별 변화를 파악하였다.

다. 대기 입자의 광특성 연구

- 에어로졸 샘플러를 구매/자체제작 하였으며, 이들을 이용하여 2005년 2월부터 해양연구원 옥상에서 매일 대기 입자를 채취하고 있으며 안면도에서 1회 샘플하였다. photospectrometer를 이용하여 에어로졸의 흡광계수를 측정하는 방법과 coulter counter를 이용하여 에어로졸의 입자 사이즈 분포를 측정하는 방법을 정립하였다.

4. 대기보정 기술 연구

가. 위성영상에 기초하는 path extraction 방법과 현장관측에 의해 얻어진 해수의 스펙트럴 특성을 고려한 새로운 방법인 Spectral Shape Matching Method (SSMM)을 개발하였다.

나. 기존의 대기보정 방법인 path extraction과 6S 방법들과 SSMM 방법을 Landsat과 SeaWiFS 위성에 적용하여 결과를 비교하여 보았다.

5. 정지궤도 대기+해양 신호 모델 개발

가. 해양 신호인 $E_u(\lambda)$ 을 계산하고 bidirectional 함수를 이용하여 $L_w(\lambda)$ 로 바꾸어 주는 알고리즘 개발하였다.

나. 대기+해양 신호인 $L_T(\lambda)$ 를 계산하는 알고리즘 개발 및 한반도 주변 $L_T(\lambda)$ 의 dynamic range 계산하였다.

다. 한반도를 포함하는 북반구에 대해 위성에서 받는 전체 신호 중 해양신호의 비에 대한 공간적 분포를 계산하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내의 경우

해양관측 탑재체가 국내에서 개발된 것은 1999년에 다목적 실용위성 1호 (KOMPSAT-1)에 탑재된 OSMI가 처음이었다. 국내에서 처음으로 개발되다보니 개발 과정에서 조금은 혼선이 있었고, 현재까지 자료 활용에도 문제 있어 많은 활용이 이루어지지 못했다. 위성의 개발과 함께 자료처리 시스템 개발이 병행되어야 하는 것은 당연하지만 HW 개발만을 중시하는 당시의 분위기로는 자료처리 시스템은 관심 밖의 문제였다. 어쨌든 OSMI의 자료처리 시스템은 위성이 개발된 후 2년이 지난 2002년에 한국해양연구원에서 개발되었으나, 이 SW 역시 미국 NASA의 공개된 SW를 그대로 이용한 것이므로 순수 우리의 기술이라 보기에 문제점이 있을 뿐 아니라 OSMI 센서 자체의 광학적 특성 등이 고려되지 않았다. 그 후 OSMI와 관련된 국내 연구실적을 보면 OSMI 센서의 검보정 연구가 약 3년에 걸쳐서 수행되었으며, 이 사업에 이어서 항공우주연구원 주관으로 현재 공공활용을 위한 연구사업이 한국해양연구원, 자원연구원 그리고 건설교통연구원 공동으로 수행되고 있다. 다목적 실용위성 2호 (KOMPSAT-2호)의 경우 1호의 사업의 문제를 바탕으로 현재 자료처리 및 분석기술개발이 HW개발 수행 시점보다는 늦었지만 2002년부터 수행되고 있다. 해양 분야의 자료처리 기술개발도 한국해양연구원에서 현재 수행 중에 있다. COMS의 경우와 같이 다목적 1호 및 2호의 문제를 거울삼아 위성개발 본 사업에 포함되어 HW 개발과 동시에 자료처리 시스템 개발이 수행되는 것은 우리나라에서는 처음이라 생각된다. 이것은 다목적 실용위성의 경우에는 본 사업에 포함되지 않고 추후 별도의 사업으로 추진되었다는 것이 크게 차이가 나는 점이다. 결과로 COMS는 위성의 개발이 완료됨과 동시에 위성자료 분석 및 활용이 가능하게 될 것이며, 이는 많은 사용자들을 확보할 수 있는 계기가 될 것으로 기대한다.

제 2 절 국외의 경우

정지궤도에서 해상위성이 개발된 경우는 선진국에서도 아직 없는 사례이다. 그러므로 정지궤도 해양위성관측 자료 분석기술은 국내가 처음이 될 것이며 계획대로 사업이 진행된다면 한국이 이 분야의 선도국이 될 것이다. 다만 대기 보정 등의 기초연구는 유럽과 미국이 우리나라의 수준보다 앞서 있는 상태이나 시스템 개발에 대한 노하우는 우리나라가 다른 어느 나라보다도 앞설 것으로 기대된다.

정지해양관측 위성은 이미 NASA에서 구상을 한 후 기획단계를 거친 적이 있는 위성체이며 다른 위성 선도국에서도 상당히 관심을 갖고 있다. 그러므로 우리의 정지해양위성 개발은 다른 후발 개발 국가의 좋은 선례가 될 것이며 각 위성 선진국에서도 앞 다투어

개발될 것으로 생각된다. 정지궤도위성은 극궤도 위성과 달리 지표의 약 1/3만을 관측할 수 있고 지구 전체를 관측할 수 없다는 문제점을 갖고 있지만 이 문제는 앞으로 다른 나라에서 2대의 유사한 위성이 개발되면 지구전체에 대해 1시간마다 관측할 수 있는 시스템이 구축될 수 있을 것이다. 이러한 전 지구적인 해양 모니터링 시스템은 획기적인 것이며 2010년경에 이루어 질 수 있을 것으로 추정된다. 그리고 지금까지 극궤도위성으로 해양을 장 주기적인 면에서 관측이 수행되었으나 이러한 정지궤도 해양위성의 관측은 단 주기 해양연구의 획기적인 전환점이 될 것이며, 해양이나 연안에서의 단기적이고 미세한 변동을 연구할 수 있을 것으로 추정된다. 1차 년도에서 6차 년도까지 사업이 수행되는 동안 대기-해양 환경 분석의 이론적 바탕과 기술개발이 이루어진 후, 5차 년도에 이르면 지금까지 개발된 기술을 바탕으로 하여 공식적인 COMS 해양환경 분석 SW의 개발에 들어가게 된다. 이 분야에는 국내전문용역업체가 참여하게 될 것이다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 정지궤도 해양위성에서 본 지표면 태양광반사의 시공간 분포 연구(II)

1. 서론

밀도가 높은 구름과 깨끗한 눈과 같이 반사율이 높은 물질에서는 적외선 밴드로 영상 촬영 시 가시 밴드 영역에서 위성 영상을 촬영한 것 같이 매우 밝게 보인다. 가시광의 반사율은 물에서 매우 작다. 그렇기 때문에 물로 덮인 표면은 가시 밴드로 위성 영상 촬영 시 어둡게 보이는 경향을 띤다. 그러나 정상적인 조건하에서의 해양의 표면은 광택이 나는 유리 거울과 같아 입사되는 태양복사광(Solar radiation)을 반사한다. 반사된 태양복사광이 위성센서의 시야각(Field of view)의 범위 내에 들어온다면 센서에 의해 촬영된 이미지의 해양 표면은 매우 밝게 보일 것이다. 이렇게 촬영된 영상에 밝게 반사된 부분을 태양광반사(Sun-glint)라 부른다.

입사되는 복사광이 부딪친 표면의 복사광 파장보다 작을 때 전반사가 일어난다. 만약 입사된 빛의 파장이 반사된 표면의 크기보다 같거나 크다면 난반사가 발생한다. 대부분의 자연적인 표면에서 가시광의 파장은 혼합적인 반사의 성질을 가진다. 수평면에 몇 개의 입사하는 빛은 앞 쪽으로 산란되거나 빛의 진행 방향으로 멀어지는 성질을 갖는다. 그리고 몇몇 광들은 입사 방향의 뒤쪽으로 산란되는 성질을 갖는다. 앞 쪽으로 산란되는 광이 대부분 자연적인 표면에서의 특징이다. 위성의 센서에 반사된 빛의 양은 전반사 되는 표면의 방향과 관계가 있다(Taranik & Trautwein, 1976)

해양원격탐사에서 해수의 투명도와 해색(Ocean Color)은 강의 퇴적, 침식, 해안선을 따르는 퇴적물의 이동, 오염도와 같은 변수들의 결정에 있어서 중요하다. 이러한 변수들을 측정하기 위한 해색은 태양광반사와 해수 표면으로부터 반사된 채광(skylight)에 의해 변질이 된다(Fraser & Curran, 1976).

위성원격탐사를 통해 해색을 결정하기 위해서는 태양광반사의 제거가 필요하다. 그렇지만 센서가 받은 총 복사량으로부터 태양광반사의 복사량 계산이 어렵기 때문에 일반적으로 위성 센서의 기울기의 변화를 이용해 태양광반사를 피하였다.

MSS(Multi-Spectral Scanner) 데이터로부터 지형의 거리를 계산하는 동안 태양광반사가 나타난 것을 발견하였다. 이러한 효과를 multi-channel technique을 이용하여 제거하려는 연구를 시도하였다. 이렇게 농작물에 반사되는 태양반사광들 또한 위성 영상으로부터 농작물들을 분류하는데 있어 귀찮은 존재가 되었다(Bauer 1985).

태양과 위성의 기하학적인 배열은 태양광반사의 패턴을 결정하기 때문에, 대부분의 지구 관측 위성들은 위성센서에 의해 얻어지는 영상에서 태양광반사효과를 최소화하기 위해 의도적으로 궤도를 결정 하였다. Landsat 계열의 저궤도 위성에서 얻어진 영상처럼 작은 swath폭을 가진 위성센서는 날씨가 좋은 상태에서는 태양광반사 효과를 피할 수 있었

지만, 거친 파도가 치는 해수표면에서는 풍속의 영향으로 인해 빛이 산란이 되어 태양광 반사 효과가 위성의 센서에 검출이 되었다(Khattak, 1989).

해양의 근해를 연구하기 위한 Nimbus-7에 탑재된 CZCS(Coastal Zone Colour Scanner) 센서는 태양광반사효과를 피하기 위해 위성의 진행방향의 피치(pitch)축으로 센서의 기울기를 조절(tilt) 할 수 있는 기능을 가지고 있다. 하지만 기름 유출등과 같은 현상을 검출하려 시도했을 경우 반대쪽 방향으로 센서가 이동하여 태양광반사 효과가 영상으로부터 검출이 되었다. 이러한 방식은 복잡하고 상당한 영상의 왜곡이 발생한다. 영상의 왜곡 보정을 위해서는 태양광반사효과를 제어하지 않는 위성으로부터 얻어진 자료의 데이터 보정에 필요한 공간보다 200배나 큰 컴퓨터 공간이 요구된다(Gordon et al. 1983).

또한 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) 센서와 같이 넓은 시야각을 가지는 센서는 위성의 센서가 정보를 모으는 시간과 범위에 따라 데이터의 40%까지 태양광반사 효과가 영향을 미쳤다. 하지만 이러한 AVHRR 영상들은 하루에 두 차례 촬영이 반복되어 적용 범위가 크고, 저렴한 데이터 처리비용 그리고 큰 시야각으로 인해 높은 해상도를 얻을 수 있어 더 많은 정보를 얻기 위한 목적으로 사용이 되었다.

태양광반사는 구름의 분류, 해수면 온도 결정, 해색의 계산, 초목의 지표계산, 그리고 water mass의 식별에 방해요소로 작용한다. 따라서 위성 영상 사용자 및 연구자가 알아야 되는 위의 5가지 주요한 분류중의 하나인 태양광반사의 위치에 대한 정보는 제공된 데이터의 효과적인 사용을 위해서는 필히 연구되어야 한다.

지구에 대해 상대적으로 고정된 위치를 유지하여 지상과 항상 송수신이 가능한 정지궤도 위성의 주 활용분야는 통신 방송 서비스 임무이다. 최근에 들어서는 정지궤도에서의 24시간 상시 관측 넓은 가시영역을 이용한 전 지구 관측 연구에 대한 관심이 높아져 정지궤도 위성 활용에 기상, 해양 관측 수요가 증대되고 있다. 한편 정지궤도는 활용성이 높은 반면에 궤도 및 주파수 자원이 매우 한정적이어서 이를 확보하기 위한 국가간의 경쟁이 치열하다. 따라서 확보된 정지궤도 위치 및 주파수에 대한 활용성을 높이는 방안 수립이 필요하여 그 중 하나가 여러 종류의 탑재체를 하나의 위성체에 장착하는 복합임무 위성이다.

이에 2008년 발사를 목표로 개발에 착수한 통신해양기상위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite)의 해양 탑재체의 임무인 해양관측을 통한 해양자원 관리 및 조기적조관측을 통한 해양환경 보존 및 정지궤도용 위성 제작기술 확보 및 다용도 위성의 개발로 한정된 자원의 효율적 활용이라는 소요가 제기 되었다(한국해양연구원, 2003).

그러므로 본 연구의 최종 목표는 통신해양기상위성에서 해양 탑재체의 성공적인 임무 완성에 기여하기 위해 이러한 필요성에 배경을 두고 정지궤도 해양위성 관측자료 분석에 적용할, 위성의 위치 및 하루 또는 연중 태양의 위치에 따른 해수면 태양광반사 영역의 위치를 찾아주는 예측 알고리즘을 개발하는 것이다. 본 보고서에서는 2차년도 위탁과제인 정지궤도 해양위성의 태양광반사 위치예측 및 크기 계산에 대한 연구를 수행하였다.

본 보고서의 2장에서는, 최근의 관측위성이 육상지리정보, 군사정보, 자원탐사, Global/Local 해양환경관측, 지구 기후변화 예측 등 전 분야에 대해 그 활용도가 급증하고

있기 때문에 해외의 지구관측위성들에 대한 정보를 얻기 위하여 정지궤도 관측위성을 중심으로 그 동안의 개발 상황을 살펴 볼 것이다. 3장에서는 정지궤도 해양위성의 태양광반사 영역의 위치 예측 알고리즘의 구현을 위해 필요한 기본적인 이론인 시간계와 좌표계 대한 이론들을 기술하였다. 4장에서는 정지궤도 해양위성의 태양광반사 영역의 위치 예측을 위한 알고리즘 구현방법을 기술하였다. 5장에서는 본 보고서에서 연구한 알고리즘을 통해 구한 계산결과와 그림들을 기술하였다. 본 알고리즘을 이용하여 계산된 데이터와 미국의 AGI사의 STK(Satellite Tool Kits) 프로그램을 이용한 시뮬레이션 비교를 통해 알고리즘을 검증하였다. 마지막으로 6장에서는 본 연구의 결론으로 끝을 맺었다.

2. 관측위성

최초의 인공위성인 Sputnik 1호가 1957년에 소련에 의하여 발사에 성공한 이후 인류는 바야흐로 우주시대에 접어들게 되었다. 현재 지구 주위에는 대기 층 및 X선 관측, 해양, 지구 자원 및 지표면의 관측, 기상 관측 등을 수행하는 관측위성과 방송통신위성, 과학위성 등 수 많은 위성들이 지구 궤도를 선회하고 있으며, 앞으로도 계속 새로운 위성들이 발사될 예정이다.

최근 관측위성이 육상지리정보, 군사정보, 자원탐사, Global/Local 해양환경관측, 지구 기후변화 예측 등 전 분야에 대해 그 활용도가 급증하면서 미국, 일본, 유럽 연합은 물론 중국, 인도까지 관측위성개발에 막대한 투자를 하고 있다.

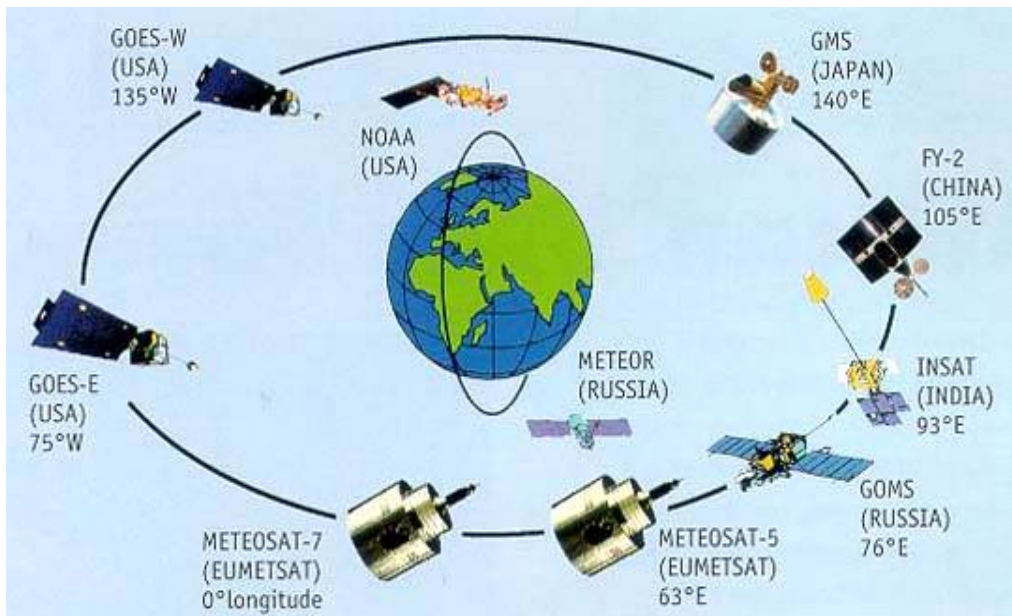


그림 3.1.1 세계의 관측 위성 망 (기상청, 2003)

해양기상관측위성에 의해 식물성 플랑크톤의 동시적, 연속적인 시공간적인 분포가 알려짐으로써 어군 탐지를 통한 어업 생산량을 예측할 수 있으며, 연안지역에서의 해색 관측을 통하여 육지의 주요 하천에서 흘러나오는 해양 부유물 및 오염물에 대한 정보를 얻을 수 있다. 또한 해수 내의 식물성 플랑크톤의 양은 지구 대기의 이산화탄소의 양과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 대기 중의 이산화탄소의 양은 전 지구에 걸친 기후 변화에 직접적인 영향력을 미친다. 따라서 위성 해양학의 성과물에 의해 해양 생명체 및 부유물의 분포를 관측할 수 있다는 점 외에도 지구의 기후 변화, 나아가 기상 이변까지 예측하여 지구 환경을 감시할 수 있는 중요한 부수 효과를 얻을 수 있다. 이번 장에서는 그 동안의 정지궤도 관측위성의 개발 상황을 살펴 볼 것이다.

가. 정지궤도 관측위성

1966년에는 미국에 의해 응용기술위성 ATS-1호가 정지궤도에 발사되어 지구에서 보아 언제나 같은 방향에서 지구의 1/4의 범위에 대해서 구름분포 등을 항시 촬영하는데 성공했다. 이로부터 지구를 둘러싸듯이 정지위성을 배치하면, 극지방을 제외한 지구상의 대부분 영역의 항시 관측이 가능하며 극궤도위성을 추가로 배치하면 위성에 의한 전 지구적인 기상관측이 가능함을 인식하게 되었다.

전 지구가 하나가 되어 일제히 기상관측을 실시하고 전 지구 규모의 데이터를 취득하기 위한 최초의 전 지구 관측실험(FGGE) 계획을 구상하게 되는데 이 계획에 있어서 가장 중요한 관측시스템이 정지기상위성이며, 이 계획에 의해 미국, 일본, 유럽이 각각 정지기상위성을 발사할 계획을 세우게 되었다.

세계관측계획을 추진하기 위해서 각 기상위성 발사 참여국 간의 위성 설계, 발사, 운용 방법, 위성자료 활용에 대한 호환성 확보 필요성이 대두되었고 이에 따라 기상위성을 발사할 계획을 가진 나라들 간의 국제적인 협의를 목적으로 한 CGMS(Coordination Group of Meteorological Satellite)가 1972년에 창설되었다. CGMS 회원으로서 미국의 해양대기청(NOAA), 항공우주국(NASA), 대기연구센터(NCAR)가 초기 회원으로 참여하였고, 일본은 기상청(JMA)과 우주개발사업단(NASDA)이 참여하였으며 유럽우주기구(ESA)가 각각 CGMS에 참여하였다. 그 후 미국이 GOES 위성의 전신인 SMS위성을 1974년 5월 17일에 발사한 것을 필두로, 일본에서 GMS-1호 위성이 1977년 7월 14일에, ESA에서 Meteosat-1호 위성이 11월 23일에 각각 발사되었다. 한편 소련이 1973년에 인도양 상공에 정지기상위성 GOMS를 발사할 계획을 표명함으로써 5개의 정지기상위성(미국 2개, ESA 1개, 일본 1개, 소련 1개)으로 지구를 둘러싸는 계획이 확립되었다. 그러나 GOMS의 발사는 매우 늦어져, 실제로 발사된 것은 소련이 러시아로 바뀐 뒤인 1994년 11월이었다. 이 때문에 전 지구 관측실험 FGGE가 실시되었던 1978~1979년에는 예비 위성으로 있던 미국의 GOES-1호 위성을 인도양 상공으로 이동시켜, GOMS를 대신하여 인도양 상공의 기상위성 관측임무를 수행하였다.

각국의 정지기상위성 발사계획은 지속적으로 추진되어 최종 발사된 정지기상위성으로는 1995년에 GMS-5호, 1997년에 GOES-10호와 Meteosat-7호가 각각 발사되었고, 극궤도위성으로는 NOAA-15호가 1998년에 발사되었다. 한편, 인도는 1982년 4월에 통신위성

INSAT에 영상관측 기능을 추가시켜 발사하였다. 그 이후 INSAT에 의한 영상관측은 계속적으로 행해지고 있지만 취득한 영상자료는 전 세계적으로 분배되지 않고 인도 국내에서만 이용되고 있다. 중국은 1988년에 극궤도 관측위성 FY-1A를, 1990년에는 극궤도 관측위성 FY-1B를 발사하였다. 그리고 1997년에는 정지기상위성 FY-2A를 발사하였으나 이 위성은 지구를 지향하는 안테나에 장애가 발생하여 제한적으로 운영되었다. 그리고 중국은 1999년에 또다시 세 번째 극궤도 관측위성 FY-1C를 발사하였고 이 위성은 현재 성공적으로 운영되고 있다.

(1) GOES 위성

GOES(Geo-stationary Operational Environmental Satellite)는 기상 감시와 예보를 위한 가장 기본적인 위성으로, NOAA의 국제 기상 서비스를 보조한다. GOES 위성은 기상에 관계된 양질의 영상과 수직 자료를 제공해 지속적으로 기후를 예측하고 환경변화를 감시하는 중요한 역할을 한다. 1975년 GOES-1이 발사되었고, 1994년 GOES-I(GOES-8), 1995년 GOES-J(GOES-9) 1997년 GOES-K(GOES-10)가 연달아 발사되어 서로 임무 수행 중 끊어짐이 없이 연속하고 있다. GOES 위성은 정지 위성이기 때문에 통상 두 개의 위성을 함께 띄우며 함께 쏘아 올려진 두 개의 위성 중 하나의 위성은 75°E(East section)를 또 다른 위성은 135°W(West section)의 한 장소만을 집중적으로 관찰하고 있다.

표 3.1.1 GOES 위성의 주요 제원 및 궤도 특징 (GSFC, 1996)

발 사 체	Atlas- I /Centaur(GOES-I/K), Atlas- II /Centaur(GOES-L/M)
길 이	27m
무 게	2100kg
궤 도	지구 정지 궤도
고 도	36,000km
경 도	75°W and 135°E
위 도	적도에서 0.5°내외
전 력	1,050W
계획수명	5년 (최소)

1998년 8월 중순 현재는 GOES-9의 momentum wheel의 고장으로 인해 GOES-10(GOES-K)이 GOES-9의 임무를 물려받아 현재 "West"위성으로 활동 중이다. 그러나 GOES-9는 현재도 궤도상에 있으며 완전히 고장 난 것은 아니다. GOES I-M의 위성은 각각 다섯 개의 채널(1 visible, 4 infrared)을 사용하도록 하여 3.8 μ m와 10 μ m, 그리고 수증기 흡수 채널이 보완되었다.

GOES 시스템의 목적은 기후 문제에 초점을 맞춰 기상과 관련한 영상 자료를 제공하고 지구의 방출과 복사에너지를 측정, 대기기온, 바람, 습도, 그리고 구름을 관측한다. Infrared(IR)와 visible radiometric imaging과 대기의 수직 자료 분석을 통해 지구와 그 대기를 지속적으로 관찰하고 기상 전문가들의 예보의 정확성을 높이기 위해 기상 현상을 다각도로 측정한다.

(가) GOES 위성 탑재 센서

환경감시 기능을 담당하는 Sounder 와 Imager의 기능을 설명하면, Sounder는 가시 채널 파장으로부터 15 μ m의 스펙트럼 범위까지를 커버하는 모두 19개의 채널을 가진 radiometer이다. 이것은 대기 온도, 수분 profiles, 표면과 구름 위의 온도, 그리고 오존 분산을 수학적 분석을 이용해 추론해 낼 수 있으며, Imager와 함께 독립적이고, 능동적으로 작동한다. 다음으로 Imager 는 선택된 지역으로부터 반사된 태양 에너지와 복사된 에너지를 감지하도록 만들어진 기기이다. 남에서 북을 따라 서-동, 동-서를 휩쓸고 지나면서 지구를 관측하는데, 주사 범위를 다양하게 선택해 전체 지구를 원반 모양의 영상, 지구의 가장자리를 포함하는 단면 영상 등 기호에 맞게 관찰할 수 있다.

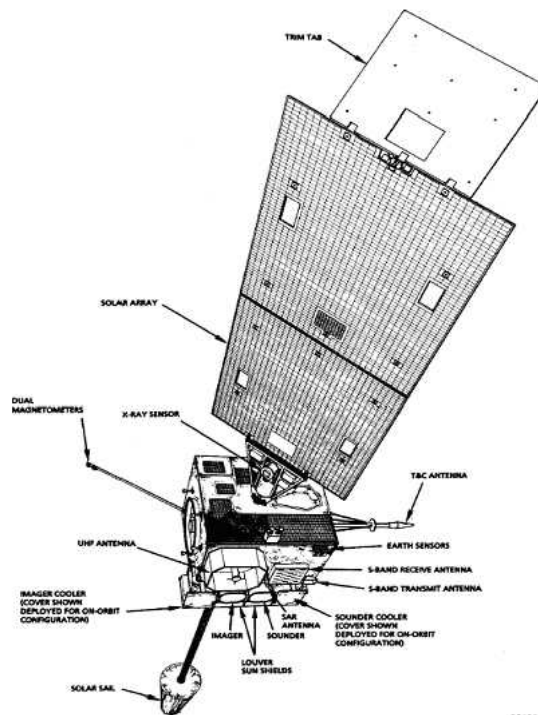


그림 3.1.2 GOES-M 위성체 형상 (GSFC, 1996)

(나) GMS 위성

GMS(Geo-stationary Meteorological Satellite)는 기상 관측을 위해 일본의 NASDA가 띄운 위성으로 지구 정지 궤도를 주행한다. 1977년 미국의 Delta 발사체에서 1호가 발사되었고 현재 GMS-5호까지 발사되어 운행 중인 상태에 있다. 1984년 3월에 올려진 3호와 1989년 12월의 4호는 그 기능과 센서가 동형이나 1994년 초에 발사된 GMS-5호는 지금까지 사용

해 온 1개의 VISSR(Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) 적외선 채널을 10.5-11.5 μm 와 11.5-12.5 μm 의 파장역의 spilt window 채널로 구분하였고, 6.4-7.0 μm 수증기 흡수대 파장역으로 세분화하여 관측하고 있다. 이 위성이 제공하는 구름 분포도 등 영상사진은 TV와 신문의 기상 예보 등 여러 분야에 이용된다. GMS는 VISSR에 의한 관측 외에도 해상의 부이, 항공기 등의 무인관측소에 설치된 DCP(Data Collection Platform) 장치로부터 관측 자료를 수집하는 역할도 한다. 또한 GMS 위성은 지진·해일 정보의 전달, 선박의 조난 신호를 수신해서 관계 기관에 전달하는 기능도 하고 있다.

표 3.1.2 GMS 위성의 역사 (Suzuki, 1997)

위 성	발사일	발사체
GMS-1	1977년 7월 14일	Delta Launch vehicle(U.S.A)
GMS-2	1981년 8월 11일	N-II Launch vehicle(다네가시마 우주센터)
GMS-3	1984년 8월 3일	N-II Launch vehicle(다네가시마 우주센터)

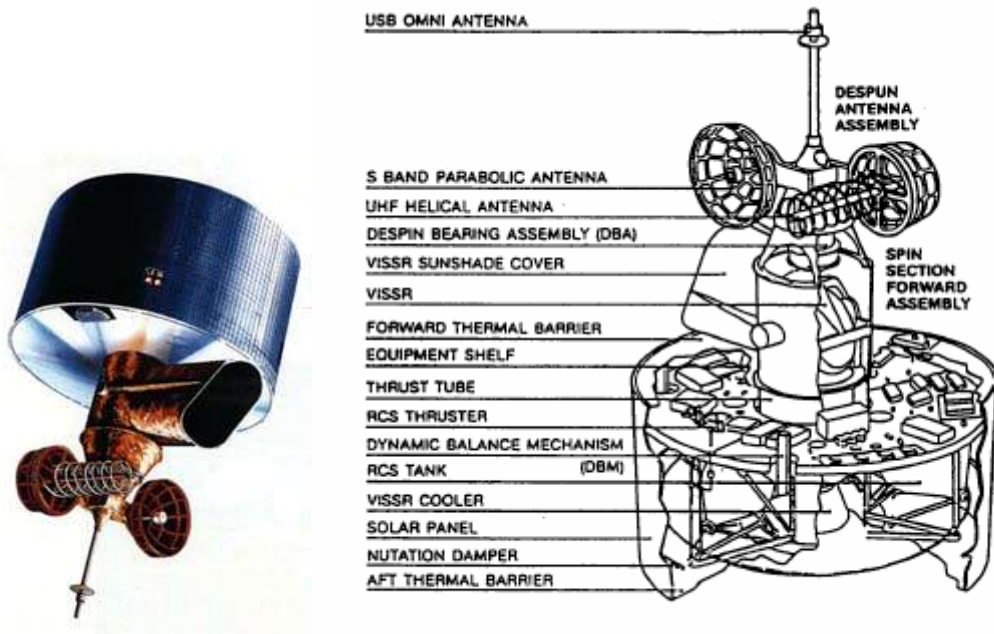


그림 3.1.3 GMS-5위성체 형상(Suzuki, 1997)

표 3.1.3 GMS위성의 주요 제원 (Suzuki, 1997)

	GMS-4	GMS-5
발사일	1989년 9월 6일	1994년
발사체	H-I	H-II
발사장소	다네가시마 우주센터	
무 게	725 kg(발사시) 325 kg(임무 시작)	747 kg(발사시) 344 kg(임무 시작)
임무기간	5년	
임무궤도	동경 : 140°, 적도상공 : 35800 km	
관측주기	적외 영상 (24회/일), 가시 영상 (약 10회/일)	
높 이	444.1 cm	

일본 기상청(JMA)은 1977년에 MSC(Meteorological Satellite Center)를 설립하고, 그 해 GMS-1 위성이 발사되었다. 1995년 6월 21일 발사된 GMS-5 위성을 사용하고 있고, 1999년 말부터 MTSAT을 사용할 예정이었으나 H-II 발사체의 발사실패로 GMS-5의 설계수명을 초과하여 현재까지 사용하고 있다. GMS의 주요 제원은 표 3.1.3과 같다.

지구로부터 GMS-5에 입사된 빛은 반사경과 프리즘에 의해 센서에 도달한다. 센서는 위성의 자전 방향에 평행하고, 그림 3.1.4과 같이 배치되어 있다. 가시 센서는 적외 센서의 1/4 크기로 4개가 모여 배치되어 있다. 적외 센서는 각도로 0.008°(=140 μ rad)의 범위를 볼 수 있다. 이것은 위성의 직하점에서 지구상의 사방 5km에 해당한다. 동서 방향의 관측에는 위성의 자전을 이용한다. 자전속도는 1분에 100회 회전한다.

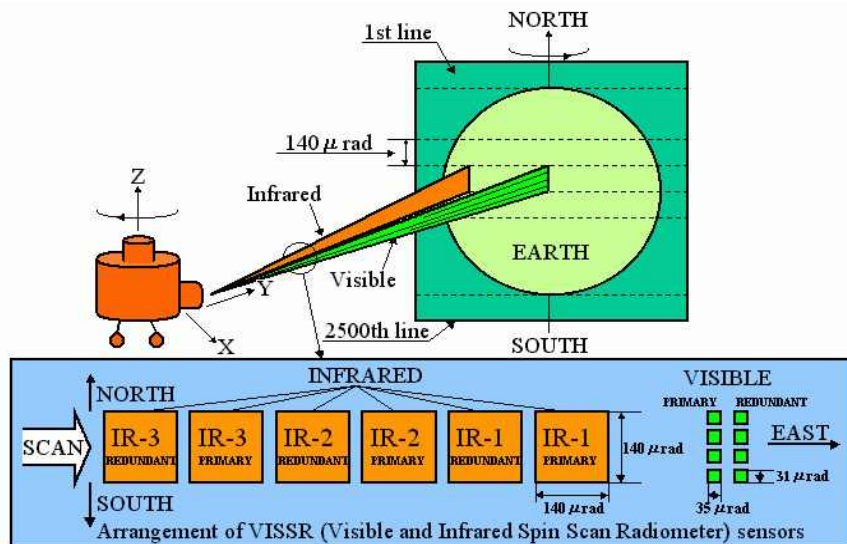


그림 3.1.4 GMS-5 위성센서의 구조 (Suzuki, 1997)

남북 방향의 관측은 반사경을 움직여, 북쪽에서 남쪽 방향으로 행해진다. 반사경은 위성이 1번 자전할 때에 센서의 시야각을 0.008°변화하도록 움직여진다. 위성에서 보아 지구는 20°남짓한 시야각을 가지기 때문에, 지구 전체를 관측하는데 위성이 2500번을 회전해야 하며 이에 소요되는 시간은 25분이 된다. 통상적인 관측은 매시 31분에 지구의 북쪽부터 시작된다. 따라서 위성이 한반도 부근을 관측하는 것은 매시 38분경이 된다.

예를 들면 03:00 UTC(12:00)의 영상에서는 02:31 UTC(11:31)부터 촬영이 시작되어 한반도는 02:38 UTC(11:38)경에 촬영된다. 즉 03:00 UTC의 영상이라고 해도 한반도 부근은 그 시각보다 20분 정도 빠른 시각의 영상에 해당한다. 지속 시간이 짧은 소규모 현상과 움직임이 빠른 요란에 대해서는 이러한 시간차에 주의하여 분석할 필요가 있다. 일상적인 관측모드는 30분 동안의 전구 관측 및 S-VISSR 자료 전송과 30분 동안의 WEFAX 자료 전송 등의 1시간 단위 모드로 되어 있으며 바람자료 추출을 위해 6시간 간격으로는 자료 전송대신에 기상 관측을 하도록 되어 있다.

그리고, 식(Eclipse) 시간 동안과 태양 간섭기간은 기상 관측을 중단 한다. 태풍 관측경우에는 전구관측 기간과 자료 전송기간 내에 태풍지역 바람예측을 위한 태풍지역 관측 운용이 삽입된다.

① GMS-5 위성 탑재 센서

GMS-5 의 VISSR은 가시 1종류, 적외 3종류로 모두 4종류의 센서로 이루어진다. 표 1.4에 각 센서의 특성을 나타내었다.

표 3.1.4 GMS 위성센서의 특징 (Suzuki, 1997)

센서명	파장대 (μm)	거리분해능 (km)	신호분해능 (bit)	관측대상
가시 (VIS)	0.55~0.75	1.25	6(64)	낮 기간에 구름, 설빙 등 지표면
적외1 (IR1)	10.5~11.5	5	8(256)	운정(Cloud Top), 해수면, 지표면 온도 측정
적외2 (IR2)	11.5~12.5	5	8(256)	해수면 온도, 화산재 감시
적외3 (IR3) 수증기(WV)	6.5~7.0	5	8(256)	대기 중의 상·중층 수증기

가시센서는 태양광의 반사광을 관측하는 것으로 구름 및 지표면 상태(눈과 얼음의 분포 등)의 파악에 이용된다. 적외 1과 적외 2 센서는 대기중의 수증기에 의한 흡수가 적은 파장대의 적외선을 관측하는 것으로, 구름의 온도와 해수면온도 관측에 사용된다. 또한 적외 1과 적외 2 센서의 관측 파장대에서는 수증기에 의한 흡수량이 약간 다르기 때문에, 이것을 이용해서 보다 정확한 해수면온도를 추정할 수 있고 대기 하층의 수증기 분포를 추정을 할 수 있다. GMS-4호까지는 적외 1과 적외 2의 파장대를 하나의 센서로 관측하였으나 GMS-5호에서는 이를 두 개의 센서로 구분하여 관측한다.

적외 1과 적외 2의 영상은 육안으로는 거의 차이를 느낄 수 없으며 수증기에 의한 복사에너지의 흡수가 작은 적외1 영상을 통상 적외 영상이라 부른다. 적외 3 센서는 수증기 센서(WV)라고도 불리며, 적외선 파장대 중에서 대기중의 수증기에 의한 흡수가 큰 파장대를 관측한다

수증기영상은 대류권 상·중층의 구름과 수증기 분포 파악에 이용할 수 있다. 가시센서의 거리 분해능은 적외 센서보다 좋고, 보다 정밀한 관측을 할 수 있다. 한반도 부근에서는 가시센서의 거리 분해능은 1.8km, 적외 센서는 7km이다. 관측자료의 디지털화도 가시자료와 적외 자료에서 각각 다르다. 가시자료에서는 6bit, 적외 자료에서는 8bit로 한다. 이는 이들 자료가 영상으로 표현되었을 때 영상에서 명암의 표현단계와 관련되며 가시영상에서는 64단계, 적외 영상에서는 256 단계로 구분할 수 있음을 의미한다.

(2) MTSAT 위성

일본은 1995년 발사된 GMS-5호 자세제어가 어렵게 되는 등 위성기상으로서 수명을 다하게 됨에 따라 후속 기상위성으로 MTSAT(multi-functional transport satellite)을 개발하기 시작한다. MTSAT은 일본 기상청(JMA)와 일본 항공국(JCAB) 주관으로 개발되었고, 기상위성 기능 이외도 항법에 활용하기 위한 기능이 탑재되어 있었다. 1999년 11월 15일 다네가시마 우주센터에서 MTSAT-1호를 발사했지만, 이륙 후 4분에 로켓의 주 엔진에 문제가 발생하였고, 제어할 수 없는 상태에 도달될 것을 우려하여 이륙 후 8분 만에 폭발시키므로 실패로 끝났다. MTSAT-1R은 2004년 1~2월경에 발사할 예정이고, MTSAT-2는 2004년 6월에 발사할 예정이다. 현재, 미국의 기상위성인 GOES-9이 GMS-5호를 대신해서 기상정보를 제공하고 있다. 그림 3.1.5 와 표 3.1.5는 MTSAT 위성체의 형상과 주요 제원을 정리하여 나타내었다.

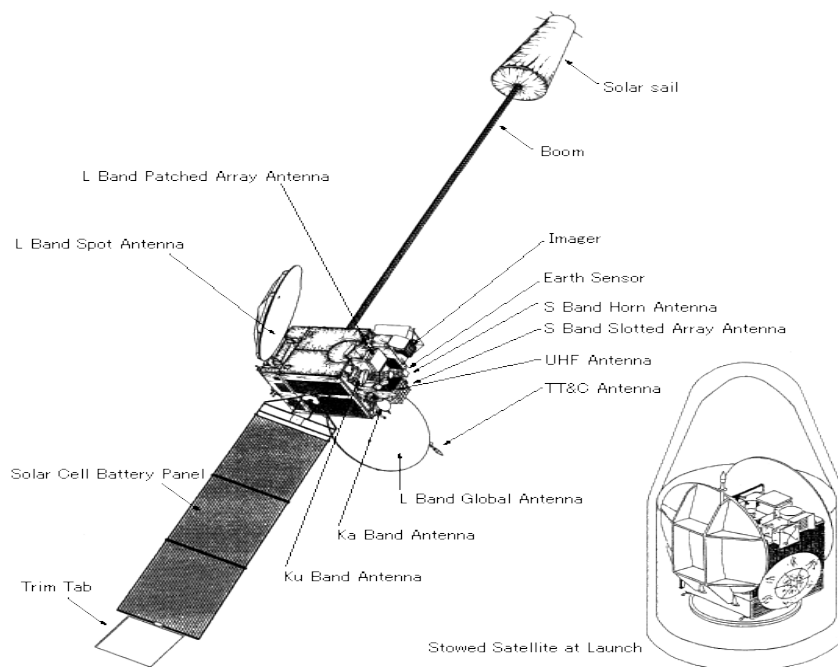


그림 3.1.5 MTSAT 위성체 형상 (Uekiyo, 2002)

표 3.1.5 MTSAT 위성의 주요 제원 (Uekiyo, 2002)

특 징	주요 제원
Owner / Sponsor	Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Japan)
임 무	기상관측, Air Traffic Control
제 조 사	Space Systems / Loral - FS-1300
Dry Mass	2900 kg (6392 lbm)
Dimensions, stowed	2.4 x 2.6 x 2.6 m (7.9 x 8.5 x 8.5 ft)
운용궤도	GSO , 140°E
수 명	10 년
전력 (EOL)	2.700 kW

(3) FY(FENG-YUN)-2 위성

FY 시리즈 위성에서 짝수 번호 위성은 정지궤도 위성을 의미한다. 중국은 1980년대 들어서 정지궤도의 기상위성 프로그램인 FY-2를 시작하였다. FY 시리즈는 5개의 위성으로 구성되었고 기능 및 제원이 거의 동일하다. 현재 FY-2A와 FY-2B가 발사되어 운용 중이고, 향후 FY-2C는 2004년, FY-2D는 2006년, FY-2E는 2009년에 발사될 예정이다. FY-2의 제원은 Huge사에 의해 만들어진 일본의 기상위성인 GMS-5와 유사하게 개발되었다. 따라서 탑재체의 특징 및 시스템 구조가 GMS와 흡사하다. 표 3.1.6은 FY-2 위성의 주요 제원을 보여준다.

표 3.1.6 FY-2 위성의 주요 제원 (Liu cheng, 2002)

	FY-2A	FY-2B
발사일	1997년 6월 10일	2000년 6월 25일
발사체	Long March-3 Launch Center	
발사장	Xi Chang Satellite Launching Center	
개발사	Shanghai Aerospace Technology Research Institute	
무 게	12000kg	
수 명	5년	
운용궤도	105°E	

(가) FY-2A, B 위성 탑재 센서

FY-2A와 B의 탑재 센서는 동일한 구조 및 특징을 갖고 있다. FY-2A, B의 주요 센서는 VISSR 이고, VISSR은 Visible, Infrared, Water Vapor 채널로 구성되어 있다.

전구 관측에 남북방향으로 2500 line Scan하여 30분의 관측 시간 소요(25분 : 전구 관측, 2.5분 : mirror 재위치, 2.5분 : VISSR 안정화)된다. 표 2.27는 VISSR의 채널 특징을 보여 준다.

향후, 발사될 FY-2C와 D의 탑재체는 Visible (0.55-0.9 μ m), IR 1 (3.5-4.0 μ m), IR 2 (6.3-7.6 μ m), IR 1 (10.3-11.3 μ m), IR 2 (11.5-12.5 μ m) 등 5개 채널로 기상을 관측하고, 식 기간 동안 위성 장비의 지속적인 운용을 위하여 위성 전력 시스템 개선을 위해 개발 중이다.

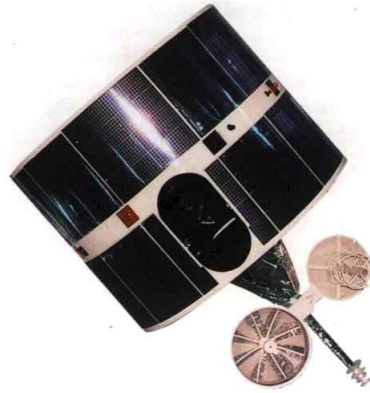


그림 3.1.6 FY(FENG-YUN)-2 위성 형상

표 3.1.7 VISSR의 채널 특징 (Liu cheng, 2002)

	Visible	Infrared	Water Vapor
관측과장	0.55-1.05 μ m	10.5-12.5 μ m	6.2-7.6 μ m
해 상 도	1.25 Km	5 Km	5 Km
FOV	35 microrad	140microrad	140microrad
Scan Line	2500_4	2500	2500
Detector	Si-photo-diode S/N=6.5	HgCdTe	HgCdTe
Noise	(albedo=2.5%)	NEDT=0.5-0.65k	NEDT=1k
Performance	S/N=43 (albedo=95%)	(300 K)	(300 K)
Quantification Scale	6 bits	8 bits	8 bits
Scan step angle	140microrad (N-S scanning)	-	-

3. 시간계와 좌표계

가. 시간계의 정의

현재 널리 사용되는 기준시는 크게 두 가지로 지구 자전에 의한 것과 원자 진동의 주파수(주로 세슘133원자)에 의한 것이 있다. 이 중 지구의 자전은 일정하지 않으며 그 회전률은 주기적으로 년당 2차의 장주기 변화를 나타낸다. 원자 진동에 의한 원자 기준시(Atomic standards)는 가장 정확한 근사방법으로 현재 년당 수 마이크로초 정도의 정확도로 표현된다. 1955년 원자시의 출현 이후, 주 기준시(primary standard)는 지구자전 이론에서부터 원자시 사용에 이르기까지 꾸준히 변화해 왔다. 원자시의 사용전, Uniform Time에 대한 가장 근접한 근사는 역표시(Ephemeris time, ET)였으며 이것은 지구 회전률 변화를 제거하는데 가장 효과적인 이론으로 1984년도까지 사용되었다. 몇몇의 중요한 시간척도(time scale)들은 여전히 지구자전이론을 따르며 대표적인 예가 항성시(sidereal)이다. 하지만 이 중 대부분은 현재의 지구 자전 이론과 실제 지구 자전의 측정을 결합한 원자시로부터 유도되고 있다(<http://www.geocites.com/thestarman3/tms/times.html>).

(1) 원자시 (Atomic times)

(가) 국제 원자시 (International Atomic Time,TAI)

오늘날 세계적으로 사용되는 주 표준시(Primary time standards)는 국제 원자시이다. 이것은 세계 각지 시계들의 입력 값을 합성한 것이며 각각은 환경적, 상대적 효과에 대해 보정되어 있다. 미 해군 천문대 (U.S. Naval Observatory)의 세슘 시계 앙상블(ensemble)과 같은 몇 개의 시계들에는 가중치(weight)를 부여하기도 한다. 국제 원자시는 상대성 항에서 지표면상의 중력 포텐셜과 관성 기준(inertial reference)에 대해 정의되기 때문에 지구 기반시(earth-based time)이며 SI(System Standard) 초(seconds)에 대한 표준이기도 하다. 국제 원자시의 영점(zero point)은 임의적으로 초기 원자시계에 의해 정의되었고 역표시(Ephemeris time)와의 오프셋(offset)은 1977.1.1 일에 대해 정확히 32.184 초로 정의된다.

(나) 협정 세계시 (Coordinate Universal Time, UTC)

협정 세계시는 전파지상국 WWV에서 발표하는 시간으로 모든 공공시계는 이것을 기준으로 한다. 협정 세계시는 국제 원자시를 통해 구해지며 단위는 원자초 (SI) 이다. 정의에 의하면 협정 세계시와 국제 원자시는 같은 변화율(rate)을 가지지만 협정 세계시는 윤초(leap seconds)라고 하는 정수 단위의 초를 더하여 평균 태양시에 보다 근접하다. 따라서 협정 세계시는 국제 원자시와 태양시 사이의 시간차를 조정하는데 이용된다. 협정 세계시는 국제 원자시의 초 단위까지 정확하며, 지구의 자전속도가 점점 느려짐에 따라 발생하는 불일치를 수정하기 위해 필요할 때마나 적당한 윤초를 더하여 UT1 의 0.7 초 이내로 정확성을 유지하게 한다. 윤초는 전형적으로 6월이나 12월의 마지막 날 일년에 한번 더 해주며 국제 원자시와 협정 세계시간의 offset은 정확하게 30초이다. (1996년 1월, 20:00:00 UTC = 20:00:30 TAI)

$$UTC = TAI - (\text{number of leap Seconds})$$

협정 세계시를 사용하기 전에 WWV 로부터 발표된 시간은 그리니치 평균시간 (Greenwich Mean time, GMT) 에 가까웠으며 그리니치 평균시간은 지구 자전 시간으로 지금은 UT1 간단하게 UT 라고 부르기도 한다.

(다) 지구 역학시 (Terrestrial Dynamic time, TDT or TT)

원자시의 사용 전, 역표시는 행성 운동 계산에 대한 Uniform Time의 가장 근접한 형태였다. 역학시(Dynamic Time)는 천체학에서 쓰이는 시간척도로 뉴턴의 운동법칙과 중력법칙에 따르는 천체의 궤도운동을 상대론으로 수정하면 역학적 시간의 함수로 나타낼 수 있다. 1925년 국제천문연맹(IAU)은 역표시라고 부르는 역학적 시간을 지구의 공전운동에 기초하여 정의했는데, 이는 1898년 미국의 천문학자 사이먼 뉴컴이 태양과 지구의 운동에 관한 비 상대론적 표로 발표한 것이다. 1984년 초 역표시를 국제 원자시와 32.184초의 옅셋값을 가지는 지구 역학시(Terrestrial Dynamic time)가 대신하게 되었다. 이 옅셋의 목적은 역표시와 지구 역학시 사이의 일정한 연속성을 유지하기 위함이었다. 행성의 운동은 현재 질량중심 역학시(Barycentric Dynamic Time, TDB)를 통해 계산된다. 이는 태양계 내의 중력 포텐셜에서 지구의 운동 때문에 생기는 상대적인 보정항을 고려하기 때문에 지구 역학시보다 더 일정한 시간이라고 할 수 있다.

$$TT = TAI + 32.184 = UTC + (\text{number of leap seconds}) + 32.184 \quad (3.1.1)$$

협정시(coordinate time)와 역학시(dynamic time) 사이에는 미묘한 상대적인 차이가 있지만 명확하지는 않다. 지구 역학시에 대응하는 시간은 지구중심 협정시(Geocentric Coordinate time, TCG)이다. 이것은 지구 역학시와 비교해 볼 때 변화율에서는 10억분의 0.7 정도 차이가 난다. 지구 역학시와 지구중심 협정시는 1977년 1월 1일 일치하였고 현재는 0.42 초 정도 차이가 난다. 지구 역학시부터 발생하는 이러한 변화율 차는 장기항 측정(long term measurement)에 매우 중요하다.

(라) 질량 중심 역학시 (Barycentric Dynamic Time, TDB)

질량 중심 역학시(Barycentric Dynamic Time, TDB)는 원점이 태양계 무게중심으로 이동함에 따라 생기는 상대적 보정항을 제외하고는 지구 역학시와 동일하다. 이 보정항은 1.6 밀리초(milliseconds)정도로 주기적이며 보정의 주요항은 1년 또는 반년의 주기를 가진다.

$$TDB = TT + 0.001658 \sin(g) + 0.000014 \sin(2g) \quad (3.1.2)$$

이때 $g = 357.53 + 0.9856003 (JD - 2451545.0)^\circ$ 이며 JD 는 Julian date 를 나타낸다. 현재 행성의 운동은 질량 중심 역학시를 이용하여 구한다.

협정시(Coordinate time)와 역학시(Dynamic time) 사이에는 상대적인 미묘한 차이가 있지

만 그 차이는 명확하지는 않다. 질량 중심 역학시에 대응하는 시간은 질량중심 협정시(Barycentric Coordinate time ,TCB)이다. 이것은 질량 중심 역학시와 비교해 볼때 10억분의 15.5 정도 차이가 난다. 질량 중심 역학시와 무게중심 협정시는 1977년 1월1일 동일하였으며 현재는 9.3 초 정도 차이가 난다. 질량 중심 역학시로부터 발생하는 이러한 변화율을 차는 장기항 측정 (long term measurement)에 매우 중요하다.

(2) 지구 자전시 (Earth Rotation Times)

세계시는 경도 0도인 자오선 상에서의 평균 태양시이며, 지구 자전을 기준으로 한 시간계이다. 세계시(UT) 0시는 한국 표준시(KST)로 9시이다. 보통 단순히 UT 라고 부르며 10분의 수초의 정밀도를 필요로 하는 경우에는 UT를 UT0, UT1, UT2 의 3종류로 구별하여 지정하는 것이 필요하다. UT0는 직접 천문관측으로 얻어진 평균 태양시이고, UT1은 지구의 자전축(극변화)과 관계가 있는 지구의 미세한 움직임의 효과에 대해 보정한 UT0이다. UT2는 지구 자전속도의 계절적 작은 변동 효과에 대해 보정한 UT1이다.

(가) 세계시 (Universal Time, UT1)

세계시(Universal time, UT1)는 관측장소에 독립적인 실제 지구 자전의 측정으로 결정되며 필연적으로는 그리니치 평균시간(GMT)과 같다. UT1은 그리니치 자오선에 대한 관측자의 경도와 극운동 때문에 발생하는 관측자의 경도상 작은 이동이 보정된 평균 태양시이다. 지구의 자전이 일정하지 않기 때문에 UT1 의 변화율은 상수가 아니며 원자시와의 윗값이 일정하게 변하고 있다. 하지만 이 값을 완벽히 예측할 수는 없다. 1995년 12월 UT1은 국제 원자시에 대해 일 년에 0.8 초 정도 drift 되었다. UTC 는 UT1과의 차를 0.7 초 이내로 유지하기 위해 윤초(leap seconds)를 더한다. 따라서 UT1 과 협정 세계시의 차이는 결코 이 값보다 커질 수 없으며 DUT1=UT1-UTC 값은 국제 지구 자전국(International Earth Rotation Service, IERS)을 통해 모니터 되고 IERS 게시판을 통해 공식 발표된다.

$$UT1 = UTC + DUT1 \tag{3.1.3}$$

UTC 에 윤초가 더해지거나 감해질 때 DUT1 값에는 1초정도 불연속이 발생한다. UT1 은 연속적이고 UTC 는 윤초에 의해 증가 또는 감소되어 UT1 과 0.7 초 이내의 정확도를 유지하게 된다.

(나) UT0

UT0 (UT-zero) 는 UT1 의 Observatory-specific version으로 관측된 지구 자전상의 극 운동 효과를 포함하고 있다. 즉 직접적인 관측을 통해 얻어진 평균 태양시이다. 극 운동은 지구의 순간적인 자전 축에 대한 지표면상의 위도, 경도의 변화와 같다. UT1 은 현재 관측소 앙상블로부터의 관측을 통해 결정되며 점점 사용이 줄어들고 있는 추세이다. UT1로부터 UT0로의 변환은 아래와 같다.

$$UT0 = UT1 + \tan(\phi) \times (x \sin(\lambda) + y \cos(\lambda)) \quad (3.1.4)$$

이 때 x, y 는 IERS 게시판에서 공식 발표하는 극 오프셋(offset) 값이며 ϕ, λ 는 각각 관측소의 위도, 경도로 표현된 지상국 좌표이다.

(다) UT2

UT2는 UT1에 지구 자전속도의 계절별 변동에 대한 효과를 수정한 시간으로 식 (3.1.5)과 같이 표현된다.

$$UT2 = UT1 + 0.022 \sin(2\pi t) - 0.012 \cos(2\pi t) - 0.006 \sin(4\pi t) + 0.007 \cos(4\pi t) \quad (3.1.5)$$

이때 t 는 다음과 같이 표현되며, MJD는 Modified Julian Date로 (Julian date -2400000.5)이다.

$$t = 2000.0 + \frac{(MJD - 51544.03)}{365.2422} \quad (3.1.6)$$

(라) 그리니치 평균 항성시 (Greenwich Mean Sidereal Time, GMST)

항성시(Sidereal time)는 멀리 떨어져 있는 천체(별)에 대한 지구 자전 측정과 관계있다. UT1은 태양의 평균 위치에 대한 지구의 자전을 고려한 것으로 항성초는 UT1 1초의 약 365.25/366.25 정도이다. 다른 말로 하면 태양년 보다 항성년에 하루가 더 있다고 생각하면 된다. 협약에 의해 그리니치 항성시에 대한 기준점은 그리니치 자오선과 춘분점(지구 적도면과 황도면의 교차점)이다. 그리니치 항성일은 춘분점이 그리니치 자오선 상에 있을 때 시작되며 그리니치 평균 항성시(GMST)는 춘분점 평균 위치의 시간각이다 (장동 때문에 생기는 춘분점의 단주기 운동을 무시한다). IAU 협약에 의해 GMST는 아래의 식을 통해 계산된다.

$$GMST = 24110.54841 + 8640184.812866 T + 0.093104 T^2 + 0.0000062 T^3 \quad (3.1.7)$$

이 때 T 는 UT1 기준 2000년 1월 1일 12시부터의 Julian centuries로 아래식과 같이 계산된다.

$$T = \frac{JD - 2451545.0}{36525} \quad (3.1.8)$$

태양시인 UT1이 먼 거리의 천체에 대한 지구 자전 측정을 통해 구해지며, 항성시인 GMST가 그것을 통해 유도된다는 것이 이상하게 보일지도 모른다. 하지만 이는 원자시

초를 결정함에 있어 우리들의 태양시 선택에 따른 것이다. 따라서 지구 자전의 작은 변수는 (UT1-Atomic time) 으로 좀 더 쉽게 publish 된다.

(마) 그리니치 겉보기 항성시 (Greenwich Apparent Sidereal Time, GAST)

그리니치 겉보기 항성시(Greenwich Apparent Sidereal Time)는 장동에 대한 춘분점의 위치 변화를 보정한 그리니치 평균 태양시(Greenwich Mean Sidereal Time)이다. 장동은 수학적으로 태양, 달, 다른 행성으로부터 발생하는 외부 토크의 변화 때문에 발생하는 지구 회전축 방향의 변화를 나타내며 예측 가능하다. 세차 운동에 대한 부분은 이미 GMST에서 고려되었다. 장동의 적경에 대한 요소는 분점방정식(equation of the equinoxes)이라고 불리운다.

$$GAST = GMST + (Equation\ of\ the\ equinoxes) \quad (3.1.9)$$

(바) 평균 지방항성시 (Local Mean Sidereal Time, LMST)

평균 지방항성시 (Local Mean sidereal Time)는 GMST에 그리니치의 동쪽방향으로 측정 한 관측자의 경도를 더한 것으로 주로 관측소의 항성시계에 표시된다.

$$LMST = GMST + (Observer's\ east\ longitude) \quad (3.1.10)$$

(사) 지방 항성시(Local Sidereal Time, LST)

지방 항성시(Local sidereal Time)의 정의는 Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac 에 “ the local hour angle of a catalog equinox ” 로 명시되어 있다.

$$Hour\ Angle = LST - Right\ Ascension \quad (3.1.11)$$

나. 좌표계의 정의

정지궤도 해양위성의 태양광반사 위치 예측 기술은 다양한 좌표계의 변환을 통해서 이루어지는데 일반적으로 지구를 중심으로 표현되는 관성 혹은 고정 좌표계가 사용된다.

(1) 좌표계의 정의

공간상의 물체의 운동을 기술할 때는 구면, 원통, 직교 좌표계 중 편리한 것을 쓰는데 인공위성의 운동을 다룰 때는 우수계 직교 좌표계를 많이 쓴다.

그런데 이 좌표계는 절대적으로 고정된 것이 아니라 기준을 어떻게 잡는가에 따라 다양하게 분류할 수 있다. 그 기준으로는 기준 평면과 기준 원점을 쓴다. 기준 평면으로는 황도면, 천구 적도면, 인공위성의 궤도면 등을 사용하고, 기준 원점으로는 태양 중심, 지구 중심, 비행체 중심과 같은 것을 사용한다. 특히 인공위성의 궤도를 기술하는 데는 천구의 적도면과 지구 중심을 기준으로 하는 지구중심-적도좌표계를 많이 쓰며 자세를 다룰 때는 비행체 중심 좌표계를 주로 쓴다. 지구 중심-적도좌표계는 크게 두 가지 형태로

구분할 수 있는데 하나는 지구 중심관성(Earth-Centered Inertia, ECI) 좌표계이고, 또 다른 하나는 지구 중심고정(Earth-Centered Fixed, ECF) 좌표계이다.

(가) 지구중심관성(Earth-Centered Inertia) 좌표계

ECI 좌표계는 X축이 춘분점 방향, Z축이 지구 자전축 방향을 가리키도록 정의된 좌표계이다. 그러나 춘분점이나 자전축이 달과 태양 그리고 그 밖의 행성들의 영향을 받아 발생하는 세차와 장동에 의해 조금씩 움직이기 때문에 엄밀히 말해서는 관성계가 아니다. 세차는 지구의 적도 부분이 불룩하게 튀어나와서 태양과 달의 차등 중력에 의해 황도 극을 중심으로 지구의 자전축이 26000년을 주기로 23.5도를 유지하면서 원 운동하는 것을 말한다. 이것으로 인해 천구의 적도 평면이 서쪽으로 조금씩 움직이게 된다. 행성에 의한 세차 운동은 황도면을 조금씩 동쪽으로 이동하게 하는데 이러한 세차의 영향으로 춘분점과 지구의 자전축이 시간에 따라 움직이게 되는 것이다. 장동은 달에 의한 영향으로 춘분점과 지구의 자전축이 시간에 따라 움직이게 되는 것이다.

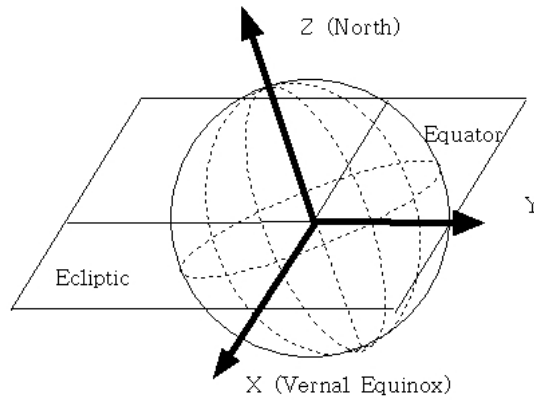


그림 3.1.7 ECI 좌표계

표 3.1.8 표준 좌표계의 정의 (최규홍, 1997)

좌표계	기준시각	X축	Z축
True of Date	Orbit Epoch	실제춘분점	실제지구자전축
True of Epoch	Coordinate Epoch	실제춘분점	실제지구자전축
Mean of Date	Orbit Epoch	평균춘분점	평균지구자전축
Mean of Epoch	Coordinate Epoch	평균춘분점	평균지구자전축
J2000	1 Jan 2000 12:00:00.00	평균춘분점	평균지구자전축
B1950	31 Dec 1949 22:09:07.2	평균춘분점	평균지구자전축
ECF	-	경도 0도	실제지구자전축

장동은 달에 의한 영향으로 지구의 실제 자전축이 평균 자전축 주위를 18.6년을 주기로 약 9초의 각의 유지하면서 다소 불규칙하게 움직이는 것이다. 하지만 인공위성의 운동을 기술하는데 필요한 모든 힘들은 바로 ECI 좌표계에서 계산을 해야만 한다. ECI 좌표계에는 예닐곱 가지 좌표계가 있는데 첫째, True of Date(TOD) 좌표계가 있다. X축은 인공위성의 상태 벡터를 정의하는 시각에서의 실제 춘분점 방향, Z축은 그 시각에서의 실제 자전축 방향으로 정의되며 여기서 실제라는 것은 세차와 장동의 효과를 보정했다는 것을 의미한다.

다음으로 True of Epoch(TOE) 좌표계가 있는데 이것은 TOD에 비해 사용자가 정의한 좌표계 기산일에서의 실제 춘분점과 자전축의 방향을 각각 X축, Z축으로 사용한다. 그리고 Mean of Date(MOD), Mean of Epoch(MOE) 좌표계가 있다. 이들은 평균 춘분점과 평균 자전축의 방향을 사용하며 여기서 평균이 의미하는 것은 세차에 의한 효과만을 보정했다는 것이다. 그리고 J2000 좌표계가 있다. 이것은 X축이 2000년 1월 1일 12:00:00.00(TDB)에서의 평균 춘분점을 향하고 Z축이 그 때의 평균 자전축을 향하는 좌표계이다.

또한 B1950 좌표계가 있다. Besselian year 1950년 1월 1일 00:00:00.00(1949년 12월 31일 22:09:07.2)에서의 평균 춘분점 방향을 X축으로 하고 그 때의 평균 자전축의 방향을 Z축으로 하는 좌표계이다. 인공위성의 궤도와 관련해서는 J2000 좌표계, B1950 좌표계가 많이 쓰이며 특히 TOD 좌표계가 많이 쓰인다.

(나) 지구중심고정(Earth-Centered Fixed) 좌표계

ECF 좌표계는 X축을 그리니치 자오선 방향으로 하고 Z축을 실제의 지구 자전축 방향으로 하는 좌표계로 ECI 좌표계와 달리 지구에 고정되어 지구가 자전함에 따라 같이 회전하는 좌표계이다. 따라서 이 좌표계는 지상에서 인공위성의 위치를 나타내는데 편리하다.

4. 태양광반사 위치예측

정지궤도위성(Geo-stationary Satellite)은 지구 표면에서 볼 때 정지되어있는 것으로 보인다. 하지만, 실제로 인공위성은 비대칭 중력장과 달과 태양의 섭동을 받아 그 궤도가 시간에 따라 조금씩 변한다. 그래서 정지궤도위성은 항상 0.1° 의 오차 내에 위치하도록 궤도조정을 통해서 그 위치를 유지한다. 그러나 본 보고서의 알고리즘에서는 이러한 0.1° 오차는 태양광반사가 발생하는데 큰 요인으로 작용하지 않기 때문에 이를 무시하였다.

정지궤도위성에 대한 입력 값으로 태양광반사를 예측하고자 하는 날짜와 시간 그리고 위성의 궤도 정보를 이용하였다. 통신해양기상위성의 경우 경도 116.2°E 혹은 128.2°E 에 위치 할 예정이기 때문에, 위성직하점은 적도좌표계상의 위도 $0^\circ(\text{N-S})$, 경도 116.2°E 또는 128.2°E 로 고정하여 태양광반사 영역의 위치를 계산하였다. 이번 장에서는 정지궤도위성의 태양광반사 영역의 위치를 계산하기 위한 몇 가지 가정과 조건, 계산에 필요한 이론 그리고 자세한 알고리즘 구현 방법에 대해 알아보도록 한다.

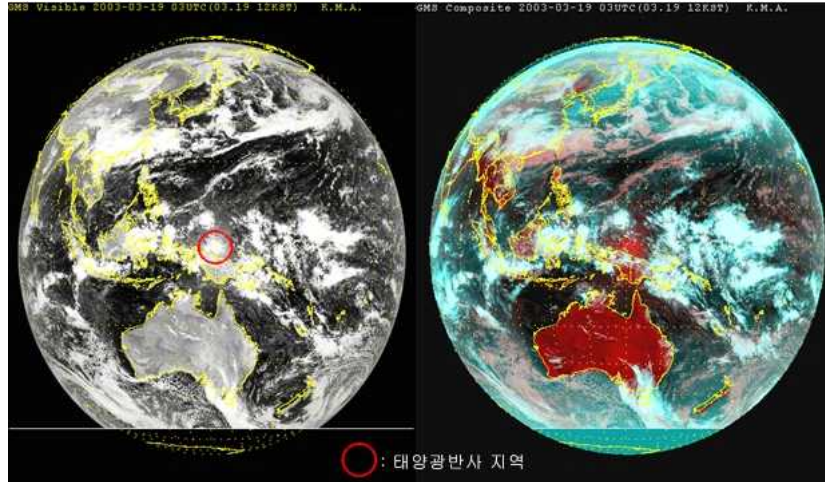


그림 3.1.8 GMS-5 기상위성이 찍은 전 지구 모습, 붉은 원안이 태양광반사 (이희훈, 2003)

가. 가정 Model

정지궤도위성에서 태양광반사 영역의 위치 계산은 몇 가지 가정을 통한 Model로부터 계산되었다. 첫 번째 가정은, 해수면은 평평하다는 가정이다. 일반적인 환경 하에 해수면은 평평할 수 없지만, 태양광반사 효과가 발생하는 지역에서는 일반적인 환경보다는 해수면이 평평하여 작은 거울과 같은 반사의 성질을 가지기 때문이다. 두 번째 가정은, 대기에 의한 효과는 무시했다는 가정이다. 대기 중에는 태양으로부터 입사하는 빛을 반사하거나 흡수하는 영향을 가지는 요인들이 많이 존재한다. 이러한 요인들을 다 고려하게 된다면 복잡한 계산이 필요로 하기 때문에 계산의 단순화를 위해 무시할 수 있다는 가정을 하였다. 세 번째 가정은, 태양광반사가 발생하는 영역에서 일반적인 반사의 법칙을 만족한다는 가정이다. 정리해보면,

- 해수면은 평평하다.
- 대기에 의한 효과는 무시한다.
- 반사의 법칙을 만족한다.

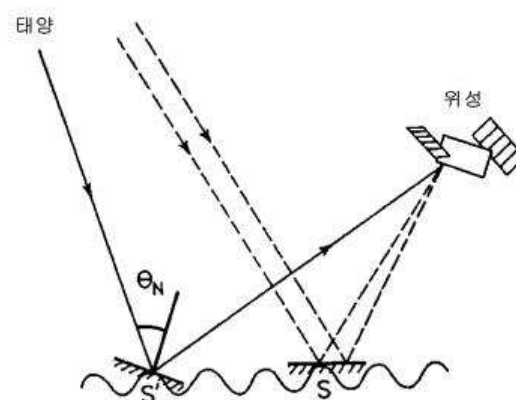


그림 3.1.9 태양광반사점 형상도

그리고 태양-지구-인공위성 사이의 기하학과 반사의 법칙을 고려하여 태양광반사 영역 $G(\phi, \lambda)$ 에서 다음의 가정 조건을 만족한다.

- 세 단위 벡터 $\overline{GO}, \overline{GN}, \overline{GS}$ 은 같은 평면에 존재한다. 여기서 \overline{GO} 는 인공위성과 태양 광반사 영역을 연결해준 벡터이고, \overline{GN} 은 반사평면의 법선 벡터, \overline{GS} 는 태양과 태양광 반사 영역을 연결해준 벡터이다. 여기서 태양의 방위각과 인공위성의 방위각의 차는 180° 떨어져 있다는 조건이 포함된다.
- 태양의 고도각은 인공위성의 고도각과 같다.

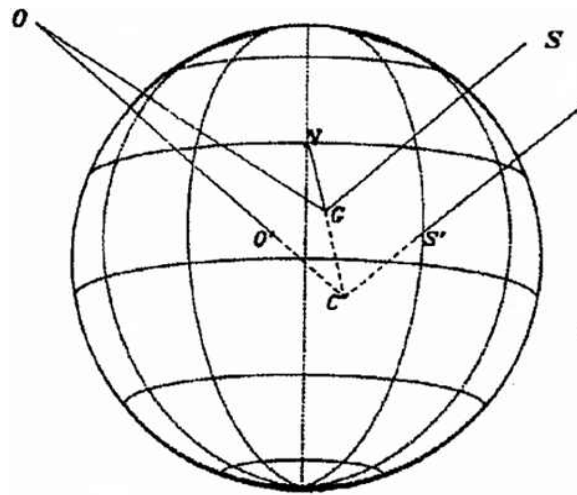


그림 3.1.10 태양광반사의 기하학적 형상 (Prakash, 1994)

나. 태양광반사 영역 위치예측 구현 방법

(1) 태양의 위치 계산

태양의 위치를 시간의 함수로 구하는 프로그램은 그 정확도에 따라 매우 다양하다. 본문에서는 천체력(Astronomical Almanac)의 알고리즘을 이용하여 그레고리안일을 입력하여 줄리안일로 변환한 뒤 그 값을 입력 값으로 하여 지구중심관성좌표계(ECI)에서의 위치 $(x_{sun}, y_{sun}, z_{sun})_{ECI}$ 을 구하였다. Astronomical Almanac의 식은 1950년에서 2050년까지 태양의 위치는 0.01° 의 오차를 가지고 있다.

아래의 식에서 n 은 기산점을 JD2000.0으로 하여 계산된 날수이다(Meeus, 1998).

$$\begin{aligned}
n &= JD - 2451545.0 \\
L &= 280^\circ .472 + 0^\circ .9856474n \\
g &= 357^\circ .528 + 0^\circ .9856003n \\
\varepsilon &= 23^\circ .439 - 0^\circ .0000004n \\
R &= 1.00014 - 0.01671 \cos g - 0.00014 \cos 2g
\end{aligned} \tag{3.1.12}$$

여기서 L은 태양의 평균 경도, g는 평균 근점각, ε 은 황도경사, R은 지구와 태양사이의 거리(AU)를 나타낸다. 그러므로 ECI 좌표계에서의 태양의 위치는,

$$(x_{sun}, y_{sun}, z_{sun})_{ECI} = (R \cos \lambda, R \cos \varepsilon \sin \lambda, R \sin \varepsilon \sin \lambda) \tag{3.1.13}$$

이고, 위 식의 단위는 AU이므로 km 단위로 변환하기 위해서는 $1AU = 1.49598 \times 10^8 km$ 을 이용한다.

$$\begin{aligned}
\alpha_{sun} &= \tan^{-1} \left(\frac{y_{sun}}{x_{sun}} \right) \\
\delta_{sun} &= \tan^{-1} \left(\frac{z_{sun}}{\sqrt{x_{sun}^2 + y_{sun}^2}} \right)
\end{aligned} \tag{3.1.14}$$

위의 식을 이용하여 ECI 좌표계에서 태양의 위치로부터 태양의 적경(α)과 적위(δ)값을 구할 수 있다.

(2) 정지궤도위성의 직하점 계산

인공위성의 위치를 표현하는 방법은 무척 다양하다. 지구중심관성좌표계(ECI)에서의 인공위성의 위치는 인공위성의 운동을 수학적으로 표현하기에 적합하고, 지구중심고정좌표계(ECF)에서의 인공위성의 위치는 자전을 하고 있는 지구상의 위치를 나타내기 때문에 지표면 상의 위성의 위치와 운동을 표현하기에 적합하다. 궤도 6요소로도 인공위성의 위치는 표현한 경우는 인공위성의 궤도의 기하학적인 특성을 나타내기에 적합하다. 또, 수평좌표계(Topocentric Coordinate)는 위성의 위치를 지표면 상의 관측점을 중심으로 해서 나타낸 좌표계로, 이 경우 위성의 위치는 방위각(Azimuth, Az), 고도(Elevation, El), 그리고 거리(Range, ρ)로 표현되어 위성을 추적하기에 적합한 좌표계이다. 이들 각 좌표계는 모두 상호 변환이 가능하므로 필요에 따라 적합한 좌표계를 선택하여 위성의 위치는 표현하여 이용한다. 이를 통해 인공위성의 매 순간 지구 표면상에서의 위치인 위성직하점(SubSatellite Point)을 위도와 경도로 표현할 수 있다. 단 본문에서는 수평좌표계에서의 인공위성의 위치 중 두 가지 요소 즉 방위각과 고도만의 정보가 주어졌을 경우이기 때문에, 지구중심고정좌표계로 변화하기위해 거리정보를 간접적인 방법으로 구하였다. 하나는 관측 대상 위성이 정지궤도의 위성이라는 점을 이용하여 관측점부터 위성까지의 거리를 구

할 수 있고, 또 하나는 대상위성의 TLE 궤도요소를 알고 있는 경우 TLE를 통해 거리를 구할 수 있다.

(가) 관측점과 위성사이의 거리 계산

① TLE를 알고 있는 경우

TLE의 정보는 MSGP4 프로그램을 통해 임의의 시간에 위성의 위치를 지구중심관성좌표계에서의 위성의 위치 $[x_{SAT} \ y_{SAT} \ z_{SAT}]_{ECI}^T$ 와 속도를 얻을 수 있다. 이는 GMST를 통해 지구중심고정좌표계로 변환 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_{SAT} \\ y_{SAT} \\ z_{SAT} \end{bmatrix}_{ECF} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{SAT} \\ y_{SAT} \\ z_{SAT} \end{bmatrix}_{ECI} \quad (3.1.15)$$

이 때 지표면상의 관측점의 위치가 위도(ϕ), 경도(λ), 고도(h)인 경우 지구중심고정좌표계에서의 관측점 $[x_{STA} \ y_{STA} \ z_{STA}]_{ECF}^T$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} x_{STA} \\ y_{STA} \\ z_{STA} \end{bmatrix}_{ECF} = \begin{bmatrix} (d+h)\cos\phi\cos\lambda \\ (d+h)\cos\phi\sin\lambda \\ (d+h-f*d)\sin\phi \end{bmatrix} \quad (3.1.16)$$

여기서,

$$f = 6.694384999587980 \times 10^{-3}$$

$$d = \frac{R_e}{\sqrt{1-f\sin^2\phi}}$$

$$R_e = 6378.137km$$

그러므로, 관측점과 위성과의 거리(ρ) 는 다음과 같이 계산된다.

$$\rho = \sqrt{(x_{SAT} - x_{STA})^2 + (y_{SAT} - y_{STA})^2 + (z_{SAT} - z_{STA})^2} \quad (3.1.17)$$

② TLE 가 없는 경우

대상 위성의 TLE의 정보가 없는 경우는 대상위성이 정지궤도로 고도가 $35786km$ 인 점을 가정하여 아래의 식과 같은 방정식을 유도하여 거리를 계산한다. 정지궤도라는 가정은 위성의 장반경과 이심율을 고정한 것으로 실제의 정지궤도 위성은 그 장반경과 이심율이 약간씩 변하기 때문에 위의 가정을 통해 구한 관측점과 위성과의 거리에 오차가 발생하게 된다. 하지만 정지궤도의 경우 장반경과 이심율의 변화율이 작기 때문에 위의 가정으로 인한 거리오차는 약 $10-20km$ 정도이다.

관측점과 위성과의 거리를 ρ 라고 했을 때, 수평좌표계에서의 위성의 좌표는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} x_{SAT} \\ y_{SAT} \\ z_{SAT} \end{bmatrix}_{TOP} = \rho \begin{bmatrix} \cos El \cos(\pi - Az) \\ \cos El \sin(\pi - Az) \\ \sin El \end{bmatrix} \quad (3.1.18)$$

이를 다시 지구중심고정좌표계로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_{SAT} \\ y_{SAT} \\ z_{SAT} \end{bmatrix}_{ECF} = \begin{bmatrix} \cos \lambda \sin \phi & -\sin \lambda & \cos \lambda \cos \phi \\ \sin \lambda \sin \phi & \cos \lambda & \sin \lambda \cos \phi \\ -\cos \phi & 0 & \sin \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{SAT} \\ y_{SAT} \\ z_{SAT} \end{bmatrix}_{TOP} + \begin{bmatrix} x_{STA} \\ y_{STA} \\ z_{STA} \end{bmatrix}_{ECF} \quad (3.1.19)$$

지구중심고정좌표계의 위성의 고도가 $35786km$ 라 가정하였으므로 다음과 같은 식이 성립한다. 이후로의 식에서 좌표는 특별한 언급이 없는 한 지구중심고정좌표계를 의미한다.

$$\begin{aligned} (x_{SAT}^2 + y_{SAT}^2 + z_{SAT}^2) &= (\rho x_{imp} + x_{STA})^2 + (\rho y_{imp} + y_{STA})^2 + (\rho z_{imp} + z_{STA})^2 \\ &= (R_e + 35786km)^2 \end{aligned} \quad (3.1.20)$$

여기서 $x_{imp}, y_{imp}, z_{imp}$ 는 수평좌표계에서의 위성의 위치가 단위 벡터인 경우에 해당하는 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} x_{imp} \\ y_{imp} \\ z_{imp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \lambda \sin \phi & -\sin \lambda & \cos \lambda \cos \phi \\ \sin \lambda \sin \phi & \cos \lambda & \sin \lambda \cos \phi \\ -\cos \phi & 0 & \sin \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{SAT} \\ \hat{y}_{SAT} \\ \hat{z}_{SAT} \end{bmatrix}_{TOP} \quad (3.1.21)$$

위의 식은 ρ 에 대한 2차방정식이므로 그 해를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho = \frac{-B + \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (3.1.22)$$

여기서, A,B,C 는 다음과 같이 정의된다.

$$A = x_{imp}^2 + y_{imp}^2 + z_{imp}^2$$

$$B = x_{imp}x_{STA} + y_{imp}y_{STA} + z_{imp}z_{STA}$$

$$C = x_{STA}^2 + y_{STA}^2 + z_{STA}^2 - (R_e + 35786km)^2$$

(나) 지구중심고정좌표계에서의 위성의 위치 계산

앞에서 구한 관측점과 위성과의 거리와 관측을 통해 얻어진 방위각과 고도를 통해 수평좌표계에서의 위성의 위치를 계산할 수 있고, 이 값은 지구중심고정좌표계로 위성의 위치를 표현할 수 있다. 위성직하점의 위도(λ_{SAT})와 경도(ϕ_{SAT})는 위에서 구한 지구중심고정좌표계에서의 위치를 통해 다음과 같이 계산된다.

$$\lambda_{SAT} = \tan^{-1} \frac{y_{SAT}}{x_{SAT}} \quad (3.1.23)$$

$$\phi_{SAT} = \sin^{-1} \frac{z_{SAT}}{r_{SAT}} \quad (3.1.24)$$

여기서, r_{SAT} 는 $\sqrt{(x_{SAT}^2 + y_{SAT}^2 + z_{SAT}^2)}$ 을 나타낸다.

(3) 태양광반사점의 계산

태양광반사 중심점을 계산하기 위해서는 가정 조건으로부터 얻은 비선형 방정식의 해 $G(\phi, \lambda)$ 를 계산해야 한다. 여기서 ϕ 와 λ 는 태양광반사 중심점의 위도와 경도를 의미한다.

두 조건 ①, ②를 방정식의 형태로 표현하면,

$$El_{sat} - El_{sun} = 0 \quad (3.1.25)$$

$$|AZ_{sat} - AZ_{sun}| = 180^\circ \quad (3.1.26)$$

여기서, El_{sun}, El_{sat} 은 태양광반사 중심점 G에서 바라본 태양과 인공위성의 고도각을 의미하며, AZ_{sun}, AZ_{sat} 은 방위각과 고도각을 의미한다.

태양과 인공위성의 고도각과 방위각은 구면삼각법의 Cosine, Sine법칙을 이용하여 유도하였다. 태양의 고도각 El_{sun} 은 그림 1.11의 기하도로부터 구면 Cosine 법칙을 통해 계산할 수 있다(Smart, 1962),

태양의 고도각 El_{sun} 은,

$$\begin{aligned} \cos(90^\circ - El_{sun}) &= \cos(90^\circ - \phi) \cos(90^\circ - \delta) \\ &+ \sin(90^\circ - \phi) \sin(90^\circ - \delta) \cos(H.A) \end{aligned} \quad (3.1.27)$$

이므로,

$$\sin(El_{sun}) = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos(H.A) \quad (3.1.28)$$

이다.

태양의 방위각은 구면삼각법의 '4-part formulae' 공식으로부터(Smart, 1962)

$$\begin{aligned} \cos(90^\circ - \phi) \cos(H.A) &= \sin(90^\circ - \phi) \cot(90^\circ - \delta) \\ &- \sin(H.A) \cot(180^\circ - AZ_{sun}) \end{aligned} \quad (3.1.29)$$

이다. 정리하면,

$$\tan(AZ_{sun}) = \frac{\cos \delta \sin(H.A)}{\sin \phi \cos \delta \cos(H.A) - \cos \phi \sin \delta} \quad (3.1.30)$$

이다. 여기서 δ 는 태양의 적경을 의미하고, H.A는 시간각, ϕ 는 태양광반사영역의 위도이다.

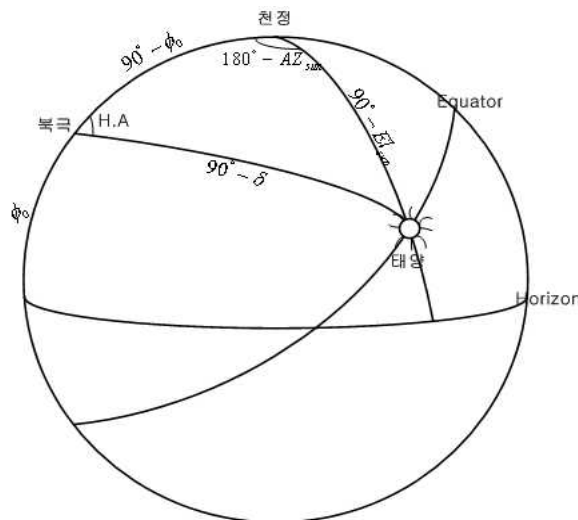


그림 3.1.11 태양의 고도각과 방위각을 유도하기 위한 기하도

인공위성의 고도각 El_{sat} 은, 그림 3.1.12와 같이 지구중심에서 인공위성까지의 거리 $(R+H)$ 를 알고 있으므로, 평면에서의 Sine, Cosine 법칙으로부터 유도할 수 있다.

평면 Cosine 법칙으로부터,

$$\cos \gamma = \sin \phi \sin \phi_s + \cos \phi \cos \phi_s \cos(\lambda - \lambda_s) \quad (3.1.31)$$

이므로,

$$\sin(El_{sat}) = \frac{(R+H) \cos \gamma - R}{d} \quad (3.1.32)$$

된다. 여기서, 위성에서부터 태양광반사점까지의 거리 d 는 $d = \sqrt{H^2 + 2R(R+H)(1 - \cos \gamma)}$ 로 나타낼 수 있다.

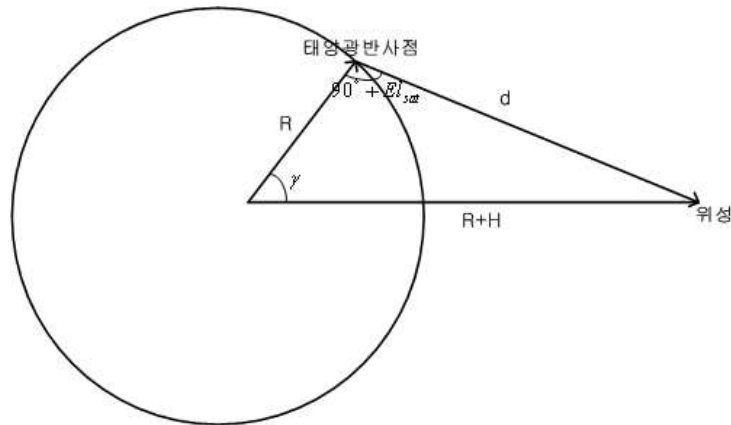


그림 3.1.12 인공위성의 고도각을 계산하기 위한 기하도

식 (3.1.31)을 식(3.1.32)에 대입하여 정리하면,

$$\sin(El_{sat}) = \frac{(R+H) \cos(\phi - \phi_s) \cos(\lambda - \lambda_s) - R}{\sqrt{H^2 + 2R(R+H)(1 - \cos(\phi - \phi_s) \cos(\lambda - \lambda_s))}} \quad (3.1.33)$$

이다. 여기서, 정지궤도위성의 경우 직하점의 위도 변화가 $\phi_s \leq 0.1^\circ$ 이므로 $\sin \phi_s \approx 0$ 이 되어 제거가 된다.

인공위성의 방위각 AZ_{sat} 은 Sine, Cosine 법칙으로부터,

$$\sin(\lambda - \lambda_s) \cot(\pi - AZ_{sat}) = \cos \phi \tan \phi_s - \sin \phi \cos(\lambda - \lambda_s) \quad (3.1.34)$$

이므로,

$$\tan(\pi - AZ_{sat}) = \frac{\sin(\lambda - \lambda_s) \cos \phi_s}{\cos \phi \sin \phi_s - \sin \phi \cos \phi_s \cos(\lambda - \lambda_s)} \quad (3.1.35)$$

가 된다. 정지궤도위성의 경우 위성직하점의 위도 변화가 $\phi_s \leq 0.1^\circ$ 이므로 $\sin \phi_s \approx 0$, $\cos \phi_s \approx 1$ 이다. 그러므로

$$\tan(\pi - AZ_{sat}) = \frac{\sin(\lambda - \lambda_s)}{\sin(\phi - \phi_s) \cos(\lambda - \lambda_s)} \quad (3.1.36)$$

식 (3.1.36) 로부터 위성의 방위각을 구할 수 있다.

식 (3.1.28), (3.1.30), (3.1.33), (3.1.36) 을 조건식 (3.1.25)과 (3.1.26)에 대입해서 정리하면, 태양광반사가 생기는 영역에서 태양-지구-인공위성 사이의 기하학과 반사의 법칙을 고려하면, 비선형 방정식의 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sin^{-1} \left[\frac{(R+H) \cos(\lambda - \lambda_s) \cos(\phi - \phi_s) - R}{\left[H^2 + 2R(R+H)(1 - \cos(\phi - \phi_s) \cos(\lambda - \lambda_s)) \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \\ & - \sin^{-1} [\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H.A] = 0 \end{aligned} \quad (3.1.37)$$

$$\begin{aligned} & \tan^{-1} \left[\frac{\sin(\lambda - \lambda_s)}{\sin(\phi - \phi_s) \cos(\lambda - \lambda_s)} \right] \\ & - \tan^{-1} \left[\frac{\cos \delta \sin H.A}{\sin \phi \cos \delta \cos H.A - \cos \phi \sin \delta} \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.1.38)$$

식 (3.1.37)과 (3.1.38)가 같은 비선형 방정식으로부터 태양광반사점의 위치 $G(\phi, \lambda)$ 구할 수 있다.

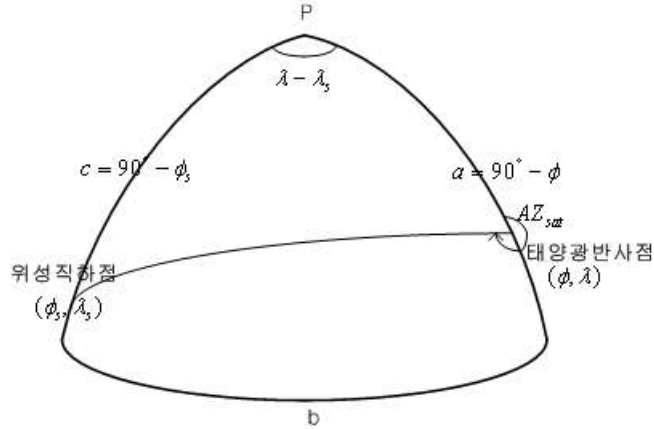


그림 3.1.13 인공위성의 방위각을 구하기 위한 구면 삼각형

비선형 방정식의 해 $G(\phi, \lambda)$ 은 수치해석방법 중에 하나인 Newton-Raphson 법을 이용하여 계산할 수 있다. Newton-Raphson 법을 이용하여 근을 구하기 위해서는 초기 근사해가 필요하다. 본 알고리즘의 초기 근사해는 태양과 위성의 중간 지점으로 가정하여 계산에 이용하였다.

첫 번째 근사해는,

$$\begin{aligned}\phi_a &= \frac{(\phi_s + \delta)}{2}, \\ \lambda_a &= \lambda_s + \frac{1}{2}(\alpha - GHA - \lambda_s)\end{aligned}\quad (3.1.39)$$

와 같이 가정하였다. 여기서 α 는 태양의 적경을 의미하고, GHA는 그리니치 시간각, ϕ_s 위성직하점의 위도, λ_s 는 위성직하점의 경도를 의미한다. 식 (3.1.25)과 (3.1.26)를 (ϕ, λ) 의 함수로 표현하면,

$$\begin{aligned}F(\phi, \lambda) &= EL_{sat} - EL_{sun} = 0, \\ G(\phi, \lambda) &= |AZ_{sat} - AZ_{sun}| - \pi = 0\end{aligned}\quad (3.1.40)$$

만약, $(\phi_a + h, \lambda_a + k)$ 가 방정식 (3.1.40)의 실근이라면,

$$\begin{aligned}F(\phi_a + h, \lambda_a + k) &= 0, \\ G(\phi_a + h, \lambda_a + k) &= 0\end{aligned}\quad (3.1.41)$$

의 형태로 표현 될 수 있다.

위의 비선형방정식을 Taylor's 급수를 이용하여 급수 전개시켜 고차 항을 제거하여 정리

하면,

$$\begin{aligned} F_0 + h\left(\frac{dF}{d\phi_a}\right) + k\left(\frac{dF}{d\lambda_a}\right) &= 0, \\ G_0 + h\left(\frac{dG}{d\phi_a}\right) + k\left(\frac{dG}{d\lambda_a}\right) &= 0 \end{aligned} \quad (3.1.42)$$

여기서, $F_0 = F(\phi_a, \lambda_a)$ 이고 $\phi = \phi_a$ 에서 $\left(\frac{dF}{d\phi}\right) = \left(\frac{dF}{d\phi_a}\right)$ 가 된다. 식 (3.1.42) 에서 h, k를 구하여,

$$\begin{aligned} h &= \frac{-\left[k\left(\frac{dF}{d\phi_a}\right) + F_0\right]}{\left(\frac{dF}{d\phi_a}\right)}, \\ k &= \frac{\left[F_0\left(\frac{dG}{d\phi_a}\right) - G_0\left(\frac{dF}{d\phi_a}\right)\right]}{\left[\left(\frac{dG}{d\lambda_a}\right)\left(\frac{dF}{d\phi_a}\right) - \left(\frac{dF}{d\lambda_a}\right)\left(\frac{dG}{d\phi_a}\right)\right]} \end{aligned} \quad (3.1.43)$$

새로운 근사해를 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_a &= \phi_a + k, \\ \lambda_a &= \lambda_a + h \end{aligned} \quad (3.1.44)$$

식 (3.1.44)과 같이 새로운 근사해를 구하는 과정을 반복하면서, 우리가 요구하는 정밀도의 태양광반사 위치 (ϕ, λ) 를 결정할 수 있다. 본 계산에서 사용한 정밀도의 에러오차는 0.00001의 범위 내에 존재하는 값들을 태양광반사 중심점이라 계산하였다.

5. 태양광반사 위치 계산 결과

앞 장에서 구현한 알고리즘을 이용하여 2008년 발사되어 동경 116.2°E 혹은 128.2°E에 위치하게 된다는 가정 하에, 통신해양기상위성(COMS)의 태양광반사 영역의 위치를 계산하여 예측해 보았다. 태양광반사점의 계산은 그림 3.1.14의 흐름도와 같은 방법으로 계산이 된다.

우선 알고리즘의 신뢰도 검증을 위해 경도 83.5°E에 위치하고 있는 인도의 정지궤도 관측위성인 INSAT-1D 에서 관측한 태양광반사 영역의 하루 및 연중 분포와 본 알고리즘을 이용해 계산한 값을 비교해 보았다.

그림 3.1.15는 인도의 정지궤도위성 INSAT-1D에서 관측한 낮 동안(05:00~12:00 GMT)과 일년간의 태양광반사 영역을 보여주는 그림이다. 점선으로 표시된 원은 700km 로 가정한 태양광반사 영역의 크기이다. 가로로 이어져 있는 실선은 낮 동안에 관측한 태양광반사 영역의 중심을 이어준 선이다. 그림 3.1.14에서 볼 수 있듯이 태양이 남반구에 위치하고 있을 때 태양광반사 영역은 북쪽을 향해 굽어져 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 태양광반사 영역의 위치는 적도좌표계 상의 위도 $\pm 15^\circ$ (N-S)와 경도 40 - 100° (E-W) 사이에 분포하는 것을 확인할 수 있다.

표 3.1.9은 본 보고서에서 연구한 알고리즘을 이용해 같은 조건인 동경 83.5°E에서 태양광반사 영역의 위치를 계산한 결과 테이블이다. 계산결과, 태양광반사 영역의 위치는 위도 $\pm 15^\circ$ (N-S)와 경도 40 - 100° (E-W) 사이에 분포하며 그림 3.1.15의 분포 패턴과 일치함을 알 수 있다.

또한, 그림 3.1.16에 보듯이 표 3.1.9의 계산 테이블을 이용하여 그림을 그려 태양광반사 영역의 중심점을 실선으로 연결했을 경우 Prakash(1994)의 관측 결과와 같이 태양의 위치가 남반구에 위치할 때 태양광반사의 경로는 북쪽을 향해 굽어지고, 북반구에 위치했을 경우 남쪽을 향해 굽어지는 경향을 확인할 수 있다. 이와 같이 동일한 태양광반사 영역의 위치 분포와 패턴은 본 논문에서 연구한 알고리즘의 결과가 신뢰 할 수 있다는 것을 보여준다.

표 3.1.10와 표 3.1.11 는 통신해양기상위성에서 해양원격탐사 임무 운용시 발생할 수 있는 태양광반사 영역의 위치를 예측한 결과 테이블이다. 아직 정확한 운용궤도가 정해지지 않았기 때문에, 동경 116.2°E와 128.2°E에 위치하게 된다는 가정 하에 계산을 하였다. 그리고 통신해양기상위성의 해양탐체체의 경우 매 1시간마다 위성 촬영을 할 수 있는 시스템 설계를 요구하고 있다. 하루 동안 주간 10:00부터 17:00(L.T)까지 8회 야간 22:00부터 02:00(L.T)에 2회를 촬영할 예정이기 때문에, 계산에서 가정한 관측 시간은 주간 10:00-17:00 (L.T)로 정하였고, 관측 날짜는 태양이 적도 부근에 위치하게 되는 것을 의도하여 2008년 2월부터 6월까지로 가정하여 계산을 하였다.

통신해양기상위성의 임무 운용 시 사전 태양광반사가 나타날 수 있는 영역의 위치를 계산하여 그림을 그려본 결과, 태양광반사 영역은 위도 $\pm 10^\circ$ (N-S)와 경도 80 - 150° (E-W) 사이에서 발생하는 것을 알 수 있으며, 태양광반사 영역의 중심을 실선으로 연결했을 경우 남반구 쪽의 태양광반사 경로는 북극 쪽을 향하였고, 반대로 북반구 쪽의 태양

광반사 경로는 남극 쪽을 향하는 패턴을 볼 수 있다. 이 패턴으로부터 계절에 따른 태양 광반사 영역의 분포의 경향을 볼 수 있다. 그림 3.1.17 는 통신해양기상위성이 경도 116.2°E 에 위치하게 될 경우의 태양광반사점의 분포 그래프이고, 그림 1.18는 128.2°E 에 위치할게 될 경우의 태양광반사점의 분포 그래프이다.

그림 3.1.19 는 통신해양기상위성이 경도 116.2°E 에 위치하게 될 경우, 2008년 1월부터 12월까지 낮 시간동안의 영상 촬영 시 나타날 수 있는 태양광반사점의 연중 분포 변화 그래프이다. 촬영 시간은 통신해양기상위성의 촬영 요구 시간인 10:00부터 17:00(L.T) 까지 제한하였다. 그림 3.1.19 에서 보듯이 곡선의 형태는 태양주위를 타원 궤도로 돌고 있는 지구궤도의 자연스런 특징을 보여 주며, 태양광반사 영역의 중심 위치가 위도 5° N 근방에서 변환한다는 것을 볼 수 있다. 그림 3.1.20은 통신해양기상위성이 경도 128.2°E 에 위치하게 될 경우 1월부터 12월까지의 연중 분포 변화 그래프이다. 03:00(UT)를 기준으로 그래프를 그렸으며 앞의 그림 3.1.19와 같은 경향성을 가지며 태양광반사의 분포가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

그림 3.1.21은 본 보고서에서 연구한 알고리즘을 이용하여 개발한 태양광반사 위치 예측 프로그램의 실행 결과 창이다. 포트란을 이용하여 개발되었으며, 입력 값으로는 예측하고자 하는 날짜와, 시간, 그리고 정지궤도위성의 직하점을 입력 값으로 계산이 된다. 계산이 완료되면 예측하고자 하는 날짜의 태양의 위치인 황경, declination, right ascension 그리고 태양의 방위각 및 고도각이 계산되며 또한 위성의 방위각과 고도각이 계산되어진다. 마지막으로 태양광반사점의 위도와 경도가 계산되어진다.

그림 3.1.22는 본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 간단하게 개발한 태양광반사 위치 예측 시각화 프로그램의 윈도우 화면이다. Microsoft Visual C++ 과 Trolltech 사의 Qt 그래픽 라이브러리를 이용하여 개발하였고, Qt의 장점인 다양한 플랫폼에서 실행가능하다는 장점이 있다. 입력 값으로는 TLE 정보를 알고 있을 경우 TLE 정보 파일을 읽어 들여 계산을 할 수 도 있으며, TLE 정보를 모를 경우 사용자가 직접 정지위성의 직하점 정보를 입력하여 태양광반사의 위치를 계산할 수 있다. 그림 3.1.23과 그림 3.1.24은 시각화 프로그램을 이용하여 계산된 결과로 그래프를 그려본 결과이다. 붉은색점이 위성의 위치를 나타내고 하얀색점은 태양광반사의 위치 분포를 나타낸다.

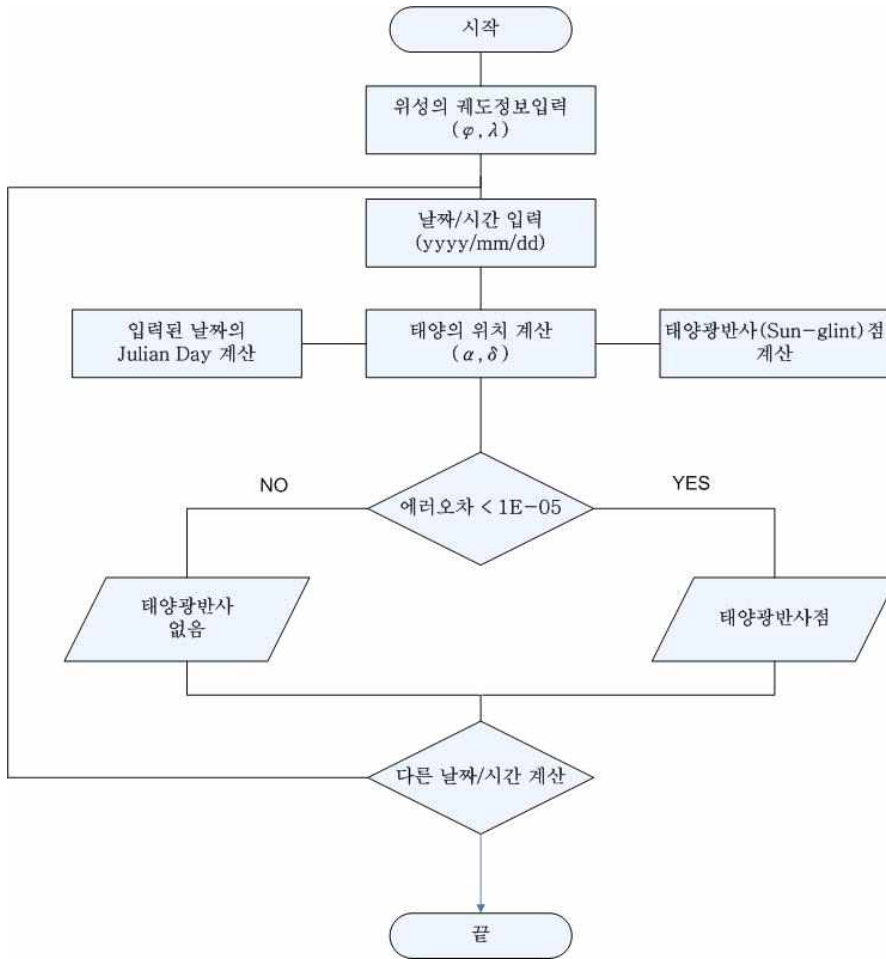


그림 3.1.14 정지궤도위성의 태양광반사 영역 위치예측 흐름도

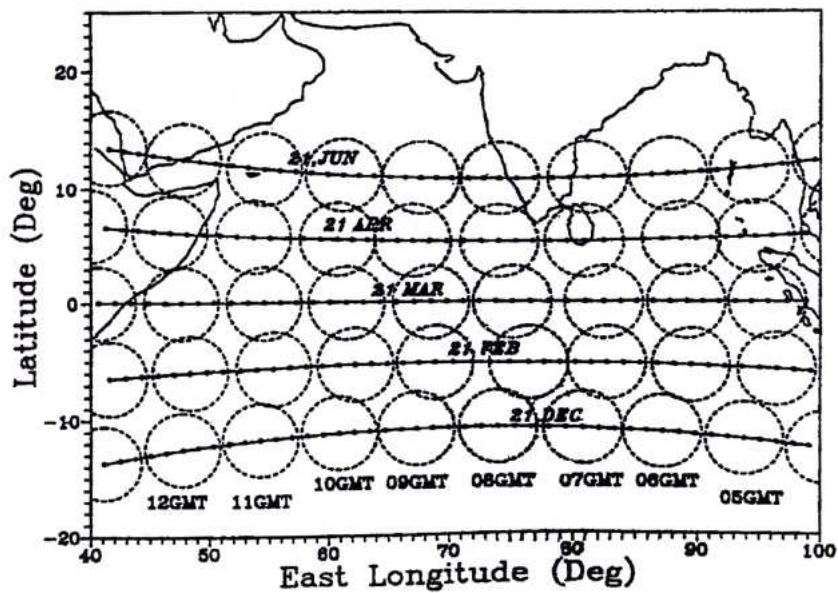


그림 3.1.15 인도의 정지궤도위성 INSAT-1D (경도 83.5°E) 에서 관측한 낮 동안과 계절에 따른 태양광반사 영역 (Prakash *et al*, 1994)

표 3.1.9 INSAT-1D 계산 결과 테이블

TIME (GMT)	1992.2.21		1992.3.21		1992.6.21		1992.6.21	
	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.
05:00	-5.0800	95.8500	0.2100	95.2000	5.6500	94.1000	11.0200	94.0700
06:00	-5.0300	82.0000	0.2100	88.2800	5.5400	87.2700	10.8000	87.4700
07:00	-5.0000	89.0000	0.2100	81.3800	5.5400	80.4400	10.7800	80.8800
08:00	-4.9900	75.3100	0.2100	74.4700	5.6400	73.6100	10.9600	74.2800
09:00	-5.1500	68.4500	0.2200	67.5400	5.8500	66.7700	11.3500	66.8100
10:00	-5.4300	61.5700	0.2300	60.5800	6.1700	59.8900	11.9900	61.0900
11:00	-5.8400	54.6600	0.2500	53.5900	6.7100	53.0100	12.9400	54.5100
12:00	-6.4500	47.7200	0.2700	46.5400	7.4600	46.0900	14.3100	47.1700

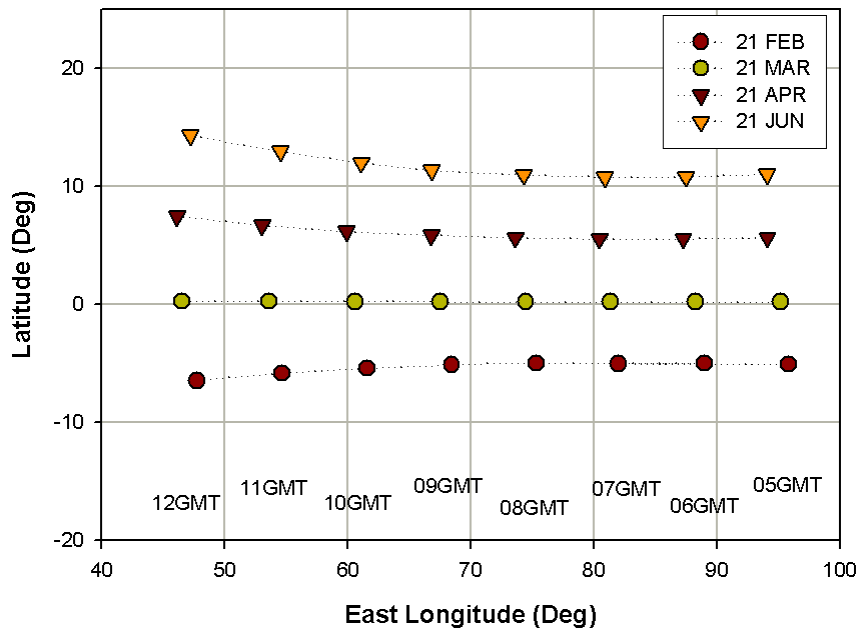


그림 3.1.16 본 보고서의 알고리즘을 이용하여 계산해본 INSAT-1D 위성의 태양광반사영역 (경도 83.5°E)

표 3.1.10 통신해양기상위성 계산 결과 테이블(동경 116.2°E)

TIME (LT)	2008.2.21		2008.3.21		2008.6.21		2008.6.21	
	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.
10:00	-5.60	139.92	0.16	139.41	6.06	138.15	11.88	137.70
11:00	-5.27	133.05	0.16	132.47	5.75	131.31	11.30	131.11
12:00	-5.07	126.20	0.16	125.55	5.57	124.50	10.93	124.53
13:00	-5.23	120.00	0.17	118.66	5.50	117.67	10.78	117.95
14:00	-5.10	113.00	0.17	111.77	5.53	110.86	10.82	111.37
15:00	-5.05	105.72	0.04	104.89	5.67	104.05	11.06	104.79
16:00	-5.24	98.88	0.20	97.96	5.93	97.21	11.51	98.22
17:00	-5.55	92.01	0.20	91.01	6.32	90.36	12.23	92.00

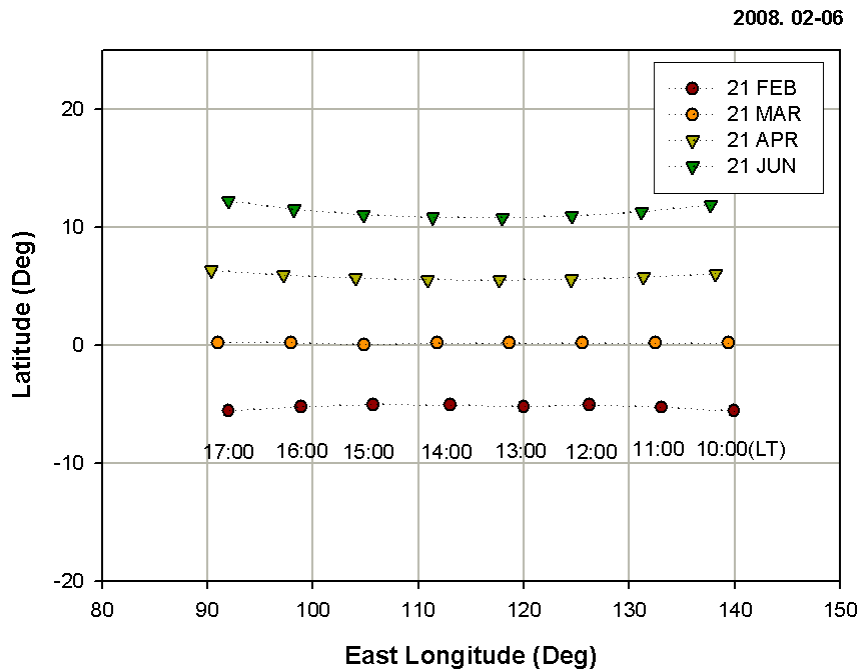


그림 3.1.17 통신해양기상위성에서 관측 시 예상되는 태양광반사 영역 예측 결과 (동경 116.2°E)

표 3.1.11 통신해양기상위성 계산 결과 테이블(동경 128.2°E)

TIME (LT)	2008.2.21		2008.3.21		2008.6.21		2008.6.21	
	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.	Lat.	Lon.
10:00	-5.35	145.80	0.15	145.30	5.81	144.14	11.44	143.87
11:00	-5.12	139.03	0.16	138.30	5.60	137.31	11.01	137.29
12:00	-5.06	132.08	0.16	131.49	5.51	130.49	10.80	130.71
13:00	-5.04	125.34	0.17	124.61	5.51	123.68	10.79	124.13
14:00	-5.03	118.54	0.18	117.71	5.62	116.87	10.97	117.55
15:00	-5.19	111.68	0.19	110.81	5.84	110.04	11.37	110.97
16:00	-5.43	104.84	0.21	103.87	6.20	103.19	11.98	104.38
17:00	-5.87	97.96	0.24	96.89	6.72	96.31	12.97	97.84

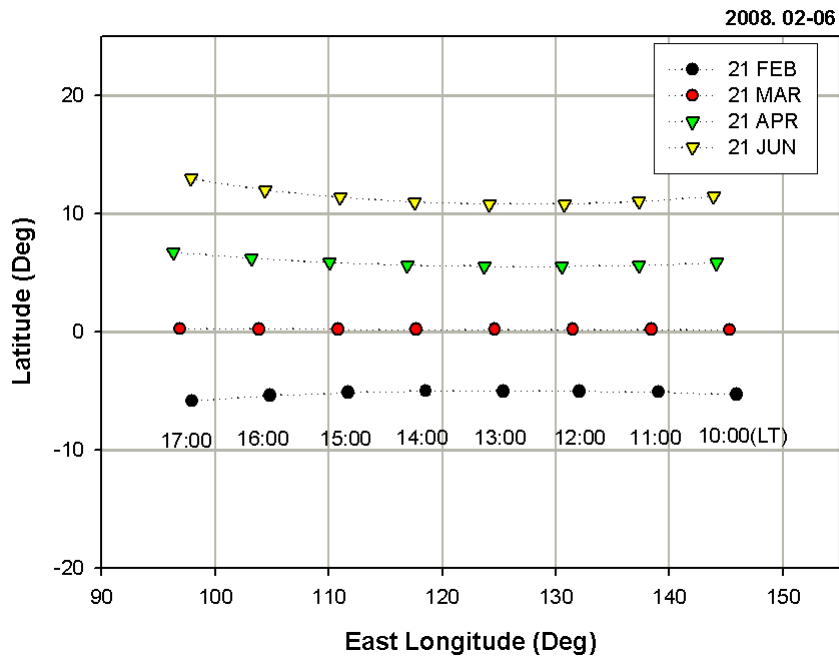


그림 3.1.18 통신해양기상위성에서 관측 시 예상되는 태양광반사 영역 예측 결과 (동경 128.2°E)

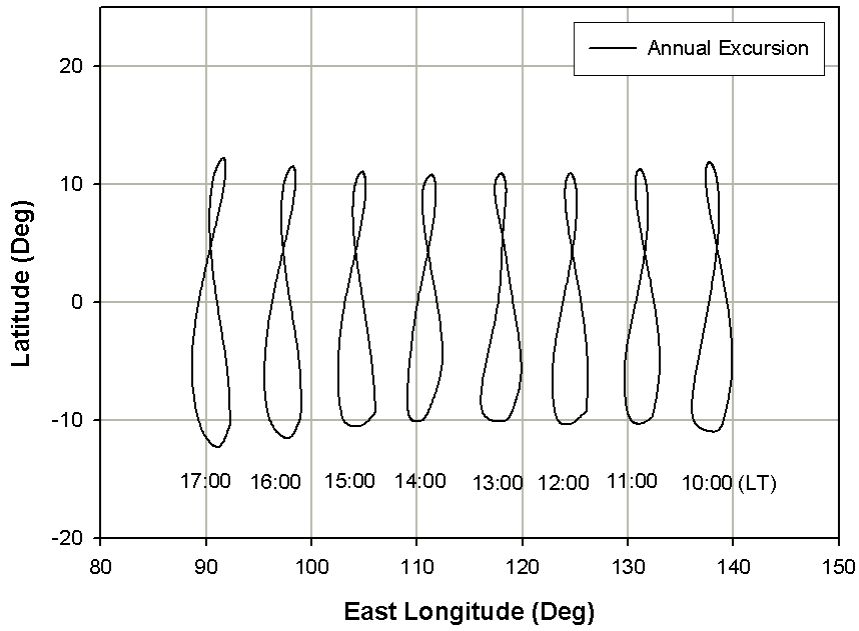


그림 3.1.19 통신해양기상위성에서 관측 시 예상되는 태양광반사 영역의 연중분포 변화 예측 결과, 2008년 1월부터 12월까지, 시간은 10:00부터 17:00(L.T) (동경 116.2°E)

SUN-GLINT ANNUAL EXCURSION (128.2E)

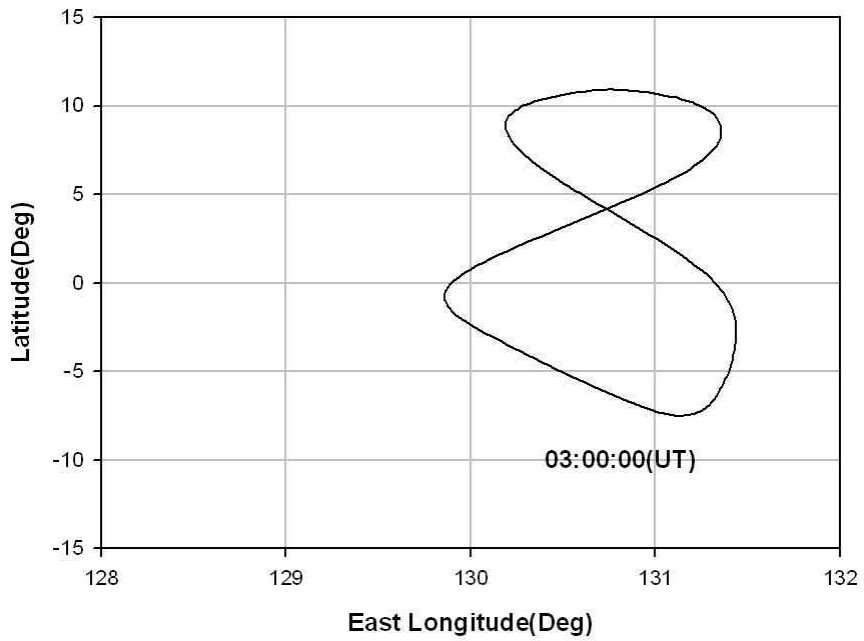


그림 3.1.20 통신해양기상위성에서 관측 시 예상되는 태양광반사 영역의 연중분포 변화 예측 결과(동경 128.2°E)

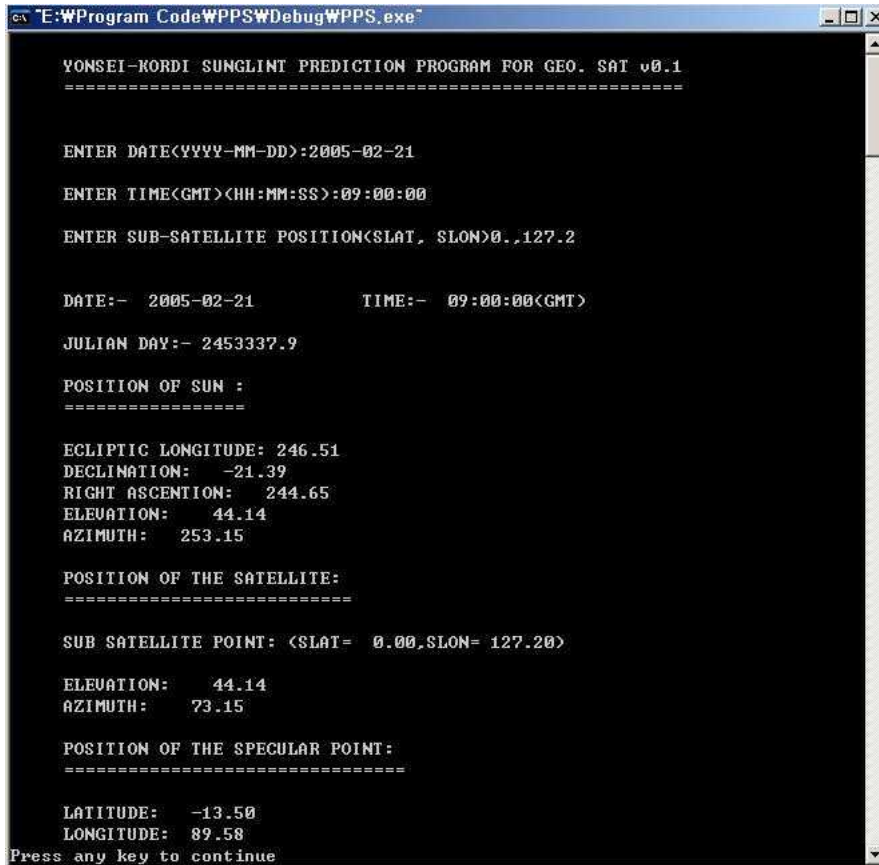


그림 3.1.21 태양광반사 위치예측 프로그램 실행 윈도우

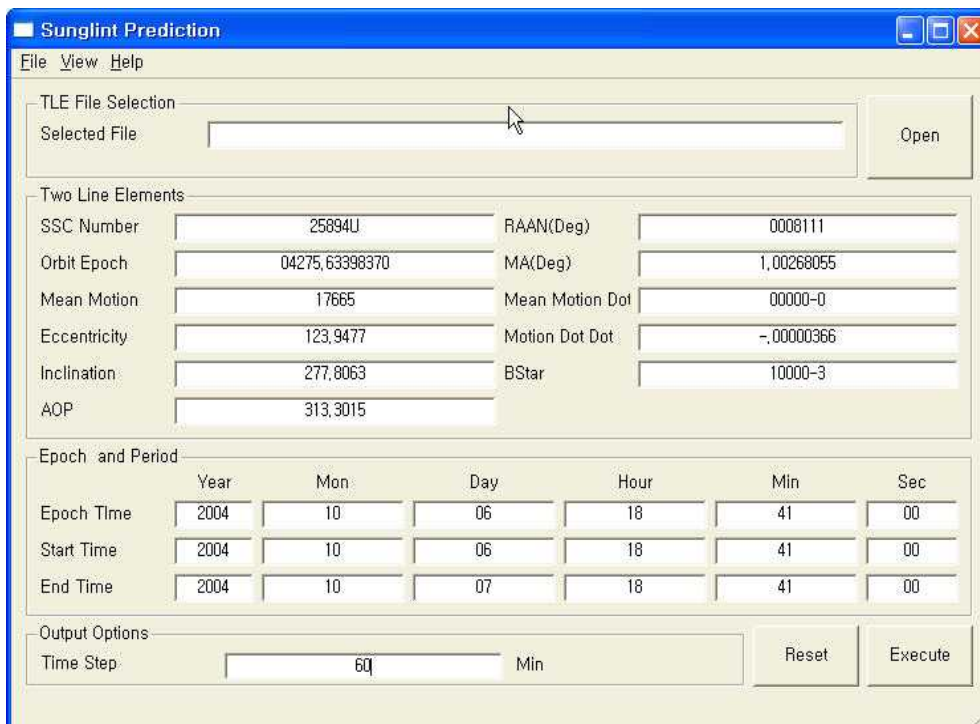


그림 3.1.22 태양광반사 위치예측 시각화 프로그램 윈도우

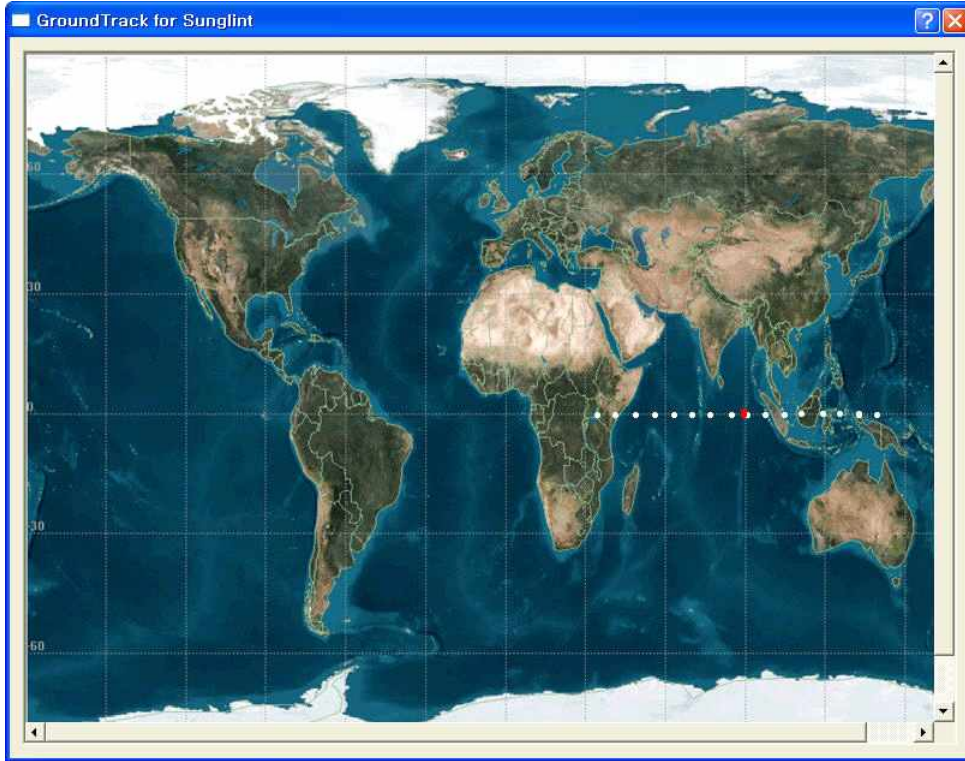


그림 3.1.23 태양광반사 위치예측 시각화 프로그램 결과 윈도우



그림 3.1.24 태양광반사 위치예측 시각화 프로그램 결과 윈도우 2

6. 결론

본 보고서에서는 2008년 발사 예정인 정지궤도 통신해양기상위성 해양 탑재체의 임무인 해양 관측 시 발생할 수 있는 태양광반사 영역의 위치 예측 알고리즘에 대해 연구하였다. 태양광반사는 해수면의 특정 부분이 거울과 같은 효과가 발생하여, 태양으로부터 입사되는 빛이 해수면의 특정 부분에 반사되어 인공위성의 센서에 맺히는 현상을 말한다. 이러한 현상은 과거의 극궤도위성과 정지궤도 기상위성에서 주로 관측이 되어 왔다.

통신해양기상위성은 동경 116.2°E 또는 128.2°E 상에 위치하여 임무를 수행할 예정이고, 해양 관측을 목적으로 하는 해양 탑재체를 탑재한 세계 최초의 정지궤도위성이다. 그 동안의 해양 관측을 목적으로 하는 인공위성들은 저궤도에 위치한 극궤도위성이 대부분이었기 때문에 해양 관측을 목적으로 위성 영상 촬영 시 발생하던 태양광반사에 관한 연구는 극궤도위성에 국한되어 연구되어 왔다. 그렇기 때문에 정지궤도 해양관측위성에 적용할 국내 실정에 맞는 통신해양기상위성에 적용할 알고리즘 개발이 필요하게 되었다.

본 보고서에서 구현한 알고리즘은 해수면은 평평하다, 대기에 의한 효과들은 무시한다, 일반적인 반사의 법칙을 만족한다는 몇 가지 가정을 통해 이루어졌다. 이러한 가정들로부터 정지궤도위성의 태양광반사 영역의 위치예측 알고리즘을 구현하였다.

정지궤도위성은 극궤도위성의 계산 알고리즘과 달리 시간에 따른 인공위성의 위치가 고정되어 있기 때문에, 태양-지구-인공위성에 관한 기하학과 반사의 법칙을 고려하여 얻은 비선형 방정식으로부터 Newton-Raphson 수치해석방법을 이용하여 계산하였다. 위성의 궤도 정보인 위성직하점 값과, 위치를 예측하고자 하는 날짜를 입력하여 입력한 날짜에 태양의 위치를 계산하여 임의의 태양광반사 영역을 계산하였다. 여기서 얻는 값이 가정한 모델과 조건에 일치할 때 우리가 원하는 태양광반사 영역의 위치라고 판별하였다.

경도 83.5°E에 위치하여 운용중인 인도의 정지궤도관측위성인 INSAT1-D로부터 얻은 태양광반사 영역의 낮 동안과 계절에 따른 태양광반사 영역의 위치 분포와 본 논문에서 연구한 알고리즘을 이용해 계산한 결과의 비교를 통해 알고리즘을 검증하였다. 계산 결과 경도 83.5°E에 위성이 위치할 시에 위도 $\pm 15^\circ$ (N-S)와 경도 40 - 100° (E-W) 사이에 발생하여 태양광반사 영역의 위치 분포가 일치함을 확인할 수 있다. 이렇게 검증된 알고리즘을 이용하여 2008년 초에 발사되어 경도 116.2°E 혹은 128.2°E 에 위치하게 될 통신해양기상위성에서 위성 영상 촬영 시 관측 될 수 있는 낮 동안과 계절에 따른 태양광반사 영역의 위치를 계산해 보았다.

통신해양기상위성의 2008년 발사 운용 시 태양광반사 영역은 위도 $\pm 10^\circ$ (N-S)와 경도 80 - 150° (E-W) 사이에서 발생하는 것을 알 수 있으며, 태양광반사 영역의 중심을 실선으로 연결했을 경우 남반구 쪽의 태양광반사 경로는 북쪽을 향하였고, 반대로 북반구 쪽의 태양광반사 경로는 남쪽을 향하는 패턴을 볼 수 있었다.

또한 본 연구에서 개발된 알고리즘을 이용하여 간단한 태양광반사 위치 예측 시각화 프로그램을 개발하였다. 시각화 프로그램은 Microsoft사의 Visual C++과 Trolltech사의 Qt 그래픽 라이브러리를 이용하였으며 계산된 결과 값들을 시각적으로 볼 수 있는 기능의 프로그램이다.

본 보고서에는 태양광반사 영역의 크기 문제는 전혀 고려하지 않았다. 앞으로의 연구에서는 태양광반사 영역의 크기 문제와 해수면 상태에 따른 위치 변화에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 위성 탑재체와 센서의 상세 설계로부터 정확한 조건과 제한을 주어 계산을 한다면 보다 정밀한 태양광반사 영역의 위치계산이 가능하다. 그리고 태양광반사 영역 위치 예측 알고리즘을 통해 다양한 영상 센서를 가진 인공위성에서 태양광반사 영역의 위치 예측과 그와 관련된 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

제 2 절 정지궤도 해양위성에 의한 해양환경관측시 공간해상력의 비교

1. 서론

해양 환경 분석은 해색센서로부터 취득된 해색자료의 시-공간적 특성에 의해 많은 영향을 받는다. 극궤도 위성의 경우 전 지구적인 관측을 위해 800m - 1 km의 공간해상력으로 1일에 1회 혹은 2일에 1회 지구관측을 수행하며 이러한 시-공간적인 해상력은 CZCS 이후 많은 발전을 거듭하여 OSMI, SeaWiFS, MODIS, MERIS, GLI 등 다양한 극궤도 위성에 탑재된 해색센서에 의해 동일지역에 대한 다양한 해색센서의 관측빈도가 증가하였고, 해색센서의 관측자료를 각각의 해색센서 특성에 의해 상호 비교하는 단계에 이르고 있다.

특히, 최근 운영되는 해색센서는 공간해상력이 더욱 향상되어 인도의 해색센서인 OCM은 350m의 공간해상력을 가지고 있으며 MODIS는 가시영역의 2개 밴드가 250m, 해색관측 영역의 밴드는 500m의 공간해상력을 가지고 있어서 보다 다양한 해양환경변화의 관측이 이루어지고 있다.

하지만 이러한 극궤도 해색센서는 COMS에 탑재될 GOCI와 같이 동일지역을 하루에 8회 이상 관측할 수 없기 때문에 시간적인 변화가 급격히 일어나는 해양환경의 관측 가능한 해양환경요소의 범위가 제한되어 왔다.

본 연구에서는 정지궤도에서 250m 또는 300m의 공간해상력을 가지고 하루 낮 시간에 6회 밤 시간에 2회 촬영할 수 있는 COMS의 GOCI에 의한 공간해상력을 다른 해색센서 자료를 바탕으로 시뮬레이션하여 해양관측 특성을 비교하고자 한다. 특히 현재 운영 중인 해색센서와 시-공간적인 특성을 비교하여 적조, 부유사 이동, 연안해색의 변화 등과 같은 연안관측의 분석에서 시-공간해상력의 특성을 비교 분석하였다.

특히, 1차년도에서 수행하였던 극궤도 위성에 의한 해색관측과 정지궤도에서의 해색관측에서 발생하는 지형왜곡의 자료 특성을 GOCI의 공간해상력에 의해 나타나는 해양환경 관측의 측면에서 비교하였다.

우리나라는 해양위성의 국제적 해색관측 추세에서 보다 발전적 단계인 정지궤도 위성에 해양관측센서인 GOCI를 탑재하고 있으며, 해양센서로서 정지궤도에서 해색을 관측하기 위한 센서는 미국에서 개발 중인 SEI와 우리나라의 GOCI가 현재 유일한 것으로 아직 발사에 성공한 정지궤도의 해색관측은 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 정지궤도에서의 해색관측을 수행할 경우 발생할 수 있는 문제점을 고찰하고 이를 통해 얻어진 결과를 분석하여 정지궤도에서 해색관측을 수행할 때 발생할 수 있는 문제점의 해결 방안을 모색하는데 목적이 있다. 1차년도의 연구 성과인 극궤도 위성자료와 정지궤도에서의 지형 오차를 비교하여 시뮬레이션된 정지궤도상에서의 해색자료와 극궤도위성에 의해 관측된 해색자료의 자료특성 등을 고찰하고 공간해상력의 관점에서 이의 해결방안을 모색하는데 본 연구의 목적이 있다.

또한, COMS 영상에 의한 해색관측은 현재 우리가 매일의 일기예보를 통해 기상현상을

예측하는 것과 같이 해양환경에 있어서 발생하는 다양한 현상들을 보다 높은 시간해상력과 공간해상력을 가지고 지속적으로 관측하는데 큰 의의가 있다.

이는 현재 전 세계적으로 이루어지고 있는 위성개발기술 분야에서 보다 앞선 기술력을 확보하는 단계로 진입하는 것을 의미하며 해양환경관측에서 위성자료의 활용에 의한 분석기술을 확대하는 계기가 될 전망이다.

본 연구에서는 정지궤도에서의 해색관측을 수행할 경우 발생할 수 있는 문제점을 고찰하고 이를 극궤도 위성자료와 비교하여 극궤도위성에 의한 해색관측에서 발생할 수 있는 알고리즘의 적용문제, 해색자료의 자료처리 문제 등을 고찰하고 이의 해결방안을 모색하는데 본 연구의 목적이 있다.

우리나라는 국가 중장기 위성개발계획에 근거하여 정지궤도 위성을 개발하고 위성에 해양센서와 기상센서를 탑재하며 통신위성의 기능을 수행할 수 있는 통신해양기상위성(COMS)를 2008년에 발사할 계획을 추진하고 있다. 해양센서로서 정지궤도에서 해색을 관측하기 위한 센서는 미국에서 개발 중인 SEI와 우리나라의 해색센서(GOCI)가 현재 유일한 것으로 아직 정지궤도에서 해색관측은 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 정지궤도에서의 해색관측을 수행할 경우 발생할 수 있는 문제점을 관측 방법, 지구곡률, 공간해상력의 측면에서 고찰하고, 이를 극궤도 해양위성자료와 비교하였다. 이는 아직 발사되지 않은 세계 최초의 정지궤도위성에 의한 해색관측에서 발생할 수 있는 문제점을 위성이 발사되기 이전에 고찰하고 이의 해결방안을 모색하는데 본 연구의 목적이 있다.

특히, 정지궤도의 관측특성에 의해서 한반도 주변해역을 높은 시간해상력과 공간해상력을 가지고 연안환경의 변화관측이 가능한데 이러한 연안 해양 환경 관측에서 GOCI의 공간해상력이 가지는 특성과 해양관측에서의 자료 특성을 연구하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 연구방법 및 자료

본 연구에서는 다음의 세 가지를 중점 고찰하기 위해 GOCI의 관측 방안에 따라 영상자료의 특성과 공간해상력의 변화에 따른 해양관측 요소를 파악하였다.

첫째 현재 정지해양위성의 적도상 위치는 동경 116도로 예상되고 있으며, 한반도 상공(130도)보다 서쪽으로 많이 편기되어 있어 수평선에서 보이는 각도와 지형 왜곡이 더 크게 발생할 수 있다. 또한, 한반도 위치(북위 36도)에 따른 공간해상도 감소(Nadir)가 발생할 수 있다.

따라서 좌표 0도N, 130도E(NADIR방향)에서 위성이 동서로 옮겨갈 때 위도에 따른 한반도 pixel foot print geometry의 변형을 분석하였다. 그리고 현재 예정지인 동경116도로 위성 위치가 옮겨질 때 영상의 질에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 왜곡은 위성센서의 관측방식에 의한 파노라믹 왜곡과 지구곡률의 변화에 따른 왜곡이 동시에 발생하는데 한반도 중심과 GOCI에 의해 관측되는 주변해역의 지형적 왜곡에 의한 영상자료의 특성 변화를 분석하였다.

둘째, 전 구를 스캐닝(scanning)할 경우 foot print의 위도에 따른 지형왜곡 및 해상도 감소(Nadir상의 해상도를 1 이하 가정할 때)를 파악하는 것이 요구되며, 실제 정지궤도의 GOES-9의 band 1 가시영상과 같은 영역의 극궤도의 MODIS band 1 (1km)영상을 비교하여 이미지의 질의 차이가 어떻게 나는지 왜 나는지 그 원인을 규명하였다. 현재 한반도를 관측하는 정지궤도 위성은 GOES-9으로 GMS-5의 수명이 다함에 따라 기상관측 목적의 정지궤도 위성이 운영되고 있다. 하지만, GOES-9은 해색관측 채널이 아니고 공간해상력도 GOCI와는 다르기 때문에 극궤도의 해색관측센서인 MODIS, SeaWiFS와 GOES-9 자료를 상호 비교하여 한반도 주변해역 관측시 나타날 수 있는 자료의 특성을 비교하였다.

셋째, GOCI의 공간해상력이 300m로 개발됨에 따라 해색자료로 얻어지는 GOCI의 채널과 공간해상력의 변화에 의해 예상되는 적조, 부유사, 엽록소의 공간분포 등을 관측할 때 해양환경의 변화를 관측 범위에 관한 연구를 수행하였다.

가. 극궤도 위성과 정지궤도 위성자료

본 연구에서는 국내에서 수신되는 극궤도 해색센서 자료(MODIS와 SeaWiFS)를 획득하여 이들 자료를 정지궤도에서 얻어지는 기상센서인 GOES-9 자료와 비교 연구하는 방법을 추진하였다. 극궤도 해색센서와 정지궤도 해색센서의 가장 뚜렷한 차이는 각각의 위성이 가지고 있는 궤도 특성과 관측방법의 차이에 의한다. 특히, 위성에 관측하는 직하점에서의 관측범위와 관측 각에 의한 지형왜곡은 해색을 연구하는데 있어서 매우 중요한 요소이다.

본 연구에 사용된 극궤도 MODIS와 SeaWiFS 자료는 한반도와 주변해역의 2001년 4월부터 2004년 5월 자료를 획득하였고, 획득된 영상에서 구름이 획득 영상의 40 % 미만인 자료를 선택하여 자료 처리하였다.

MODIS 자료는 그림 3.2.1과 같이 EOSQV를 통해 PDS자료를 Level 1A HDF의 자료로 변환하였고, 이중 한반도 주변해역이 구름에 노출된 정도를 평가하여 연구에 적용할 자료를 구분하였다. 그림 3.2.2는 EOSQV에서 판단된 MODIS 자료를 읽어 Level 1A HDF의 형식으로 export하는 과정을 나타낸 것이다. 각각의 단계를 통해 얻어진 자료는 기하보정과 방사보정에 의해 동일지점의 관측값을 다른 위성자료와 비교하는데 사용하였다.

GOES-9 정지궤도 자료는 레벨 0의 자료 형식으로 획득하고 그림 3.2.3과 같은 IDL 프로그램에 의해 이를 분석하였다. 연구에 사용된 MODIS-AQUA 자료는 이들 영상과 동일지점의 픽셀 값을 비교하기 위해 같은 날 취득된 GOES-9 자료를 처리하여 분석에 사용하였다.

검색된 정지궤도 위성(GOES-9)과 극궤도 위성(MODIS)의 자료는 한국항공우주연구원을 통해 자료 요청하고, 이를 원시자료의 형태로 받아 분석하였다. 또한 각각의 자료를 분석하기 위한 프로그램을 한국항공우주연구원으로부터 획득하였고, MODIS 자료와 GOES 자료를 분석 가능한 형태로 구축하였다.

특히 본 연구에서는 GOES-9이 GMS-5의 임무를 대신하기 위해 위성의 위치가 조정된 경우를 고려하였다. 통신해양위성의 경도 위치가 아직 명확히 정해지지 않은 상태이나 예상되는 경도 위치에 따른 영상자료의 왜곡을 판단하였다. GOES-9과 GMS-5는 한반도에서

불 때 서로 다른 지점에 위치하고 있어서 이의 위치에 따른 자료 변화의 차이를 파악하기 위해 IDL 프로그램을 이용하여 자료처리 모듈을 구축하였다.

극궤도와 정지궤도에서의 해색센서가 가지는 특성은 동일한 관점에서 파악할 수 있다. 극궤도와 정지궤도 모두 해색위성에서 채널을 선정하는 위치는 두 가지 관점에서 접근이 가능하다. 하나는 해수색 신호로부터 해양환경을 분석하는데 필요한 파장대와 전체 신호에서 대기신호의 크기를 추정할 수 있는 파장대로 구분할 수 있다. 만약 채널 수를 설정하는 데 아무런 제약조건이 없으면 채널 수는 많을수록 보다 다양한 정보를 추출할 수 있으며, 정밀한 값을 얻을 수 있다. 그러나 일반적으로 밴드수가 많을수록 저장 자료의 양이 증가하며 자료처리의 속도가 느려진다는 어려움이 있다.

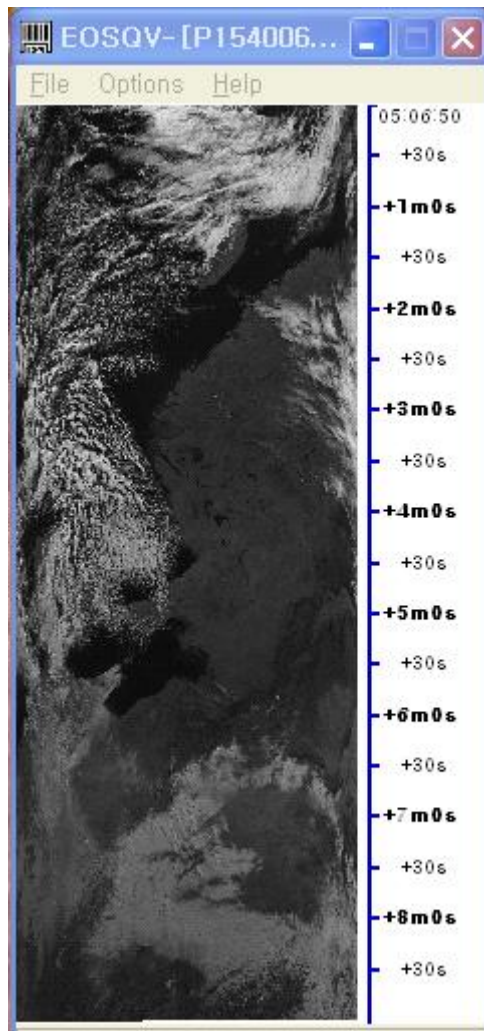


그림 3.2.1 EOSQV에 의한 MODIS 자료 읽기

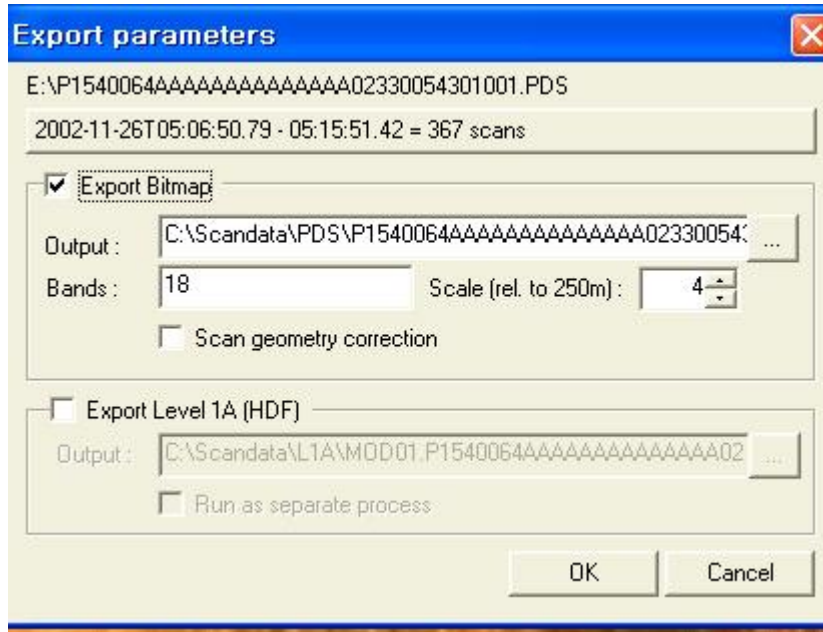


그림 3.2.2 MODIS 자료를 Level 1A 자료로 Export 하는 과정

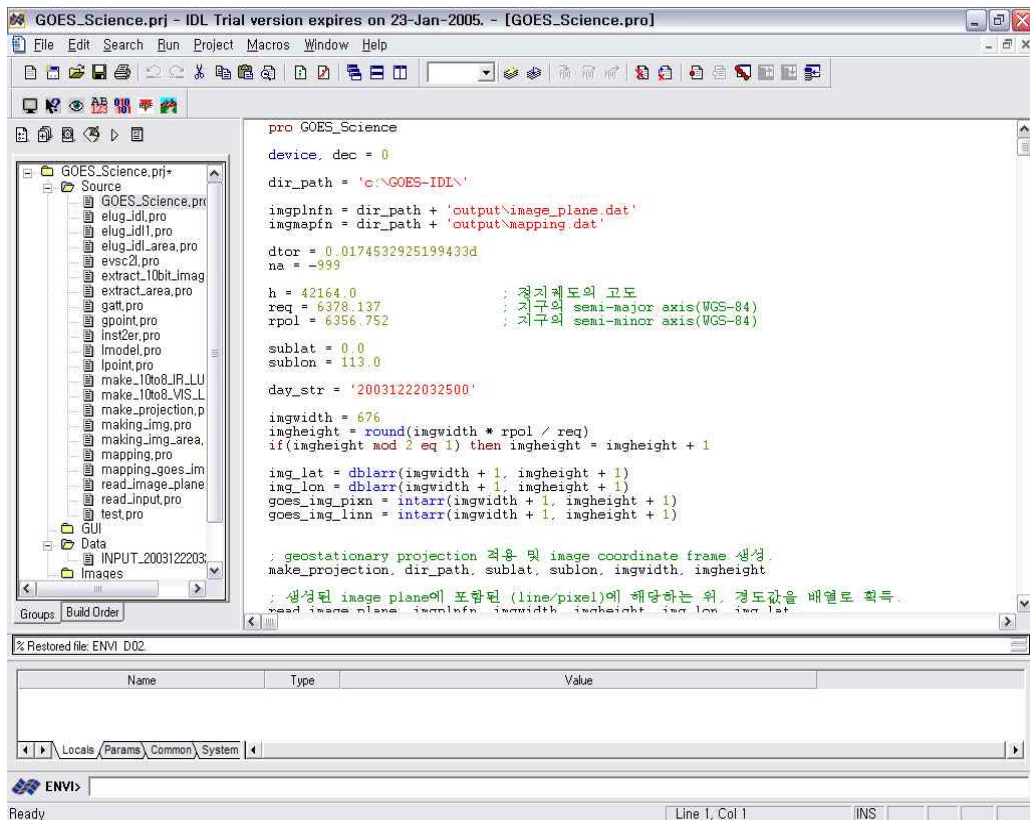


그림 3.2.3 GOES 자료를 지구좌표로 투영하고 자료 처리하는 프로그램

채널의 수는 결국 위성에서 지상으로 자료의 전송속도, 지상에서 자료처리 능력 등에 의하여 제약을 받게 된다. 그 외 자료의 비트수 역시 자료의 양에 관여하므로 동시에 고려되어야 할 사항이다. 현재 GOCI는 극궤도 해색센서인 SeaWiFS와 유사한 채널 특성을 가지고 해색자료를 획득할 예정이다.

대기의 에어로졸에 의한 광 특성은 전파장 영역에서 흡광 작용이 거의 없고(황사는 제외) 산란특성이 아주 강하다. 그러므로 에어로졸의 광 신호는 대부분 에어로졸의 산란으로 발생된다. 극궤도와 정지궤도 모두 대기에서의 복사휘도는 대기 통과 길이에 의해 영향을 받게 되는데 이러한 영향을 평가하는데 있어서 센서의 관측 순간 시야각과 직하점에서의 거리 등을 고려하는 것이 필요하다.

최대 대기신호의 크기는 대기의 광 경로에 의하여 좌우되며, 대기 중의 에어로졸 농도에 따라 변할 수 있기 때문에 그 한계를 정하는 것은 상당히 어렵다. 즉 기존의 극궤도 위성의 주어진 L_{max} 에서부터 정지궤도 위성으로 그 값을 유추하는 방식을 택한다. 표 3.2.1은 몇몇 해색 센서의 maximum radiance 값을 보여주고 있다.

4개 위성 중 3개 위성에서 나타나는 maximum radiance 값은 밴드별 유사한 값을 보여주고 있으나 OSMI만 타 위성과는 다르게 특이하게 높은 값을 보여주고 있다. 이것은 원래 이 센서의 목적과 거리가 먼 육상관측까지 고려하여 복합적인 성격을 갖는 위성으로 설계되었기 때문이라 사료된다. 표 3.2.1에서는 COMS에 탑재될 GOCI의 L_{max} 값을 극궤도 센서와 비교하였다(한국해양연구원, 2001).

정지궤도 위성의 해색센서에서 획득되는 maximum radiance는 극궤도 해색센서와 같을 수 없다. 이는 여러 가지로 다른 광학적 요인에 의한 것으로 2가지의 증가요인이 발생하게 된다. 그 중 하나는 궤도 차이에 의한 광로가 길어졌다는 것이며, 다른 하나는 한반도 위치의 경우 지구의 구면 효과로 인한 광로의 증가를 들 수 있다.

표 3.2.1 극궤도 해색센서의 Maximum radiance 값(Nadir 방향)과 GOCI 비교

Bands	센서	OCTS	SeaWiFS	GLI	OSMI	GOCI
1.	412nm	145	136.3	130	?	140
2.	443nm	150	132.5	109	329	135
3.	490nm	130	105	86	206	95
4.	510nm	120	90.8	74	123	-
5.	555nm	90	74.4	51.5	80	63
6.	625nm	-	-	33	-	38
7.	670nm	60	42	25	62	34
8.	765nm	40	30	-	?	30
9.	865nm	20	21.3	9	68	15

정지궤도는 지구로부터 36,000 km 떨어진 위치에서 지구와 동일한 속도를 가지고 지구를 관측하므로 항상 지구의 동일지역을 관측할 수 있다. 이러한 궤도 특성에 의해 기상관측이나 통신위성의 목적으로 개발되어 운영되고 있는데 본 연구에서는 기상관측 위성으로 한반도 지역을 관측하는 GMS와 GOES에 대해 요약하였다. GMS 위성 영상의 특성은 정지궤도에서 한반도를 관측센서로 관측 자료의 특성을 평가할 수 있다.

GMS-5호 위성이 GOES-9호로 대체되기까지 간략하게 살펴보면 다음과 같다. -
1995. 3: GMS-5호 발사 (GOES-9 1995. 5. 발사)

- 1999.11: GMS-5호 후속위성 MTSAT-1 발사 실패
- 2000. 3: GMS-5호 설계수명 종료
- 2001.10: GMS-5호 연료부족으로 남북방향 자세제어 종료
- 2002. 5: 미국 GOES-9로 GMS-5 관측임무를 대체하기로 결정
(위성운영에 대한 양국간 상호 백업체계 유지 협약에 근거)

GMS에 의해 수신되는 위성영상은 가시적외주사 복사계(Visible and Infrared Spin Scan Radiometer, VISSR)로 관측되며 적외영상 3채널과 가시영상 1채널 등 모두 4채널이 있으며 각 채널별 특성은 다음과 같다.

- (1) VISIVLE : 가시영상, 0.55 ~ 0.90 micrometers의 파장대 감지빛의 반사가 강한 곳은 희게 약한 곳은 검게 나타나며, 반사휘도는 측기, 태양고도와 구름의 상대적인 위치, 구름과 지표면의 반사율과 관계가 있다. 가시영상은 주간에 출력되는데 태양고도가 낮을수록 어둡게 나타난다. 거리분해능은 위성 직하점에서 동서와 남북으로 각각 1.25km이며, 직하점에서 멀어질수록 거리분해능은 떨어진다.
- (2) IR1 BAND : 적외영상, 10.5 ~ 11.5 micrometers의 파장대 감지지구를 흑체로 가정하여 관측된 에너지로부터 온도를 산출하여 영상에서는 검은색에서 흰색 사이의 농담으로 표현된다. 온도 산출범위는 대략적으로 섭씨 -100 ~ +55도 이고, 영상에서 따뜻한 곳은 검게, 차가운 곳은 희게 나타난다. 관측된 적외복사 강도는 구름의 온도, 사출률, 이산화탄소나 수증기에 의한 흡수효과 등과 관계가 있다. 적외영상은 주야에 관계없이 관측이 가능하며 그 거리 분해능은 위성 직하점에서 동서와 남북으로 각각 5km이며 직하점에서 멀어질수록 거리 분해능은 떨어진다
- (3) IR2 BAND : 적외영상, 11.5 ~ 12.5 micrometers의 파장대로 감지 IR1 BAND와 비슷한 특성을 가지고 있으나 대기의 수증기량에 따라 복사량의 차이가 있다.
- (4) IR3 BAND : 적외영상, 6.5 ~ 7.0 micrometers의 파장대로 감지대기 중상층의 수증기 흡수영역으로 수증기 채널이라고 한다. 구름이 없는 곳에서도 수증기의 이동을 이용해 대기의 움직임을 추정할 수 있다. 따라서 대기 중층의 수증기 분포 및 습도 분석, 수증기 이동벡터 산출, 대기 하강 운동역 및 수평운동 추정에 이용된다.

GOES(Geo-stationary Operational Environmental Satellite)는 기상 감시와 예보를 위한 가장 기본적인 위성으로, NOAA의 국제 기상 서비스를 보조한다. GOES 위성은 기상에 관계된 양질의 영상과 sounding data(수직 자료)를 제공해 지속적으로 기후를 예측하고 환경 변화를 감시하는데 중요한 역할을 한다. 1975년 GOES-1이 발사되었고, 1994년 GOES-I(GOES-8), 1995년 GOES-J(GOES-9) 1997년 GOES-K(GOES-10)가 연달아 발사되어 서로 임무 수행 중 끊어짐이 없이 연속하고 있다. GOES 위성은 정지 위성이기 때문에 통상 두개의 위성을 함께 띄우며 함께 쏘아 올려진 두개의 위성 중 하나의 위성은 75W(East section)를 또 다른 위성은 135W(West section)의 한 장소만을 집중적으로 관찰하고 있다.

정지기상위성은 적도상공 35,800km 고도에서 지구의 자전속도와 같은 각속도로 지구주위를 돌기 때문에, 상대적으로 정지해 있으므로 일정한 범위의 연속관측이 가능하며, 관측범위는 적하점을 중심으로 반경 약 6,000km (지구표면의 1/4) 이다

본 연구에 사용될 GOES-9호 위성은 GMS-5호 위성의 운영이 종료됨에 따라 후속위성인 MTSAT-1R(2004년 1월/2월 발사예정)이 정상운용 때까지 아시아 태평양지역의 연속적인 위성자료 취득을 위해 GMS-5호 위성의 관측임무를 계승하게 된다.

GOES-9호 위성은 4월 26일부터 동경 155도에서 관측을 수행하고 있으며, 자료보정, 자세제어 등의 시험운영을 거쳐 5월 22일 09시부터 정규적으로 운영되고 있다. GMS-5 위성은 1시간 간격으로 지구관측을 수행한데 반해 GOES-9호 위성은 약 30분 간격으로 관측하므로 구름의 이동탐지가 더 용이하며, GOES-9호 위성은 근적외 채널자료를 새롭게 제공하기 때문에 야간에도 안개를 연속적으로 탐지할 수 있으며, 산불 탐지 등에도 유용하게 활용되고 있다.

GOES-9에 의해 수신되는 위성자료는 GVAR(GOES Variable)로 관측되며, 가시 1채널, 근적외 1채널, 수증기 1채널, 적외영상 2채널 등 모두 5채널로 구성된다. 각 채널별 특성은 다음과 같다

(1) 가시채널 : 0.55 ~ 0.75 μm 의 파장대 감지

가시영상은 구름과 지표면에서 반사된 태양광의 강약을 나타내며 반사광이 강할수록 영상에서 밝게 보인다. 일반적으로 바다는 어둡게, 육지는 그보다 약간 밝게, 구름은 매우 밝게 보인다. 이는 대상물체의 반사도에 의해 나타나는 결과로써 해양센서에서는 가장 반사도가 낮은 바다를 대상으로 하여 위성에서 신호를 탐지하므로 이에 대한 정확한 관측방안의 모색이 요구된다.

또한 같은 물체라도 태양의 고도에 따라 보이는 모양이나 반사도가 다르기 때문에 해양에서 일어나는 현상을 파악하는데 있어서 주의해야 한다. 해색센서는 가시영역의 다중채널을 이용하여 해양의 엽록소를 정량화하거나, 부유사의 분포와 농도를 파악하고 적조의 분포 위치를 탐지하는 기능을 가지기 때문에 이를 분석하기 위한 알고리즘의 적용은 태양광의 입사량과 반사조건 및 지형의 왜곡에 의해 차이가 나타날 것으로 판단된다.

정지궤도에서 해색센서(GOCI)는 낮시간 동안 6회 관측하도록 임무가 주어져 있어서 아침이나 저녁시간이 차이에 의해 그리고 고위도에서는 태양광이 비스듬하게 들어오기 때문에 입사광이 적어지고 그만큼 반사광도 적어져서 육상이나 구름의 관측보다 어둡게 나

타난다.

현재 예상되는 해색센서의 채널은 가시영역에 6개 채널이 들어가고 이들의 밴드 폭은 GOES-9의 가시채널에 비하여 매우 좁기 때문에 센서에서 받아들이는 신호의 세기가 매우 미약하다. 특히 앞에서 언급한 바와 같이 바다의 반사 신호는 육상이나 구름에 비해 매우 약하기 때문에 대기중의 에어로졸과 대기 구성성분에 의한 대기효과가 클 것으로 판단된다.

(2) 근적외 채널: 3.8 ~ 4.0 μm 파장대 감시

근적외 영상은 해색센서의 채널영역에 속하지 않으나 지구복사(구름 및 지표면으로부터 흑체복사)와 태양 복사를 함께 관측할 수 있다. 주간인 경우 근적외 파장대에서는 태양반사광이 지표면으로부터의 복사보다 크므로 주간에는 태양 반사광과 지구복사에너지가 혼재해 있으므로 영상의 해석이 어렵다 그러나 야간에는 지구복사에너지만을 관측하기 때문에 적외영상과 같이 이용할 수 있다.

(3) 수증기 채널 : 6.5 ~ 7.0 μm 파장대 감시

수증기영상은 적외영상의 일종으로 구름이 없는 대기에서도 수증기에 민감하게 반응한다. 그 최대 반응고도는 약 400 hPa에 이르므로 대기 중상층 수증기 분포 및 습도 분석, 상층 고/저기압의 위치 제트기류, 상층 침강역 및 건조역에서의 바람 분포나 중관규모 대기특성을 분석할 수 있다.

(4) 적외 1채널 : 10.2 ~ 11.2 μm 파장대 감시

적외영상은 물체가 방출하는 적외선 에너지량의 많고 적음을 나타낸다. 물체가 방출하는 적외선 에너지량은 물체의 온도에 따라 결정되며, 온도가 높을수록 많다. 따라서 적외 영상 관측으로부터 물체의 온도를 추정할 수 있으며 이렇게 추정된 온도를 휘도온도라고 한다. 적외영상에서는 온도가 높은 구름은 어둡게, 낮은 구름은 밝게 보인다. 따라서 고도가 높은 구름은 밝게 보이고 낮은 구름은 어둡게 보인다

(5) 적외 2채널 : 11.5 ~ 12.5 μm 파장대 감시

적외 1채널과 비슷한 특성을 가지고 있으나 대기 중에 포함된 수증기량 또는 황사나 에어리솔의 함량에 따라 적외 채널과의 복사량의 차이를 보인다. 따라서 해수면온도 분석시 복사광 흡수효과 보정 및 황사탐지에 활용된다.

GOES-9호 위성은 동경 155도에 위치함에 따라 GMS-5에 비해 한반도의 위치가 북동쪽으로 이동하여 그림 3.2.4와 같이 관측된다. 그림 3.2.4의 오른쪽 영상은 임의로 생산한 자료이다(이현경 외, 2003).

관측영역은 모두 3영역으로 나누어지며, 아시아, 반구, 전구영역이 있다. 이에 따라 현재의 아시아영상은 영역의 변동없이 동일하게 제공되며 Full disk를 관측하는데 약 26분의 시간이 소요된다(그림 3.2.5).

GOES-9의 채널, 밴드 폭, 공간해상력을 표 3.2.2에 제시하였고, 기상청에서 제공되는 영상자료와 분석 자료를 표 3.2.3에 제시하였다. GOES-9호 위성은 GMS-5호에 비해 시간 해상도인 관측간격이 30분 간격이므로 기상현상의 분석에 편리할 것으로 예상된다. GOES-9호의 관측스케줄은 표 3.2.4에서 같으며, 일 44회 관측을 실시한다. 모두 30분 간격이다 03, 09, 15, 21 UTC는 1회의 관측을 한다.

그림 3.2.5는 GOES에 의해 관측되는 관측영역이 모두 3영역으로 아시아, 반구, 전구영역으로 구분된다. 전구영역을 관측하는데 20분의 시간이 소요되고 있다. 정지궤도에서의 기상관측은 그림 3.2.6과 같이 북미와 남미 지역을 GOES-E와 GOES-W로 구분하여 영상을 획득하고 있다.

이미 언급한 바와 같이 극궤도와 정지궤도는 그림 3.2.7과 같이 관측점에서 위성의 카메라까지 거리와 관측각에 의한 영향이 클 것으로 판단되기 때문에 해석관측에서 나타나는 왜곡 오차를 파악한다.

본 연구에서는 Satscape 프로그램을 이용하여 지구 주변의 극궤도 위성과 정지궤도(GOES-9)의 계산된 궤도 위치를 나타내어 그림 3.2.8, 그림 3.2.9, 그림 3.2.10에 제시하였다. 그림 3.2.8의 경우 극궤도와 정지궤도에서 운행 중인 위성을 프로그램 상에서 시뮬레이션하여 상대적인 위치를 비교한 것이며, 작은 점들은 다른 위성의 위치를 나타낸 것이다.

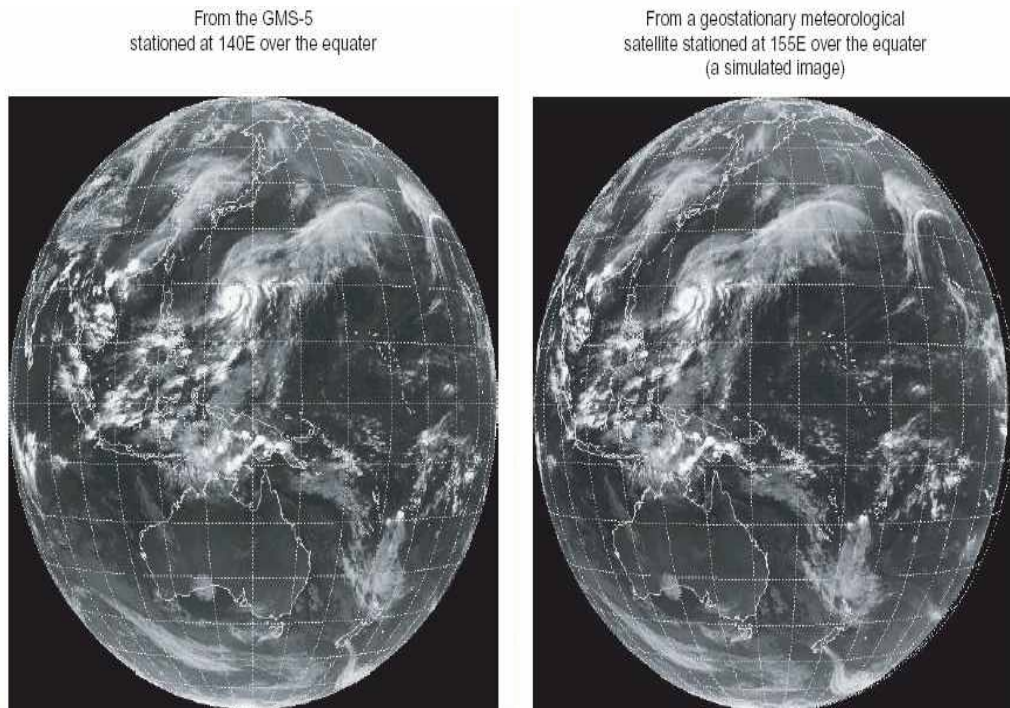


그림 3.2.4 GMS-5와 GOES-9의 임무교대에 따른 관측지역

표 3.2.2 GOES-9 imager의 채널과 해상력

Channel	Wavelength Range	Resolution
1 (Visible)	0.55 ~ 0.75 μm	1km
2 (Shortwave)	3.80 ~ 4.00 μm	4km
3(Moisture)	6.50 ~ 7.00 μm	8km
4 (IR1)	10.2 ~ 11.2 μm	4km
5 (IR2)	11.5 ~ 12.5 μm	4km

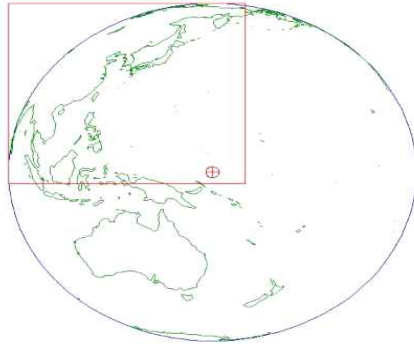
표 3.2.3 GOES-9 images의 종류와 생산주기

	자료종류	제공간격	비고
영상자료	가시	30분	한반도/아시아: 일 44회 전구영역: 일 24회
	적외1	"	
	수증기	"	
	합성	"	
	강조	"	
	METEOSAT-5와 합성자료	"	적외,수증기
분석자료	안개	"	
	황사	"	
	운정온도/고도/기압	"	
	태풍분석	"	태풍발생시
	구름이동벡터	매 6시간	
	수증기이동벡터	매 6시간	

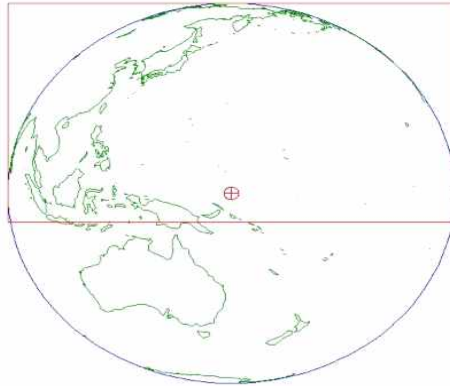
표 3.2.4 GOES-9 Imager의 관측방식과 관측시간

TIME (UTC)	SCAN SECTOR	DURATION (MM:SS)
19:18:00.	FULL DISK	26:06
19:54:20.0	SHORT FULL DISK	15:05
20:18:00.0	FULL DISK	26:06
20:54:20.0	SHORT FULL DISK	15:05
21:18:00.0	FULL DISK	26:06
22:06:00.0	FULL DISK	26:06
22:42:00.0	FULL DISK	26:06
23:18:00.0	FULL DISK	26:06
23:54:20.0	SHORT FULL DISK	15:05
00:18:00.0	FULL DISK	26:06
00:54:20.0	PAC9	09:30
01:18:00.0	FULL DISK	26:06
01:54:20.0	SHORT FULL DISK	15:05
02:18:00.0	FULL DISK	26:06
02:54:20.0	SHORT FULL DISK	15:05
03:18:00.0	FULL DISK	26:06
04:06:00.0	FULL DISK	26:06
04:42:00.0	FULL DISK	26:06
05:18:00.0	FULL DISK	26:06
05:54:20.0	SHORT FULL DISK	15:05
06:18:00.0	FULL DISK	26:06
06:54:20.0	PAC9	09:30
07:18:00.0	FULL DISK	26:06
07:54:20.0	SHORT FULL DISK	15:05
08:18:00.0	FULL DISK	26:06
08:54:20.0	SHORT FULL DISK	15:05
09:18:00.0	FULL DISK	26:06
10:06:00.0	FULL DISK	26:06
10:42:00.0	FULL DISK	26:06
11:18:00.0	FULL DISK	26:06
11:54:20.0	SHORT FULL DISK	15:05
12:18:00.0	FULL DISK	26:06
12:54:20.0	SHORT FULL DISK	15:05
13:18:00.0	FULL DISK	26:06
13:54:20.0	SHORT FULL DISK	15:05
14:18:00.0	FULL DISK	26:06
14:54:20.0	SHORT FULL DISK	15:05
15:18:00.0	FULL DISK	26:06
16:06:00.0	FULL DISK	26:06
16:42:00.0	FULL DISK	26:06
17:18:00.0	FULL DISK	26:06
17:54:20.0	SHORT FULL DISK	15:05
18:18:00.0	FULL DISK	26:06
18:54:20.0	PAC9	09:30

155E IMAGER, 9.5 SCAN



15 MINUTE FULL DISK



26 MINUTE FULL DISK SCAN

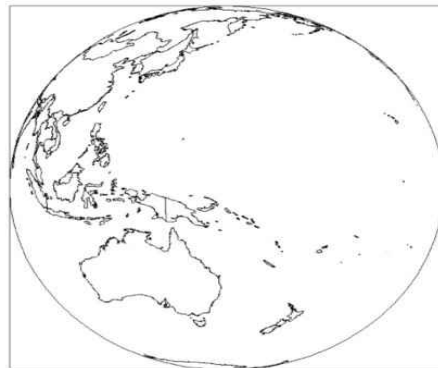


그림 3.2.5 관측영역은 모두 3영역으로 아시아, 반구, 전구영역이 있다.

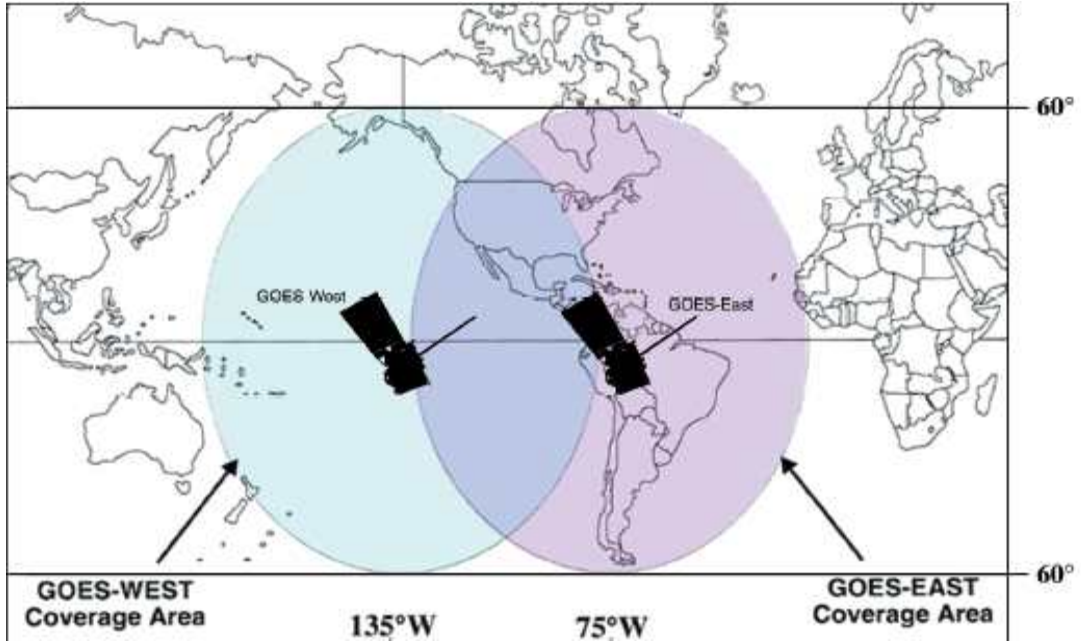


그림 3.2.6 GOES-East와 GOES-West coverage

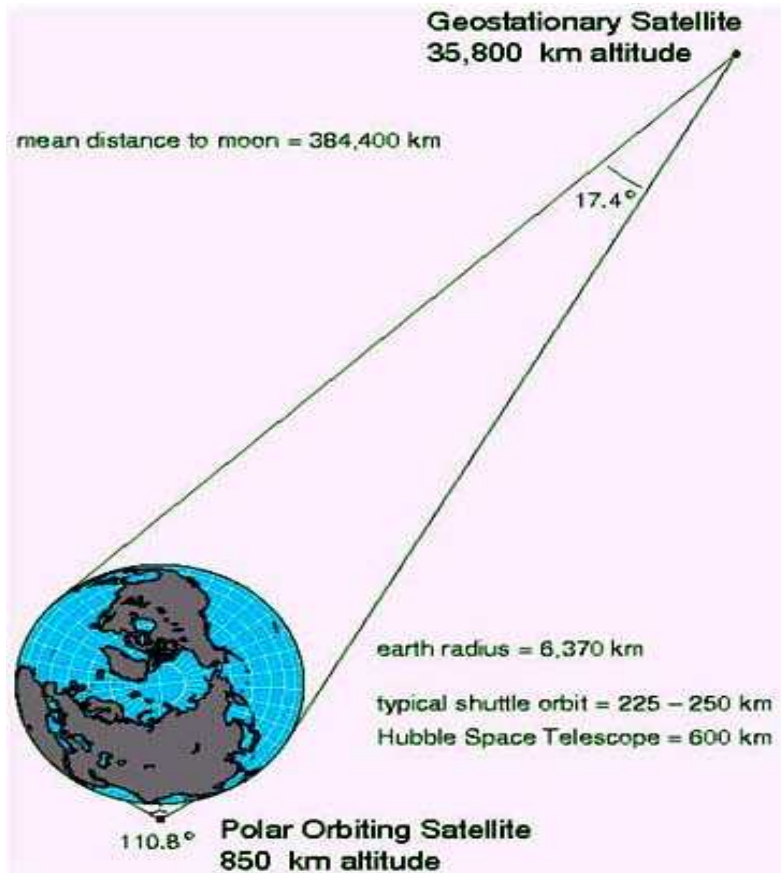


그림 3.2.7 극궤도와 정지궤도의 궤도 특성

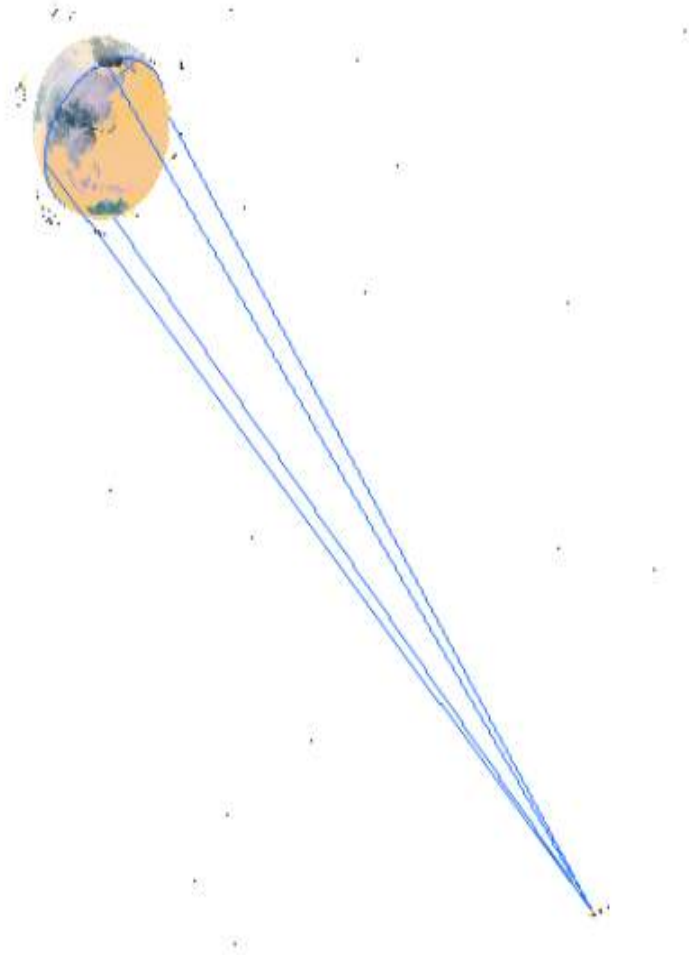


그림 3.2.8 Satscape 프로그램을 이용하여 지구 주변의 극궤도 위성과 정지궤도(GOES-9)의 계산된 궤도 위치를 나타낸 그림으로 작은 점들은 다른 위성의 위치를 나타낸 것이다.

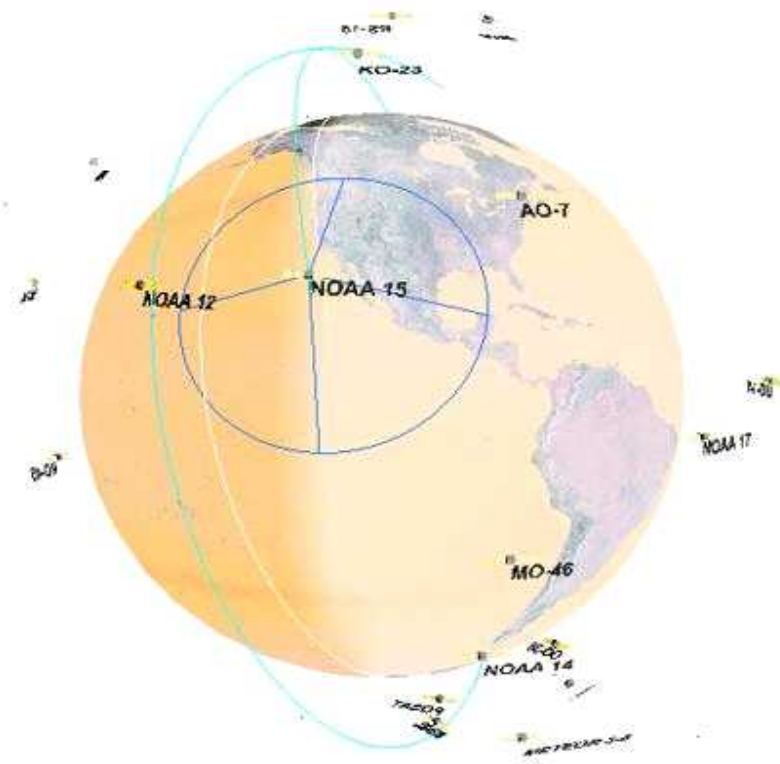


그림 3.2.9 지구 주변의 극궤도 위성

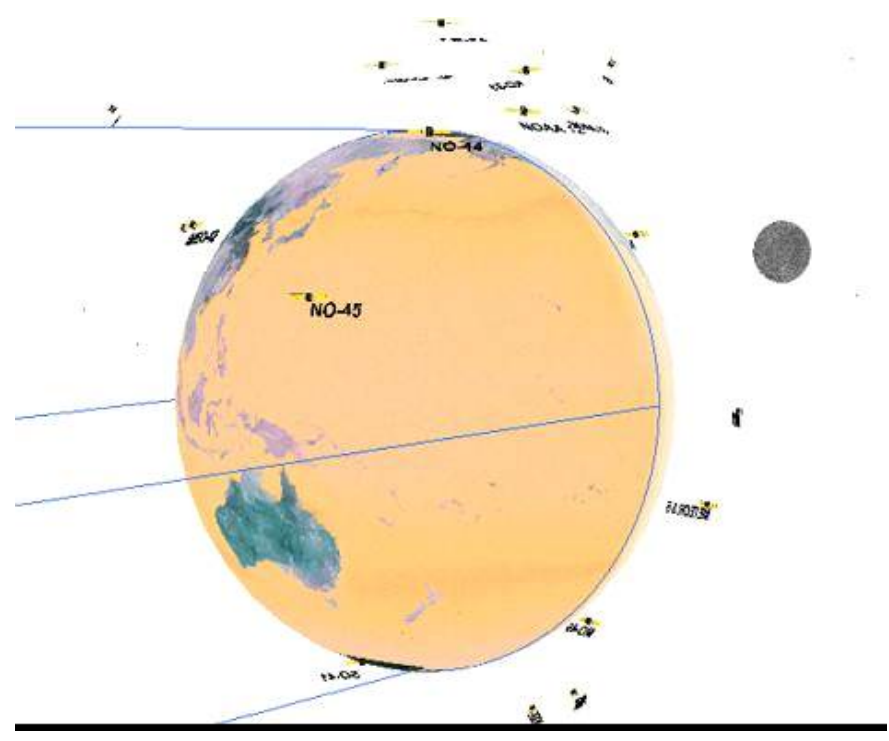


그림 3.2.10 지구 주변의 극궤도 위성과 GOES-9의 관측범위 (회색의 둥근 원은 달의 위치를 나타냄)

나. 지구곡률과 지형왜곡에 의한 자료

위성과 항공기에 탑재된 센서에 의해 영상자료가 취득될 때 화소의 신호 값과 기하조건(geometry)에는 오차가 포함될 수 있다. 전자는 방사학적 오차(radiometric error)라 불리며, 그 원인은 영상자료를 기록하는데 사용된 장치나 대기효과 때문이다. 위성에서 획득되는 영상의 기하학적 오차는 여러 가지로 발생할 수 있다. 예를 들어 위성, 센서, 지구의 상대적인 운동 때문에 영상자료는 왜곡이 발생하게 된다.

센서 자체가 지구관측의 방법에서 이상적이지 못할 경우나, 지구 곡률, 위성의 위치와 고도에 있어 제어되지 못하는 경우, 지구곡률, 위성의 위치와 고도에 있어 제어되지 못하는 변화도 기하학적 오차를 유발한다. 때문에 해색위성영상이 해양환경의 관측에 이용될 때 해수면에서의 신호에 대한 보정과 기하학적 보정은 필요하다. 특히, 해양환경의 여러 응용분야에 있어서 발생하는 오차의 주된 원인에 대해 방사보정과 기하보정이 필요할 것이고, 해색원격탐사 영상에서 흔히 발생하는 방사학적, 기하학적 오차의 특성에 대해 파악하고 오차의 보정에 사용될 처리방법을 알아보는 것이 매우 중요하다. GOCI의 경우 이러한 오차 발생은 지구곡률과 한반도가 북위 36도에 위치하고 있어서 지형적 오차가 발생하는 것을 고려해야한다.

방사학적 왜곡의 원인에는 여러 가지가 있으나 위성영상에서 화소의 신호값에 영향을 주는 메카니즘(mechanism)은 두 종류의 방사학적 왜곡으로 나타난다. 첫째는 주어진 단일 밴드에서 신호값의 상대적 분포가 지상의 실제 신호값의 분포와 다를 수 있다. 둘째는 한 화소에 대한 여러 밴드의 신호값이 지상의 그 지점에 대한 분광반사특성과 비교했을 때 다를 수 있다. 두 종류의 왜곡은 방사에너지가 에너지원으로부터 센서에 이르기까지 통과하는 전달 매질인 대기 때문에 발생하고 또, 측정기기의 오차 때문에도 발생한다.

방사(radiation)에 있어 대기의 효과는 태양이 에너지원인 수동원격탐사시스템에서 한 화소의 신호값에 대기가 주는 효과를 나타내고 있는 것으로 대기가 없는 상태에서 센서에 의해 측정된 신호는 화소에 입사한 태양의 에너지와 화소 자체의 반사특성에 관한 함수이다.

1978년 10월에 Nimbus-7 위성에 탑재되었던 CZCS(Coastal Zone Color Scanner)는 위성에 장착되어 해색을 관측한 최초의 센서이다. 높은 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio)를 가지고 해색을 관측함으로써, CZCS는 해수의 내용물에 대응되는 색채를 분석하는 원리를 제공하였다. CZCS에 의해 획득된 해색 자료들은 해수 내 성분들의 집중도와 기타 부유물들의 지도를 작성하는데 이용되었고, 적외선 영역에 의해 획득된 자료는 해수의 온도를 측정하는데 사용되었다.

CZCS는 Cassegrain 망원경의 광축에 45°의 각도에서 회전하는 평면 거울을 이용하는 전형적인 다중 영역 촬영 기기이다. 회전 거울은 360°를 촬영했지만 단지 위성의 직하점에 대해 $\pm 39.34^\circ$ 내에서 관측된 자료들만이 해색 관측 자료로써 활용되었다. 이는 위성센서에서 관측되는 해색자료가 직하점에서 멀어질수록 지형효과에 의한 왜곡이 발생하기 때문이다. 이러한 원리에 의해 해양에서 관측되는 신호는 태양 고도와 위성의 관측 각도가 중요한 의미를 갖는다.

정지위성에서 해색을 관측하는데 있어서 제기 될 수 있는 문제점은 두 가지이다. 첫째, 정지위성이 적도 상공에 위치함으로써 한반도를 관측할 때 지형적인 곡면 왜곡이 일

어난다는 것이고(그림 3.2.11), 위성관측시 연직방향에서 멀어질수록 하나의 화소가 대표하는 면적이 넓어진다는 것이다(그림 3.2.12).

그림 3.2.12는 이러한 지형왜곡을 모식하여 나타낸 것이다. 또한 그림 3.2.11과 같이 한반도가 북위 36도에 위치하고 있어서 한반도의 남쪽 보다는 북쪽에서 곡면 왜곡의 현상이 클 것으로 예측된다. 본 연구에서는 예상되는 경도 위치에서 이와 같은 왜곡을 추정하기 위해 IDL 프로그램을 작성하고 GOCI의 경도위치에 따른 화소단위의 왜곡을 추정하였다.

그림 3.2.13은 파노라믹 왜곡과 지구곡률에 의한 왜곡의 발생을 나타낸 것으로 GOCI는 촬영(주사)방향에 파노라믹 왜곡과 한반도가 북위 36도에 위치함으로써 지구곡률에 의한 왜곡이 나타나고 있다.

그림 3.2.14는 GOCI가 동경 127도에 위치하는 것을 가정하여 관측되는 한반도의 위치를 IDL 프로그램을 이용하여 나타낸 것이며, 그림 3.2.15는 GOCI가 동경 155도에 위치하여 관측할 경우 한반도가 관측되는 위치를 나타낸 것이다. 그림 3.2.16과 그림 3.2.17를 통해 한반도는 GOCI의 적도상 위치에 따라 지형왜곡과 지구곡률의 왜곡정도가 크게 달라지는 것을 예상할 수 있다. 즉, GOCI의 적도상 위치가 동경 155도에 위치할 경우 한반도는 좌측으로 편기되어 관측됨으로써 동경 127도에서 관측할 때 보다 좌상단의 화소에서 가장 큰 지형왜곡이 나타난다. 이를 수치화하기 위해 먼저 지구타원체를 설정하여 그림 3.2.18과 같이 Nadir 방향과 off-nadir 방향에서 각각의 화소에 나타나는 왜곡률을 정의하였다.

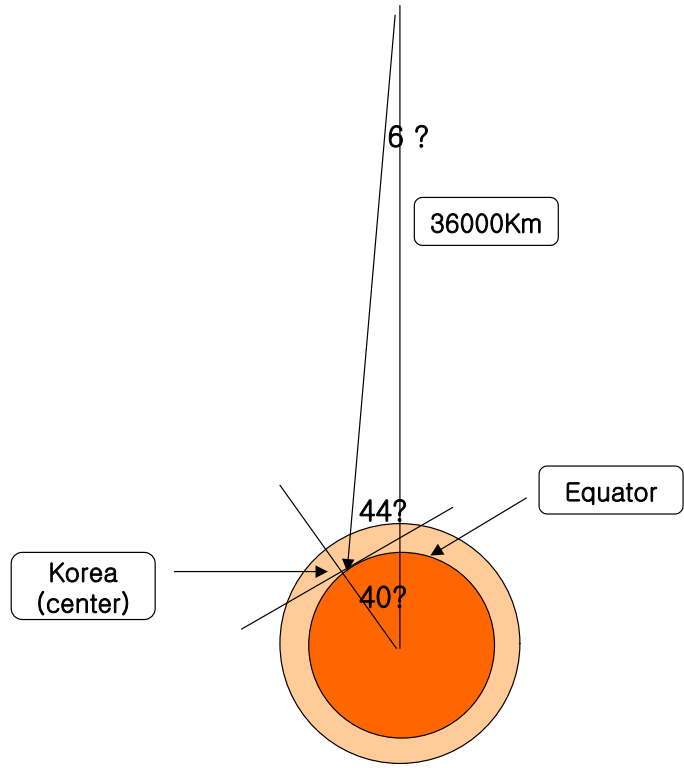


그림 3.2.11 한반도의 위치에 의한 지구곡률 왜곡

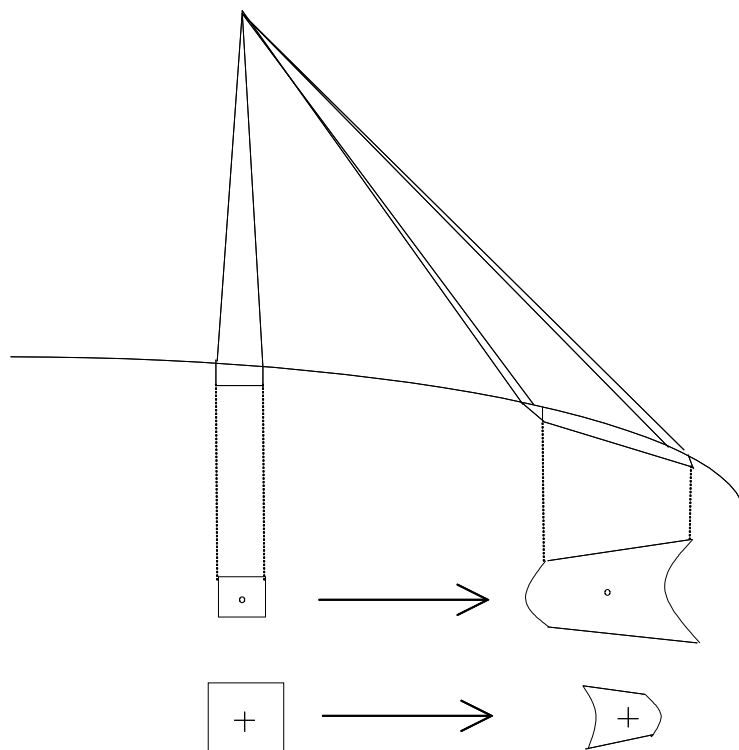
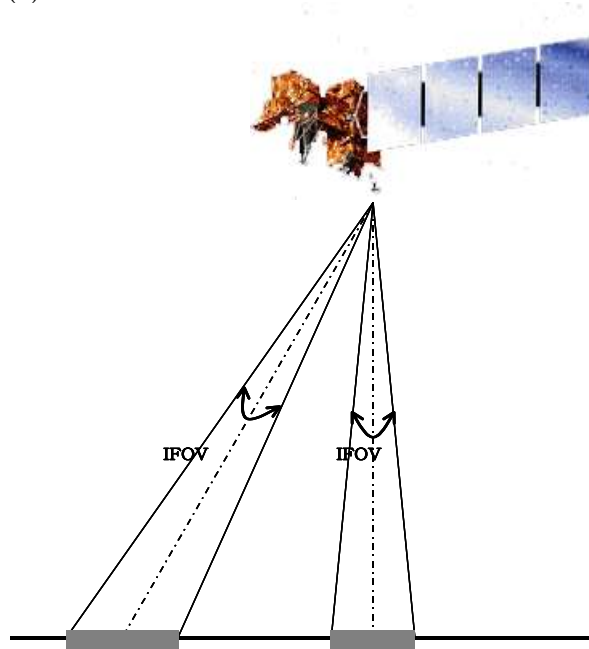


그림 3.2.12 직하방향에서 멀어질수록 나타나는 지형왜곡

(a)



(b)

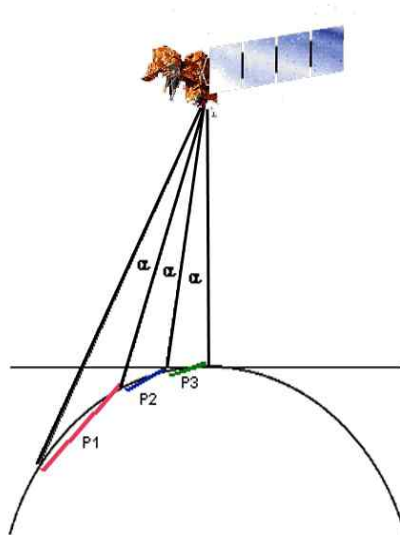


그림 3.2.13 파노라믹 왜곡(a)과 지구곡률에 의한 왜곡(b)를 비교하여 모식적으로 나타낸 것으로 극궤도 위성과 정지궤도위성에서 관측할 때의 지형왜곡 관측

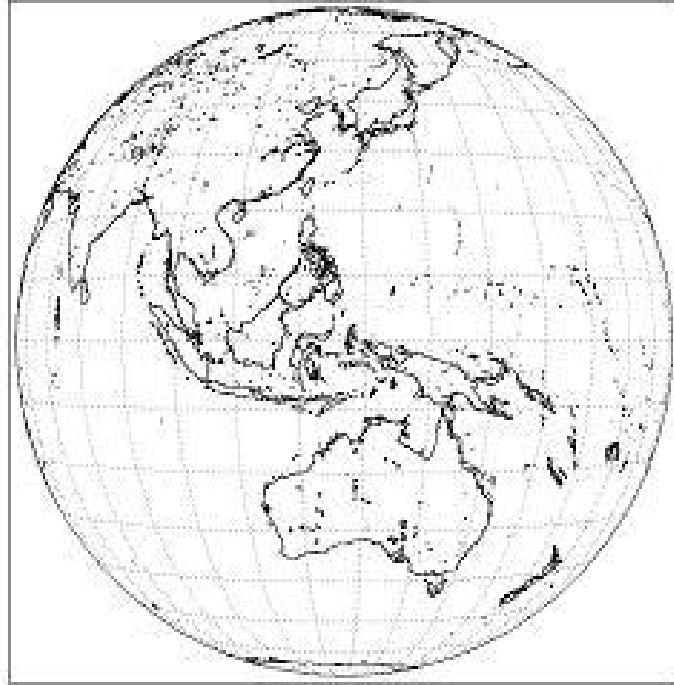


그림 3.2.14 GOCI가 동경 127도에 위치하는 것을 가정한 한반도의 위치

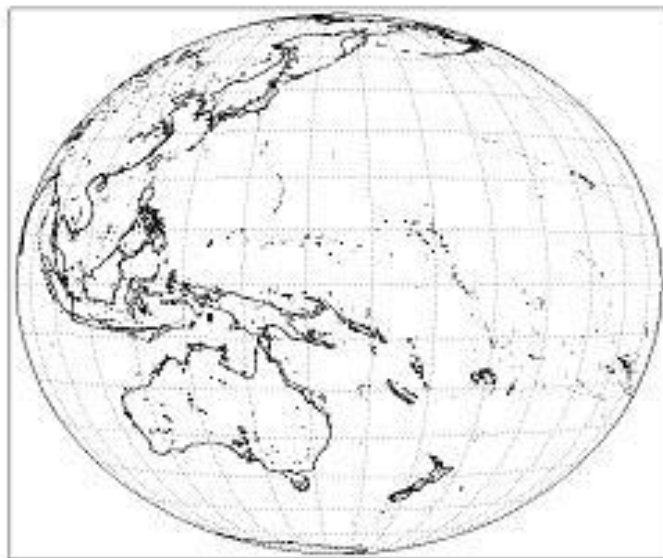


그림 3.2.15 GOCI가 동경 155도에 위치하는 것을 가정한 한반도의 위치

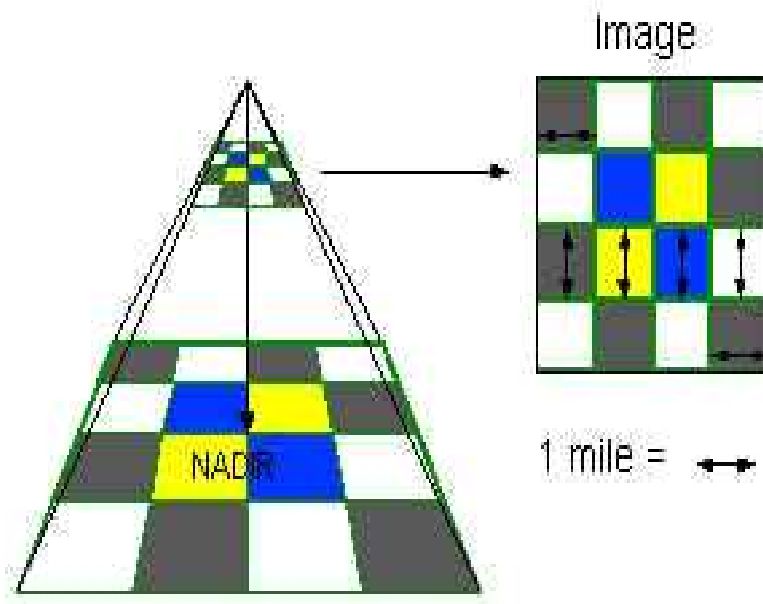


그림 3.2.16 nadir 방향에서의 화소별 왜곡

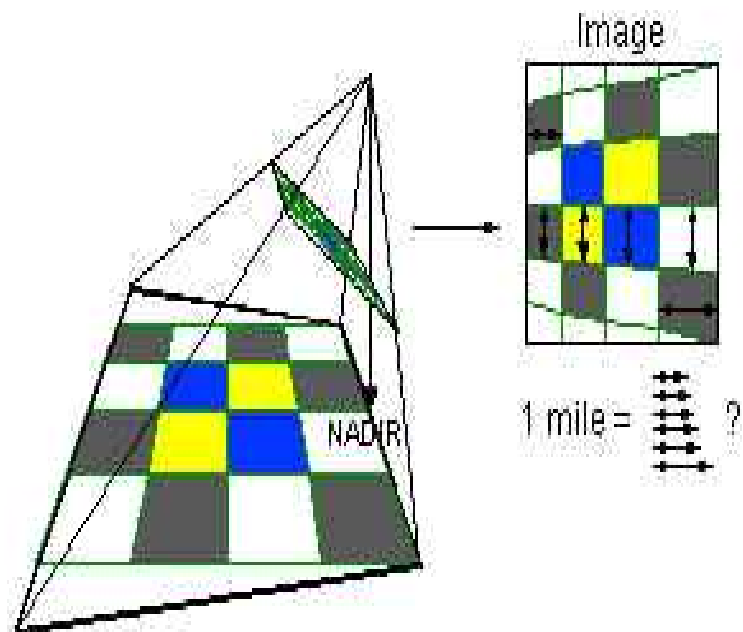


그림 3.2.17 Off-nadir 방향에서의 화소별 왜곡

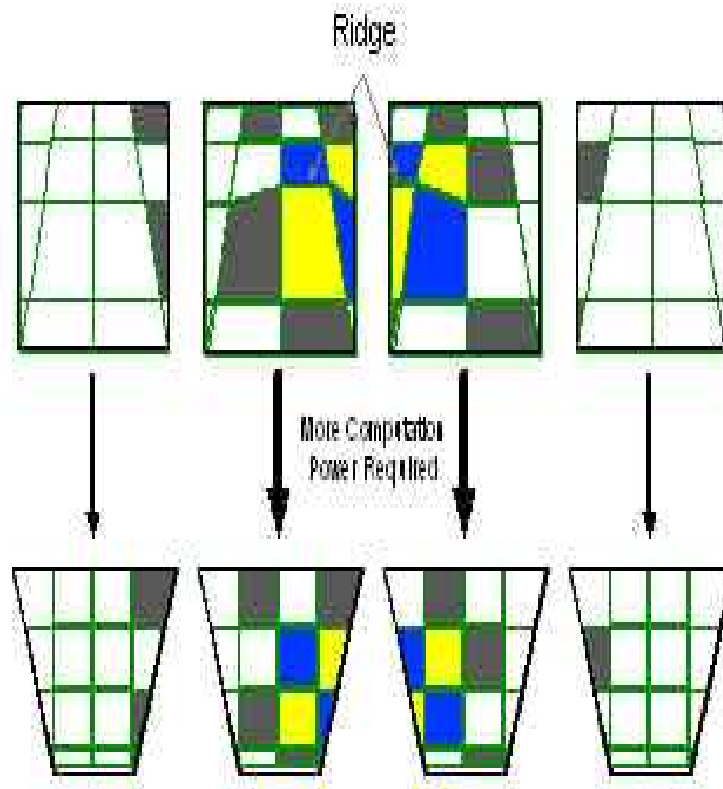


그림 3.2.18 Ortho-rectification의 원리를 이용한 왜곡률 계산

다. 공간해상도 변화에 의한 GOCI 자료 비교

본 연구에서는 공간해상도의 변화에 의한 해양환경관측의 차이를 해색원격탐사자료와 Landsat 자료를 이용하여 분석하였다. 해양환경을 나타내는 위성 영상은 해양환경의 정보를 담고 있으므로 해상도가 변화함에 따라 축척 효과(scale effect)에 의해 관측특성이 변화한다. 따라서 적조, 부유사의 이동과 같은 해양환경의 변화는 다양한 해상도의 원격탐사 영상으로부터 분석하여, 해양환경 연구에 적합한 환경변화현상이 나타나는 적정 해상도(optimum resolution)를 선택하여야 한다.

해색센서의 다양한 해상도를 해색 영상으로부터 적정 해상도에 대해 탐색하기 위해서는 해상도의 변화에 따른 영상의 특성을 객관적 지수로 산출할 필요가 있다. 이 지수는 공간해상도 변화에 따른 위성영상의 특성 변화를 대표하는 값으로 정의하여야 하지만, 해양환경의 관측 요소는 특정한 해양 환경 인자에 의해 공간해상력의 표현이 달라진다. 즉, 해상도에 따라 영상의 특성을 표현하는 지수의 값이 변화하기 때문에 이의 변화를 분석하면 적정해상도 탐색이 가능하다.

한편, 해상도에 따라 변화하는 영상의 특성을 표현할 지수는 다음과 같은 요건을 고려하여 선정하였다. 첫째, 해상도에 따른 변화를 명확히 표현하여야 한다. 즉, 해상도의 변화에 따른 지수의 민감도(sensitivity)가 높아서 영상 특성의 변화에 민감하게 반응할 수 있어야 한다.

둘째, 영상의 처리과정이 효율적이어야 한다. 일반적으로 영상으로부터 필요한 속성을 파악하기 위해서는 영상의 전처리, 훈련지역 설정, 영상의 분류, 정확도 평가 등 일련의 영상처리 절차를 필요로 한다.

셋째, 속성정보의 분류 정확도가 반영될 수 있어야 한다. 원격탐사 영상은 최종적으로 지표면의 속성정보로 변환되며 이러한 속성정보의 질을 평가하는 방법이 분류정확도이다. 따라서 분류정확도는 다양한 해상도로부터 분류된 속성정보의 질을 평가하는 주요한 수단 중의 하나이다. 해상도의 변화를 측정하는 지수는 원격탐사 영상으로부터 파악되는 속성정보의 변화를 표현하여야 하므로 분류정확도와 밀접한 관계가 요구된다(구자용, 2002).

본 연구에서는 해양관측 영상의 공간해상도에 따른 특성을 이용하여 적정 해상도 탐색에 따른 해양환경 관측의 특성을 실험하고자 한다. 이를 위해 해색위성영상의 해상도를 저감하여 다양한 공간해상도의 해양영상을 제작하고, 생성된 다양한 공간해상도의 영상을 대상으로 구조특성과 속성정보특성의 변화를 파악하여 이를 통해 특정 해양환경현상이 나타나는 특징을 파악하고자 한다.

해양관측 위성자료의 해상도 변화에 따른 영상의 특성을 분석하기 위한 지수는 크게 두 가지 종류로 구분할 수 있다. 첫째는 속성정보 분류과정 이전의 영상을 대상으로 해상도에 따른 특성을 파악하는 지수이다. 기존 연구의 기술통계적 분석이나 국지적 분산, 프랙탈 차원 등과 같이 영상의 공간적 구조특성(spatial structure)을 파악하는데 사용되는 지수들이 여기에 속한다. 둘째는 속성정보의 파악과정에서 훈련지역의 특성을 반영한 지수이다. 해양원격탐사영상으로부터 분류된 속성정보의 특성은 해색영상의 질을 평가하는 중요한 기준이다.

해양원격탐사 영상의 해상도에 따른 변화를 측정하고 적정 해상도를 모색할 수 있는 방안 중의 대표적인 기법이 국지적 분산(local variance)이다. Woodcock와 Strahler(1987)에 의해 개발된 국지적 분산은 3×3의 이동 윈도우(moving window)를 영상 자료에 씌운 후 분산을 계산하는 방법이다. 국지적 분산은 해색원격탐사 영상의 해상도 특성을 측정하기 위해 구조적인 특성을 측정하는 기법이다. 그러나 국지적 분산기법은 영상의 전체 분산에 의존하고 있다는 점이 가장 큰 문제로 대두된다. 즉, 한 영상의 국지적 분산의 측정 결과는 다른 영상의 결과와 비교할 수 없다. 또한 영상의 국지적 분산이 다시 평균으로 요약되기 때문에 영상내에서 분산의 공간적 분포특성을 파악할 수 없는 단점이 있다.

프랙탈 분석은 프랙탈 차원의 측정을 통하여 이루어진다(Lam and Cola, 1993, Lam,1990). Cao(1992)는 위성 영상에 대한 프랙탈 차원을 계산하기 위한 Isarithm 기법, Variogram 기법, Triangular prism 기법 등을 비교· 분석하여 이 가운데 Goodchild(1980)가 제안한 Isarithm 기법을 가장 적절한 방법으로 평가한 바 있다. 해양위성 영상의 프랙탈 차원은 일반적으로 2차원과 3차원 사이의 실수값으로 나타난다. 프랙탈 차원의 값이 높을 수록 복잡한 공간구조를 가지고 있기 때문에 해상도에 따른 프랙탈 차원의 변화를 관찰함으로써 공간구조의 변화를 파악할 수 있다. 이러한 원리로 프랙탈 차원을 구하여 해상도에 따른 영상의 특성을 수치로 표현할 수 있다.

원래의 해양관측 영상이 가지고 있는 분포특성이 해상도 저감과정에서 어떻게 변화하

였는가를 파악하기 위해서는 평균영상 이외에 분산영상(variance image)이 필요하다. 분산 영상은 원래의 영상이 해상도가 저감될 때 변화되는 지역의 분포특성을 나타내는 영상이다. 해상도를 저감할 때 원래의 해상도에서 화소들 간의 이질성이 크면 하위영상의 분산은 커진다. 반대로 화소들이 비슷한 값을 가지고 있으면 하위영상의 분산은 작아진다.

넓고 평활한 지역은 해상도의 저감과정에서 낮은 분산의 값이 기록되며, 좁고 복잡한 지역은 높은 분산의 값이 기록된다. 분산영상과 같이 연속적인 변수를 가지고 있는 자료의 분포패턴은 Moran의 제2측도를 이용한 자기상관 측정이 적합하다(남영우, 1992).

Divergence는 원격탐사 자료의 처리에 이용되는 최초의 통계적 분리도 측정기법 중의 하나로 자주 사용되고 있다. Divergence는 감독 분류의 훈련지역 선정과정에서 수집되는 계급 통계의 평균과 공분산 행렬을 이용하여 계산된다. Divergence를 구함으로써 훈련지역의 영상자료를 계급간의 통계적 분리도를 파악할 수 있다. 그러나 Divergence는 분류계급간의 거리가 멀어질수록 급격히 증가하는 경향이 있어 일반화하기 어렵다는 단점을 가지고 있다(Jensen, 1996).

Jeffreys-Matusita distance는 Divergence를 변형한 Bhattacharyya distance를 지수 변환하여 계산한 값이다. 이 J-M distance는 다변량의 분류계급으로부터 분광분리도(spectral separability)를 계산할 때 Divergence보다 널리 사용되는 기법이다. 그것은 J-M distance가 Divergence가 가지고 있던 distance에 따른 분광분리도의 급격한 증가현상이 나타나지 않기 때문이다. 그러나 계산과정이 복잡하고 많은 처리시간이 소요된다는 단점이 있다.

Mahalanobis distance는 기하학에서 널리 사용되는 유클리드 distance에 자료간의 상관관계나 분포를 함께 고려한 값으로서 인도의 수학자 Mahalanobis가 고안했다. Mahalanobis distance는 유클리드 distance에 계급간의 공분산 행렬을 곱한 값이다. Mahalanobis distance는 J-M distance에 비하여 계산이 간단하고 처리시간도 적게 소요되는 장점이 있다. 또한 Divergence에서 나타나는 계급간 distance에 대한 급격한 분광분리도 증가도 나타나지 않았다. Mahalanobis distance는 이러한 장점으로 분광분리도 측정기법으로 널리 사용되고 있으며, 특히 영상의 분류 방법 가운데 하나인 Mahalanobis 분류법의 핵심기술이다.

해양환경 관측의 적정 해상도 탐색절차는 일반적으로 원격탐사 영상의 적정 해상도는 영상을 분류할 경우 속성정보가 잘 표현되는 이른바 ‘현상반영 축척’에 해당되는 해상도를 일컫는다. 다양한 해상도의 원격탐사 영상으로부터 적정 해상도를 선정하기 위해서는 객관적인 해상도 특성지수를 개발하여 영상의 특성변화를 분석할 필요가 있다. 즉, 영상의 특성을 반영할 수 있는 지수를 선정하고 이 지수의 변화를 분석하여 적정해상도를 선정할 수 있다.

그런데 영상의 특성을 반영하는 하나의 지수만으로 적정해상도를 선정하는 방법에는 무리가 따른다. 해상도 특성을 파악하기 위한 지수들은 개발목적에 따라 각자 다른 특성을 반영하기 때문이다(구자용, 2002).

해양원격탐사 영상으로부터 정보를 파악하는 과정은 기하보정된 영상으로부터 연구지역을 설정하고 이를 바탕으로 적조, 부유사, 연안지형 등의 유형을 분류한 후 이들의 정성적 또는 정량적인 정확성을 평가하는 절차를 거친다.

해색 자료의 해상도에 따른 영상의 특성을 파악하기 위해, 특히 영상으로부터 파악되는

해양환경 속성의 특성을 파악하기 위해서는 이러한 영상처리 과정을 거쳐 정확도가 평가되어야 한다. 그러나 다양한 해상도의 모든 영상으로부터 해양환경의 개별속성을 분류하고 정확성을 평가하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소요된다. 따라서 연구 대상지역의 해석 영상처리 과정을 모두 수행하지 않고서도 해양환경을 관측할 수 있는 위성영상의 생성과 파악된 속성정보를 적절히 표현할 수 있는 해상도의 탐색절차가 필요하다.

지금까지 해양환경 관측을 위한 적정해상도의 선정을 위한 연구는 원래의 영상을 대상으로 해상도에 따른 해양환경관측 대상에 대해 원래의 영상을 대상으로 해상도에 따른 구조적 특성을 파악하는데 집중되어 왔다. 예컨대 국지적 분산과 프랙탈 차원이 여기에 해당된다. 그러나 이들 지수는 영상으로부터 취득되는 속성정보의 처리과정이 반영되지 않기 때문에 속성정보의 변화를 파악할 수 없다는 단점을 안고 있다.

위성영상의 해상도 저감은 다음과 같은 원리에 의해 수행한다. 위성영상은 수치자료의 형태로 되어있어 컴퓨터에서 수치의 조작으로 공간 해상도 변환이 가능하다. 인근의 픽셀의 값을 조합하여 하나의 대표값을 줌으로써 저해상도의 축척으로 변환할 수 있다. 또한 저해상도로 변환된 영상 역시 인근의 픽셀값을 합침으로써 더욱 낮은 해상도의 영상을 제작할 수 있다. 원 이미지를 기반으로 계속 축척을 줄여가면서 낮은 해상도의 영상을 제작하면, 마치 하나의 피라미트와 같은 구조를 이루게 된다. 이러한 축척변형 방법을 피라미트 모형이라고 한다.

원이미지로부터 생성된 여러 가지 축척의 이미지들은 각각 비교, 분석되어 연구자의 분석에 적합한 해상도로 선정된다. 이때 새로운 해상도의 대표값을 부여하는 방법 중에서 가장 보편적으로 사용되는 축척변환 기법이 원래의 화소들의 평균값을 구하여 하나의 화소로 표현하는 평균법이다. 평균법은 전체 영상이 영상의 통계적 특성을 유지하면서, 영상의 내용을 보존할 수 있는 방식이다.

낮은 해상도의 영상을 제작하기 위하여 화소의 평균을 구할 때, 분산(variance)도 동시에 구할 수 있다. 분산은 자료의 산포도를 측정하는 기법으로 평균과 함께 기본적인 통계 특성을 표현할 때 사용된다. 따라서 낮은 해상도의 영상을 제작할 때 평균값을 가진 영상과 함께 분산값을 가진 영상을 동시에 제작하면, 영상의 특성을 분석하는데 더욱 효과적이다.

구체적으로는 영상에서 인접한 화소들을 묶어 새로운 화소를 작성함으로써 해상도를 변화시키고 새로운 영상으로 합쳐지는 화소들 간의 분산을 계산하여 분산영상을 제작한다. 분산영상은 해상도를 저감할 때 저감된 영상과 원래의 영상간의 차이를 표현하는 영상이다. 따라서 분산영상의 공간분포를 분석함으로써 해상도 저감에 따른 영상의 변화를 파악할 수 있다.

위성영상 구조특성의 변화 해상도 탐색은 영상의 특성이 변화하는 해상도를 탐색하기 위한 지수로 분산영상의 공간적 자기상관도를 선정하였다. 해상도의 변화과정에서 파생되는 분산영상의 공간적 분포패턴을 파악함으로써 해상도 변화에 따른 영상의 특성 변화를 분석할 수 있다. 이러한 원리는 웨이브렛 다해상도 분해과정에서 상세영상(detail image)의 해석과 유사한 과정이라 할 수 있다.

1단계: 해상도의 변화과정에서 제작된 분산영상을 대상으로 공간적 자기상관도 측정지수인 Moran's I를 계산한다. Moran's I는 인접한 화소들 간의 차이가 임의적인가 그리고 어떠한 경향을 가지고 있는가를 표현하는 지수로 I의 값이 높을수록 공간적 자기상관도가 높다고 할 수 있다. 공간적 자기상관도가 높으면 공간적 분포패턴은 집중된다. 분산영상의 공간적 분포패턴이 집중되면 해상도 저감에 따른 일부구역의 변화가 크다는 것을 의미한다.

2단계: 각 해상도마다 측정된 Moran's I 값을 해상도에 따라 비교한다. Moran's I 값은 해상도의 변화에 따라 일정한 변화양상을 보이고 있다. 이러한 변화양상을 분석하고 이를 그래프로 표현한다.

3단계: Moran's I 값의 변화를 파악하여 변화 해상도를 선정한다. Moran's I의 변화를 표현한 그래프에서 곡선의 정점에 해당되는 해상도가 영상의 정보가 변화하는 해상도이다. 즉, 원격탐사 영상의 특성이 변화하는 해상도로서 이 해상도를 기준으로 영상의 정보가 변화하며 분류정확도가 저하된다.

분산영상의 공간적 자기상관도 분석을 통하여 영상의 특성이 변화하는 해상도를 탐색할 수 있다. 한편 변화 해상도보다 높은 해상도에서는 해상도의 변화에 따른 분류정확도의 변화가 크지 않다. 그러나 변화 해상도보다 낮은 해상도의 경우 해상도의 변화에 따른 분류정확도의 변화가 심하게 나타나고 있다. 따라서 변화 해상도보다 낮은 해상도 중에서 적정 해상도를 선정할 경우 속성정보의 표현에 적합한 해상도의 탐색 절차가 수반되어야 한다.

해양위성영상의 속성정보 표현에 적합한 해상도 탐색은 해양환경 속성정보의 표현에 적합한 해상도 탐색을 위한 연구지역의 통계정보를 이용한 분광분리도 측정기법을 적용하는 것이 효과적이다.

Markham과 Townshend(1981)의 연구에서와 같이 공간해상도가 영상의 분류결과에 미치는 주요 요인 중의 하나가 분광분리도의 변화이기 때문이다. J-M distance와 Mahalanobis distance가 높게 나타나는 해상도는 분류정확도가 향상되는 해상도로 볼 수 있다. 따라서 이러한 해상도는 영상의 속성정보를 잘 반영하는 해상도라고 할 수 있다. 분광분리도 측정기법을 이용한 속성정보의 표현에 적합한 해상도의 탐색절차는 다음과 같다.

1단계: 원격탐사 영상으로부터 훈련지역(training set)을 설정한다. 훈련지역은 영상으로부터 속성정보를 파악하기 위해 분류 지역의 특성을 전형적으로 가지고 있는 지역으로 선정한다. 선정된 훈련지역은 각 해상도의 영상에 적용된다.

2단계: 각 해상도의 영상으로부터 훈련지역의 통계량을 계산하여 signature 파일로 저장한다. 훈련지역의 통계량으로는 평균, 표준편차, 최소, 최대, 밴드간 공분산 등이 있다. 대부분의 영상처리 시스템을 통해 이와 같은 훈련지역의 통계량을 얻을 수 있다.

3단계: 훈련지역의 통계특성을 담은 signature 파일로부터 분광분리도를 측정한다. 분광분리도 측정기법으로는 J-M distance나 Mahalanobis distance를 이용한다. 이들 분광분리도 측정기법은 영상으로부터 분류되는 속성정보의 분류정도를 예측할 수 있는 기법이다.

4단계: 각 해상도마다 측정된 J-M distance와 Mahalanobis distance를 해상도에 따라 비교한다. 이들 분광분리도는 해상도의 변화에 따라 특이한 변화양상을 나타내고 있다. 이러한 변화양상을 분석하고 이를 그래프로 작성한다.

5단계: J-M distance와 Mahalanobis distance의 변화를 파악하여 영상의 속성정보를 적절히 표현할 수 있는 해상도를 선정한다. 분광분리도의 변화를 표현한 그래프에서 지수의 값이 급속히 증가하는 해상도가 영상의 속성정보를 잘 표현할 수 있는 해상도이다. 특히 변화 해상도보다 낮은 해상도 중에서 분광분리도가 증가하는 해상도는 영상으로부터 파악된 속성정보의 분류정확도가 증가하는 해상도로 파악될 수 있다. 즉, 원격탐사 영상의 속성정보를 적절히 표현할 수 있는 적정 해상도로 선정할 수 있다.

원격탐사 영상의 분광분리도 분석을 통하여 속성정보를 적절히 표현할 수 있는 해상도를 선정할 수 있다. 특히 분광분리도가 증가하는 해상도에서는 분류정확도의 향상을 예측할 수 있다. 이와 같이 분광분리도 측정기법은 변화 해상도보다 낮은 해상도에서 속성정보를 적절히 표현하고자 할 경우 적정 해상도를 선정하는데 사용될 수 있다.

본 연구에서 제안한 적정 해상도 탐색절차는 기존의 해상도 측정기법과 비교하여 다음과 같은 장점을 가질 수 있다. 첫째, 영상의 특성이 변화하는 해상도, 즉 변화 해상도를 우선 선정한다. 즉 기존 방법은 적정 해상도를 선정할 기준이 모호하였지만, 여기서 제안한 해상도 탐색 기법에서는 변화 해상도를 우선 탐색하여 연구자에게 적정 해상도를 선정할 수 있는 기준을 제시한다. 변화 해상도를 기준으로 자료의 질과 양을 고려하여 적정 해상도를 탐색할 수 있도록 분석의 유연성을 부여하고 있다. 영상은 일정 범위까지는 해상도의 변화에 따라 그 특성이 크게 변화하지 않다가 변화 해상도에서 급격히 변화한다. 이보다 낮은 해상도의 영상에서도 지리현상의 축척 효과에 따라 낮은 해상도라 할지라도 높은 수준의 정보를 파악할 수 있다. 둘째, 영상을 분석하여 파악되는 속성의 정확도를 예측할 수 있기 때문에 속성이 선명하게 표현되는 해상도를 탐색할 수 있다.

분광분리도가 증가하는 해상도는 영상으로부터 파악되는 속성정보의 정확도가 높은 해상도라 할 수 있다. 원격탐사 영상의 이용목적은 속성을 파악하여 공간정보로 가공하는 것이다. 따라서 정확한 속성정보가 파악되는 해상도의 탐색이 필요하다. 이때 분광분리도를 이용하여 속성과악에 적합한 해상도를 탐색함으로써 명확한 정보의 파악이 가능하다.

3. 연구결과 및 고찰

가. 정지궤도와 극궤도의 해석관측

Illumination Degradation 이 현상은 태양 입사각이 변화함에 따라 지상 물체에 반사되는 태양광선의 양이 변화함으로써 나타나는 현상이다. 이해를 돕기 위해 동일한 면적에 대해 태양 광선이 수직으로 입사하는 경우와 45도 각도로 비스듬히 입사하는 경우를 가정해 보자. 태양광선이 수직으로 입사하는 경우의 밝기 값을 S라고 했을 때, 45도로 비스듬히 입사하는 경우에는 $S \cos 45^\circ$ 의 밝기 값을 갖게 된다. 즉, 태양광선의 입사각이 적을수록 그 만큼 지표면이 어둡게 나타나는 것이다. 이러한 현상은 태양이 높게 떠있는 낮이 새벽이나 저녁 무렵보다 더 밝은 것을 생각하면 쉽게 이해할 수 있을 것이다.

이러한 태양 입사각의 변화는 결국 인공위성의 센서에 감지되는 영상자료의 밝기에도 그대로 영향을 미치게 된다. 그러나 실제의 경우 대다수의 지구 관측용 인공위성의 궤도가 같은 시각에 항상 같은 지점을 통과하는 태양 동주기 궤도를 따르기 때문에 태양 고도의 변화는 영상 자료의 밝기에 그렇게 큰 영향을 주지는 못한다.

그렇다면 Illumination Degradation에 영향을 주는 것은 무엇일까? 그것은 태양 자체의 고도 변화가 아니라 태양광선이 입사하는 지표면의 고도변화이다. 태양의 고도가 일정한 경우라도 태양광선이 평지에 입사하느냐, 산의 사면에 입사하느냐에 따라 입사광의 세기가 달라지게 되며, 경사가 같은 지역이라도 양지나 음지나에 따라 그 값이 다르게 나타난다. 이처럼 지표면의 경사도나 향에 따라 변화하는 태양광선의 차이는 결국 영상 자료의 밝기 값에 차이를 가져오게 된다. 이와 같이 태양 입사각의 변화를 보정해 주기 위해서는 촬영 시각과 그때의 대기 환경뿐만 아니라 촬영 지역의 지형에 대한 고려가 반드시 병행되어야 한다. 이러한 지형 요소에 대한 보정을 일반적으로 지형 보정(Topographic Correction)이라고 하며 현재 이러한 보정에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

정지궤도와 극궤도의 해석자료를 비교하기 위해 극궤도와 정지궤도의 궤도 특성을 비교하였다. 이를 통해 각각의 궤도 특성에 따른 optical path의 차이를 분석하고자 하였다.

본 연구에서는 정지궤도에서 관측 가능한 범위의 파악과 이때 동일한 관측범위를 갖는 극궤도 위성을 검색할 수 있다. 그림 3.2.19는 극궤도와 정지궤도에 동일하게 적용되는 optical path에 영향을 미치는 범위를 나타낸 것이다. 대기권, 성층권, 열권 등 센서의 관측 각도에 의해 optical path가 달라지는데 이러한 영향이 극궤도와 정지궤도는 위성의 궤도를 판단할 때 각각의 궤도에 의해 optical path에 미치는 영향이 크게 차이를 나타내지 않는 것으로 판단된다.

그림 3.2.20은 극궤도와 정지궤도에서 동일하게 optical path에 영향을 미치는 범위를 나타낸 것으로 두개의 궤도상에서 해석센서에 미치는 optical path 영향은 동일한 것으로 판단된다. 그림 3.2.20과 같이 해수에서 올라오는 신호가 위성의 궤도 위치에 따라 optical path의 차이를 나타내는데 이는 GOCI 정지궤도 해석센서의 경우 낮 시간동안 6회 관측하도록 예정되어 있어서 태양광의 위치에 따른 영향이 더 클 것으로 판단된다.

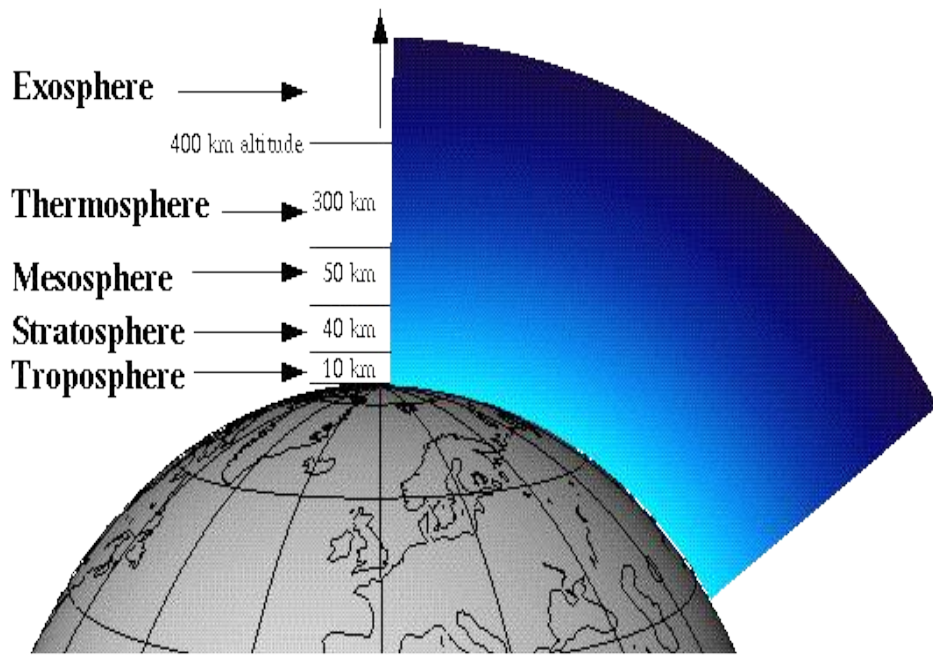


그림 3.2.19 극궤도와 정지궤도에 동일하게 optical path에 영향을 미치는 범위

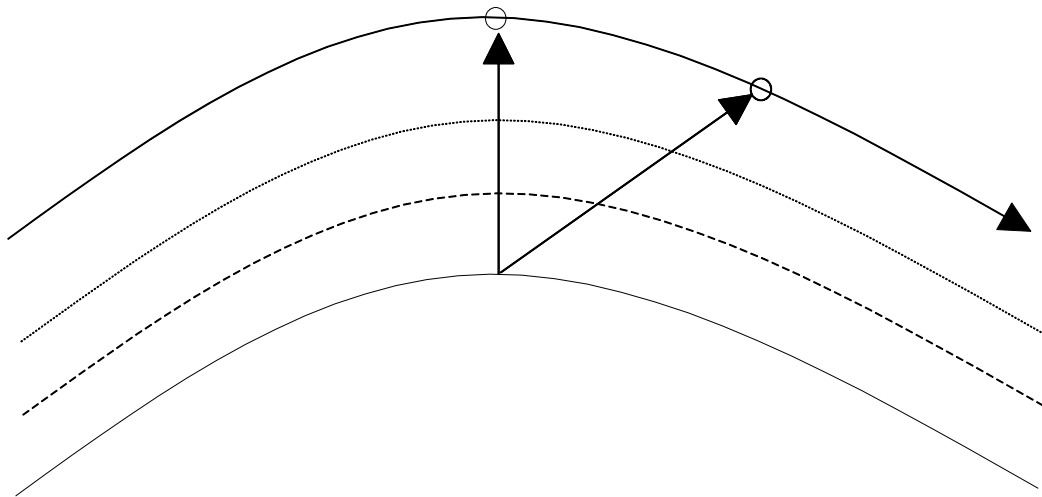


그림 3.2.20 극궤도와 정지궤도에 동일하게 적용되는 optical path

나. 정지궤도에서 GOCI의 경도위치에 따른 해석관측

정지궤도 상에서 GOCI의 경도위치에 따른 해석관측을 비교하기 위해서 본 연구에서는 정지궤도 관측위성을 조사하였다. 정지궤도의 해석센서는 아직 개발되어 발사된 사례가 없으며 GOES-O 또는 GOES-N에 2004년이나 2007년에 SEI라는 해석센서를 탑재하여 발사될 예정이다.

따라서 본 연구에서는 현재 운영 중인 정지궤도 기상위성을 파악하였다. 한반도와 주변 해역의 기상관측에 이용되었던 GMS-5(일본) 위성이 임무를 다함에 따라 기상위성 관측협약에 의해 2003년 4월 26일부터 GOES-9이 한반도 주변해역의 기상관측 자료를 획득하고 있다. GMS-5는 동경 140도 적도상공에서 관측을 하지만 GOES-9는 동경 155도에서 기상관측을 수행함에 따라 한반도 주변해역의 기상자료는 상대적으로 좌측으로 이동되어 관측된다.

본 연구에서는 표 3.2.5와 같은 GOES-9 자료를 동경 113도에서 관측할 경우 관측되는 범위를 시뮬레이션하여 제시하였다(IDL 프로그램으로 작성). 이는 GOCI의 관측 자료를 동경 116도와 동경 127도의 위치 변경에 따라 해석관측 자료의 비교를 위해 GOES-9 자료를 처리하는 IDL 프로그램을 작성하였고 정지위성의 위치가 변하여도 이들의 영상자료를 비교 가능하도록 구축하였다.

표 3.2.5 동경 155도 GOES-9 자료를 동경 113도로 시뮬레이션 하는데 사용된 GOES-9 영상자료

영상 수신 일시	2003년 12월 22일 03시25분 00초
Line	18981
Pixel	10832
resolution	10bit
영상 filename	FD_VIS_20031222032500.raw
보조 정보 1	INPUT_20031222032500.dat
보조 정보 2	IMCSET_20031222032500.dat

표 3.2.5의 자료들은 현재 한국항공우주연구원 위성운영센터 지상수신관제그룹에서 개발, 설치, 운용 중인 MESIS(Meteorological Sensor Ingest System) 시스템이 GOES-9의 Raw bit stream자료에서 추출한 자료들이다. 또한, 본 시뮬레이션에 사용된 FD_VIS_20031222032500.raw는 이미 MESIS 내에서 NOAA에서 제안한 10->8bit 변환 방식에 따라 변환된 '영상'이다.

본 시뮬레이션을 위해 개발된 알고리즘은 다음의 절차에 의한다.

- (1) GOES 위성영상보조 자료들/ 투영 직하점 /정보 지구 물리 상수 /GOES-9 위성 고도정보를
- (2) 지구 투영 영상 평면으로 생성한다

- (3) GOES-9 영상에 대해 Image Navigation을 수행한 후
- (4) 지구 투영 영상 평면에 GOES-9 영상화소를 삽입하고
- (5) 지리정보를 입력한다---> 투영된 GOES-9 영상을 획득한다.

본 시뮬레이션에 사용되는 입력 자료들에는 MESIS를 통해 획득된 8bit 형식의GOES-9 Imager 자료와 그에 대한 보조 자료들 그리고 투영하고자 하는 지점의 지리 정보와 고도 및 지구 물리 상수들이 있다.

시뮬레이션에서 적용된 투영하고자 하는 지점의 지리 정보, 고도 및 지구 물리 상수들은 표 3.2.6와 같으며 WGS(World Geodetic System) 84를 이용하여 지구 타원체를 모델링 하였다.

표 3.2.6 투영 관련 상수

항목	값
지구 중심 ~ 투영점까지의 거리	42,164 km
투영 직하점 경, 위도	(113°E / 0°N)
지구 장, 단반경	(6378.137km, 6356.752km)

지구 투영 영상 평면 생성은 그림 3.2.21과 같은 지구 투영점에 대한 좌표 결정 과정을 통해 설명할 수 있다. 여기서 각 좌표계에서의 P의 좌표는 다음과 같이 정의된다.

- (1) 지구 중심 직각 좌표계에서의 P의 좌표 : (e1, e2, e3)
- (2) 지구 중심 극 좌표계에서의 P의 좌표 : (λ_e, ϕ_e, r_e)
- (3) 위성 중심 직각 좌표계에서의 P의 좌표 : (s1, s2, s3)
- (4) 위성 중심 극 좌표계에서의 P의 좌표 : (λ_s, ϕ_s, r_s)

우선, 지구 투영 영상 평면의 좌표계는 (x, y)로 기술될 수 있으며, (x, y)는 위성의 scan 각도 또는 FOV와 식 (2.1)의 관계를 가지고 있다. 여기서, (Px, Py)는 지구 투영 영상 평면의 ((line 수 1)/2, (pixel 수 1)/2)이며, (338, 337)의 값을 가진다. 한편, ($\theta_\lambda \theta_\phi$)는 지구 투영 영상 평면에 대한 동서, 남북 방향의 FOV이며, (8.60190°, 8.57349°)의 값을 가진다.

따라서 본 시뮬레이션에서 사용된 지구 투영 영상 평면은 (677, 675)의 크기를 가지고 있으며, 위성의 동서, 남북 방향의 FOV는 각각 8.60190°, 8.57349°로 설정하여, 지구 투영 영상 평면의 네 모서리가 투영된 지구의 가장자리와 접하도록 설정하였다. 결과적으로 지구 투영 영상 평면의 모든 화소들에 대한 위성 중심 극좌표계에서의 P의 좌표는 식 (3.2.1)을 통해 획득된다.

$$\lambda_s = -\frac{\theta_\lambda}{P_x} \cdot x, \quad \phi_s = -\frac{\theta_\phi}{P_y} \cdot y \quad \dots\dots\dots (3.2.1)$$

한편, 보조 지구 중심 직각 좌표계를 설정하고 이에 대한 P의 좌표는 (f1, f2, f3)라 하자. 보조 지구 중심 직각 좌표계의 x축은 위성을 향하고 있으며, z축은 북극을 향하고 있으며, y축은 x축과 z축의 외적에 의해 그 방향이 결정된다. 결과적으로 위성 중심 극좌표계에서의 P의 좌표값 (λ_s, ϕ_s, r_s)와 보조 지구 중심 직각 좌표계에서의 P의 좌표값 (f1, f2, f3)은 식 (2.2)를 만족하게 된다.

$$\begin{aligned} f_1 &= h - r_s \cdot \cos \phi_s \cdot \cos \lambda_s \\ f_2 &= -r_s \cdot \cos \phi_s \cdot \sin \lambda_s \dots\dots\dots (3.2.2) \\ f_3 &= r_s \cdot \sin \phi_s \end{aligned}$$

여기서, h는 지구 중심과 위성까지의 거리이다. 한편, 보조 지구 중심 직각 좌표계에서 결정된 P의 좌표값은 식 (3.2.3)과 같은 지구 타원체 모델에 적용된다.

$$\frac{f_3^2}{r_{pol}^2} + \frac{f_1^2 + f_2^2}{r_{eq}^2} = 1 \dots\dots\dots (3.2.3)$$

여기서, (req, rpol)는 각각 지구의 장, 단반경이다. 식 (3.2.2)를 식 (3.2.3)에 대입하면 식 (3.2.4)와 같이 rs의 값을 획득할 수 있으며, 이에 따라 (f1, f2, f3)을 획득할 수 있다.

$$r_s = \frac{h \cdot \cos \lambda_s \cdot \cos \phi_s - \sqrt{(h \cdot \cos \lambda_s \cdot \cos \phi_s)^2 - (h^2 - r_{eq}^2) \cdot \left(\frac{r_{eq}^2}{r_{pol}^2} \cdot \sin^2 \phi_s + \cos^2 \phi_s \right)}}{\frac{r_{eq}^2}{r_{pol}^2} \cdot \sin^2 \phi_s + \cos^2 \phi_s} \dots\dots(3.2.4)$$

따라서, 최종적인 지구 중심 극좌표계에서의 P의 경, 위도값은, (f1, f2, f3)를 이용하여 식 (2.5)를 통해 획득할 수 있다.

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{f_2}{f_1} \right) + \lambda_D, \quad \phi = \tan^{-1} \left(\frac{r_{eq}^2}{r_{pol}^2} \cdot \frac{f_3}{\sqrt{f_1^2 + f_2^2}} \right) \dots\dots\dots (3.2.5)$$

위의 과정을 통해 지구 투영 영상 평면 내의 모든 화소들에 대한 지리 정보들을 획득할 수 있다.

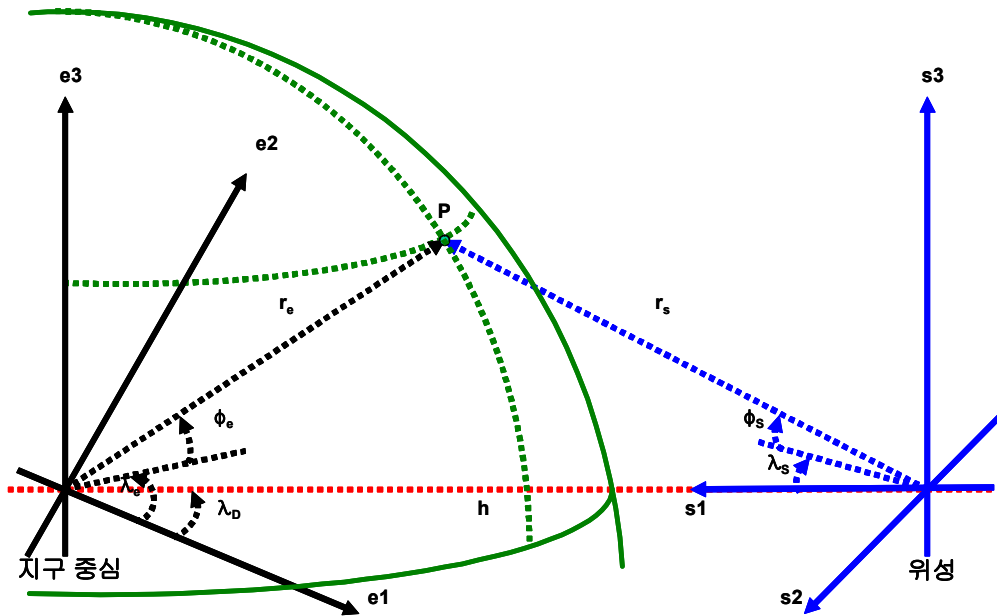


그림 3.2.21 지구 투영점에 대한 좌표 결정 과정

그림 3.2.21은 한국항공우주연구원 위성운영센터 지상수신관제그룹에서 운영 중인 MESIS에서 획득한 GOES-9 위성의 Raw 영상을 시뮬레이션 과정을 거쳐 결과 파일로 생성될 지구 투영 영상 평면의 모든 화소들에 대한 지리 정보들을 나타낸다.

지구 투영 영상 평면의 모든 화소들의 지리 정보들에 해당하는 GOES-9 위성 영상의 (line, pixel) 위치를 획득할 수 있으면, 해당 지리 정보를 가지는 GOES-9 위성 영상 화소값을 지구 투영 영상 평면의 각 화소들에 삽입하면 최종적인 지구 투영 영상을 획득할 수 있을 것이다. 이를 위해서는 특정 경, 위도에 대한 GOES-9 영상의 대응 화소를 찾는 과정, 즉 Image Navigation 과정이 필요하다.

GOES 위성관련 홈페이지(<http://rsd.gsfc.nasa.gov/goes/text>)에서는 GOES-9 영상의 Image Navigation을 수행하기 위해 NOAA의 NESDIS에서 배포한ELUG(Earth Location User Guide, <http://rsd.gsfc.nasa.gov/goes/text/.pdf>)를 발견할 수 있다. ELUG은 한국항공우주연구원 위성운영센터 지상수신관제그룹에서 운영 중인 MESIS 시스템에도 구현되어 있으며, (경, 위도)와 (line, pixel) 간의 양 방향 변환을 지원한다.

ELUG을 이용하면 특정 경, 위도에 해당하는 GOES-9 영상 화소의 (line, pixel) 위치를 획득할 수 있다. 따라서, 획득된 지구 투영 영상 평면의 모든 화소들에 대한 지리 정보를 ELUG에서 제시한 알고리즘을 통해 처리하여 각 화소들에 삽입될 GOES-9 영상 화소의 (line, pixel) 위치를 획득한다.

지구 투영 영상 평면에 GOES-9 영상 화소 삽입과정은 다음과 같다. Image Navigation 과정을 통해 얻은 결과를 지구 투영 영상 평면의 모든 화소들에 대한 지리 정보들에 대한 GOES-9 영상 화소의 (line, pixel) 위치 정보를 이용하여 GOES-9 영상으로부터 지구 투영 영상 평면에 삽입될 화소들을 추출한다. 사용된 GOES-9 영상은 NOAA의 제안에 따라 변환된 8bit의 resolution을 갖는 Imager의 Visible channel 영상이다.

그림 3.2.22는 생성된 (113°E/0°N), 고도 35,786km 상공으로부터 획득된 지구 투영 영상 평면에 GOES-9의 화소들을 삽입한 이후의 모습이며 여기에 지리정보를 입력하여 나타낸 결과이다.

지리 정보 입력의 입력과정은 GOES-9 영상 화소들이 삽입된 지구 투영 영상 평면에 대해 지표의 모습을 나타내기 위한 지리 정보를 씌우는 것으로 설명할 수 있다. 사용된 지리 정보는 IDL(Interactive Data Language)에 내장되어 있는 World Data Bank II의 고해상도 해안선 지도를 이용하였다. 그림 2.18은 지리 정보가 입력된, (113°E/0°N), 고도 35,786km 상공으로부터 획득된, 최종적인 지구 투영 영상을 보여준다.

본 연구에서는 대략 (155°E/0°N), 35,786km의 상공에서 획득된 GOES-9 영상을 이용하여 (113°E/0°N), 35,786km에서 획득될 것으로 보이는 지구 투영 영상을 제작하였다.

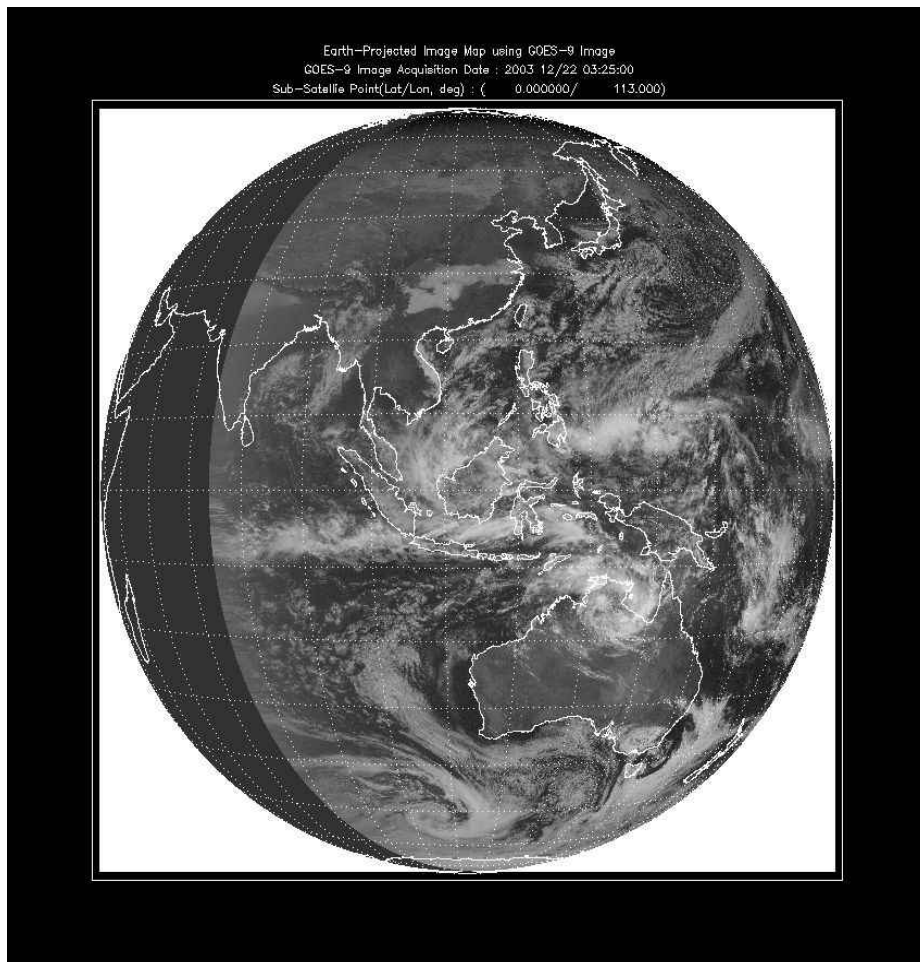


그림 3.2.22 동경 155도 GOES-9 자료를 동경 113도로 시뮬레이션한 영상(GOCI의 관측자료를 동경 116도와 동경 127도의 위치 변경에 따라 관측자료의 비교를 위해 GOES-9 자료를 처리하는 IDL 작성)

위도 및 경도의 차이에 따른 영향은 위성이 어떤 특정 지역을 관측할 때 그 지역이 위성의 off-nadir에 위치하게 되면 nadir에 위치할 때와 비교했을 때 관측되는 영상에 기하학적 그리고 질적인 영향을 미치게 된다. 먼저 기하학적 측면에서 본다면 각도의 편향 및 지형의 왜곡현상이 발생하고 이로 인하여 공간분해능이 감소하는 결과를 가져오게 된다. 이러한 기하학적 왜곡을 보정하는 작업을 orthorectification이라고 한다.

본 연구에서는 그림 3.2.23과 그림 3.2.24의 Ortho-rectification의 원리를 이용한 왜곡률 계산을 수행하였다. 해상도 값의 증가는 그림 3.2.23의 식에서 보는 바와 같다. 한반도의 경우 경도는 그냥 130도라 가정하고 θ 는 6도, ϕ 는 37도의 값으로 계산해보면 공간해상도가 약 1.4배 증가한다.

만약 경도까지도 130도에서 벗어난다면 더 큰 값이 산출될 것이다. 즉 분해능이 떨어질 수 밖에 없다는 결론이 나오게 된다. 위성이 전 지구를 스캔할 경우 foot print의 위도에 따른 지형왜곡 및 분해능의 감소는 이러한 내용들을 기반으로 하여 IDL상에서 프로그램을 코딩하여 시뮬레이션을 해볼 수 있다. 또한 정지궤도위성과 극궤도위성간의 이미지의 질의 차이도 확인할 수 있다.

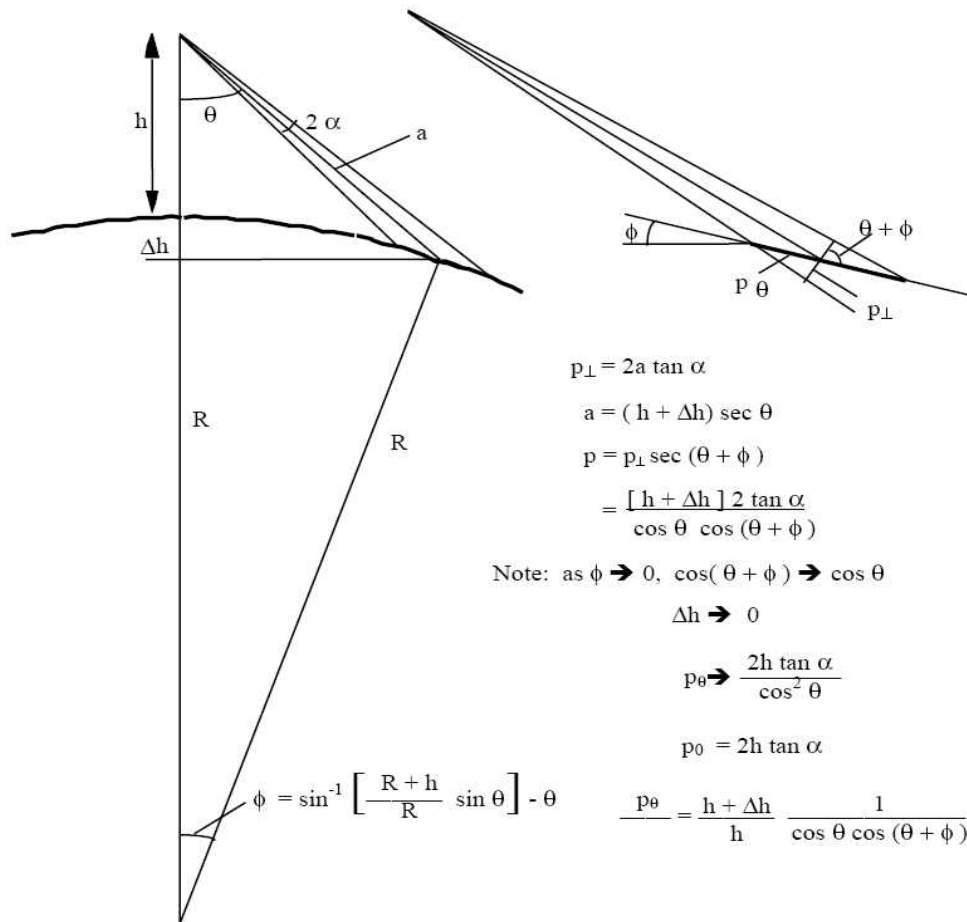


그림 3.2.23 Off-nadir일 때의 도식적인 모습

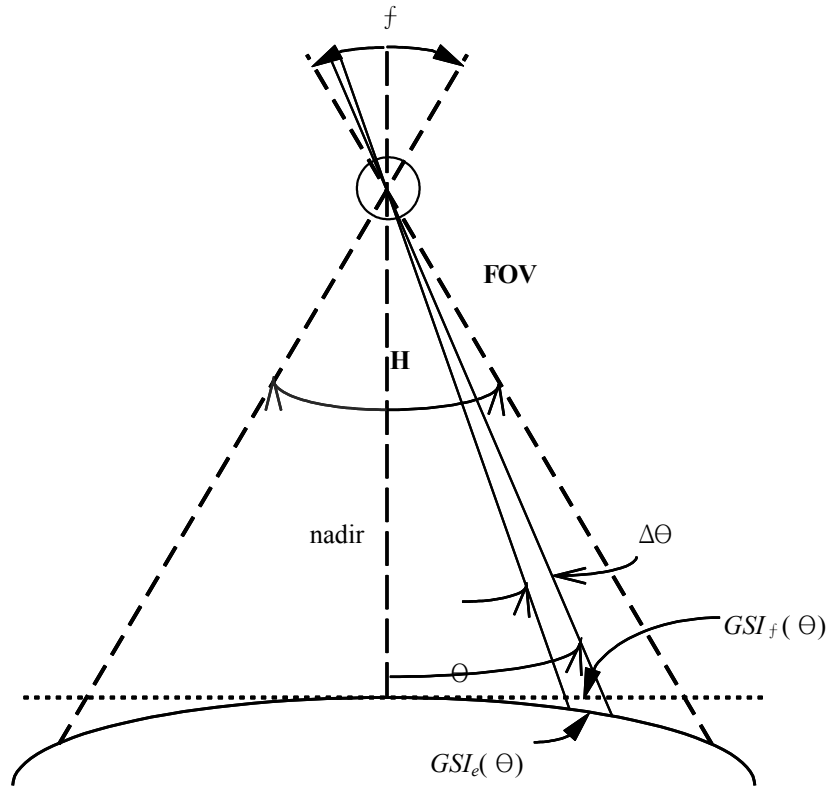


그림 3.2.24 지구 곡면에 의한 왜곡을 직하점과 외각점에 대한 비교

그림 3.2.25는 동경 114도 적도상공에 통신해양위성이 위치하여 관측할 때 화소별로 나타나는 지형 왜곡을 보고한 사례이다. 적도상의 점이 통신해양기상위성의 해석센서(GOCI)의 위치를 나타내며 한반도 주변해역은 정지위성에서 볼 때 북동쪽에 편기하여 나타난다. 이를 통신해양기상위성의 해석센서에서 관측되는 화소의 기준으로 살펴본 것이 그림 3.2.25이다.

그림 3.2.25는 GOCI의 관측영역을 동경 114도 적도상공에서 관측할 때 화소별 왜곡으로 나타낸 것이다. 또한, 그림 3.2.26은 동경 127도 적도상공에서 관측할 때 화소별 왜곡을 나타낸 것으로 적도상의 점이 GOCI의 위치를 나타내며 센서는 적도상공에서 북위 36도 한반도 지역을 관측하는 모습을 볼 수 있다. 이 경우 관측되는 화소의 아래쪽에서 극지 방향으로 화소의 왜곡이 커지는 것을 알 수 있다. 그림 3.2.27은 동경 133도 적도상공에서 관측할 때 화소별 왜곡을 나타낸 것으로 적도상의 점이 GOCI의 위치를 나타내며 정지위성의 위치로부터 한반도는 북서방향에 편기하여 나타난다. 이 경우는 그림 3.2.25의 결과와 반대되는 방향의 왜곡이 커지는 결과를 나타내고 있어서 정지위성의 경도 위치에 따라 한반도 주변해역의 관측 화소에 대한 지형적 왜곡의 차이가 나타남을 알 수 있다.

그림 3.2.28은 GOCI의 관측영역을 동경 114도 적도상공에서 관측할 때 화소별 왜곡을 나타낸 것이며 이러한 왜곡의 정도는 해석센서에서 매우 심각한 영향을 나타낼 것으로 판단된다.

본 연구에서는 극궤도 위성과 정지궤도 위성의 관측 자료를 바탕으로 각 화소단위의

위치와 지형왜곡의 정도를 평가하고자 하였으나 평가대상 화소의 물리량을 극궤도 위성(MODIS)과 정지궤도(GOES-9)의 자료를 통해 비교할 때 표준화할 수 있는 연구가 필요함을 알 수 있었다. 특히 각각의 위성에서 관측 운영되는 센서는 채널의 폭과 민감도가 다르고 10 bit 자료를 8 bit로 전환하면서 관측자료의 정량적인 비교가 어려워졌다.

그러나 경도 위치에 따른 지형왜곡의 정도를 IDL 프로그램으로 계산할 수 있어서 향후 개발되는 센서의 반사치가 직하점의 화소와 가장자리 화소의 왜곡을 정량화하는 연구가 이루어질 수 있다.

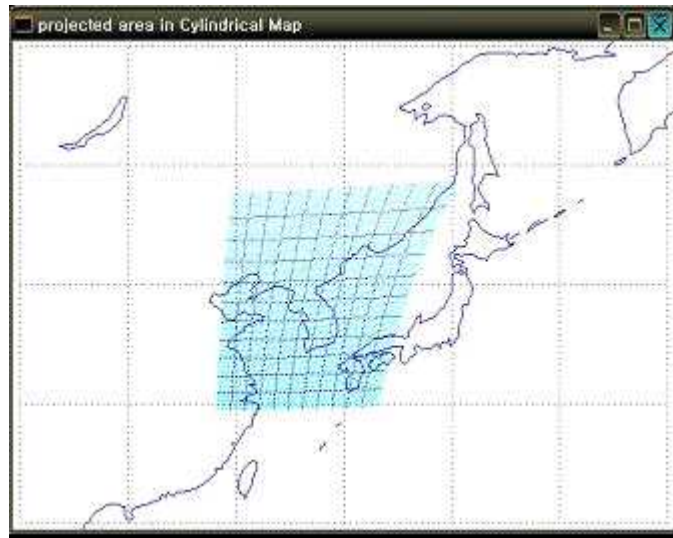


그림 3.2.25 GOCI의 관측영역을 동경 114도 적도상공에서 관측할 때 화소별 왜곡

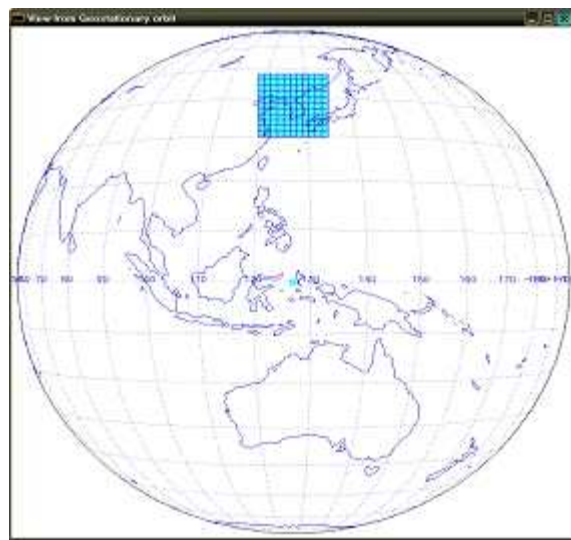


그림 3.2.26 동경 127도 적도상공에서 관측할 때 화소별 왜곡
(적도상의 점이 GOCI의 위치)

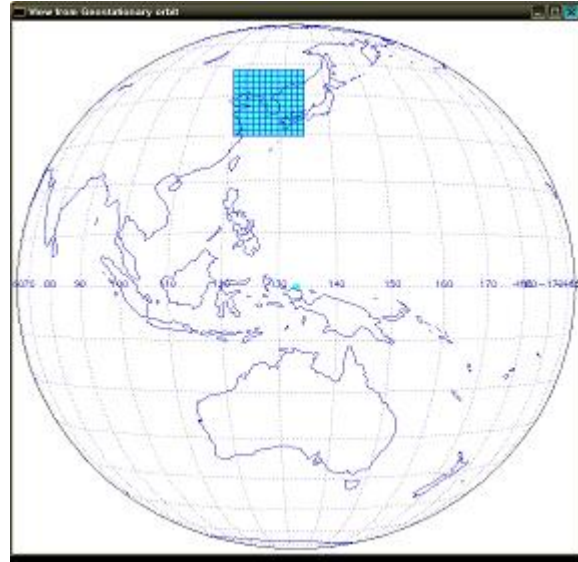


그림 3.2.27 동경 133도 적도상공에서 관측할 때 화소별 왜곡
(적도상의 점이 GOCI의 위치)

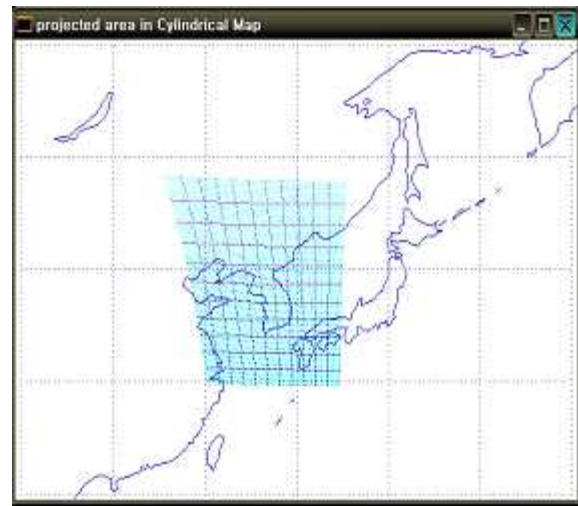


그림 3.2.28 GOCI의 관측영역을 동경 114도 적도상공에서 관측할 때 화소별 왜곡

표 3.2.7은 중급해상도를 가진 극궤도 육상관측센서의 지구곡률에 의한 가장자리 화소의 반사치가 직하점의 화소와 가장자리 화소의 왜곡율을 정량화하는 연구의 사 내용을 본 연구의 결과와 비교하기 위해 제시한 것이다.

표 3.2.7 극궤도 육상센서의 직하점 화소와 가장자리 화소의 왜곡율

sensor	source	effect on imagery	max. error	reference(s)
MSS	non-unity aspect ratio sampling	cross-track versus in-track scale differential	1.41:1	(USGS/NOAA,1984)
	nonlinear scan mirror velocity	nonlinear cross-track distortion	±6 pixels	(Anuta, 1973) (Steiner and Kirby, 1976)
	detector offset	band-to-band misregistration	2 pixels between bands	(Tilton <i>et al.</i> , 1985)
TM	focal plane offset	misregistration between visible (bands 1-4) and IR (bands 5-7)	-1.25 pixel	(Bernstein <i>et al.</i> , 1984) (Desachy <i>et al.</i> , 1985) (Walker <i>et al.</i> , 1984)
SPOT	detector element misalignment	in-track and cross-track pixel-to-pixel positional error	±0.2 pixel	(Westin, 1992)

다. 해양관측 시 공간해상력 비교

연안해양에서 관측되는 다양한 해양환경 요소를 COMS의 해색센서인 GOCI에 의해 관측할 때 해양환경 관측요소에 대한 분석이 다음 그림 3.2.29와 같은 중급해상도를 가진 극궤도 육상관측센서인 Landsat ETM+에 의해 분석되었다. 그림 3.2.29에서 적조는 가시영역 채널에서 분포의 패턴이 잘 나타나고 있으며, 이를 zoom 이미지로 나타내어 적조의 분포가 30m의 공간해상력에서 관측되는 패턴을 분석하였다. 또한, 직사각형 모양의 양식장이 관측되고 있어서 이들의 공간적 분포와 적조의 이동에 의한 연안해역의 적조 피해를 파악할 수 있다. 또한 부유사의 이동과 분포 패턴은 부유사가 지닌 높은 반사치에 의해 적조의 패턴과 구분된다.

본 연구에서는 이러한 적조와 부유사의 공간적 분포와 이동에 대한 위성영상을 통해 관측 가능한 공간해상력을 파악하고 GOCI의 공간해상력에 의해 관측 가능한 해양관측

특성을 비교하였다.

Landsat 위성은 육상을 관측할 목적으로 가시영역에 3개 채널을 가지고 있어서 R, G, B 합성에 의한 True Color 이미지를 생성할 경우 연안 해양 환경의 요소를 관측할 수 있다.

그림 3.2.29에서와 같이 연안에서 관측되는 적조와 부유사의 해양환경요소는 관측 특성이 다양하게 구분되는데 이는 가시영역의 채널에서 가지는 해양환경요소의 반사특성에 기인한다. 적조는 식물플랑크톤의 흡광특성을 지니고 있어서 광의 흡수로 적갈색의 패턴이 관측되고 있다. 이러한 패턴은 연안해역에서 부유사의 반사에 의한 패턴과 구분되는데 그림 3.2.29에서는 해양의 이러한 특성이 잘 나타나고 있다. 특히 부유사 농도가 높은 해역은 부유사의 높은 반사 특성에 의해 밝은 해류의 패턴을 나타내고 있어서 이들을 통한 연안해역의 해수 유동과 적조 분포 및 이동을 파악할 수 있다.

하지만 이러한 적조와 부유사의 관측은 정성적인 분포의 판단에 이용될 뿐 아직 정량적으로 적조의 농도와 부유사의 농도를 Landsat 영상을 이용하여 해석하는 연구는 부족한 실정이다.

그림 3.2.29에서는 적조와 부유사의 공간적인 분포와 크기, 형태, 색상적 특성 등의 요소를 관측할 수 있고, 연안해역의 양식어장 위치와 분포 등을 분석하는 것이 가능하다. 그림 3.2.30은 부산 앞바다의 해역을 나타낸 것으로 낙동강 하구역의 부유사 분포와 부산 앞 해역의 선박의 이동, 선박의 위치, 선박의 수 등이 관측되고 있다.

적조나 부유사와 같은 요소의 정량적인 해석은 해양관측센서에서 이루어지고 있는데 CZCS, SeaWiFS, OCTS, MODIS 등의 극궤도 위성에 의한 알고리즘과 보정 및 검증의 연구를 통해 적조나 부유사의 정량적인 파악을 위한 연구가 이루어지고 있다. 그러나, 적조 발생시점의 극궤도 해색영상에서 적조의 공간적 분포를 구분하거나 국내 연안해역에서의 부유사 농도를 정량적으로 해석한 연구는 일부 수행되었으나, 이를 적용하는 알고리즘의 검증을 위한 연구가 더 추진되어야 한다.

해색위성 자료에 의한 적조의 관측은 외국의 사례에서도 적조의 공간적 분포를 광범위한 영역에서 분석한 일부 연구가 제시되고 있을 뿐 그림 3.2.29와 같은 패턴의 분석이 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이러한 원인이 해색센서의 파장대에 의한 민감도와 알고리즘의 문제에서 원인을 찾기에 앞서 공간해상력에 의한 분석을 하였다.

GOCI와 같은 해색센서는 적조와 부유사의 정량적인 분석에 좋은 가시영역의 파장대를 가지고 있으며, 공간해상력도 300m의 향상된 자료를 얻을 수 있다. 이러한 해상력의 해색자료에 의해 연안해양의 적조와 부유사 분포를 관측할 때 적용 가능성을 평가하기 위해서 그림 3.2.29부터 그림 3.2.43까지 적조와 부유사가 관찰된 영상의 공간해상력을 Nearest neighbor resampling하여 30m의 공간해상력을 가진 위성자료를 100m, 300m, 500m, 1 km의 공간해상력으로 조정하여 적조와 부유사, 연안양식장 등의 관측을 수행하였다. 이를 보다 효율적으로 비교관측하기 위해 본 연구에 사용된 영역 전체 영상과 확대영상, 특정관측 지역만을 ZOOM 영역으로 설정하여 제시한 영상을 같이 비교할 수 있도록 한 장의 그림으로 제시하였다. 그림 3.2.31은 남해 해역의 적조와 부유사 분포를 제시한 것으로 다양한 패턴이 관찰되고 있다.

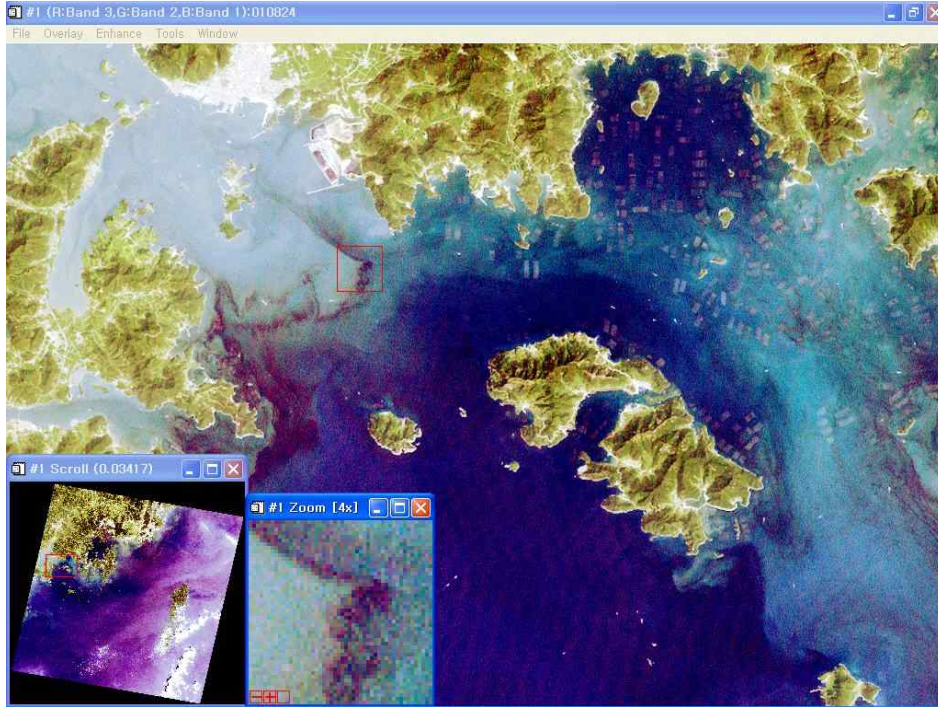


그림 3.2.29 적조와 부유사의 공간적 분포와 양식장의 위치

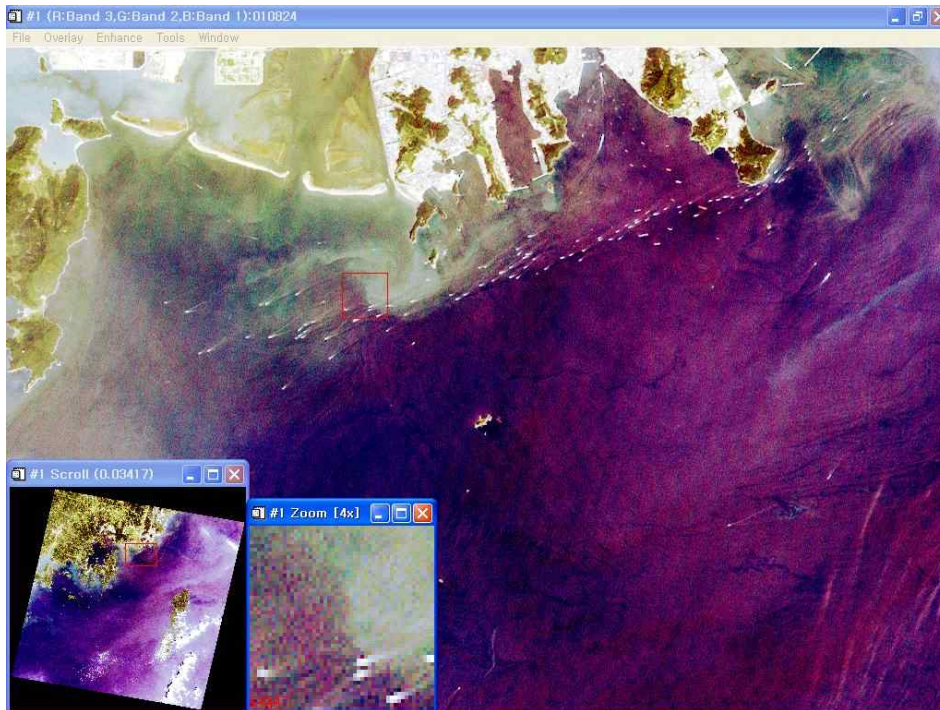


그림 3.2.30 Lansat ETM+영상에 의한 낙동강 하구와 부산 앞바다의 해양환경관측

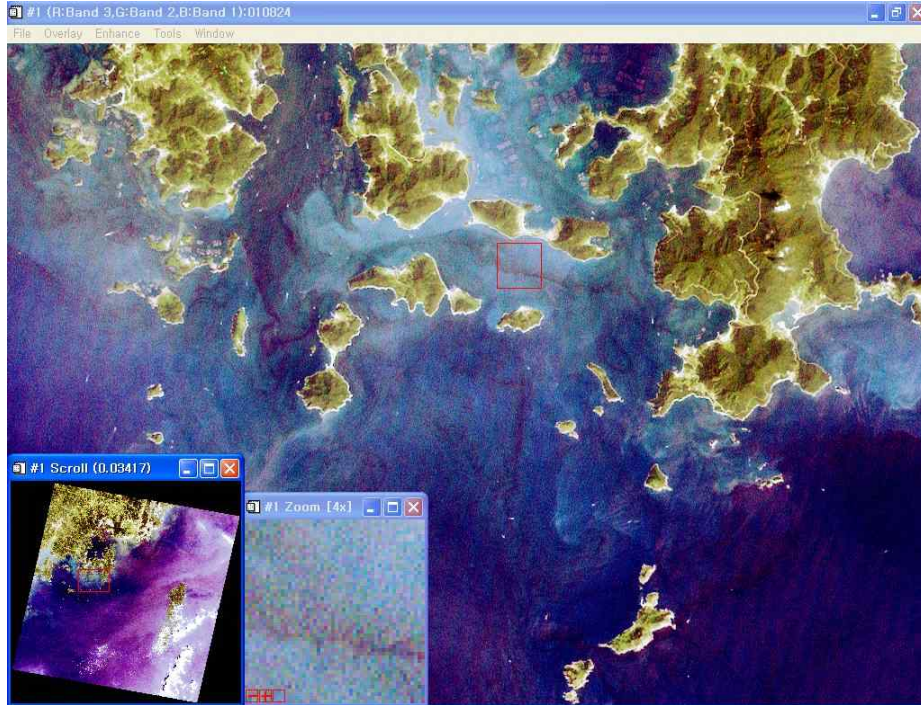


그림 3.2.31 Landsat ETM+영상에 의한 남해 해역의 적조와 부유사 분포

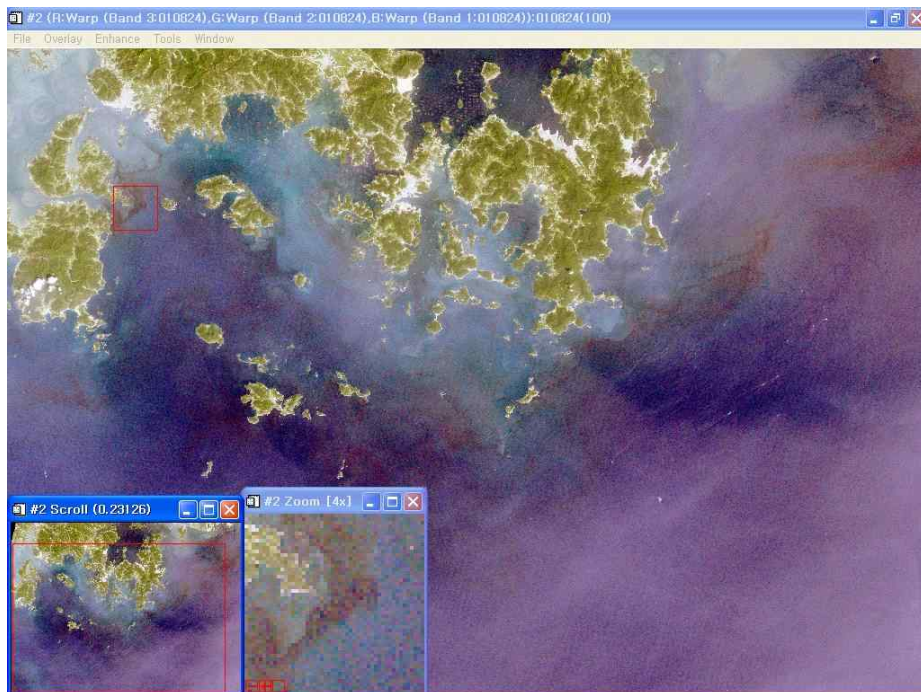


그림 3.2.32 Landsat ETM+영상에 100m 해상력

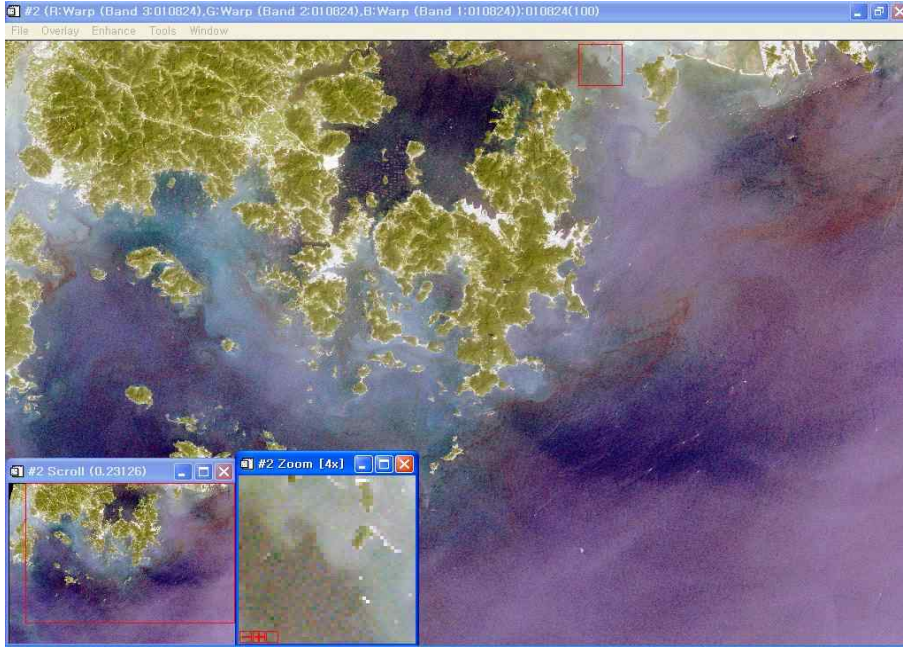


그림 3.2.33 Landsat ETM+영상에 100m 해상력

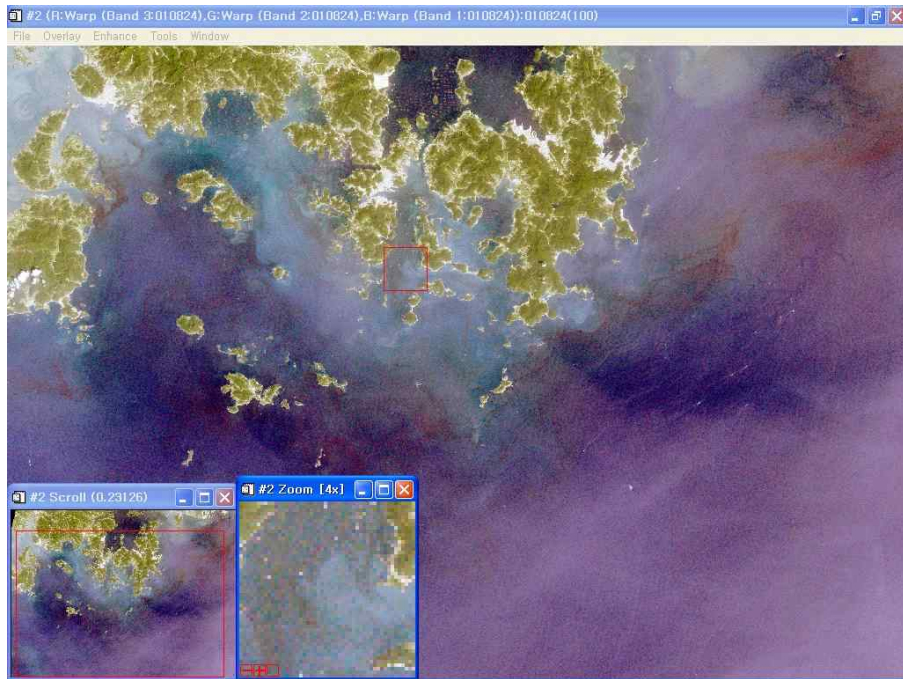


그림 3.2.34 Landsat ETM+영상에 100m 해상력

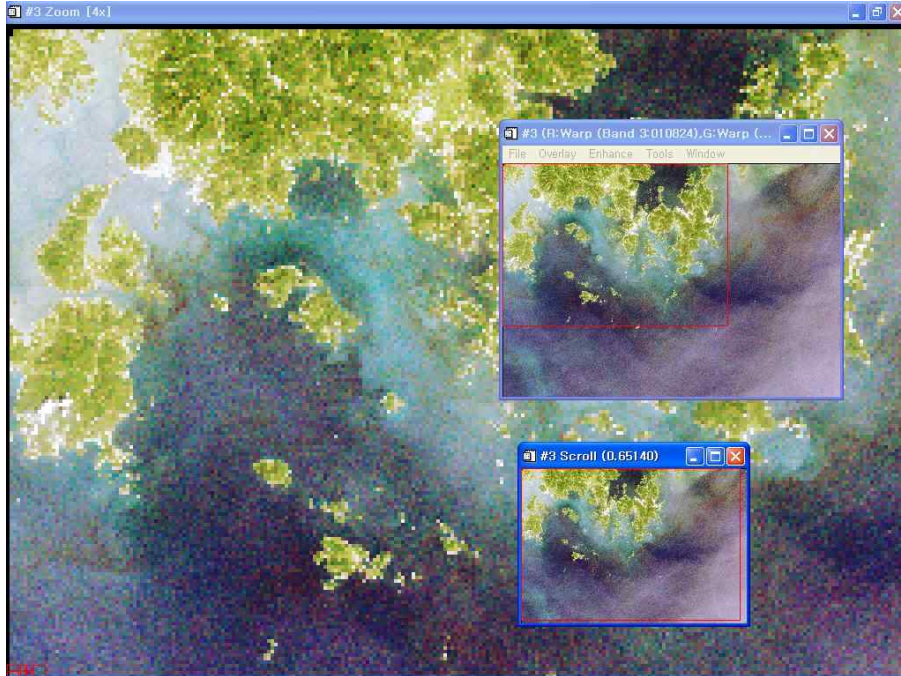


그림 3.2.35 Lansat ETM+영상에 300m 해상력

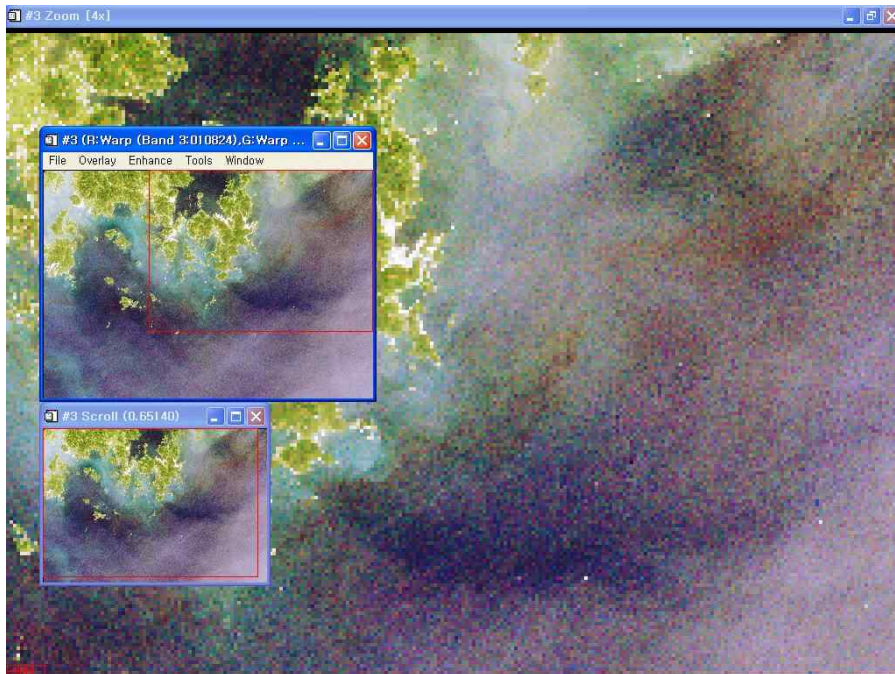


그림 3.2.36 Lansat ETM+영상에 300m 해상력

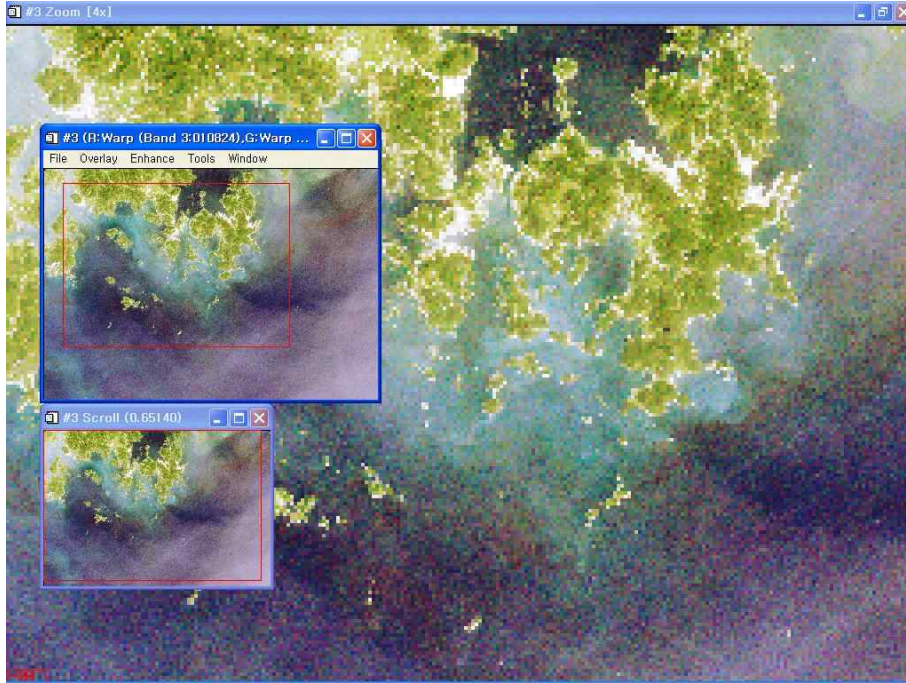


그림 3.2.37 Lansat ETM+영상에 300m 해상력

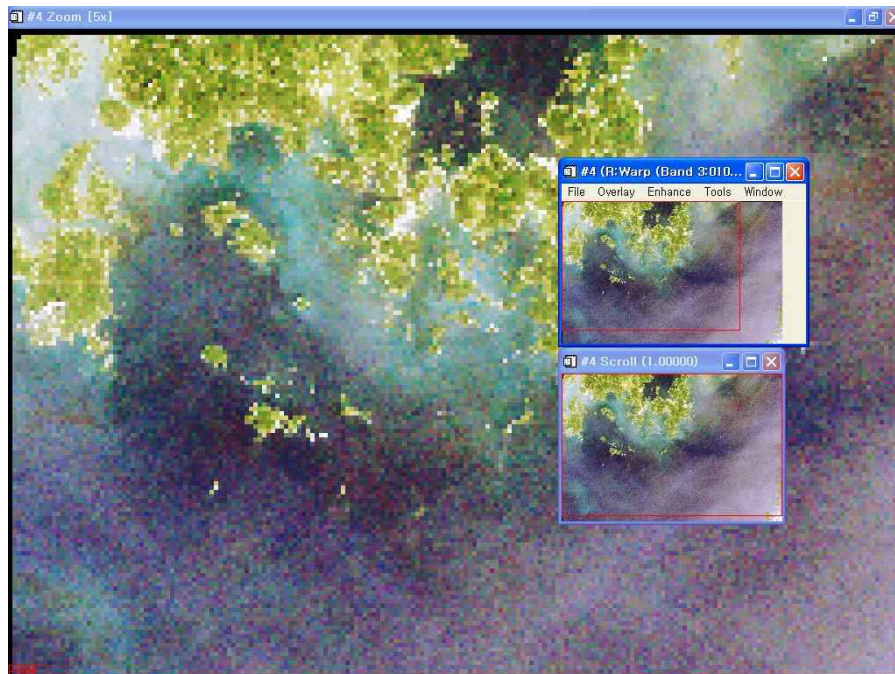


그림 3.2.38 Lansat ETM+영상에 500m 해상력

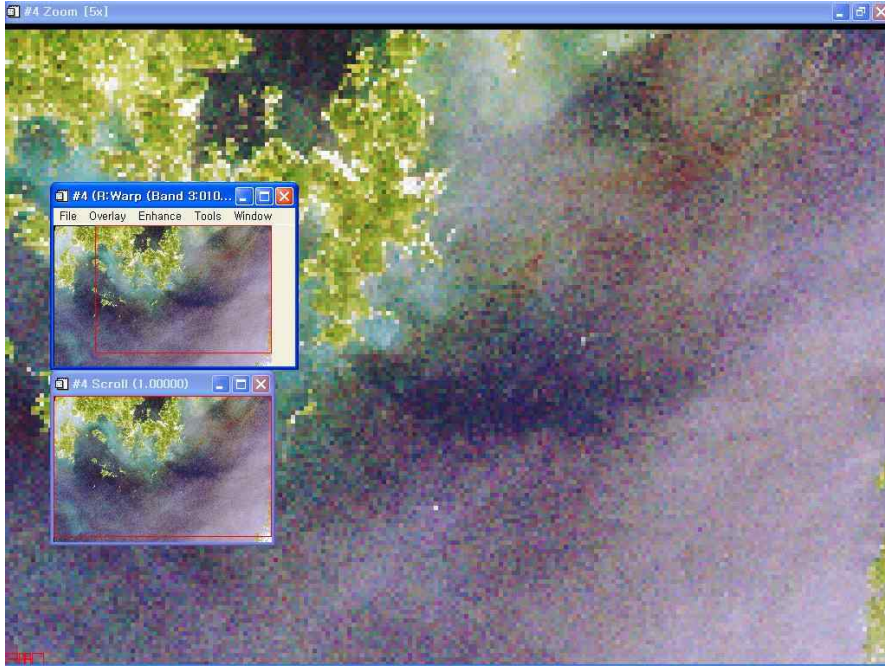


그림 3.2.39 Lansat ETM+영상에 500m 해상력

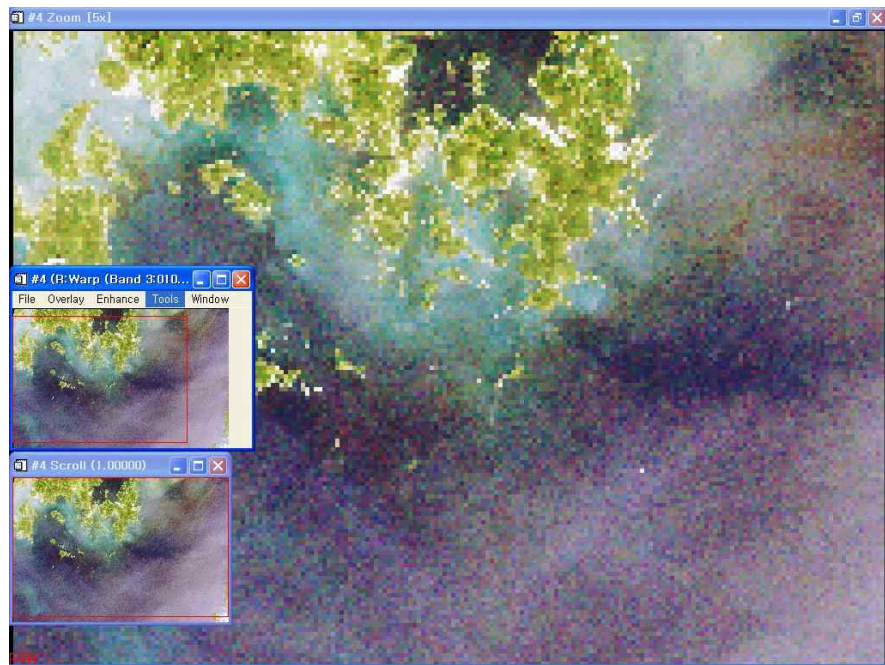


그림 3.2.40 Lansat ETM+영상에 500m 해상력

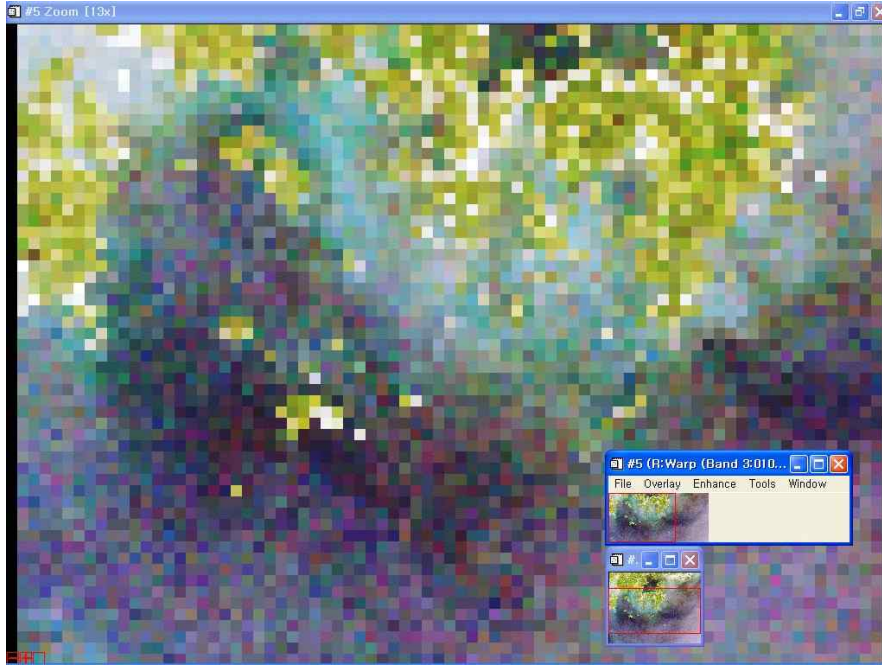


그림 3.2.41 Lansat ETM+영상에 1000m 해상력

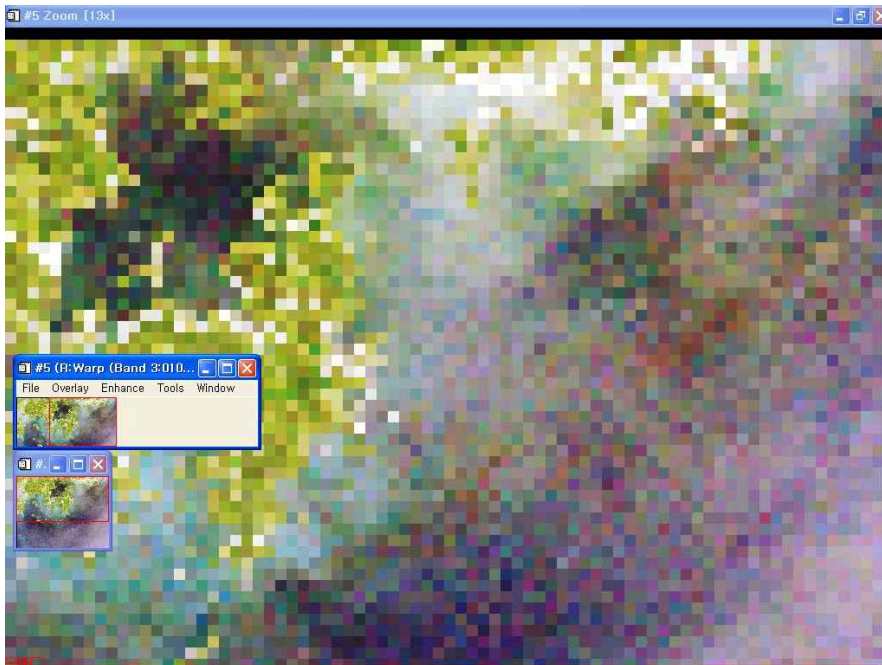


그림 3.2.42 Lansat ETM+영상에 1000m 해상력

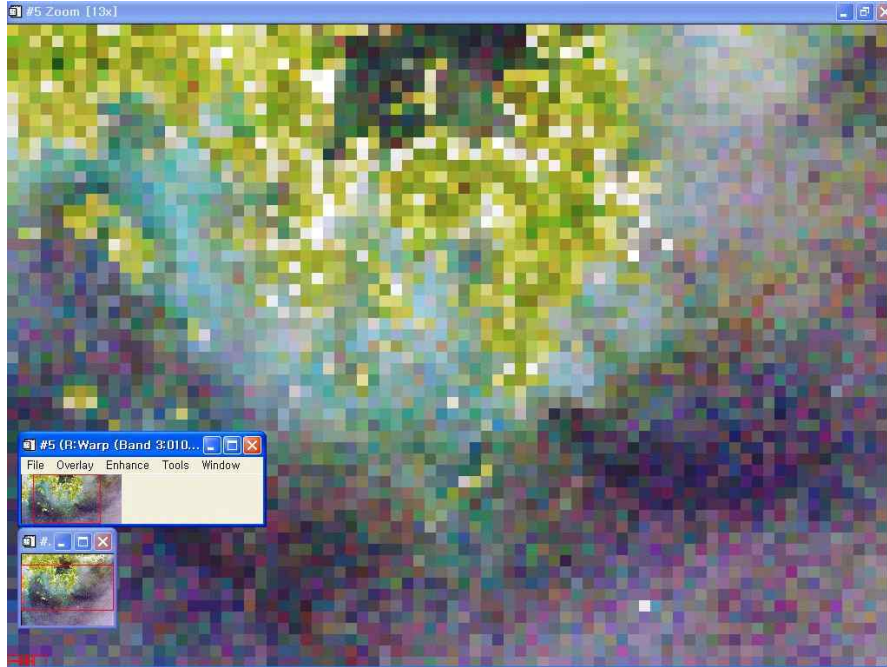


그림 3.2.43 Landsat ETM+영상에 1000m 해상력

그림 3.2.32는 남해안 해역의 적조와 부유사 분포를 100m 공간해상력으로 제시한 것으로 30m의 공간해상력에서 관측되는 다양한 해양관측 패턴이 관찰되고 있다. 그림 3.2.33과 그림 3.2.34는 100m 공간해상력에 의한 관측을 적조의 패턴에 ZOOM하여 적조의 공간적 분포 모양과 색상의 변화 등을 관찰하였다. 연안에서의 100m 공간해상력은 적조와 부유사의 공간적 패턴과 이동의 경향을 판단하는데 좋은 결과를 나타내고 있으나 연안 양식장의 경우 판단이 어려웠다.

그림 3.2.35, 그림 3.2.36 그리고 그림 3.2.37은 300m의 공간해상력에 의한 적조관측 영상으로 인접 픽셀의 반사치에 의한 영향으로 적조 패턴의 구분이 영향을 받고 있으나 뚜렷한 적조의 공간적분포를 파악할 수 있다. 그림 3.2.44는 분석된 위성영상과 동일시점의 현장관측에 의한 적조 분포 지도로 지도에서 적조의 농도가 높고 낮음에 의한 영향에 따른 적조 패턴의 변화가 나타난다. 즉 적조의 농도가 높은 일부 패턴의 경우 위성영상에서도 공간적 분포가 뚜렷하게 구분되지만, 낮은 농도의 경우 해수역의 반사치와 혼합되어 적조의 패턴이 뚜렷하게 관찰되지 않고 구분이 어렵게 나타난다.

GOCI의 경우 300m의 해상력을 가지고 있어서 앞에서 논의한 적조패턴의 관측은 용이하나 적조 농도의 영향에 의해 공간적 구분이 영향을 받을 것으로 판단된다. 그러나, 본 연구에서 적용된 Landsat은 가시영역의 채널에서 민감도가 낮고 밴드 폭이 넓어 적조의 정량적인 해석이 어려운 반면 GOCI에서서는 정량적인 해석이 가능하므로 농도 분포에 따른 적조의 공간분포 구분은 분석 가능한 부분으로 판단된다.

그림 3.2.38은 500m 공간해상력에 의한 적조 관측을 본 연구의 결과와 비교한 것이다. MODIS 해색센서가 가진 500m 공간해상력은 해양환경의 다양한 관측이 용이한 것으로 판단되었고, 해양에서의 클로로필 농도에 대한 관측이 이루어지고 있다. 500m의 공간해상력은 300m의 경우와 같이 적조의 관측 공간분포가 적조의 농도에 의해 구분되는 것으로

로 나타난다. 특히, 그림 3.2.38과 그림 3.2.39를 비교하면 이러한 경향을 뚜렷하게 파악할 수 있다.

그림 3.2.41은 SeaWiFS의 공간해상력인 1 km 해상력으로 자료를 변화하여 나타낸 것이다. 그림 3.2.42와 그림 3.2.43에서 관측할 수 있는 바와 같이 적조의 공간적 분포와 패턴을 구분하기 힘들고 각각 적조 픽셀로 판단된 지역이나 적조의 농도가 높은 지역의 적조 패턴도 구분하기 힘들다. 이러한 경향은 외해역에서 해수의 반사도가 낮은 지역과 적조의 흡광대가 상호 동일한 신호값으로 나타나기 때문이며 적조의 공간적 패취 크기 및 특성이 1 km의 해상력에서는 구분하기 어려운 것으로 판단된다.

과거 SeaWiFS 해색센서에 의해 적조를 관측하고자 하거나 부유사의 정량적 패턴을 관측하는 공간해상력의 문제가 한 가지 원인이 될 수 있다는 것을 본 연구에서 검증하였다. 즉, 연안해역의 부유사, 적조 알고리즘이 현장관측 자료에 의해 이론적으로 잘 구축되었다고 해도 공간적 해석 능력이 중요한 분석 요소가 될 수 있는데 본 연구에서와 같이 적조와 부유사의 공간적 패턴이 지역적인 분포 영역에서 해석되어야 할 경우 1 km 보다 향상된 300m와 500m의 수준을 가져야 한다는 것이다. 최근 발사되어 해색 자료를 제공하고 있는 인도의 OCI가 300m의 해상력을 MODIS가 500m의 공간해상력을 가진 것은 연안에서의 해양환경 관측을 보다 향상시키는데 기여하였을 것으로 판단된다.

4. 결론

정지위성에서 해색을 관측하는데 있어서 제기 될 수 있는 문제점은 두 가지이다. 첫째, 정지위성이 적도 상공에 위치함으로써 한반도를 관측할 때 지형적인 곡면 왜곡이 일어난다는 것이고, 위성관측 시 연직방향에서 멀어질수록 하나의 화소가 대표하는 면적이 넓어진다는 것이다.

본 연구에서는 이러한 지형왜곡을 모사하여 분석하였다. 특히 한반도가 북위 36도에 위치하고 있어서 한반도의 남쪽 보다는 북쪽에서 곡면 왜곡의 현상이 클 것으로 예측되었다.

본 연구에서는 예상되는 해색관측위성의 경도 위치에서 이와 같은 왜곡을 추정하기 위해 IDL 프로그램을 작성하고 GOCI의 경도위치에 따른 화소단위의 왜곡을 추정하였다.

둘째, 정지위성과 극궤도위성의 관측방식이나 관측거리의 문제 등으로 나타날 수 있는 해색관측의 차이를 분석하였다. 해색관측에 있어서의 optical path는 대기구성 성분의 영향이 정지위성과 극궤도위성의 관측범위에서 동일한 효과가 나타날 것으로 분석되었다. 다만 관측 방식의 차이에 의해 nadir 픽셀과 가장자리 픽셀의 지형왜곡이 1.4배 이상 나타나는 것으로 계산되었다.

현재 정지궤도에서 얻어지는 가시영역의 위성영상은 기상위성과 같은 반사도가 높은 구름의 관측을 위해 운영되고 있다. 그러나 해색센서는 해양에서 올라오는 아주 미약한 신호를 분석하여 해색을 관측하고 해수속의 엽록소를 정량화하여야 하므로 이러한 미약한 해수신호를 36,000km의 정지궤도에서 관측하는 것은 많은 문제점들이 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이러한 예측할 수 있는 문제점 중 정지위성이 위치하는 경도 위치와 한반도가 위도 36도 지점에 위치하고 있어서 지구곡률에 의한 지형적인 화소의 왜곡이 발생할 것을 제안하고 이에 대한 문제를 보다 정량적으로 분석하는 연구의 결과를 구축하였다. 특히 정지궤도와 극궤도에서 얻어지는 위성자료를 분석할 수 있는 프로그램을 개발하고 이를 통해 위성의 위치에 따른 시뮬레이션된 위성영상을 제작하였고, 위경도에 따른 왜곡율을 평가할 수 있는 프로그램을 구축하였다.

본 연구에서는 적조와 부유사의 공간적 분포와 이동에 대해 위성영상을 통해 관측 가능한 공간해상력을 파악하고 GOCI의 공간해상력에 의해 관측 가능한 해양관측 특성을 비교하였다. Landsat 위성은 육상을 관측할 목적으로 가시영역에 3개 채널을 가지고 있어서 R, G, B 합성에 의한 True Color 이미지를 생성할 경우 연안 해양 환경의 요소를 관측할 수 있다. 따라서 적조와 부유사의 공간분포가 관측된 위성자료를 공간해상력을 시뮬레이션하여 적조와 부유사의 관측에 적합한 공간해상력을 파악하였다.

연안에서 관측되는 적조와 부유사의 해양환경요소는 관측 특성이 다양하게 구분되는데 이는 가시영역의 채널에서 가지는 해양환경요소의 반사특성에 기인한다. 적조는 식물플랑크톤의 흡광특성을 지니고 있어서 광의 흡수로 적갈색의 패턴이 관측되고 있다. 이러한 패턴은 연안해역에서 부유사의 반사에 의한 패턴과 구분되는데 부유사 농도가 높은 해역은 부유사의 높은 반사 특성에 의해 밝은 해류의 패턴을 나타내고 있어서 이들을 통한

연안해역의 해수 유동과 적조 분포 및 이동을 파악할 수 있다. 이러한 연안환경의 변화 관측은 높은 공간해상력에서 크기와 패턴, 이동의 확산 경향이 잘 관찰되었지만 100m와 300m에서의 공간해상력에서 적조와 부유사 등의 연안 관측이 구분됨을 알 수 있었다. GOCI의 공간해상력이 300m인 점을 고려할 때 향후 연안에서의 적조와 부유사의 정성적인 공간분포와 패턴의 관측은 물론 정량적인 해석이 가능할 것으로 판단된다.

제 3 절 대기의 광 특성 및 광 변화 연구

1. 서론

통해기 위성에 탑재된 해양센서는 각 밴드에서 측정된 radiance로부터 정확한 해석을 산출하여 해수내의 생물학적 상태나 해양의 오염 상태 등 시간에 따른 해양생태계의 모니터링을 가능하게 하여 중규모적인 단기간의 변화 모니터링이 필요한 해양환경 및 그 응용 분야에 폭 넓게 활용이 가능하다. 그러나 센서에서 측정된 radiance는 순수한 해수의 radiance(L_w)와 함께 대기의 산란 및 흡수에 의한 path radiance 등을 포함하고 있으므로 정확한 해석을 산출하기 위해서는 해수면과 인공위성 사이에 존재하는 대기의 효과를 제거해야 한다. 일반적으로 대기의 간섭효과에 의해 측정된 radiance는 해수의 radiance보다 상당히 크므로, 10% 정도의 오차범위를 갖도록 해수의 radiance를 측정하기 위해서는 1% 정도의 정확도를 갖는 대기효과의 관측과 이에 보정이 요구된다. 따라서 순수한 해수의 radiance(L_w)를 산출하는 것은 정밀한 대기 보정 방법에 의해 대기의 간섭효과를 제거하는 것과 같다고 할 수 있다. 정지궤도 해양센서 자료는 기존의 극궤도 위성의 센서에서 갖고 있는 광학적 특성과 매우 다르다. 극궤도 위성은 거의 매일 같은 시각에 자료를 수신하여 광학적 환경이 크게 변하지 않지만, 정지궤도 위성은 매 시간마다 자료를 수신하게 되는데 그때마다 태양의 위치가 시간에 따라 변하고 이에 따른 해석도 변하여 기존의 해양환경 분석 알고리즘의 사용이 어렵다. 따라서 태양과 대기 신호의 시간별/일별/월별 특성을 측정하여 분석함으로써, 우리나라 주변의 에어로졸 타입을 파악하여 추후 태양의 광세기 변화와 대기의 영향을 고려한 대기보정 방법을 개발하고자 한다.

가. 태양복사 스펙트럼과 태양상수

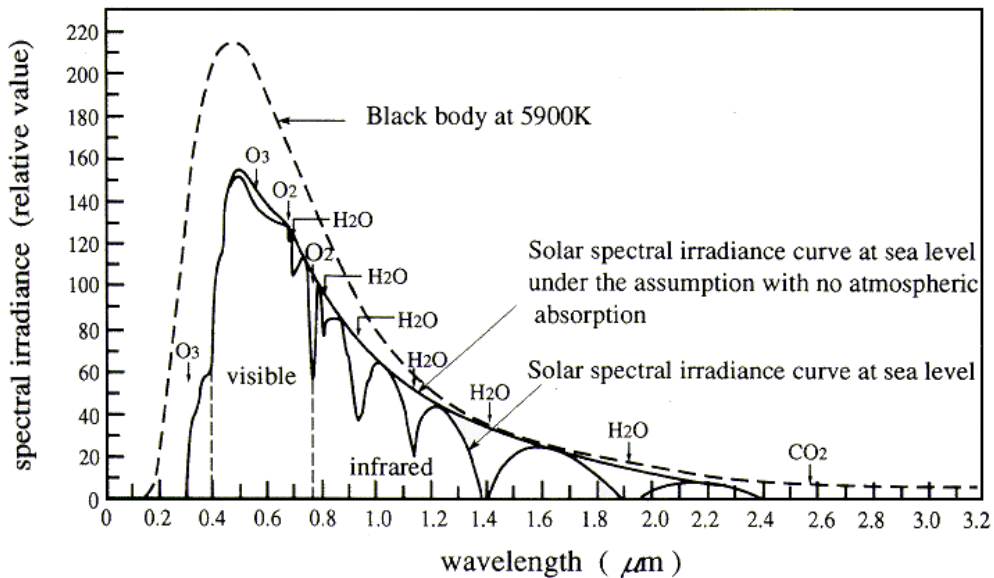


그림 3.3.1 태양복사 스펙트럼의 분포도

태양으로부터 대기권 상부와 지표에 도달하는 파장별 태양 복사 에너지를 그림 3.3.1에 나타내었다. 이 그림에서 파장에 따라 H₂O, CO₂, O₃, O₂ 등에 의해 태양 복사가 흡수됨을 알 수 있다. 이 태양복사 스펙트럼 분포는 가시광선과 적외선 파장 영역에서 흑체의 5,900K 온도 곡선과 비슷하다. 태양복사에너지의 약 95%는 0.3 - 2.4 μm 파장영역에 분포 되어 있으며, 태양복사에너지 중에서 0.3 μm 이하의 자외선 부분은 상대적으로 에너지 양이 적으나 상층 대기의 O₃, O₂, O, N₂, N 등에 의해 모두 흡수되어 10 km 이상의 상층 대기에서 에너지원이 되고 있다.

지구가 태양과의 평균거리에 있을 때, 대기 밖에서 태양광선에 수직으로 놓여 있는 단위면적당 단위시간에 받을 수 있는 전체 복사에너지의 양을 태양상수(solar constant)라고 한다. 에너지 보존원리에 의해 태양 표면으로부터 방출되는 총에너지는 태양으로부터 지구까지의 거리 d_e 에 해당되는 곳에서도 구의 전 표면을 통과하는 에너지양은 같으므로 다음 식이 성립된다.

$$F_s 4\pi r_s^2 = F_{sc} 4\pi d_e^2 \quad (3.3.1)$$

여기에서 F_s 는 태양 표면에서 방출하는 solar emittance, F_{sc} 는 태양상수, r_s 는 태양의 반지름, d_e 는 태양과 지구간의 평균거리이다. 따라서 태양상수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{sc} = F_s \left(\frac{r_s}{d_e}\right)^2 \quad (3.3.2)$$

반지름이 r_e 인 지구가 받는 총에너지는 $F_{sc} \pi r_e^2$ 이며, 이 에너지가 지구의 모든 표면에 균일하게 분포된다고 가정하면 지구 대기권 상부에서 단위면적당 단위시간에 받는 에너지는 다음과 같다.

$$Q_s = \frac{F_{sc} \pi r_e^2}{4\pi r_e^2} = \frac{F_{sc}}{4} \quad (3.3.3)$$

즉 태양으로부터 지구의 모든 표면에서 받는 평균 에너지는 태양 상수의 1/4가 된다. 태양을 흑체라 가정하면 태양상수와 Stefan-Boltzman 법칙에 의해 태양의 온도를 구할 수 있다.

$$T_s = \left(\frac{F_{sc} d_e^2}{\sigma r_e^2}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.3.4)$$

여기서, 태양과 지구와의 거리 $d_e = 149,597,890\text{km}$, 지구의 반지름 $r_e = 695,980\text{km}$, $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}$ 이므로, 식 (3.3.4)에 의해 태양표면 온도는 $T \approx 5800\text{K}$ 가 된다. 대기가 지표면과 평행한 층으로 이루어졌다고 가정하면, 태양 천정각이 θ_0 일 때, 공기 질량의 유효 광로 (effective path length)는 $u \sec\theta_0$ 이다. 여기서 광로 u 는 다음과 같다.

$$u = \int_{z_1}^{\infty} \rho dz \quad (3.3.5)$$

여기서 z_1 는 관측지점의 높이를 의미한다.

Beer-Bouguer-Lambert 법칙에 의해, 파장 λ 에 따른 태양으로부터 지표면에 도달하는 direct solar irradiance는 다음과 같이 주어진다.

$$F_{n\lambda} = F_{0n\lambda} \exp(-k_\lambda u \sec\theta_0) = F_{0\lambda} \tau_\lambda^m \quad (3.3.6)$$

여기에서 $F_{0n\lambda}$ 는 대기권 상부에서 단색광의 solar irradiance, k_λ 는 단색광의 질량 소산 계수, $\tau_\lambda (= e^{-k_\lambda u})$ 는 단색광의 투과율 (transmissivity), 그리고 $m (= \sec\theta_0)$ 는 태양과 관측자 사이의 대기 질량 (air mass)과 천정거리와의 비를 나타낸다. r 을 지구와 태양사이의 실제 거리라고 하면, 에너지 보존원리에 의해 태양상수는 다음과 같이 간단히 주어진다.

$$F_{sc} = F_{0n} \left(\frac{r}{d_e}\right)^2 \quad (3.3.7)$$

여기서, $F_{0n} = \int_0^\infty F_{0n\lambda} d\lambda \approx \sum_{i=0}^N F_{0n\lambda_i} \Delta\lambda_i$ 을 의미한다.

결국 $F_{0n\lambda}$ 을 알면 태양상수를 결정할 수 있는데, 이를 구하는 방법은 장기법과 단기법의 두 가지가 있다. 장기법은 대기의 투과율이 변하지 않는다 ($\tau_\lambda =$ 상수)는 가정 하에 식(3.3.6)에 \ln 을 취해 나온 식으로부터 $\ln F_{n\lambda}$ 와 m 과의 관계를 구하고, 이것으로부터 외삽하여 $F_{0n\lambda}$ 구한 다음 식(3.3.7)에 의해 태양상수를 계산한다. 그런데 이 방법은 태양상수를 한번 결정할 때마다 관측과 자료 환산하여야 하므로 기간이 오래 소요된다. 이 방법은 기간이 오래 걸리고, τ_λ 가 일정하다는 가정이 필요하다. 이러한 두 가지 결점을 보완하기 위해 만들어진 것이 단기법이다. 단기법은 오랜 기간 관측한 τ_λ , $F_{n\lambda}$ 와 m 으로부터 이들 세 요소의 그래프를 작성한다. $F_{n\lambda}$ 을 관측하고 m 을 알면 이 그래프로부터 τ_λ 을 알 수 있다. 따라서 식 (3.3.6)에 의해 $F_{0n\lambda}$ 을 계산한다. 이와 같이 이들 두 방법을 지상 관측 자료에 의하여 태양상수를 구하였다.

지구의 태양상수 값은 $1.94 - 1.95 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$ (약 1363W/m^2)이다. 이 값은 미국 스

미스소니언 연구소에서 수 십년 동안 관측을 실시하여 얻은 값으로써, 현재 가장 많이 사용되고 있는 값은 $1.95 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$ 이다. 최근 인공위성에 탑재된 복사계의 관측결과에 의하면 태양상수는 $1.960 \pm 0.003 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$ 정도로 보고되고 있다.

나. 대기 밖의 복사량

지구에서 태양광에 직각인 면에서의 radiance flux density를 F_{0n} 이라고 하면

$$F_{0n} = F_{sc} \left(\frac{d_e}{r} \right)^2 = F_{sc} E_0 \quad (3.3.8)$$

가 되고, 지구표면에 수평을 이루는 면에서의 solar radiance flux density(F_0)는 다음과 같다.

$$F_0 = F_{0n} \cos\theta_z \quad (3.3.9)$$

여기서,

$$\cos\theta_z = \sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega \quad (3.3.10)$$

이며, θ_z 는 태양의 천정각, δ 는 태양의 적위 (태양이 적도로부터 북쪽(+) 또는 남쪽(-)으로 기울어진 거리각, 경사도), ϕ 는 관측자의 위도, ω 는 시간각을 의미한다. 따라서 짧은 시간 간격 dt 동안의 복사에너지량 (irradiation) dF_0 는 다음과 같다.

$$dF_0 = F_{sc} E_0 \cos\theta_z dt \quad (3.3.11)$$

여기서, dt 는 시간 단위이고, 태양상수 F_{sc} 는 에너지 단위인 $KJ/m^2/h$ 이다. 또한 $dt = (12/\pi)d\omega$ 이므로 식 (3.3.11)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$dF_0 = (12/\pi) F_{sc} E_0 (\sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega) d\omega \quad (3.3.12)$$

식 (3.3.12)로부터 1시간동안의 복사 에너지를 구할 수 있다. 태양의 남중으로부터 I 번째 시간을 고려했을 때 1시간에 해당하는 두 자오선의 중간지점의 시간각을 ω_i 라고 하면,

$$F_0 = \frac{12}{\pi} F_{sc} E_0 \int_{\omega_i - (\pi/24)}^{\omega_i + (\pi/24)} (\sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega) d\omega$$

$$F_0 = F_{sc} E_0 (\sin\delta\sin\phi + (24/\pi)\sin(\pi/24)\cos\delta\cos\phi\cos\omega_i) \quad (3.3.13)$$

여기서, 근사식으로 $(24/\pi)\sin(\pi/24) = 0.9972 \approx 1$ 이므로 식 (3.3.13)을 다음과 같이 나

타낼 수 있다.

$$F_0 = F_{sc} E_0 (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega_i) \quad (3.3.14)$$

여기서, F_0 는 지구표면에 수평을 이루는 면에 대한 시간당 solar radiance flux density로서 시간당 수평면 일사량을 의미한다. 일출(sr)부터 일몰(ss)까지의 일별 복사량 H_0 는 다음과 같이 나타낸다.

$$H_0 = \int_{sr}^{ss} F_0 dt = 2 \int_0^{ss} F_0 dt \quad (3.3.15)$$

하루 동안의 E_0 을 상수로 가정하고 dt 을 시간각으로 환산하면, 식 (3.3.15)은 다음과 같다.

$$H_0 = \frac{24}{\pi} F_{sc} E_0 \int_0^{+\omega_s} (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) d\omega \quad (3.3.16)$$

또는

$$H_0 = \frac{24}{\pi} F_{sc} E_0 [(\pi/180)\omega_s (\sin \delta \sin \phi) + (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s)] \quad (3.3.17)$$

여기서 ω_s 는 도(degree) 단위이다. 식 (3.3.17)은 식 (3.3.10)을 이용하여 다음과 같이 변형하여 쓸 수 있다.

$$H_0 = (24/\pi) F_{sc} E_0 \sin \phi \sin \delta [(\pi/180)\omega_s - \tan \omega_s] \quad (3.3.18)$$

또는

$$H_0 = (24/\pi) F_{sc} E_0 \cos \phi \cos \delta [\sin \omega_s - (\pi/180)\omega_s \cos \omega_s] \quad (3.3.19)$$

이와 같이 식 (3.3.17), 식 (3.3.18) 또는 식 (3.3.19)로부터 수평면 일별 solar radiance flux density (수평면 일당 일사량)를 구할 수 있다. 북반구에서 특별한 경우의 일별 태양 복사량을 생각하면 적도에서의 수평면 일별 복사량은 $\phi = 0, \omega_s = \pi/2$ 이므로 식 (3.3.19)을 이용하면 다음과 같다.

$$H_0 = (24/\pi) F_{sc} E_0 \cos \delta \quad (3.3.20)$$

다음 두 가지 특별한 경우의 대기 밖 일당 수평면 일사량을 생각한다. 극 지역에서 여름 동안의 수평면 일사량은 일출, 일몰이 없으므로 식 (3.3.19)에 ω_s 대신 π 을 대입하여

구한다.

$$H_0 = (24/\pi)F_{sc}E_0 \sin\phi \sin\delta(\pi^2/180) \quad (3.3.21)$$

대기 밖 월평균 수평면 일별 일사량은 다음과 같다.

$$H_0 = \frac{1}{n_2 - n_1} \sum_{n_1}^{n_2} H_0 \quad (3.3.22)$$

여기서, n_1 과 n_2 는 해당 월에서의 시작과 마지막 일수를 각각 의미한다. 이와 같은 식에 의하여 대기권 밖의 일사량을 계산하지만 최근에는 위성에서 관측된 값을 이용하는 경우가 많다.

다. 대기의 구성 성분

표 3.3.1에서 보는 바와 같이 대기의 구성 성분으로는 질소(N₂), 산소(O₂), 아르곤(Ar), 네온(Ne), 헬륨(He), 크립톤(Kr), 제논(Xe) 등이 있으며 그 밖에 수증기(H₂O), 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 수소(H₂), 아산화질소(N₂O), 일산화탄소(CO), 오존(O₃) 등이 존재한다.

표 3.3.1 The gaseous composition of the atmosphere

Gases	% by volume	Comments
Constant gases		
Nitrogen, N ₂	78.08%	Photochemical dissociation high in the ionosphere; mixed at lower levels
Oxygen, O ₂	20.95%	Photochemical dissociation above 95 km; mixed at lower levels
Argon, Ar	0.93%	Mixed up to 110 km
Neon, Ne	0.0018%	Mixed in most of the middle atmosphere
Helium, He	0.0005%	
Krypton, Kr	0.00011%	
Xenon, Xe	0.000009%	
Variable gases		
Water vapor, H ₂ O	4.0% (maximum, in the tropics) 0.00001%(minimum, at the South Pole)	Highly variable; photodissociates above 80 km dissociation
Carbon dioxide, CO ₂	0.0365% (increasing ~0.4% per year)	Slightly variable; mixed up to 100 km; photodissociates above
Methane, CH ₄	~0.00018% (increases due to agriculture)	Mixed in troposphere; dissociates in mesosphere
Hydrogen, H ₂	~0.00006%	Variable photochemical product; decreases slightly with height in the middle atmosphere
Nitrous oxide, N ₂ O	~0.00003%	Slightly variable at surface; dissociates in stratosphere and mesosphere
Carbon monoxide, CO	~0.000009%	Variable
Ozone, O ₃	~0.000001% - 0.0004%	Highly variable; photochemical origin
Fluorocarbon 12, CF ₂ Cl ₂	~0.00000005%	Mixed in troposphere; dissociates in stratosphere

수증기의 경우, 지역적 편차가 매우 크게 나타나는데 적도 지방에서는 최대 4% 존재하나 남극에서는 0.00001% 만 존재한다. 표 3.3.2와 같이 질소(N₂)와 산소(O₂)는 각각 대기 성분의 78.084±0.004%와 20.946 ±0.002%의 일정량을 갖고 있으며 대부분을 차지하고 있다.

표 3.3.2 Gases present in standard amounts in a dry atmosphere (Bohren, 1991)

Constituent	Volume Ratio (%)	Parts per million
Nitrogen, N ₂	78.084 ± 0.004	-
Oxygen, O ₂	20.946 ± 0.002	-
Argon, Ar	0.934 ± 0.001	-
Neon, Ne	0.001818	18.18 ± 0.04
Helium, He	5.24 × 10 ⁻⁴	5.24 ± 0.004
Krypton, Kr	1.14 × 10 ⁻⁴	1.14 ± 0.01
Xenon, Xe	-	0.087 ± 0.001
Hydrogen, H ₂	-	0.5
Methane, CH ₄	-	1.6
Nitrous Oxide, N ₂ O	-	0.5 ± 0.1

대기는 분자나 에어로졸에 의해 흡수(absorption)와 산란(scattering)을 한다. 흡수는 에어로졸보다 분자에서 강하게 나타나고, 산란은 분자와 에어로졸 모두 공간이나 파장에 따라 다르게 나타난다. 대기 분자에 의한 산란은 입자의 사이즈가 파장보다 작을 경우로써, 레일리 산란(Rayleigh scattering)이라고 하며, 에어로졸에 의한 산란은 입자의 사이즈가 파장보다 클 경우에 해당된다. 또한 대기의 밀도와 refractive index에서의 비균질성은 redirection을 일으키며, 편광의 변화를 일으키는 등 대기는 다양한 작용을 유도한다.

대기의 attenuation을 결정하는 요인은 분자에 의한 산란계수, 에어로졸에 의한 산란계수, 분자에 의한 흡수계수와 에어로졸에 의한 흡수계수 등 4가지로 구분할 수 있다. 분자에 의한 흡수는 파장에 따라 빠르게 변하는 반면 에어로졸에 의한 흡수는 파장이 1 μ m보다 작을 경우 천천히 변한다. 대기의 path는 위도, 경도, 고도, 시간, 계절, 구름, 비, 안개, 거리(distance, path length), path에 따른 습도, path에 따른 온도, path에 따른 압력, path에 따른 오존농도 등의 변수들에 의해 결정된다. 그림 3.3.3은 오존에 의한 흡수 계수와 투과도 등을 나타낸 오존 예측 차트이다.

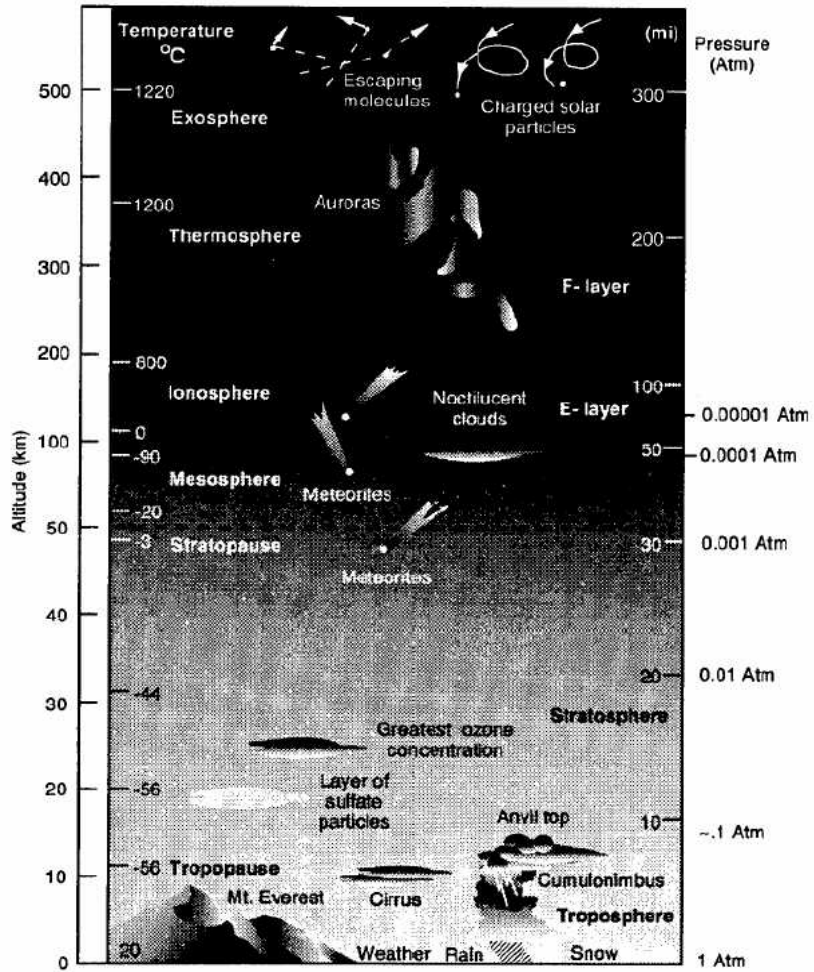


그림 3.3.2 대기의 구조와 광학적 특성

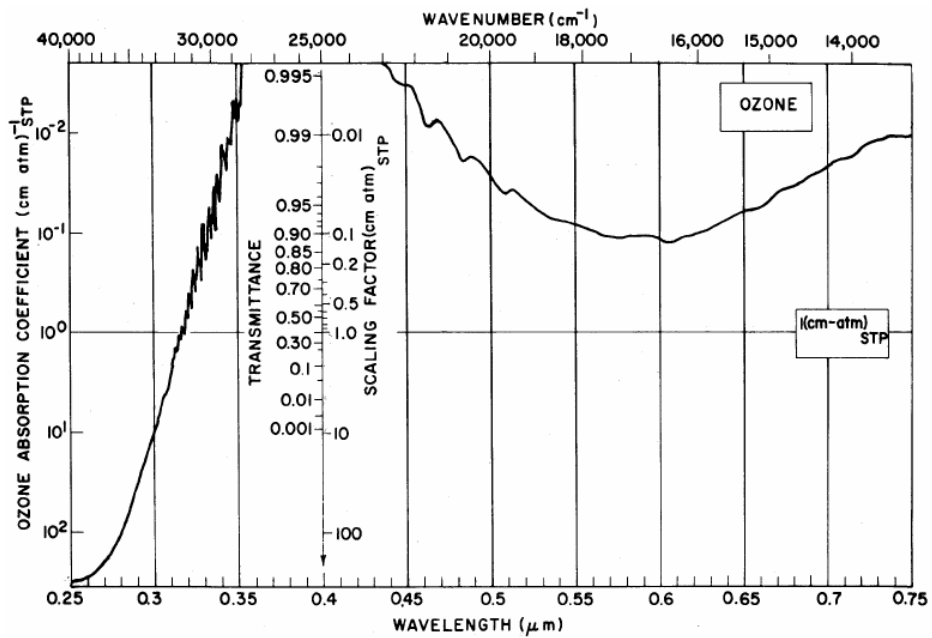


그림 3.3.3 Prediction chart for Ozone

라. 에어로졸

에어로졸은 기체 중에 존재하는 고체 또는 액체상의 입자를 말하며 입자의 크기는 대부분 직경으로 약 0.002 nm에서 100 mm의 범위에 존재하나 직경이 mm 이상인 입자라도 공기 중에 상당기간 부유하는 경우에도 에어로졸로 취급한다. 입자의 크기는 에어로졸의 특성 규명에 가장 중요한 물리적 요소이다. 에어로졸의 크기는 주로 μm 단위로 표시하며, 오염 생성원의 종류에 따라 독특한 크기 범위를 가지고 있다. 작은 입자는 분자의 균집체 정도의 크기를 가지며, 큰 입자는 가시적으로도 확인할 수 있다. 일반적으로 에어로졸은 입경에 따라 2가지로 분류할 수 있으며 대략 2.0 μm 미만의 입자를 미세입자라고 하며, 그 이상의 입자를 거대 입자라고 한다. 미세입자는 토양 및 수중 생태계에 영향을 미치며 가시도(visibility) 감소에 큰 영향을 준다. 거대 입자는 바람에 날린 토양의 먼지 및 해염을 포함하여, 기계적 분쇄과정을 거쳐 주로 생성되는데, 자연적 발생원으로부터 방출된 것이 대부분이다. 대기중에 존재하는 에어로졸의 종류는 먼지(dust), 분진(particulate), 훈연(fume), 미스트(mist), 연기(smoke), 안개(fog), 스모그(smog), 박무(haze), 검댕(soot) 등이다.

에어로졸은 지표에 도달하거나 지표에서 반사 혹은 방출된 복사 에너지를 흡수 또는 산란함으로써 위성을 통해 얻게 되는 해색이나 해면온도, 지표면 알베도 등과 같은 지구 물리적인 변수의 질적인 면에 영향을 미친다. 이와 같은 이유로 지구복사 수지의 연구나 대기의 효과를 제거하기 위한 대기보정 알고리즘의 개발에 있어 가장 중요한 요소이다. 일반적으로 해색 센서에 도달하는 총 복사휘도 중 물로부터 나오는 복사휘도는 약 10 % 정도로 알려져 있다. 따라서 정량적으로 정확한 해수환경 분석을 위해서는 1 % 정도의 정밀도를 갖는 대기효과 보정이 요구된다. 이러한 대기보정의 과정에서 에어로졸의 효과는 대기보정 알고리즘에 포함된 여러 가지 에어로졸 모델에 의해 결정됨으로, 정밀한 에어로졸 모델이 갖추어진다면 위성자료를 이용한 해수환경 분석의 정밀도를 높일 수 있다.

에어로졸은 일반적으로 지역성에 의해 많은 영향을 받는다. 한반도를 포함하는 동아시아 지역은 공기의 이동이 서쪽에서 동쪽으로 일어나는 편서풍계에 속해 있으므로, 한반도 부근 해역에서의 에어로졸 분포 특성은 중국 대륙에서 발생하는 에어로졸에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 특히 봄철에 발생하는 황사 현상은 기존의 대기 보정 알고리즘 만으로는 보정 할 수 없는 국지적인 특성이다 (Fukushima *et al.*, 1993). 그러므로 한반도 주변 해역에서 해색 센서를 이용한 정밀한 해수 환경 분석을 위해서 지역적 특수성을 감안한 에어로졸 모델을 갖는 대기보정 알고리즘의 개발이 요구된다.

2. 연구방법

태양과 대기 신호의 변화 크기를 측정하기 위하여 태양의 디스크를 추적하면서 태양의 irradiance를 파장에 따라 연속적으로 측정 가능한 Sunphotometer와 대기의 광학적 신호를 파장에 따라 연속 측정이 가능한 Hyperspectral radiometer를 한국해양연구원 제3연구동 옥상에 설치하였다(그림 3.3.4). 측정항목으로는 $E_{sun}(\lambda)$ 과 $E_d(\lambda)$, $L_{sky}(\lambda)$ 등이며, $E_{sun}(\lambda)$ 은 지상에서 측정한 파장에 따른 태양의 irradiance로서 시간에 따라 변하게 되며 대기의 상태에 따라 큰 차이를 보이게 된다. $E_d(\lambda)$ 는 downwelling irradiance로서, 해면이나 지상에서 아래 방향으로 내려오는 모든 방향에 대한 입사광 에너지를 말한다. $L_{sky}(\lambda)$ 는 sky radiance로서, 태양광이 대기 산란에 의하여 만들어지는 하늘의 광량을 말하며 임의 방향에 대한 radiance 값을 의미한다.



그림 3.3.4 태양과 대기의 광학적 특성을 측정하기 위해 한국해양연구원 제3연구동 옥상에 함께 설치된 Sunphotometer와 Hyperspectral radiometer.

가. 태양광 모니터링

한국해양연구원 제3연구동 옥상에 설치된 PREDE사의 Grating sunphotometer PGS-100(그림 3.3.5)은 분광방식에 grating을 채용한 sunphotometer로서, 기본 SW는 Windows에서 동작되며 옥외에서 연속 관측된다. 태양 위치를 추적할 수 있는 태양감시 센서가 장착되어 있어서 태양의 위치를 자동추적하며 표 3.3.3의 주요 사양에서 보는 바와 같이 시야반각은 1도이며 350 nm에서 1050 nm 사이의 파장범위를 연속관측하게 되며 분해능은 3.6 nm 정도이다. 지금까지의 sunphotometer는 관측파장영역이 연속적이지 못했기 때문에 지상관측기와 위성에서 얻어지는 파장대가 달라 조정이 필요하였으나 본 기기는 연속적으로 측정되므로 필요한 파장대를 선택적으로 활용할 수 있는 장점이 있다. 2004년 2월말에 설치된 이후 2004년 3월 11일부터 현재까지 매일 10분 간격으로 지속적으로 측정하고 있다.



그림 3.3.5 한국해양연구원에 설치된 PREDE사의 Grating sunphotometer PGS-100.

표 3.3.3 PREDE사의 Grating sunphotometer PGS-100 주요 사양

Wavelengths	350 - 1050nm
FOV (half view angle)	1°
Inclination angle	0.5°
Slit	100 μ m
Detector	Si-CCD
Resolution	3.6 nm
Wavelength accuracy	± 0.5 nm
Exposure time	5ms, 10ms, 20ms, 50ms, 100ms, Auto
Averaging	1, 10, 20, 50, 100
Controlling temperature	30°C \pm 2°C
Sensor for temperature	YSI44016
PC interface	RS232C (19200bps)
Power	30W
Temperature range for use	0°C ~ +45°C
Temperature range for storage	-10°C ~ +60°C

PGS-100을 이용하여 관측된 원시자료는 다음과 같은 식에 의해 지표면에서의 solar irradiance (E_{sun}) 값으로 변환하였다.

$$E_{sun}(\lambda) = \frac{C.C(\lambda) \times raw(\lambda) \times 5}{E.T} \quad (3.3.23)$$

여기서, $C.C(\lambda)$ 는 파장 λ 에 대한 calibration constant 값이고, $raw(\lambda)$ 는 PGS-100에서 측정된 파장 λ 에 대한 원시자료 값이고, $E.T$ 는 PGS-100으로 태양을 측정할 때 설정되어

있었던 exposure time 값이다. 이와 같은 방법에 의해 얻어진 E_{sun} 값을 이용하여 대기의 투과도(transmittance)는 아래의 식에 의해 계산하였다.

$$Transmittance(\lambda) = \frac{E_{sun}(\lambda)}{E_{sun, TOA}(\lambda)} \quad (3.3.24)$$

여기서, $E_{sun}(\lambda)$ 는 PGS-100으로 측정한 파장 λ 에 대한 solar irradiance이고, $E_{sun, TOA}(\lambda)$ 는 대기권 밖(Top Of the Atmosphere, TOA)에서 측정한 파장 λ 에 대한 solar irradiance이다. 본 연구에서 사용된 TOA에서의 solar irradiance 값은 PGS-100 제작사인 PREDE사에서 제공하는 값을 사용하였는데, RReDC(Renewable Resource Data Center)에서 제공하는 2000 ASTM Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00과 1985 Wehrli Standard Extraterrestrial Solar Irradiance Spectrum과 비교해 본 결과, 거의 일치하였다 (그림 3.3.6).

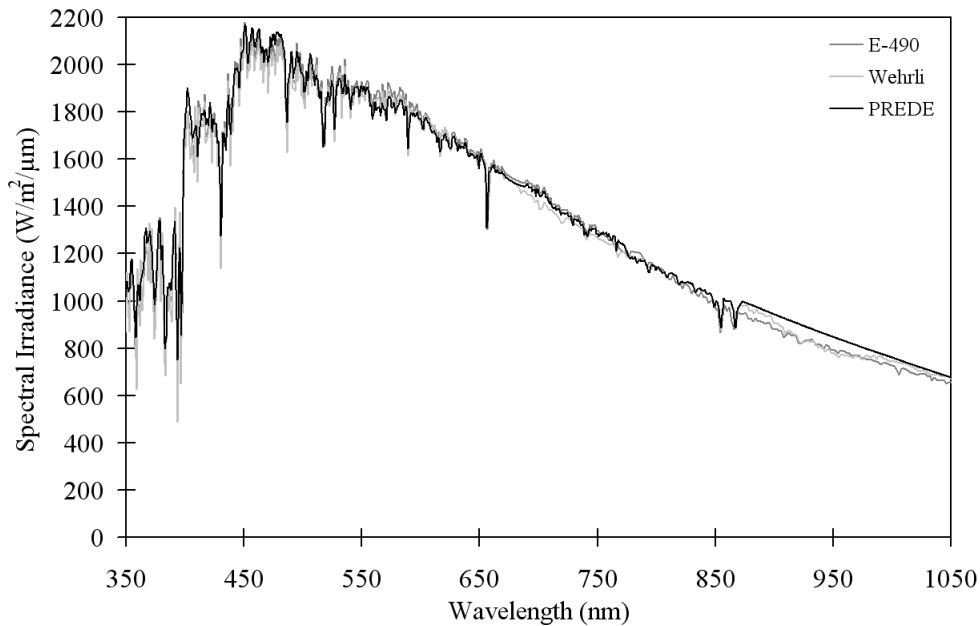


그림 3.3.6 PREDE사에서 제공하는 TOA에서의 solar irradiance와 RReDC(Renewable Resource Data Center)에서 제공하는 2000 ASTM Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00과 1985 Wehrli Standard Extraterrestrial Solar Irradiance Spectrum과의 비교.

지구를 둘러싸고 있는 대기층을 통과하여 지표면에 도달하는 solar irradiance (E_{sun})는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{sun}(\lambda) = E_{sun, TOA}(\lambda) \exp^{-\tau(\lambda)} \quad (3.3.25)$$

여기서, $\tau(\lambda)$ 는 대기의 광학적 두께(optical thickness)로서 태양광이 대기층에서 흡수와

산란에 의해 감쇄하는 attenuation coefficient와 태양 복사가 대기층을 통과하는 optical path의 함수로 주어진다. 따라서 식 (3.3.24)과 식 (3.3.25)을 이용하여 대기의 광학적 두께는 다음과 같이 계산하였다.

$$\tau(\lambda) = \ln\left(\frac{1}{T(\lambda)}\right) \quad (3.3.26)$$

여기서, $T(\lambda)$ 는 파장 λ 에 대한 transmittance 값이다.

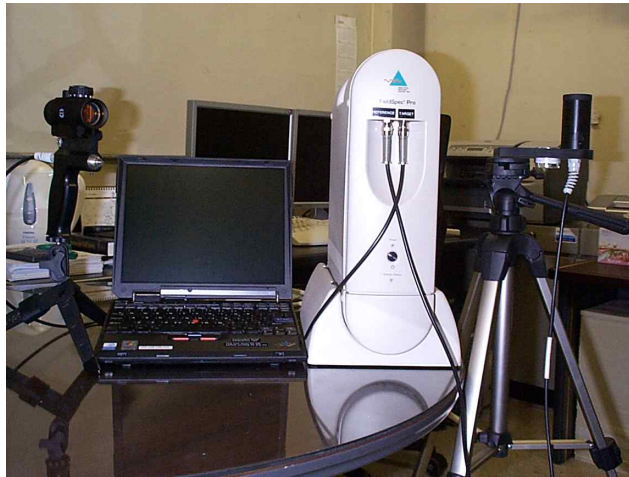


그림 3.3.7 ASD사의 Field Spectroradiometer Model FieldSpec Pro Dual VNIR

PGS-100에서 측정되는 파장 350 - 1050 nm에 대한 $E_{sun}(\lambda)$ 값의 신뢰도 검정을 위해 ASD사의 Field spectroradiometer를 이용하였다. 측정방법은 길이 1 m의 검정색 원통을 제작하여 원통의 양쪽 끝부분과 원통 중간 지점에 검정색 필터를 부착하였다. 부착된 필터는 오직 태양의 디스크로부터 오는 복사 에너지만을 통과할 수 있도록 지름 1.5 cm의 원형 구멍을 만들었다. ASD의 $E_d(\lambda)$ 을 측정하는 장비인 RCR (Remote Cosine Receptor)를 사용하여 PGS-100이 측정하는 동일한 시간에 ASD를 이용하여 파장 350 - 1050 nm까지 solar irradiance (E_{sun})를 측정하였다 (그림 3.3.8). 관측한 결과를 동일한 시간에 측정한 PGS-100 자료와 비교하였는데, PGS-100이 측정한 $E_{sun}(\lambda)$ 값의 spectral shift와 파장에 따라 대기의 투과도가 1을 초과하는 문제점을 발견하였다. 우선 PGS-100이 측정한 $E_{sun}(\lambda)$ 값의 spectral shift는 사용된 calibration constant 값이 shift된 것으로 파악되어, 제작사인 PREDE사에 확인 및 수정을 강력히 요구하여 새로운 calibration constant 값을 받음으로서 현재는 수정된 calibration constant 값을 사용하여 $E_{sun}(\lambda)$ 값을 산출하고 있다. 두 번째 문제점인 PGS-100이 측정한 $E_{sun}(\lambda)$ 값을 이용하여 계산된 transmittance 값이 파장에 따라 1을 초과하였는데, 본 연구팀이 가지고 있는 ASD사의 Field spectroradiometer와 자체 제작한 태양의 디스크만 바라볼 수 있는 원통을 이용하여 측정한 $E_{sun}(\lambda)$ 값을 이용하여 계산된 transmittance 값은 파장에 따라 1 미만이었다. 이것은 PGS-100의 기계적인 오류

보다는 노출시간에 따라 $E_{sun}(\lambda)$ 값을 계산하는 식에 문제가 있다고 생각되어 제작사에 수차례 사용된 수식의 검증 및 정확한 산출식을 제공해 줄 것을 강력히 요구하여 현재 새로운 $E_{sun}(\lambda)$ 값을 계산하는 식을 사용하고 있다 (3.3.23). 그림 3.3.9는 위의 문제점들이 해결된 후 두 기기로부터 얻어진 $E_{sun}(\lambda)$ 와 투과도를 비교한 것이다. ASD로 측정된 시간대 사이에 측정된 sunphotometer 자료가 모두 ASD 측정 결과 사이에 위치함으로 두 기기간의 신뢰도가 매우 높음을 알 수 있다. 위와 같이 계산된 solar irradiance ($E_{sun}(\lambda)$), transmittance, 대기의 광학적 두께의 자료들은 시간별, 일별, 월별로 구분하여 변화를 모니터링 하였으며, 이들 자료는 정지궤도 해색위성 자료의 bi-directional 함수 연구나 대기 보정 알고리즘 개발에 활용될 계획이다.

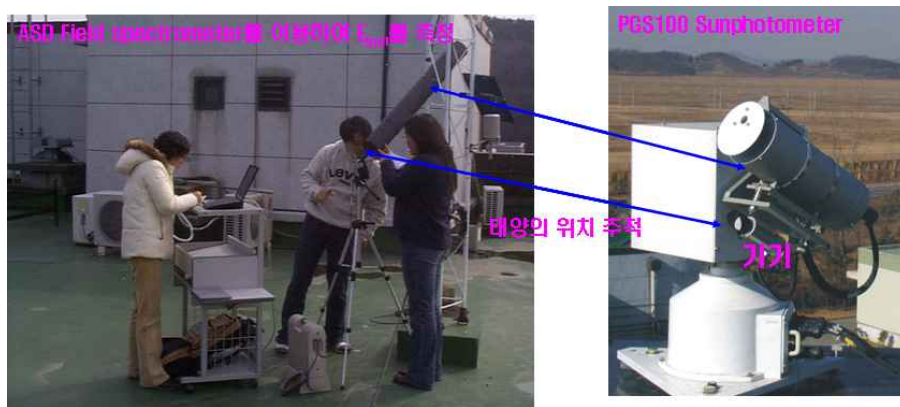


그림 3.3.8 PGS-100 Sunphotometer 자료의 신뢰도 검정을 위해 ASD사의 Field spectroradiometer를 이용하여 solar irradiance(E_{sun})를 측정하는 모습.

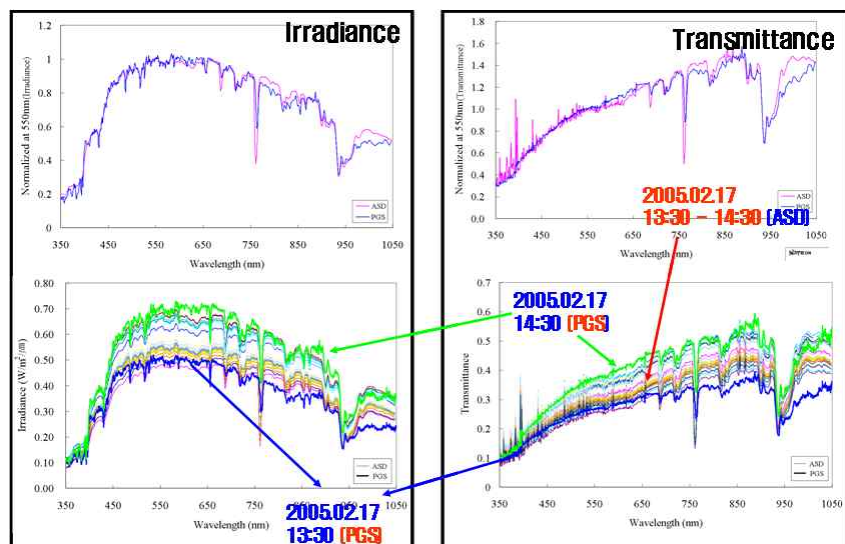


그림 3.3.9 PGS-100에서 측정된 E_{sun} , transmittance 값과 ASD에서 측정된 E_{sun} , transmittance 값의 비교.

나. 대기광 모니터링

TriOS사에서 개발한 Hyperspectral radiometer는 downwelling irradiance (E_d)를 측정하는 RAMSES-ACC (그림 3.3.10의 A)와 sky radiance(L_{sky})를 측정하는 RAMSES-ARC (그림 3.3.10의 B)로 구성되어 있다. 표 3.3.4의 Hyperspectral radiometer에 대한 주요 사양에서 보는 바와 같이 관측과장영역은 320 nm에서 950 nm까지이고 분해능은 3.3 nm로서 PREDE사의 PGS-100 sunphotometer보다 약간 우수한 편이다. $L_{sky}(\lambda)$ 을 측정하는 RAMSES-ARC는 수직으로 설치된 $E_d(\lambda)$ 을 측정하는 RAMSES-ACC에 대하여 30°의 각을 가지고 $L_{sky}(\lambda)$ 을 측정하고 있으며, Field of view(FOV)는 7°이다. 계절에 따라 태양의 위치가 조금씩 달라지기 때문에 $L_{sky}(\lambda)$ 을 측정하는 RAMSES-ARC의 위치도 태양의 위치에 따라 조금씩 변경하여 측정하는 것이 원칙이지만, 본 관측장비는 $E_d(\lambda)$ 을 측정하는 RAMSES-ACC에 대한 RAMSES-ARC가 이루는 각만 조정이 가능하고 관측위치조정은 거의 불가능한 고정식 타입이다.

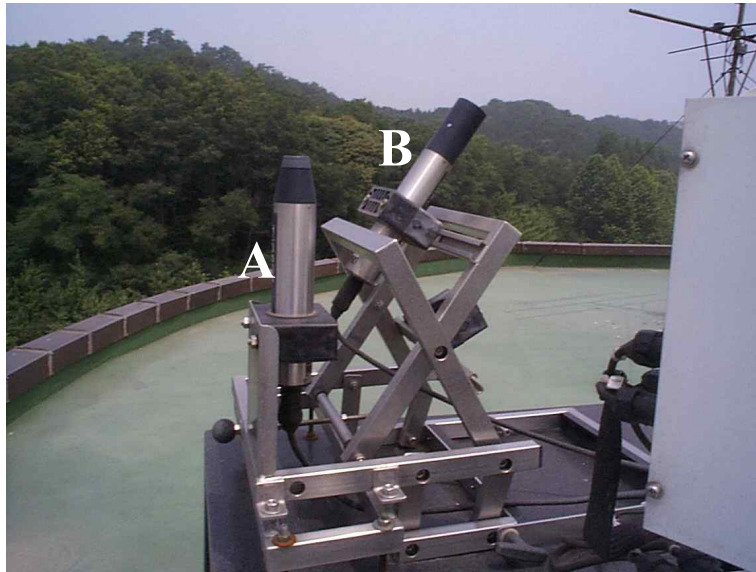


그림 3.3.10 한국해양연구원에 설치된 TirOS사의 Hyperspectral radiometer.

Hyperspectral radiometer의 RAMSES-ACC와 RAMSES-ARC에서 측정한 raw data는 다음과 같은 식에 의해서 파장 350 - 950nm에 따른 $E_d(\lambda)$ 와 $L_{sky}(\lambda)$ 값을 얻었다.

$$F(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{S(\lambda)} \quad (3.3.27)$$

여기서, $F(\lambda)$ 는 파장 λ 에 대해 보정된 spectral data로서, 각 센서에 따라 E_d 와 L_{sky} 을 대변한다. $E(\lambda)$ 는 센서에서 얻은 raw data에서 background data와 electrical offset를 이용하여 기계적인 편차를 제거한 파장 λ 에 따른 subtraction data이고, $S(\lambda)$ 는 TriOS사에서 제공한 RAMSES-ACC와 RAMSES-ARC 센서에 대한 파장 λ 에 따른 sensitivity calibration

data이다.

이와 같이 관측된 $E_d(\lambda)$ 와 $L_{sky}(\lambda)$ 자료들은 시간별, 일별, 월별로 나누어 그 변화패턴을 모니터링 하였으며, 2004년 2월말에 설치하여 2004년 3월 11일부터 현재까지 10분 간격으로 지속적으로 측정하고 있다.

표 3.3.4 TirOS사의 Hyperspectral radiometer 주요 사양

	RAMSES-ACC(E_d)	RAMSES-ARC(L_{sky})
Wavelength range	320 - 950nm	
Detector type	channel silicon photodiode array	256 channel silicon photodiode array
Spectral sampling	3.3nm/pixel	
Spectral accuracy	0.3nm	
Usable channels	190	
Typical saturation(at 500nm)	20 $W/m^2/nm$ (4ms int time)	1 $W/m^2/nm/sr$
Typical NEI(at 500nm)	2 $\mu W/m^2/nm$ (8sec int time)	0.25 $\mu W/m^2/nm/sr$
Collector type	cosine response	-
Field of view(FOV)	-	7° in air (can be customized)
Accuracy	better than 6 - 10% (depending on spectral range)	better than 6% (depending on spectral range)
Integration time	4ms - 8sec	
Telemetry data interface	RS-232	RS-232 or Serial Bus
Data rate (RS-232)	1200 - 19200 baud	

다. 에어로졸의 광 특성 연구

에어로졸 입자의 광 특성을 측정하기 위하여 대형 에어 샘플러를 자체 제작하였는데 (그림 3.3.11의 A), 본 에어 샘플러는 필터 직경이 142 mm인 대형 필터를 사용하여 일정한 시간 동안에 다량의 에어로졸 입자를 채취할 수 있으므로 대기 입자의 크기 분포 ($F(d)$)를 분석하는데 아주 유용하다. 또한 대기 입자의 흡광 특성을 파악하기 위하여 SIBATA사에서 제작한 AC-10 에어 샘플러를 사용하였다 (그림 3.3.11의 B). SIBATA사의 AC-10 에어 샘플러는 직경 47 mm 필터만을 사용하며 SIBATA사의 LV-20 유량계를 연결하여 분당 5 - 32 ℓ 의 공기를 통과시킬 수 있다.

한국해양연구원 제3연구동 옥상에서 2005년 3월 7일부터 현재까지 매일 오전 9시 30분부터 저녁 5시 30분까지 8시간 동안 대형 에어 샘플러와 SIBATA사의 AC-10 에어 샘플러를 가동하여 대기 입자를 채취하였다. 대기 입자의 크기 분포 ($F(d)$)를 분석하기 위하여 대형 에어 샘플러에는 pore size가 0.2 μm 인 142 mm Nuclepore 필터를 사용하였으며, 대기 입자의 흡광 특성을 분석하기 위하여 AC-10 에어 샘플러는 유량을 분당 20 ℓ 로 일정하게 유지하고 필터는 필터무게를 측정한 GF/F 47mm 필터를 사용하였다. 대형 에어 샘플러를 통해 얻은 Nuclepore 필터 표면에는 상당히 많은 양의 대기 입자들이 묻어 있지

만, Nuclepore 필터 그대로 사용하여 Coulter Counter에서 $F(d)$ 을 분석할 수 없다. Coulter Counter는 액체상태의 시료만 분석가능하기 때문에, 증류수 또는 전해질 용액(Beckman Coulter사의 Multisizer™ 3 Coulter Counter 전용) 100 ml을 이용하여 Nuclepore 필터로부터 대기 입자들을 소실되는 입자 없이 완전하게 회수하여 Beckman Coulter사의 Multisizer™ 3 Coulter Counter (그림 3.3.12)로 $F(d)$ 을 분석하였다.

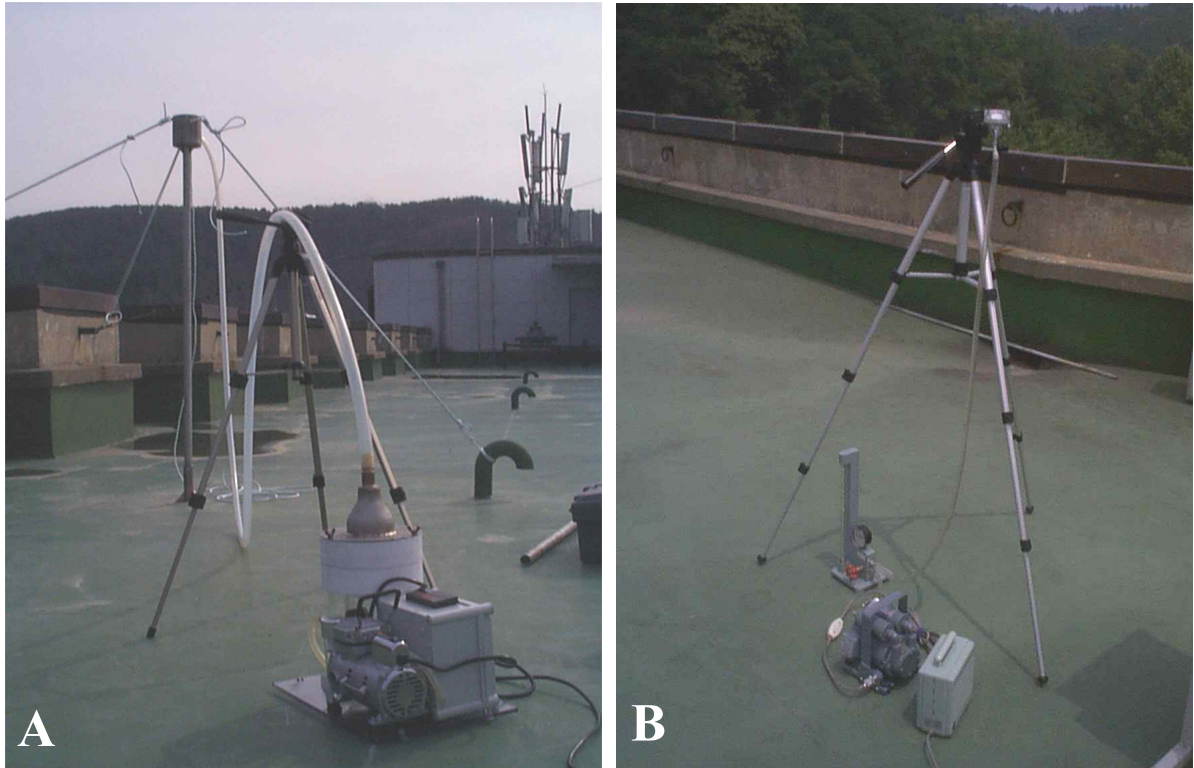


그림 3.3.11 대기 입자를 채취하기 위하여 자체 제작한 대형 에어 샘플러(A)와 SIBATA사의 AC-10 에어 샘플러와 LV-20 유량계(B).

8시간 동안 SIBATA사의 AC-10 에어 샘플러를 통해 얻은 GF/F 47 mm 필터표면에는 대기 입자들에 의해 필터표면이 착색 되므로, 건조기에 넣어 착색된 필터를 건조하여 착색된 필터의 무게를 측정하였다. 사용전후의 필터무게 차이와 관측시간동안 통과한 공기의 유량을 이용하여 GF/F 47 mm 필터표면에 착색된 대기 입자의 농도를 계산하였다. 대기 입자의 농도를 측정한 후, 대기 입자의 흡수 계수와 소산 계수를 분석하기 위하여 Perkin Elmer사의 Lambda 19 UV/VIS/NIR Spectrophotometer를 사용하였다 (그림 3.3.13). GF/F 47 mm 필터를 이용하여 Lambda 19에 대한 baseline correction을 실시한 후, 착색된 GF/F 47 mm 필터를 광전관 바로 앞에 부착하여 전방산란에 의한 광을 모두 회수할 수 있도록 파장 250 - 1050 nm까지 스캔, 흡수계수를 측정하였다. 소산계수는 광전관 앞에 광 차단 pin hole를 설치하여 산란되지 않고 직진한 광만을 감지할 수 있도록 설정한 후, 착색된 GF/F 47mm 필터를 부착하여 파장 250 - 1050 nm까지 스캔하였다. 소산계수 ($c(\lambda)$)는 아래의 식 (3.3.28)과 같이 흡수계수($a(\lambda)$)와 산란계수($b(\lambda)$)의 합으로 표현되므로, 산란계수는 소산계수와 흡수계수의 차로 구하였다.

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (3.3.28)$$

$$\therefore b(\lambda) = c(\lambda) - a(\lambda) \quad (3.3.29)$$



그림 3.3.12 대기 입자의 size distribution($F(d)$)를 분석하기 위해 사용된 Beckman Coulter사의 Multisizer™ 3 Coulter Counter.



그림 3.3.13 대기 입자의 흡수 계수(absorption coefficient, $a(\lambda)$)와 소산 계수(attenuation coefficient, $c(\lambda)$)를 측정하기 위해 사용된 Perkin Elmer사의 Lambda 19 UV/VIS/NIR Spectrophotometer.

위에서 얻은 대기 입자의 크기 분포 ($F(d)$), 흡수계수 ($a(\lambda)$), 산란계수 ($b(\lambda)$), 소산계수

$(c(\lambda))$ 를 이용하여 각각 대기 입자에 의한 광의 흡수, 산란, 소산에 대한 효율인자 (efficiency factor, Q)를 계산할 수 있다. 효율인자에 대한 일반적인 정의는 다음과 같다.

$$Q_i = \frac{i}{S} \quad (3.3.30)$$

여기서, Q_i 는 입자의 광 효율인자로서 i 가 흡수(a)이면 흡수 효율인자, 산란(b)이면 산란 효율인자, 소산(c)이면 소산 효율인자가 된다. 그에 따라서 i 는 입자에서 광에 대한 흡수(a) 또는 산란(b) 또는 소산(c)되는 총 에너지이고, S 는 입자 단면에 입사되는 총 에너지를 나타낸다. 따라서 대기 입자의 흡수, 산란, 소산에 대한 Q factor는 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$Q_i = \frac{i}{\sum S} \quad (3.3.31)$$

여기서, i 는 흡수계수($a(\lambda)$), 산란계수($b(\lambda)$), 소산계수($c(\lambda)$)를 각각 나타내고 있으며, $\sum S$ 는 대기 입자의 총 단면적의 합으로서 $F(d)$ 값과 대기 입자의 지름(r)을 이용하여 계산할 수 있으며 식은 다음과 같다.

$$\sum S = \pi/4 \int_0^\infty F(d) r^2 dr \quad (3.3.32)$$

대기 입자의 Q factor 값과 Van de Hulst 이론에 의해 대기 입자의 광학적 특성을 나타내는 상대굴절지수 (relative reflectance index, n)와 흡수지수 (absorption index, n')를 구할 수 있다. Van de Hulst 이론은 입자에 의한 광 산란과 흡수효율 이론을 복잡하고 계산이 긴 Mie 이론으로부터 단순화시킨 것으로서, 입자의 흡수지수 (n')와 상대굴절지수 (n), 입자의 크기 (d)가 주어질 때 흡수 효율인자 (Q_a)와 소산 효율인자 (Q_c)는 다음과 같다.

$$Q_a(\rho') = 1 + 2 \frac{\exp(-\rho')}{\rho'} + 2 \frac{\exp(-\rho') - 1}{\rho'^2} \quad (3.3.33)$$

여기서, ρ' 는 흡수에 대한 입자의 광학적 두께 (optical thickness)로서 $\rho' = 4\alpha n'$ 이고, α 는 파장 λ 에 대한 입자의 상대적인 크기로서 $\alpha = \pi d n / \lambda$ 이다.

$$Q_c(\rho) = 2 - 4 \exp(-\rho \tan \xi) \left[\frac{\cos \xi}{\rho} \sin(\rho - \xi) + \left(\frac{\cos \xi}{\rho} \right)^2 \cos(\rho - 2\xi) \right] \quad (3.3.34)$$

$$+ 4 \left(\frac{\cos \xi}{\rho} \right)^2 \cos 2\xi$$

여기서, $\tan \xi = n' / (n - 1)$ 이고 $\rho = 2\alpha(n - 1)$ 이다. ρ (Phase lag)의 물리적 의미는 광이 굴절률 n 인 입자를 통과하는 동안 매질보다 지연되는 광로를 의미한다. 이것은 식 (3.3.33)에서 ρ' (흡수에 의하여 지체되는 광학적 두께)와 유사한 의미를 갖는다.

그러므로 대기 입자의 흡수지수(n')는 다음과 같은 식에 의해 계산된다.

$$\overline{Q_a} = \frac{\int_0^\infty Q_a(\rho') F(\rho') \rho'^2 d\rho'}{\int_0^\infty F(\rho') \rho'^2 d\rho'} \quad (3.3.35)$$

여기서, $\rho' = 4\alpha n'$ 이고 좌변항은 에어 샘플러를 통해 측정된 대기 입자의 size distribution($F(d)$)과 흡수계수($a(\lambda)$) 값을 식 (3.3.31)에 대입하여 얻은 실험에 의해 얻은 값이다. 우변항은 다중 분포된 대기 입자들의 흡수지수를 n' 이라고 가정하였을 때 계산되는 이론적인 값이다. 따라서 파장 λ 에 대하여 우변항의 n' 값을 계속 변화시키면서 산출되는 $Q_a(\lambda)$ 값과 좌변항의 측정을 통해 산출된 $Q_a(\lambda)$ 값이 같을 때까지 반복적인 계산을 계속하다가 좌변항과 우변항이 같아질 때의 n' 값이 구하고자 하는 대기 입자의 흡수지수가 된다.

대기 입자의 상대 굴절지수(n)의 계산도 흡수지수의 계산과 유사하게 반복적인 방법을 사용하며, 식은 다음과 같다.

$$\overline{Q_c} = \frac{\int_0^\infty Q_c(\rho) F(\rho) \rho^2 d\rho}{\int_0^\infty F(\rho) \rho^2 d\rho} \quad (3.3.36)$$

여기서, $\rho = 2\alpha(n - 1)$ 이다. 좌변항은 대기 입자의 샘플링을 통해 측정된 대기 입자의 size distribution($F(d)$)과 소산계수($c(\lambda)$)를 이용하여 얻은 값이고, 우변항은 대기 입자의 상대 굴절지수를 n 이라고 할 때 산출되는 이론적인 값이다. 따라서 파장 λ 에 대한 대기 입자의 상대 굴절지수(n)는 우변항의 이론적인 $Q_c(\lambda)$ 값과 좌변항의 측정된 $Q_c(\lambda)$ 값이 수렴할 때까지 굴절지수 n 값을 변화시키면서 반복적으로 계산하여 좌변항과 우변항의 값이 일치할 때의 n 값을 얻는다.

이와 같이 대기 입자의 광학적 특성을 나타내는 상대 굴절지수(n)와 흡수지수(n') 값을

지속적으로 산출하여 일별, 월별로 그 변화패턴이 어떻게 변하는지 모니터링하고 그에 따른 에어로졸 타입을 분석하여 에어로졸 특성에 따른 광학적 특성을 파악하고자 한다. 이렇게 얻은 에어로졸의 정보들을 대기보정 알고리즘의 에어로졸 타입을 결정하는데 활용코자 한다. 그림 3.3.14는 위의 내용들을 도식화하여 간략히 나타낸 것이다.

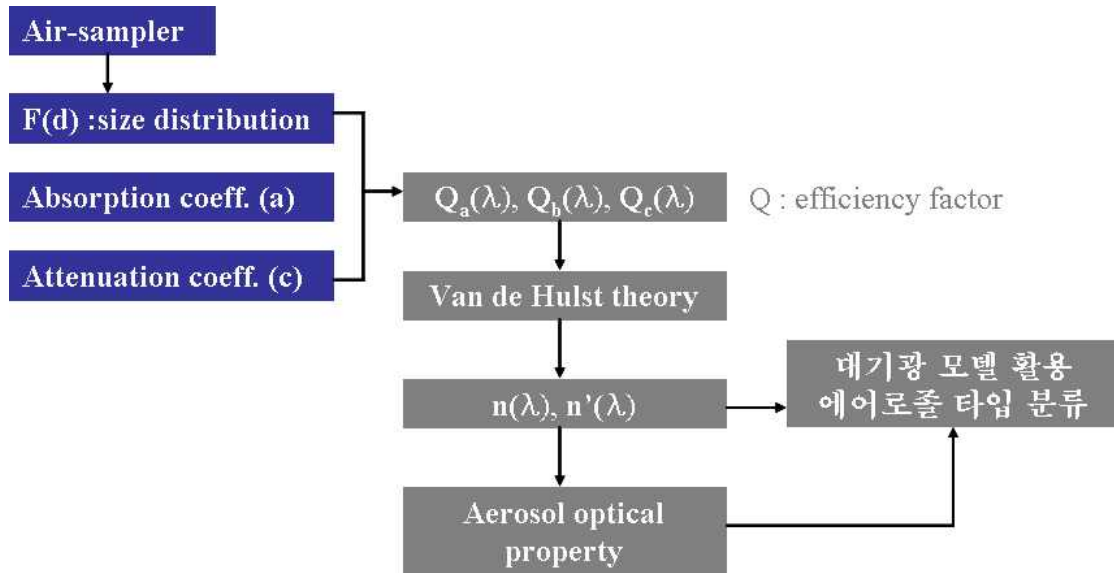


그림 3.3.14 에어로졸 광특성 연구에 대한 도식화

그림 3.3.15는 휴대용 입자계수기 (particle counter)인 MetOne사의 Portable Airborne Particle Counter Model 237B로서, 대기 중에 분포하는 입자들을 사이즈별로 counting하는 대기 광학 관측기기이다. 표 3.3.5에서 보는 바와 같이 237B 입자계수기는 $0.3\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$, $0.7\mu\text{m}$, $1.0\mu\text{m}$, $2.0\mu\text{m}$, $5.0\mu\text{m}$ 의 6개 channel을 가지고 있으며, 유량은 0.1 cfm (Cubic Feet per Minutes)로서 분당 2.83ℓ 의 공기를 흡입한다. 또한 레이저를 이용하여 본체 내로 흡입된 공기 중의 입자를 사이즈별로 counting하는 방식을 채택하고 있다. 237B 입자계수기는 휴대용이므로 손쉽게 이동하여 원하는 장소에서의 대기 입자의 크기별 분포를 정량적으로 빠르게 분석할 수 있는 장점이 있다.

2005년 4월 18일부터 현재까지 한국해양연구원 제3연구동 옥상에 설치하여 하루에 5회 씩(09:30, 11:30, 13:30, 15:30, 17:30) 측정하여 대기 중 입자의 크기별 분포를 정량적으로 분석하였다.



그림 3.3.15 MetOne사의 Portable Airborne Particle Counter Model 237B.

표 3.3.5 MetOne사의 Portable Airborne Particle Counter Model 237B 주요 사양

Size Channels(μm)	0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 5.0
Flow Rate	0.1 cfm (2.83 lpm)
Light Source	Laser diode (30,000 hours mean time between failure)
Factory Calibration	Mono-dispersed polystyrene spheres (NIST traceable)
Display	7-digit red LED
Output	RS232C/RS485 for computer, built-in printer
Location Labels	250, appear on printout
Data Storage	500 samples, rotating buffer
Sample and Hold Times	1 second to 24 hours
Power	AC adapter or internal battery pack
Battery Type	Rechargeable NiCd
Battery Recharge Time	90% in 10 hours; 100% in 12 hours
Operating Time	4 hours with printing, 8 hours without printing, typical
Size	wide 17cm \times high 12cm \times deep 30cm
Weight	3.1 kg

3. 연구결과

가. 대기 투과도 모니터링

PREDE사의 PGS-100 Grating Sunphotometer를 이용하여 2004년 3월부터 2005년 4월까지 매일 오전 8시부터 저녁 6시까지 10분 간격으로 solar irradiance ($E_{sun}(\lambda)$)를 측정하였다. 그 중에서 기상상태가 구름이 전혀 없었을 때 측정된 자료들만을 선별하여 일별, 월별, 시간별로 비교, 분석하였으며, 시간별 비교에서는 일출과 일몰 직전의 $E_{sun}(\lambda)$ 을 제외한 오전 10시부터 오후 5시까지의 자료들만을 사용하였다.

그림 3.3.16은 PGS-100에서 측정한 $E_{sun}(\lambda)$ 값을 월별로 비교한 자료로서, 우리나라 여름철에는 장마철과 태풍의 영향으로 운량이 많아서 태양이 가려지고 $E_{sun}(\lambda)$ 을 측정하는데 열악한 환경이 되므로 2004년 7월과 8월의 맑은 날 $E_{sun}(\lambda)$ 자료는 얻을 수 없었다. 그림 3.3.16에서 보면, 2004년 3월에서 5월까지의 시간에 따라 다른 달에 비해 전반적으로 높은 E_{sun} 값을 형성하고 있으며 파장 550nm를 기준으로 오후 1시에서 2시 사이에 측정된 E_{sun} 값이 가장 높게 나타나고 있었다. 2004년 6월 관측 자료에서는 3월 - 5월 관측 자료보다 조금 낮은 E_{sun} 값을 나타내고 있으며, 시간에 따라서도 파장 550nm를 기준으로 3월 - 5월 관측 자료와는 다른 시간대인 오전 11시에서 정오 사이에 측정한 E_{sun} 값이 가장 높게 나타나고 있다. 2004년 9월 관측 자료는 6월 관측 자료보다 조금 낮게 나타나고 있었으며, 시간에 따라서 파장 550nm를 기준으로 오전 11시에서 오후 1시까지 관측된 E_{sun} 값이 가장 높은 값을 형성하고 있었다. 2004년 10월 관측 자료에서는 9월 관측 자료보다 E_{sun} 값이 전반적으로 높게 나타나고 있었으며, 파장 550nm를 기준으로 시간에 따라서 오후 1시에 측정한 E_{sun} 값이 가장 높게 나타나고 있었다. 11월 관측 자료에서도 10월 관측 자료와 유사하게 나타나고 있었는데, 파장 550nm를 기준으로 정오에 측정한 E_{sun} 값이 가장 높게 나타나고 있었다. 또한 2004년 9월 - 11월까지 파장 550nm를 기준으로 시간에 따른 E_{sun} 값은 최고값이 나타났던 시간대 이후로 서서히 감소하다가 오후 5시에 관측한 E_{sun} 값이 가장 최저값을 나타내는 경향을 보이고 있었다. 이것은 2004년 3월 - 6월까지 시간에 따른 E_{sun} 값의 분포 형태와는 다른 모습이며, 3월 - 6월의 관측 자료에서는 오후 5시에 관측한 E_{sun} 값이 9월 - 11월에 관측한 동일 시간대의 자료보다 상당히 높게 나타나고 있었음이 이것을 잘 대변해주고 있다. 2004년 12월부터 2005년 2월까지의 9월 - 11월에 관측한 자료와 유사하게 나타나고 있었으며, 전반적으로 파장 550nm를 기준으로 E_{sun} 값이 가장 높게 나타나는 시간대는 정오에서 오후 2시 사이였다. 또한 시간에 따라서 서서히 감소하는 경향이 점점 줄어들고 있었으며, 특히 오후 4시에 관측된 E_{sun} 값과 오후 5시에 관측된 E_{sun} 값의 차이가 급격하게 형성되고 있었다. 2005년 3월부터 4월까지 관측된 E_{sun} 값은 시간에 따라서 2004년 3-4월 자료와 거의 동일한 분포를 나타내고 있었다.

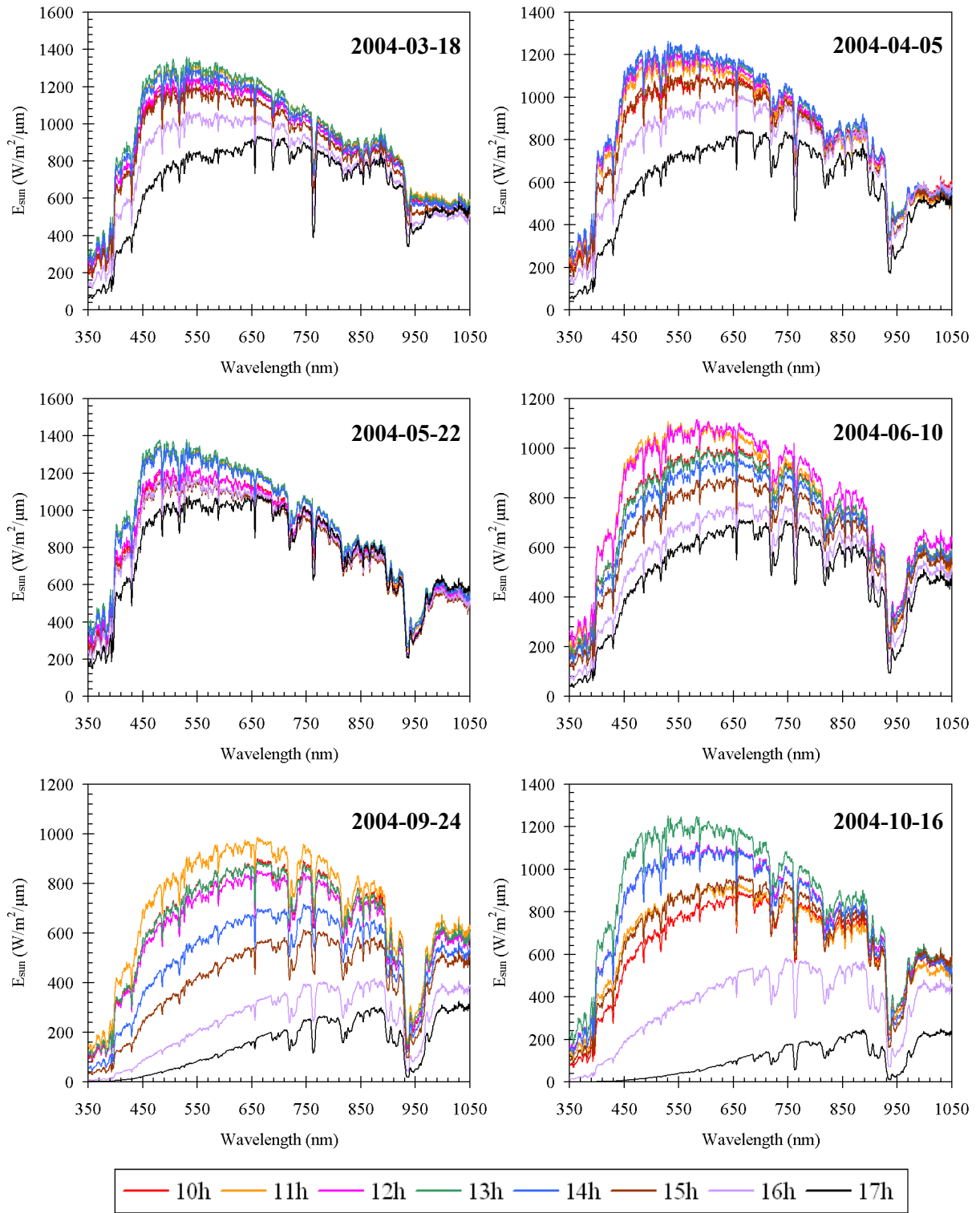


그림 3.3.16 PGS-100에서 측정 한 solar irradiance(E_{sun})의 2004년 3월부터 2005년 4월까지 월별 변화

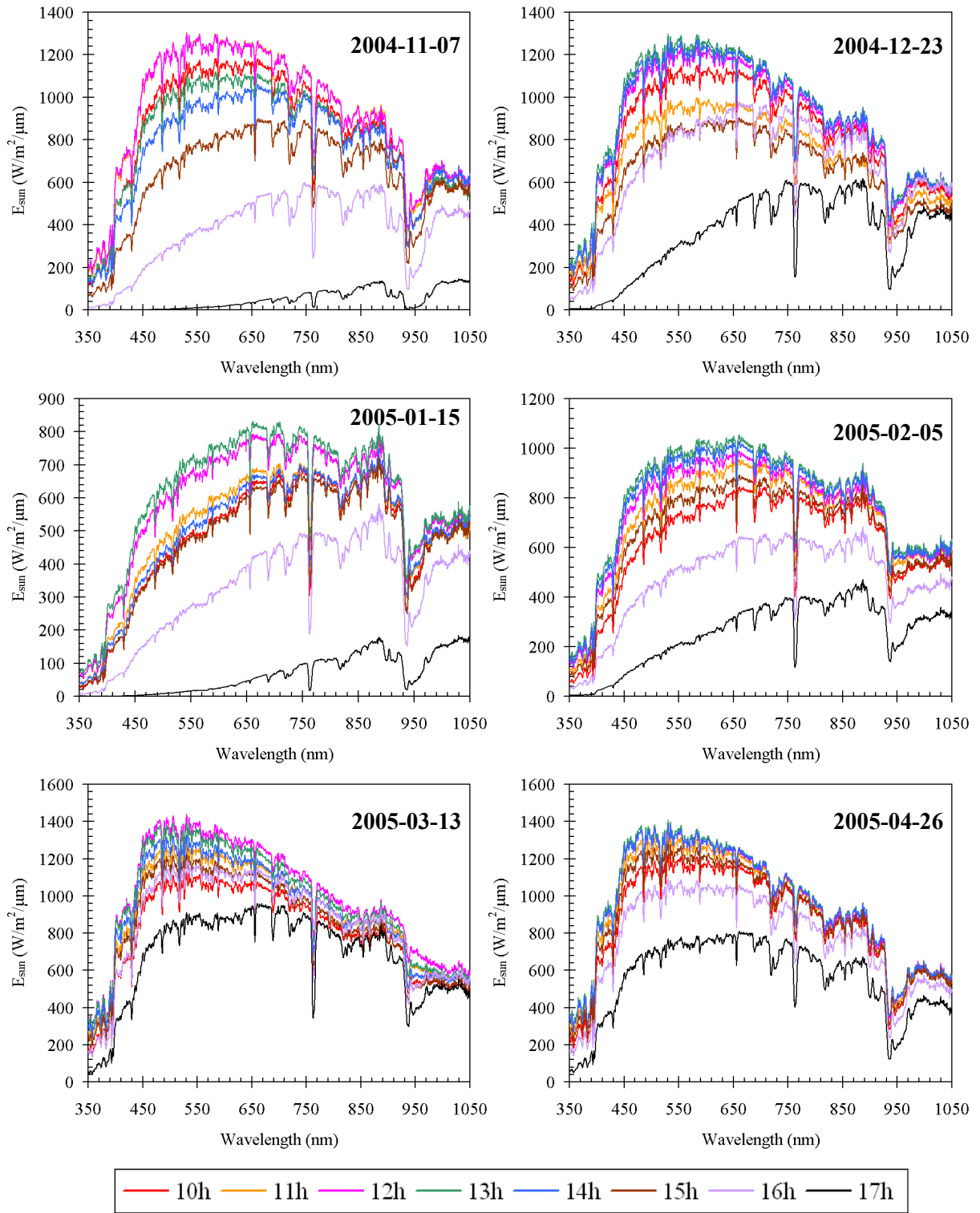


그림 3.3.16 계속.

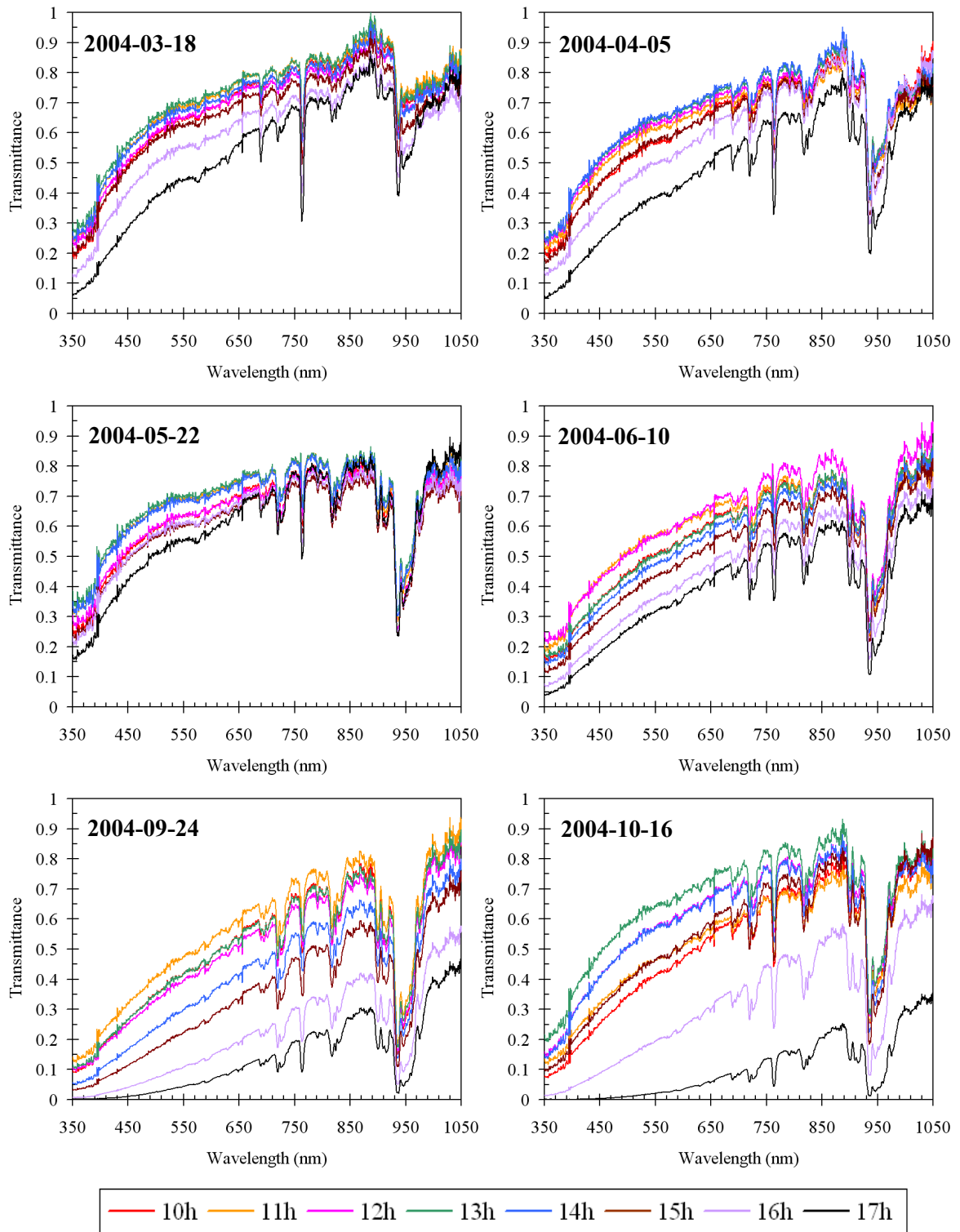


그림 3.3.17 PGS-100에서 측정 한 solar irradiance(E_{sun})를 이용하여 계산된 Transmittance의 2004년 3월부터 2005년 4월까지 월별 변화

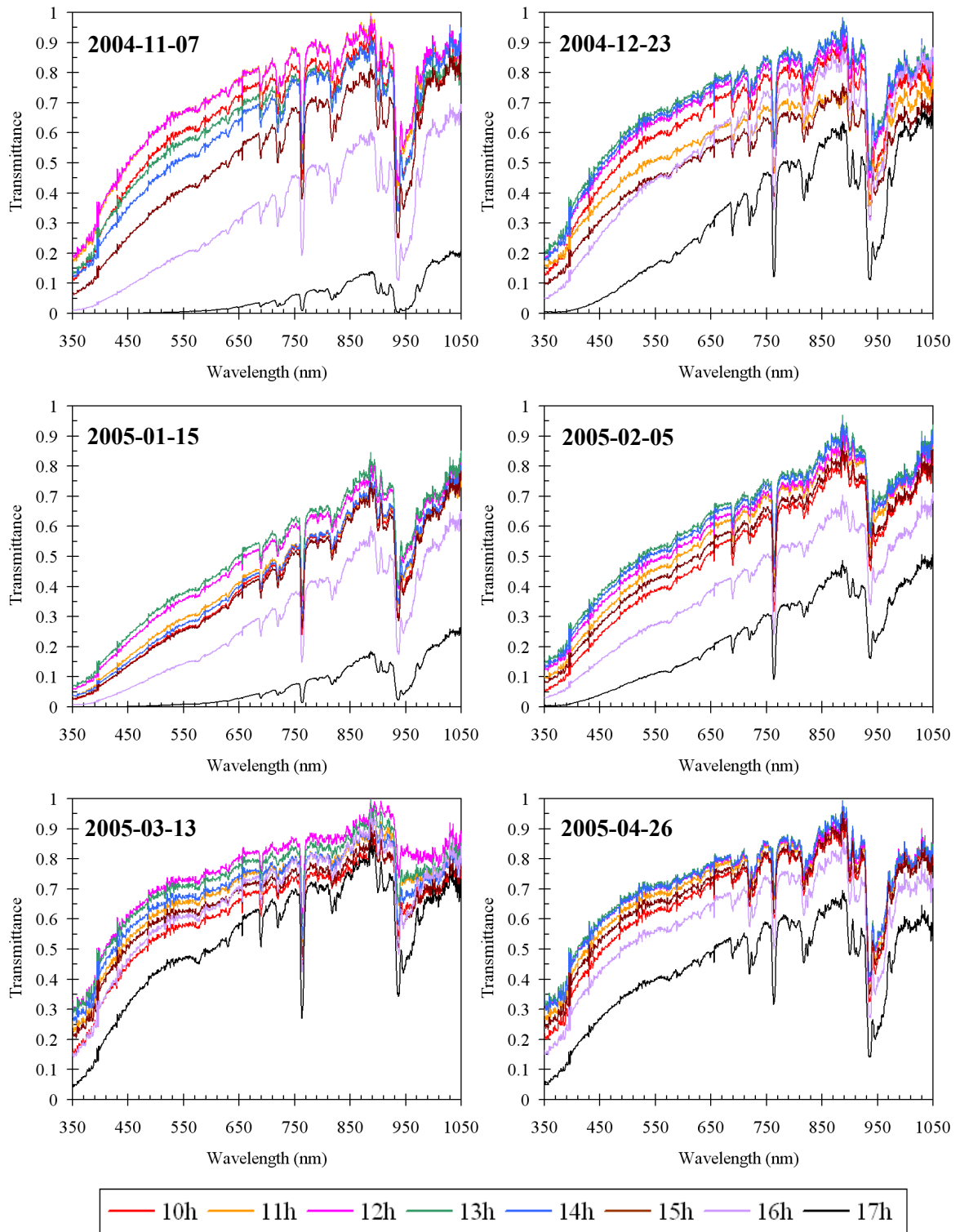


그림 3.3.17 계속.

그림 3.3.17은 PGS-100에서 측정한 E_{sun} 값(그림 3.3.16)을 이용하여 계산된 대기의 투과도(transmittance)로 2004년 3월부터 2005년 4월까지 월별 변화를 나타낸 것이다. 대기의 투과도는 대기권 밖에서 측정한 $E_{sun}(\lambda)$ 값과 대기권 내 지표면에서 측정한 $E_{sun}(\lambda)$ 값의 비 값이므로 0과 1 사이의 값의 분포를 가지게 된다. 이것은 지구표면을 둘러싸고 있는 대기층이 항상 존재하고 있으며, 이 대기층은 태양으로부터 지구표면으로 내려오는 태양광을 흡수 또는 산란하거나 소산시키기 때문에 E_{sun} 값은 대기권 밖보다 항상 적게 측정된다. 만약 1이 넘는다면, 대기권 밖보다 대기권 내 지표면에서 태양광에 의한 E_{sun} 값이 높다는 것을 의미하는 것으로 이것은 이론적으로 불가능한 것이다. 따라서 본 연구에서 측정한 2004년 3월부터 2005년 4월까지 대기의 투과도는 모두 1 이하의 값을 나타내고 있었으므로 측정된 E_{sun} 값을 신뢰할 수 있다고 생각된다. 그림 3.3.17에서 보면 2004년 3월부터 5월까지 측정한 대기의 투과도는 시간에 따라서 큰 차이 없이 거의 일률적으로 나타나고 있었다. 파장 850nm를 기준으로 투과도가 가장 높게 나타난 시간대는 오후 1시에서 2시 사이로서 그림 3.3.16의 동일한 시기에 측정한 E_{sun} 자료에서 나타난 시간대와 일치하고 있었다. 2004년 6월 측정한 대기의 투과도 자료부터 2004년 11월 자료까지는 파장 850nm를 기준으로 시간에 따라서 가장 높은 대기의 투과도 값을 나타낸 시간대가 6월에는 오전 11시에서 정오사이, 9월에는 오전 11시경, 10월에는 오후 1시경, 11월에는 오전 11시에서 정오사이로서 조금씩 다르게 나타나고 있었다. 또한 2004년 3월 - 5월 관측 자료와는 다르게 대기의 투과도가 최고값을 나타낸 시간대로부터 오후 5시까지 시간이 변화함에 따라 서서히 감소하는 추세를 나타내고 있었다. 이와 같이 최고값을 나타낸 시간대에서 오후 5시까지 감소하는 추세는 겨울철인 2004년 12월과 2005년 1월, 2월에서도 잘 나타나고 있었으며, 겨울철에는 파장 850nm를 기준으로 대기의 투과도가 오후 1시경에 가장 높은 값을 나타내고 있었다. 2005년 3월과 4월 대기의 투과도 관측자료들은 2004년 3월과 4월 자료들과 매우 유사하였으며, 이것들도 역시 그림 3.3.16의 동일한 시기에 측정한 E_{sun} 자료에서 나타났던 최고값의 시간대와 모두 일치하고 있었다. 월별에 따라서 나타나는 대기 투과도의 스펙트럴 형태는 사계절 중 봄에 해당하는 2004년 3월 - 5월까지 관측된 자료들 모두 파장 400nm에서 590nm까지 조금 불룩한 형태의 곡선 모양을 나타내고 있었다. 그러나 2004년 6월과 9월에 관측된 대기 투과도 자료들에서는 이와 같은 형태가 거의 사라지고 완만한 곡선 혹은 직선에 가까운 형태를 나타내고 있었다. 2004년 10월부터 12월까지 다시 조금 불룩한 형태의 곡선 모양을 이루고 있었으며, 2005년 1월과 2월에는 이러한 형태가 완화되어 직선에 가까운 형태를 나타내고 있었다가 2005년 3월과 4월에는 1년전인 2004년 3월과 4월에 나타났었던 형태와 거의 유사하게 나타나고 있었다. 이와 같이 가시광 영역에 해당되는 파장대에서 월별로 조금씩 다른 모양의 그래프를 나타내고 있었던 것은 계절별로 대기의 성분이 조금씩 차이가 있었기 때문이라고 사료되며, 이에 대한 연구는 앞으로 이루어져야 할 것이다. 그리고 각 파장에 따른 흡수대가 계절별로 다르게 분포함을 알 수 있는데, 690nm와 940nm 부근은 수증기에 의한 흡수대이며 760nm 전후는 수증기와 O₂에 의한 흡수대이다. 따라서 월별 계절별 흡수대 특성연구도 추후 수행할 계획이다.

관측지역에서 대기의 매질은 하루에도 수차례 바뀔 것이라고 생각된다. 따라서 PGS-100을 이용하여 측정된 solar irradiance(E_{sun})과 대기의 투과도(transmittance) 값들이 시간에 따라서 일별로 어떻게 변화하는지 분석하기 위해 최근에 관측한 자료 2005년 4월 관측 자료들을 분석하여 그림 3.3.18과 그림 3.3.19에 각각 나타냈다. 그림 3.3.18은 2005년 4월 한달 동안 관측한 E_{sun} 값이 시간에 따라 일별로 어떻게 변화하는지 분석한 자료들이다. 2005년 4월 초순에 해당하는 4월 4일부터 8일까지 관측한 E_{sun} 값들은 시간에 따라서 급격한 변화를 나타내고 있었다. 특히 4월 4일과 4월 8일 자료에서는 최고값을 나타낸 시간대가 각각 오전 11시에서 12시 사이와 오전 11시경인데, 이 시간대를 기준으로 오후 5시까지 E_{sun} 값이 시간이 경과할수록 급격하게 낮아지는 경향을 나타내고 있었다. 4월 중순에 해당하는 4월 13일부터 4월 16일까지 관측한 E_{sun} 값들은 시간에 따라 그 변화폭이 상당히 작았으며 4월 13일 관측 자료만 모든 시간대에 대하여 E_{sun} 값의 변화가 소폭 변동하는 형태를 나타내고 있었을 뿐이고, 나머지 4월 15일과 4월 16일 관측 자료에서는 오후 5시에 측정된 E_{sun} 자료만이 이전 시간에 측정된 E_{sun} 자료보다 상대적으로 낮게 나타내고 있었던 것이 특징이라고 할 수 있다. 또한 4월 13일과 4월 15일 관측 자료들은 모두 최고값을 나타낸 E_{sun} 값의 시간대가 오후 3시경이었으며 다른 자료들과는 사뭇 다른 분포형태를 나타낸 그래프였다. 4월 하순에 해당하는 4월 21일부터 4월 26일까지 관측한 E_{sun} 값들은 시간에 따라서 매우 다양하게 나타나고 있었다. 우선 4월 21일 관측한 자료인 경우에는 4월 초순 자료와 유사하게 나타나고 있었는데, E_{sun} 값이 정오에 최고값을 나타낸 이후 오후 5시까지 순차적으로 감소하고 있었다. 4월 22일 관측 자료는 4월 중순에 나타난 특징 중 한가지인 4월 13일 자료와 매우 유사하게 시간대별로 E_{sun} 값이 소폭 변동하는 형태를 나타내고 있었다. 나머지 4월 23일부터 26일까지 자료들은 모두 4월 중순에서 나타난 특징 중 한가지인 오후 5시 관측 자료가 이전 시간대에서 관측한 E_{sun} 자료보다 상대적으로 급격히 하락한 모습을 나타내고 있었다. 또한 각 일별로 시간에 따라서 E_{sun} 의 최고값이 관측된 시간대는 각각 4월 21일에는 정오, 4월 22일에는 오후 3시에서 오후 4시 사이, 4월 23일에는 오후 1시부터 오후 3시 사이, 4월 25일에는 정오에서 오후 2시까지, 4월 26일에는 오후 1시에서 오후 2시 사이에 나타나고 있었다.

그림 3.3.19는 2005년 4월 한달동안 측정된 E_{sun} 값을 이용하여 계산된 대기 투과도의 일별 변화를 나타낸 그래프들이다. 월별 대기 투과도 변화 모니터링 자료(그림 3.3.17)에서 언급하였듯이, 대기 투과도의 일별 변화 자료에서 나타나는 시간에 따른 대기 투과도 값의 변동 특성은 그림 3.3.18에서 나타난 E_{sun} 값의 일별 변동 특성과 일치하고 있었다. 또한 파장에 따른 형태도 그림 3.3.17의 월별 변화 자료에서 2004년 4월과 2005년 4월 자료에서 나타난 것과 동일하게 파장 400nm에서 590nm까지 조금 불룩한 형태의 곡선 모양을 2005년 4월 한달 동안 관측한 자료에서 날짜에 상관없이 동일하게 나타내고 있었다. 단지 일별로 다르게 나타나고 있었던 것은 대기 투과도의 최고값이다. 2005년 4월 5일과 8일은 대기 투과도 최고값이 파장 850nm에서 0.6을 나타내고 있었으나, 4월 4일과 4

월 13일, 15일, 4월 25일, 26일에서는 대기 투과도 최고값이 파장 850nm에서 0.9를 나타내고 있었다. 그 외 나머지 4월 16일, 21일, 22일, 23일에서는 대기 투과도 최고값이 파장 850nm에서 0.8를 나타내고 있었다.

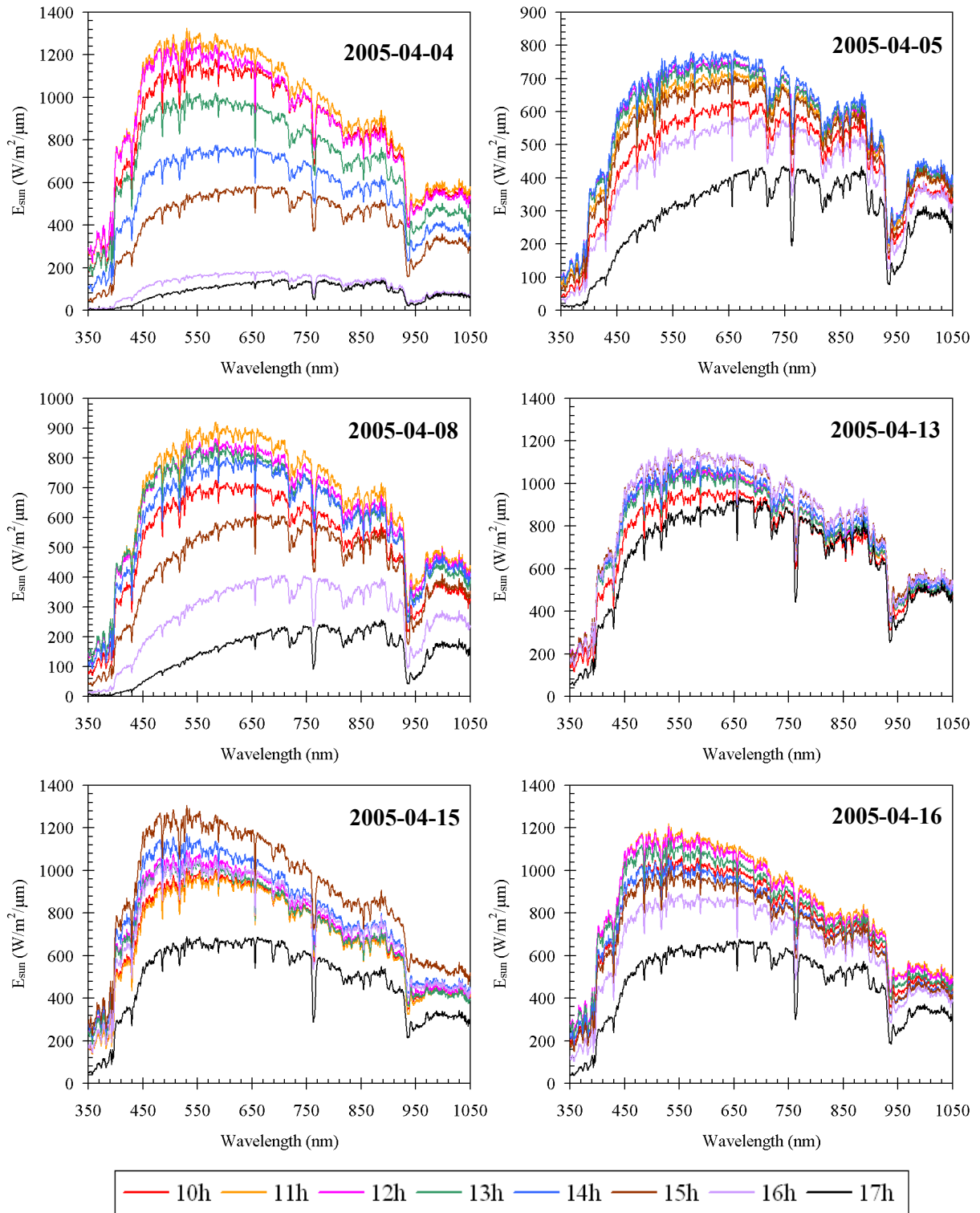


그림 3.3.18 PGS-100에서 측정된 solar irradiance(E_{sun})의 2005년 4월 일별 변화

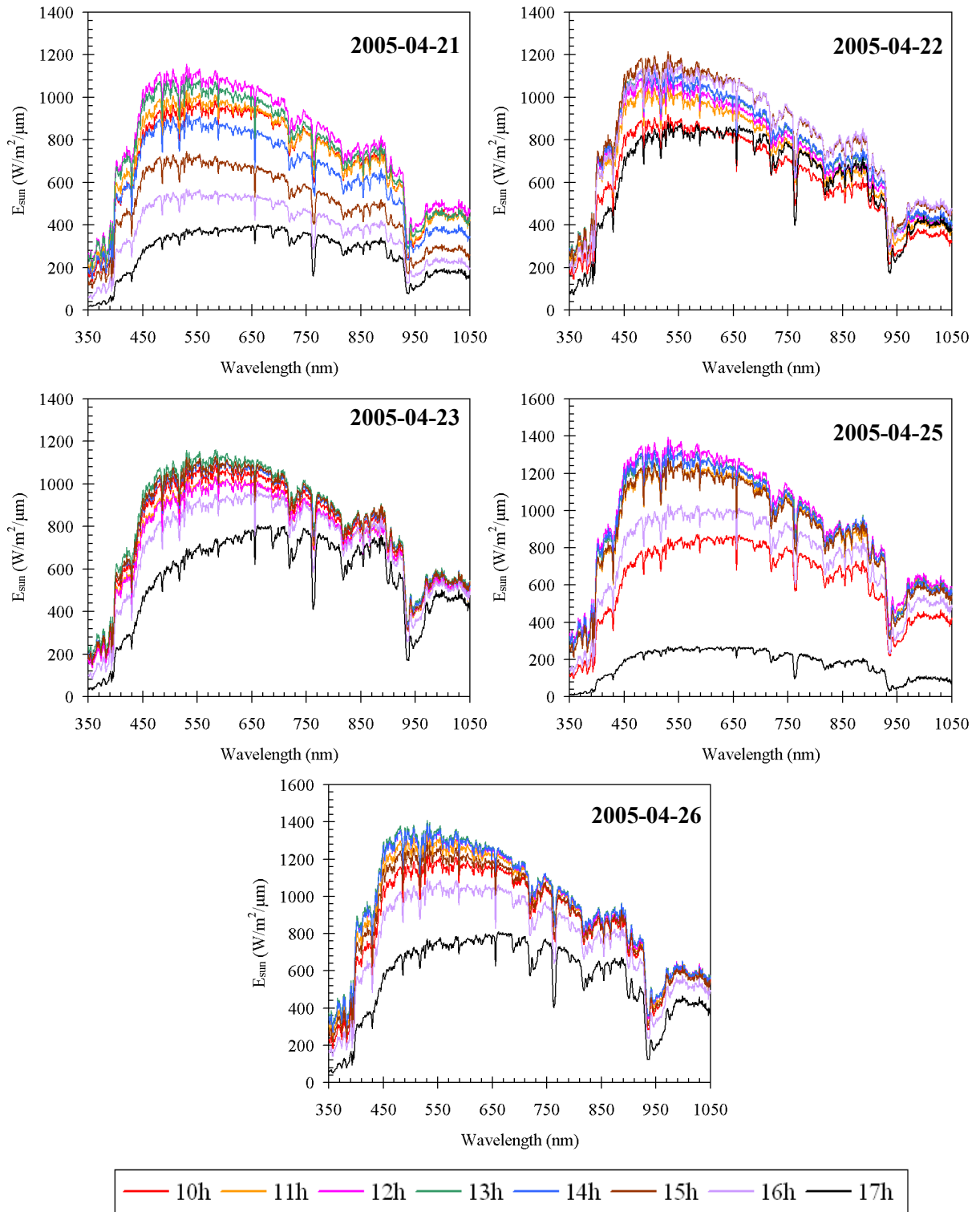


그림 3.3.18 계속.

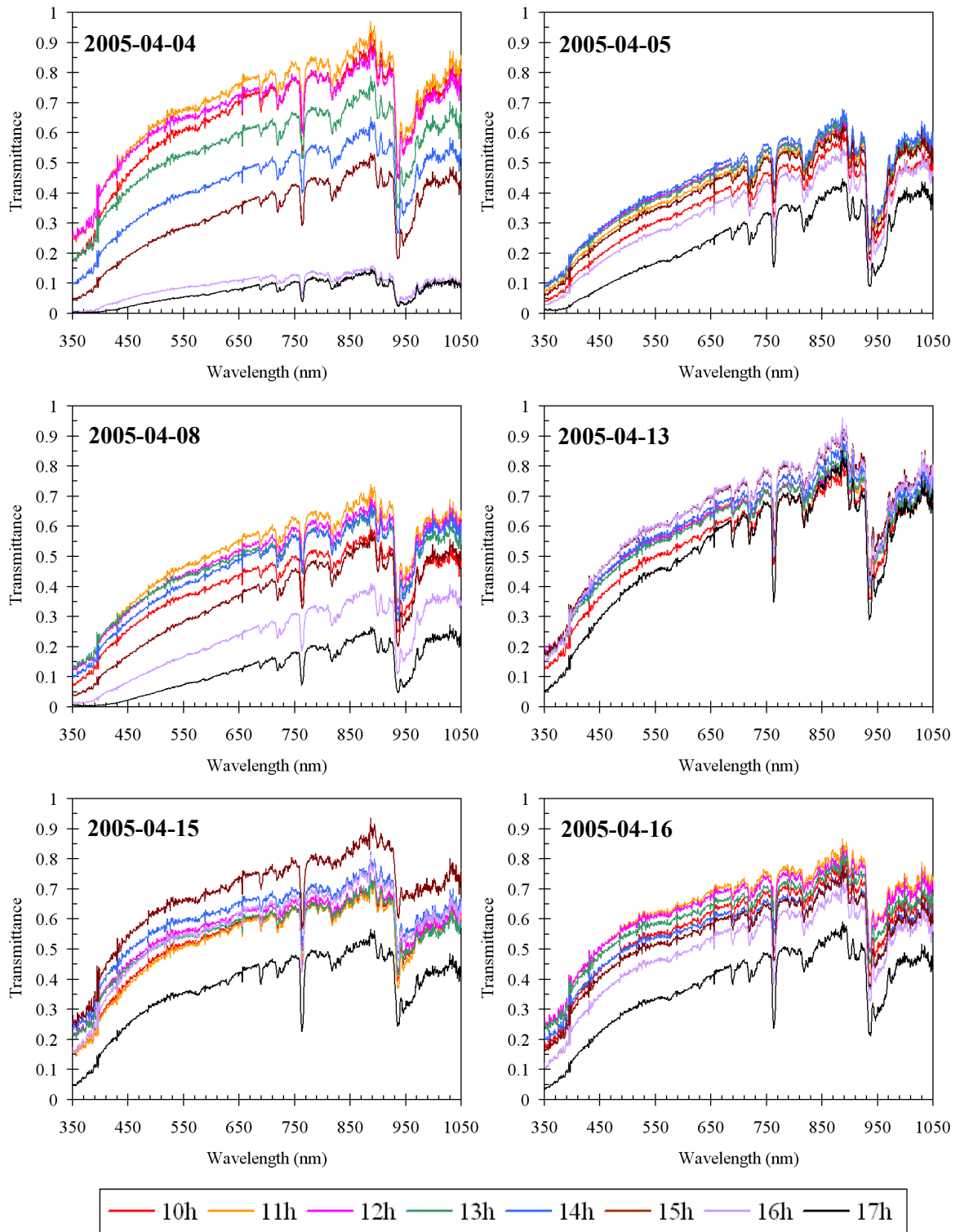


그림 3.3.19 PGS-100에서 측정 한 solar irradiance(E_{sun})를 이용하여 계산된 Transmittance의 2005년 4월 일별 변화

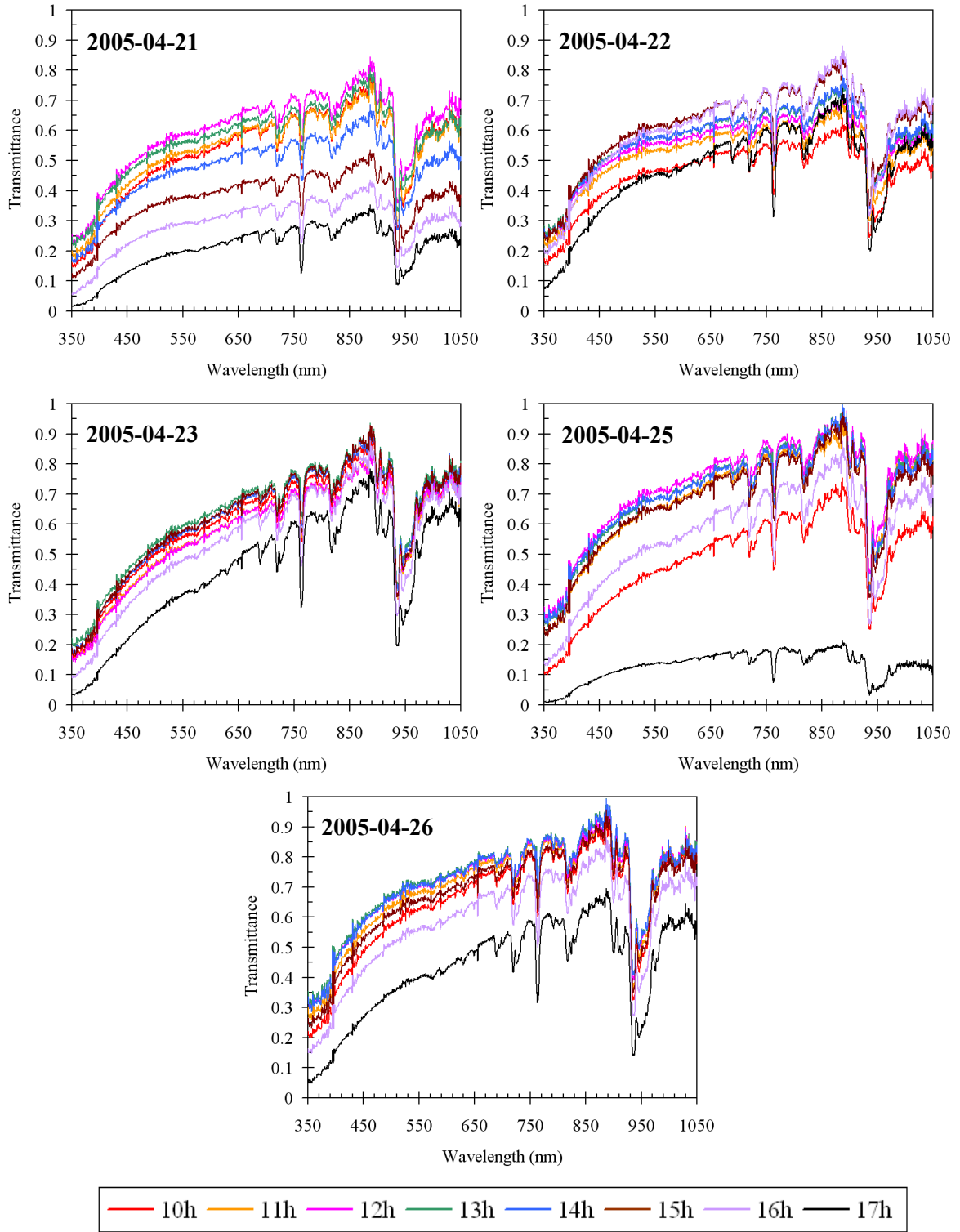


그림 3.3.19 계속.

나. 대기의 광학적 두께 모니터링

그림 3.3.20은 PGS-100 Sunphotometer를 이용하여 2004년 3월부터 2005년 4월까지 관측된 파장 550nm, 660nm, 745nm에 대한 대기의 광학적 두께(optical thickness)의 시간에 따른 월별 변화를 나타낸 그래프들이다. 그림 3.3.21은 2005년 4월동안 관측된 파장 550nm, 660nm, 745nm에 대한 대기 광학적 두께(optical thickness)의 시간에 따른 일별 변화를 나타낸 그래프들이다. 각각의 파장들에 대해서 시간에 따라 동일한 날짜의 변화 패턴이 같게 나타나고 있으므로 파장 550nm에 대한 대기 광학적 두께의 월별과 일별 변화를 통합하여 각각의 그래프로 나타낸 것이 그림 3.3.22이다.

그림 3.3.22의 A는 파장 550nm에 대한 대기 광학적 두께의 월별 변화를 나타낸 그래프로서, 2004년 3월부터 5월까지의 대기의 광학적 두께가 시간에 관계없이 1 이하이지만 2004년 6월에는 오후 4시부터 대기의 광학적 두께가 1 이상의 값을 나타내고 있었다. 9월 자료에서는 6월 자료보다 빠르게 오후 2시부터 대기의 광학적 두께가 1 이상의 값을 나타내고 있었다. 2004년 10월부터 12월까지의 2004년 6월 자료와 유사하게 오후 4시 이후부터 대기 광학적 두께가 1 이상을 나타내고 있었다. 2005년 1월 자료에서는 정오부터 대기 광학적 두께가 1을 넘어섰으며, 이 시기가 가장 빠르게 1 이상의 값에 도달한 시간으로 기록되었다. 2005년 2월부터는 대기 광학적 두께가 1 이상에 도달했던 시간이 차츰 길어져서 2월에 오후 4시였던 것이 3월부터는 관측시간 모두 1이하의 값을 나타내고 있었다. 월별 대기 광학적 두께 값의 시간에 따른 변동폭은 2004년 3월과 4월은 0.45 정도로 전반적으로 낮게 나타나고 있었으며, 5월은 0.3 정도로 가장 낮은 변동폭을 가지고 있었다. 2004년 6월부터는 시간에 따른 대기 광학적 두께의 변동폭이 서서히 증가하기 시작하고 있었으며, 6월 0.5, 9월 2.7, 10월 3.4, 11월 4.9, 12월 1.3, 2005년 1월 4.0, 2월 1.5로 2004년 11월이 시간에 따른 대기 광학적 두께의 변동폭이 가장 크게 나타났으며, 2004년 12월에 잠시 변동폭이 줄었다가 2005년 1월에 다시 증가한 후 2월부터 서서히 감소하는 경향을 보이고 있었다. 2005년 3월과 4월은 2004년 3월과 4월의 변동폭과 유사하게 나타나고 있었다.

그림 3.3.22의 B는 파장 550nm에 대한 2005년 4월 대기 광학적 두께의 일별 변화를 나타낸 그래프로서, 2005년 4월 초순에 해당하는 4월 4일부터 8일까지는 시간에 따른 대기 광학적 두께가 대부분 정오를 지나면서 1 이상의 값을 나타내고 있었다. 또한 대기 광학적 두께 값의 시간에 따른 변동폭도 4월 4일은 3.0으로 상당히 컸었는데, 4월 5일에는 0.8로 급격히 줄어들었다가 4월 8일 1.6으로 다시 커지는 등 시간에 따른 광학적 두께의 변동폭이 급변하는 형태를 나타내고 있었다. 4월 중순에 이르러서는 대기 광학적 두께 값이 전반적으로 1 이하로 나타났으며, 시간에 따른 변동폭도 4월 13일 0.25, 4월 15일 0.5, 4월 16일 0.6으로 4월 초순에 비해 상당히 일정한 값을 유지하고 있었다. 4월 하순에는 일부 시간대에서 대기의 광학적 두께 값이 1이 넘는 경우가 종종 나타나고 있었다. 4월 21일에는 오후 4시부터 대기의 광학적 두께 값이 1이 넘었으며, 4월 22일에는 관측시간 내내 1 이하의 값을 나타내고 있었다. 그 이후 4월 23일, 25일, 26일에는 오후 5시 이후에 관측된 대기의 광학적 두께 값이 1을 초과하는 값을 나타내고 있었다. 시간에 따른 대기 광학적 두께 값의 변동폭도 4월 21일 0.6, 4월 22일 0.2, 4월 23일 0.45, 4월 25일

1.4, 4월 26일 0.5로 소폭 변동하는 형태를 나타내고 있었다.

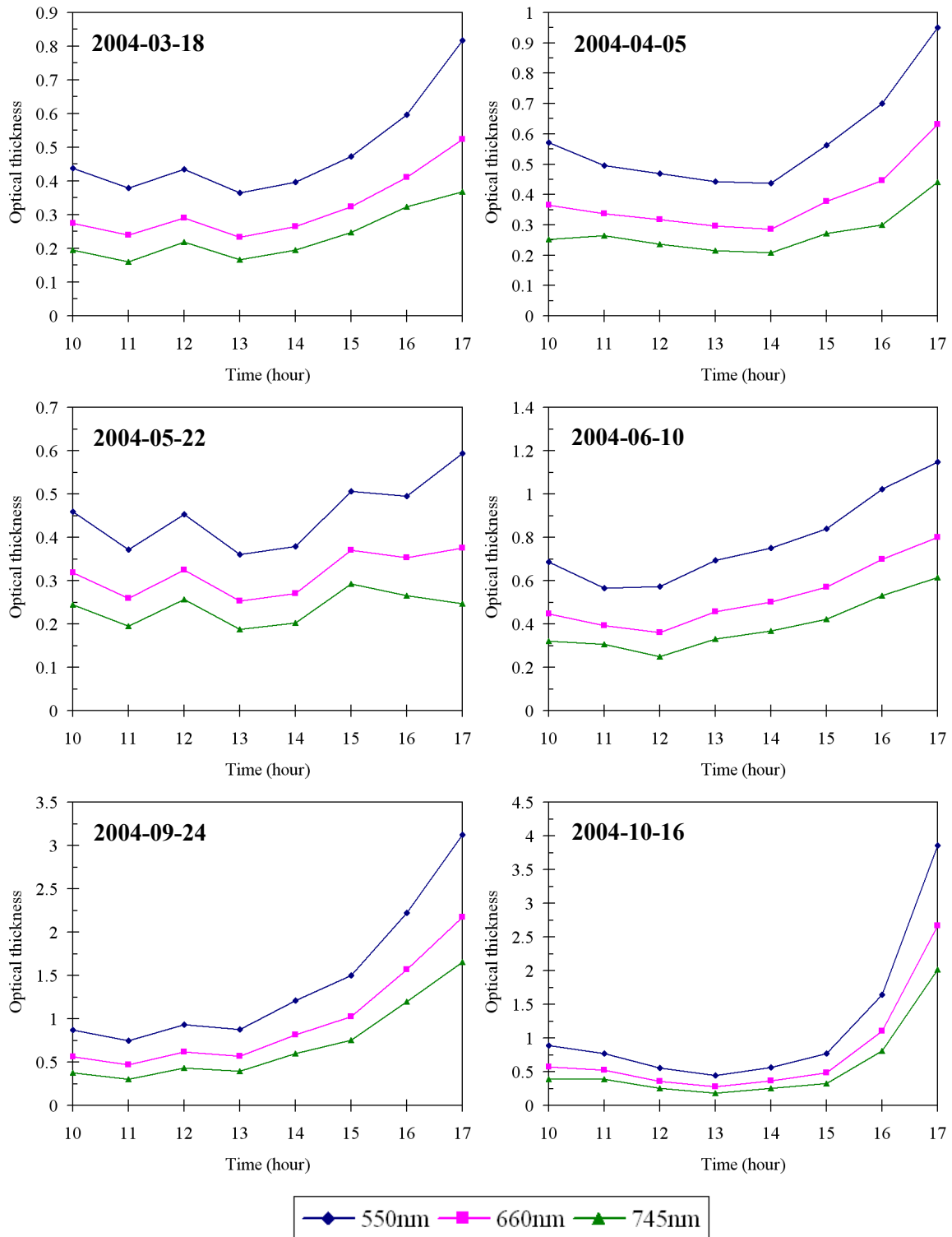


그림 3.3.20 PGS-100 Sunphotometer를 이용하여 계산된 파장 550nm, 660nm, 745nm에 대한 대기 광학적 두께의 2004년 3월부터 2005년 4월까지 시간에 따른 월별 변화

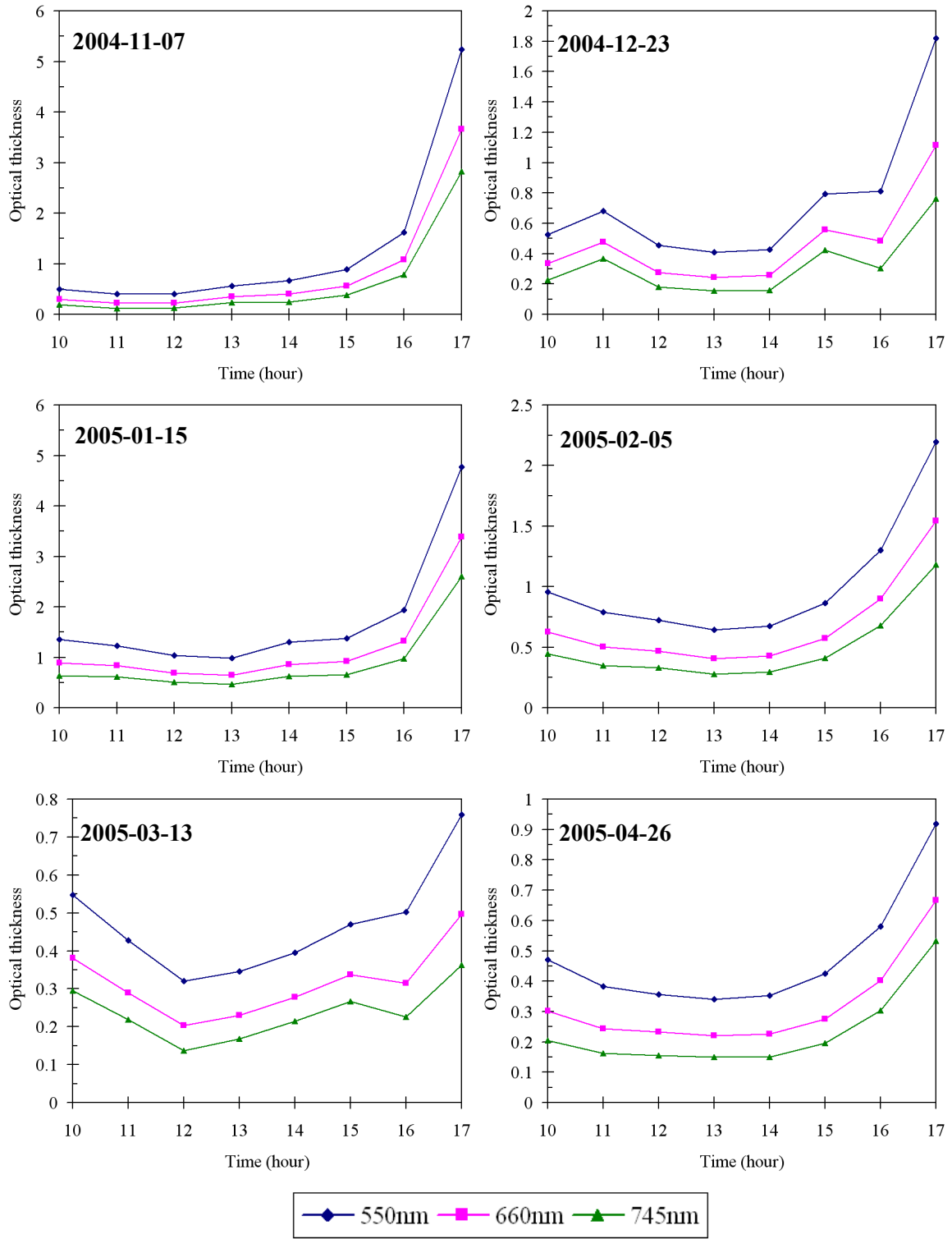


그림 3.3.20 계속.

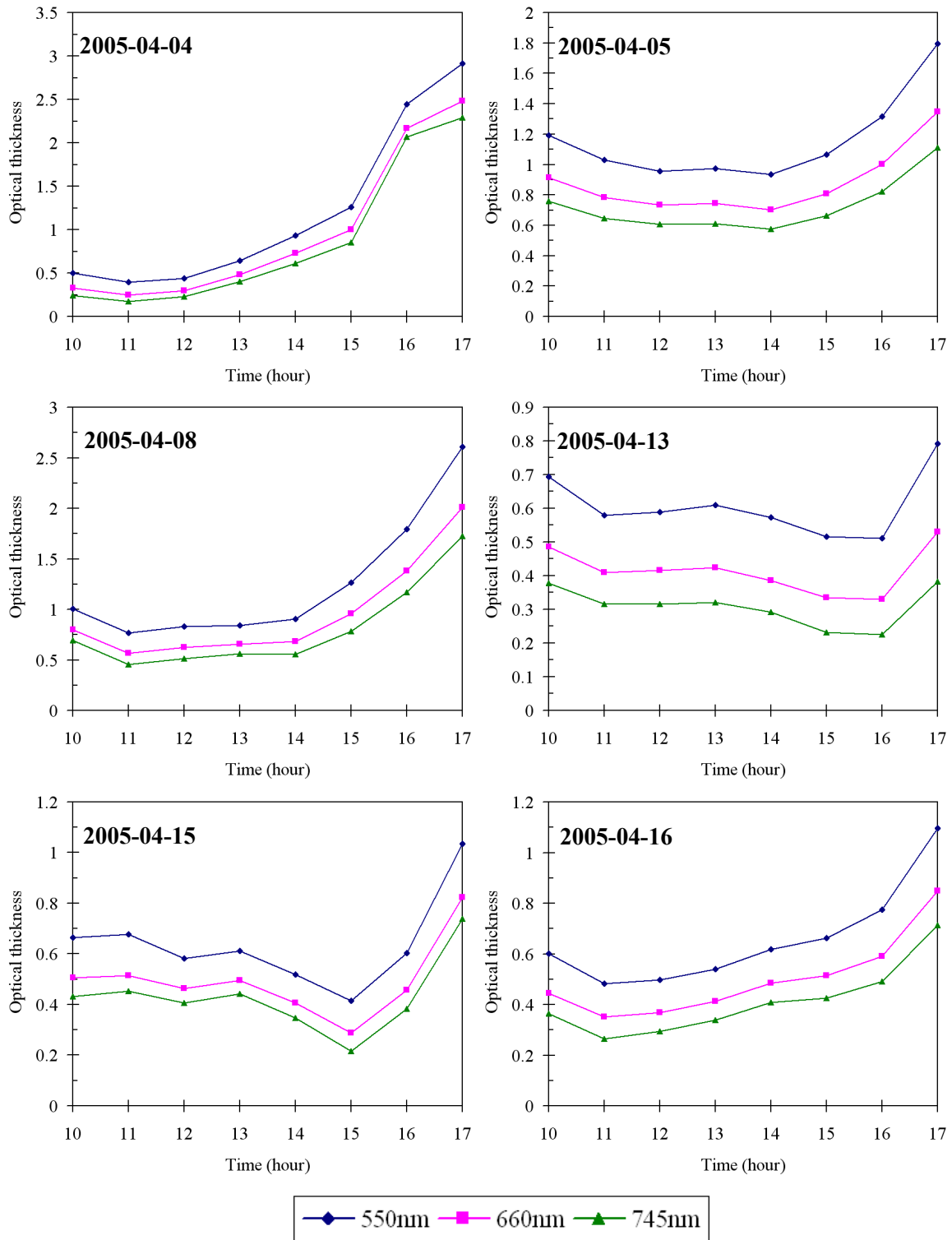


그림 3.3.21 PGS-100 Sunphotometer를 이용하여 계산된 파장 550nm, 660nm, 745nm에 대한 대기 광학적 두께(optical thickness)의 2005년 4월 시간에 따른 일별 변화

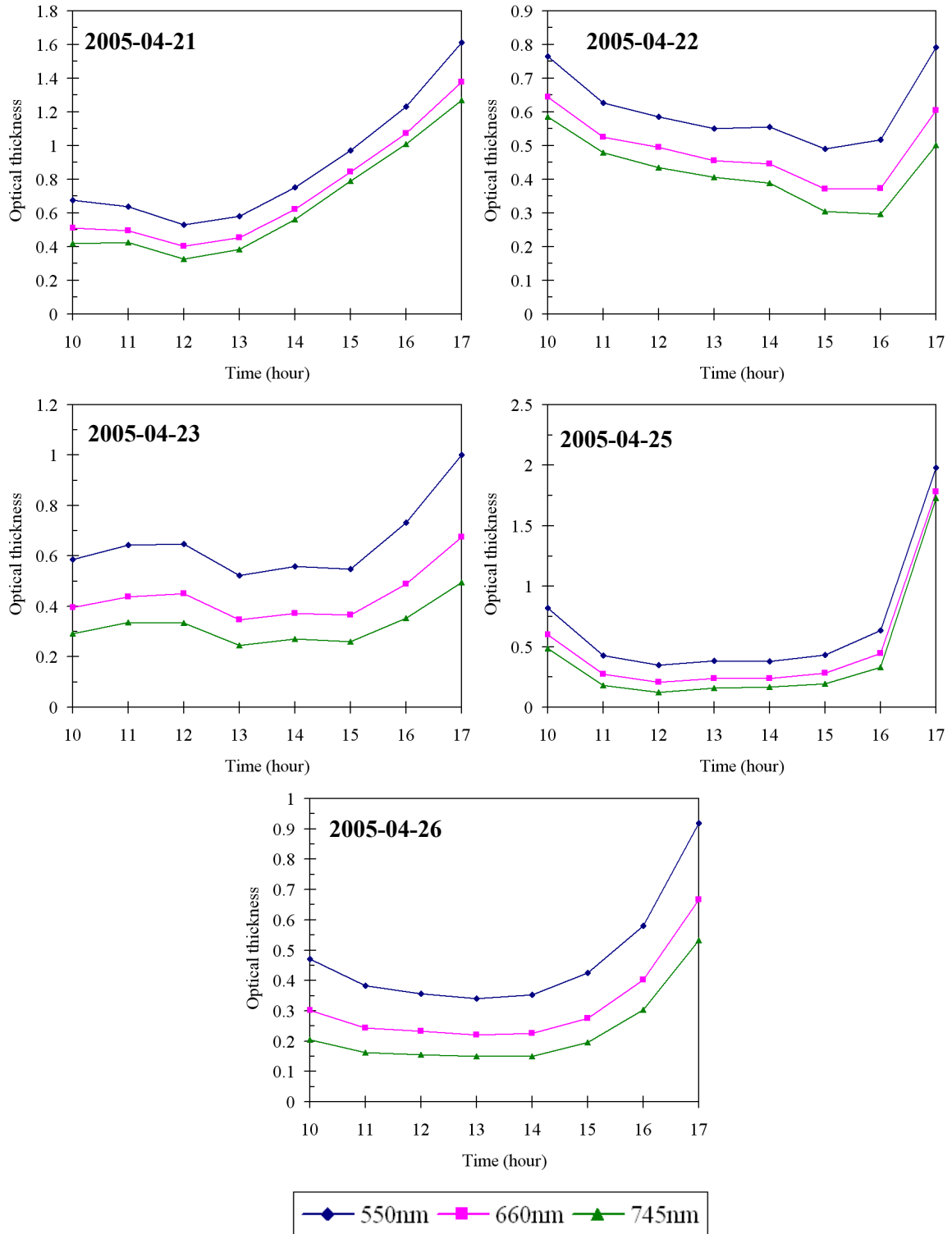


그림 3.3.21 계속.

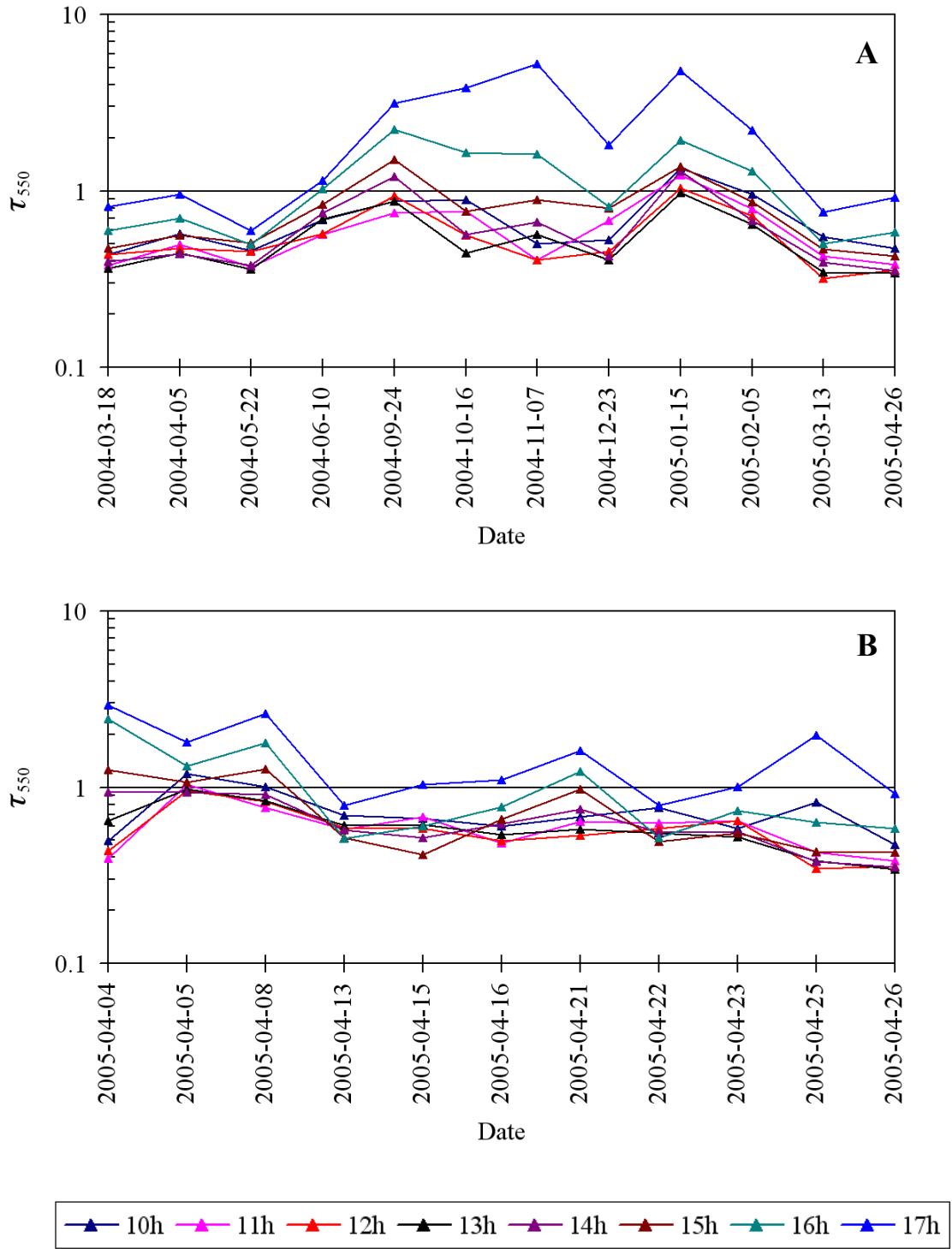


그림 3.3.22 파장 550nm에 대한 대기 광학적 두께(optical thickness, τ)의 월별(A), 일별(B) 변화

다. 에어로졸의 광 특성

그림 3.3.23은 2005년 3월부터 5월까지 SIBATA사의 AC-10 에어 샘플러를 이용하여 관측된 대기 입자의 농도를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 2005년 3월 29일, 4월 15일, 4월 20일, 5월 17일에 관측된 대기 입자의 농도가 다른 날짜에 관측된 대기 입자의 농도보다 유난히 높게 나타나고 있었다. 이것을 기상연구소 응용기상연구실에서 제공하는 황사 발생 정보제공 시스템과 비교해보면(<http://yellow.metri.re.kr>) 2005년에 황사가 발생했던 날짜 중에서 2005년 3월 29일, 4월 15일, 4월 20일이 포함되어 있었으며, 이와 같은 황사에 의해 본 연구에서 대기 입자의 농도를 관측했었던 2005년 3월 29일, 4월 15일, 4월 20일, 5월 17일에 높은 대기 입자의 농도가 나타난 것이다.

그림 3.3.24와 그림 3.3.25는 2005년 3월, 4월, 5월에 SIBATA사의 AC-10 에어샘플러를 이용하여 관측된 파장 250 - 1050nm에 대한 대기 입자의 흡수 스펙트럼과 대기 입자의 단위 농도당 흡수 스펙트럼들을 각각 나타낸 그래프이다. 각각의 흡수 스펙트럼들을 파장 400nm에서 규격화(normalization)하여 대기 입자의 흡수 스펙트럼 형태를 비교·분석한 그림이 그림 3.3.26이다. 그림 3.3.26에서 보면, 파장 300nm을 기준으로 단파장 영역의 그래프 형태가 완만한 상승곡선 형태 (그림 3.3.26의 Type 1)와 하강곡선 형태(그림 3.3.26의 Type 2)로 구분하였으며, 이것은 대기 입자를 채취할 시기의 대기 매질이 각각 상이함에 따라서 생겼을 것이라고 사료된다. 이에 대한 연구는 앞으로 심도 깊게 연구되어야 할 것이다.

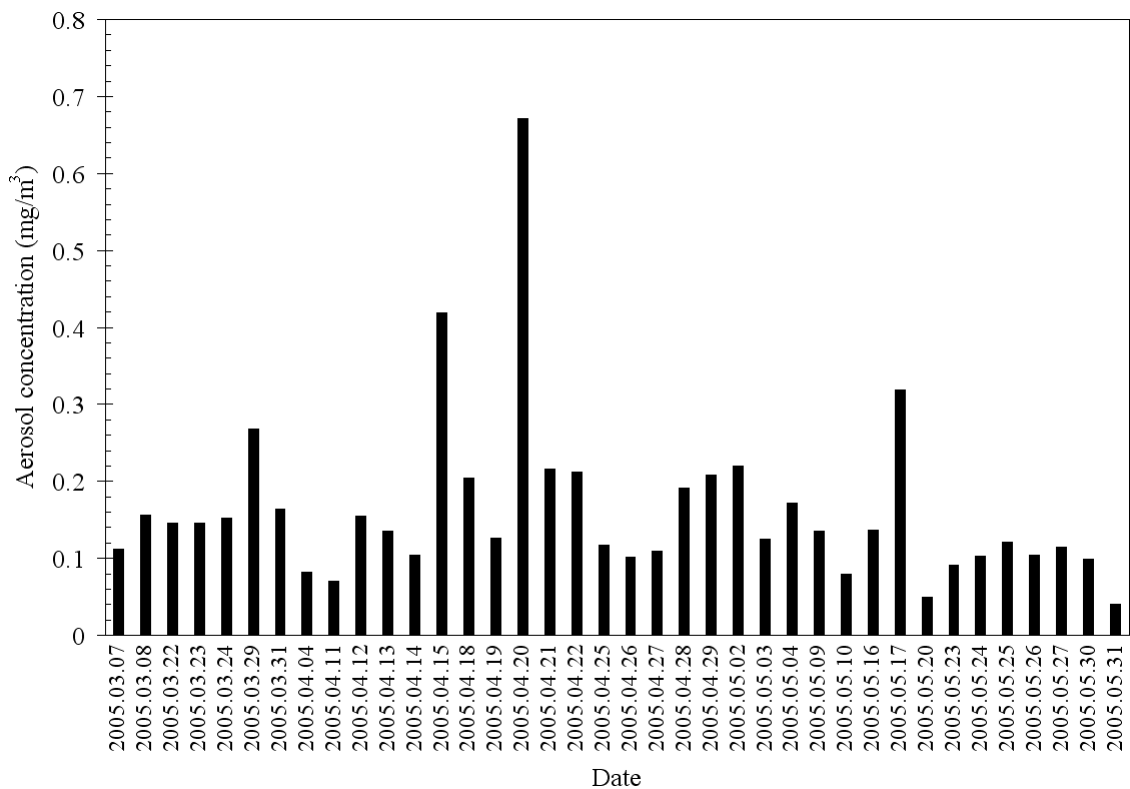


그림 3.3.23 2005년 3월부터 5월까지 에어 샘플러를 통해 관측된 대기 입자의 농도

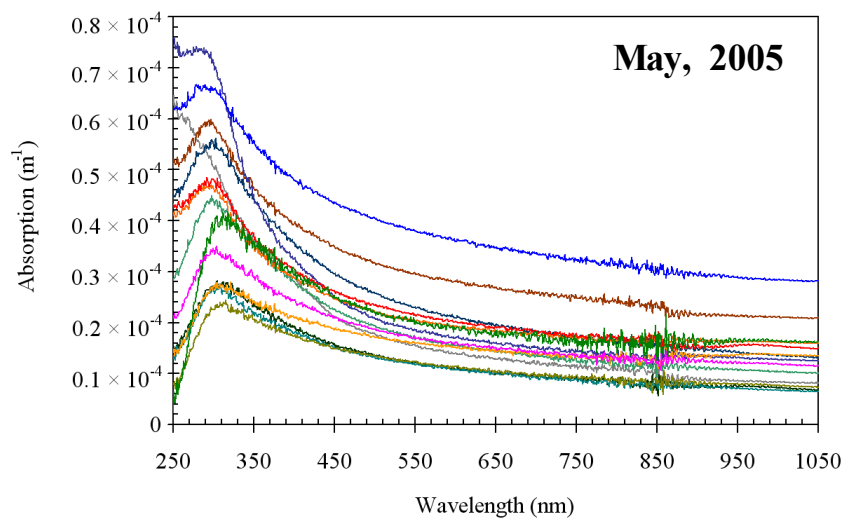
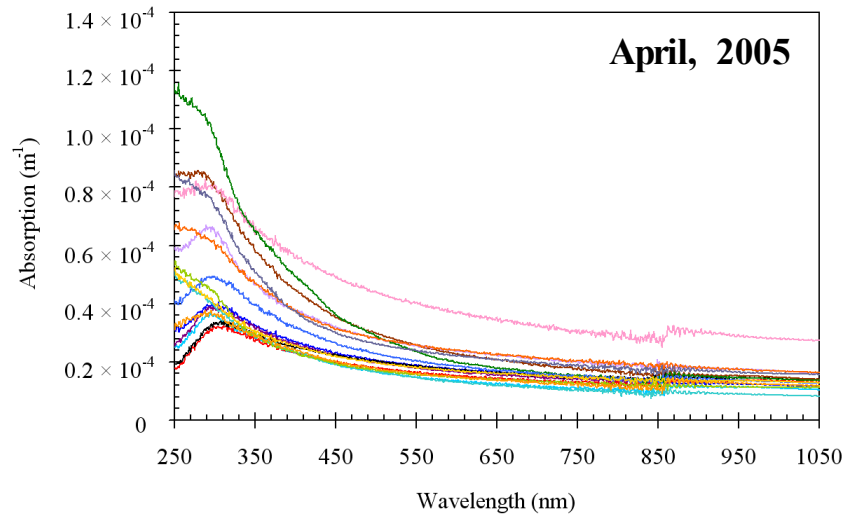
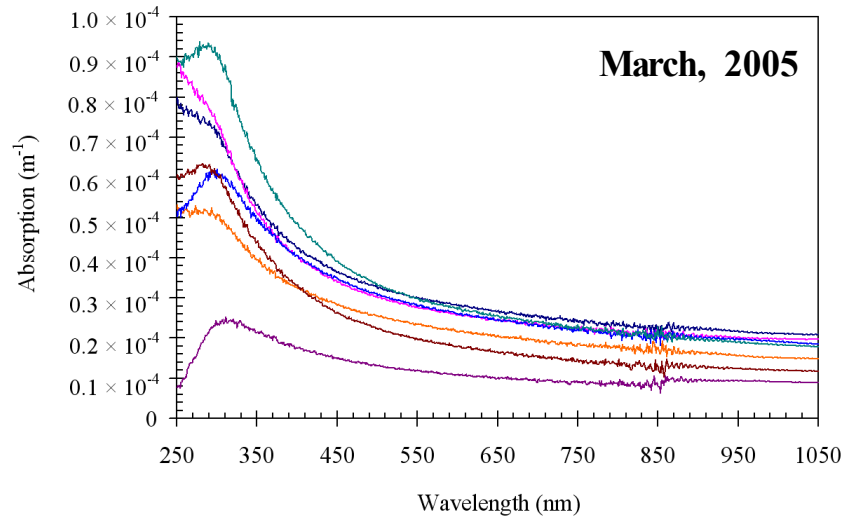


그림 3.3.24 2005년 3월, 4월, 5월에 SIBATA사의 AC-10 에어샘플러를 이용하여 관측된 파장 250 - 1050nm에 대한 대기 입자의 흡수 스펙트럼들

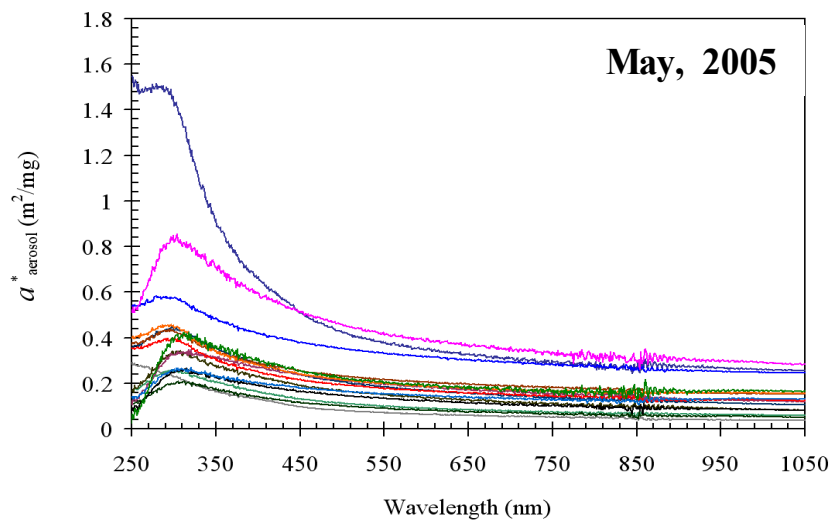
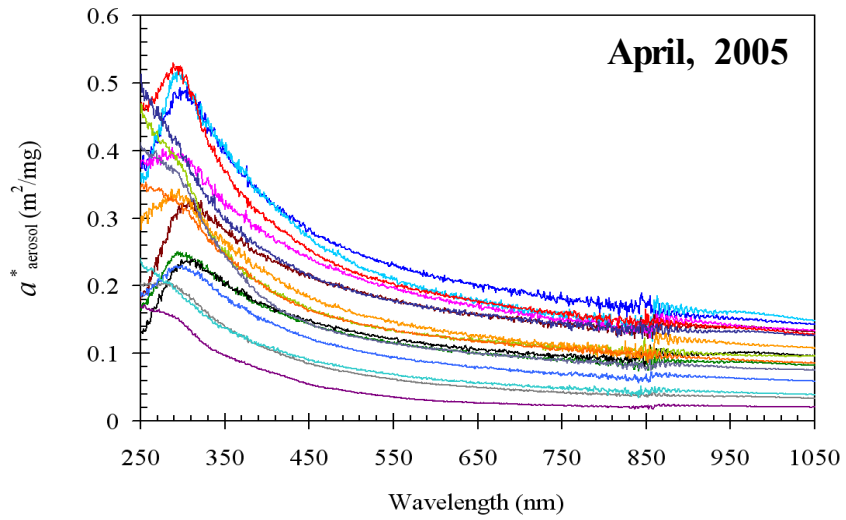
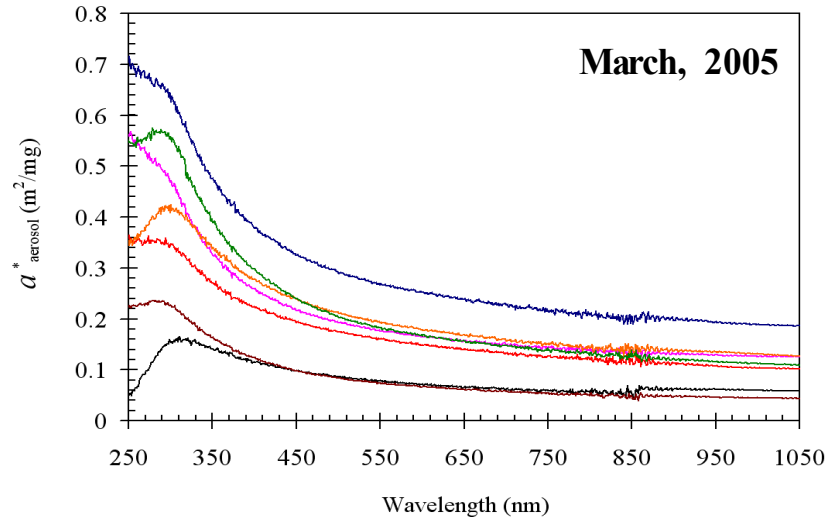


그림 3.3.25 2005년 3월, 4월, 5월에 SIBATA사의 AC-10 에어샘플러를 이용하여 관측된 파장 250 - 1050nm에 대한 단위 농도당 대기 입자의 흡수 스펙트럼들

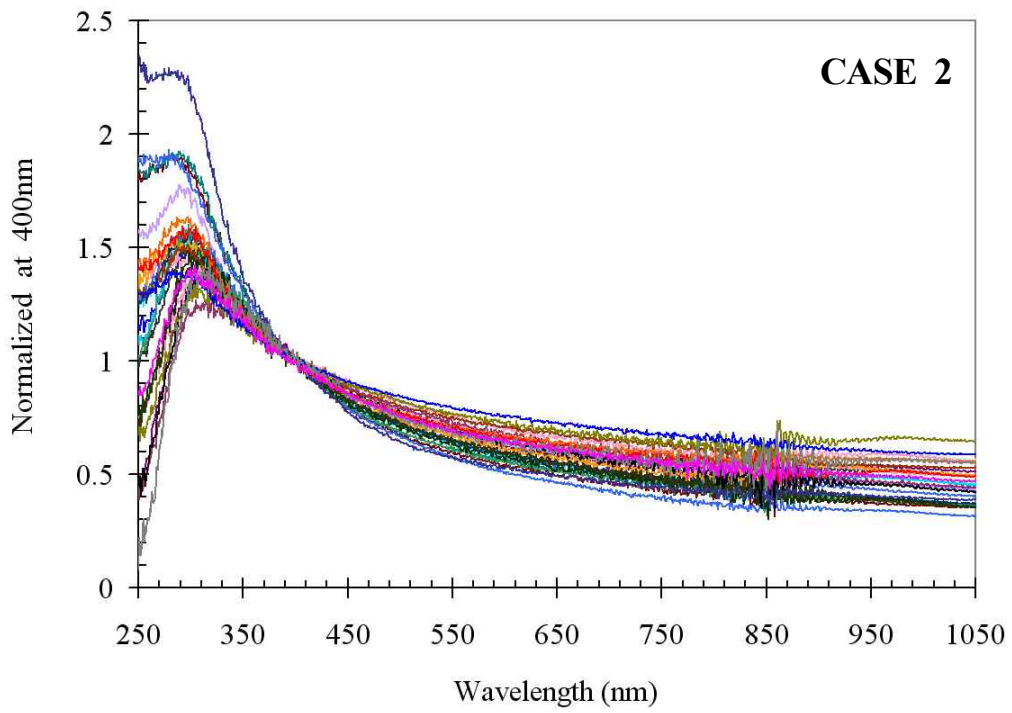
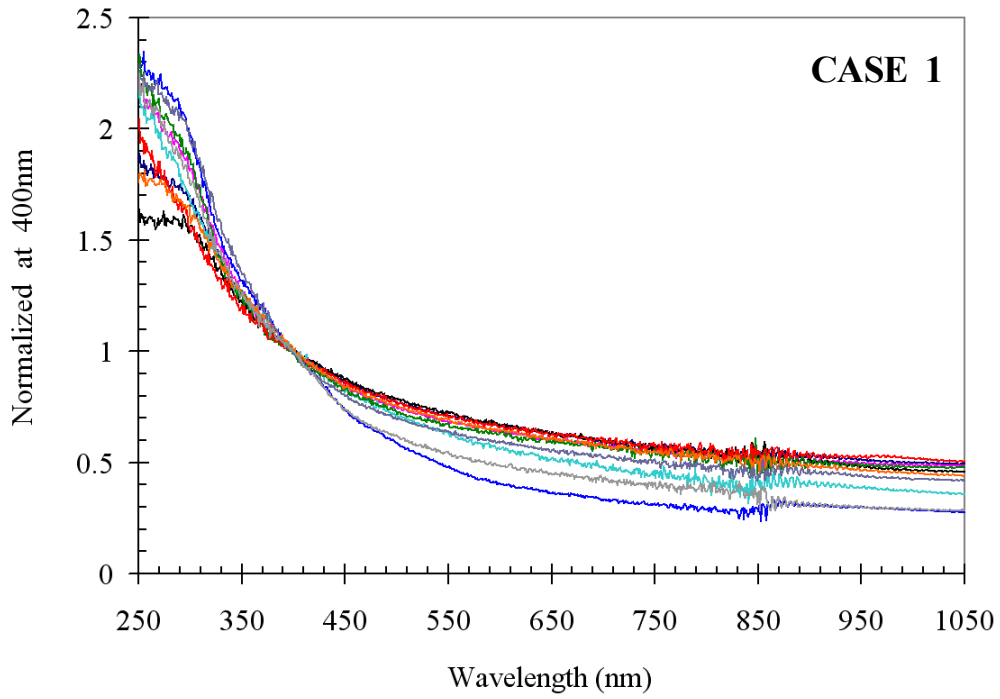


그림 3.3.26 파장 400nm에서 normalization하여 대기 입자의 흡수 스펙트럼 형태를 2가지로 분류하여 나타낸 그래프들

그림 3.3.27은 2005년 4월 하순부터 5월말까지 MetOne사의 Portable Airborne Particle Counter Model 237B를 이용하여 측정된 시간에 따른 대기 입자의 사이즈 분포를 나타낸 그래프들이다. 그래프의 x 축에 나타낸 입자의 사이즈들에서 $0.3\mu\text{m}$ 은 $0.3 - 0.5\mu\text{m}$ 사이에 분포하는 대기 입자를 나타내며, $0.5\mu\text{m}$ 은 $0.5 - 0.7\mu\text{m}$ 사이의 대기 입자, $0.7\mu\text{m}$ 은 $0.7 - 1.0\mu\text{m}$ 사이의 대기 입자, $1.0\mu\text{m}$ 은 $1.0 - 2.0\mu\text{m}$ 사이의 대기 입자, $2.0\mu\text{m}$ 은 $2.0 - 5.0\mu\text{m}$ 사이의 대기 입자, $5.0\mu\text{m}$ 은 $5.0\mu\text{m}$ 이상의 대기 입자를 나타내고 있다. 기상연구소 응용기상연구소에서 제공하는 황사 발생 정보제공 시스템에서 2005년 4월 28일에서 29일까지 황사가 발생했음을 알려주고 있는데, 동일한 날짜에 측정된 대기 입자의 크기별 counting된 수가 다른 날짜에 관측된 대기 입자의 크기별 counting 수보다 상당히 많은 양이 측정되었음을 알 수 있었다. 시간에 따른 대기 입자 사이즈의 분포 특성은 전반적으로 입자 사이즈별로 정오 이전 시간에 측정된 대기 입자 수가 타 시간에 측정한 대기 입자 수보다 상당히 많았다. 그러나 황사가 발생했었던 2005년 4월 28일 자료와 2005년 5월 25일 자료에서는 입자 크기별로 오전보다 오후에 관측된 대기 입자 수가 상당히 많았다. 또한 대기 입자의 크기별로 counting된 수를 비교해 보면 본 연구에서 사용된 관측기기인 particle counter 237B가 측정 가능한 입자 사이즈의 최소단위인 $0.3\mu\text{m}$ 에서 시간에 관계없이 가장 많은 분포 특성을 나타내고 있었다. 그러나 $0.3\mu\text{m}$ 보다 작은 대기 입자들도 상당량 존재하고 있었을 것이라고 사료되므로 이에 대한 보완이 필요하리라고 생각된다.

라. downwelling irradiance(E_d) 모니터링

그림 3.3.28은 2004년 3월부터 2005년 4월까지 TriOS사의 Hyperspectral radiometer를 이용하여 측정된 downwelling irradiance(E_d)의 시간에 따른 월별 변화를 나타낸 그래프들이다. 시간에 따른 월별 E_d 의 스펙트럼 형태들은 거의 대부분 유사하게 나타내고 있었으며, 시간에 따른 파장 $350 - 950\text{nm}$ 에 대한 E_d 값의 변화는 월별에 관계없이 대부분 오전 11시부터 오후 1시 사이에 측정된 E_d 값이 최고를 나타내고 시간이 지남에 따라 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 파장 490nm 에 따른 E_d 값의 월별 변화는 2004년 3월부터 6월까지의 평균 $140 \text{ mW/cm}^2/\mu\text{m}$ 의 높은 값을 나타내고 있었으며, 2004년 9월과 10월에는 평균 $100 \text{ mW/cm}^2/\mu\text{m}$, 2004년 11월부터 2005년 2월까지의 평균 $70 \text{ mW/cm}^2/\mu\text{m}$, 2005년 3월과 4월에는 평균 $140 \text{ mW/cm}^2/\mu\text{m}$ 이다. 따라서 사계절 중에서 봄철에 가장 높은 E_d 값을 나타내고 있었으며, 겨울철에 가장 낮은 E_d 값을 나타내고 있었다.

그림 3.3.29는 2005년 4월 한달동안 TriOS사의 Hyperspectral radiometer를 이용하여 측정된 downwelling irradiance(E_d)의 시간에 따른 일별 변화를 나타낸 그래프들이다. 시간에 따른 일별 E_d 의 스펙트럼 형태들은 월별과 마찬가지로 거의 대부분 유사하게 나타내고 있었으며, 시간에 따른 파장 $350 - 950\text{nm}$ 에 대한 E_d 값의 변화도 월별과 마찬가지로 날짜에 관계없이 대부분 오전 11시부터 오후 1시 사이에 측정된 E_d 값이 최고를 나타내고 시간이 지남에 따라서 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 또한 파장 490nm 에 따른 E_d 값의 일별 변화는 날짜에 상관없이 평균 $140 \text{ mW/cm}^2/\mu\text{m}$ 값을 나타내고 있었으며, 일부 날

짜(2005년 4월 5일과 4월 8일)에서는 3분의 1 수준의 E_d 값을 나타내고 있었는데 이것은 구름 등의 대기 상태에 의해 일부 광이 차단되어 측정된 결과라고 사료된다.

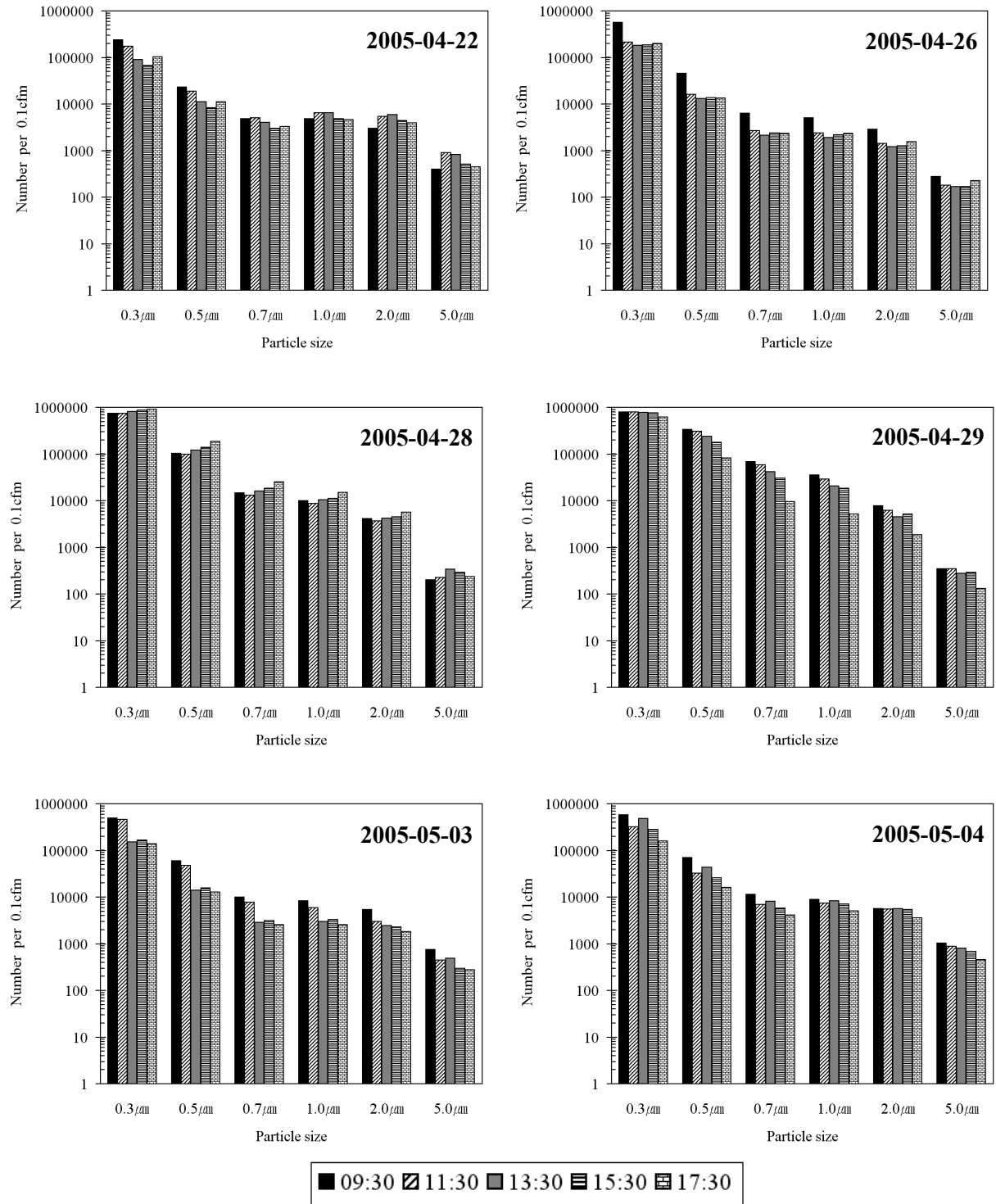


그림 3.3.27 2005년 4월 - 5월동안 MetOne사의 Portable Airborne Particle Counter Model 237B를 이용하여 측정된 시간에 따른 대기 입자의 size distribution

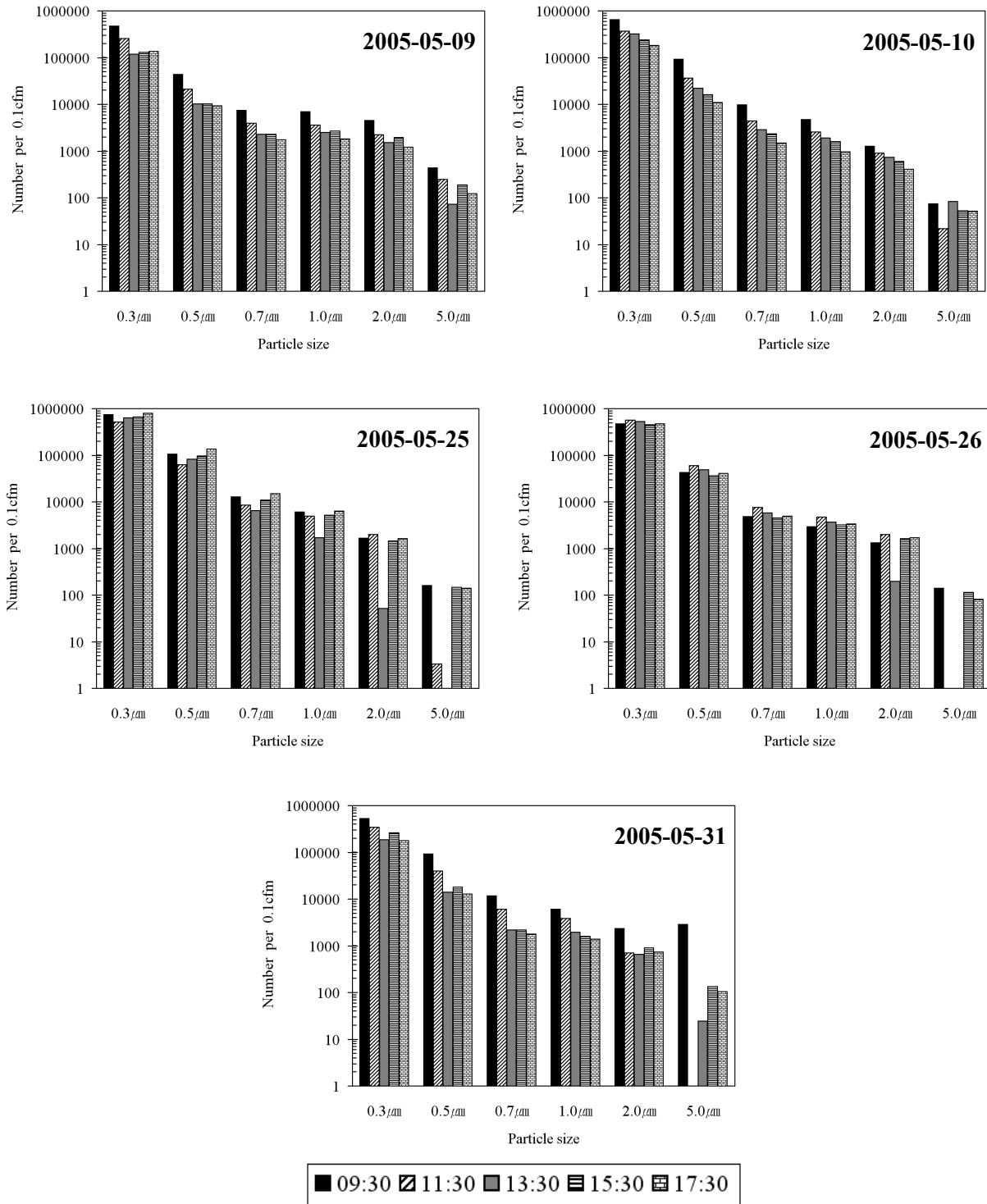


그림 3.3.27 계속

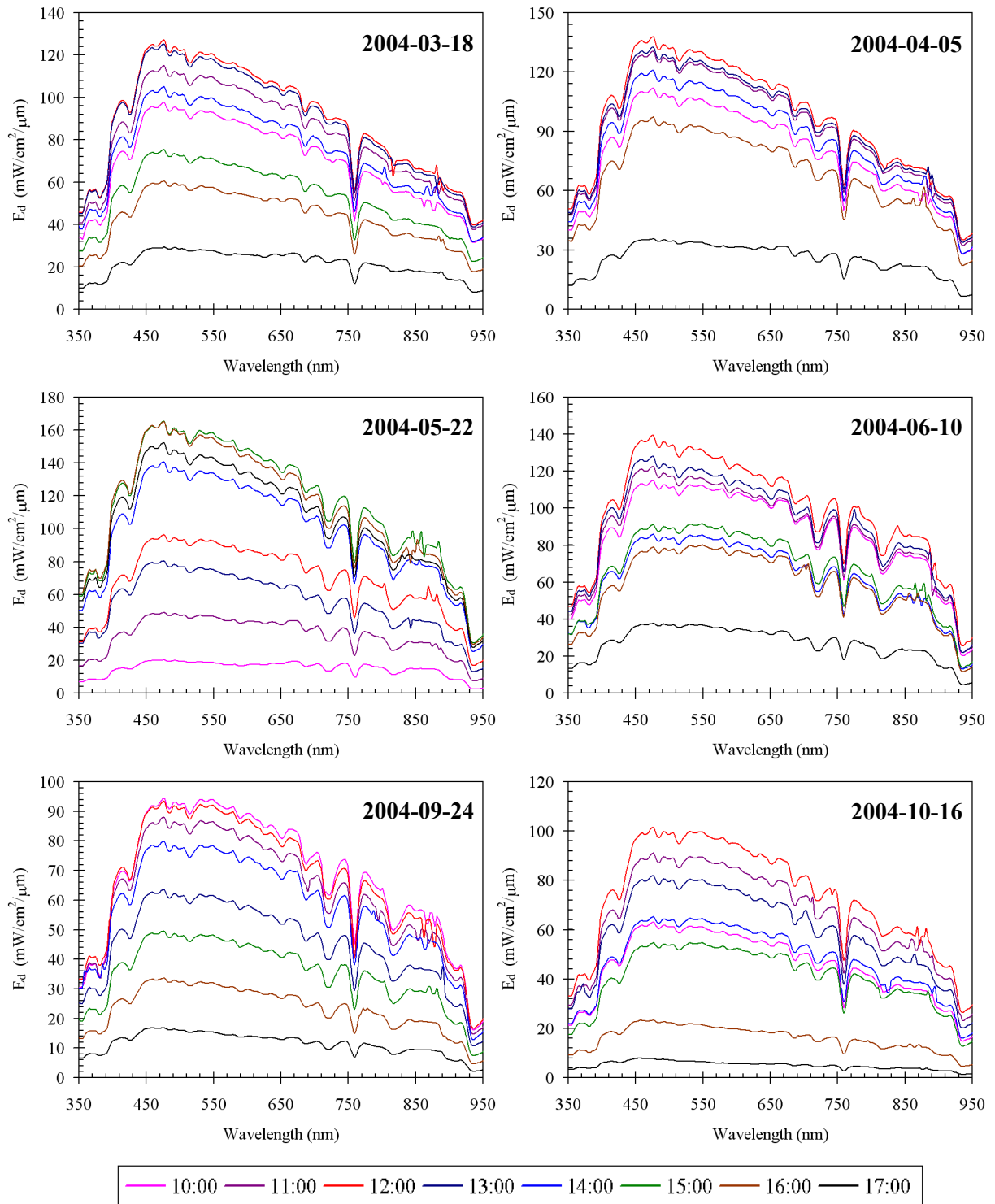


그림 3.3.28 TriOS사의 Hyperspectral radiometer에서 측정된 downwelling irradiance(E_d)의 시간에 따른 2004년 3월부터 2005년 4월까지 월별 변화

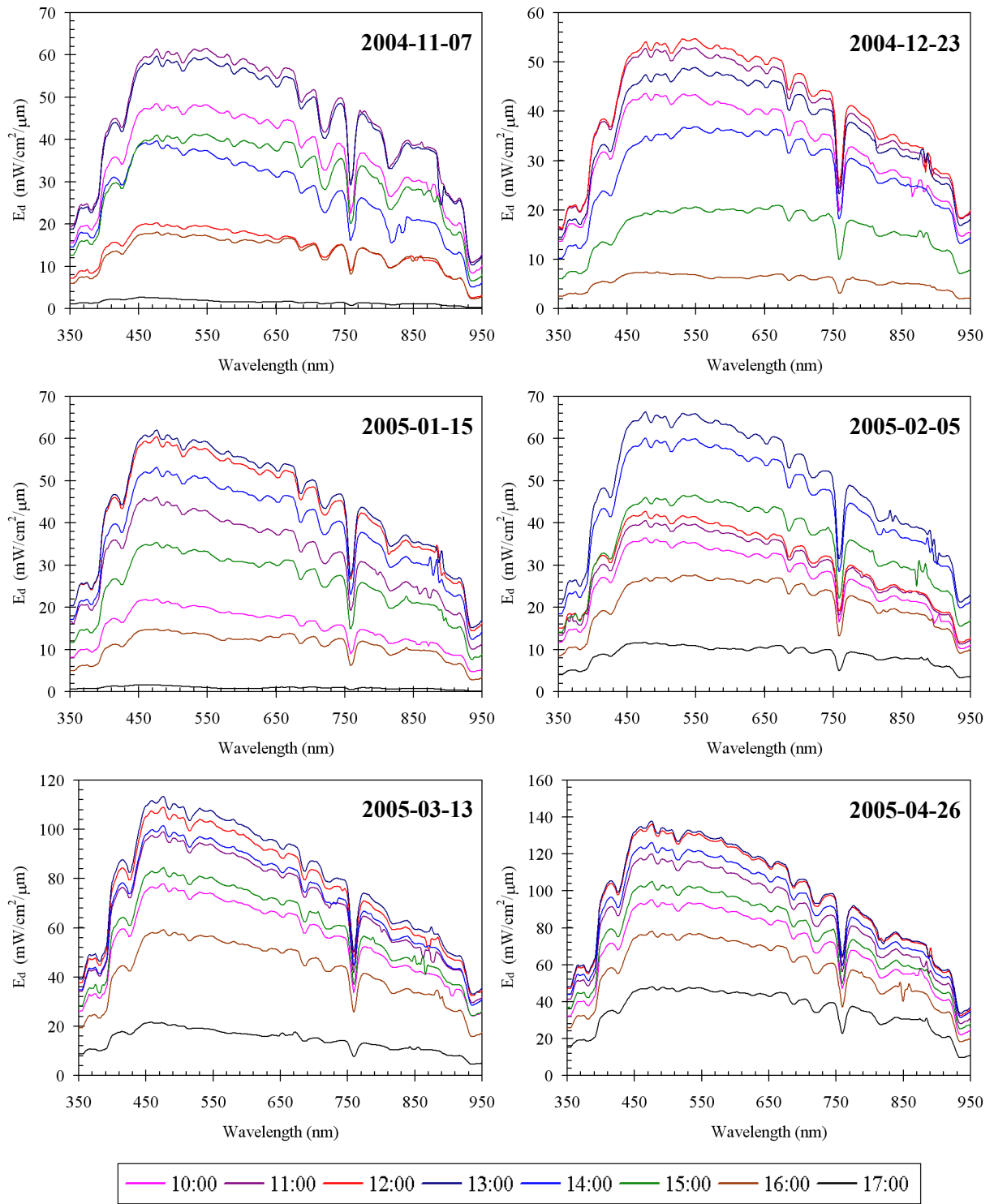


그림 3.3.28 계속.

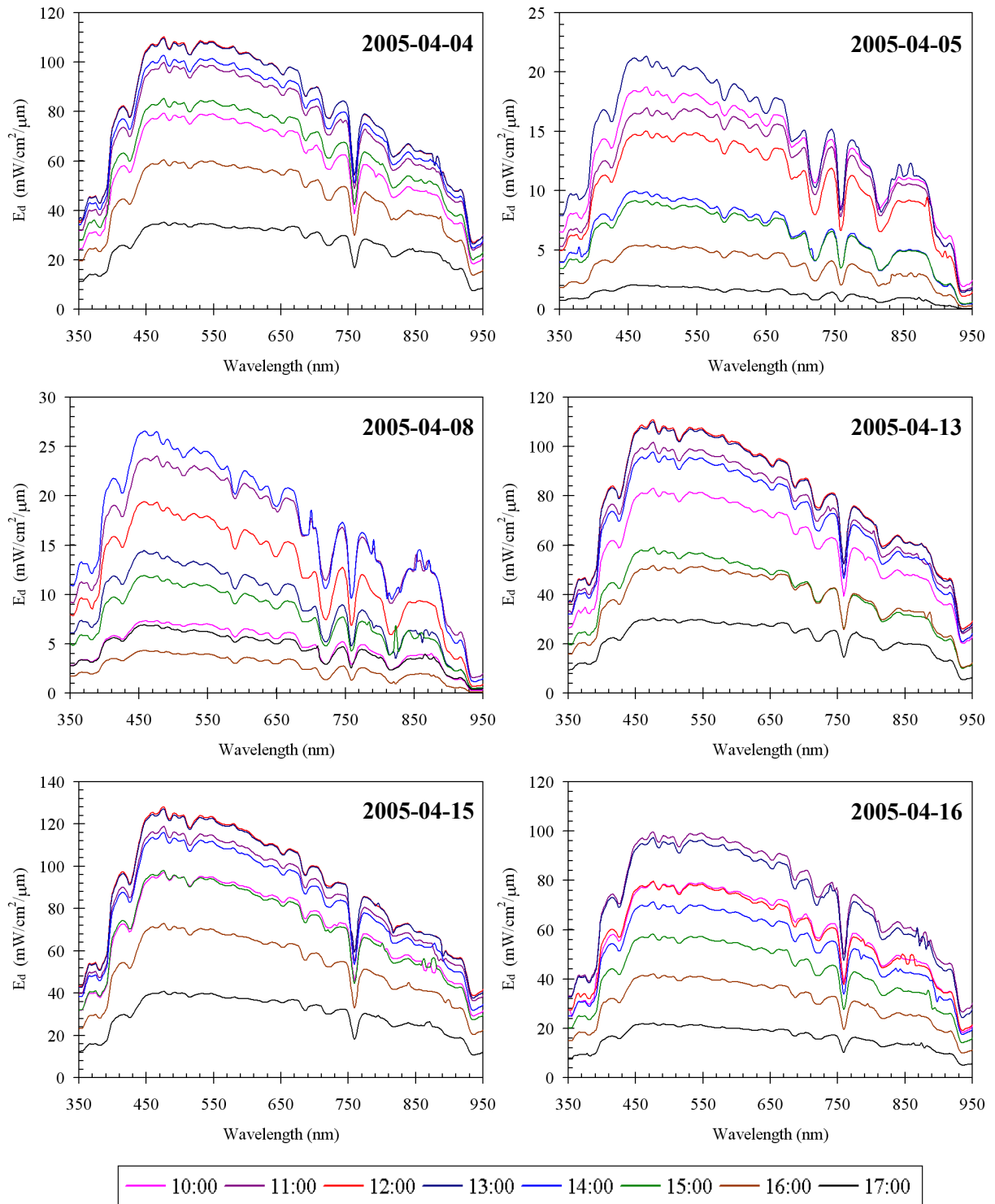


그림 3.3.29 TriOS사의 Hyperspectral radiometer에서 측정된 downwelling irradiance(E_d)의 2005년 4월 한달 동안 시간에 따른 일별 변화

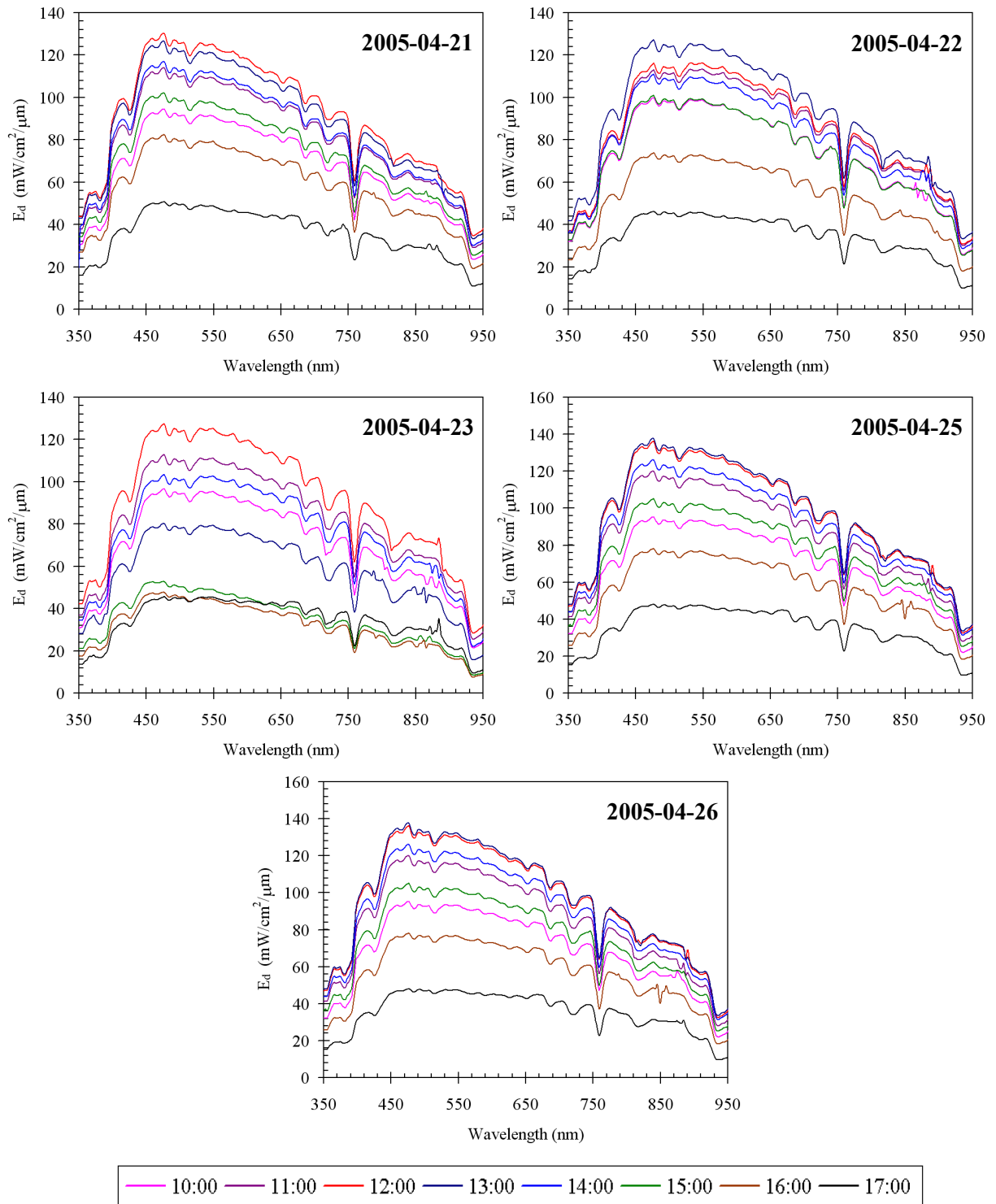


그림 3.3.29 계속.

4. 결론

PREDE사의 PGS-100 Grating Sunphotometer와 TriOS사의 Hyperspectral radiometer, SIBATA사의 AC-10 에어 샘플러와 자체 제작한 대형 에어 샘플러 등을 이용하여 solar irradiance(E_{sun}), 대기 투과도(transmittance), 대기의 광학적 두께(optical thickness), 대기의 광 특성이 시간별, 일별, 월별로 어떻게 변하는지 연구하기 위하여 2004년 3월부터 2005년 4월까지 매일 오전 8시부터 저녁 6시까지 매시간 측정하였다. 그 중에서 일출과 일몰 직전의 자료를 제외하고 구름이 전혀 없는 맑은 날의 기상상태에서 측정한 자료들만을 선별하여 본 연구에 활용하였다.

2004년 3월부터 2005년 4월까지 관측한 solar irradiance(E_{sun}) 값은 파장에 따른 스펙트럼 분포가 봄철에 가장 높게 나타나고 있었으며, 겨울철에 가장 낮게 나타나고 있었다. 시간에 따른 E_{sun} 값의 스펙트럼 변화는 일별, 월별로 조금씩 차이가 있었지만 대부분 오전 11시에서 오후 1시 사이에 가장 높은 값을 나타내고 있었으며, 시간이 지남에 따라 서서히 혹은 급격히 감소하여 오후 5시에는 그 날의 E_{sun} 값 중에서 최소값이 관측되었다. 이에 따른 대기 투과도(transmittance)도 E_{sun} 의 모니터링 결과와 동일하게 나타나고 있었으며, 대부분 1 이하의 값을 나타내고 있었다.

파장 550nm에 대한 대기 광학적 두께(optical thickness)의 월별 변화는 봄철에는 시간에 관계없이 1 이하의 값을 나타내고 있었으며, 여름철부터 시간에 따라 오후 4시 이후부터 1 이상의 값을 나타내기 시작하여 초가을에는 오후 2시부터 1이상의 값을 나타냈다가 초겨울까지 일몰직전까지 1이하의 낮은 값을 나타내고 있었다. 겨울철 중반, 1월에는 정오 이후부터 1 이상의 값이 나타났다가 2월부터 서서히 감소하여 다시 봄철에는 관측시간 내내 1 이하의 값을 유지하고 있었다. 파장 550nm에 대한 대기 광학적 두께의 일별 변화는 황사가 발생했었던 시기를 전후하여 관측시간 내내 1 이상의 높은 값을 나타내고 있었으며, 그 외 관측날짜에서는 봄철 대기의 광학적 두께 변화 양상과 동일하게 시간에 관계없이 1 이하의 낮은 값을 항상 나타내고 있었다.

에어로졸의 광 특성을 연구하기 위하여 관측된 대기 입자의 농도는 황사가 발생했었던 시기인 2005년 3월 29일, 4월 15일, 4월 20일, 5월 17일에 대기 입자의 농도가 상당히 높게 나타났으며, 그 중에서 4월 20일에 관측된 대기 입자의 농도가 가장 높게 나타났다. 이에 따른 대기 입자의 파장 250 - 1050nm에 따른 흡수 스펙트럼 형태는 파장 300nm를 기준으로 단파장 영역에서 흡수 스펙트럼 형태가 완만한 상승곡선 형태를 나타내는 경우와 급격하게 혹은 완만하게 하강곡선 형태를 나타내는 경우의 두 가지 형태로 구분할 수 있었다. 또한 MetOne사의 Portable Airborne Particle Counter Model 237B를 이용하여 측정한 시간에 따른 대기 입자의 사이즈 분포는 시간 및 날짜에 관계없이 대부분 0.3 μ m의 입자들이 가장 많은 분포를 나타내고 있었으며, 시간이 지남에 따라 감소하는 추세를 나타내고 있었다. 그러나 황사가 발생했었던 2005년 4월 28일과 5월 25일에는 시간에 따른 입자 사이즈별 분포가 오전보다 오후에 증가하는 경향을 나타내고 있었다. TriOS사의 Hyperspectral radiometer를 이용하여 측정한 downwelling irradiance(E_d)의 월별 변화는 봄철에 가장 높게 나타나고 있었으며 겨울철에 가장 낮게 나타나고 있었다. 또한 시간에 따

른 E_d 값의 변화는 날짜에 관계없이 대부분 오전 11시에서 오후 1시 사이에 가장 높은 스펙트럼 형태를 나타내고 있었다.

이와 같이 대기 투과도 및 에어로졸의 광학적 특성들은 시간별, 일별, 월별로 각기 다양한 변화 형태를 가지고 있었으므로 지속적이고 심도 깊은 연구가 앞으로 진행되어 대기 보정 알고리즘 개발 및 활용에 있어서 중요한 입력 자료로서 활용되어야 할 것이다.

제 4 절 대기보정 기술 연구

1. 서론

위성에 의한 지구관측은 탑재된 센서를 이용하여 지표 또는 대기로부터 방출되는 전자기와 형태의 에너지를 관측하는 것이다. 태양에 의한 복사에너지는 대기 중에 존재하는 분자, 에어로졸 등의 입자에 의해 흡수 및 산란되어 태양광 또는 산란광으로서 지표에 도달하게 된다. 지표에 도달한 태양광은 다시 흡수, 반사, 굴절 등의 작용을 받아 지표에서 센서 방향으로 전달되며, 이때 대기를 거치면서 다시 대기입자에 의해 흡수 및 산란을 거쳐 최종적으로 대기권 외의 위성 센서에 의하여 감지 된다 (그림 3.4.1). 일반적으로 센서에 도달하는 총 복사휘도에서 물속에서 나오는 복사휘도는 약 10 % 정도의 값을 가지므로 10 % 정도의 오차범위에서 정확한 해석을 얻기 위해서는 1 % 정도의 정확성을 갖는 대기 효과의 보정이 필요하다 (Gordon *et al.*, 1983).

센서에 도달하는 가시광선 영역의 빛은 여러 경로를 가지며 아래의 식과 같이 간략화된 대기복사 전달 방정식을 도입할 수 있다.

$$L_{sat} = L_r + L_a + L_{ra} + TL_g + t_d \cdot L_w \quad (3.4.1)$$

우리가 구하고자 하는 값은 물속으로부터 나오는 복사휘도 L_w 로, 위성의 센서에서 감지되는 총 복사휘도 L_{sat} 로부터 나머지 항들을 제거함으로써 얻을 수 있다. L_r 와 L_a 는 각각 대기 분자에 의한 레일레이 다중 산란과 에어로졸에 의한 다중 산란에 의한 복사휘도를 말한다. L_{ra} 는 대기분자와 에어로졸 입자 사이의 상호 작용에 의한 복사휘도로 먼저 대기 분자에 의해 산란된 후 에어로졸 입자에 의해 다시 산란되거나, 반대로 에어로졸 입자에 의해 먼저 산란된 후 다시 대기 분자에 의해 산란되어 센서까지 올라오는 복사휘도를 말한다. L_g 는 태양광이 해수 표면에 직접 반사되어 올라오는 복사휘도를, T 와 t 는 각각 직선광의 투과도와 산란광의 투과도로 다음과 같이 정의 된다 (Gordon, 1993; Gordon *et al.*, 1997).

$$T(\lambda) = \exp[-(\tau_r(\lambda) + \tau_{oz}(\lambda) + \tau_a(\lambda)/\cos\theta)] \quad (3.4.2)$$

$$t(\lambda) = \exp[-(\tau_r(\lambda)/2 + \tau_{oz}(\lambda)/\cos\theta)]t_a(\lambda) \quad (3.4.3)$$

여기서 τ_r , τ_{oz} , τ_a 는 각각 공기분자, 오존과 에어로졸의 광학적 두께를 의미하며 θ 는 센서의 천정각이다. $t_a = \exp[-[1 - \omega_a(\lambda)F(\lambda)]\tau_a(\lambda)/\cos\theta]$ 이다. 여기서 F 는 광자가 에어로졸에 의해 90도 이하로 산란될 확률로 $[1 - \omega_a(\lambda)F(\lambda)]$ 은 보통 1보다 훨씬 적으므로 에어로졸의 광학적 두께에 크게 영향을 받는다. ω_a 는 단산란 알베도로 분산계수(extinction coefficient)

에 대한 산란계수 (scattering coefficient)의 비를 의미한다. 산란광의 투과도에서 공기분자에 의한 레일리 광학적 두께를 2로 나눈 것은 레일리 산란의 전방 산란이 결과 투과율에 영향을 미치지 않기 때문이다. L_y 는 센서가 바라보는 각도를 조절함으로써 제거할 수 있으므로 결국 정확한 L_w 를 구하기 위해서는 대기분자와 에어로졸의 산란에 의한 효과, 즉 대기의 간섭효과를 정확히 계산해야만 한다. 대기 분자에 의한 효과는 대기의 수직분포가 잘 알려져 있고, 그다지 심하게 변화지 않으므로 비교적 정확하게 그 효과를 계산할 수 있다. 그러나 에어로졸에 의한 산란은 레일리 산란과는 달리 에어로졸의 양상이 시간과 공간에 따라 많은 차이를 보이므로 그 효과를 미리 고려할 수 없다. 그동안 CZCS, SeaWiFS 그리고 OCTS 등의 해색 센서에서의 대기보정 알고리즘을 개발하는 과정에서 에어로졸의 효과를 고려하는 방법들이 제시되었고, 지금 현재에도 사용되고 있지만 여전히 에어로졸 효과는 해색을 위한 대기보정 알고리즘에서 가장 중요한 문제로 남아 있다.

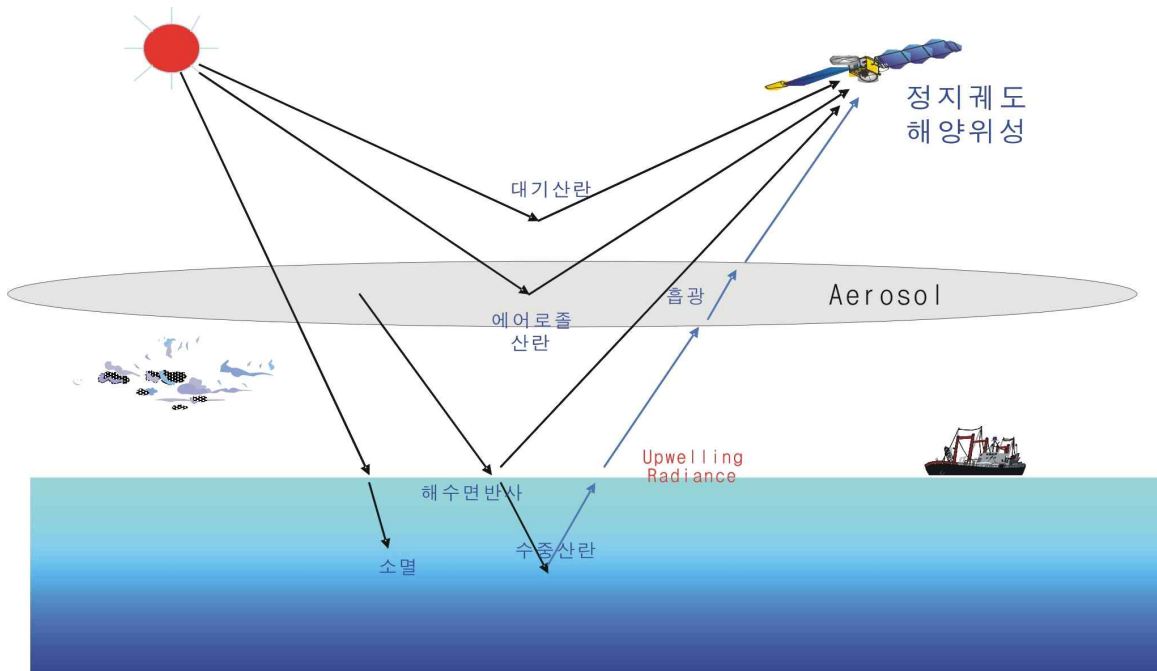


그림. 3.4.1 위성자료의 대기효과 모식도

그러므로 해색위성자료의 대기 보정에 대한 연구는 해색 위성이 개발되기 시작하면서 부터 활발히 연구되어왔는데, CZCS 위성의 경우 Gordon (1978)에 의한 단일 산란 알고리즘을 이용하였으며, SeaWiFS와 MERIS는 복잡한 다산란 알고리즘을 채택하여 사용하고 있다 (Gordon and Wang, 1994; Antoine and Morel, 1999). 하지만 지금까지 개발되었던 해색위성의 대기보정 방법들은 맑은 바다의 특성을 갖는 Case-I 지역에서는 비교적 좋은 결과를 보였지만 DOM (Dissolved organic matter)과 부유퇴적물의 농도가 높은 우리나라 서해 연안 지역 (Case-II)에서는 적합하지 않은 것으로 분석되었다. 이는 우리나라 연안에서는 맑은 물의 L_w (water-leaving radiance)가 근적외선 파장대에서 0이 아니기 때문이다. 따

라서 우리가 통신해양기상위성 해양탐재체로부터 우리나라 연안의 $2500 \times 2500 \text{ km}^2$ 지역에 대해 정량적으로 해양환경을 모니터링하기 위해서는 새로운 대기보정 방법이 반드시 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 지금까지 개발된 해색 센서와 육상관측 위성자료의 대기보정 방법에 대해서 알아보고 우리나라 연안에 맞는 효과적인 대기보정 방법을 제안하고자 한다.

2. 연구방법

대기 복사 전달 방정식에서 복사휘도 (L)보다는 단위가 없는 반사도 (ρ)로 표현하는 것이 여러 가지 면에서 편리하고 또한 복사휘도 대신 반사도를 이용하여 해색을 보정하게 됨으로 다음과 같이 반사도를 도입하도록 한다 (Gordon *et al.*, 1994).

$$\rho(\lambda) = \pi L(\lambda) / E_0(\lambda) \cos \theta_0 \quad (3.4.4)$$

여기서 E_0 는 대기권 밖에 도달하는 파장 λ 의 태양복사량이고, θ_0 는 태양의 천정각을 말한다. 즉, 반사도는 L 이 등방형으로 퍼져 나갈 때 대기권 최상부에서의 반사도를 말한다. L_g 는 앞에서 이미 언급했듯이 센서가 바라보는 방향을 고려함으로써 충분히 제거할 수 있으므로 식 3.4.4의 관계를 식 3.4.1에 도입하면 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$\rho_{sat}(\lambda) = \rho_r(\lambda) + \rho_a(\lambda) + \rho_{ra}(\lambda) + t \cdot \rho_w(\lambda) \quad (3.4.5)$$

따라서 우리가 원하는 정확한 해색을 얻기 위해서는 식 3.4.5에서 대기의 다중산란효과인 ($\rho_r(\lambda) + \rho_a(\lambda) + \rho_{ra}(\lambda)$)을 정확하게 계산하여야 한다. 1978년 발사된 Nimbus-7에 탑재된 CZCS에서 측정된 자료의 처리과정에서 정량적인 해색 정보를 얻기 위해 대기보정 알고리즘에 관한 많은 연구가 수행되었다. 이러한 연구를 바탕으로 1997년 발사된 SeaWiFS는 보다 나은 대기보정 알고리즘으로 운영되고 있으며, 이보다 먼저 발사된 OCTS 역시 SeaWiFS와 비슷한 알고리즘을 바탕으로 운영되었다. 이 세 가지의 대기보정 알고리즘은 모두 에어로졸 산란에 의한 효과를 보정하는데 가장 중점을 두고 있으며, SeaWiFS와 OCTS에서는 에어로졸 모델을 사용하여 그 효과를 고려하고 있다. 지금까지 개발된 대기보정 알고리즘을 살펴보면 다음과 같다.

가. CZCS 알고리즘

CZCS는 해색을 위한 4개의 가시광선 영역의 밴드와 1개의 근적외선 밴드를 가지고 있으며, 해수면 온도를 위한 하나의 열적외선 밴드를 가지고 있는 센서이다. CZCS가 발사된 후 대기보정을 위한 많은 연구가 진행되었으며, 이러한 연구는 해색을 위한 대기보정 알고리즘의 기초를 제공하였다. 이렇게 처음 개발된 CZCS 대기보정 알고리즘에서는 다중 산란을 고려하지 않고 단산란 효과만을 고려하였다. 따라서 식 3.4.5는 다음과 같이 단순하게 표현된다.

$$\rho_{sat}(\lambda) = \rho_{rs}(\lambda) + \rho_{as}(\lambda) + t \cdot \rho(\lambda) \quad (3.4.6)$$

여기서 아래첨자 s는 단산란 (single scattering)을 의미한다. 대기 분자에 의한 레일레이 산란은 표준 대기 기체의 연직 분포로부터 대기 복사 전달 모델을 통해 계산이 가능하다. 에어로졸에 의한 단산란은 에어로졸의 광학적 두께가 작은 경우 대기복사 전달 방정식으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\rho_{as}(\lambda) = \omega_a(\lambda)\tau_a(\lambda)P_a(\theta_\nu, \phi_\nu; \theta_0, \phi_0; \lambda) / 4\cos\theta_\nu\cos\theta_0$$

$$P_a(\theta_\nu, \phi_\nu; \theta_0, \phi_0; \lambda) = P_a(\theta_-, \lambda) + (r(\theta_\nu) + r(\theta_0))P_a(\theta_+, \lambda) \quad (3.4.7)$$

$$\cos\theta_\pm = \pm\cos\theta_0\cos\theta_\nu - \sin\theta_0\sin\theta_\nu\cos(\phi_\nu - \phi_0)$$

여기서 $P_a(\alpha, \lambda)$ 는 산란각 α 에 대한 에어로졸 산란 위상 함수이고 ω_a 는 에어로졸 단산란 알베도이다. $r(\alpha)$ 는 입사각 α 에 대한 해수면의 정반사율 (fresnel reflectance)을 말하고, θ_0 와 θ_ν 는 각각 태양과 센서의 천정각, ϕ_0 와 ϕ_ν 는 태양과 센서의 방위각을 의미한다. 그러나 에어로졸은 시간과 장소에 따라 매우 다른 양상을 보이므로 식 3.4.7에서 에어로졸의 단산란 반사율을 구하는 것은 불가능하다. 따라서 CZCS 대기보정 알고리즘은 몇 가지 가정을 통해 이 문제를 해결하였다.

우선 충분히 낮은 식물성 플랑크톤의 농도(C)를 가진 맑은 해양에 대해서 $\rho_w(670)$ 은 0으로 들 수 있고, 따라서 식 3.4.6으로부터 $\rho_{as}(670)$ 의 값을 구해 낼 수 있다. 여기서 새로운 변수 $\epsilon(\lambda_1, \lambda_2)$ 과 $[\rho_w(\lambda)]_N$ 을 다음과 같이 도입한다.

$$\epsilon(\lambda_1, \lambda_2) \equiv \frac{\rho_{as}(\lambda_1)}{\rho_{as}(\lambda_2)} = \frac{\omega_a(\lambda_1)\tau_a(\lambda_1)P_a(\theta_\nu, \phi_\nu; \theta_0, \phi_0; \lambda_1)}{\omega_a(\lambda_2)\tau_a(\lambda_2)P_a(\theta_\nu, \phi_\nu; \theta_0, \phi_0; \lambda_2)} \quad (3.4.8)$$

$$[\rho_w(\lambda)]_N \equiv \rho_w(\lambda) / t(\theta_0, \lambda) \quad (3.4.9)$$

$[\rho_w(\lambda)]_N$ 는 결과적으로 태양이 천정에 있고, 대기의 효과가 제거되었을 때의 $\rho_w(\lambda)$ 를 의미한다. $\epsilon(\lambda_1, \lambda_2)$ 의 정의로부터 우리가 구하고자 하는 파장 λ_i 에 대해서 $\rho_w(\lambda_i)$ 는 식 3.4.6으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\rho_w(\lambda_i) = \frac{1}{t} [\rho_t(\lambda_i) - \rho_{rs}(\lambda_i) - \epsilon(\lambda_i, 670)\rho_{as}(670)] \quad (3.4.10)$$

$\epsilon(\lambda_i, 670)$ 은 충분히 낮은 C에 대하여 $[\rho_w(550)]_N$ 이 거의 일정하다는 것으로부터 다음의 식 3.4.11을 이용하여 n을 구해내고, 이를 통해 나머지 파장에 대한 $\epsilon(\lambda_i, 670)$ 을 구해낸다 (Gordon *et al.*, 1988).

$$\epsilon(\lambda_i, 670) = \left(\frac{670}{\lambda_i}\right)^n \quad (3.4.11)$$

이때 n 은 거의 일정한 값을 가진다.

CZCS 대기보정 알고리즘은 이상과 같은 방법으로 위성자료로부터 정량적인 해색의 반사도를 구해내게 된다. 그러나 앞에서 언급했듯이 이 알고리즘은 우선 C 가 충분히 작아야 하는 문제가 있으므로, 만약 센서가 보게 되는 이미지가 맑은 해양을 가지지 않는다면 정확한 해색을 얻을 수가 없게 된다. 또한 $[\rho_w(550)]_N$ 이 일정하다는 가정과 식 3.4.11를 통한 다른 파장으로의 외삽은 많은 문제점을 포함하고 있어 실제 적용에 있어서 많은 오차를 발생시킬 수 있다. 그리고, CZCS 알고리즘은 기본적으로 대기의 단산란만을 고려하였으므로, 대기과 에어로졸의 다중산란 효과가 무시되어 있다. 이러한 CZCS 알고리즘의 문제는 보다 좋은 감지도를 가지고, 더 많은 밴드를 보유한 OCTS와 SeaWiFS가 올라가면서 에어로졸 모델을 이용한 알고리즘으로 한층 더 발전하게 된다.

나. SeaWiFS 알고리즘 (NASA 표준 대기보정 알고리즘)

SeaWiFS는 오랜 준비를 거쳐 1997년 발사되었으며 해색을 위하여 총 8개의 밴드를 가지고 있다. 즉, 가시광선 영역에 6개의 밴드(412, 443, 490, 510, 555, 670 nm)와 대기보정을 위하여 근적외선 영역에 2개의 밴드(765, 865 nm)를 가지고 있다.

SeaWiFS는 Gordon *et al.* (1994)이 제시한 알고리즘을 기본으로 해색을 위한 대기보정을 하고 있다. SeaWiFS 알고리즘은 CZCS 알고리즘과는 달리 다중 산란 효과를 고려하고 있으며 또한 에어로졸 효과의 보정을 위해 에어로졸 모델을 사용하고 있다. Gordon *et al.* (1994)은 에어로졸 유형을 대류권 (tropospheric) 에어로졸 모델, 해양성(maritime) 에어로졸 모델 (Shettke and Fenn, 1979), 해안형(coastal) 에어로졸 모델로 나누었으며 이들에 대해 각각 상대습도 50, 70, 90과 99%로 나누었으므로 총 12가지로 구분하여 사용하였다. SeaWiFS 대기보정 알고리즘은 도식적으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon(765, 865) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon_i(765, 865) \quad (3.4.12)$$

$$t\rho_w(\lambda) = \rho_t(\lambda) - \rho_r(\lambda) - [\rho_a(\lambda) + \rho_{ra}(\lambda)]$$

$$\rho_t(765) - \rho_r(765), \rho_t(865) - \rho_r(865) \rightarrow {}^{NModel} \epsilon(765, 865) \quad : 2개의 모델을 선택$$

$$\epsilon(765, 865) \rightarrow {}^{2Model} \epsilon(\lambda, 865)$$

$$\rho_{as}(865) \rightarrow {}^{\epsilon(\lambda, 865)} \rho_{as}(\lambda)$$

$$\rho_{as}(\lambda) \rightarrow {}^{2Model} \rho_a(\lambda) + \rho_{ra}(\lambda)$$

여기서 N 은 사용된 에어로졸 모델의 개수인데, NASA 표준 대기보정 알고리즘에서는 12개의 모델이 사용되었다. 이 알고리즘은 우선 근적외선 영역(765, 865 nm)에서의 ρ_w 는 0이라 가정한

후, 에어로졸의 단산란 (ρ_{as})을 이용하여 12개의 모델에 대하여 $\epsilon(765,865)$ 을 구하여 평균값을 이용하여 가장 근접한 값을 가지는 2개의 에어로졸 모델을 선택한다. 이러한 방법은 765와 865 nm에서 에어로졸 모델에 대하여 다중 산란이 거의 비슷하고 레일레이 산란의 효과가 매우 약하므로 ρ_{ra} 가 매우 작게 되어 $\epsilon(765,865)$ 는 에어로졸 모델에 관계없이 구하고자 하는 올바른 값에 가깝다 (Gordon *et al.*, 1994). 이렇게 구한 2개의 모델 사이에 내분 비율을 구하여 다른 파장에 대한 $\epsilon(\lambda,865)$ 을 구하게 된다. $\epsilon(\lambda,865)$ 의 정의로부터 $\rho_{as}(\lambda)$ 를 구하고, $\rho_{as}(\lambda)$ 와 $\rho_a(\lambda) + \rho_{ra}(\lambda)$ 의 선형적인 관계로부터 에어로졸의 다중 산란 효과를 구해내어 해수로부터의 $\rho_w(\lambda)$ 을 구해내게 된다 (Wang, 1991; Gordon, 1997).

SeaWiFS 알고리즘은 앞으로도 많은 연구를 통해 검증이 필요하지만 현재 대기보정에 있어 가장 모범적인 방법을 제시하고 있다. 하지만 이 알고리즘은 765 nm에서 산소 분자에 의한 흡수 효과를 고려해야 하는 문제를 가지고 있다.

다. OCTS 알고리즘

OCTS는 1996년에 발사되어 1997년까지 짧은 기간 동안 운행되었으나 많은 자료를 관측하였다. OCTS는 시기적으로 SeaWiFS보다 먼저 올라갔으나 SeaWiFS에서 사용하기 위해 제시된 알고리즘을 기본적으로 채용하였다. OCTS는 SeaWiFS와 비슷하게 가시광선 영역에서 6개의 밴드 (412, 443, 490, 520, 565, 670 nm)와 근적외선 영역에서 2개의 밴드(765, 865 nm)를 가지고 있다.

앞에서 언급했듯이 OCTS 알고리즘은 기본적으로 SeaWiFS의 알고리즘과 동일하다. 다만 에어로졸 모델이 다르고, 에어로졸 모델을 선택하기 위해 필요한 변수를 조금 다르게 사용하고 있다. 우선 OCTS에서는 SeaWiFS와 다른 황사를 포함하는 10가지 에어로졸 모델을 가지고 있다. 또한, 가장 근접한 2개의 에어로졸 모델을 택하기 위해 새로운 변수 $\gamma'_{ave}(670,865)$ 와 $\gamma(i,\lambda,865)$ 을 다음과 같이 도입하였다.

$$\gamma'_{ave}(670,865) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma'(i,670,865) \quad (3.4.13)$$

$$\gamma(i,670,865) \equiv \frac{K_{ext}(i,\lambda)}{K_{ext}(i,865)} \quad (3.4.14)$$

여기서, $\gamma'(i,670,865) = \tau_a(i,670)/\tau_a(i,865)$ 이다. i 는 에어로졸 모델을 의미하고 N 은 에어로졸의 개수를 의미한다. $K_{ext}(i,\lambda)$ 는 에어로졸 모델과 파장에 따른 분산 계수(extinction coefficient)이다. 따라서 OCTS 대기보정 알고리즘에서는 10개의 에어로졸 모델에 대하여 $\gamma'_{ave}(670,865)$ 을 구하여 에어로졸 모델에 따라 미리 계산된 $\gamma(i,\lambda,865)$ 에서 가장 근접한 2개의 모델을 택하고, 그 내분 비율을 이용해서 에어로졸 광학적 두께를 계산해 냄으로서 에어로졸 다중 산란 효과를 계산해낸다. 이 알고리즘에서 765 nm 대신 670 nm를 사용한 것은 SeaWiFS 알고리즘에서 지적한 바와 같이 765 nm의 파장이 산소 분자에 의해 흡수되기 때문이다.

라. 육상관측 위성에 주로 사용되는 radiative transfer model

물리적인 대기 자료에 기반을 둔 대기보정 모델들은 대기 자료에 관련된 많은 변수들이 요구되는 simulation 서브모델이다. 이러한 대기보정 모델로는 LOWTRAN, MODTRAN, ATREM과 6S 등이 있다. 대기 자료를 기반으로 한 대기보정 모델은 정밀도 면에서 우수하다는 장점이 있지만, 영상이 획득된 날에 대한 층별 대기상태와 현장자료 등을 입력변수로 넣어야 하므로 대기 자료가 없는 지역이나 과거의 위성영상을 보정할 경우에는 어려움이 따른다.

Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) 모델은 이 모델이 나오기 10년 전 Laboratoire d'Optique Atmospherique에 의해 만들어진 5S 모델에서 더욱 발전된 대기보정 프로그램이다. Vermont *et al.* (1997)에 의하면 입력되는 항목은 아래와 같으며, MODTRAN에 비해 대기 자료가 적은 환경에서 사용을 용이하게 하였다.

- Geometric condition
- Atmospheric model
- Aerosols model
- Aerosol model concentration
- Target altitude
- Sensor platform
- Sensor band
- Type of data
- Number of pixels of the image

위성에서 관측된 값은 6S 모델에 의해 대기의 효과를 보정하여야 한다. $\rho_{sat}(\lambda)$ 는 해수의 광학반사도와 관련되므로 식 3.4.5와 같이 표현 가능하다. 이로부터 대기 보정된 반사도 값은 아래의 식과 같다.

$$\rho_{ac}(\lambda) = \frac{\rho_w(\lambda)}{1 + S \cdot \rho_w(\lambda)} \quad (3.4.15)$$

여기서 S 는 total spherical albedo이다. 연구지역에 대한 위성자료 획득시기의 대기 조성을 추정하기 위하여 대기압, 온도, 수증기, 오존 밀도와 고도 등을 선정한다. continental, maritime과 urban 등의 tropospheric aerosol model 중 maritime aerosol을 선택하였으며, 550 nm에서의 에어로졸의 optical thickness는 총 소산계수(total extinction coefficient)를 적분해줌에 의해 구할 수 있다.

$$\tau(550) = \int_0^{\infty} K_{550}(z) dz \quad (3.4.16)$$

여기서 총 소산계수는 아래와 같이 정의된다.

$$K_{550}(z) = \sigma_{550} 10^{-3} N(z) \quad (3.4.17)$$

$\sigma_{550}(\mu m^2)$ 은 extinction cross-section이고 aerosol density (N , $part.cm^{-3}$)는 visibility의 함수(v , km)이며 z 는 고도 (km) 이다.

$$N(z) = \frac{a(z)}{v} + b(z) \quad (3.4.18)$$

MODTRAN은 대기투과율이나 background radiance 등의 모사를 위해 미국 AFGL (Air Force Geophysical Laboratory)에서 개발한 대기보정 프로그램으로 대기복사모델 중 세계적으로 많이 사용되고 있다. 1983년 LOWTRAN6에서 출발하여 지속적인 연구에 의해 다산란방사량, CO_2 및 O_3 양의 변화 등 여러 가지 모듈에서 지속적으로 보완되어져 왔다. 그러나 이 프로그램으로 대기보정을 실시하기 위해서는 각 위성자료가 얻어지는 당시의 대기의 기압과 온도 자료 뿐만 아니라 대기 중에 존재하는 H_2O , O_3 , CH_4 , N_2O , SO_2 , NO_2 , NH_3 , HNO_3 , CFC'S, $ClONO_2$, CCL_4 , N_2O_5 및 에어로졸에 대한 층별 기상자료가 필요하고 또한 연구지역의 위치, 천정각, 지역 특성, 위성의 위치 등 방대한 자료가 요구된다.

마. 영상에 기초한 알고리즘

한 영상의 대기효과가 동일하다는 가정 하에 이루어지는 영상기반 대기보정 모델들은 흑체의 존재와 표면이 Lambertian surface 임을 가정으로 하며 현장조사 자료가 검증의 역할은 하지만 실제적인 보정에는 사용되지 않는다. 또한 여러 자료들은 위성의 고도, 태양각, 획득시간 등의 자료와 영상내의 처리과정을 거쳐 대기보정이 수행된다.

Invariant-object 방법에서의 가정은 주어진 어떠한 영상에서든지 상당히 안정된 반사도를 갖는 픽셀이 존재한다는 것이다. 따라서 이 불변의 물체의 반사도를 기반으로 각각의 밴드에 대해 선형적 연관성을 가지고 다른 시기에 얻어진 영상들에 대한 표준화 하게 된다 (Shunlin Liang *et al.*, 2001). 이 방법은 FILE (First ISLSCP Field Experiments)에서 Landsat TM 영상에 적용하여 성공적인 결과를 얻었다. 이 방법은 간단하다는 장점이 있지만 통계적 방법이 필수적이며 상대적인 보정만을 수행하게 된다. 또한, 다중 에어로졸 산란의 보정이 어렵다는 한계를 갖는다.

Dark-Object Subtraction (DOS) 방법은 영상내의 몇 개의 픽셀은 완전한 흑체이며 위성에서 받는 그들의 태양복사에너지양은 모두 대기의 산란으로부터 야기된다고 가정한다. Moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS)와 Medium resolution imaging spectrometer (MERIS) 대기보정 알고리즘은 이 원칙에 근거하고 있다. 그러나 이 방법은 산란효과는 제거되

지만 산란과 흡수 등에 의한 대기의 투과율의 보정은 이루어지지 않는다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 DOS 모델의 발전된 방법으로 COST 모델이 제안되었다. 이는 천정각의 cosine 값을 이용하여 대기의 투과율을 보정해 주는 방법이다. DOS 모델에서는 τ_z 와 τ_v 의 값이 1로 정해지지만 COST 모델에서는 위성의 관측이 거의 수직에서 이루어지기 때문에 τ_v 의 값은 1이 되며, τ_z 는 solar zenith angle을 이용하여 아래의 식에 의해 구해진다.

$$\tau_z = \cos\theta_z = 1 - \theta\left(\frac{z^2}{2!}\right) + \theta\left(\frac{z^4}{4!}\right) - \theta\left(\frac{z^6}{6!}\right) \quad (3.4.19)$$

Path extraction 방법은 육상관측 위성 영상의 VIS/NIR 밴드에서 대기효과를 제거하기 위하여 DOS 방법을 발전시킨 것으로 영상의 대기효과를 제거하는 데에 있어서 개념적으로 매우 단순하고 효과적인 방법이다 (Kaufman *et al.*, 2000; Brivio *et al.*, 2001; Liang *et al.*, 2001). 이 방법은 각 밴드에 대해서 산 그림자나 black ocean과 같이 가장 낮은 반사도 값을 갖는 점을 선정하고, 이 점들은 공기 분자나 에어로졸에 의해 산란된 광자로 인한 path radiance로 간주 한다 (Antoine and Morel, 1999). 여기서 산란 투과도는 1이다.

$$L_{sat}(\lambda) = L_{path}(\lambda) + t_d \cdot L_w(\lambda); t_d = 1, L_w(\lambda) = 0 \quad (3.4.20)$$

공기분자와 에어로졸에 의한 산란 값은 L_{path} 로 간주하며, 모든 밴드에서 dark pixel을 정하고 이들은 모두 L_{path} 로 간주하게 된다.

바. 새로운 대기보정 방법

본 방법의 아이디어는 대기보정을 위하여 위성의 촬영 영역 내에 이미 잘 알려진 지표 스펙트럼이 있는 경우에 이 스펙트럼 값을 기준 자료로 활용하고자 하는 방법이다. 그리고 기준이 되는 target을 “기준점 스펙트럼 (Reference Target Spectrum; RTS)”이라 부른다. RTS의 광학적 특성은 다음과 같은 성격을 가지는 조건이 필요할 것이다.

<RTS의 광학적 특성>

- 연중 반사도 스펙트럼의 모양이나 크기가 일정하다.
- 시간이 지나도 RTS의 광특성은 변화되지 않는 안정성이 필요하다.
- 해양대기보정을 위해서는 가능한 해수면에서 얻어지는 것이 바람직하다.
- RTS의 해수면 광 특성이 탁한 해수거나 맑은 해수거나 하는 것은 상관이 없다.
- RTS의 종류는 다양한 DB를 갖는 것이 바람직하다.

다음은 한반도 근해역 및 육상에서 얻어진 몇몇 기준 스펙트럼의 종류별로 얻어진 반사된 radiance 스펙트럼의 모양을 보여준다.

- 맑은 물의 스펙트럼

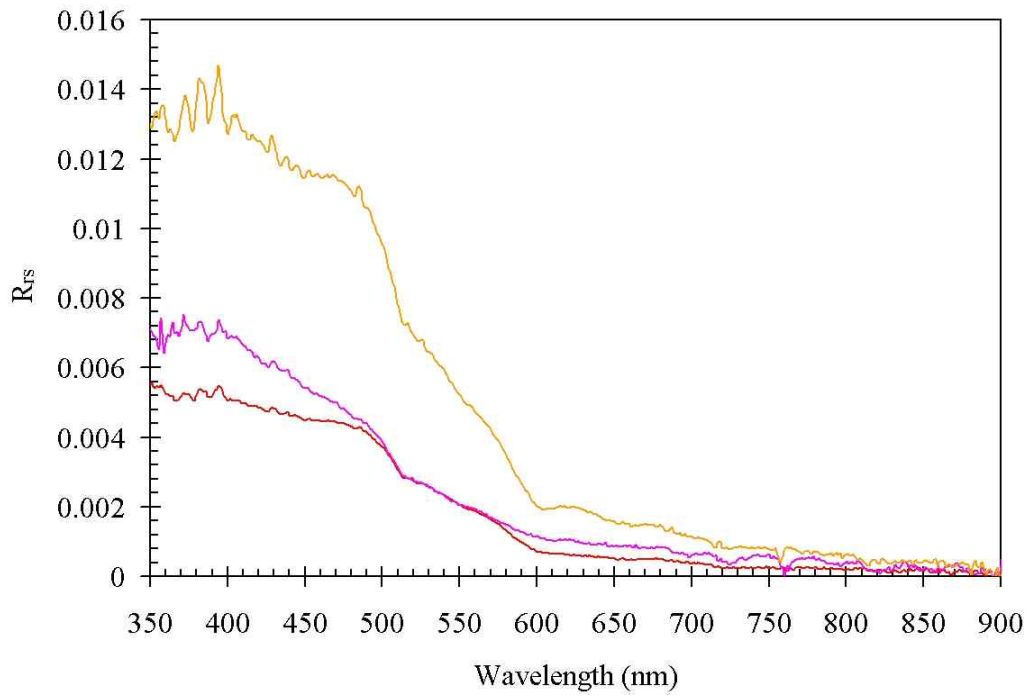


그림 3.4.2 Clear water spectrum

- 탁도가 높은 물의 스펙트럼

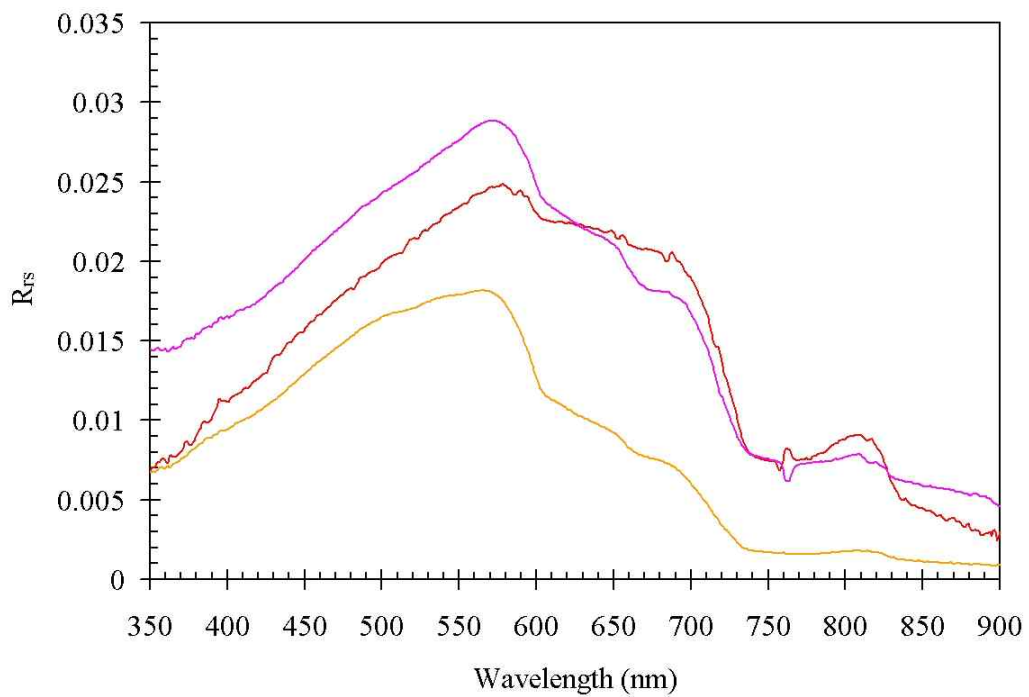


그림 3.4.3 Turbid water spectrum

- 잔디(골프장) 스펙트럼

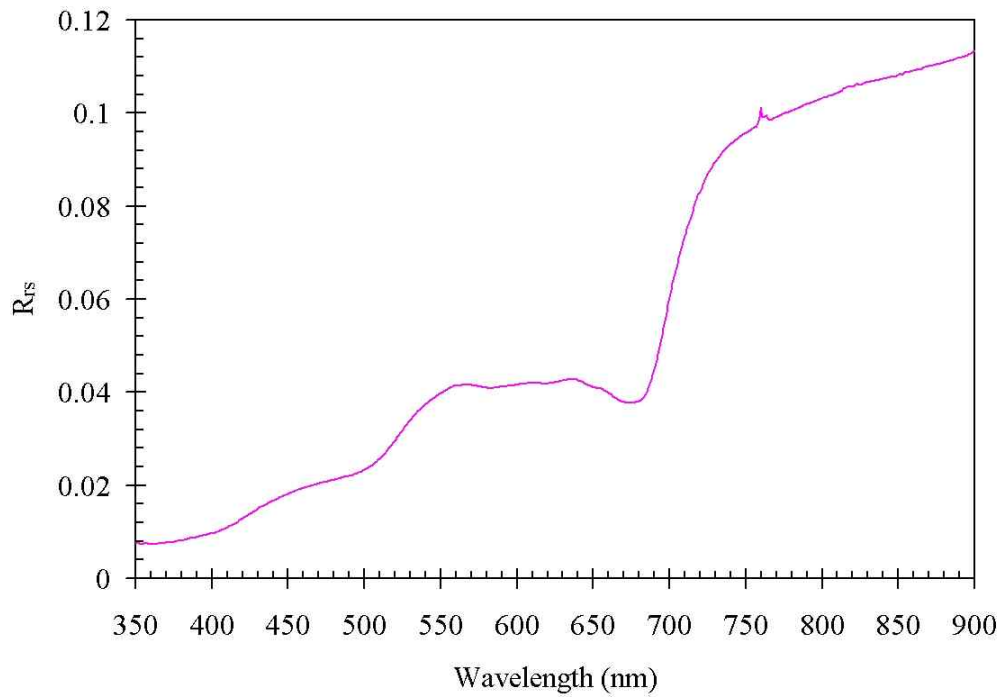


그림 3.4.4 Lawn spectrum

- 포장된 도로의 스펙트럼 (아스팔트)

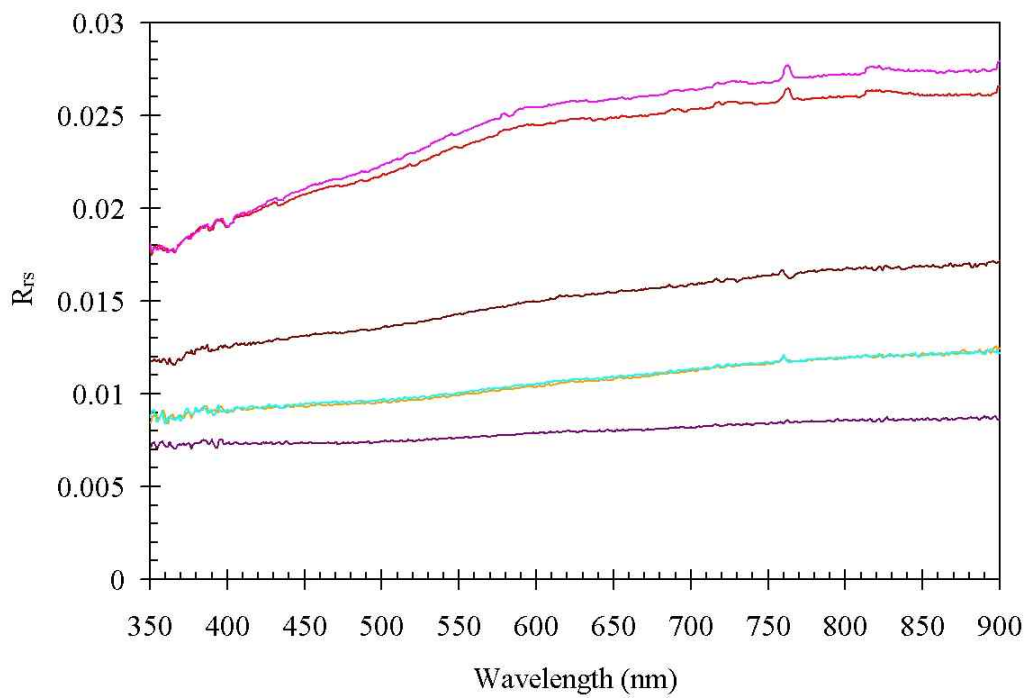


그림 3.4.5 Asphalt spectrum

상기 얻어진 한 스펙트럼은 4가지 관점에서 정량화 할 수 있을 것이다.

- 첫째는 얻어진 radiance 스펙트럼의 절대 값 (L)을 갖는 경우와
- 둘째는 주어진 한 파장 값으로 규격화 (normalized spectrum)한 경우 (L_N) 그리고
- 셋째는 원격반사도 (R_{rs}) 값 스펙트럼이고
- 마지막으로 이 원격 반사도 스펙트럼을 역시 규격화한 것 (R_{rs-N})이다.

여기서 표면 반사된 Radiance 크기를 규격화한 은 555nm에서 규격화 하였으며 다음과 정의된다.

$$\tilde{L}(\lambda) = \frac{L(\lambda)}{L(555\text{ nm})} \quad (3.4.21)$$

마찬가지로 원격반사도 역시,

$$R_{rs-N}(\lambda) = \frac{R_{rs}(\lambda)}{R_{rs}(555\text{ nm})} \quad (3.4.22)$$

상기 스펙트럼은 시간을 두고 연중 radiance 스펙트럼의 모양 및 크기에 관한 정보를 계속 누적하여 DB화할 필요가 있다. 이 부분은 지속적으로 정보를 갱신하여 연중 스펙트럼의 변화도를 추정할 것이다.

(1) 기준점의 절대값 radiance 활용방법

위성 영상에서 1점 RTS 대기 보정은 수평적으로 균질한 대기 신호를 갖는다는 가정이 필요하다. 이러한 조건은 고해상도 좁은 촬영 영역을 갖는 해역에 적합하다. 그러므로 광역의 대기 보정은 이 방법으로 사용하기가 어려울 것이다. 현재는 이 한점 대기 보정기술만을 개발하였으며 추후 수평적인 비균질의 대기 보정방법을 개발할 것이다. 이론적인 접근 방법은 다음과 같다.

우선 여기서 필요한 가정은 다음과 같다.

- 수평적으로 균질한 대기 특성을 갖는다.
- 모든 위성 파장대에서 한 주어진 RTS의 radiance 절대 값을 알아야한다.
- 위성에서는 total radiance 값을 알고 있다.

한주어진 기준 점의 절대 값 radiance를 알고 있는 경우는 가장 수월하게 대기 보정을 수행할 수 있을 것이다. 즉, 다음과 같은 식으로 일반화 할 수 있을 것이다.

$$L_{atm}(\lambda) + t \cdot [(L_w(\lambda) + L_{FR}(\lambda) + L_{wc}(\lambda))] = L_T(\lambda) \quad (3.4.23)$$

위 식에서 t는 대기의 투과도 이며, $L_{atm}(\lambda)$ 은 대기에 의한 신호로 공기분자산란, 수증

기, 오존, 에어로졸 등으로 발생하는 복합적인 대기신호이다. $L_w(\lambda)$ 는 순수 해수에 의한 해석신호이며, $L_{FR}(\lambda)$ 은 푸른 하늘($L_{sky}(\lambda)$)에 의한 해수면 Fresnel 반사 값이며 $L_{wc}(\lambda)$ 는 해수면에서 바람에 의하여 발생하는 white-cap(흰색파도)의 추가 광량이 된다. 이러한 복합적 신호는 대기의 투과도(t)에 의하여 감쇄하여 위성에 감지되게 된다.

그러나 위 식으로의 표현은 문제 해결을 복잡하게 만들므로 다음과 같은 단순화된 개념으로 식을 구성하였다.

$$L_w(\lambda) + f[t(\lambda), L_{atm}(\lambda), L_{FR}(\lambda), L_{wc}(\lambda)] = L_T(\lambda) \quad (3.4.24)$$

즉, 위성에서 얻어지는 신호는 대기신호, 해수신호, 해수면 반사신호, white cap 신호로 구분하였고, 해수신호를 제외한 대기신호(대기성분에 의한 산란, 흡수 영향의 포괄적 신호), 반사신호, white cap신호 그리고 이들과 복합적으로 복잡하게 결합된 대기의 투과도(t)를 통합적으로 고려된 “path radiance”를 정의하였다.

$$L_{path}(\lambda) = f[t(\lambda), L_w(\lambda), L_{FR}(\lambda), L_{wc}(\lambda)] \quad (3.4.25)$$

상기 식에서 $L_{path}(\lambda)$ 는 앞에서 언급한 다양한 물리적 과정을 포함하고 있는 함수로 수식적으로 표현하기 어려운 변수이다. 그러므로 대기의 투과도가 “1”이라는 가정이 필요하지 않다는 의미를 갖는다.

그리고 한 주어진 그러면 상기 식은 다음과 같이 다시 표현이 가능하다. 즉 한 주어진 기준점(ref)에서;

$$L_{w-ref}(\lambda) + L_{path}(\lambda) = L_{T-ref}(\lambda) \quad (3.4.26)$$

위 식에서 $L_{w-ref}(\lambda)$ 의 값은 이미 기준 reference spectrum DB에서 알고 있고, 쉽게 $L_{path}(\lambda)$ 을 얻을 수 있으며, 이 값을 영상의 모든 pixel에 적용만하면 순수한 $L_w(\lambda)$ 값을 얻을 수 있게 된다.

$$L_{path}(\lambda) = L_{T-ref}(\lambda) + L_{w-ref}(\lambda) \quad (3.4.27)$$

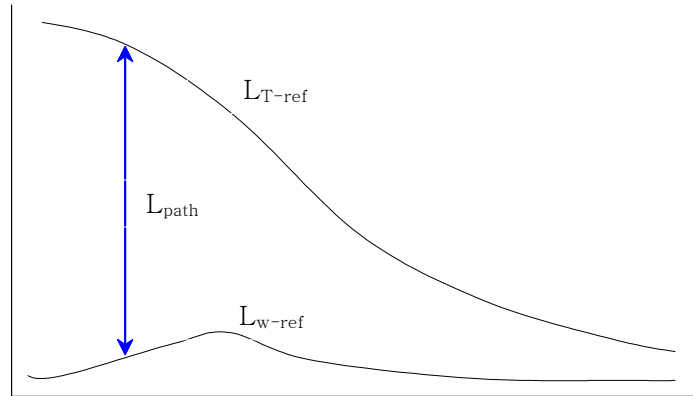


그림 3.4.6 Path radiance를 구하기 위한 개념도

실제적으로 상기 방법을 활용하기 위해서는 정해진 지표에 인공적인 기준점을 만들어 두고 주기적/자동 관측하여 사용하는 방법이 가장 이상적일수도 있다. 이 경우는 저해상도 광역의 매시간 촬영하는 정지궤도 해양위성에는 적합하지 못하며, 시간 해상도 (temporal resolution)이 낮은 다목적 2호에 탑재된 MSC와 같은 고해상도 위성에 적합할 것으로 사료된다.

(2) 스펙트럼 모양 일치법 (Spectral Shape Matching Method; SSMM)-1

위의 기준점의 절대 radiance 값 활용 방법은 기준점의 radiance 값을 알고 있고 언제나 일정하다는 가정이 필요하다. 그러나 자연 상태의 기준점 target의 광량이 일정하기란 사실 어렵다. 입사 태양빛의 세기가 계절과 일중 시간에 따라 변하며 기준점의 광학적 특성도 변한다. 그러므로 기준점의 실제 관측 값이 없으면 사용이 어렵게 된다. 이러한 문제점을 제거하기 위하여 기준점의 RTS Shape를 기준 자료로 활용할 수 있을 것이다.

여기서 필요한 가정은 다음과 같다.

- 수평적인 균질의 대기 특성을 갖는다.
- RTS의 radiance 절대 값은 필요하지 않다. 오로지 규격화된 스펙트럼의 상대적 값만 알면 된다 (여기서는 일반적으로 555 nm에서 규격화된 값을 사용).
- 대기 Path radiance 스펙트럼의 파장에 따른 slope 값 (역시 모양 값 임)을 알거나 혹은 최소한 하나의 파장대 (밴드)에서 $L_{path}(\lambda)$ 의 절대 값을 알아야 한다.
- 위성으로부터 total radiance 값을 알고 있다.

<이론적인 접근법>

여기서 접근의 기본 개념은 한 기준점에서, total radiance에서 모양이 알려진 대기 path radiance를 위성으로부터 적당하게 빼 줄 경우 남는 target 스펙트럼의 모양이 기존의 DB화 된 스펙트럼의 모양과 일치하도록 path radiance가 조절하는 법이다.

기준이 되는 target의 스펙트럼 모양은 radiance(L) 값을 사용하거나 혹은 원격반사도

(R_{rs}) 값을 사용할 수 있다. 여기서는 radiance를 규격화한 스펙트럼 ($\tilde{L}(\lambda)$) 을 사용할 것이다. 일반적인 $L_{path}(\lambda)$ 의 해를 얻는 방법은 다음과 같다.

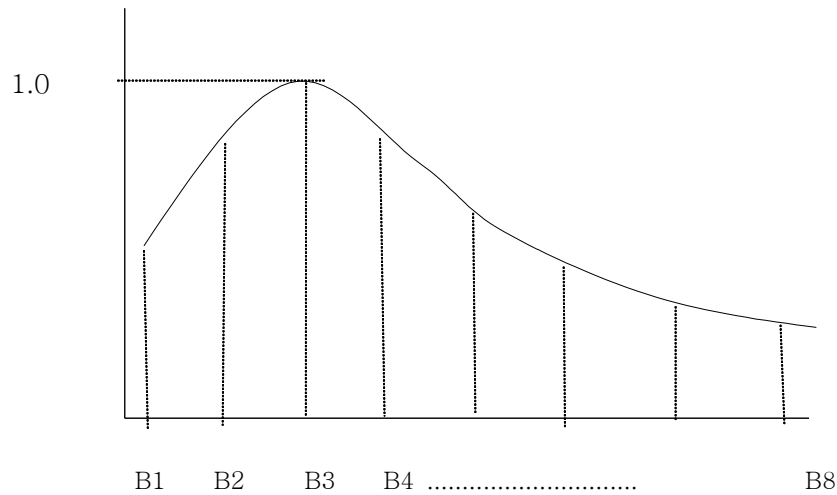


그림 3.4.7 Band-3 (555nm)에서 규격화 된 기준점 spectrum ($\tilde{L}_{w-ref}(\lambda)$)의 예.

(가) 하나의 band/pixel의 L_{path} radiance를 찾기

여러 개의 band에서 최소한 1개의 band-1 pixel에서 $L_{path}(\lambda)$ 값을 찾아내어야 한다. 가정하여 위성 영상 중에서 $L_{surface}(\lambda)$ 값이 “0”이 되는 pixel이 있다고 가정하자. 다시 말하여 이곳 pixel점은 $L_{path}(\lambda)$ 의 값만 있고 $L_{surface}(\lambda)$ 값은 “0”이 되어야 한다. 현실적으로 이런 점은 다음과 같은 경우에 존재할 수 있을 것이다. 즉,

- ① 붉은 장파장 영역이며 해수가 아주 맑은 곳 (장파장 쪽으로 갈수록 물의 흡광도가 크게 증가하는 이유임).
- ② 푸른 단파장이라도 적조 등이 발생하여 이곳의 해수가 적조생물로 인하여 검게 보이는 곳(445nm 부근).
- ③ 육지이며 고해상도 위성의 경우에 수목의 짙은 그림자 구멍이 깊게 있는 경우, 예를 들면 절벽의 그림자 밑에 짙은 수목의 그림자 구멍이 있는 경우.

GOCI 정지 위성의 경우는 공간 해상도가 낮아서 3)의 경우는 발생하기 어려우므로 가장 이상적인 방법은 1)의 경우를 적용하여 찾을 수 있을 것이다. 즉, 하나의 band 에서 $L_{path}(\lambda)$ 찾아내기 위하여 사용하는 band는 red band가 되어야하며, 위성 영상의 모든 pixel에서 blue water인 open sea water가 될 것이다.

=> Red band (8번 band)에서 open sea water를 대상으로 $L_T(band8)$ 가 최소가 되는 pixel를 찾아낸다.

=> 이 pixel에서는 ; $L_T(band8) = L_{path}(band8)$ 이라고 가정한다.

=> Band 8번에서 $L_{path}(\lambda)$ 는 모든 pixel에서 동일하다고 가정 (수평적 균일한 path

$$\begin{aligned}
[L_T(\text{band1}) - C \cdot \tilde{L}_{\text{path-ref}}(\text{band1})] / [L_T(\text{band3}) - C] &= \tilde{L}_{w-ref}(\text{band1}) \\
[L_T(\text{band2}) - C \cdot \tilde{L}_{\text{path-ref}}(\text{band2})] / [L_T(\text{band3}) - C] &= \tilde{L}_{w-ref}(\text{band2}) \\
[L_T(\text{band3}) - C] / [L_T(\text{band3}) - C] &= \tilde{L}_{w-ref}(\text{band3}) (= 1) \\
\text{.....} \\
[L_T(\text{band8}) - C \cdot \tilde{L}_{\text{path-ref}}(\text{band8})] / [L_T(\text{band3}) - C] &= \tilde{L}_{w-ref}(\text{band8}) \quad (4-3-33)
\end{aligned}$$

위 식에서 식의 수는 7개이며 미지수는 C 하나뿐이다. 최적의 C 값은 matrix를 이용한 최소자승법을 이용하면 얻을 수 있게 된다. 얻어진 C는 다시 식 (4-3-30)을 활용하면 각각의 band에서 path radiance를 구할 수 있게 된다. 이 방식을 적용하기 위해서는 우선 해양에서 Path radiance의 스펙트럼 모양에 대한 연구가 필요하다. 여기서 명심해야 할 점은 path radiance는 어떤 에어로졸의 특성이나 기존의 대기보정 스펙트럼처럼 power function이 되지 않을 수 있다. 그 이유는 식 (4-3-25)의 표현이 항목별 단순한 가감의 표현으로 될 수 없기 때문이다. 그리고 path radiance의 스펙트럼 모양은 연 중 혹은 해역에 따라 크게 변화되지 않아야 사용할 수 있을 것이다. 이 path radiance의 모양 변동으로 최종 얻어지는 $L_w(\lambda)$ 신호의 안정성 여부에 대한 연구는 추후 다시 이어질 것이다.

3. 연구결과

가. Landsat TM/ETM+ 영상의 대기보정

Landsat 영상의 각 밴드에 대해 DN 값을 우선적으로 radiance로 바꾸어 주는 식은 아래와 같다.

$$L_{sat}(\lambda) = \frac{L_{MAX}(\lambda) - L_{MIN}(\lambda)}{Q_{cal}} Q_{cal} + L_{MIN}(\lambda) \quad (3.4.34)$$

여기서 L_{sat} 은 대기권 밖 (top of atmosphere)의 upwelling radiance ($mW/cm^2/\mu m/ster$)이고 Q_{cal} 은 위성자료의 DN 값이며 L_{MIN} 과 L_{MAX} 는 표 3.4.1과 같이 정의된다.

표 3.4.1 ETM+ Spectral Radiance Range (unit: $mW/cm^2/\mu m/ster$)

Band	Before July 1, 2000				After July 1, 2000			
	Low Gain		High Gain		Low Gain		High Gain	
	L _{MIN}	L _{MAX}	L _{MIN}	L _{MAX}	L _{MIN}	L _{MAX}	L _{MIN}	L _{MAX}
1	-0.62	29.75	-0.62	19.43	-0.62	29.37	-0.62	19.16
2	-0.60	30.34	-0.60	20.24	-0.64	30.09	-0.64	19.65
3	-0.45	23.55	-0.45	15.86	-0.50	23.44	-0.50	15.29
4	-0.45	23.50	-0.45	15.75	-0.51	24.11	-0.51	15.74
5	-0.10	4.770	-0.10	3.176	-0.10	4.757	-0.10	3.16
6	0.00	1.704	0.32	1.265	0.0	1.704	0.32	1.265
7	-0.035	1.660	-0.035	1.0932	-0.035	1.654	-0.035	1.080
8	-0.50	24.400	-0.50	15.840	-0.47	24.31	-0.47	15.83

위의 식에 의해 얻어진 Landsat 자료의 radiance는 아래의 식에 의해 단위가 없는 reflectance 값으로 바꿀 수 있다.

$$R_{sat}(\lambda) = \frac{\pi(L_{sat}(\lambda) - L_{path}(\lambda)) \times D^2}{E_o(\lambda) \times \cos \theta_s} \quad (3.4.35)$$

여기서 θ_s 는 solar zenith angle이며 E_o 는 solar exoatmospheric irradiance로 Landsat 위성의 각 밴드별 값은 다음의 표 3.4.2와 같다.

표 3.4.2 Landsat 위성의 band 별 E_o (unit: $mW/cm^2/\mu m$)

Band	Landsat 4	Landsat 5	Landsat-7 ETM+
1	195.7	195.7	196.9
2	182.5	182.6	184.0
3	155.7	155.4	155.1
4	103.3	103.6	104.4
5	21.49	21.50	22.57
7	8.072	8.067	8.207

또한 D 값은 지구와 태양간의 거리를 나타내며 Julian day에 따른 거리는 아래의 표와 같다.

표 3.4.3 Earth-Sun Distance in Astronomical Units

DOY	Distance	DOY	Distance	DOY	Distance
1	0.9832	121	1.0076	242	1.0092
15	0.9836	135	1.0109	258	1.0057
32	0.9853	152	1.0140	274	1.0011
46	0.9878	166	1.0158	288	0.9972
60	0.9909	182	1.0167	305	0.9925
74	0.9945	196	1.0165	319	0.9892
91	0.9993	213	1.0149	335	0.9860
106	1.0033	227	1.0128	349	0.9843
DOY - Day of Year (Julian Day)				365	0.9833

2000년 4월 16일 서해 중부 해역을 찍은 Landsat-7 ETM+ 영상의 가시광/근적외선 (VIS/NIR) 밴드에 대해 6S radiative transfer code를 이용하여 기하학적인 상태 및 대기의 상태, 에어로졸 모델 타입, 에어로졸 농도 등의 주어진 자료에 기초하여 대기 보정을 수행하였다. 그림 3.4.9는 Landsat-7 ETM+ 각 밴드의 Top of atmosphere reflectance ($\rho_t(\lambda)$) 영상을 보여준다.

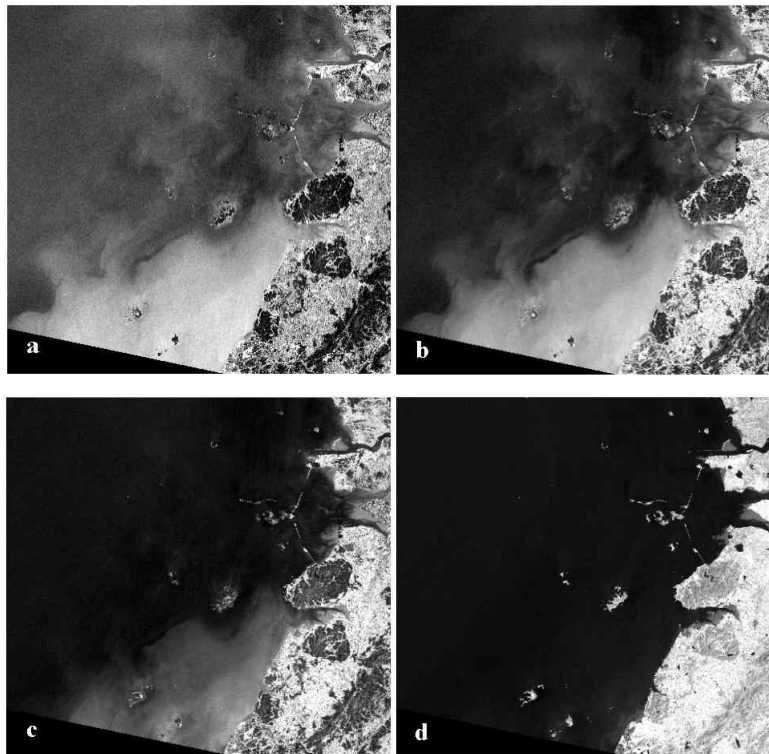


그림 3.4.9 Maps showing total reflectance at the top of the atmosphere (R_{TOA}) in the centerwavebands (nm), 485, 560, 660 and 830, respectively, of the Landsat-7 ETM+ imagery acquired on 16 April 2001, over the southwest coastal waters of Korea.

대기에 의한 영향인 $\rho_{path}(\lambda)$ 을 구하기 위해 4개의 VIS/NIR 밴드와 기하학적인 관계 ($\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi$), 대기의 두께에 대한 정보를 6S Radiative transfer simulation에 입력하였다. $\rho_{rs}(\lambda)$ 를 계산하기 위하여 위에서와 같은 기하학적인 관계 ($\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi$)와 밴드들이 사용되었다. 에어로졸 모델 (대륙 에어로졸, 도시 에어로졸과 해양 에어로졸)의 선택에 따라 spectral optical thickness가 결정된다. 그러므로 고전적인 대기보정 알고리즘들은 에어로졸의 구성과 수직 분포 특성에 대한 가정을 만드는 것이 일반적이었다. 3가지 에어로졸 모델 중에서, 본 연구에서는 해양 에어로졸 모델을 선정하였는데 이 에어로졸 모델을 선택하는 동기는 해양 레이어 안의 에어로졸이 주로 물과 0.05 μm 이하의 작은 대륙성 입자들로 구성된 sea-salt 입자들로 구성되어 있기 때문이다 (Antoine and Morel, 1999). layer 안에서는 에어로졸이 균일하다는 가정과 6S radiative transfer code를 사용한 molecular atmosphere에 대한 TOA (total radiances)의 계산을 이용하여 $\rho_{path}(\lambda)$ signal을 추정하였다. 해양 에어로졸에 대한 정규화된 $\rho_{path(N)}(\lambda)$ 값은 도시나 대륙의 에어로졸의 값에 비해 상당히 낮는데, 이는 다른 지역에 비해 해양에서 높은 reflectance 값을 얻을 수 있음을 의미한다.

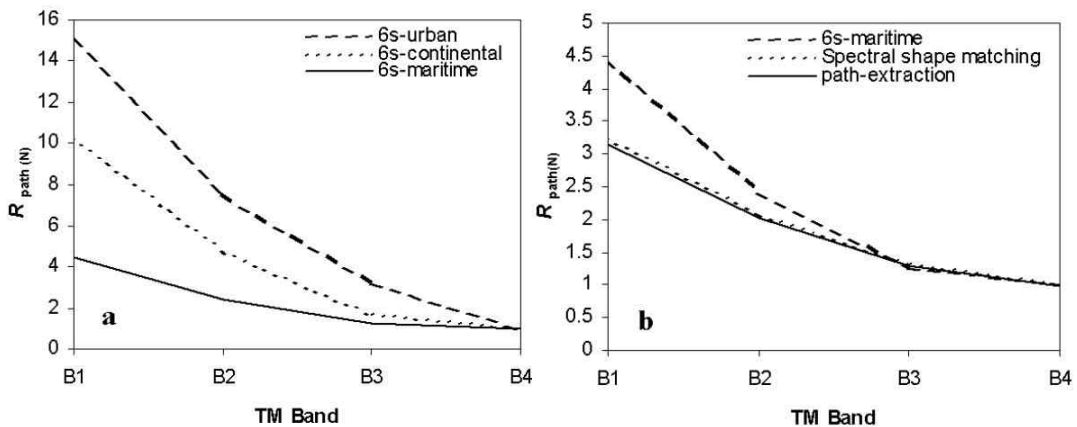


그림 3.4.10 Comparative performance of three aerosol models (a) and comparison of the atmospheric path reflectance estimated from the 6S radiative transfer code, developed by Vermote et al. (1997), path-extraction and SSMM methods (b). Note that the path reflectance R_{path} is normalized at ETM+ band 4.

ETM+ VIS/NIR bands의 $\rho_t(\lambda)$ 로부터 6S model을 사용하여 구한 해양 에어로졸과 복합된 대기에 대한 $\rho_{path}(\lambda)$ 와 path-extraction과 SSMM 방법으로 구한 $\rho_{path}(\lambda)$ 값과 비교하여 보았다 (그림 3.4.10). 정규화 된 $\rho_{path(N)}(\lambda)$ 값은 파장이 증가할수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 6S 모델은 가시광선 밴드에서 $\rho_{path(N)}(\lambda)$ 값이 다른 방법들에 비해 높게 산출하기 때문에 $\rho_w(\lambda)$ 값이 다른 보정 방법보다 낮은 값을 보일 것으로 예상된다. 이와는 반대로 path-extraction과 SSMM 방법을 사용하여 구한 $\rho_{path(N)}(\lambda)$ 값은 상대적으로 낮다. 대기보정의 결과는 ETM+ 영상 VIS/NIR 밴드의 $\rho_t(\lambda)$ 에서 $\rho_{path}(\lambda)$ 를 빼줌으로써 현장에서 측정된 값 (*in situ* spectra)과 비교할 수 있는 대기 보정된 반사도 스펙트라를 얻게 된다. 그림 3.4.11은 clear water와 turbid water에 대해서 6S 모델과 SSMM 방법으로 구한 Total reflectance와 Path reflectance 그리고 Path-corrected reflectance를 보여준다. Path-extraction 방법에 의한 효과는 SSMM 방법에 의한 결과와 상당히 유사하게

나타나므로 이 그림에 포함시키지 않았다. 총 반사도와 path reflectance 값은 파장이 증가할수록 감소함을 알 수 있다. clear water에서의 스펙트럴 형태가 6S model을 사용하였을 때 거의 정확하다는 것은 주목할 만한 것이다. 이것은 종종 탁도가 높은 물에서의 $\rho_w(\lambda)$ 값에 대해서 비현실적인 값을 추정하기도 한다. 결론적으로 SSMM 방법이 탁한 물과 맑은 물에서의 $\rho_w(\lambda)$ 의 스펙트럴 형태에 대한 정확한 값을 구하는데 있어서 더 효과적인 것으로 생각되며 이들 방법들의 결과와 현장에서 관측한 스펙트라 값들을 비교해보고자 한다. 2001년 4월 16일 위성이 지나가는 시간에 ASD 스펙트로미터를 이용하여 맑은 물과 탁한 물에서 광학 측정을 실시하였다.

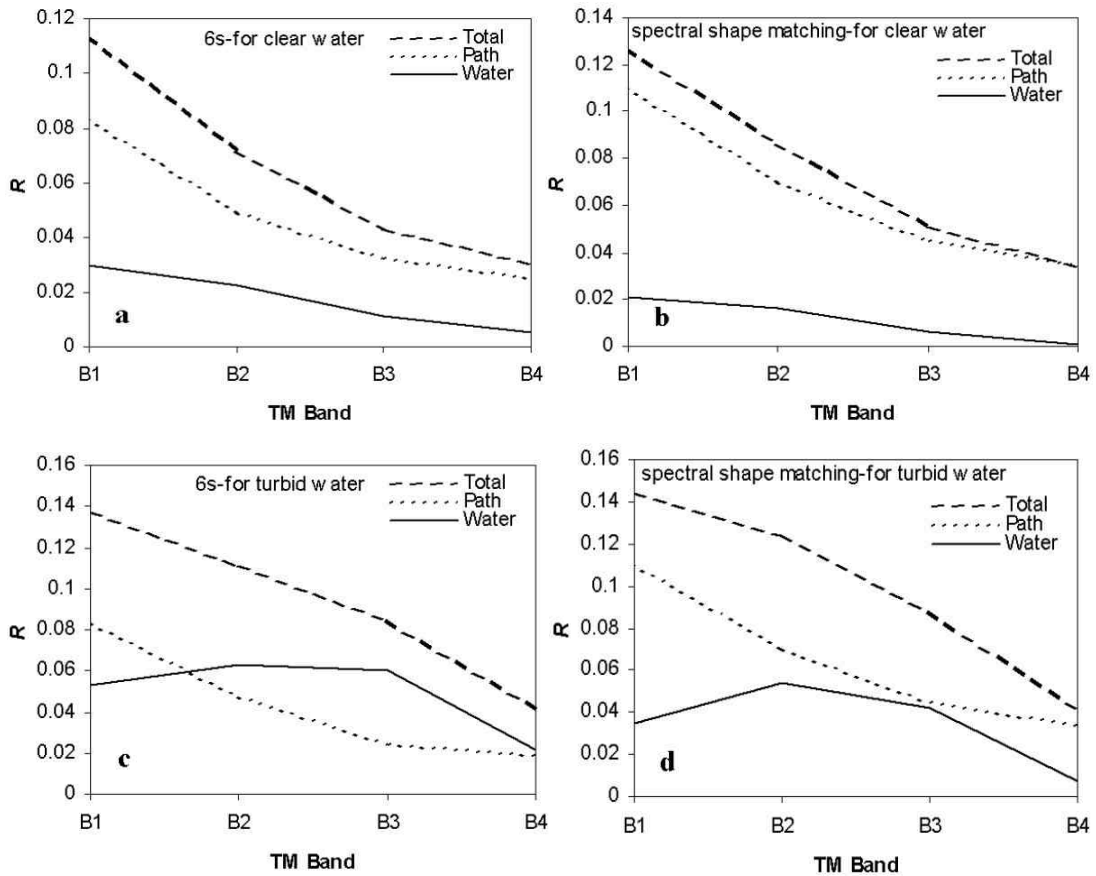


그림 3.4.11 Schematic representation of the total (at the TOA), path and path-corrected reflectance spectra, obtained from the 6S model and SSMM method, for relatively clear and turbid waters.

ETM 밴드 값과 현장관측 원격반사도 ($R_{rs}(\lambda)$)를 비교하기 위하여 ETM 센서의 스펙트럴 반응 함수를 고려하여 ETM+ 파장대의 값들을 합하였다. 그림 3.4.12는 현장관측 값과 여러 가지 대기보정 방법에 의해 대기의 효과가 제거된 반사도 값들을 비교한 그래프이다. 6S 모델에 의한 결과는 다른 방법들에 비해 현장관측 자료와 많은 차이를 보이는 것으로 나타났다. 6S에 의해서 얻어진 $\rho_w(\lambda)$ 은 이번 현장조사에서 한번도 관측된 적이 없을 정도의 높은 값이었다.

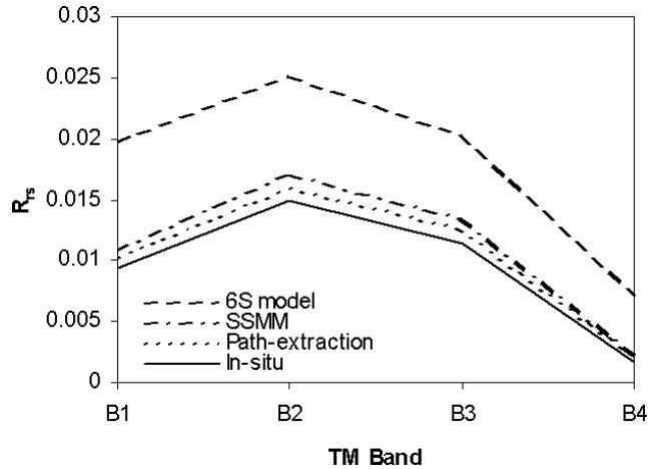


그림 3.4.12 Comparison of the atmospherically corrected remote sensing reflectance (R_{rs}) spectrum, obtained from 6S model, path-extraction and SSMM, with the *in situ* R_{rs} spectrum.

다른 대기 보정 방법들에 비해 6S 방법이 큰 차이가 나타나는 이유는 아래의 세 가지로 설명가능하다. 첫째는 입력 자료들의 선정에서 관측 값이 아닌 6S에서 제공하는 일반화된 값을 넣음으로서 에러가 증가됐을 것으로 판단된다. 두 번째는 해양에서의 파도와 foam에 의한 white cap 반사도의 영향일 것으로 추정된다. 세 번째 이유는 기본 가정 자체의 문제이다. 따라서 일단 다른 방법들과 6S 모델을 정량적으로 비교하기 위해서는 정량적으로 관측된 대기 입력 자료를 사용하여야 될 것으로 생각된다. path-extraction 방법도 black ocean signal의 가정으로 인하여 water-leaving radiance 값이 0 이하의 값이 나올 수 있음으로 사용에 주의를 기울여야 한다.

나. 해색위성 자료의 대기보정

1998년 10월 21일 획득된 SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor) 해색 위성자료를 이용하여 SSMM 방법을 적용시켜 보았다. Gordon and Wang (1994)에 의해 제안된 SeaWiFS 표준 대기 보정 알고리즘은 근적외선 영역의 해수의 water-leaving radiance 값이 0이라는 가정이 탁한 물에서는 적용되지 않으므로 정밀도에 많은 문제를 갖고 있다 (Ruddick *et al.*, 2000). 그러므로 Level 1A SeaWiFS 데이터의 총 신호로부터 SeaDAS software (Version 4.3)에서 제공하는 대기보정 방법에 의한 결과를 SSMM 방법의 결과와 비교하였다. SSMM 방법을 적용하기 위하여 Level 1A raw 자료는 Hooker *et al.* (1994)에 의한 NASA SeaWiFS technical report와 SeaWiFS 밴드 sensitivity를 고려하여 TOA에서의 total radiance ($mWcm^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$)로 바꾸어주어야 한다. 그림 3.4.13은 맑은 물에서와 탁한 물에서의 표준 SeaWiFS 방법과 SSMM 방법에 의해 구해진 $\rho_{path}(\lambda)$ 값을 비교하였다. 표준 SeaWiFS 방법에 의한 맑은 물과 탁한 물에서의 L_{path} 의 스펙트럴 형태와 크기는 SSMM 방법의 경향과 매우 유사하게 분석되었다. 표준 SeaWiFS 방법에서의 맑은 물과 탁한 물의 L_{path} 신호는 비교적 큰 차이를 보였으나 SSMM 방법에서의 맑은 물과 탁한 물의 차이는 미미했다. 이 두 대기보정 방법들에 의해 path 값을 제거하고 얻어진 water-leaving radiance와 현장 관측 자료를 이용하여 정밀도를 검증하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 현장에서 측정된 스펙트럴 값을 위성자료의 파장대에 맞게 response function을 이용하여 값을 변환하였다. 표준 SeaWiFS 방법 적용

결과는 청록 파장대에서 ρ_w 값이 과추정 되었으며 특히 그림 3.4.14와 같이 높은 탁도를 갖는 정점 B2와 B3에서 현장조사 값과 큰 차이를 보였다. 정점 B2와 B3에서 관측된 해양환경 현장조사 값은 다음과 같다 : St. B2: $\langle \text{Chl} \rangle 1.1 \text{ mg m}^{-3}$ $\langle \text{SS} \rangle 24 \text{ g m}^{-3}$ $\langle \text{DOM} \rangle 0.11 \text{ m}^{-1}$. St. B3: $\langle \text{Chl} \rangle 0.7 \text{ mg m}^{-3}$ $\langle \text{SS} \rangle 20 \text{ g m}^{-3}$ $\langle \text{DOM} \rangle 0.21 \text{ m}^{-1}$. 이와는 달리 SSMM 방법에 의해 얻어진 ρ_w 값은 현장조사 자료와 잘 일치하였다. SSMM에 의해 얻어진 값과 현장관측치의 차이는 SeaWiFS 위성 자료의 낮은 공간해상도를 인한 sub-pixel variability로 설명될 수 있다.

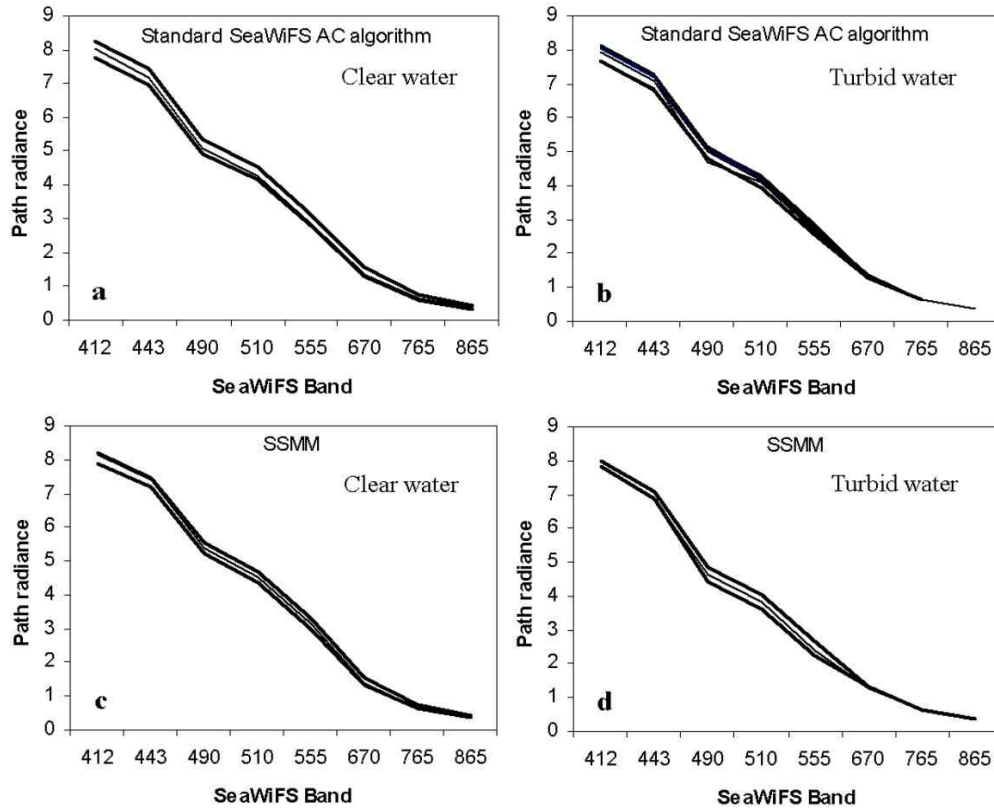


그림 3.4.13 Variation of the atmospheric path signal ($\text{mW cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$) over clear and turbid waters, assessed from total radiance recorded at the TOA by SeaWiFS ocean sensor, flown on 21 October 1998 over the south sea, using the standard SeaWiFS atmospheric correction algorithm and SSMM.

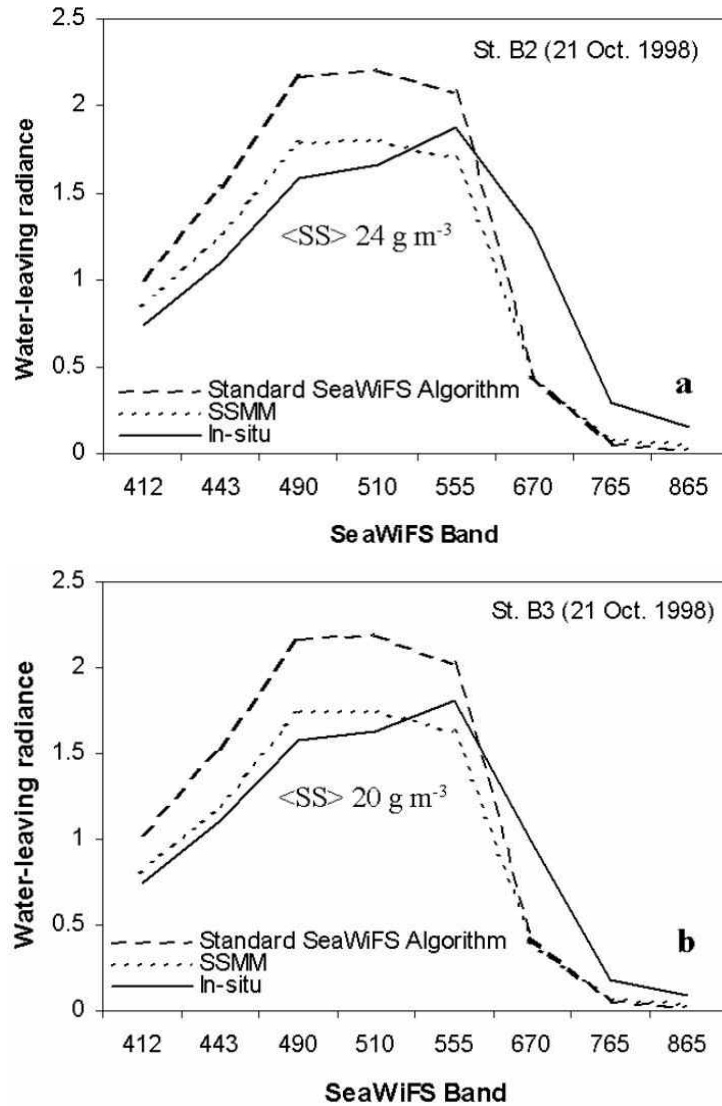


그림 3.4.14 Comparison of in-situ water-leaving radiance spectra ($\text{mW cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$), obtained from ASD measurements in highly turbid waters of the Jin-do and Wan-do bays on 21 October 1998 at 11:45 a.m, with coincident spectra from the SeaWiFS image acquired at 11:31 a.m. and processed with the standard SeaWiFS AC algorithm and SSMM method. The concentrations of chlorophyll (Chl), suspended sediments (SS) and dissolved organic matter (DOM) at stations B2 and B3 are as follows: St. B2: $\langle\text{Chl}\rangle 1.1 \text{ mg m}^{-3}$ $\langle\text{SS}\rangle 24 \text{ g m}^{-3}$ $\langle\text{DOM}\rangle 0.11 \text{ m}^{-1}$. St. B3: $\langle\text{Chl}\rangle 0.7 \text{ mg m}^{-3}$ $\langle\text{SS}\rangle 20 \text{ g m}^{-3}$ $\langle\text{DOM}\rangle 0.21 \text{ m}^{-1}$.

4. 결론

COMS에 탑재될 GOCI는 우리나라 주변 해역 약 2500×2500 km에 대해 매일 한 시간 간격으로 8차례씩 위성자료를 획득할 계획이다. 해색위성자료를 이용하여 부유퇴적물과 클로로필 농도 등의 정밀도는 위성자료의 대기보정과 해수환경 분석 알고리즘에 의해 좌우된다. 일반적으로 센서에 도달하는 총 복사휘도에서 물속에서 나오는 복사휘도는 약 10 % 정도의 값만을 가지므로 10 % 정도의 오차범위에서 정확한 해색을 얻기 위해서는 1 % 정도의 정밀도를 갖는 대기 보정 방법이 필요하다.

GOCI는 세계 최초의 정지궤도 해색탑재체로서 정지궤도라는 점에서는 기상관측 센서와 유사한 특성을 갖지만, 주로 해색을 관측한다는 점에서는 해양관측센서의 특성을 갖으며, 지역이 우리나라 해역에 한정되어 있다는 점과 일반적인 해색 센서보다는 공간해상도가 향상되었다는 점에서는 육상관측센서와도 비슷한 점을 갖고 있는 복합적인 특성을 갖고 있다. 정지궤도라는 특성으로 인해서 태양-지표면-위성간의 기하학적 구조가 매시간 바뀌게 됨으로서 지표로 들어오는 태양광의 세기가 매시간 달라짐에 따라 같은 해수의 특성을 갖더라도 나오는 광량은 달라질 수 있다. 또한 대기의 특성은 빠르게 변하게 됨으로 매시간 대기의 특성이 달라질 수 있다. 그리고 지금까지 개발되었던 해색위성의 대기보정 방법들은 맑은 바다의 특성을 갖는 Case-I 지역에서는 비교적 좋은 결과를 보였지만 DOM (Dissolved organic matter)와 부유퇴적물의 농도가 높은 우리나라 연안 지역과 같은 Case-II 해역에서는 적합하지 않다고 여러 연구자들에 의해 보고된 바 있다.

이와 같은 이유로 기존의 방법과는 다른 대기보정 방법이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 기존 해색과 육상 관측 위성에 활용되기 위해 개발된 대기보정 방법들에 대해서 고찰해보고 이들의 장단점을 파악하여 COMS GOCI 특성에 맞는 새로운 대기보정 방법을 개발하고자 한다. 제안된 방법은 Spectral shape matching method라 명명하였는데, 육상관측 위성에서 주로 사용하는 영상에 기초한 path extraction 방법과 해수의 스펙트럴 형태를 고려하는 복합적인 방법이다.

개발된 방법과 기존의 6S와 path extraction 방법들에 의해 2001년 4월 16일과 1998년 10월 21일에 각각 획득된 Landsat 과 SeaWiFS 위성자료로부터 대기의 신호를 제거하고 현장에서 얻어진 해수의 스펙트럴 값들과 비교해본 결과, SSMM 방법의 결과가 다른 방법에 비해 매우 우수하게 나타났다. 그러나 위성자료와 현장조사 자료의 시기가 일치하는 자료가 많지 않아 정량적인 비교는 이루어지지 않았다. 따라서 추후 이 보정 방법의 신뢰성 확보를 위해서는 많은 위성-현장 매칭 자료가 필요하다. 또한 앞 절의 태양광과 대기 신호의 모니터링 자료와 연계하여 보다 정량적으로 접근할 수 있는 방법이 되도록 지속적인 연구를 할 계획이다.

제 5 절 Assessing the Atmospheric and Marine Signal from a Geostationary Orbit

1. Theoretical background

가. Marine signal

(1) Geometry

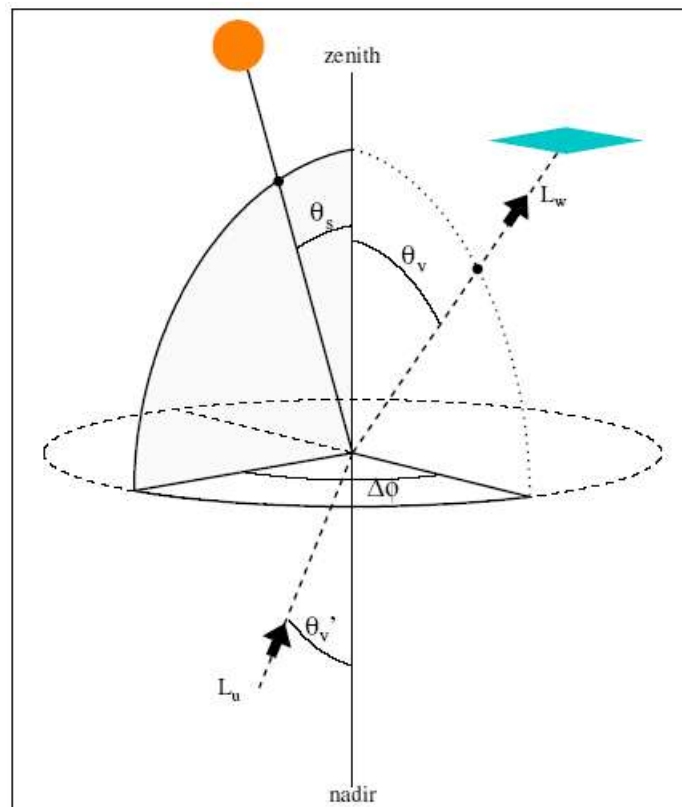


Figure 3.5.1 geometry at sea level

Figure 3.5.1 shows the three angles already defined in the precedent report :

- the zenith-sun angle θ_s ,
- the viewing angle θ_v ,
- the azimuthal difference $\Delta\phi$.

θ'_v is the refracted viewing angle defined by $\sin(\theta_v) = n \sin(\theta'_v)$ where n is the seawater refractive index ($n = 1.34$)

(2) water-leaving radiance

the water-leaving radiance L_w is expressed as :

$$L_w = E_d(0^+) \frac{\mathfrak{R}}{Q} R \quad (3.5.1)$$

where

- $E_d(0^+)$ (Wm^{-2}), the irradiance at sea level, depends on the wavelength λ , and on τ_a (the aerosol optical thickness)
- \mathfrak{R} , which is a term that merges all the reflection and refraction effects at the air-sea interface depends on θ'_v and the wind speed
- $R = E_u(0^-) / E_d(0^-)$ is the underwater irradiance reflectance, and depends on λ , θ_s and the chlorophyll concentration Chl ; model "MM2001" (Morel, A., and S. Maritorena, 2001) is used;

$$R = R_{MM2001}(\lambda, Chl) \frac{f}{0.33} \quad (3.5.2)$$

f is the f -factor which depends on λ , θ_s and Chl

- Q is defined as $Q = E_u / L_w$, and depends on λ , θ_s , Chl , θ'_v and $\Delta\phi$.

Actually, L_w in Eq 3.5.1 is depending on λ , Chl , θ_s , θ_v and $\Delta\phi$.

(3) transmittance

The water-leaving radiance is attenuated through the atmosphere and the contribution of the sea to the top of atmosphere radiance is $t(\theta_v)L_w$, with

$$t(\theta_v) = \exp(- (0.5\tau_r + \tau_{oz} + (1 - \omega_a F_a)\tau_a) / \cos(\theta_v)) \quad (3.5.3)$$

where τ_r , τ_{oz} and τ_a are the optical thickness for Rayleigh atmosphere, for ozone, and for aerosol

$$\tau_r(\lambda) = 8.52410^{-3}\lambda^{-4} + 9.6310^{-5}\lambda^{-6} + 1.110^{-7}\lambda^{-8} \quad (3.5.4)$$

(with λ expressed as μm).

$$\tau_{oz} = \frac{DU}{1000} k_{oz} \quad (3.5.5)$$

DU is the amount of ozone in Dobson units (we took DU = 350) and k_{oz} is wavelength dependent.

λ	412	443	490	510	555	670	765	865
k_{oz}	0.00103	0.00400	0.02536	0.04200	0.09338	0.04685	0.00837	0.00485

- τ_a (at 550nm) is a fixed input (0.03, 0.1, and 0.5 in the present computation); $\omega_a = 0.98$ and $F_a = 0.75$ (Gordon and Morel, 1983).

(4) remote sensing reflectance

It is defined as :

$$R_{rs} = \frac{L_\omega}{E_d(0^+)} \quad (3.5.6)$$

with Eq 3.5.1 it comes

$$R_{rs} = \frac{\Re}{Q} R \quad (3.5.7)$$

(5) normalized water-leaving radiance

Gordon-Clark definition :

$$[L_\omega]_N = \frac{L_\omega}{E_d(0^+)} F_0 \quad (3.5.8a)$$

By introducing all arguments

$$[L_w(\lambda, \theta_v, \theta_s, \Delta\phi, Chl)]_N = \frac{L_w(\lambda, \theta_v, \theta_s, \Delta\phi, Chl)}{E_d(0^+, \lambda, \theta_s)} F_0 = \frac{L_w(\lambda, \theta_v, \theta_s, \Delta\phi, Chl)}{\epsilon t(\theta_s) \cos(\theta_s)} \quad (3.5.8b)$$

$$\epsilon = d^{-2} \quad (3.5.8c)$$

$$t(\theta_s) = \exp(-(0.5\tau_r + \tau_{oz} + (1 - \omega_a F_a)\tau_a) / \cos(\theta_s)) \quad (3.5.8d)$$

where

- F_0 if the extraterrestrial radiation (Wm^{-2}),
- d is the actual sun-earth distance expressed in AU (astronomical unit),
- $t(\theta_s)$ is calculated as for $t(\theta_v)$ (see above).

(6) Exactly normalized water-leaving radiance

An exactly normalized water-leaving radiance has also been defined (Morel & Gentili, 1996) which removes the bidirectional effects still present in $[L_\omega]_N$

$$[L_w]_N^{ex} = [L_w]_N \frac{\mathbf{R}_0}{\mathbf{R}} \frac{f_0}{Q_0} \left(\frac{f}{Q} \right)^{-1} \quad (3.5.9)$$

where f_0 and Q_0 are the f -factor and Q -factor at nadir when the sun is at zenith. See also Chapter 4, by A. Morel and L. Mueller in "Ocean Optics Protocols for satellite Ocean Color Sensor validation" NASA/TM 2003-211621/Rev 4 - vol III.

(7) Bi-directional correction factor (BF)

It is defined by KORDI as being :

$$BF(\lambda, \theta_v, \theta_s, \Delta\phi, Chl) = L_w(\lambda, \theta_v, \theta_s, \Delta\phi, Chl) / [L_w]_N^{ex}(\lambda, Chl) \quad (3.5.10)$$

By using equations 3.5.4, and 3.5.5 above, it comes

$$BF(\lambda, \theta_v, \theta_s, \Delta\phi, Chl) = \epsilon t(\theta_s) \cos(\theta_s) \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{R}_0} \frac{f}{Q} \left(\frac{f_0}{Q_0} \right)^{-1} \quad (3.5.11)$$

The arguments for the above quantities are reintroduced :

$\mathbf{R}(\theta_v, WS)$ and $\mathbf{R}_0(WS)$ as $\theta_v = 0$ (WS is the wind speed)

$$\frac{f(\lambda, \theta_s, Chl)}{Q(\lambda, \theta_v, \theta_s, \Delta\phi, Chl)}$$

$$\frac{f_0(\lambda, \theta_s=0, Chl)}{Q_0(\lambda, \theta_v=0, \theta_s=0, \Delta\phi=0, Chl)}$$

↳. General conditions for the computations

- (1) Geostationary position at 127°E and sensor aiming at a 2,500 km × 2,500 km target centered on 36°N, 130°E, or viewing the half terrestrial disk (Northern Hemisphere).
- (2) Three selected days: the two solstice days, and a equinoctial day.
- (3) Adopted time is GMT+9 (corresponding to 135°E), and computations are made for each hour between 9h00 and 16h00.
- (4) Atmospheric conditions: one mean aerosol type (maritime aerosol with 80% of humidity) is considered, with 3 optical thickness values, namely $\tau_a = 0.03, 0.10, \text{ and } 0.50$, corresponding to very clear, average, and turbid atmosphere. The selected atmosphere is spatially homogeneous over the Northern Hemisphere (or the Korean target).
- (5) The ocean is also spatially homogeneous. The optical properties are those of Case-1

waters with 3 chlorophyll concentrations, namely 0.1, 1, and 10 $mg\ m^{-3}$.

(6) The wind speed is zero (with residual capillary waves); the sun glint zone is ignored.

(7) Eight wavelengths are considered, according to the prescribed specifications, i.e. 412, 443, 490, 555, 660, 680, 745, and 865 nm.

다. Computation of BF

Remember that

$$BF = [\epsilon] [t \cos(\theta_s)] \left[\frac{\mathbf{R}}{\mathbf{R}_0} \frac{f}{Q} \left(\frac{f_0}{Q_0} \right)^{-1} \right] \quad (3.5.12)$$

The above expression is the product of three terms (delimited by the brackets) :

- ϵ is time dependent and tabulated as a function of the julian day (see 부록 1의 가).
- $t \cos(\theta_s)$ is dependent of the aerosol optical thickness τ_a , of the wavelength λ , and of the sun-zenith angle θ_s . for each aerosol optical thickness, we give a table with 2 entries θ_s and λ (see 부록 1의 나).
- finally tables for the term $\frac{\mathbf{R}}{\mathbf{R}_0} \frac{f}{Q} \left(\frac{f_0}{Q_0} \right)^{-1}$ are provided. For each triplet(λ , Chl , θ_s) a table with 2 entries (θ_v and $\Delta\phi$) is available; there are 108 tables of that sort 6 λ , 3 Chl values, and 6 θ_s values (see 부록 1의 다).

라. Computations of the Chl_a -fluorescence contribution

The previous computations made at the wavelength 681nm are modified by adding a fluorescence contribution. This contribution is estimated by computing the energy absorbed by phytoplankton using the absorption spectra (in Bricaud *et al.*, 1995) and by letting the quantum yield for fluorescence equal to 0.6%.

The increase of R , the underwater irradiance reflectance, due to fluorescence, is shown hereafter :

Chl	0.1	1	10
ΔR	0.000188	0.000832	0.003610

The results are presented as the relative increase (%) of the signal at the top of atmosphere when $Chl = 10\ mg\ m^{-3}$, and for the 21st of March.

2. Results

2.1. Summary of the results

In reference to the Detailed Objectives 2.1 to 2.7 of the Scientific Annex

- (1) (Objective 2.1) The purely atmospheric signal for the three new wavelengths (660, 680, and 745 nm) have been computed, under the proviso of a "black" sea (as made during the first phase of the contract, for the other wavelengths).
- (2) (Objective 2.2) The Morel and Maritorena model (2001) has been used to generate the irradiance reflectance of the sea (for the 3 Chlorophyll concentrations). Then, the bidirectional functions (f and Q , Morel *et al.*, 2002) are used to translate the irradiance reflectances into actual water-leaving radiances, by accounting for the three angles θ_s , θ_v , and $\Delta\phi$ (cf. Theoretical background), at each pixel of the scene and at each hour of observation.
- (3) (Objectives 2.3 and 2.4) The remote sensing reflectance and normalized water-leaving radiances have been produced (Eqs. 3.5.7 and 3.5.8 in the Theoretical background). Tables are prepared for the transformation of water-leaving radiances into normalized water-leaving radiances.
- (4) (Objective 2.5) The coupling of the atmospheric signal and the marine signal has been achieved and the "top of atmosphere" signal, L_{TOA} , has been computed for all situations, namely all wavelengths, the 3 Chl and the 3 τ_a values, all pixels, for 8 observations per day, and for the three selected dates (21 XII, 21 III, and 21 VI).
- (5) (Objective 2.6) The dynamical range of the L_{TOA} signal has been studied for the Korean target (Table 3.5.1), and for the entire Northern Hemisphere (Table 3.5.2). The wavelength dependency of L_{TOA} signal has been studied, and a Table 3.5.3 is provided which shows, for the center of the Korean target and at noon, the ratio $L_{TOA}(\lambda) / L_{TOA}(865)$.
- (6) (Objective 2.6, cont.d) The relative increase of $L_{TOA}(\lambda)$, which results from the presence of a real case 1 ocean is put in evidence by forming the ratio of the marine radiance $L_{Mar, TOA}(\lambda)$ (transmitted at the top of the atmosphere) to the total radiance $L_{TOA}(\lambda)$. Color plates show the distribution of this ratio (expressed as %) over the Northern Hemisphere, including the Korean target.
- (7) (Objective 2.7) The relative increase of $L_{TOA}(\lambda)$, due to fluorescence, is put in evidence by forming the ratio of the fluorescence signal (transmitted at the top of the

atmosphere) to the total radiance $L_{TOA}(\lambda)$. Color plates show the distribution of this ratio (expressed as %) over the Northern Hemisphere, including the Korean target.

4. Attached documents and brief comments

The present document aims at showing and commenting significant examples of the various computation made, and thus at providing an overview of the main results. The whole set of data, figures, tables, or additional information, such as lookup tables, are available by anonymous ftp at oceane.obs-vlfr.fr in the `pub/gentili/GEOSTAT` directory. The numbering used in section 3 is used in what follows.

Result 1. The results are available under the form of lookup tables (via http).

Result 2. The Figures 3.5.2a to 3.5.2f show selected examples of the distribution of $L_w(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi)$, expressed as $Wm^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$, for two wavelengths (443 and 555nm), from 9h00 to 16h00 on the 21st of March. As expected, when *Chl* increases, $L_w(443)$ decreases and conversely $L_w(555)$ increases. The maximal radiance regularly moves during the day from East to West and follows the sun's position in the Equatorial plane (equinox). This is a direct consequence of Eq. 3.5.1 where L_w is proportional to $E_d(0+)$.

Result 3. No Figure, as the transformation of L_w into $[L_w]_N$ provide constant values.

Result 4. Selected examples of $L_{TOA}(\lambda)$, expressed as $Wm^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$, on the 21st of March, for

- $\lambda = 443nm$, $\tau_a = 0.1$ and 0.50 , $Chl = 0.1mgm^{-3}$ (Figures. 3.5.3a and 3.5.3b),
- $\lambda = 555nm$, $\tau_a = 0.1$ and 0.50 , $Chl = 0.1mgm^{-3}$ (Figures. 3.5.4a and 3.5.4b)

As comments: these figures show the preponderant role of atmosphere in modifying the L_{TOA} signal, regardless the chlorophyll concentration. Even when the marine signal is maximal ($\lambda = 555nm$, and $Chl = 10 mg m^{-3}$), L_{TOA} changes remain largely dominated by τ_a changes.

Result 5. First Table 3.5.1 summarizes the dynamical range of $L_{TOA}(\lambda)$, as $Wm^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$ for the Korean target and when all the hours of observation (from 9 to 16h) are merged. Are given values for

- the 8 wavelengths
- the 3 days
- the 3 optical thicknesses

- the 3 Chl values

For a given day, the L_{TOA} at 865 and 745 nm are obviously independent from Chl (Case-1 waters); they are strongly dependent on the τ_a values, and rather steady with respect to the dates. For the visible wavelengths, the situation is more complex (simultaneous influences of τ_a and Chl).

Second Table 3.5.2, as for the first one but for the entire Northern Hemisphere. Note that the maximal L_{TOA} values are notably increased, compared to those in the first table.

Table 3.5.3 provides the ratios $L_{TOA}(\lambda)/L_{TOA}(865)$ at noon and at the center of the Korean target. Are given values for

- the 8 wavelengths
- the 3 days
- the 3 optical thicknesses
- the 3 Chl values

Figure 3.5.5 show the absolute values of $L_{TOA}(\lambda)$, for the same target, for each hour of observation, for the 21st of March and for

- the 3 optical thicknesses
- the 3 Chl values

Note that the change of Chl has a reduced impact on $L_{TOA}(\lambda)$, which remains dominated by the atmospheric signal.

Result 6. Color plates (Figures 3.5.6a to 3.5.6h) for the 21st of March, showing the spatial distribution on the northern hemisphere of the contribution of the marine signal to the total signal recorded at the top of the atmosphere, i.e. the ratio $L_{Mar, TOA}(\lambda)/L_{TOA}(\lambda)$, expressed as %.

Two wavelengths are selected (443 and 555 nm) for $Chl = 0.1$ and 10 mg m^{-3} , and for $\tau_a = 0.03$ 0.1 and 0.5.

Result 7. Color plates (Figures 3.5.7a to 3.5.7c) for the 21st of March, showing the relative increase (%) of the $L_{TOA}(\lambda)$ signal due to fluorescence at 681 nm, when $Chl = 10 \text{ mg m}^{-3}$, and for $\tau_a = 0.03$ 0.1 and 0.5.

Comments:

The maximal percentage follows the sun's position during the day, as consequence of the results in Figures 3.5.2a to 3.5.2f, already discussed. This maximal value may exceed 15% (see below) on the Equator (when considering the northern hemisphere), and reach 14% in the

southernmost part of the Korean target. The minimal values are of the order of 1 to 2%, for the conditions which are considered.

For given wavelength, and given *Chl* value, the percentage is, roughly speaking, divided by 2 when τ_a varies from 0.1 to 0.50.

The maximal % values are obviously observed when the aerosol load is minimal ($\tau_a = 0.1$), and when the marine signal is maximal, namely at 443 nm when *Chl* is 0.1 mg m^{-3} and at 555 nm when *Chl* is 10 mg m^{-3} .

The increase of the signal due to fluorescence at 681 nm is very small, with a maximum value of 0.15 % for a clear atmosphere ($\tau_a = 0.03$) and 0.08 % for a turbid atmosphere ($\tau_a = 0.5$).

다. Figures and tables

Color plates:

- the white color is for upperlimit values,
- the gray color indicates that the sun-zenith angle is greater than 75° .

(1) Water living radiance

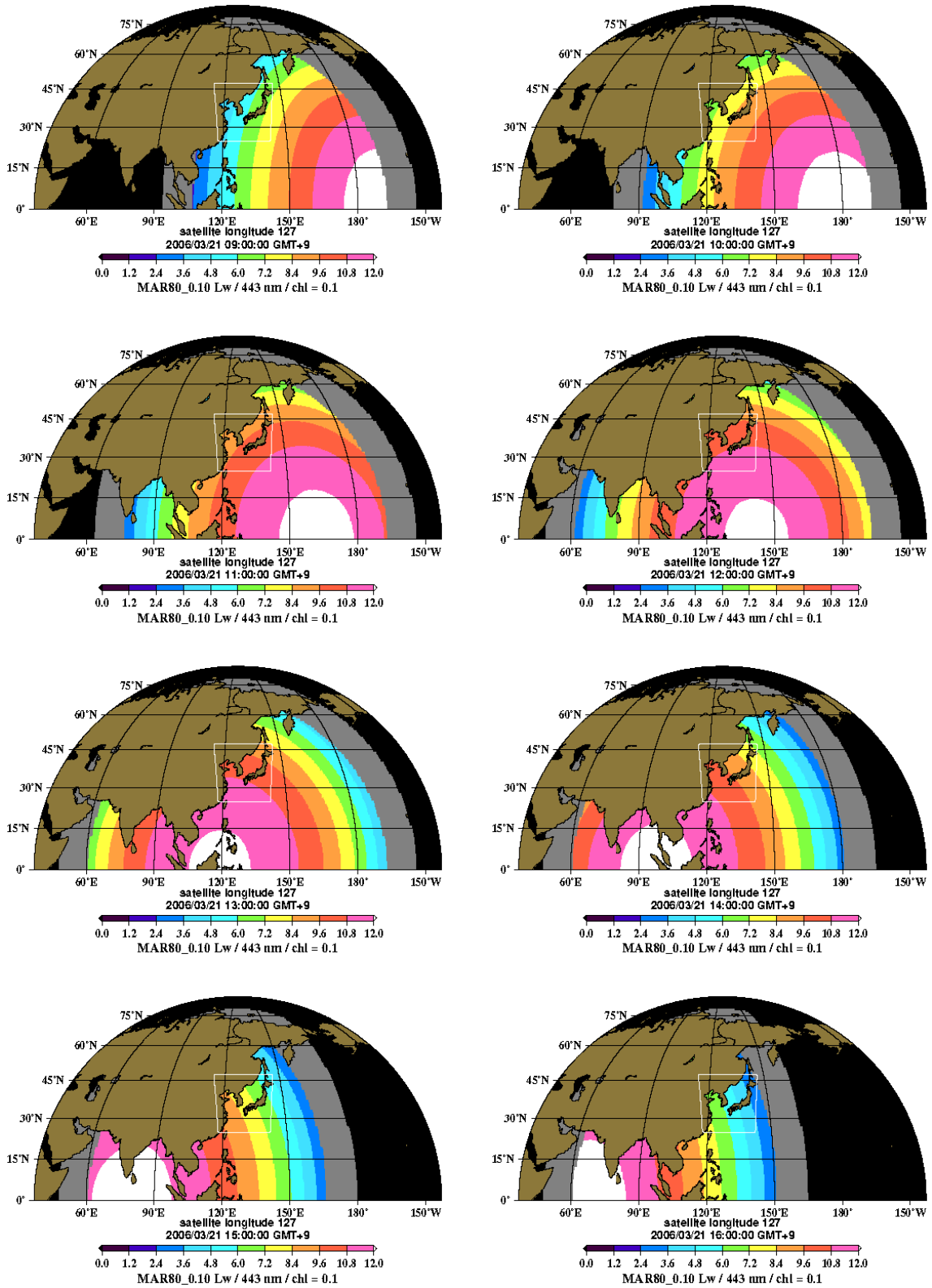


Figure 3.5.2a L_w 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a=0.10$) $Chl = 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ $\lambda = 443\text{nm}$

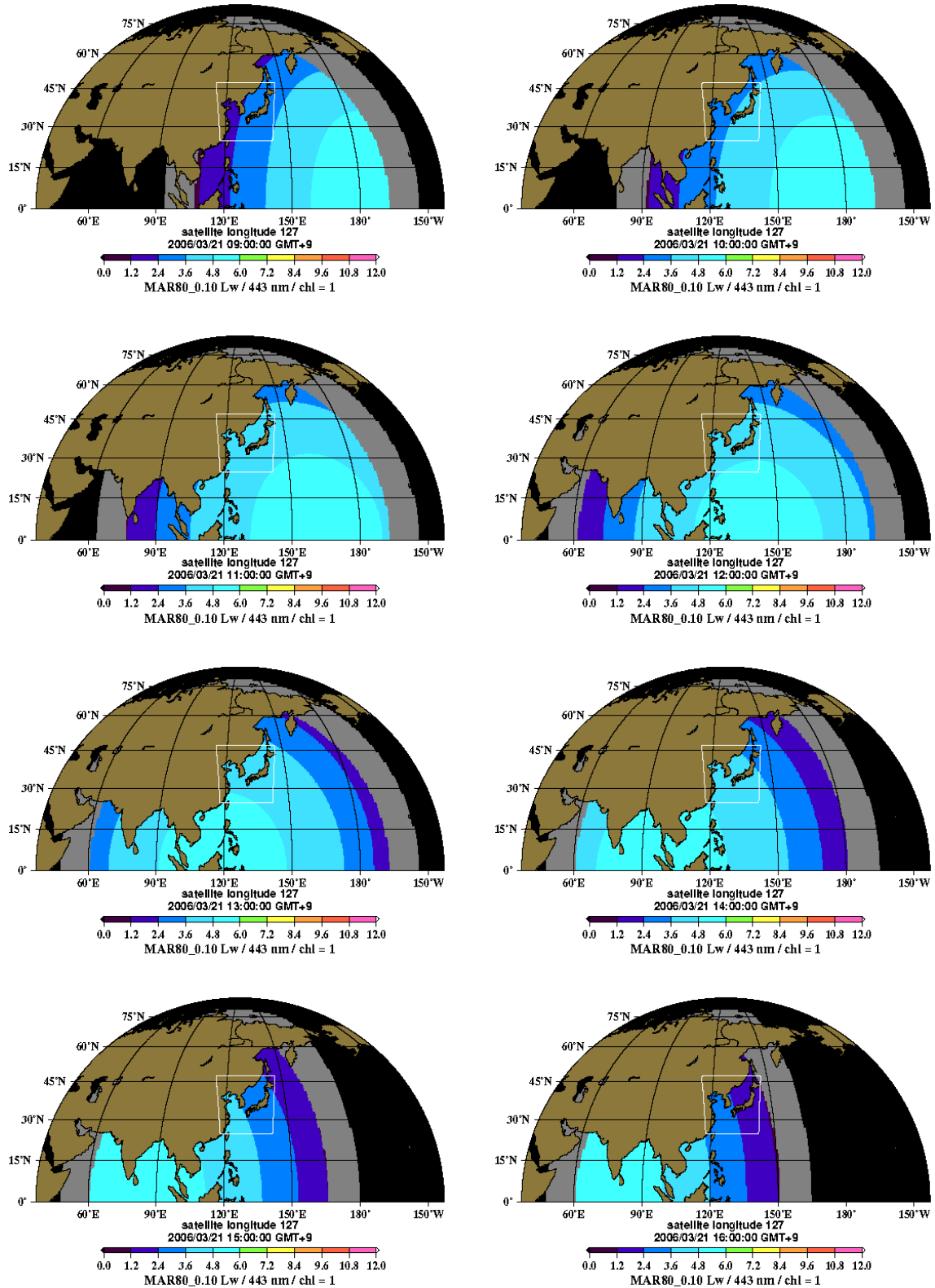


Figure 3.5.2b L_w 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 1 \text{ mg m}^{-3}$ $\lambda = 443\text{nm}$

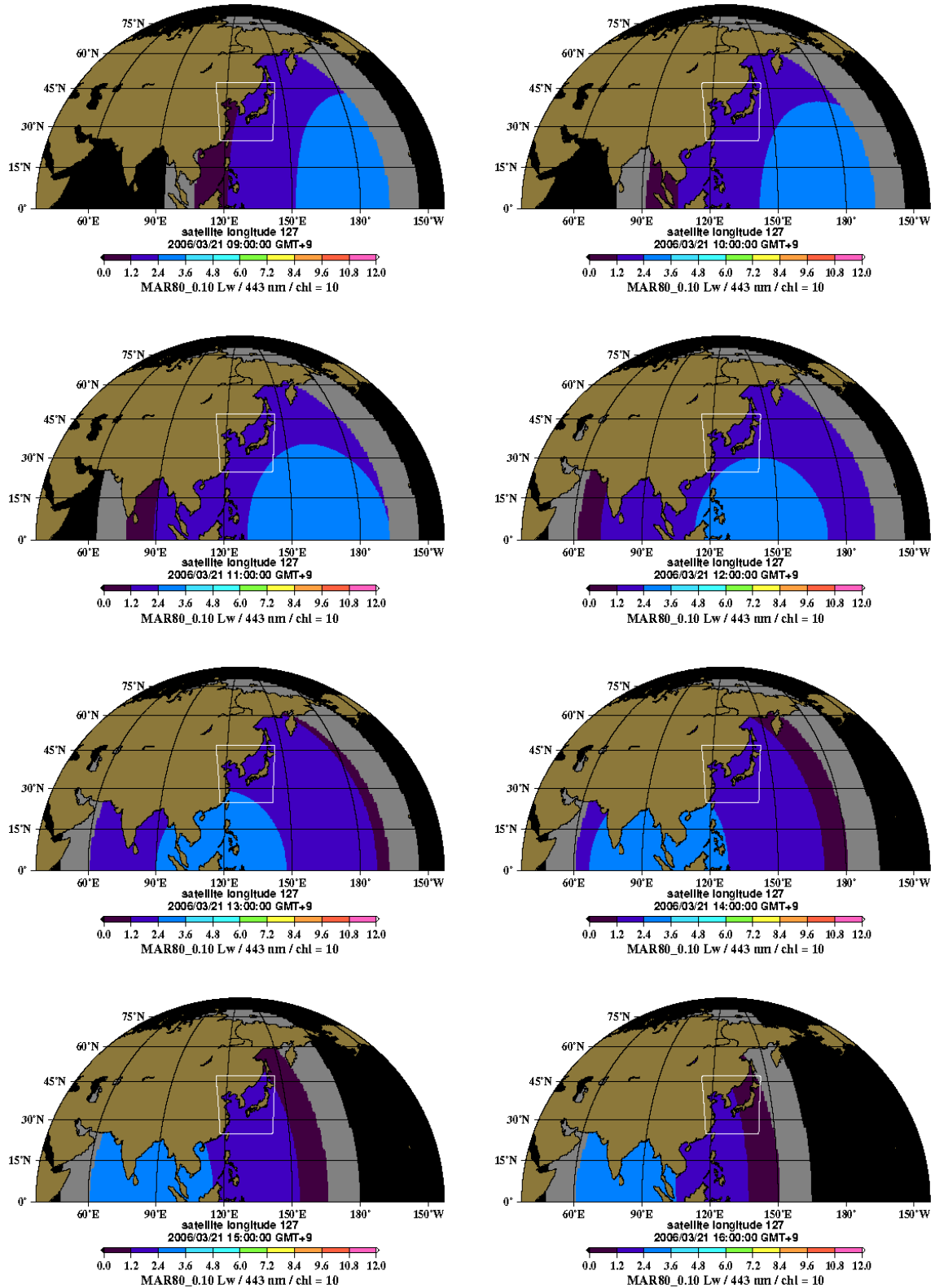


Figure 3.5.2c L_w 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) Chl = 10 $mg\ m^{-3}$ $\lambda = 443nm$

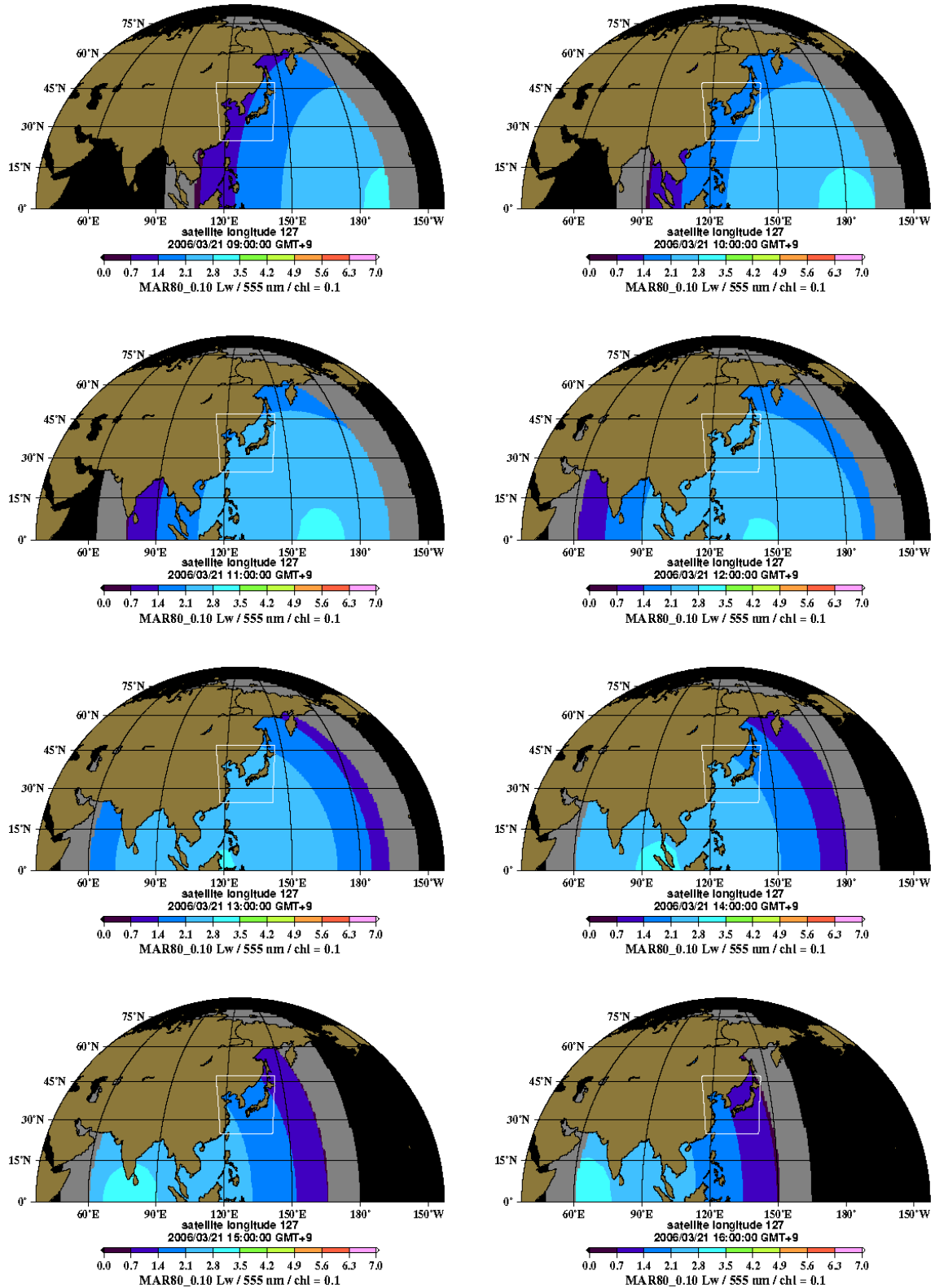


Figure 3.5.2d L_w 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ $\lambda = 555\text{nm}$

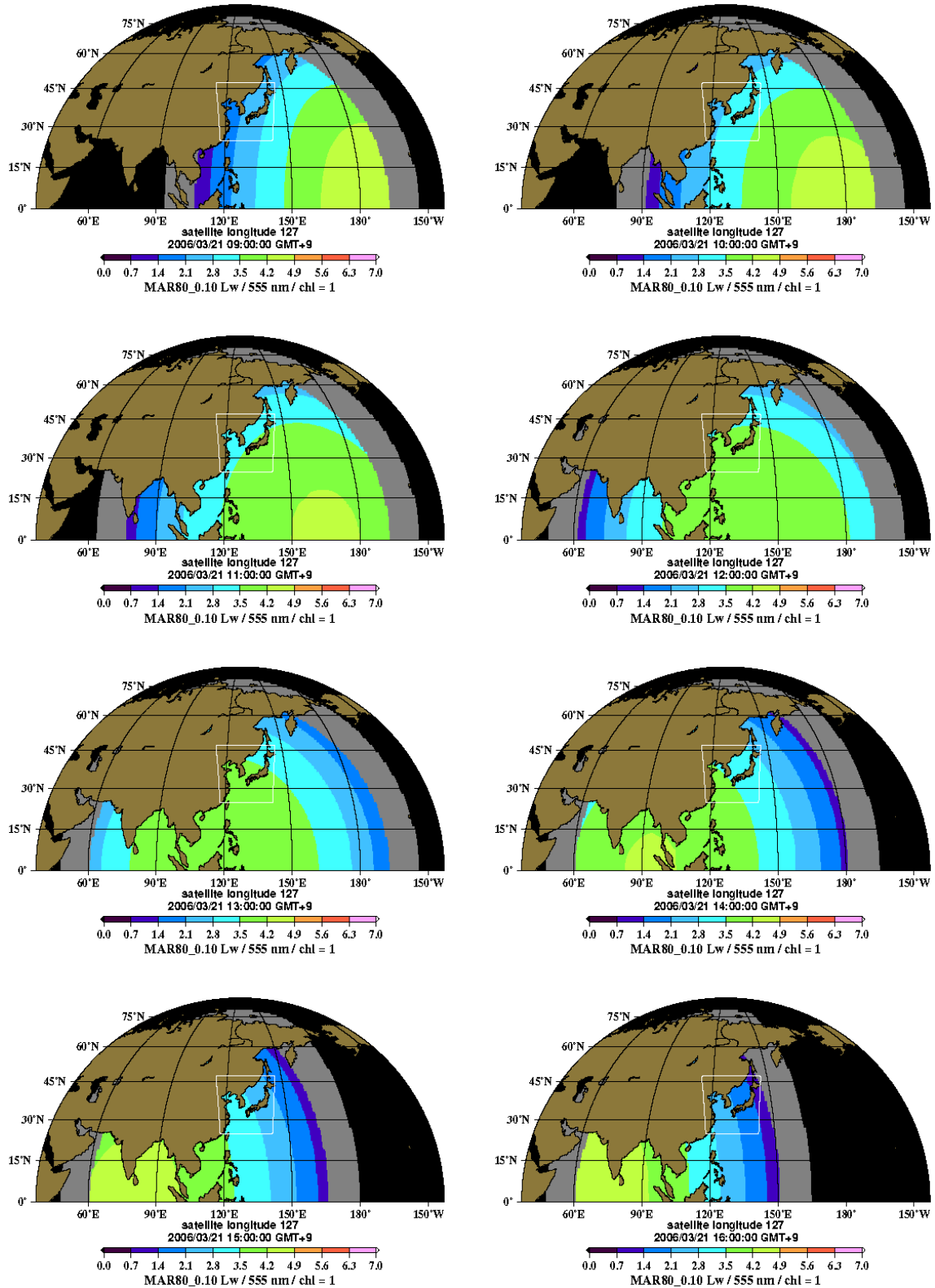


Figure 3.5.2e L_w 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 1 \text{ mg m}^{-3}$ $\lambda = 555\text{nm}$

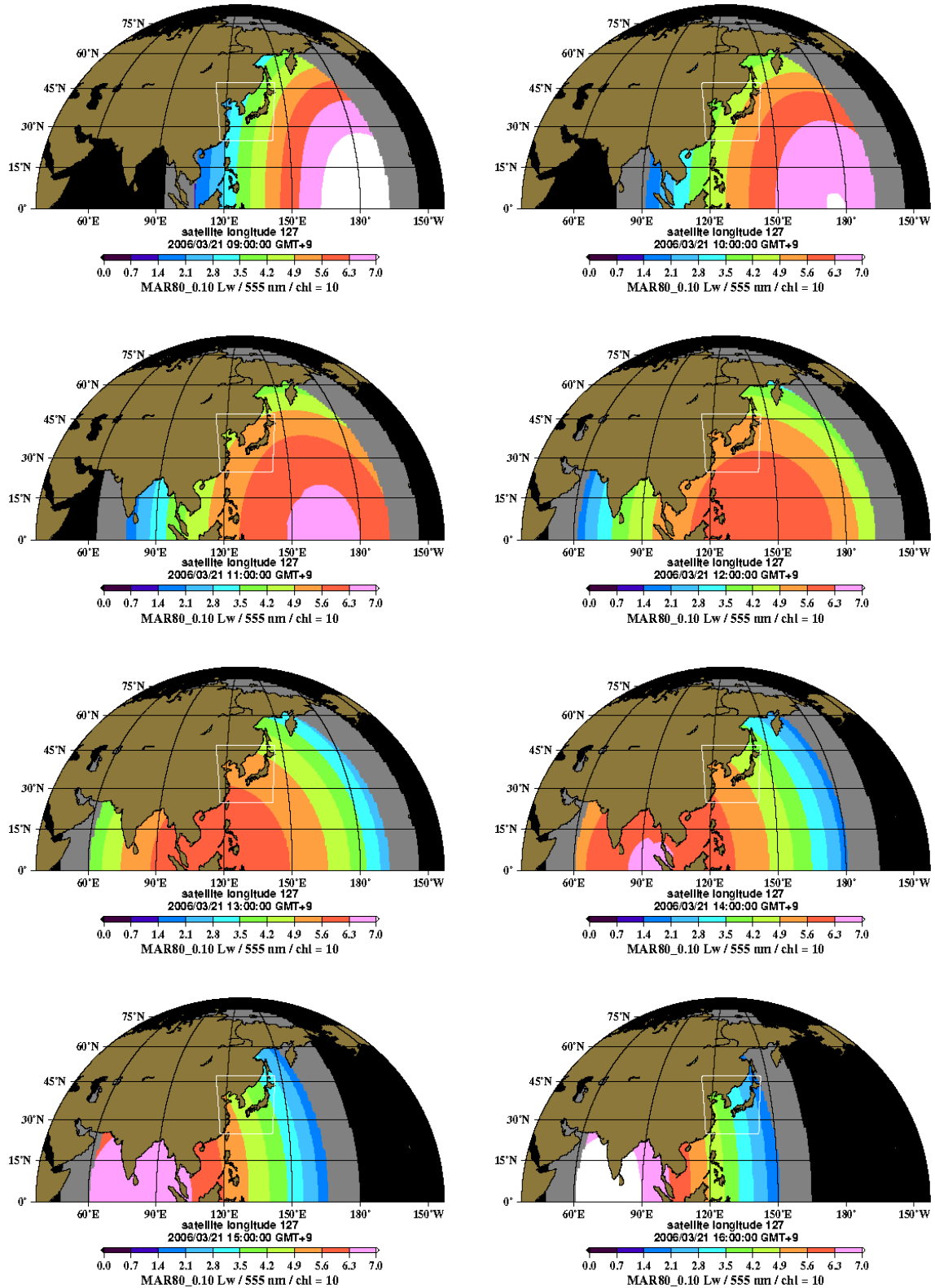


Figure 3.5.2f L_w 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) Chl = 10 $mg\ m^{-3}$ $\lambda = 555nm$

(2) Radiance at top of atmosphere

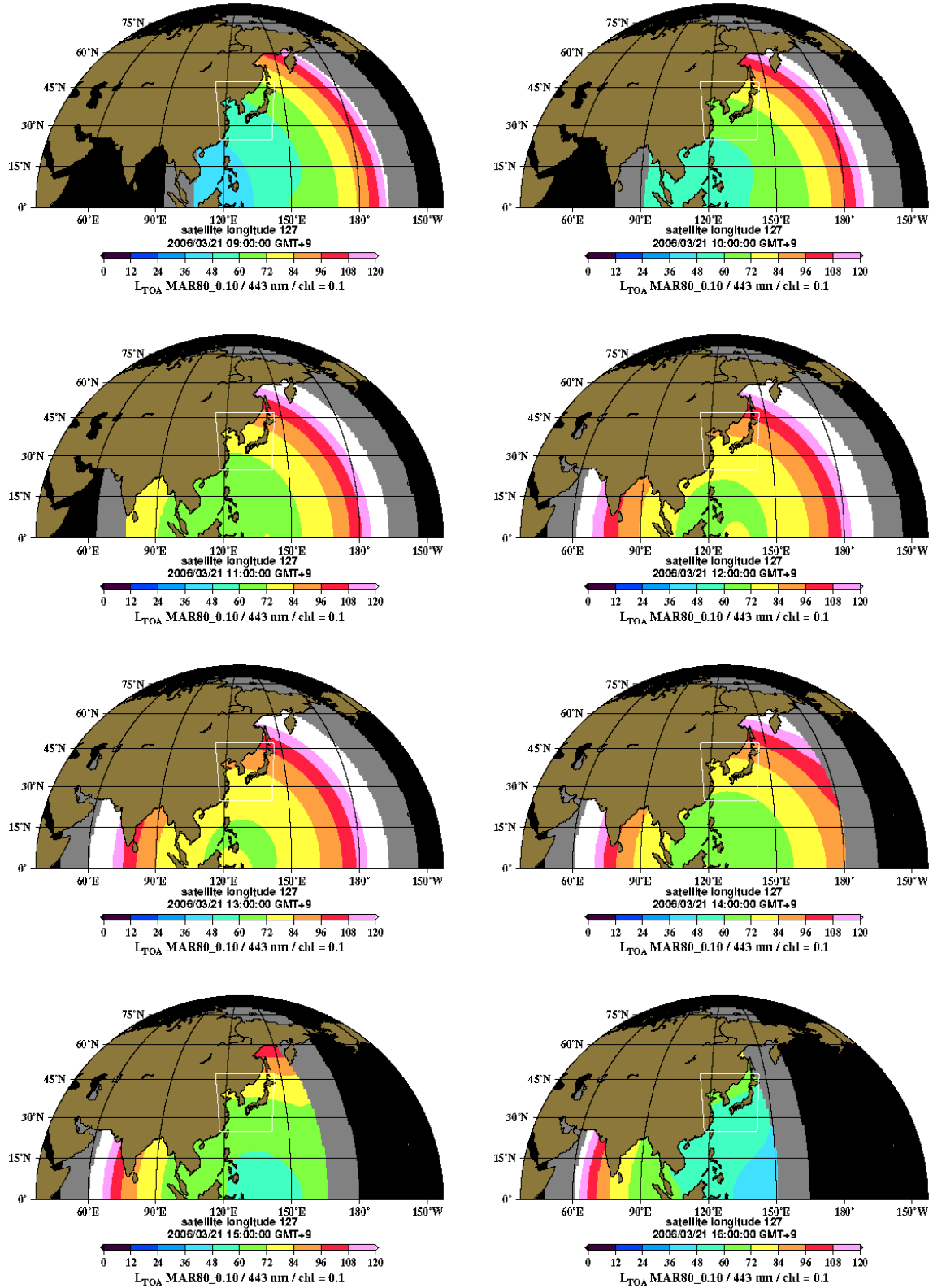


Figure 3.5.3a L_{TOA} 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ $\lambda = 443\text{nm}$

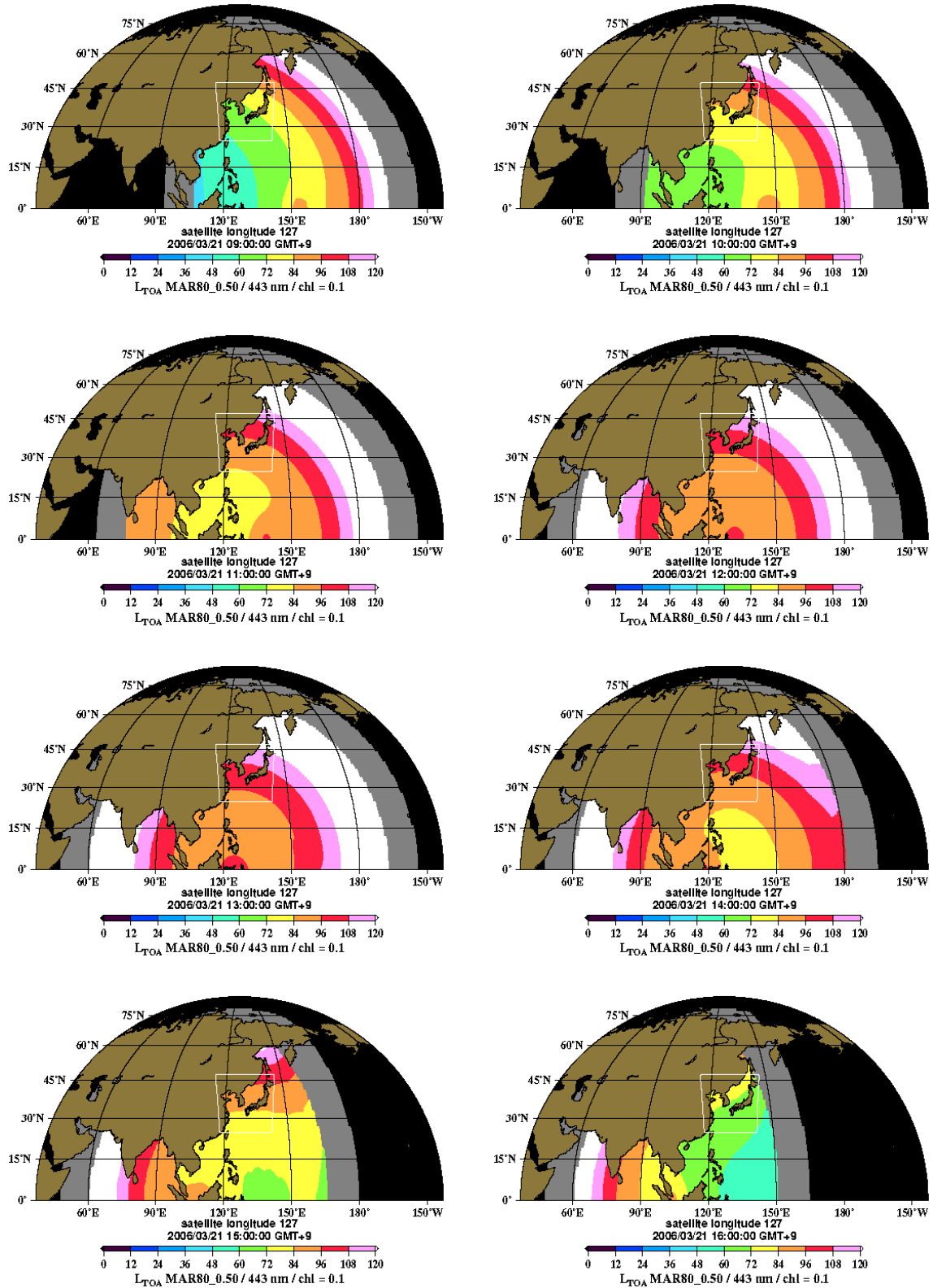


Figure 3.5.3b L_{TOA} 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.50$) $Chl = 0.1\ mg\ m^{-3}$ $\lambda = 443nm$

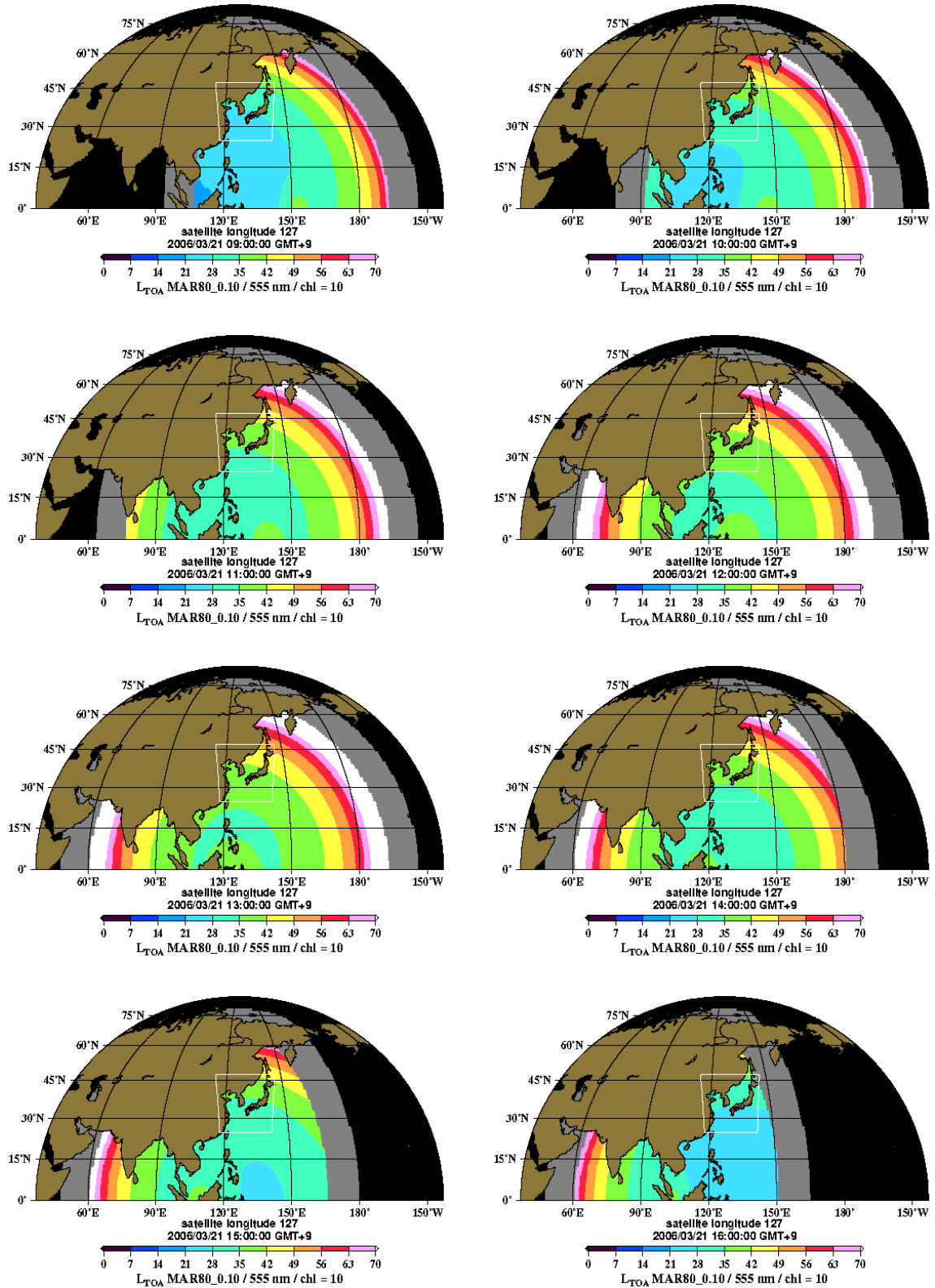


Figure 3.5.4a L_{TOA} 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 10 \text{ mg m}^{-3}$ $\lambda = 555\text{nm}$

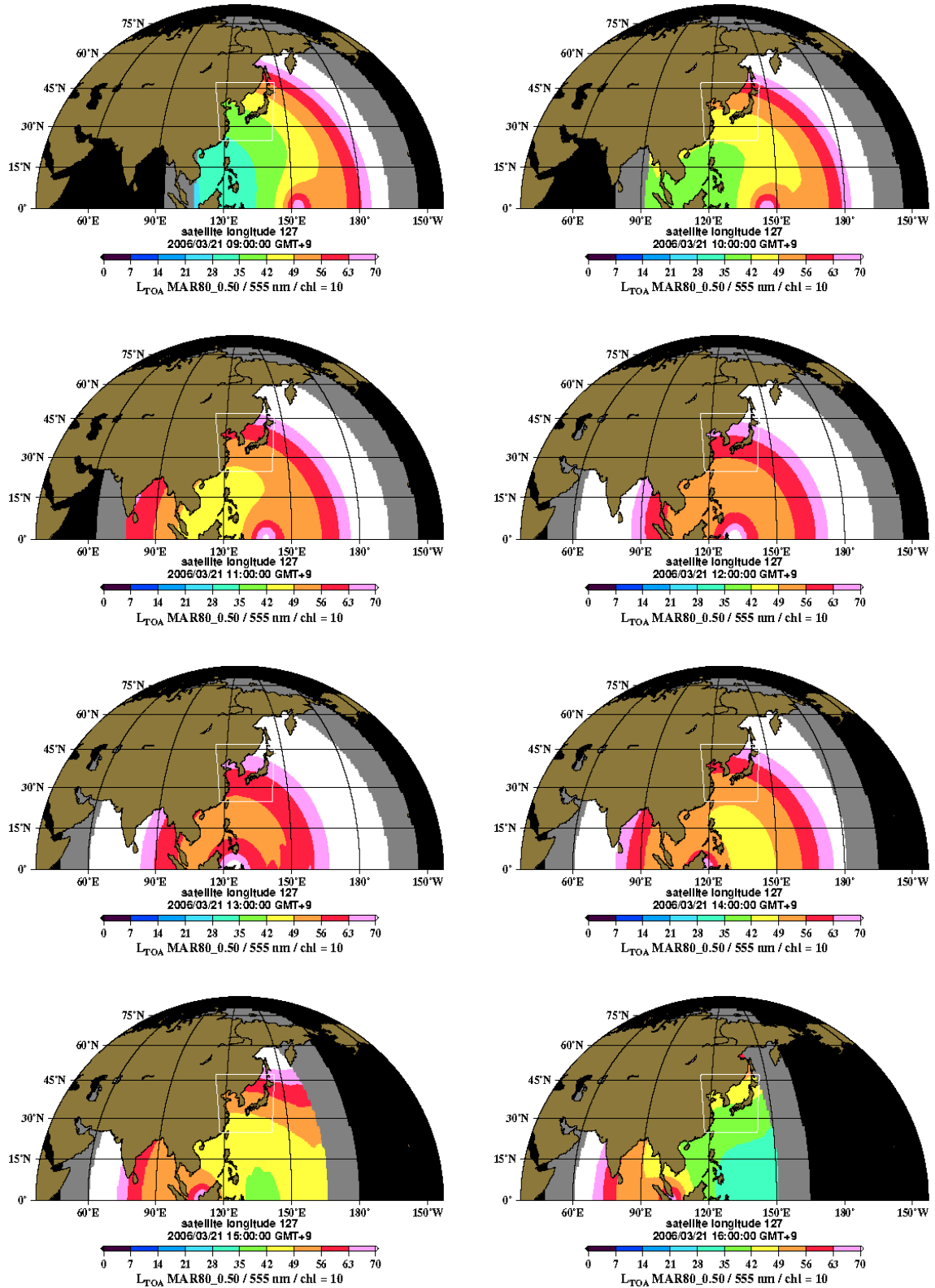


Figure 3.5.4b L_{TOA} 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.50$) $Chl = 10\ mg\ m^{-3}$ $\lambda = 555nm$

(3) Dynamical range of L_{TOA}

Table 3.5.1 Korean target: range of L_{TOA}

12/21	All times	0.1 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	45.7-93.3	40.4-83.5	31.4-66	19.8-42.5	8.8-20.1	7.6-17.8	4.8-11.4	2.2-5.5
MAR80_0.10	46.6-96	41.6-87	32.8-70.4	21.3-47.4	10.3-24.3	9.1-22	6-15	3.1-8.2
MAR80_0.50	51-107.4	47-101.7	39.4-88.5	28.6-67.9	17-43.2	15.9-40.7	11.9-31.2	7.6-20.7
12/21	All times	1 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	44.3-91.4	39.2-81.9	30.9-65.2	20.1-43	8.9-20.2	7.7-17.9	4.8-11.4	2.2-5.5
MAR80_0.10	45.3-94.2	40.4-85.5	32.3-69.7	21.6-47.8	10.3-24.4	9.2-22	6-15	3.1-8.2
MAR80_0.50	50-106.1	46.1-100.4	39-87.9	28.9-68.2	17.1-43.2	15.9-40.7	11.9-31.2	7.6-20.7
12/21	All times	10 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	43.9-90.8	38.8-81.3	30.5-64.6	20.6-43.6	9.2-20.4	8-18	4.8-11.4	2.2-5.5
MAR80_0.10	44.8-93.6	40-84.9	31.9-69.1	22-48.4	10.5-24.6	9.4-22.2	6-15	3.1-8.2
MAR80_0.50	49.6-105.6	45.7-100	38.7-87.5	29.2-68.7	17.2-43.4	16-40.9	11.9-31.2	7.6-20.7
03/21	All times	0.1 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	54.4-114.3	46.3-98.3	34.4-73.9	20.2-44.4	8.4-19.6	7.3-17.2	4.5-10.9	2.1-5.2
MAR80_0.10	55.9-118.6	48.1-103.4	36.3-79.8	22.1-50.4	9.9-24.6	8.8-22	5.7-14.9	2.9-8.1
MAR80_0.50	63.9-138.6	57.4-127.7	46.8-108.2	32.9-80	19.2-50	17.9-47.1	13.4-36.1	8.5-23.6
03/21	All times	1 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	52-110	44.2-94.5	33.5-72	20.8-45.3	8.6-19.9	7.5-17.4	4.5-10.9	2.1-5.2
MAR80_0.10	53.6-114.5	46-99.8	35.4-78	22.7-51.3	10.1-24.8	8.9-22.2	5.7-14.9	2.9-8.1
MAR80_0.50	62-135.5	55.8-124.9	46.1-106.8	33.3-80.6	19.3-50.1	18-47.3	13.4-36.1	8.5-23.6
03/21	All times	10 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	51.2-108.6	43.4-93	32.7-70.7	21.7-46.6	9.1-20.4	7.9-17.8	4.5-10.9	2.1-5.2
MAR80_0.10	52.8-113.2	45.3-98.4	34.7-76.7	23.5-52.5	10.5-25.3	9.3-22.7	5.7-14.9	2.9-8.1
MAR80_0.50	61.4-134.5	55.2-123.9	45.5-105.9	34-81.6	19.6-50.5	18.2-47.6	13.4-36.1	8.5-23.6
06/21	All times	0.1 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	56.3-106.4	47-89.9	34.2-66.3	19.3-38.4	8-16.3	6.9-14.2	4.3-8.9	2-4.2
MAR80_0.10	58-109.8	48.9-93.9	36.2-70.8	21.2-42.8	9.5-20	8.4-17.7	5.5-11.8	2.8-6.2
MAR80_0.50	67.9-127.6	60.1-114.7	48.3-94.1	33.3-66.6	19.4-39.9	18-37.2	13.5-28.2	8.6-18.1
06/21	All times	1 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	52.9-100.6	44.1-84.9	33-63.9	20.2-39.5	8.2-16.6	7.1-14.5	4.3-8.9	2-4.2
MAR80_0.10	54.7-104.3	46.1-89.1	35-68.5	22.1-43.9	9.7-20.2	8.5-18	5.5-11.8	2.8-6.2
MAR80_0.50	65.2-123.3	57.8-110.9	47.3-92.3	34-67.5	19.5-40.1	18.1-37.4	13.5-28.2	8.6-18.1
06/21	All times	10 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	51.8-98.8	43-83.1	31.9-62.2	21.5-41.2	8.7-17.3	7.5-15.1	4.3-8.9	2-4.2
MAR80_0.10	53.6-102.5	45-87.4	34-66.8	23.4-45.5	10.2-20.9	9-18.5	5.5-11.8	2.8-6.2
MAR80_0.50	64.4-122	56.9-109.5	46.5-91	35-68.8	19.9-40.6	18.5-37.8	13.5-28.2	8.6-18.1

Table 3.5.2 Northern Hemisphere: range of L_{TOA}

12/21	All times	0.1 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	42.8-161.8	37.9-149.3	29.5-123.3	18.1-84.8	7.6-42.7	6.6-38.3	4.1-24.8	1.9-12.3
MAR80_0.10	43.6-165.4	38.9-154.4	30.7-129.9	19.8-92.8	9-50.4	7.9-46.2	5.2-31.8	2.7-17.9
MAR80_0.50	47.5-180.6	43.7-173.5	36.5-154.8	26.4-121.4	15.7-78.3	14.6-74.2	10.9-56.9	6.9-38
12/21	All times	1 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	41.4-159.4	36.7-147	28.9-122.5	18.7-85.1	7.8-42.8	6.7-38.4	4.1-24.8	1.9-12.3
MAR80_0.10	42.3-163.3	37.7-152.3	30.1-129.1	20.1-93.3	9.1-50.5	8.1-46.3	5.2-31.8	2.7-17.9
MAR80_0.50	46.4-178.6	42.8-172.2	36.1-154.2	26.6-121.8	15.7-78.4	14.6-74.3	10.9-56.9	6.9-38
12/21	All times	10 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	41-158.7	36.2-146.1	28.5-121.9	19.2-85.8	8.2-43.1	7.1-38.6	4.1-24.8	1.9-12.3
MAR80_0.10	41.9-162.6	37.3-151.5	29.7-128.5	20.6-94	9.5-50.7	8.4-46.5	5.2-31.8	2.7-17.9
MAR80_0.50	46.1-178.1	42.4-171.8	35.8-153.7	27-122.2	15.8-78.6	14.7-74.4	10.9-56.9	6.9-38
03/21	All times	0.1 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	42.5-172.6	37.6-158.8	29.3-130.6	17.9-90.5	7.5-45.8	6.5-41.1	4-26.8	1.9-13.4
MAR80_0.10	43.3-176.3	38.6-164	30.5-138.1	19.5-100	8.8-55.7	7.8-51.3	5.1-35.8	2.6-20.4
MAR80_0.50	47.1-191.2	43.3-184.2	36.3-164.7	26.3-130.8	15.6-85.6	14.5-81.8	10.8-63.3	6.9-42.7
03/21	All times	1 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	41.2-169.9	36.5-156.2	28.7-129.4	18.6-90.9	7.7-45.9	6.6-41.2	4-26.8	1.9-13.4
MAR80_0.10	42-173.8	37.5-161.7	30-137.1	20-100.3	9-55.8	7.9-51.4	5.1-35.8	2.6-20.4
MAR80_0.50	46.1-189.7	42.5-182.7	35.9-164.1	26.5-131.1	15.6-85.6	14.5-81.8	10.8-63.3	6.9-42.7
03/21	All times	10 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	40.7-169	36-155.4	28.3-128.6	19.1-91.4	8.1-46.2	7-41.4	4-26.8	1.9-13.4
MAR80_0.10	41.6-173	37.1-161	29.6-136.3	20.5-100.8	9.3-56	8.3-51.6	5.1-35.8	2.6-20.4
MAR80_0.50	45.8-189.2	42.1-182.2	35.6-163.6	26.8-131.6	15.8-85.8	14.7-81.9	10.8-63.3	6.9-42.7
06/21	All times	0.1 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	40.1-160.9	35.5-145.6	27.6-117.2	16.8-79.6	7.1-39.4	6.1-35.2	3.8-22.8	1.8-11.3
MAR80_0.10	40.8-164.4	36.4-150.5	28.7-123.7	18.4-87.2	8.3-46.8	7.4-42.8	4.8-29.3	2.5-16.4
MAR80_0.50	44.6-179.3	41-170.2	34.3-149.6	24.8-115.9	14.7-74.4	13.7-70.3	10.2-53.8	6.5-35.8
06/21	All times	1 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	38.8-157.2	34.4-142.8	27.1-115.9	17.4-80	7.2-39.5	6.3-35.3	3.8-22.8	1.8-11.3
MAR80_0.10	39.6-160.9	35.3-147.9	28.2-122.5	18.9-87.6	8.5-46.9	7.5-42.8	4.8-29.3	2.5-16.4
MAR80_0.50	43.6-177.2	40.1-168.6	33.9-148.8	25-116.3	14.8-74.4	13.7-70.4	10.2-53.8	6.5-35.8
06/21	All times	10 mg m^{-3}						
	412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03	38.4-156	34-141.7	26.7-115.1	18-80.6	7.6-39.7	6.6-35.5	3.8-22.8	1.8-11.3
MAR80_0.10	39.2-159.8	34.9-146.9	27.9-121.8	19.3-88.1	8.8-47.1	7.8-43	4.8-29.3	2.5-16.4
MAR80_0.50	43.3-176.5	39.8-168	33.6-148.2	25.3-116.8	14.9-74.6	13.9-70.6	10.2-53.8	6.5-35.8

(4) Wavelength dependence

Table 3.5.3 $L_{TOA}(\lambda)/L_{TOA}(865)$ at noon

12/21	12h00	0.1 mg m^{-3}							
		412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03		23.57	20.12	14.99	8.9	3.87	3.37	2.12	1
MAR80_0.10		16.21	14.01	10.67	6.62	3.15	2.8	1.87	1
MAR80_0.50		6.5	5.91	4.91	3.55	2.16	2.02	1.54	1
12/21	12h00	1 mg m^{-3}							
		412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03		22.58	19.25	14.57	9.1	3.92	3.41	2.12	1
MAR80_0.10		15.58	13.45	10.4	6.75	3.18	2.83	1.87	1
MAR80_0.50		6.33	5.76	4.83	3.58	2.17	2.02	1.54	1
12/21	12h00	10 mg m^{-3}							
		412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03		22.26	18.93	14.26	9.39	4.04	3.52	2.12	1
MAR80_0.10		15.38	13.24	10.2	6.93	3.26	2.89	1.87	1
MAR80_0.50		6.27	5.7	4.78	3.63	2.19	2.04	1.54	1
03/21	12h00	0.1 mg m^{-3}							
		412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03		25.81	21.64	15.84	9.04	3.84	3.34	2.1	1
MAR80_0.10		17.27	14.65	10.96	6.57	3.08	2.74	1.85	1
MAR80_0.50		6.82	6.09	4.98	3.52	2.14	2	1.54	1
03/21	12h00	1 mg m^{-3}							
		412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03		24.16	20.22	15.15	9.35	3.91	3.4	2.1	1
MAR80_0.10		16.23	13.76	10.53	6.76	3.12	2.78	1.85	1
MAR80_0.50		6.54	5.85	4.86	3.57	2.15	2.02	1.54	1
03/21	12h00	10 mg m^{-3}							
		412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03		23.63	19.69	14.66	9.78	4.09	3.56	2.1	1
MAR80_0.10		15.91	13.43	10.23	7.03	3.24	2.88	1.85	1
MAR80_0.50		6.44	5.76	4.78	3.65	2.18	2.04	1.54	1
06/21	12h00	0.1 mg m^{-3}							
		412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03		27.92	23.26	16.9	9.41	3.9	3.39	2.12	1
MAR80_0.10		19.03	16.02	11.87	6.93	3.17	2.8	1.88	1
MAR80_0.50		7.55	6.67	5.37	3.7	2.2	2.04	1.55	1
06/21	12h00	1 mg m^{-3}							
		412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03		25.73	21.39	16.02	9.82	4	3.47	2.12	1
MAR80_0.10		17.63	14.83	11.31	7.19	3.23	2.86	1.88	1
MAR80_0.50		7.15	6.34	5.21	3.78	2.21	2.05	1.55	1
06/21	12h00	10 mg m^{-3}							
		412	443	490	555	660	681	745	865
MAR80_0.03		25.04	20.7	15.38	10.43	4.24	3.68	2.12	1
MAR80_0.10		17.19	14.39	10.9	7.58	3.38	2.99	1.88	1
MAR80_0.50		7.03	6.21	5.1	3.89	2.26	2.09	1.55	1

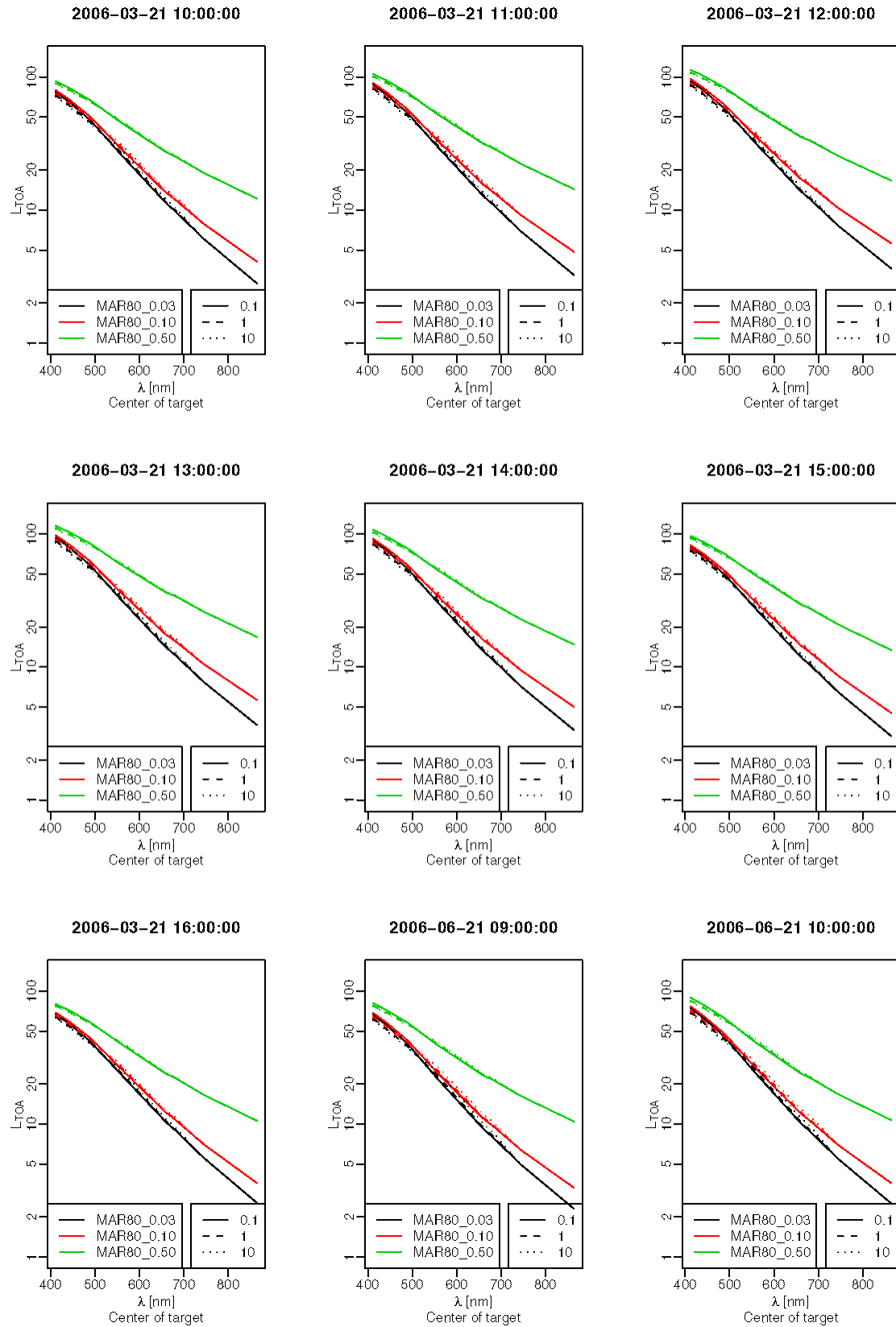


Figure 3.5.5 wavelength dependency of L_{TOA} (equinox)

(5) % of marine signal

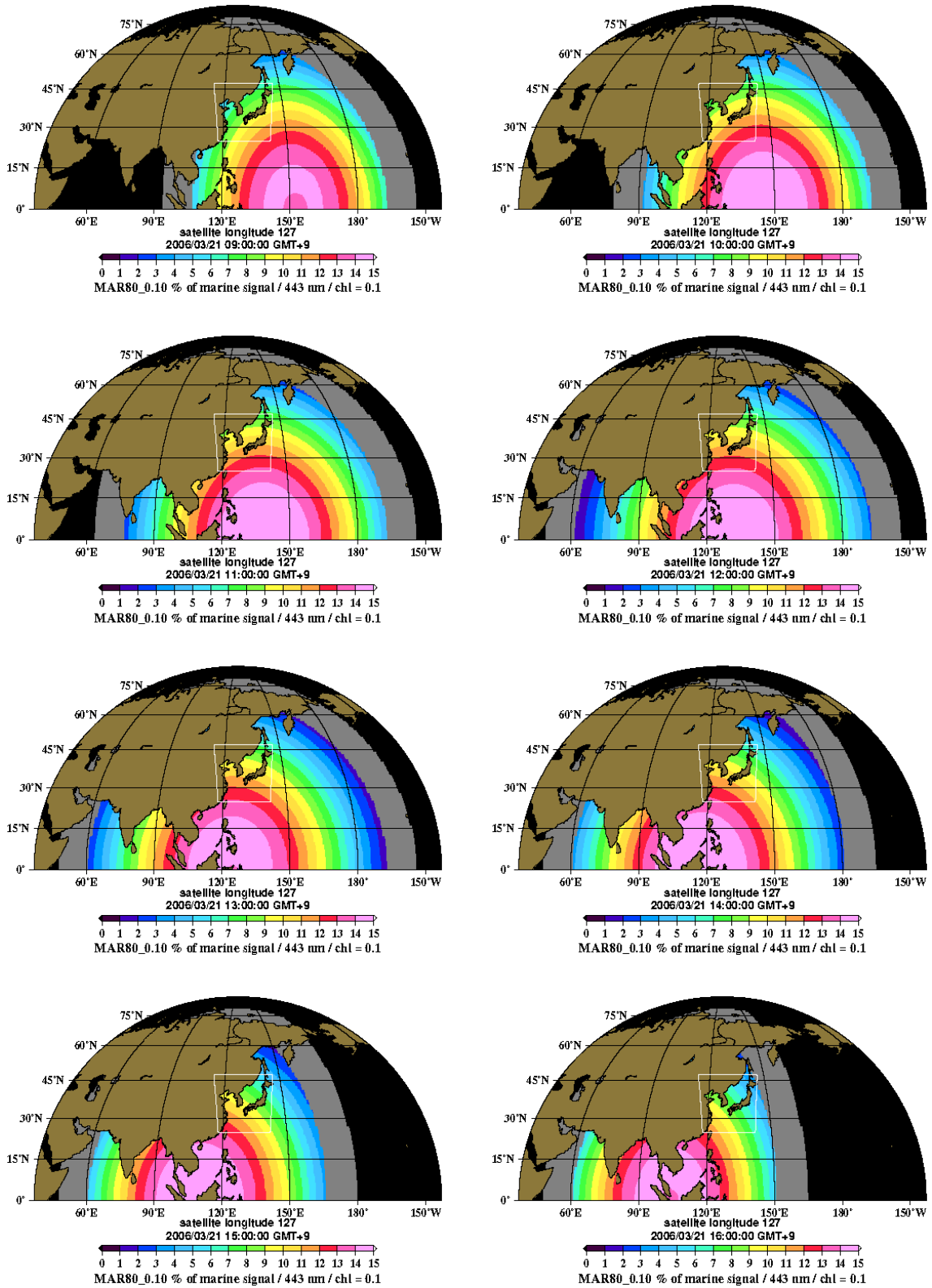


Figure 3.5.6a % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 0.1 \text{ mg m}^{-3}$
 $\lambda = 443\text{nm}$

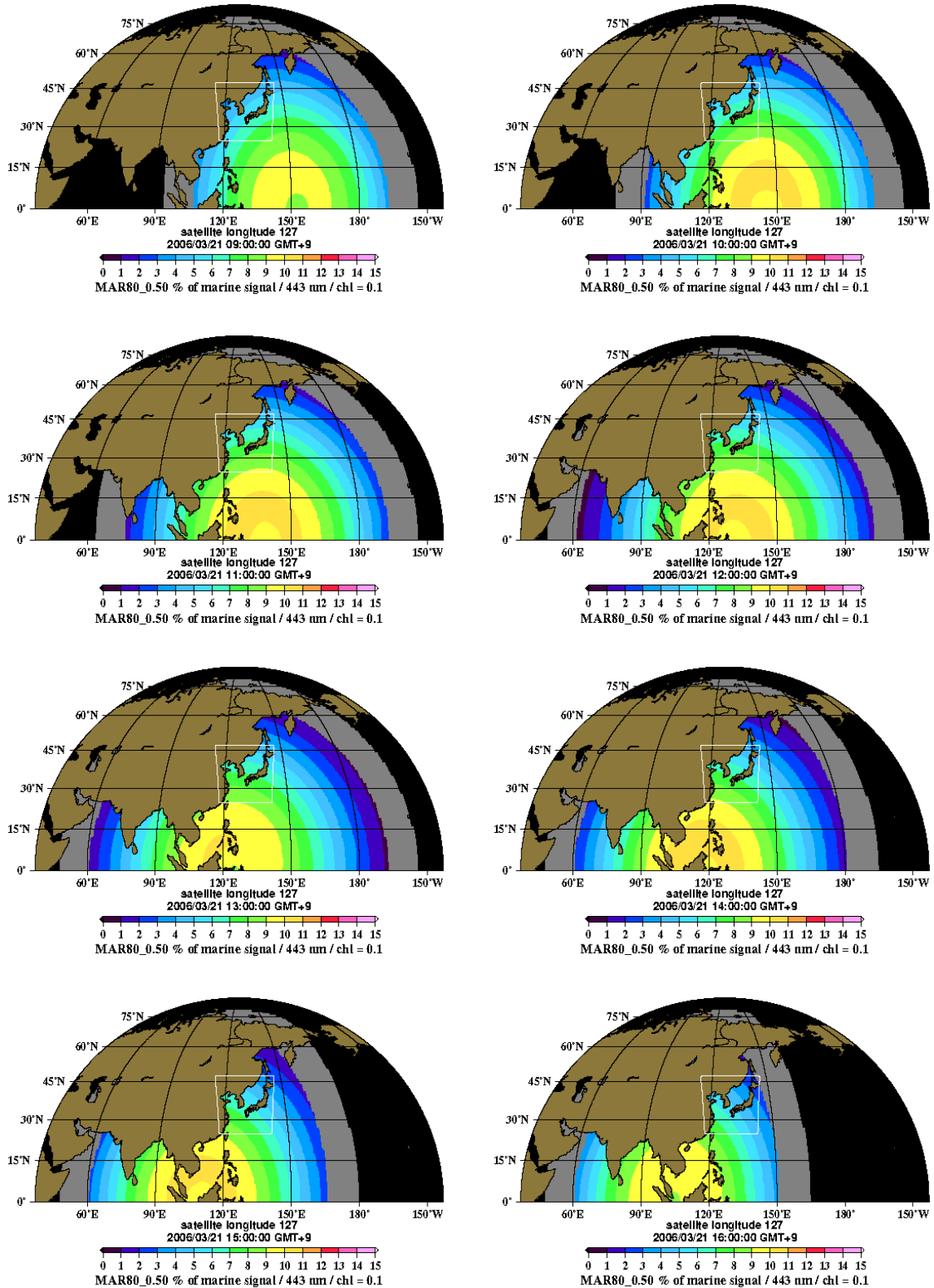


Figure 3.5.6b % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.50$) Chl = 0.1 $mg\ m^{-3}$
 $\lambda = 443nm$

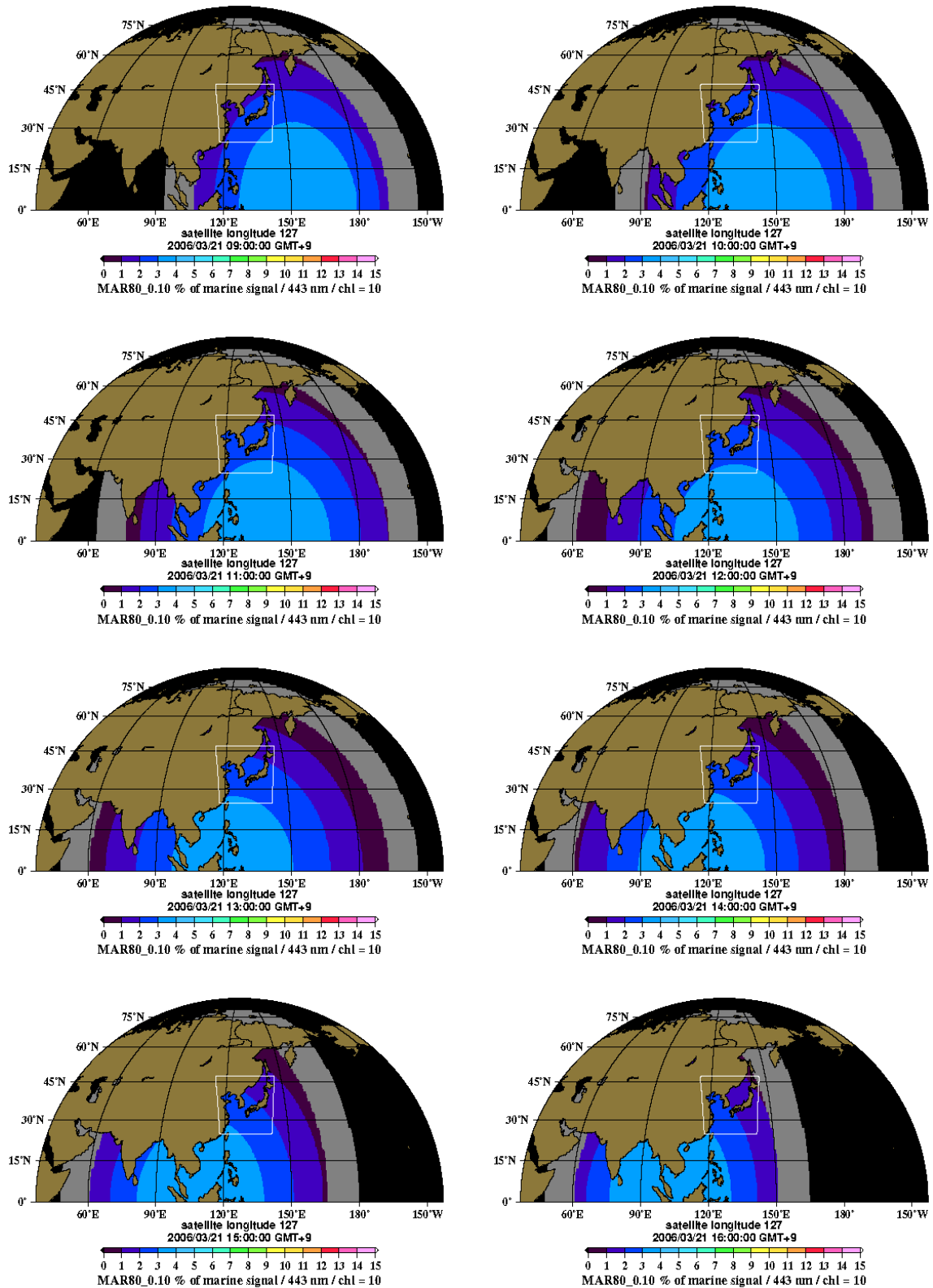


Figure 3.5.6c % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 10 \text{ mg m}^{-3}$
 $\lambda = 443\text{nm}$

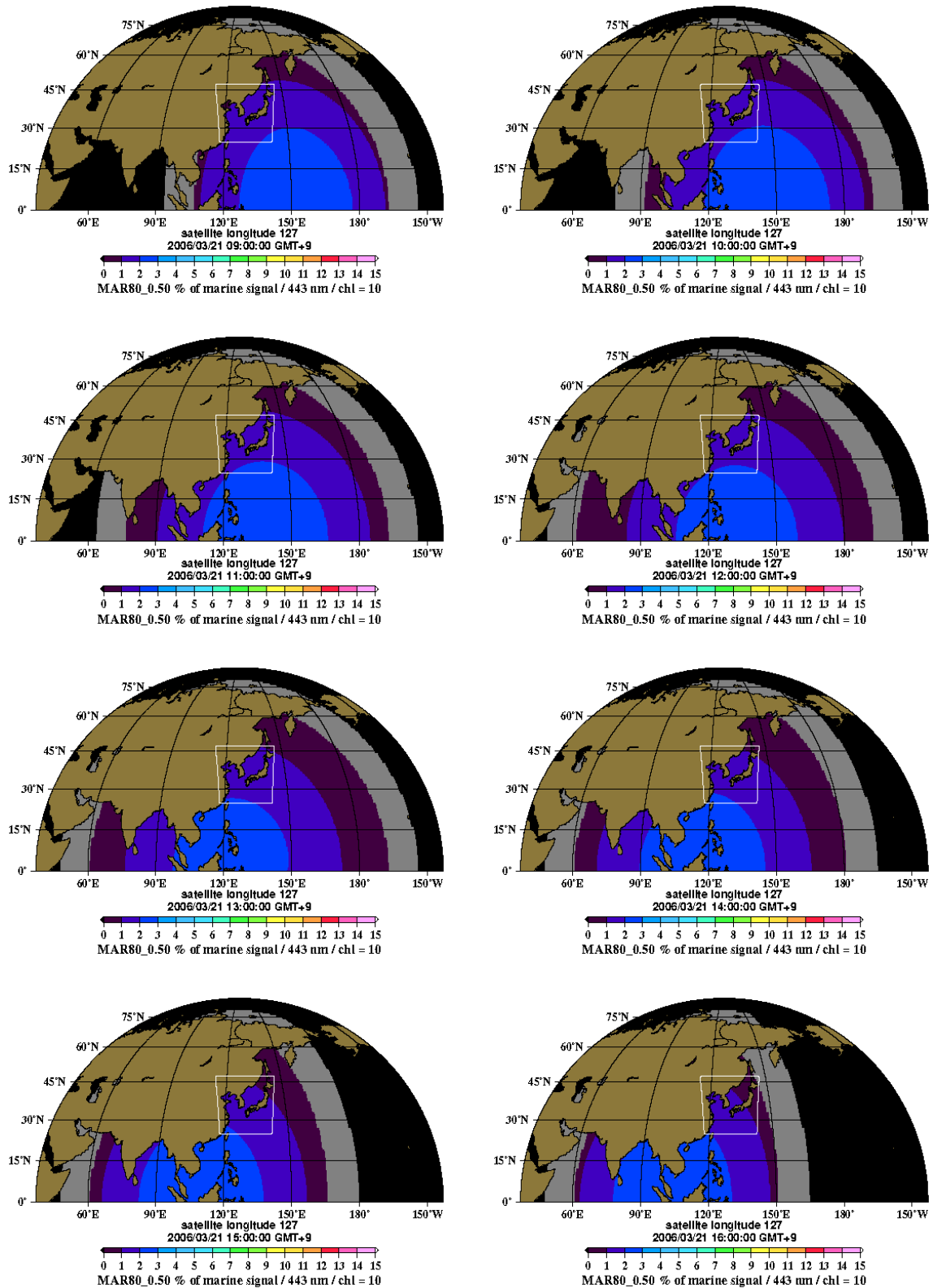


Figure 3.5.6d % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.50$) Chl = 10 $mg\ m^{-3}$
 $\lambda = 443\text{nm}$

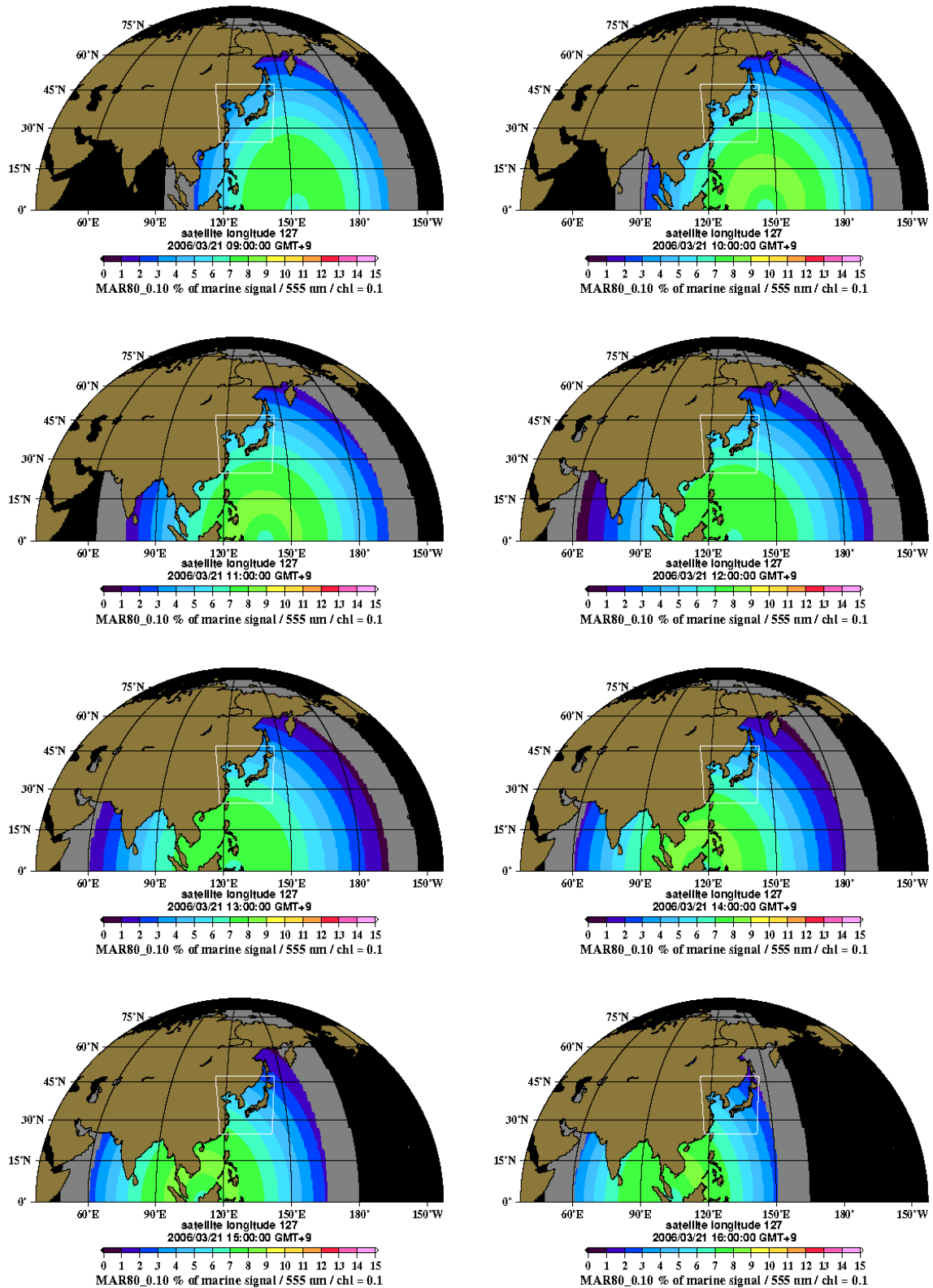


Figure 3.5.6e % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 0.1 \text{ mg m}^{-3}$
 $\lambda = 555\text{nm}$

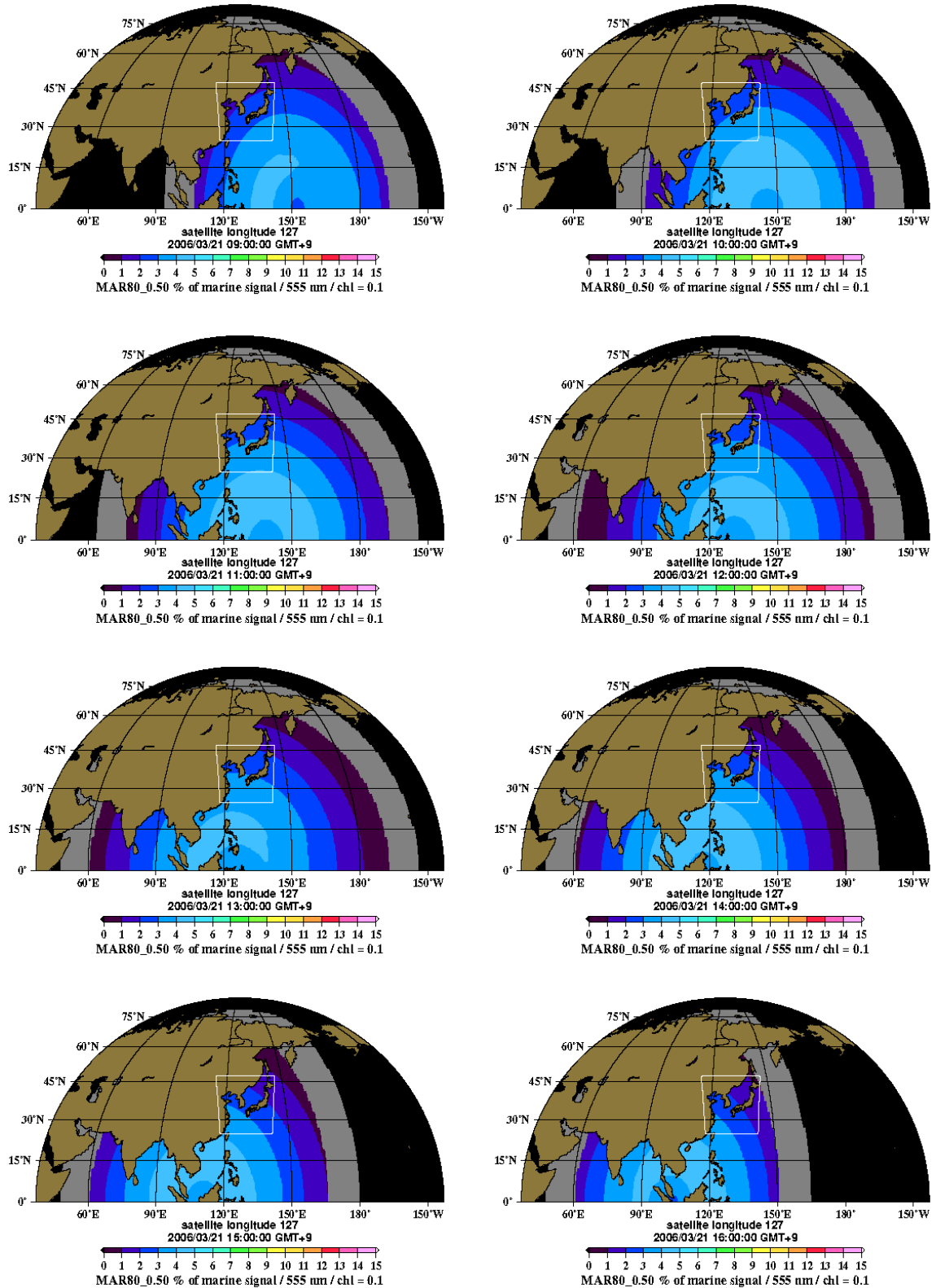


Figure 3.5.6f % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.50$) $Chl = 0.1 \text{ mg m}^{-3}$
 $\lambda = 555\text{nm}$

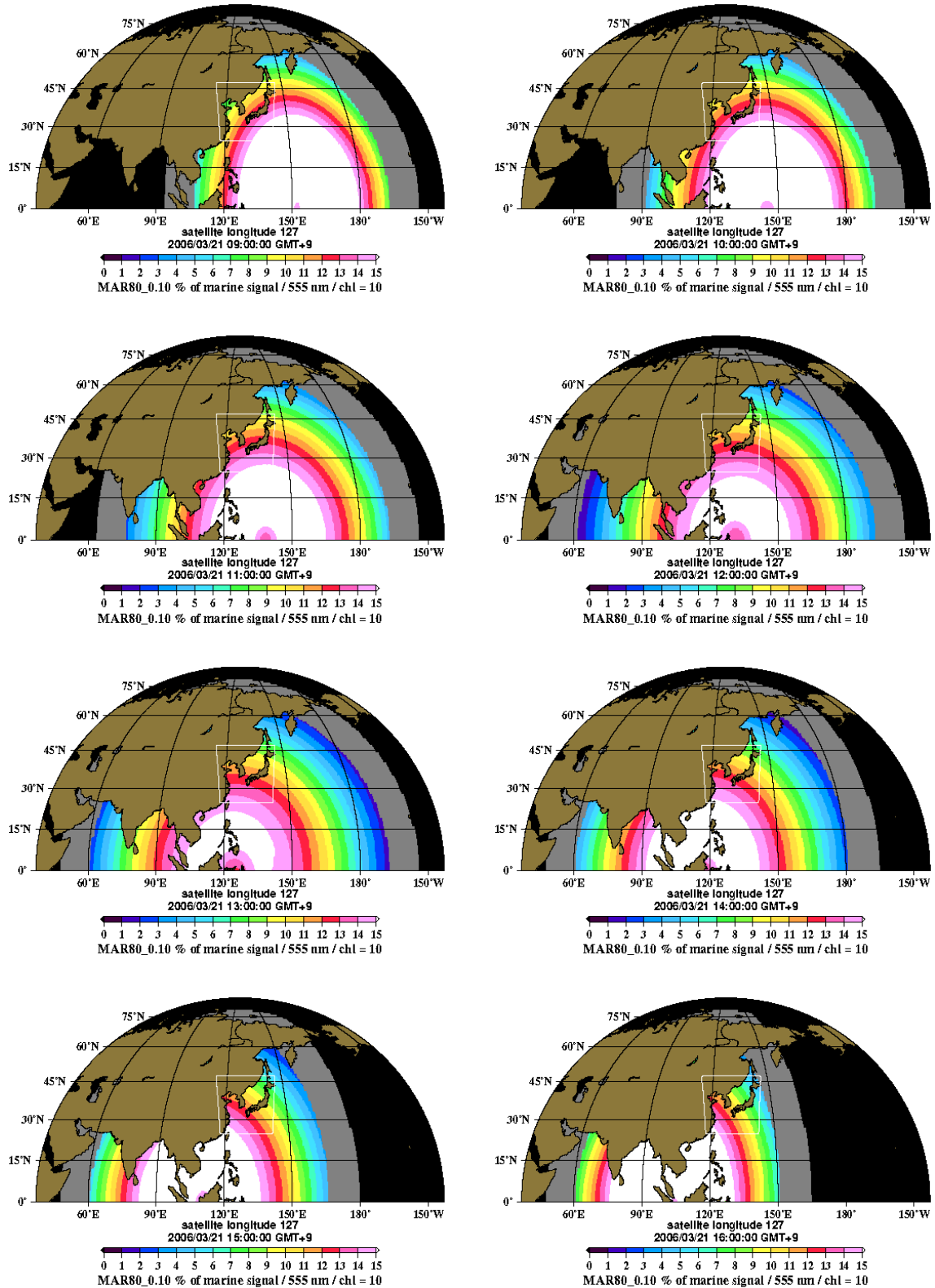


Figure 3.5.6g % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 10 \text{ mg m}^{-3}$
 $\lambda = 555\text{nm}$

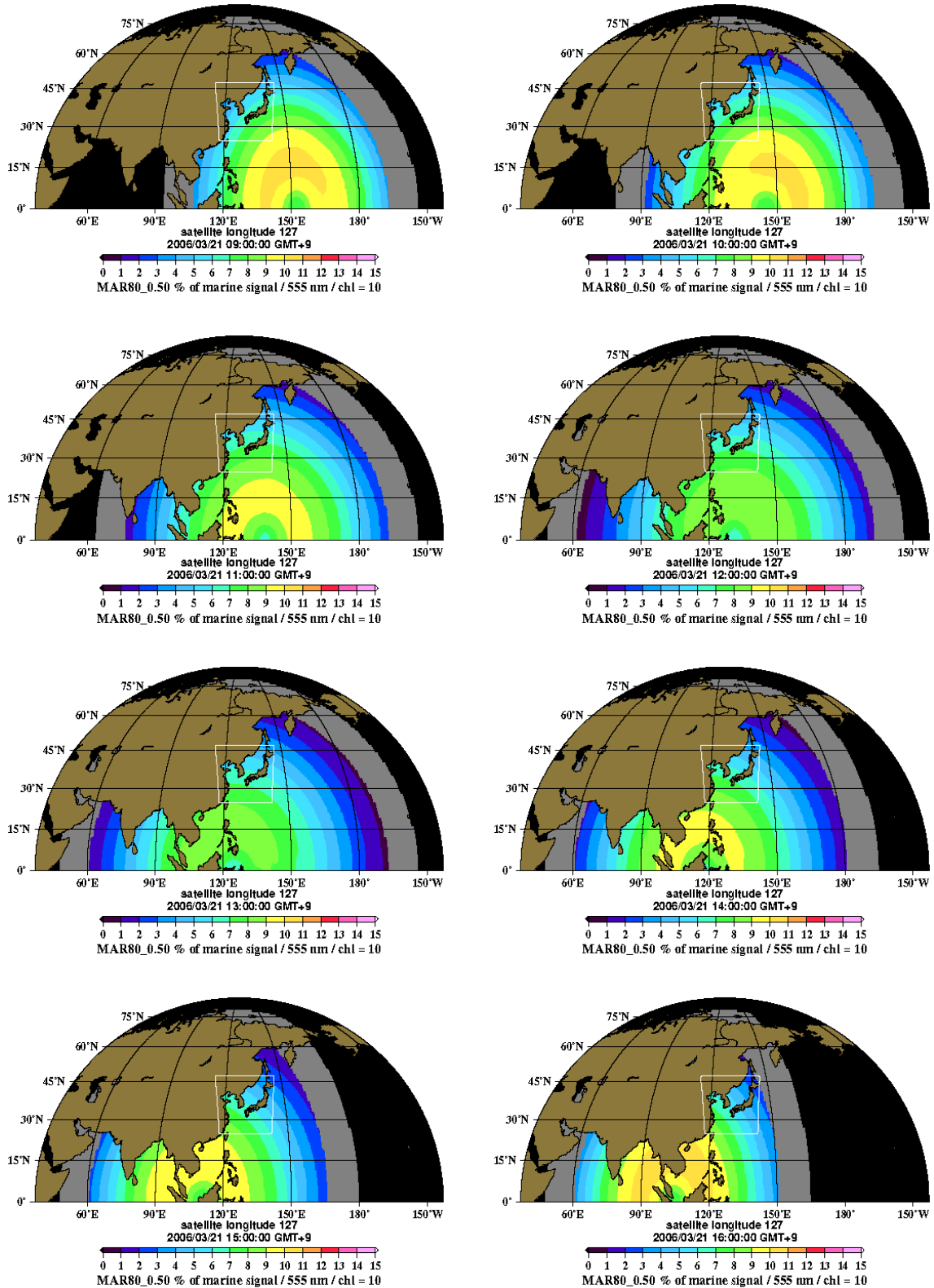


Figure 3.5.6h % of marine signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.50$) $Chl = 10 \text{ mg m}^{-3}$
 $\lambda = 555 \text{ nm}$

(6) % of fluorescence signal

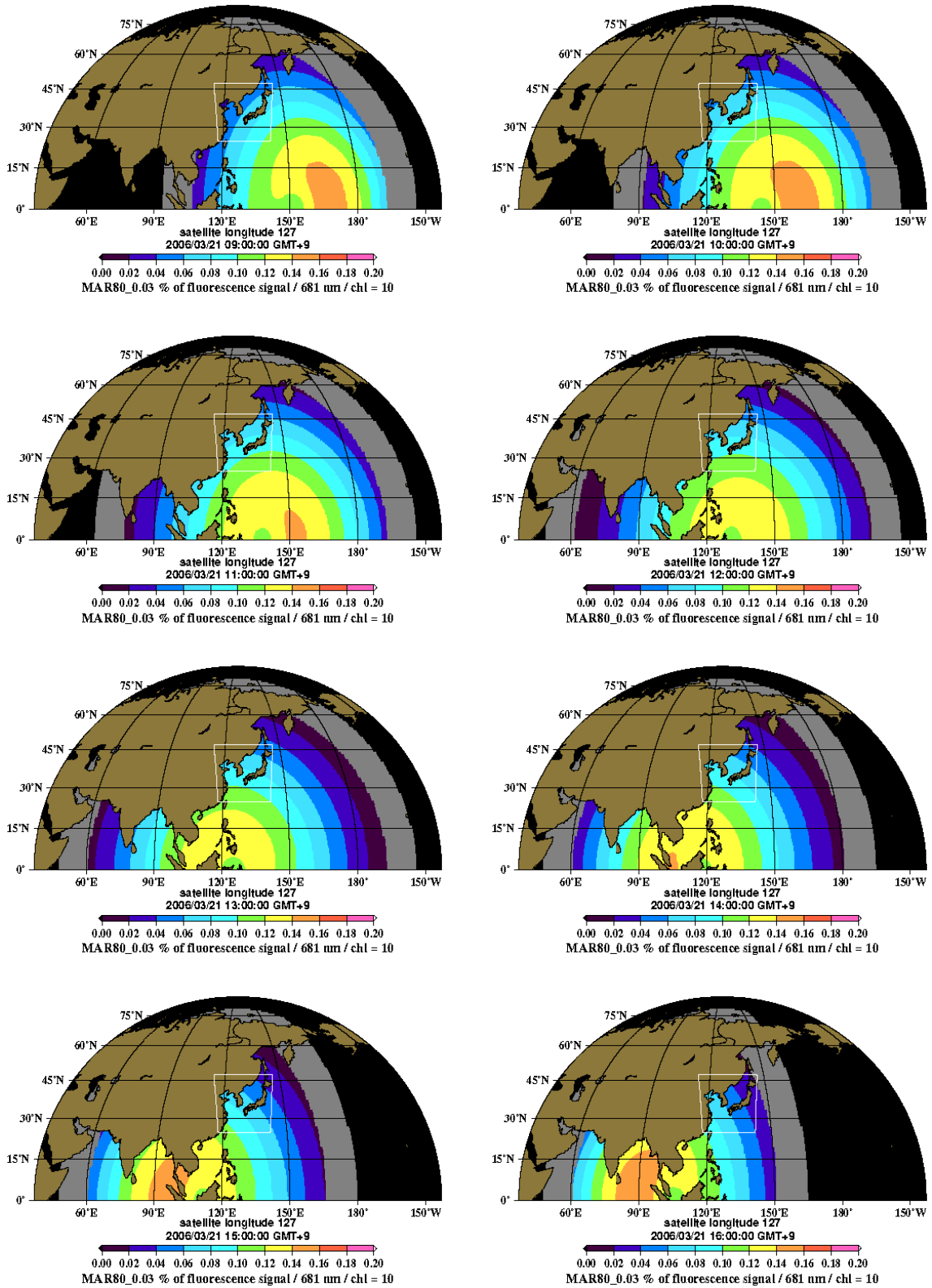


Figure 3.5.7a % of fluorescence signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.03$) $Chl = 10$ $mg\ m^{-3}$ $\lambda = 681nm$

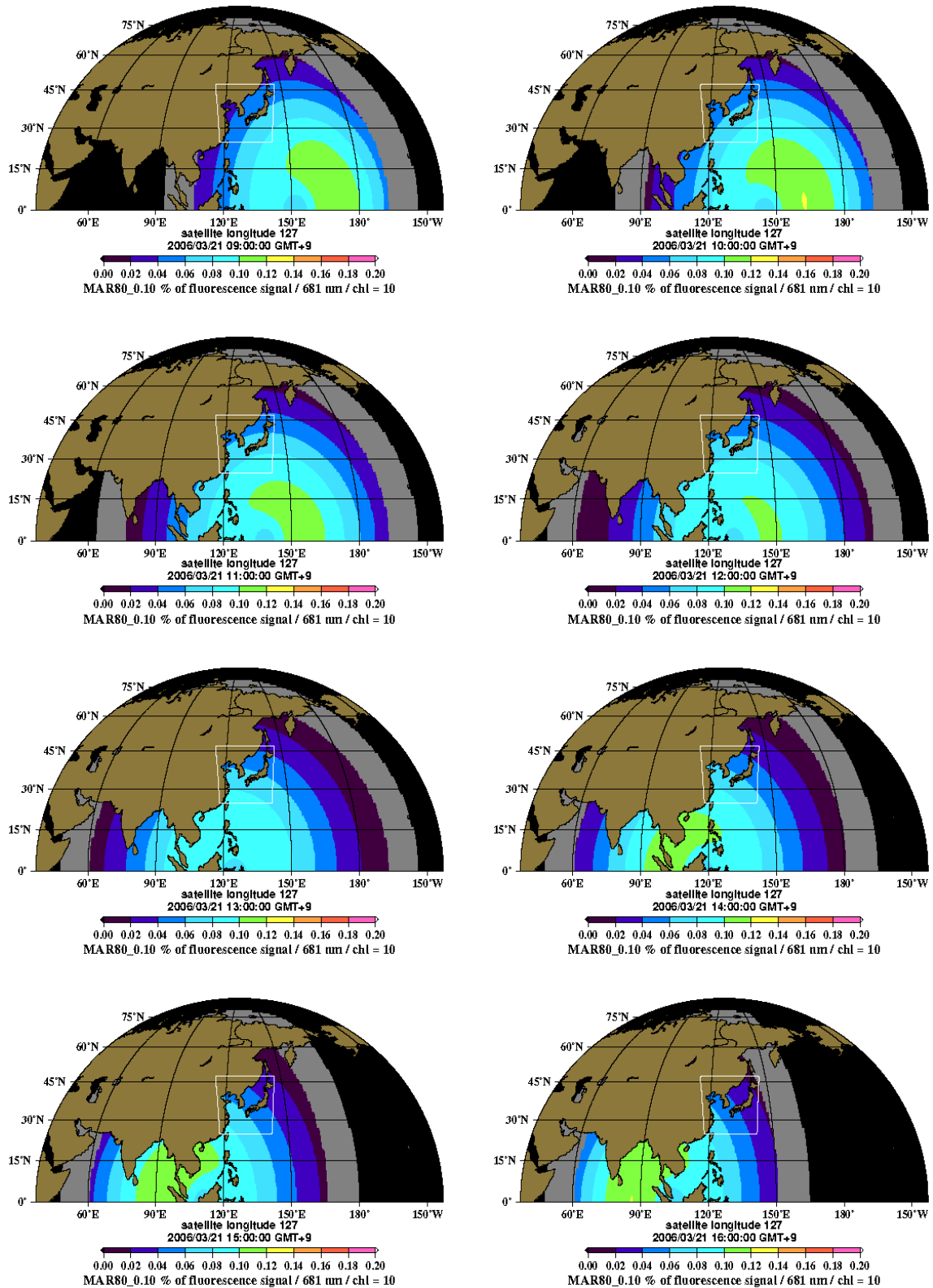


Figure 3.5.7b % of fluorescence signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.10$) $Chl = 10$ $mg\ m^{-3}$ $\lambda = 681nm$

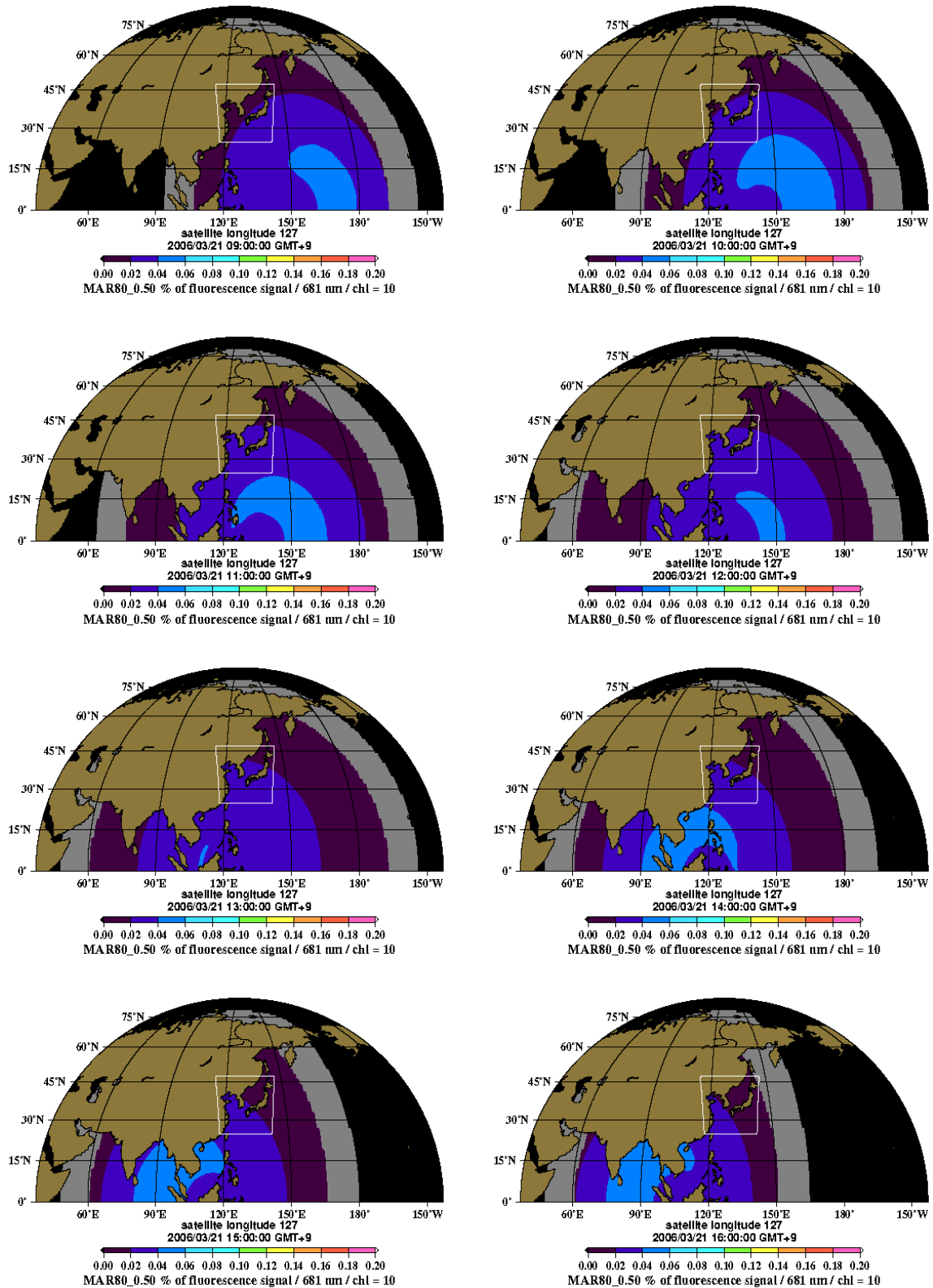


Figure 3.5.7c % of fluorescence signal 03/21 aerosol MAR80 ($\tau_a = 0.50$) $Chl = 10$
 $mg\ m^{-3}$ $\lambda = 681nm$

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구개발 목표의 달성도

1. 태양광반사의 시공간 분포 파악

구면 삼각법과 Newton-Raphson 수치 해석적 방법을 이용하여 정지궤도 위성의 태양반사점 계산 알고리즘을 성공적으로 개발하였으며, 개발된 알고리즘을 포트란, C++, QT 라이브러리를 이용하여 시각화 SW를 개발하였다. 개발된 SW의 검증을 위하여 인도의 정지위성인 INSAT1-D 위성의 결과 값과 미국 AGI사의 STK (Satellite Tool Kit)로 시뮬레이션한 결과와 비교하여 개발된 알고리즘의 우수성을 확인하였다. COMS로부터 위성자료 획득시 예상되는 태양광반사 영역의 연중 분포 변화를 예측한 결과, 바람의 영향이 없다면 우리나라 근처에서는 태양반사점의 영향을 받지 않을 것으로 분석되었다.

2. 정지위성 영상 자료의 질 검증

위성자료의 공간해상력을 시뮬레이션하는 프로그램을 작성하여 정지궤도와 극궤도의 해석관측을 위한 적절한 해상력의 평가가 이루어졌고, 이를 기반으로 한 해양환경 위성연구의 기초가 구축되었다. MODIS, SeaWiFS 자료와 GOES-9 자료의 자료처리 및 비교 분석기술을 개발하여 IDL 프로그램으로 구축하였다. Low Level 자료에서 자료처리 과정을 통해 지구 투영 시뮬레이션 영상 작성하였다. GOCI의 관측 자료를 동경 116도와 동경 127도의 위치 변경에 따라 관측 자료의 비교를 위해 GOES-9 자료를 처리하는 IDL 프로그램 작성하였고, 자료처리 IDL 프로그램을 이용하여 위성영상 자료의 질을 평가하였다.

3. 연중 태양 및 대기 신호의 변화 크기 연구

격자태양광측정기와 분광측정기가 설치된 2004년 3월 이후 현재까지 지속적으로 매일 오전 8시부터 18시까지 10분 간격으로 $E_{sun}(\lambda)$, $E_d(\lambda)$, $L_{sky}(\lambda)$ 를 측정하고 있으며, 기기의 신뢰도를 위해 다른 측정기와 cross-check 한 결과 매우 안정적인 자료를 얻고 있는 것을 확인하였다. 지표에서 측정된 $E_{sun}(\lambda)$ 과 대기권 밖의 $F_0(\lambda)$ 값을 이용하여 대기의 투과도와 광학적 두께를 계산하여 1년간 시간/일/월/계절별 모니터링을 수행하였다. 에어로졸의 특성을 파악하기 위하여 47 mm 에어로졸 샘플러를 구매하였고 142 mm 대용량 샘플러를 자체 제작하여 2005년 2월부터 해양연구원 옥상에서 매일 에어로졸을 채취하고 있으며 안면도에서 1회 채취하였다. 이들로부터 에어로졸의 흡광계수를 측정하는 방법과 에어로졸의 입자 사이즈 분포를 측정하는 방법을 정립하였으며 축적된 자료를 분석하여 추후 우리나라 주변의 에어로졸 타입을 분류하고자 한다.

4. 대기보정 연구

영상에 기초한 path extraction 방법과 현장에서 관측된 해수의 스펙트럴 형태를 이용하는 새로운 대기보정 방법인 SSMM 방법의 개념을 정립하였으며, 이 방법을 이용하여

Landsat과 SeaWiFS 등의 위성에 적용하여 기존의 방법보다 좋은 결과를 얻었다.

5. 대기 신호의 성분별 크기 추정 모델 개발

8개의 밴드 영역에 대해 3개의 에어로졸 모델과 클로로필 농도를 각각 달리하며 매시간 간격으로 bidirectional 함수를 이용하여 $L_w(\lambda)$ 값을 모사할 수 있는 모델을 개발하였으며, 북반구에 대해 공간적 분포 값을 파악하였다. 대기+해수 신호 모델에 의해 대기권 밖(위성)에서 얻어지는 $L_{total}(\lambda)$ 값을 성공적으로 모사하고 GOCI의 dynamic range을 파악하였다. COMS 관측영역을 포함하는 북반구에 대해 다양한 대기-해양 조건에 따른 대기권 밖의 신호 중 해양신호의 %의 공간적 분포를 파악하였다. 본 연구에서 개발된 대기+해양 신호 모델은 태양의 위치가 시간에 따라 바뀌게 되는 정지궤도 위성 자료의 방사 보정이나 센서의 검보정에도 활용이 가능하다.

제 2 절 관련분야의 기술발전의 기여도

태양과 위성의 기하학적인 배열은 태양광반사의 패턴을 결정하기 때문에 대부분의 지구 관측 위성들은 위성센서에 의해 얻어지는 영상에서 태양광반사 효과를 최소화하기 위하여 의도적으로 궤도를 결정하였다. CZCS 센서의 경우 태양광반사를 피하기 위해 위성의 피치축으로 센서의 기울기를 조절할 수 있는 기능을 가지고 있다. 태양광반사는 구름의 분류, 해수면 온도 결정, 해색을 이용한 해양환경 모니터링, 식생지수 계산, 그리고 water mass의 식별 등 원격탐사를 이용하여 분석 가능한 모든 분야에 문제를 일으킬 수 있으므로 이번 연구에서 개발된 태양광반사 위치 계산 알고리즘은 추후 우리나라 위성계획에 따른 위성개발에 모두 활용될 수 있으며 항공우주 분야의 기술 발전에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

지구에 대해 상대적으로 고정된 위치를 유지하여 지상과 항상 송수신 가능한 정지궤도 위성의 주 활용분야는 통신 방송 서비스 임무이다. 최근에 들어서는 정지궤도에서의 24시간 상시 관측 넓은 가시 영역을 이용한 전 지구 관측 연구에 대한 관심이 높아져 정지궤도 위성 활용에 기상과 해양 관측 수요가 증대되고 있다. 한편 정지궤도는 활용성이 높은 반면에 궤도, 주파수와 위치 등이 매우 한정적이어서 이를 확보하기 위한 국가 간의 경쟁이 치열하다. 따라서 확보된 정지궤도의 위치는 한반도 직상부가 아닌 다른 위도 상에 위치할 수 있고 이로 인해 각 픽셀의 지형적 왜곡 현상이 발생할 수 있고 대기의 광학적 두께의 증가로 영상의 질에 문제가 발생할 수 있다. 이는 COMS 뿐만 아니라 추후 계획 중인 COMS 시리즈의 문제점이다. 따라서 영상의 질 검정에 대한 소프트웨어가 구현이 된다면 추후 우리나라에서 제작될 정지궤도 위성자료의 위치에 따른 영상의 질을 사전에 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

해색위성자료의 경우, 대기 신호의 세기가 해양 신호보다 훨씬 큰 값을 가지므로 정확한 대기보정이 정량화된 해색정보의 정확도를 좌우하게 된다. 또한 정지궤도 위성은 지표면으로 입사되는 태양광이 시간에 따라 바뀌게 됨으로 bi-directional reflectance를 고려하여야 한다. 따라서 실측에 의한 태양광의 세기와 대기 신호의 일/월/계절/연별 크기를 파

악하고 대기신호의 성분별 크기 추정 모델이 반드시 필요하다. 본 연구에서 개발된 대기+해양 신호 모델은 정지궤도 위성 자료의 방사 보정이나 센서의 검보정에도 활용이 가능할 뿐 아니라 dynamic range 값을 계산함에 의해 센서의 설계 등에도 반영될 수 있다. 따라서 우리나라 원격탐사 대기보정 분야의 수준을 한 단계 끌어올리는데 기여할 것으로 생각된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

정지궤도 위성인 통해기 에 탑재되는 해양 탑재체는 국내외를 막론하고 처음으로 시도하는 분야이므로 당연히 이 자료의 처리시스템 기술 개발 역시 국외 선진국에서도 개발된 적이 없는 기술이다. 우리가 개발한 기술이 앞으로 이 분야의 기술 개발에 선도적인 역할을 하게 될 것이다. 동시에 국내 이 분야가 선진국을 앞서가는 연구능력과 기술력이 축적됨에 의해 정지궤도 해양 탑재체 처리/응용 분야에서 국제적으로 앞서갈 수 있는 전환점이 되리라 생각된다.

2008년까지 수행될 본 연구는 크게 대기 분야, 해양 분야, SW 개발 분야로 나누어지며 본 연구는 대기광학모델 개발의 1차년 연구로서 크게 4가지 분야로 나누어 연구되었다. 1차 년도에서 연구된 극궤도 위성자료의 태양반사점 위치 계산 알고리즘을 바탕으로 2차 년도에 정지궤도 위성자료의 태양반사점 위치 계산 알고리즘이 개발된다면 위성자료를 얻기 전에 문제가 될 수 있는 부분을 사전에 파악함으로써 자료를 분석하는데 도움이 될 수 있다. 또한 우리나라 중장기 우주개발 계획에 의한 다목적 위성과 통해기 시리즈 등의 계획/설계 시 적극 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 정지궤도 위성 영상 자료의 질 검증 연구는 정지궤도 위성의 위치와 관련하여 영상의 지형적 왜곡과 함께 자료값의 변화를 파악할 수 있는 알고리즘이 개발된다면 추후 통해기 2호의 위치 선정 등에 활용될 것이다. 정지궤도 위성의 특성상 태양과 대기의 신호 크기가 변하기 때문에 이의 실측 및 모델 개발의 결과는 정량적인 대기보정을 위한 필수적 항목이다. 따라서 실측에 의한 연중 태양 및 대기 신호의 변화 크기 연구와 대기 신호의 성분별 크기 추정 모델이 개발되면 매시간 관측되는 통해기 자료의 대기 보정과 통해기 자료 전처리 시스템(Level 1.5) 개발에 적극 활용이 가능하다.

이와 같이 연구된 대기광학모델 연구는 2005-2006년에 수행될 해양광학 모델 개발의 기본이 되는 연구로 이번 연구에서 설치된 sunphotometer과 야외 스펙트로미터 자료의 시간/일/월/계절/연별 측정 결과는 정지궤도의 통해기 시리즈는 물론 현재와 미래의 극궤도 위성 자료의 대기 보정 등에 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 2007-2008년에 개발된 자료처리 시스템 SW는 NASA의 "SeaDAS"와 같은 기능을 갖는 정지궤도 통신해양 기상 위성 탑재체의 해양 분야의 공식적인 분석 활용 기술과 SW로 학계, 국가연구기관, 환경관련 기업 및 일반 이용자에게 공급할 예정이다. 동시에 일반인 사용을 위한 기본 교육과 국가 연구/활용기관에 대한 기술 이전도 수행하여 위성자료 활용의 저변확대에 기여할 것이다. 이와 같은 통해기 자료의 수신/처리/배포 등의 기능을 담당할 수 있는 해양 위성센터 건립을 위한 기획연구가 한국해양연구원에서 수행된 바 있다.

제 6 장 참고문헌

- 강치호, 1998, “OSMI의 월간 촬영 계획 수립을 위한 CZCS 영상, 구름, 태양 섬광 효과의 분포 경향 분석”, 석사학위논문, 연세대학교, 서울, pp.2~19
- 공공기술연구회, 2002, 위성자료 공공활용연구, P02040.
- 과학기술처, 1996, 다목적실용위성 지상국 수신 시설 설치 및 운용 사업(I),(II),서울
- 기상청, 2003, 기상위성관측망(<http://www.kma.go.kr/kmas/study>), 서울
- 유신재, 정종철, 1999, 탁한해역에서의 적조관측, 대한원격탐사학회지, 제15권 4호, 321-327.
- 유신재, 정종철, 1999, 해양환경관측을 위한 원격탐사의 활용과 그 전망, 대한원격탐사학회지, 제 15 권 3호, 277-288.
- 윤재철, 1996, “Cowell 방법과 해석적 방법에 의한 정지위성 궤도 예측”, 석사학위논문, 연세대학교, 서울, pp.15~27
- 이상삼, 2000, “안면도에서의 태양 복사 지상 관측을 통한 황사의 광학적 특성 연구”, 석사학위논문, 서울대학교, 서울, pp.1~65
- 정종철, 1999, 주성분분석을 이용한 다중시기 원격탐사 자료분석, 한국지리정보학회지, 제 2권 3호, 71-80.
- 정종철, 유신재, 2000, SeaWiFS 밴드역에 의한 연안해역의 엽록소 밴드비율 알고리즘 검증, 대한원격탐사학회지, 제 16 권 1 호, 37-46.
- 정종철, 유신재, 김정욱, 1999, 시화호와 연안해역의 부유사 분포 분석을 위한 원격탐사 알고리즘, 한국지리정보학회지, 제 2권 2호, 59-68.
- 정종철, 2001, SeaWiFS 자료를 이용한 황해와 동해의 생물광학 특성 비교, 한국지리정보학회지, 제4권 2호, 38-45.
- 정종철, 2001, 연안해역의 투명도 추정을 위한 밴드비율 알고리즘 검증, 한국지리정보학회지, 제4권 1호, 27-33.
- 최규홍, 1997, 천체역학, 민음사, 서울, pp.15~28
- 해양광학연구실, 2001, 국가별지구관측위성(<http://ocr1.kordi.re.kr>), 해양연구원.
- 해양수산부, 2002, 해양GIS 기술개발연구, 해양지리정보체계를 위한 기반 연구.
- 한국해양연구소, 1998, 해양원격탐사기술개발을 위한 해색분석 모델의 개발, BSPE 97670-00-1075
- 한국해양연구소, 1999, 해양종합관측위성의 사전조사연구, BSPE 97670-00-1146
- 한국해양연구소, 1999, OSMI (LRC) 보정/검증 및 해양응용을 위한 연구, BSPN 98370-00-1226-3, 과학기술부
- 한국해양연구원, 2003, 정지궤도 해양위성 탑재체 선행연구, BSPK045-00-1536-1, 해양수산부.
- 한국해양연구원, 2004, 통신해양기상위성 1호 해양자료처리시스템 개발 사업 (I), BSPM 24400-1624-1, 해양수산부.
- 황석규, 1999, “SeaWiFS 자료를 이용한 봄철 동아시아 에어로졸의 특성 연구”, 석사학위

- 논문, 서울대학교, 서울, pp1~62
- Ahmed A. Kamel, 1996. GOES Image Navigation and Registration, SPIE Vol 2812(GOES-8 and Beyond Conference), pp.766-776.
- Antoine D. and A. Morel, 1999, A multiple scattering algorithm for atmospheric correction of remotely sensed ocean colour (MERIS instrument): principle and implementation for atmospheres carrying various aerosols including absorbing ones, *International Journal of Remote Sensing*, 20(9), pp 1875-1916.
- Beavers, W. I. 1996, Technical Report (MA: MIT Lincoln Laboratory), Project Report STK-241.
- Brivio, P.A., Giardino, C., Zilioli, E., 2001, Determination of concentration changes in Lake Garda using image-based radiative transfer code for Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing* 22, pp 487-502.
- CGMS, August 1999. LRIT/HRIT Global Specification, Issue 2.6. 766-776.
- Chi-Ho Kang and In-Hoi Goo, 2004. The Global Perspective Plane Image Generation using the GOES-9 Satellite Images, KARI Technical Memo, KOREA.
- Chobotov, V.A., 1991, *Orbital mechanics*, AIAA, Washington, DC, pp.17~27
- Clark, R. 1999, in A. Rencz, *Manual of Remote Sensing*, ed. John Wiley & Sons (MA: John Wiley & Wiley Inc.), 115
- Cracknell, A.P., 1990, *Sun glint and the study of near-surface windspeeds over the oceans*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp.125~139
- Culp, R. D., Jorgensen, K., Gravseth, I., & Lambert, J. V. 2000, *Space Debris* (Netherlands: Kluwer Academic Publishers), 113-125.
- Dennis L. Helder, and Taeyoung Choi, 2002, IKONOS Satellite on Orbit modulation Transfer Function (MTF) Measurement using Edge and Pulse Method, South Dakota State University
- European Space Research Institute, 1994, *Coastal Zone Color Scanner*, Italy
- Eusan et al., (MA: MIT Lincoln Laboratory), p.52.
- Gardashov, R., Barla, M.C., 2001, "The calculation of the distribution of the sun glitter radiance on the ocean surface by observing from a geostationary orbit", *Int. J. Remote Sensing*, v.22, no.22, pp.2939~2952
- Gerald C. Holst, 2003, *Electro-Optical Imaging System Performance 3rd Edition*, JDC Publishing
- Gordon, H. R., D. K. Clark, J. W. Brown, O. B. Brown, R. H. Evans, and W. W. Broenkow, 1983, Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determination and CZCS estimates, *Applied Optics*, 22 pp 20-36.
- Gordon, H. R., and M. Wang, 1994, Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS; A preliminary algorithm, *Applied Optics*, 33, pp. 443-452.

- Gordon, H. R., 1997, Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth Observing System era, *Journal of Geophysical Research*, 102, pp 17081-17106.
- Gravseth, I. J., & Culp, R. D. 1996, *Advances in the Astronautical Sciences*, Vol. 93, 221-229.
- ITT Industries, 2003. ITT Imager Operational Reference Manual Revision B, pp. 2-1~2-44.
- J.M.A, 2002. Establishment of the procedure the back up GMS-5 with GOES-9.
- J.M.A, 2002, Plan for Geo-stationary Meteorological Satellites and their dissemination.
- Kang, C. H., S. B. Seo, H. S. Lim, D. J. Park, S. I. Ahn, I. H. Koo, D. H. Hyun, H.M. Yang, H. J. Choi, 2004. Study on the Coverage by COMS OCI FOV, *International Symposium on Remote Sensing 2004*, pp.336-339.
- Kara, G., Barla, M.C., Gardashov, R., 2002, Method to locate sunglint on the ocean surface by observing from the geostationary orbit, pp.152~156.
- Kaufman, Y. J., Karnieli, A., Tanre, D., 2000, Detection of dust over deserts using satellite data in the solar wavelengths. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing* 38, 525-531.
- Kenichi Hirano, Yasushi Kaibai, and Mikio Takagi, 2000. Residual Error Acquisition for the Precise Geometric Correction of GMS Images, *Proc. ISRS'2000, Braszil*, pp.1506-1511.
- Khattak, S., 1989, "Identification of sunglint areas in polar orbiting satellites imagery and determination of near-surface wind speed from sunglint radiance", Ph.D. dissertation, The University of Dundee, UK, pp.1~82
- Khattak, S., Vaughan, R.A., and Cracknell, A.P., 1991, "Sunglint and its observation in AVHRR data", *Remote Sens. Environ.*, v.37, no. 2, pp.101~116
- KORDI, 2003 Preliminary studies and the user requirements of the ocean payloads in geostationary orbit satellite, MOMAF
- Kwok, J.H., 1987, *The Artificial Satellite Analysis Program*, JPL NPO-17522.
- Lambert, J. V. 1971, Masters Thesis, Air Force Institute of Technology
- Landsat Project, 1998, *The Landsat 7 satellite, Instrument and data*, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.
- Liang, S., Fang, H., Chen, M., 2001, Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery-Part 1: Methods. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 39, 2490-2498.
- Lim, Hyun-Su, Sang-il Ahn and Hae-Jin Choi, 2004. Sub-satellite Point Observation and Image Registration Accomplishment with GOES-9 IMC-Off Status, *International Symposium on Remote Sensing 2004*, pp.212-215.
- Liou, Kuo-Nan, 1980, *An interoduction to atmospheric radiation*, Academic Press, INC.
- Liu Cheng, 2002, *The status and applications of the chinese meteorological satellites*, NSMC/CMA.
- Manjunath Kempaiah Rangaswamy, 2003, *Quickbird II Two-dimensional On-orbit Modulation*

- Transfer Function Analysis Using convex Mirror Array, South Dakota State University
- Mathieu Chambon, Jerome Primot, and Michel Girard, 1996, modulation Transfer Function Assessment for Sampled Imaging System: Application of the Generalized Line Spread Function to a Standard Infrared Camera, *Infrared Physics and Technology*, 37 (1996) 619-626
- Meeus, J., 1998, *Astronomical Algorithms*, Willmann-Bell, Richmond
- N. Uekiyo, 2002, Multi-functional transport satellite(MTSAT) program, Meteorological Satellite Center, Japan Meteorological Agency.
- Oliver Montenbruck, Eberhard Gill, 2000, *Satellite Orbits*, Springer-Verlag Berlin, Germany, pp.53~113
- Prakash, W.K., Varma, A.K., and Bhandari, S.M., 1994, "An algorithm for the precise location of the solar specular reflection point in the visible band images from geostationary meteorological satellites", *Computer & Geoscience*, v.20, n.10, pp.1467~1482
- Prochko, A. E., Holbert, E., Gregory, S. A., Rafert, J. B., Panye, T. & Durham, S. E. 1994, in *Proceedings of the 1994 Space Surveillance Workshop*.
- Rafel C. Gonzalez, and Richard E. Woods, 2002, *Digital Image Processing 2nd Edition*, Ch. 10 Image Segmentation, Prentice Hall
- Robert Ryan, Braxton Baldrige, Robert A. Schowengerdt, Taeyoung Choi, Dennis. Helde, and Slawomir Blonski, 2003, *IKONOS Spatial Resolution and Image Interpretability Characterization*, *Remote Sensing and Environment*, 88 (2003) 37-52
- Satellites Service Division, NESDIS, 2003, *GOES-9 - Dissemination Schedules*.
- Seok-Bae Seo, Chi-Ho Kang, Sang-Il Ahn, and Hae-Jin Choi, 2004. Fast landmark matching algorithm using moving guide-line image, *International Symposium on Remote Sensing 2004*, pp.208-211.
- Shettke, E. P., and R. W. Fenn, 1979, *Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties*, AFGL-TR-79-0214, Air Force Geophysics Lab., Hanscomb AFB, Mass.
- Shunling Liang, 2001, Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery-Part I: method, *IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing* 39(11), pp 2490-2498.
- Smart W.M., *Text-Book on Spherical Astronomy*, Cambridge Univ., UK, pp.1~56
- Song, J. H., 2004, Modulation Transfer Function (MTF) Measurement for KOMPSAT EOC image data Using Edge Method, *International Symposium on Remote Sensing 2004*, pp.489-493.
- Space systems Loral, 1996, *GOES I-M Databook Revision 1*. pp.20-38.
- Standish et al., 1995, *JPL Planetary and Lunar Ephemerides: DE403/LE403*, JPL IOM 314.10-127
- T. Suzuki, 1997, *The GMS's User's Guide(3rd Ed.)*, Meteorological Satellite Center, Tokyo, Japan

VCS Aktiengesellschaft, 2002, 2met! XPIF Reference Manual Issue 1.2.

Vermote, E.F., Tanre, D., Deuze, J.L., Herman, M., Morcrette, J.J., 1997, Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, AN overview. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing 35, pp 675-686.

Wald, L. and Monget, J.M., 1983, "Sea surface winds from sun glitter observations", Jour. Of Geophysical Research, v.88. no.C4, pp.2547~2555.

Wang M., 1991, Atmospheric correction of the second generation ocean color sensors, Ph.D. dissertation (University of Miami, Coral Gables, Fla).

William C, et al., 1996. GOES Image Navigation and Registration On-Orbit Performance, SPIE Vol. 2812(GOES-8 and Beyond Conference), pp.805-821.

Young-Min Cho, 2004. Study on Solar Constraint in the Operation of COMS Meteorological Imager, International Symposium on Remote Sensing 2004, pp.382-385.

Zeen-Chul, Seong-Bong Choi, and Jung Hoon Kim, 2003. Conceptual Design of Communication, Ocean and Meteorological Satellite System, porc. Joint Conference on Satellite Communication, TOKYO, pp.31-37.

<http://mscweb.kishou.go.jp/>

http://www.jma.go.jp/JMA_HP/jma/indexe.html

http://www.landings.com/_landings/pages/wthr/weather-asia.html

<http://www.oso.noaa.gov/goes/goes-status/goes-status.htm>

<http://rsd.gsfc.nasa.gov/goes/text>

<http://rsd.gsfc.nasa.gov/goes/text/.pdf>

<http://www.soest.hawaii.edu/wessel/gshhs/gshhs.html>

<http://www.goes.noaa.gov>

KARI MESIS, at <http://mesis.kari.re.kr>.

GOES Tech Notes(E;IG), at <http://rsd.gsfc.nasa.gov>.

부록 1. Table of BF

가. ϵ

month	day	ϵ	month	day	ϵ	month	day	ϵ
01	01	1.035020	02	01	1.030935	03	01	1.018984
01	02	1.035050	02	02	1.030638	03	02	1.018469
01	03	1.035069	02	03	1.030333	03	03	1.017949
01	04	1.035077	02	04	1.030018	03	04	1.017424
01	05	1.035075	02	05	1.029693	03	05	1.016894
01	06	1.035061	02	06	1.029360	03	06	1.016359
01	07	1.035036	02	07	1.029018	03	07	1.015820
01	08	1.035000	02	08	1.028666	03	08	1.015276
01	09	1.034953	02	09	1.028307	03	09	1.014729
01	10	1.034896	02	10	1.027938	03	10	1.014177
01	11	1.034827	02	11	1.027561	03	11	1.013622
01	12	1.034747	02	12	1.027176	03	12	1.013063
01	13	1.034657	02	13	1.026783	03	13	1.012500
01	14	1.034555	02	14	1.026381	03	14	1.011934
01	15	1.034443	02	15	1.025972	03	15	1.011366
01	16	1.034320	02	16	1.025555	03	16	1.010794
01	17	1.034187	02	17	1.025130	03	17	1.010220
01	18	1.034042	02	18	1.024698	03	18	1.009643
01	19	1.033887	02	19	1.024258	03	19	1.009064
01	20	1.033722	02	20	1.023811	03	20	1.008483
01	21	1.033546	02	21	1.023358	03	21	1.007900
01	22	1.033359	02	22	1.022897	03	22	1.007315
01	23	1.033162	02	23	1.022430	03	23	1.006729
01	24	1.032955	02	24	1.021956	03	24	1.006141
01	25	1.032737	02	25	1.021475	03	25	1.005552
01	26	1.032510	02	26	1.020989	03	26	1.004962
01	27	1.032272	02	27	1.020496	03	27	1.004371
01	28	1.032024	02	28	1.019998	03	28	1.003780
01	29	1.031766				03	29	1.003188
01	30	1.031499				03	30	1.002596
01	31	1.031222				03	31	1.002003

month	day	ϵ	month	day	ϵ	month	day	ϵ
04	01	1.001411	05	01	0.984524	06	01	0.971726
04	02	1.000819	05	02	0.984017	06	02	0.971431
04	03	1.000227	05	03	0.983515	06	03	0.971143
04	04	0.999636	05	04	0.983018	06	04	0.970864
04	05	0.999046	05	05	0.982527	06	05	0.970594
04	06	0.998457	05	06	0.982042	06	06	0.970331
04	07	0.997869	05	07	0.981562	06	07	0.970077
04	08	0.997282	05	08	0.981087	06	08	0.969832
04	09	0.996697	05	09	0.980619	06	09	0.969595
04	10	0.996113	05	10	0.980157	06	10	0.969367
04	11	0.995531	05	11	0.979701	06	11	0.969148
04	12	0.994951	05	12	0.979251	06	12	0.968937
04	13	0.994373	05	13	0.978807	06	13	0.968736
04	14	0.993798	05	14	0.978370	06	14	0.968543
04	15	0.993225	05	15	0.977940	06	15	0.968359
04	16	0.992655	05	16	0.977516	06	16	0.968183
04	17	0.992087	05	17	0.977099	06	17	0.968017
04	18	0.991523	05	18	0.976689	06	18	0.967860
04	19	0.990961	05	19	0.976286	06	19	0.967712
04	20	0.990403	05	20	0.975890	06	20	0.967573
04	21	0.989849	05	21	0.975502	06	21	0.967443
04	22	0.989298	05	22	0.975120	06	22	0.967322
04	23	0.988750	05	23	0.974746	06	23	0.967210
04	24	0.988207	05	24	0.974380	06	24	0.967108
04	25	0.987667	05	25	0.974021	06	25	0.967014
04	26	0.987132	05	26	0.973670	06	26	0.966930
04	27	0.986601	05	27	0.973326	06	27	0.966855
04	28	0.986075	05	28	0.972990	06	28	0.966789
04	29	0.985553	05	29	0.972662	06	29	0.966733
04	30	0.985036	05	30	0.972342	06	30	0.966685
			05	31	0.972030			

month	day	ϵ	month	day	ϵ	month	day	ϵ
07	01	0.966648	08	01	0.970029	09	01	0.981440
07	02	0.966619	08	02	0.970281	09	02	0.981917
07	03	0.966599	08	03	0.970542	09	03	0.982400
07	04	0.966589	08	04	0.970810	09	04	0.982889
07	05	0.966589	08	05	0.971087	09	05	0.983383
07	06	0.966597	08	06	0.971373	09	06	0.983882
07	07	0.966615	08	07	0.971666	09	07	0.984386
07	08	0.966642	08	08	0.971968	09	08	0.984896
07	09	0.966678	08	09	0.972277	09	09	0.985410
07	10	0.966724	08	10	0.972595	09	10	0.985929
07	11	0.966779	08	11	0.972921	09	11	0.986453
07	12	0.966843	08	12	0.973254	09	12	0.986981
07	13	0.966916	08	13	0.973596	09	13	0.987513
07	14	0.966999	08	14	0.973945	09	14	0.988050
07	15	0.967090	08	15	0.974301	09	15	0.988591
07	16	0.967191	08	16	0.974665	09	16	0.989136
07	17	0.967301	08	17	0.975037	09	17	0.989684
07	18	0.967421	08	18	0.975416	09	18	0.990236
07	19	0.967549	08	19	0.975802	09	19	0.990792
07	20	0.967686	08	20	0.976196	09	20	0.991351
07	21	0.967833	08	21	0.976596	09	21	0.991913
07	22	0.967988	08	22	0.977004	09	22	0.992478
07	23	0.968153	08	23	0.977418	09	23	0.993046
07	24	0.968326	08	24	0.977839	09	24	0.993616
07	25	0.968508	08	25	0.978267	09	25	0.994189
07	26	0.968699	08	26	0.978701	09	26	0.994765
07	27	0.968899	08	27	0.979142	09	27	0.995342
07	28	0.969108	08	28	0.979589	09	28	0.995922
07	29	0.969325	08	29	0.980043	09	29	0.996504
07	30	0.969551	08	30	0.980503	09	30	0.997087
07	31	0.969786	08	31	0.980968			

month	day	ϵ	month	day	ϵ	month	day	ϵ
10	01	0.997672	11	01	1.015596	12	01	1.029201
10	02	0.998258	11	02	1.016135	12	02	1.029538
10	03	0.998845	11	03	1.016671	12	03	1.029867
10	04	0.999433	11	04	1.017202	12	04	1.030186
10	05	1.000022	11	05	1.017728	12	05	1.030495
10	06	1.000612	11	06	1.018249	12	06	1.030796
10	07	1.001203	11	07	1.018765	12	07	1.031087
10	08	1.001793	11	08	1.019276	12	08	1.031368
10	09	1.002384	11	09	1.019782	12	09	1.031640
10	10	1.002975	11	10	1.020282	12	10	1.031902
10	11	1.003565	11	11	1.020776	12	11	1.032155
10	12	1.004155	11	12	1.021264	12	12	1.032397
10	13	1.004745	11	13	1.021746	12	13	1.032629
10	14	1.005334	11	14	1.022222	12	14	1.032852
10	15	1.005922	11	15	1.022691	12	15	1.033064
10	16	1.006508	11	16	1.023154	12	16	1.033265
10	17	1.007094	11	17	1.023610	12	17	1.033457
10	18	1.007678	11	18	1.024059	12	18	1.033638
10	19	1.008260	11	19	1.024501	12	19	1.033808
10	20	1.008841	11	20	1.024936	12	20	1.033969
10	21	1.009419	11	21	1.025363	12	21	1.034118
10	22	1.009995	11	22	1.025783	12	22	1.034257
10	23	1.010569	11	23	1.026196	12	23	1.034385
10	24	1.011140	11	24	1.026600	12	24	1.034502
10	25	1.011709	11	25	1.026997	12	25	1.034609
10	26	1.012274	11	26	1.027385	12	26	1.034705
10	27	1.012837	11	27	1.027765	12	27	1.034789
10	28	1.013396	11	28	1.028137	12	28	1.034863
10	29	1.013951	11	29	1.028501	12	29	1.034927
10	30	1.014503	11	30	1.028855	12	30	1.034979
10	31	1.015051				12	31	1.035020

4. $t \cos(\theta_s)$

The following tables are simplified. The full resolution is available at the ftp site oceane.obs-vlfr.fr, in the `pub/gentili/GEOSTAT` directory.

Imprimé par Gentili Bernard

30 avr 05 17:52		taua_0.03						Page 1/1
	wl	412	443	490	555	660	681	
tetas								
0		0.846927	0.881245	0.910053	0.916488	0.952363	0.957827	
15		0.813288	0.847430	0.876126	0.882540	0.918329	0.923784	
30		0.714849	0.748400	0.776721	0.783066	0.818566	0.823991	
45		0.559041	0.591344	0.618866	0.625063	0.659944	0.665305	
60		0.358643	0.388296	0.414098	0.419975	0.453498	0.458716	
75		0.136212	0.158806	0.179821	0.184784	0.214336	0.219126	

30 avr 05 17:52		taua_0.10						Page 1/1
	wl	412	443	490	555	660	681	
tetas								
0		0.831361	0.865049	0.893327	0.899643	0.934859	0.940223	
15		0.797818	0.831311	0.859461	0.865753	0.900862	0.906213	
30		0.699700	0.732540	0.760260	0.766471	0.801219	0.806529	
45		0.544566	0.576032	0.602842	0.608879	0.642856	0.648079	
60		0.345581	0.374155	0.399016	0.404679	0.436981	0.442009	
75		0.126791	0.147822	0.167384	0.172004	0.199512	0.203971	

30 avr 05 17:52		taua_0.50						Page 1/1
	wl	412	443	490	555	660	681	
tetas								
0		0.747747	0.778046	0.803480	0.809161	0.840836	0.845660	
15		0.714899	0.744911	0.770135	0.775773	0.807233	0.812028	
30		0.619092	0.648148	0.672675	0.678170	0.708915	0.713614	
45		0.468756	0.495842	0.518919	0.524116	0.553363	0.557858	
60		0.279563	0.302678	0.322790	0.327371	0.353502	0.357570	
75		0.084182	0.098146	0.111134	0.114201	0.132465	0.135426	

$$\kappa \frac{R}{R_0} \frac{f}{Q} \left(\frac{f_0}{Q_0} \right)^{-1}$$

The following tables are simplified. The full resolution is available at the ftp site oceane.obs-vlfr.fr, in the `pub/gentili/GEOSTAT` directory.

Imprimé par Gentili Bernard

30 avr 05 17:49		412_00.1_0							Page 1/1
	dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav									
0		1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
15		1.000643	1.000643	1.000643	1.000643	1.000643	1.000643	1.000643	
30		1.002671	1.002671	1.002671	1.002671	1.002671	1.002671	1.002671	
45		1.008245	1.008245	1.008245	1.008245	1.008245	1.008245	1.008245	
60		1.017869	1.017869	1.017869	1.017869	1.017869	1.017869	1.017869	
75		1.027785	1.027785	1.027785	1.027785	1.027785	1.027785	1.027785	

30 avr 05 17:50		412_00.1_15							Page 1/1
	dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav									
0		0.998551	0.998551	0.998551	0.998551	0.998551	0.998551	0.998551	
15		1.016813	1.014332	1.008033	0.999485	0.991124	0.985221	0.983261	
30		1.035288	1.030891	1.018778	1.002708	0.987623	0.976846	0.973321	
45		1.054538	1.048169	1.031751	1.010388	0.990924	0.977588	0.972907	
60		1.072441	1.065170	1.046031	1.022185	1.001031	0.987469	0.982911	
75		1.086205	1.078269	1.058421	1.033990	1.013453	1.000465	0.996318	

30 avr 05 17:50		412_00.1_30							Page 1/1
	dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav									
0		0.995193	0.995193	0.995193	0.995193	0.995193	0.995193	0.995193	
15		1.028155	1.023823	1.012415	0.997257	0.982897	0.972745	0.969001	
30		1.063798	1.055228	1.032618	1.004118	0.978251	0.960850	0.954487	
45		1.099339	1.086913	1.055325	1.016595	0.984149	0.964090	0.957729	
60		1.131017	1.116124	1.078271	1.034210	1.000134	0.981382	0.976114	
75		1.153403	1.136855	1.095964	1.050796	1.018474	1.003747	1.000510	

30 avr 05 17:50		412_00.1_45							Page 1/1
	dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav									
0		0.992334	0.992334	0.992334	0.992334	0.992334	0.992334	0.992334	
15		1.036217	1.030500	1.015440	0.996100	0.978439	0.966252	0.961819	
30		1.087588	1.075759	1.044741	1.007689	0.976767	0.957261	0.950785	
45		1.141088	1.123468	1.079211	1.028483	0.990100	0.970637	0.965092	
60		1.190100	1.167444	1.113319	1.055127	1.017385	1.003401	1.001842	
75		1.224964	1.199785	1.139906	1.079679	1.046137	1.041784	1.044678	

30 avr 05 17:50		412_00.1_60							Page 1/1
	dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav									
0		0.992522	0.992522	0.992522	0.992522	0.992522	0.992522	0.992522	
15		1.038405	1.032526	1.017142	0.997875	0.980564	0.969175	0.965313	
30		1.096945	1.083976	1.051767	1.014417	0.984712	0.968217	0.963295	
45		1.161160	1.141247	1.093575	1.042368	1.007797	0.994263	0.992091	
60		1.222014	1.197025	1.137866	1.077790	1.046220	1.043727	1.047979	
75		1.268252	1.239194	1.172243	1.110060	1.085972	1.097725	1.110092	

30 avr 05 17:50		412_00.1_75							Page 1/1
	dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav									
0		0.998891	0.998891	0.998891	0.998891	0.998891	0.998891	0.998891	
15		1.033934	1.029685	1.018851	1.005303	0.993668	0.985984	0.983439	
30		1.083451	1.074069	1.051067	1.024679	1.004958	0.994695	0.991841	
45		1.142708	1.128266	1.093541	1.057303	1.035061	1.028707	1.028739	
60		1.203353	1.184561	1.140550	1.098351	1.079838	1.083828	1.089638	
75		1.251317	1.229548	1.179591	1.135548	1.123819	1.140843	1.153618	

30 avr 05 17:50		412_01.0_0							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000		
15	1.002531	1.002531	1.002531	1.002531	1.002531	1.002531	1.002531		
30	1.013892	1.013892	1.013892	1.013892	1.013892	1.013892	1.013892		
45	1.035300	1.035300	1.035300	1.035300	1.035300	1.035300	1.035300		
60	1.065603	1.065603	1.065603	1.065603	1.065603	1.065603	1.065603		
75	1.095027	1.095027	1.095027	1.095027	1.095027	1.095027	1.095027		

30 avr 05 17:50		412_01.0_15							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.000125	1.000125	1.000125	1.000125	1.000125	1.000125	1.000125		
15	1.017337	1.015334	1.010497	1.004312	0.998397	0.994113	0.992194		
30	1.040223	1.036974	1.028276	1.017182	1.007193	1.000463	0.998110		
45	1.069686	1.065348	1.054285	1.041048	1.030241	1.023723	1.021644		
60	1.102289	1.097637	1.086382	1.074164	1.065836	1.062165	1.061378		
75	1.130028	1.125651	1.115630	1.106193	1.101989	1.102443	1.103473		

30 avr 05 17:50		412_01.0_30							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.004402	1.004402	1.004402	1.004402	1.004402	1.004402	1.004402		
15	1.032003	1.028837	1.020646	1.010036	1.000496	0.993972	0.991736		
30	1.068892	1.062264	1.046102	1.027115	1.011820	1.002925	0.999705		
45	1.110908	1.102016	1.080375	1.057527	1.042809	1.037551	1.036786		
60	1.153644	1.143345	1.119607	1.098353	1.090781	1.095102	1.098950		
75	1.187340	1.176734	1.153590	1.137074	1.139744	1.155963	1.165522		

30 avr 05 17:50		412_01.0_45							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.014041	1.014041	1.014041	1.014041	1.014041	1.014041	1.014041		
15	1.048387	1.044391	1.034235	1.021947	1.011689	1.005473	1.003506		
30	1.097468	1.088820	1.067923	1.045583	1.031134	1.025709	1.024849		
45	1.155674	1.142647	1.112951	1.086353	1.077131	1.082924	1.087711		
60	1.213864	1.198056	1.163654	1.139541	1.145573	1.173905	1.190276		
75	1.259381	1.242132	1.206691	1.189188	1.214757	1.269683	1.299547		

30 avr 05 17:50		412_01.0_60							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.025934	1.025934	1.025934	1.025934	1.025934	1.025934	1.025934		
15	1.060157	1.056430	1.046791	1.036149	1.028145	1.024250	1.023241		
30	1.115348	1.106401	1.085498	1.066040	1.057335	1.058805	1.061227		
45	1.184412	1.170626	1.139864	1.116933	1.119314	1.140535	1.153120		
60	1.257033	1.238693	1.201654	1.182861	1.208426	1.265391	1.296445		
75	1.314752	1.294453	1.255179	1.244283	1.297703	1.395970	1.449155		

30 avr 05 17:50		412_01.0_75							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.034373	1.034373	1.034373	1.034373	1.034373	1.034373	1.034373		
15	1.061292	1.058343	1.052456	1.045731	1.041479	1.040025	1.039521		
30	1.112140	1.105468	1.091197	1.079651	1.076647	1.081371	1.084897		
45	1.182269	1.172139	1.150740	1.137216	1.145790	1.169089	1.182172		
60	1.260945	1.247815	1.221505	1.212350	1.242004	1.297827	1.327795		
75	1.329203	1.313779	1.284669	1.282750	1.337184	1.430408	1.481136		

30 avr 05 17:50		412_10.0_0						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
15	1.009110	1.009110	1.009110	1.009110	1.009110	1.009110	1.009110	
30	1.038325	1.038325	1.038325	1.038325	1.038325	1.038325	1.038325	
45	1.089996	1.089996	1.089996	1.089996	1.089996	1.089996	1.089996	
60	1.160212	1.160212	1.160212	1.160212	1.160212	1.160212	1.160212	
75	1.227945	1.227945	1.227945	1.227945	1.227945	1.227945	1.227945	

30 avr 05 17:50		412_10.0_15						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.005889	1.005889	1.005889	1.005889	1.005889	1.005889	1.005889	
15	1.020489	1.019017	1.017539	1.016075	1.015026	1.014506	1.015185	
30	1.051069	1.050288	1.048494	1.047292	1.047692	1.048722	1.049567	
45	1.099846	1.099437	1.099613	1.102314	1.108866	1.115981	1.119030	
60	1.160228	1.161117	1.165527	1.176718	1.194140	1.210622	1.217468	
75	1.215081	1.217591	1.227785	1.248188	1.276735	1.303418	1.314597	

30 avr 05 17:50		412_10.0_30						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.023695	1.023695	1.023695	1.023695	1.023695	1.023695	1.023695	
15	1.039626	1.038725	1.037149	1.035751	1.035819	1.036675	1.037162	
30	1.077932	1.075263	1.072487	1.072732	1.078437	1.086895	1.091657	
45	1.131666	1.129684	1.128675	1.137102	1.158703	1.182904	1.193625	
60	1.195072	1.194332	1.199156	1.223118	1.268944	1.318126	1.339928	
75	1.250064	1.251360	1.263661	1.304670	1.376560	1.453729	1.488470	

30 avr 05 17:50		412_10.0_45						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.055479	1.055479	1.055479	1.055479	1.055479	1.055479	1.055479	
15	1.069566	1.069160	1.068674	1.070366	1.075829	1.081519	1.083854	
30	1.113380	1.111333	1.109727	1.117036	1.136804	1.159180	1.169327	
45	1.179228	1.175484	1.175581	1.196980	1.245759	1.301906	1.327735	
60	1.253806	1.251101	1.256991	1.301589	1.395011	1.505103	1.556386	
75	1.318251	1.316786	1.331227	1.400254	1.542098	1.712510	1.794153	

30 avr 05 17:50		412_10.0_60						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.088717	1.088717	1.088717	1.088717	1.088717	1.088717	1.088717	
15	1.098079	1.098341	1.100340	1.107181	1.118077	1.129215	1.133783	
30	1.145767	1.144885	1.146332	1.163025	1.196712	1.233941	1.250248	
45	1.222273	1.219602	1.223211	1.258229	1.333546	1.422981	1.464316	
60	1.314075	1.310191	1.319443	1.383199	1.521970	1.694519	1.778235	
75	1.393498	1.390826	1.407969	1.501500	1.708389	1.975410	2.108716	

30 avr 05 17:50		412_10.0_75						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.101982	1.101982	1.101982	1.101982	1.101982	1.101982	1.101982	
15	1.110954	1.111680	1.114895	1.122430	1.133434	1.143885	1.148388	
30	1.163537	1.163287	1.167327	1.184152	1.215919	1.250208	1.265552	
45	1.252960	1.251608	1.257276	1.290522	1.359272	1.440613	1.478820	
60	1.366032	1.363975	1.373893	1.431098	1.556059	1.713306	1.790414	
75	1.470660	1.468347	1.483894	1.566138	1.751691	1.996052	2.118365	

30 avr 05 17:50		443_00.1_0							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000		
15	1.000274	1.000274	1.000274	1.000274	1.000274	1.000274	1.000274		
30	1.002499	1.002499	1.002499	1.002499	1.002499	1.002499	1.002499		
45	1.008268	1.008268	1.008268	1.008268	1.008268	1.008268	1.008268		
60	1.018549	1.018549	1.018549	1.018549	1.018549	1.018549	1.018549		
75	1.029442	1.029442	1.029442	1.029442	1.029442	1.029442	1.029442		

30 avr 05 17:50		443_00.1_15							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	0.998616	0.998616	0.998616	0.998616	0.998616	0.998616	0.998616		
15	1.017039	1.014620	1.008215	0.999373	0.990996	0.985034	0.983083		
30	1.036221	1.031518	1.019248	1.002751	0.987613	0.976821	0.973099		
45	1.055439	1.049217	1.032185	1.010766	0.991416	0.978268	0.973647		
60	1.073879	1.066411	1.047045	1.023363	1.002623	0.989349	0.984844		
75	1.087681	1.079820	1.060089	1.036251	1.016181	1.003972	1.000359		

30 avr 05 17:50		443_00.1_30							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	0.996084	0.996084	0.996084	0.996084	0.996084	0.996084	0.996084		
15	1.029362	1.025200	1.013174	0.997815	0.983300	0.972972	0.969653		
30	1.066063	1.056865	1.034026	1.004746	0.978844	0.961680	0.955306		
45	1.101982	1.089336	1.056928	1.018371	0.985907	0.966513	0.960156		
60	1.134504	1.119003	1.080657	1.037128	1.003951	0.986918	0.981942		
75	1.157200	1.140310	1.099216	1.054979	1.024342	1.012695	1.010301		

30 avr 05 17:50		443_00.1_45							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	0.993970	0.993970	0.993970	0.993970	0.993970	0.993970	0.993970		
15	1.038792	1.033094	1.017379	0.998034	0.979796	0.967411	0.963512		
30	1.091877	1.079195	1.048002	1.010481	0.978845	0.960025	0.953788		
45	1.147086	1.128491	1.082826	1.032184	0.994825	0.976762	0.972529		
60	1.197306	1.174276	1.118544	1.060334	1.024901	1.015498	1.016028		
75	1.233669	1.207427	1.146061	1.086956	1.058106	1.060467	1.066556		

30 avr 05 17:50		443_00.1_60							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	0.994613	0.994613	0.994613	0.994613	0.994613	0.994613	0.994613		
15	1.042275	1.036127	1.020146	1.000278	0.982705	0.971360	0.967538		
30	1.103181	1.089806	1.056280	1.017909	0.988320	0.972732	0.968281		
45	1.170843	1.150072	1.100198	1.047789	1.014809	1.004511	1.004025		
60	1.235134	1.208526	1.145526	1.085894	1.058533	1.063159	1.071257		
75	1.282213	1.252506	1.182924	1.120699	1.103657	1.127225	1.145636		

30 avr 05 17:50		443_00.1_75							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	0.999739	0.999739	0.999739	0.999739	0.999739	0.999739	0.999739		
15	1.037120	1.032516	1.020769	1.006571	0.994259	0.986551	0.984126		
30	1.090255	1.080070	1.055139	1.027389	1.007362	0.997962	0.995580		
45	1.154023	1.138197	1.100470	1.062346	1.041411	1.038623	1.040423		
60	1.219226	1.198472	1.150434	1.106926	1.092498	1.104329	1.114426		
75	1.270527	1.246532	1.192338	1.147711	1.142979	1.172995	1.192882		

30 avr 05 17:50		443_01.0_0							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000		
15	1.003348	1.003348	1.003348	1.003348	1.003348	1.003348	1.003348		
30	1.017922	1.017922	1.017922	1.017922	1.017922	1.017922	1.017922		
45	1.044375	1.044375	1.044375	1.044375	1.044375	1.044375	1.044375		
60	1.080532	1.080532	1.080532	1.080532	1.080532	1.080532	1.080532		
75	1.115142	1.115142	1.115142	1.115142	1.115142	1.115142	1.115142		

30 avr 05 17:50		443_01.0_15							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.001012	1.001012	1.001012	1.001012	1.001012	1.001012	1.001012		
15	1.017741	1.015846	1.011707	1.006321	1.001346	0.997737	0.996009		
30	1.042004	1.039066	1.031726	1.022591	1.014544	1.009197	1.007442		
45	1.074468	1.070876	1.061883	1.051608	1.043989	1.040001	1.038932		
60	1.111108	1.107524	1.099092	1.091034	1.087314	1.087379	1.088030		
75	1.142744	1.139447	1.133131	1.129039	1.130622	1.135644	1.138131		

30 avr 05 17:50		443_01.0_30							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.008567	1.008567	1.008567	1.008567	1.008567	1.008567	1.008567		
15	1.033988	1.031270	1.024274	1.015416	1.007692	1.002599	1.000859		
30	1.071039	1.065086	1.051431	1.036052	1.024731	1.018956	1.016867		
45	1.114690	1.107088	1.089319	1.072342	1.064287	1.064482	1.065863		
60	1.160283	1.151747	1.133212	1.120108	1.122393	1.135108	1.142266		
75	1.196569	1.188016	1.171314	1.164963	1.180275	1.207859	1.222057		

30 avr 05 17:50		443_01.0_45							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.023453	1.023453	1.023453	1.023453	1.023453	1.023453	1.023453		
15	1.054248	1.050807	1.042449	1.032777	1.025380	1.021369	1.020328		
30	1.102371	1.094999	1.077453	1.060645	1.052505	1.052428	1.053734		
45	1.161801	1.150381	1.126057	1.108217	1.110038	1.125667	1.134608		
60	1.222169	1.208651	1.181413	1.169812	1.192522	1.236969	1.260425		
75	1.269791	1.255362	1.228660	1.226938	1.274643	1.352086	1.392064		

30 avr 05 17:50		443_01.0_60							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.040433	1.040433	1.040433	1.040433	1.040433	1.040433	1.040433		
15	1.070246	1.067114	1.059669	1.052215	1.047707	1.046617	1.046704		
30	1.124555	1.116911	1.100008	1.087047	1.086668	1.095421	1.100662		
45	1.195360	1.183251	1.158205	1.145917	1.162927	1.198693	1.217687		
60	1.270695	1.254829	1.225531	1.221863	1.270629	1.352291	1.395084		
75	1.331348	1.313593	1.283487	1.292235	1.377246	1.511542	1.581892		

30 avr 05 17:50		443_01.0_75							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.050229	1.050229	1.050229	1.050229	1.050229	1.050229	1.050229		
15	1.073776	1.071768	1.067012	1.063044	1.061573	1.062585	1.063856		
30	1.126283	1.120785	1.109035	1.102239	1.106877	1.118708	1.125312		
45	1.200654	1.191128	1.174073	1.169102	1.191461	1.229720	1.249364		
60	1.285317	1.273546	1.252175	1.256269	1.308052	1.391033	1.433375		
75	1.358617	1.344812	1.322802	1.337024	1.423464	1.556302	1.625923		

30 avr 05 17:50		443_10.0_0						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
15	1.010136	1.010136	1.010136	1.010136	1.010136	1.010136	1.010136	
30	1.042757	1.042757	1.042757	1.042757	1.042757	1.042757	1.042757	
45	1.099443	1.099443	1.099443	1.099443	1.099443	1.099443	1.099443	
60	1.175633	1.175633	1.175633	1.175633	1.175633	1.175633	1.175633	
75	1.248326	1.248326	1.248326	1.248326	1.248326	1.248326	1.248326	

30 avr 05 17:50		443_10.0_15						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.007136	1.007136	1.007136	1.007136	1.007136	1.007136	1.007136	
15	1.020851	1.019649	1.018970	1.018537	1.018713	1.019116	1.020244	
30	1.052355	1.052149	1.052062	1.053222	1.056093	1.059151	1.060475	
45	1.103964	1.104427	1.107152	1.113675	1.124356	1.134650	1.138955	
60	1.167503	1.169544	1.177625	1.194362	1.217761	1.238925	1.247681	
75	1.225178	1.229300	1.243849	1.271191	1.307263	1.340119	1.353602	

30 avr 05 17:50		443_10.0_30						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.028916	1.028916	1.028916	1.028916	1.028916	1.028916	1.028916	
15	1.041614	1.041464	1.041242	1.042163	1.044479	1.047208	1.048511	
30	1.079526	1.077734	1.078193	1.082968	1.094127	1.106664	1.112882	
45	1.133911	1.133810	1.137668	1.153807	1.183934	1.215433	1.229015	
60	1.199177	1.200767	1.212056	1.246864	1.305535	1.365813	1.392225	
75	1.255721	1.259647	1.280102	1.334482	1.422930	1.514621	1.555541	

30 avr 05 17:50		443_10.0_45						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.066982	1.066982	1.066982	1.066982	1.066982	1.066982	1.066982	
15	1.076183	1.076564	1.078509	1.083849	1.093036	1.101704	1.105577	
30	1.117529	1.117167	1.120261	1.135348	1.163666	1.193508	1.206695	
45	1.183349	1.182031	1.189381	1.222718	1.286798	1.356618	1.388055	
60	1.258198	1.258765	1.274814	1.336597	1.453129	1.585152	1.646194	
75	1.323337	1.325687	1.352243	1.443368	1.615367	1.816603	1.911900	

30 avr 05 17:50		443_10.0_60						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.107559	1.107559	1.107559	1.107559	1.107559	1.107559	1.107559	
15	1.109874	1.111057	1.116094	1.127738	1.144355	1.159422	1.166019	
30	1.154266	1.155384	1.163200	1.189622	1.235448	1.283241	1.303918	
45	1.230458	1.230312	1.242995	1.294123	1.391621	1.501598	1.552385	
60	1.322786	1.322429	1.343686	1.430628	1.603552	1.811822	1.912011	
75	1.402227	1.403603	1.435465	1.558585	1.811807	2.131457	2.289362	

30 avr 05 17:50		443_10.0_75						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.124546	1.124546	1.124546	1.124546	1.124546	1.124546	1.124546	
15	1.127136	1.128873	1.135101	1.147144	1.163384	1.178211	1.184309	
30	1.178519	1.179975	1.189116	1.215586	1.259693	1.305448	1.325754	
45	1.269713	1.270687	1.284076	1.332772	1.424544	1.529726	1.578521	
60	1.386226	1.386797	1.407418	1.487160	1.649185	1.848624	1.946229	
75	1.493853	1.494673	1.522954	1.633841	1.870737	2.178207	2.332104	

30 avr 05 17:50		490_00.1_0							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000		
15	1.000362	1.000362	1.000362	1.000362	1.000362	1.000362	1.000362		
30	1.002283	1.002283	1.002283	1.002283	1.002283	1.002283	1.002283		
45	1.008844	1.008844	1.008844	1.008844	1.008844	1.008844	1.008844		
60	1.019958	1.019958	1.019958	1.019958	1.019958	1.019958	1.019958		
75	1.032280	1.032280	1.032280	1.032280	1.032280	1.032280	1.032280		

30 avr 05 17:50		490_00.1_15							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	0.998460	0.998460	0.998460	0.998460	0.998460	0.998460	0.998460		
15	1.017080	1.014500	1.008270	0.999442	0.991245	0.985252	0.983425		
30	1.036175	1.031312	1.018911	1.003282	0.987848	0.977892	0.974243		
45	1.055300	1.048968	1.032613	1.011655	0.992894	0.980722	0.976188		
60	1.074257	1.067000	1.048079	1.025514	1.006225	0.994197	0.990075		
75	1.088654	1.081399	1.062071	1.039816	1.021831	1.011769	1.008273		

30 avr 05 17:50		490_00.1_30							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	0.996491	0.996491	0.996491	0.996491	0.996491	0.996491	0.996491		
15	1.029941	1.025634	1.013788	0.998718	0.984351	0.974465	0.970841		
30	1.066662	1.057394	1.034729	1.005816	0.980966	0.964302	0.957945		
45	1.102727	1.090368	1.058285	1.020366	0.989852	0.972121	0.966585		
60	1.135293	1.119966	1.082374	1.040802	1.010649	0.997323	0.994124		
75	1.158641	1.142056	1.102086	1.060898	1.035203	1.028094	1.027684		

30 avr 05 17:50		490_00.1_45							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	0.995320	0.995320	0.995320	0.995320	0.995320	0.995320	0.995320		
15	1.040247	1.034672	1.019419	0.999663	0.982581	0.970188	0.966614		
30	1.093450	1.081396	1.050249	1.012988	0.983030	0.966018	0.960656		
45	1.149981	1.131355	1.086063	1.036655	1.002702	0.988661	0.986343		
60	1.201083	1.177776	1.122776	1.067376	1.038642	1.036373	1.039679		
75	1.238413	1.212528	1.152033	1.097168	1.076753	1.090306	1.102394		

30 avr 05 17:50		490_00.1_60							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	0.997293	0.997293	0.997293	0.997293	0.997293	0.997293	0.997293		
15	1.045189	1.038995	1.023039	1.003370	0.986304	0.975536	0.971998		
30	1.107705	1.094050	1.060206	1.022372	0.994708	0.981478	0.978301		
45	1.177108	1.156059	1.105724	1.054784	1.026415	1.022335	1.024847		
60	1.243784	1.216391	1.153445	1.096407	1.077892	1.094893	1.109299		
75	1.293418	1.262170	1.192031	1.134824	1.131292	1.174209	1.202259		

30 avr 05 17:50		490_00.1_75							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.002183	1.002183	1.002183	1.002183	1.002183	1.002183	1.002183		
15	1.041320	1.036523	1.024165	1.009531	0.997254	0.989625	0.987340		
30	1.098541	1.087354	1.060698	1.032164	1.013046	1.006018	1.005014		
45	1.166966	1.149927	1.109385	1.070731	1.053557	1.057558	1.063344		
60	1.237233	1.214640	1.163159	1.119922	1.114239	1.141001	1.159140		
75	1.293037	1.266389	1.208236	1.165410	1.175059	1.228770	1.261577		

30 avr 05 17:50		490_01.0_0							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000		
15	1.005893	1.005893	1.005893	1.005893	1.005893	1.005893	1.005893		
30	1.027549	1.027549	1.027549	1.027549	1.027549	1.027549	1.027549		
45	1.064063	1.064063	1.064063	1.064063	1.064063	1.064063	1.064063		
60	1.111982	1.111982	1.111982	1.111982	1.111982	1.111982	1.111982		
75	1.156282	1.156282	1.156282	1.156282	1.156282	1.156282	1.156282		

30 avr 05 17:50		490_01.0_15							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.004056	1.004056	1.004056	1.004056	1.004056	1.004056	1.004056		
15	1.017989	1.017046	1.014564	1.011126	1.008647	1.006747	1.005435		
30	1.045239	1.043340	1.039388	1.034641	1.031004	1.029257	1.028320		
45	1.083680	1.081775	1.077986	1.074596	1.073914	1.075256	1.076193		
60	1.127841	1.126734	1.125191	1.125706	1.131874	1.139174	1.143110		
75	1.165581	1.165581	1.166718	1.173697	1.186524	1.201112	1.207792		

30 avr 05 17:50		490_01.0_30							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.017301	1.017301	1.017301	1.017301	1.017301	1.017301	1.017301		
15	1.036891	1.035257	1.031357	1.026735	1.023269	1.021428	1.020885		
30	1.073037	1.069318	1.061765	1.055001	1.052652	1.053755	1.054121		
45	1.119837	1.115531	1.106899	1.103494	1.109614	1.120510	1.126353		
60	1.170123	1.165836	1.159772	1.163966	1.185765	1.215267	1.228922		
75	1.210589	1.207358	1.204520	1.220195	1.259974	1.307479	1.330505		

30 avr 05 17:50		490_01.0_45							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.041883	1.041883	1.041883	1.041883	1.041883	1.041883	1.041883		
15	1.063259	1.061520	1.057614	1.054183	1.053312	1.054309	1.055014		
30	1.107645	1.103371	1.094686	1.090655	1.096562	1.107556	1.113077		
45	1.167768	1.160949	1.149910	1.151941	1.176457	1.211159	1.227583		
60	1.231032	1.223520	1.213932	1.229488	1.284801	1.357965	1.393505		
75	1.281841	1.274404	1.268389	1.299744	1.389366	1.504072	1.560778		

30 avr 05 17:50		490_01.0_60							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.067799	1.067799	1.067799	1.067799	1.067799	1.067799	1.067799		
15	1.086380	1.085122	1.082718	1.082718	1.086432	1.091578	1.094045		
30	1.136014	1.131877	1.125157	1.127468	1.144655	1.167985	1.178990		
45	1.206966	1.199855	1.190253	1.202307	1.248947	1.311070	1.341187		
60	1.285116	1.275923	1.266940	1.296966	1.389756	1.514062	1.575400		
75	1.348774	1.338970	1.333039	1.383135	1.525490	1.718746	1.815685		

30 avr 05 17:50		490_01.0_75							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.080798	1.080798	1.080798	1.080798	1.080798	1.080798	1.080798		
15	1.096281	1.095642	1.095255	1.097531	1.103480	1.110447	1.113488		
30	1.147348	1.144741	1.141387	1.148086	1.169227	1.195894	1.207917		
45	1.226320	1.221035	1.215731	1.232659	1.284040	1.350629	1.383146		
60	1.318773	1.311247	1.306337	1.340519	1.437991	1.569598	1.634646		
75	1.397938	1.389765	1.386852	1.439939	1.586856	1.789554	1.893239		

30 avr 05 17:50		490_10.0_0						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
15	1.013456	1.013456	1.013456	1.013456	1.013456	1.013456	1.013456	
30	1.054675	1.054675	1.054675	1.054675	1.054675	1.054675	1.054675	
45	1.123888	1.123888	1.123888	1.123888	1.123888	1.123888	1.123888	
60	1.212500	1.212500	1.212500	1.212500	1.212500	1.212500	1.212500	
75	1.293267	1.293267	1.293267	1.293267	1.293267	1.293267	1.293267	

30 avr 05 17:50		490_10.0_15						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.010657	1.010657	1.010657	1.010657	1.010657	1.010657	1.010657	
15	1.021150	1.020904	1.022390	1.025175	1.028372	1.031161	1.032967	
30	1.055584	1.057055	1.061487	1.068904	1.078139	1.085900	1.089052	
45	1.113933	1.116890	1.126286	1.142457	1.162829	1.180517	1.187527	
60	1.184820	1.190079	1.207105	1.236405	1.272720	1.303960	1.316507	
75	1.247151	1.254991	1.279828	1.321894	1.373538	1.418330	1.436312	

30 avr 05 17:50		490_10.0_30						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.040328	1.040328	1.040328	1.040328	1.040328	1.040328	1.040328	
15	1.045003	1.046294	1.050428	1.057321	1.065708	1.072920	1.075906	
30	1.080735	1.082300	1.091201	1.108185	1.131838	1.153775	1.163514	
45	1.137714	1.142303	1.159057	1.193691	1.243499	1.290300	1.309812	
60	1.206572	1.214327	1.242693	1.302125	1.387664	1.469572	1.504186	
75	1.265719	1.276450	1.316932	1.400519	1.521344	1.639574	1.690718	

30 avr 05 17:50		490_10.0_45						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.091633	1.091633	1.091633	1.091633	1.091633	1.091633	1.091633	
15	1.086941	1.089674	1.097971	1.112414	1.130788	1.146550	1.152963	
30	1.122118	1.126361	1.142446	1.175550	1.223833	1.269180	1.288079	
45	1.186729	1.192334	1.219014	1.281095	1.377308	1.473181	1.515044	
60	1.262876	1.272377	1.313700	1.414505	1.576563	1.747285	1.823805	
75	1.328467	1.341267	1.397504	1.535584	1.764142	2.014480	2.129800	

30 avr 05 17:50		490_10.0_60						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.143748	1.143748	1.143748	1.143748	1.143748	1.143748	1.143748	
15	1.128664	1.132838	1.145996	1.168510	1.196774	1.220960	1.230449	
30	1.165297	1.171316	1.194592	1.243825	1.315760	1.384162	1.413421	
45	1.238772	1.246898	1.282795	1.370253	1.510704	1.658094	1.723663	
60	1.330615	1.340905	1.393475	1.530741	1.766961	2.033425	2.157665	
75	1.410158	1.423682	1.492681	1.677487	2.011527	2.407224	2.597795	

30 avr 05 17:50		490_10.0_75						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.167551	1.167551	1.167551	1.167551	1.167551	1.167551	1.167551	
15	1.154415	1.159245	1.172674	1.195333	1.223025	1.246919	1.256757	
30	1.201006	1.207437	1.229903	1.278446	1.349048	1.417652	1.447169	
45	1.293219	1.300955	1.335696	1.420084	1.558630	1.706221	1.774104	
60	1.412589	1.422992	1.472178	1.602021	1.834800	2.106661	2.235757	
75	1.522467	1.533983	1.596096	1.770999	2.101835	2.507823	2.707434	

30 avr 05 17:50		555_00.1_0						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
15	0.998440	0.998440	0.998440	0.998440	0.998440	0.998440	0.998440	
30	0.994895	0.994895	0.994895	0.994895	0.994895	0.994895	0.994895	
45	0.992872	0.992872	0.992872	0.992872	0.992872	0.992872	0.992872	
60	0.995773	0.995773	0.995773	0.995773	0.995773	0.995773	0.995773	
75	1.001710	1.001710	1.001710	1.001710	1.001710	1.001710	1.001710	

30 avr 05 17:50		555_00.1_15						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	0.998187	0.998187	0.998187	0.998187	0.998187	0.998187	0.998187	
15	1.017295	1.014207	1.006752	0.997058	0.987702	0.981052	0.979895	
30	1.032106	1.026926	1.013077	0.994895	0.977866	0.965973	0.961792	
45	1.044886	1.037786	1.018972	0.995228	0.973838	0.959736	0.954814	
60	1.056053	1.047736	1.026479	1.000579	0.978416	0.964418	0.959908	
75	1.064768	1.056145	1.034318	1.008649	0.988102	0.976580	0.973028	

30 avr 05 17:50		555_00.1_30						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	0.994391	0.994391	0.994391	0.994391	0.994391	0.994391	0.994391	
15	1.029968	1.025100	1.011925	0.994614	0.978326	0.967076	0.962963	
30	1.065407	1.054842	1.028776	0.996364	0.967722	0.948809	0.941035	
45	1.096527	1.082055	1.045712	1.002699	0.967742	0.947362	0.941173	
60	1.122629	1.105325	1.062466	1.014621	0.980133	0.964212	0.960613	
75	1.140635	1.121757	1.076233	1.028287	0.998892	0.990384	0.990592	

30 avr 05 17:50		555_00.1_45						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	0.991948	0.991948	0.991948	0.991948	0.991948	0.991948	0.991948	
15	1.040776	1.034091	1.016509	0.994188	0.974100	0.960763	0.956141	
30	1.094761	1.080733	1.044651	1.002162	0.967724	0.947934	0.941717	
45	1.148708	1.127137	1.074959	1.017854	0.978647	0.962161	0.959930	
60	1.194913	1.168357	1.104489	1.040586	1.006377	1.003941	1.008606	
75	1.227628	1.197749	1.128222	1.063616	1.040444	1.056713	1.072031	

30 avr 05 17:50		555_00.1_60						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	0.993230	0.993230	0.993230	0.993230	0.993230	0.993230	0.993230	
15	1.046181	1.039064	1.020212	0.997571	0.977696	0.964964	0.960914	
30	1.111607	1.095376	1.055867	1.011161	0.979000	0.963343	0.959736	
45	1.180456	1.155630	1.096494	1.036328	1.002746	0.998310	1.001631	
60	1.244187	1.211779	1.137704	1.070012	1.047878	1.069517	1.088371	
75	1.290440	1.253573	1.170926	1.102417	1.098141	1.153090	1.189976	

30 avr 05 17:50		555_00.1_75						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	0.997570	0.997570	0.997570	0.997570	0.997570	0.997570	0.997570	
15	1.043229	1.037165	1.021802	1.003421	0.988052	0.979048	0.976204	
30	1.104652	1.090996	1.057479	1.021492	0.997922	0.989470	0.988552	
45	1.174928	1.153161	1.101985	1.053144	1.032144	1.038884	1.047228	
60	1.244420	1.215537	1.150272	1.095206	1.088615	1.126807	1.153041	
75	1.298530	1.264662	1.190848	1.135543	1.149078	1.225540	1.273532	

30 avr 05 17:50		555_10.0_0						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
15	1.016481	1.016481	1.016481	1.016481	1.016481	1.016481	1.016481	
30	1.065675	1.065675	1.065675	1.065675	1.065675	1.065675	1.065675	
45	1.144400	1.144400	1.144400	1.144400	1.144400	1.144400	1.144400	
60	1.239417	1.239417	1.239417	1.239417	1.239417	1.239417	1.239417	
75	1.320902	1.320902	1.320902	1.320902	1.320902	1.320902	1.320902	

30 avr 05 17:50		555_10.0_15						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.014213	1.014213	1.014213	1.014213	1.014213	1.014213	1.014213	
15	1.020034	1.020904	1.025126	1.031405	1.038603	1.043785	1.046236	
30	1.056030	1.059660	1.069179	1.083640	1.099962	1.113398	1.118197	
45	1.118283	1.123701	1.141105	1.167583	1.198424	1.223732	1.233325	
60	1.191464	1.200134	1.226089	1.268241	1.317417	1.357956	1.374181	
75	1.252511	1.263944	1.298811	1.354657	1.421057	1.475426	1.497285	

30 avr 05 17:50		555_10.0_30						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.051619	1.051619	1.051619	1.051619	1.051619	1.051619	1.051619	
15	1.045952	1.049097	1.058283	1.072096	1.087428	1.099702	1.104160	
30	1.077294	1.082788	1.101536	1.132778	1.170002	1.201733	1.214985	
45	1.133688	1.143515	1.175036	1.230154	1.299706	1.360923	1.385499	
60	1.201708	1.215697	1.262969	1.347801	1.458269	1.557412	1.599237	
75	1.257054	1.276018	1.336729	1.448153	1.596894	1.734553	1.792273	

30 avr 05 17:50		555_10.0_45						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.113765	1.113765	1.113765	1.113765	1.113765	1.113765	1.113765	
15	1.093214	1.098571	1.114437	1.138863	1.167167	1.190284	1.199246	
30	1.119378	1.129000	1.159899	1.213375	1.281700	1.341936	1.366332	
45	1.178779	1.192673	1.241546	1.334082	1.461003	1.579337	1.630050	
60	1.250716	1.270530	1.340668	1.480334	1.681866	1.881808	1.969172	
75	1.311220	1.335829	1.424777	1.607705	1.880584	2.163174	2.288589	

30 avr 05 17:50		555_10.0_60						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.173994	1.173994	1.173994	1.173994	1.173994	1.173994	1.173994	
15	1.139769	1.147043	1.168971	1.203562	1.243803	1.276915	1.289903	
30	1.164599	1.177089	1.218284	1.292122	1.389072	1.476524	1.512639	
45	1.230507	1.248427	1.311461	1.436975	1.617069	1.794221	1.870968	
60	1.315686	1.338777	1.426941	1.614694	1.904483	2.210766	2.347871	
75	1.388154	1.416642	1.526871	1.770944	2.167874	2.607316	2.812270	

30 avr 05 17:50		555_10.0_75						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.203984	1.203984	1.203984	1.203984	1.203984	1.203984	1.203984	
15	1.171813	1.179386	1.201504	1.236560	1.277593	1.311397	1.325018	
30	1.207318	1.219399	1.260490	1.334843	1.433908	1.524605	1.562762	
45	1.292886	1.310066	1.371851	1.497232	1.682020	1.869518	1.952553	
60	1.404817	1.427357	1.512383	1.699494	2.000031	2.329414	2.481728	
75	1.504929	1.531330	1.636781	1.880235	2.295136	2.774747	3.004217	

30 avr 05 17:50		660_01.0_0						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
15	0.995344	0.995344	0.995344	0.995344	0.995344	0.995344	0.995344	
30	1.005415	1.005415	1.005415	1.005415	1.005415	1.005415	1.005415	
45	1.025967	1.025967	1.025967	1.025967	1.025967	1.025967	1.025967	
60	1.057881	1.057881	1.057881	1.057881	1.057881	1.057881	1.057881	
75	1.092301	1.092301	1.092301	1.092301	1.092301	1.092301	1.092301	

30 avr 05 17:50		660_01.0_15						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	0.995233	0.995233	0.995233	0.995233	0.995233	0.995233	0.995233	
15	1.013701	1.009811	1.004673	0.998698	0.993286	0.989035	0.984899	
30	1.032162	1.028921	1.020818	1.010267	1.001447	0.995604	0.993542	
45	1.059344	1.054985	1.044814	1.033315	1.025821	1.022092	1.021244	
60	1.090349	1.086088	1.076077	1.068854	1.066442	1.067902	1.069341	
75	1.117563	1.114522	1.108317	1.106540	1.110388	1.119156	1.123620	

30 avr 05 17:50		660_01.0_30						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.004544	1.004544	1.004544	1.004544	1.004544	1.004544	1.004544	
15	1.030323	1.027131	1.019486	1.009401	1.000967	0.995219	0.993324	
30	1.067032	1.058152	1.042800	1.025403	1.013394	1.007961	1.003278	
45	1.103531	1.094752	1.074348	1.055744	1.049310	1.052050	1.054746	
60	1.143243	1.133250	1.111914	1.099370	1.106211	1.125037	1.135334	
75	1.175149	1.165544	1.147013	1.143303	1.166729	1.206313	1.226115	

30 avr 05 17:50		660_01.0_45						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.024783	1.024783	1.024783	1.024783	1.024783	1.024783	1.024783	
15	1.056548	1.052520	1.043078	1.032149	1.025025	1.021474	1.020598	
30	1.103333	1.094700	1.074373	1.055977	1.049822	1.052818	1.055596	
45	1.160553	1.145205	1.116588	1.098040	1.105668	1.129862	1.141868	
60	1.213474	1.197198	1.164850	1.155246	1.190003	1.255527	1.290915	
75	1.256242	1.238900	1.207677	1.210772	1.279483	1.395422	1.458493	

30 avr 05 17:50		660_01.0_60						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.051748	1.051748	1.051748	1.051748	1.051748	1.051748	1.051748	
15	1.081463	1.077836	1.069029	1.061632	1.058951	1.059737	1.060535	
30	1.135800	1.126190	1.105695	1.092939	1.097793	1.114275	1.123272	
45	1.203568	1.188056	1.157222	1.146728	1.176548	1.234512	1.265722	
60	1.275374	1.253299	1.216659	1.217924	1.293503	1.426480	1.499182	
75	1.329357	1.306288	1.269131	1.286429	1.415973	1.641631	1.767659	

30 avr 05 17:50		660_01.0_75						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.071035	1.071035	1.071035	1.071035	1.071035	1.071035	1.071035	
15	1.094371	1.091730	1.086240	1.083352	1.084745	1.089758	1.092142	
30	1.149386	1.141509	1.125529	1.119933	1.135357	1.162149	1.176726	
45	1.224003	1.210160	1.184216	1.183654	1.231312	1.312989	1.357365	
60	1.306666	1.286993	1.254998	1.267515	1.371403	1.551278	1.651564	
75	1.377436	1.353290	1.319272	1.349048	1.518021	1.816662	1.990822	

30 avr 05 17:50		681_00.1_0						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
15	0.997851	0.997851	0.997851	0.997851	0.997851	0.997851	0.997851	
30	0.991900	0.991900	0.991900	0.991900	0.991900	0.991900	0.991900	
45	0.986534	0.986534	0.986534	0.986534	0.986534	0.986534	0.986534	
60	0.986376	0.986376	0.986376	0.986376	0.986376	0.986376	0.986376	
75	0.990775	0.990775	0.990775	0.990775	0.990775	0.990775	0.990775	

30 avr 05 17:50		681_00.1_15						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	0.998810	0.998810	0.998810	0.998810	0.998810	0.998810	0.998810	
15	1.017949	1.014182	1.006427	0.996651	0.987544	0.980636	0.981383	
30	1.029442	1.023982	1.010360	0.991884	0.975197	0.963490	0.959147	
45	1.038746	1.031503	1.012747	0.989177	0.968116	0.954308	0.949590	
60	1.046224	1.038179	1.016779	0.991501	0.970173	0.956835	0.952639	
75	1.052520	1.043954	1.022851	0.998089	0.978553	0.968312	0.965345	

30 avr 05 17:50		681_00.1_30						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	0.996204	0.996204	0.996204	0.996204	0.996204	0.996204	0.996204	
15	1.030702	1.025762	1.012755	0.995169	0.979076	0.967926	0.963735	
30	1.064635	1.053238	1.027163	0.994493	0.966318	0.947909	0.938123	
45	1.091360	1.077003	1.040384	0.997530	0.963654	0.944376	0.938685	
60	1.113890	1.096418	1.053270	1.006562	0.973908	0.960140	0.957339	
75	1.128940	1.110220	1.064911	1.018391	0.991957	0.987345	0.989391	

30 avr 05 17:50		681_00.1_45						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	0.995656	0.995656	0.995656	0.995656	0.995656	0.995656	0.995656	
15	1.044199	1.037242	1.019641	0.997197	0.977469	0.963968	0.959504	
30	1.096091	1.081802	1.045494	1.003079	0.969419	0.950131	0.944709	
45	1.147617	1.124789	1.072085	1.015457	0.977988	0.964051	0.965134	
60	1.189731	1.162476	1.097895	1.035136	1.004505	1.008177	1.016143	
75	1.219194	1.188936	1.118872	1.056086	1.039151	1.066000	1.087573	

30 avr 05 17:50		681_00.1_60						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	0.999495	0.999495	0.999495	0.999495	0.999495	0.999495	0.999495	
15	1.052452	1.045429	1.026153	1.003148	0.983419	0.970930	0.967200	
30	1.116978	1.100238	1.059622	1.014749	0.983393	0.969637	0.967004	
45	1.183718	1.157949	1.096984	1.036883	1.005933	1.007566	1.013635	
60	1.245483	1.210873	1.134472	1.067482	1.051778	1.086581	1.114392	
75	1.288409	1.249593	1.164676	1.098196	1.104546	1.183342	1.234461	

30 avr 05 17:50		681_00.1_75						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.000979	1.000979	1.000979	1.000979	1.000979	1.000979	1.000979	
15	1.048815	1.042255	1.025666	1.006248	0.990189	0.981442	0.978765	
30	1.112672	1.097485	1.060806	1.022517	0.999353	0.993139	0.993803	
45	1.184129	1.159932	1.103585	1.051825	1.033935	1.049747	1.063812	
60	1.253791	1.221220	1.149139	1.091522	1.094004	1.154707	1.194880	
75	1.307487	1.268885	1.187310	1.130434	1.160565	1.276766	1.349611	

30 avr 05 17:50		555_01.0_0						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
15	1.005137	1.005137	1.005137	1.005137	1.005137	1.005137	1.005137	
30	1.027448	1.027448	1.027448	1.027448	1.027448	1.027448	1.027448	
45	1.066211	1.066211	1.066211	1.066211	1.066211	1.066211	1.066211	
60	1.117737	1.117737	1.117737	1.117737	1.117737	1.117737	1.117737	
75	1.165824	1.165824	1.165824	1.165824	1.165824	1.165824	1.165824	

30 avr 05 17:50		555_01.0_15						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.003556	1.003556	1.003556	1.003556	1.003556	1.003556	1.003556	
15	1.017933	1.016512	1.014232	1.011516	1.009259	1.007604	1.006338	
30	1.044359	1.042871	1.039462	1.035669	1.033345	1.032485	1.032242	
45	1.083600	1.082129	1.079208	1.077732	1.079475	1.082763	1.084414	
60	1.129259	1.128593	1.128472	1.132884	1.142718	1.153435	1.158064	
75	1.168775	1.169295	1.173146	1.184377	1.203121	1.222153	1.230387	

30 avr 05 17:50		555_01.0_30						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.019843	1.019843	1.019843	1.019843	1.019843	1.019843	1.019843	
15	1.037895	1.036578	1.033281	1.029570	1.027241	1.026219	1.026025	
30	1.073477	1.069837	1.063701	1.059022	1.059364	1.062896	1.063887	
45	1.119589	1.115979	1.109427	1.109494	1.121168	1.137427	1.145144	
60	1.170538	1.167126	1.163833	1.174912	1.205756	1.243132	1.260289	
75	1.212098	1.209824	1.211675	1.235460	1.287552	1.348107	1.375985	

30 avr 05 17:50		555_01.0_45						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.049727	1.049727	1.049727	1.049727	1.049727	1.049727	1.049727	
15	1.068317	1.066963	1.064195	1.062657	1.064102	1.066813	1.068322	
30	1.111106	1.107525	1.100946	1.100881	1.112273	1.128486	1.136184	
45	1.170612	1.164402	1.156665	1.165653	1.200673	1.246066	1.267094	
60	1.233486	1.227133	1.222109	1.248510	1.321324	1.414065	1.458657	
75	1.284554	1.278633	1.278806	1.324595	1.438581	1.583703	1.654457	

30 avr 05 17:50		555_01.0_60						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.082651	1.082651	1.082651	1.082651	1.082651	1.082651	1.082651	
15	1.097012	1.096214	1.095552	1.098414	1.105668	1.113889	1.117480	
30	1.144543	1.141094	1.137343	1.145717	1.171815	1.203647	1.218560	
45	1.214368	1.208208	1.202850	1.225087	1.288808	1.369979	1.408810	
60	1.292443	1.284309	1.280969	1.326495	1.448166	1.607914	1.686506	
75	1.356045	1.347674	1.349163	1.419942	1.603574	1.851198	1.976374	

30 avr 05 17:50		555_01.0_75						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.102472	1.102472	1.102472	1.102472	1.102472	1.102472	1.102472	
15	1.112754	1.112712	1.113881	1.120300	1.130367	1.141348	1.146107	
30	1.162176	1.160063	1.159846	1.173785	1.206380	1.244932	1.263129	
45	1.241446	1.236860	1.235568	1.264887	1.338785	1.433037	1.478449	
60	1.334722	1.327976	1.328651	1.381584	1.518589	1.702403	1.794030	
75	1.416136	1.407760	1.412251	1.490113	1.694588	1.978148	2.125015	

30 avr 05 17:50		660_10.0_0						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
15	1.009485	1.009485	1.009485	1.009485	1.009485	1.009485	1.009485	
30	1.041260	1.041260	1.041260	1.041260	1.041260	1.041260	1.041260	
45	1.097073	1.097073	1.097073	1.097073	1.097073	1.097073	1.097073	
60	1.174640	1.174640	1.174640	1.174640	1.174640	1.174640	1.174640	
75	1.250290	1.250290	1.250290	1.250290	1.250290	1.250290	1.250290	

30 avr 05 17:50		660_10.0_15						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.008635	1.008635	1.008635	1.008635	1.008635	1.008635	1.008635	
15	1.021972	1.019857	1.019398	1.019680	1.020607	1.021618	1.024016	
30	1.049877	1.049949	1.050946	1.053919	1.058350	1.063260	1.065318	
45	1.098790	1.099907	1.103904	1.113519	1.128973	1.143103	1.149196	
60	1.158917	1.162304	1.173207	1.196277	1.227796	1.255955	1.267440	
75	1.214724	1.220440	1.240051	1.276528	1.323700	1.366180	1.383484	

30 avr 05 17:50		660_10.0_30						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.035390	1.035390	1.035390	1.035390	1.035390	1.035390	1.035390	
15	1.045438	1.045438	1.046162	1.048673	1.053263	1.057637	1.059324	
30	1.081155	1.078730	1.080891	1.089265	1.105740	1.123777	1.133614	
45	1.129635	1.130378	1.137478	1.160728	1.202357	1.245000	1.263296	
60	1.189487	1.192352	1.208783	1.256368	1.334404	1.413429	1.447585	
75	1.241689	1.247567	1.275717	1.348296	1.463044	1.582692	1.635910	

30 avr 05 17:50		660_10.0_45						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.086244	1.086244	1.086244	1.086244	1.086244	1.086244	1.086244	
15	1.088804	1.089863	1.094195	1.103008	1.117335	1.131008	1.136526	
30	1.124971	1.125625	1.132380	1.155591	1.197970	1.240519	1.258543	
45	1.185335	1.184400	1.197270	1.246401	1.335606	1.431290	1.474903	
60	1.251663	1.253856	1.278392	1.365108	1.522929	1.702528	1.786461	
75	1.309796	1.315115	1.353068	1.477011	1.707963	1.983344	2.117065	

30 avr 05 17:50		660_10.0_60						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.145272	1.145272	1.145272	1.145272	1.145272	1.145272	1.145272	
15	1.134604	1.137250	1.146977	1.166259	1.193054	1.216777	1.226297	
30	1.170914	1.173937	1.188271	1.231180	1.301651	1.372666	1.404390	
45	1.238327	1.240357	1.262236	1.340851	1.484607	1.646973	1.722301	
60	1.321543	1.321905	1.356405	1.484359	1.735066	2.043102	2.195035	
75	1.389830	1.393950	1.443117	1.619813	1.984512	2.463029	2.706774	

30 avr 05 17:50		660_10.0_75						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.186249	1.186249	1.186249	1.186249	1.186249	1.186249	1.186249	
15	1.168251	1.172112	1.185634	1.210798	1.243375	1.272587	1.284627	
30	1.207788	1.211548	1.231933	1.285060	1.369638	1.457353	1.496494	
45	1.287166	1.290545	1.318696	1.411488	1.582254	1.782999	1.878819	
60	1.389223	1.392113	1.432226	1.577729	1.874902	2.260715	2.455458	
75	1.482767	1.485337	1.538647	1.736963	2.169954	2.769387	3.083614	

30 avr 05 17:50		660_00.1_0						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
15	0.997851	0.997851	0.997851	0.997851	0.997851	0.997851	0.997851	
30	0.991900	0.991900	0.991900	0.991900	0.991900	0.991900	0.991900	
45	0.986534	0.986534	0.986534	0.986534	0.986534	0.986534	0.986534	
60	0.986376	0.986376	0.986376	0.986376	0.986376	0.986376	0.986376	
75	0.990775	0.990775	0.990775	0.990775	0.990775	0.990775	0.990775	

30 avr 05 17:50		660_00.1_15						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	0.998810	0.998810	0.998810	0.998810	0.998810	0.998810	0.998810	
15	1.017949	1.014182	1.006427	0.996651	0.987544	0.980636	0.981383	
30	1.029442	1.023982	1.010360	0.991884	0.975197	0.963490	0.959147	
45	1.038746	1.031503	1.012747	0.989177	0.968116	0.954308	0.949590	
60	1.046224	1.038179	1.016779	0.991501	0.970173	0.956835	0.952639	
75	1.052520	1.043954	1.022851	0.998089	0.978553	0.968312	0.965345	

30 avr 05 17:50		660_00.1_30						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	0.996204	0.996204	0.996204	0.996204	0.996204	0.996204	0.996204	
15	1.030702	1.025762	1.012755	0.995169	0.979076	0.967926	0.963735	
30	1.064635	1.053238	1.027163	0.994493	0.966318	0.947909	0.938123	
45	1.091360	1.077003	1.040384	0.997530	0.963654	0.944376	0.938685	
60	1.113890	1.096418	1.053270	1.006562	0.973908	0.960140	0.957339	
75	1.128940	1.110220	1.064911	1.018391	0.991957	0.987345	0.989391	

30 avr 05 17:50		660_00.1_45						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	0.995656	0.995656	0.995656	0.995656	0.995656	0.995656	0.995656	
15	1.044199	1.037242	1.019641	0.997197	0.977469	0.963968	0.959504	
30	1.096091	1.081802	1.045494	1.003079	0.969419	0.950131	0.944709	
45	1.147617	1.124789	1.072085	1.015457	0.977988	0.964051	0.965134	
60	1.189731	1.162476	1.097895	1.035136	1.004505	1.008177	1.016143	
75	1.219194	1.188936	1.118872	1.056086	1.039151	1.066000	1.087573	

30 avr 05 17:50		660_00.1_60						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	0.999495	0.999495	0.999495	0.999495	0.999495	0.999495	0.999495	
15	1.052452	1.045429	1.026153	1.003148	0.983419	0.970930	0.967200	
30	1.116978	1.100238	1.059622	1.014749	0.983393	0.969637	0.967004	
45	1.183718	1.157949	1.096984	1.036883	1.005933	1.007566	1.013635	
60	1.245483	1.210873	1.134472	1.067482	1.051778	1.086581	1.114392	
75	1.288409	1.249593	1.164676	1.098196	1.104546	1.183342	1.234461	

30 avr 05 17:50		660_00.1_75						Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180	
tetav								
0	1.000979	1.000979	1.000979	1.000979	1.000979	1.000979	1.000979	
15	1.048815	1.042255	1.025666	1.006248	0.990189	0.981442	0.978765	
30	1.112672	1.097485	1.060806	1.022517	0.999353	0.993139	0.993803	
45	1.184129	1.159932	1.103585	1.051825	1.033935	1.049747	1.063812	
60	1.253791	1.221220	1.149139	1.091522	1.094004	1.154707	1.194880	
75	1.307487	1.268885	1.187310	1.130434	1.160565	1.276766	1.349611	

30 avr 05 17:50		681_01.0_0							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000		
15	0.995344	0.995344	0.995344	0.995344	0.995344	0.995344	0.995344		
30	1.005415	1.005415	1.005415	1.005415	1.005415	1.005415	1.005415		
45	1.025967	1.025967	1.025967	1.025967	1.025967	1.025967	1.025967		
60	1.057881	1.057881	1.057881	1.057881	1.057881	1.057881	1.057881		
75	1.092301	1.092301	1.092301	1.092301	1.092301	1.092301	1.092301		

30 avr 05 17:50		681_01.0_15							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	0.995233	0.995233	0.995233	0.995233	0.995233	0.995233	0.995233		
15	1.013701	1.009811	1.004673	0.998698	0.993286	0.989035	0.984899		
30	1.032162	1.028921	1.020818	1.010267	1.001447	0.995604	0.993542		
45	1.059344	1.054985	1.044814	1.033315	1.025821	1.022092	1.021244		
60	1.090349	1.086088	1.076077	1.068854	1.066442	1.067902	1.069341		
75	1.117563	1.114522	1.108317	1.106540	1.110388	1.119156	1.123620		

30 avr 05 17:50		681_01.0_30							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.004544	1.004544	1.004544	1.004544	1.004544	1.004544	1.004544		
15	1.030323	1.027131	1.019486	1.009401	1.000967	0.995219	0.993324		
30	1.067032	1.058152	1.042800	1.025403	1.013394	1.007961	1.003278		
45	1.103531	1.094752	1.074348	1.055744	1.049310	1.052050	1.054746		
60	1.143243	1.133250	1.111914	1.099370	1.106211	1.125037	1.135334		
75	1.175149	1.165544	1.147013	1.143303	1.166729	1.206313	1.226115		

30 avr 05 17:50		681_01.0_45							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.024783	1.024783	1.024783	1.024783	1.024783	1.024783	1.024783		
15	1.056548	1.052520	1.043078	1.032149	1.025025	1.021474	1.020598		
30	1.103333	1.094700	1.074373	1.055977	1.049822	1.052818	1.055596		
45	1.160553	1.145205	1.116588	1.098040	1.105668	1.129862	1.141868		
60	1.213474	1.197198	1.164850	1.155246	1.190003	1.255527	1.290915		
75	1.256242	1.238900	1.207677	1.210772	1.279483	1.395422	1.458493		

30 avr 05 17:50		681_01.0_60							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.051748	1.051748	1.051748	1.051748	1.051748	1.051748	1.051748		
15	1.081463	1.077836	1.069029	1.061632	1.058951	1.059737	1.060535		
30	1.135800	1.126190	1.105695	1.092939	1.097793	1.114275	1.123272		
45	1.203568	1.188056	1.157222	1.146728	1.176548	1.234512	1.265722		
60	1.275374	1.253299	1.216659	1.217924	1.293503	1.426480	1.499182		
75	1.329357	1.306288	1.269131	1.286429	1.415973	1.641631	1.767659		

30 avr 05 17:50		681_01.0_75							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.071035	1.071035	1.071035	1.071035	1.071035	1.071035	1.071035		
15	1.094371	1.091730	1.086240	1.083352	1.084745	1.089758	1.092142		
30	1.149386	1.141509	1.125529	1.119933	1.135357	1.162149	1.176726		
45	1.224003	1.210160	1.184216	1.183654	1.231312	1.312989	1.357365		
60	1.306666	1.286993	1.254998	1.267515	1.371403	1.551278	1.651564		
75	1.377436	1.353290	1.319272	1.349048	1.518021	1.816662	1.990822		

30 avr 05 17:50		681_10.0_0							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000		
15	1.009485	1.009485	1.009485	1.009485	1.009485	1.009485	1.009485		
30	1.041260	1.041260	1.041260	1.041260	1.041260	1.041260	1.041260		
45	1.097073	1.097073	1.097073	1.097073	1.097073	1.097073	1.097073		
60	1.174640	1.174640	1.174640	1.174640	1.174640	1.174640	1.174640		
75	1.250290	1.250290	1.250290	1.250290	1.250290	1.250290	1.250290		

30 avr 05 17:50		681_10.0_15							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.008635	1.008635	1.008635	1.008635	1.008635	1.008635	1.008635		
15	1.021972	1.019857	1.019398	1.019680	1.020607	1.021618	1.024016		
30	1.049877	1.049949	1.050946	1.053919	1.058350	1.063260	1.065318		
45	1.098790	1.099907	1.103904	1.113519	1.128973	1.143103	1.149196		
60	1.158917	1.162304	1.173207	1.196277	1.227796	1.255955	1.267440		
75	1.214724	1.220440	1.240051	1.276528	1.323700	1.366180	1.383484		

30 avr 05 17:50		681_10.0_30							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.035390	1.035390	1.035390	1.035390	1.035390	1.035390	1.035390		
15	1.045438	1.045438	1.046162	1.048673	1.053263	1.057637	1.059324		
30	1.081155	1.078730	1.080891	1.089265	1.105740	1.123777	1.133614		
45	1.129635	1.130378	1.137478	1.160728	1.202357	1.245000	1.263296		
60	1.189487	1.192352	1.208783	1.256368	1.334404	1.413429	1.447585		
75	1.241689	1.247567	1.275717	1.348296	1.463044	1.582692	1.635910		

30 avr 05 17:50		681_10.0_45							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.086244	1.086244	1.086244	1.086244	1.086244	1.086244	1.086244		
15	1.088804	1.089863	1.094195	1.103008	1.117335	1.131008	1.136526		
30	1.124971	1.125625	1.132380	1.155591	1.197970	1.240519	1.258543		
45	1.185335	1.184400	1.197270	1.246401	1.335606	1.431290	1.474903		
60	1.251663	1.253856	1.278392	1.365108	1.522929	1.702528	1.786461		
75	1.309796	1.315115	1.353068	1.477011	1.707963	1.983344	2.117065		

30 avr 05 17:50		681_10.0_60							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.145272	1.145272	1.145272	1.145272	1.145272	1.145272	1.145272		
15	1.134604	1.137250	1.146977	1.166259	1.193054	1.216777	1.226297		
30	1.170914	1.173937	1.188271	1.231180	1.301651	1.372666	1.404390		
45	1.238327	1.240357	1.262236	1.340851	1.484607	1.646973	1.722301		
60	1.321543	1.321905	1.356405	1.484359	1.735066	2.043102	2.195035		
75	1.389830	1.393950	1.443117	1.619813	1.984512	2.463029	2.706774		

30 avr 05 17:50		681_10.0_75							Page 1/1
dphi	0	30	60	90	120	150	180		
tetav									
0	1.186249	1.186249	1.186249	1.186249	1.186249	1.186249	1.186249		
15	1.168251	1.172112	1.185634	1.210798	1.243375	1.272587	1.284627		
30	1.207788	1.211548	1.231933	1.285060	1.369638	1.457353	1.496494		
45	1.287166	1.290545	1.318696	1.411488	1.582254	1.782999	1.878819		
60	1.389223	1.392113	1.432226	1.577729	1.874902	2.260715	2.455458		
75	1.482767	1.485337	1.538647	1.736963	2.169954	2.769387	3.083614		

부록 2. 정지궤도위성의 태양광반사 위치 예측 프로그램 포트란 코드

PROGRAM SUNGLINT

CC

```
C
C PROGRAM : TLE_SUB
C PURPOSE : CALCULATE SUB-SATELLITE POINT FROM TLE SET
C VARIABLE I/O
C DATE(6) : GREGORIAN DATE YYYY:MM:DD:HH:MM:SS SS I
C IDATE(6) : O
C STAECEF(3): GROUND STATION POSITION IN ECF
C SLONG : SUBSATELLITE LONGITUDE(RAD) O
C SLATI : SUBSATELLITE LATITUDE(RAD) O
```

```
C
C REFERENCE : SATELLITE COMMUNICATION AND SYSTEM ENGINEERING
C
```

CC

```
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION IDATE(6)
DIMENSION SATECEF(3), SATECI(6), STARTDATE(6), STOPDATE(6), DATE(6)
DIMENSION OSCELE(20)
REAL*8 EPOCHJD, STARTJD, STOPJD, TSINCE
COMMON /CONST/ PI, RAD, D2M, RE
```

```
C INITIALIZE
  INFILE = 11
  IOUTFILE = 12
  IOUTFILE2= 13
  IOUTFILE3= 14
```

```
C USEFUL CONSTANT
  PI=3.141592653589793D0
```

```
C OLD VARIABLE D2R
  RAD=PI/180.D0
```

```
C OLD VARIABLE R2D
  RADI=180.D0/PI
  D2M=1440.D0
```

RE=6378.137D0 ! EQUATORIAL EARTH RADIUS

C OPEN OBS FILE NAME

```
OPEN(INFILE,FILE='norad_tle.inp')
OPEN(IOUTFILE,FILE='sub_satellite.dat')
OPEN(IOUTFILE2,FILE='orbit_element.dat')
OPEN(IOUTFILE3,FILE='sunglint.dat')
```

C READ TLE DATA SET FROM INPUT FILE

```
CALL READ_TLE(INFILE,IYR,DAY,ISSC)
```

C THIS IS BECAUSE TLE HAVE ONLY 2 DIGIT OF YR (IT COVER 1950 - 2049)

```
IF(IYR.LT. 50) THEN
  IYEAR=2000+IYR
ELSE
  IYEAR=1900+IYR
ENDIF
```

C CALCULATE JULIAN DAY AT EPOCH TIME

```
CALL GRE2JUL(IYEAR,1,DAY,EPOCHJD)
CALL JUL2GRE(EPOCHJD,DATE)
```

C READ START AND STOP DATE

```
READ(INFILE,*) (STARTDATE(I),I=1,6)
READ(INFILE,*) (STOPDATE(I),I=1,6)
```

C CALCULATE JULIAN DATE AT START & STOP DATE

```
IYEAR = DINT(STARTDATE(1))
MONTH = DINT(STARTDATE(2))
DAY = STARTDATE(3) + STARTDATE(4)/24.D0 + STARTDATE(5)/24./60.D0
.   + STARTDATE(6)/60.D0/60.D0/24.D0
CALL GRE2JUL(IYEAR,MONTH,DAY,STARTJD)

IYEAR = DINT(STOPDATE(1))
MONTH = DINT(STOPDATE(2))
DAY = STOPDATE(3) + STOPDATE(4)/24.D0 + STOPDATE(5)/24./60.D0
.   + STOPDATE(6)/60.D0/60.D0/24.D0
CALL GRE2JUL(IYEAR,MONTH,DAY,STOPJD)
```

C OUTPUT STEP SIZE IN MIN

```
READ(INFILE,*) STEP
```


C WRITING HEADER OF OUTPUT

```
WRITE(IOUTFILE, 100)
WRITE(IOUTFILE3, 103)
```

C MAIN LOOP

```
TMPJD = STARTJD
DO WHILE( TMPJD .LE. STOPJD)
```

C CALCULATE ECI COORDINATE OF SATELLITE BY MSGP4

```
TSINCE = (TMPJD - EPOCHJD)*D2M
CALL MSGP4(TSINCE,SATECI)
```

C CALCULATE ORBITAL ELEMENT

```
CALL EQNOX(SATECI,3.986005D05,OSCELE)
```

```
SMAXIS =OSCELE(1)
ECC     =OSCELE(7)
DINC    =OSCELE(8)*RADI
RAAN    =OSCELE(9)*RADI
AROP    =OSCELE(10)*RADI
DMA     =OSCELE(11)*RADI
```

C CALCULATE GMST AND CONVERT GMST UNIT FROM HOUR TO RADIAN

```
CALL CAL_GMST(TMPJD, GMST)
GMST=GMST*15.D0*RAD
```

C ECF COORD. OF SATELLITE

```
SATECF(1) = SATECI(1)*DCOS(GMST)+SATECI(2)*DSIN(GMST)
SATECF(2) =-SATECI(1)*DSIN(GMST)+SATECI(2)*DCOS(GMST)
SATECF(3) = SATECI(3)
```

C CALCULATE SUBSATELLITE POINT

```
TMP = DSQRT(SATECF(1)*SATECF(1) + SATECF(2)*SATECF(2) )
SLONG = DATAN2(SATECF(2),SATECF(1))
SLATI = DATAN( SATECF(3)/TMP)
IF(SLONG .LT. 0.D0) SLONG = SLONG + 2.D0*PI
```

C SUBSATELLITE POINT (DEG)

SLONG = SLONG/RAD

SLATI = SLATI/RAD

C CALCULATE OF SUN-GLINT POINTS FOR GEO

CALL ECCS(TMPJD, ECLAT, ECLON)

CALL EQCS(TMPJD, ECLAT, ECLON, DEC, RA)

CALL NEWGRAPH(TMPJD, SLATI, SLONG, GLAT, GLON, AERR)

CALL GECS(GLAT, GLON, SLATI, SLONG, ASAT, ZSAT)

CALL HOCS(TMPJD, GLAT, GLON, DEC, RA, ALT, AZI)

CALL JUL2GRE(TMPJD,DATE)

DO I=1,6

 IDATE(I)=DATE(I)

ENDDO

WRITE(IOUTFILE, 101) (IDATE(I),I=1,5),DATE(6), SLATI, SLONG

WRITE(IOUTFILE2,102) (IDATE(I),I=1,5),DATE(6), SMAXIS, ECC, DINC,

1 RAAN, AROP, DMA

100 FORMAT(/,10X,'SUBSATELLITE POINT ', /,' YEAR MTH DAY HH MM S
 .S.SS LAITITUDE LONGITUDE ')

101 FORMAT(3X,I4,3X,I2,3X,I2,3X,I2,':',I2,':',F5.2,5X, F10.4,5X,F10.4)

102 FORMAT(3X,I4,3X,I2,3X,I2,3X,I2,':',I2,':',F5.2,5X, 6(F15.4,2X))

103 FORMAT(/,10X,'SUN-GLINT POINT ', /,' YEAR MTH DAY HH MM S
 .S.SS LAITITUDE LONGITUDE ')

 IF (AERR .EQ. .0D0) THEN

 WRITE(IOUTFILE3, 200) (IDATE(I),I=1,5),DATE(6), GLAT, GLON

200 FORMAT (3X,I4,3X,I2,3X,I2,3X,I2,':',I2,':',

 ,F5.2,5X,F9.2,9X,F7.2)

 ELSE

 WRITE(IOUTFILE3, 201) (IDATE(I),I=1,5),DATE(6)

201 FORMAT (3X,I4,3X,I2,3X,I2,3X,I2,':',I2,':',F5.2,5X,

 'GLINT DOES NOT LIE!')

 END IF

C PROCESS NEXT STEP

```

    TMPJD = TMPJD + STEP/D2M
    ENDDO

C   ENDOF MAIN LOOP

999  CLOSE(INFILE)
      CLOSE(OUTFILE)
      CLOSE(OUTFILE2)
      CLOSE(OUTFILE3)

      STOP
      END

C   FIND POSITION OF SUN IN THE ECLIPTIC COORDINATE SYSTEM
C   OUTPUT : ECLAT, ECLON (DEG)
      SUBROUTINE ECCS(TMPJD, ECLAT, ECLON)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
      PARAMETER (ELE=.279403303D3, ELP=.282768422D3)
      PARAMETER (ECC=.16713D-1, PI=.3141592654D1)
      DOUBLE PRECISION JDEP
      RAD=PI/.18D3

      JDEP=.24478915D7
      DAYS=TMPJD-JDEP
      AN=(.36D3/.365242191D3)*DAYS
      M=DINT(AN/.36D3)
      AN=AN-(M*.36D3)
      AM=AN+ELE-ELP
      IF (AM .LT. .0D0) AM=AM+.36D3
      EC=(.36D3/PI)*ECC*DSIN(AM*RAD)
      ECLON=AN+EC+ELE
      IF (ECLON .GT. .36D3) ECLON=ECLON-.36D3
      IF (ECLON .LT. .0D0) ECLON=ECLON+.36D3
      ECLAT=.0D0

      RETURN
      END

C   FIND POSITION OF SUN IN THE EQUATORIAL COORDINATE SYSTEM
C   OUTPUT : RA, DEC (DEG)
      SUBROUTINE EQCS(TMPJD, ECLAT, ECLON, DEC, RA)

```

```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
PARAMETER (PI=.3141592654D1)
DOUBLE PRECISION JDEP
RAD=PI/.18D3
RADI=.18D3/PI
JDEP=.2451545D7
DAYS=TMPJD-JDEP
T=DAYS/.36525D5
DEP=.46815D2*T+.6D-3*T**.2D1-.181D-2*T**.3D1
EP=.23439292D2-DEP/.36D4
ECLON1=ECLON*RAD
ECLAT1=ECLAT*RAD
EP=EP*RAD
TEMP1=DSIN(ECLAT1)*DCOS(EP)
TEMP2=DCOS(ECLAT1)*DSIN(EP)*DSIN(ECLON1)
DEC=DASIN(TEMP1+TEMP2)*RADI
ANR=DSIN(ECLON1)*DCOS(EP)-DTAN(ECLAT1)*DSIN(EP)
DNR=DCOS(ECLON1)
RA=DATAN2(ANR, DNR)*RADI

RETURN
END

```

```

C      SUBROUTINE NEWGRAPH
C      FIND THE POSITION OF GLINT USING NEWTON RAPHSON METHOD
C      INPUT : SLATI, SLONG (DEG)
C      OUTPUT : GLAT, GLON (DEG), AERR

```

```

SUBROUTINE NEWGRAPH(TMPJD, SLATI, SLONG, GLAT, GLON, AERR)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
DIMENSION DATE(6)
PARAMETER (HSAT=.35786D8, ERAD=.6378D7)
PARAMETER (PI=.3141592654D1)
RAD=PI/.18D3
RADI=.18D3/PI
CDIFF=.1D1/.36D4*RAD

```

```

C      OUPUT : DEG
CALL ECCS(TMPJD, ECLAT, ECLON)
CALL EQCS(TMPJD, ECLAT, ECLON, DEC, RA)

```

```
CALL JUL2GRE(TMPJD, DATE)
TIME=DATE(4)+DATE(5)/.6D2+DATE(6)/.36D4
```

```
GLAT=(DEC+SLATI)/.2D1
SANG=(.12D2-TIME)*.15D2
```

```
IF (SANG .LT. .0D0) SANG=SANG+.36D3
```

```
DIFF=DABS(SANG-SLONG)
IF (DIFF .GT. .18D3) THEN
    DIFF=.36D3-DIFF
    GLON=DMAX1(SANG, SLONG)+DIFF/.2D1
ELSE
    GLON=DMIN1(SANG, SLONG)+DIFF/.2D1
END IF
IF (GLON .GT. .36D3) GLON=GLON-.36D3
IF (DIFF .GT. .12D3) THEN
    AERR=-.1D1
    RETURN
END IF
```

```
GLAT1=GLAT*RAD
GLON1=GLON*RAD
SLAT1=SLATI*RAD
SLON1=SLONG*RAD
DEC1=DEC*RAD
```

```
KK=0
```

```
150  KK=KK+1
    DLAT=GLAT1-SLAT1
    DLON=GLON1-SLON1
    OLDGLAT1=GLAT1
    OLDGLON1=GLON1
    GLON2=GLON1*RADI
```

```
HANG=HOURANG(TMPJD, GLON2, RA)
HANG1=HANG*.15D2*RAD
```

```
U1=(HSAT+ERAD)*DCOS(DLAT)*DCOS(DLON)-ERAD
U2=DSIN(GLAT1)*DSIN(DEC1)+DCOS(DEC1)*DCOS(GLAT1)*DCOS(HANG1)
```

```

U3=DSIN(DLON)
U4=-DCOS(DEC1)*DCOS(GLAT1)*DSIN(HANG1)
V1=HSAT**.2D1+.2D1*ERAD*(ERAD+HSAT)*(.1D1-DCOS(DLAT)*DCOS(DLON))
V2=DCOS(DLON)*DSIN(DLAT)
V3=DSIN(DEC1)-DSIN(GLAT1)*U2
F0=DASIN(U1/SQRT(V1))-DASIN(U2)
G0=DATAN2(U3,V2)-DATAN2(U4, V3)
DU DT1=- (ERAD+HSAT)*DSIN(DLAT)*DCOS(DLON)
DU DT2=DCOS(GLAT1)*DSIN(DEC1)-DSIN(GLAT1)*DCOS(DEC1)*DCOS(HANG1)
DU DT3=.0D0
DU DT4=DCOS(DEC1)*DSIN(GLAT1)*DSIN(HANG1)
DU DP1=- (ERAD+HSAT)*DCOS(DLAT)*DSIN(DLON)
DU DP2=.0D0
DU DP3=DCOS(DLON)
DU DP4=.0D0
DV DT1=.2D1*ERAD*(HSAT+ERAD)*DSIN(DLAT)*DCOS(DLON)
DV DT2=DCOS(DLAT)*DCOS(DLON)
XX1=-.2D1*DSIN(GLAT1)*DCOS(GLAT1)*DSIN(DEC1)
XX2=DCOS(GLAT1)*DSIN(GLAT1)*DCOS(DEC1)*DCOS(HANG1)
DV DT3=XX1+XX2
DV DP1=.2D1*ERAD*(HSAT+ERAD)*DCOS(DLAT)*DSIN(DLON)
DV DP2=-DSIN(DLAT)*DSIN(DLON)
DV DP3=.0D0
T1=.1D1/(SQRT(.1D1-(U1/SQRT(V1))**.2D1))
T2=.1D1/(SQRT(.1D1-U2**.2D1))
T3=.1D1/(.1D1+(U3/V2)**.2D1)
T4=.1D1/(.1D1+(U4/V3)**.2D1)
TEMP1=(SQRT(V1)*DU DT1-U1*DV DT1/(SQRT(V1)*.2D1))/V1
TEMP2=(SQRT(V1)*DU DP1-U1*DV DP1/(SQRT(V1)*.2D1))/V1
TEMP3=(V2*DU DT3-U3*DV DT2)/V2**.2D1
TEMP4=(V2*DU DP3-U3*DV DP2)/V2**.2D1
TEMP5=(V3*DU DT4-U4*DV DT3)/V3**.2D1
TEMP6=(V3*DU DP4-U4*DV DP3)/V3**.2D1
DFDT=T1*TEMP1-T2*DU DT2
DFDP=T1*TEMP2-T2*DU DP2
DGDT=T3*TEMP3+T4*TEMP5*DV DT3
DGDP=T3*TEMP4+T4*TEMP6*DV DP3
AK=(F0*DGDT-G0*DFDT)/(DGDP*DFDT-DFDP*DGDT)
AH=-(AK*DFDP+F0)/DFDT
GLAT1=GLAT1+AH
GLON1=GLON1+AK
IF (GLON1 .LT. .0D0) GLON1=GLON1+.2D1*PI

```

```

IF (GLON1 .GT. .2D1*PI) GLON1=GLON1-.2D1*PI
IF (GLAT1 .LT. -PI/.2D1) GLAT1=-PI-GLAT1
IF (GLAT1 .GT. PI/.2D1) GLAT1=PI-GLAT1
ALATD=DABS(GLAT1-OLDGLAT1)
ALOND=DABS(GLON1-OLDGLON1)
IF (ALOND .GT. PI) ALOND=.2D1*PI-ALOND
IF (KK .GT. 150) THEN
    AERR=-.2D0
    RETURN
END IF
IF (ALOND .GT. CDIFF .AND. ALATD .GT. CDIFF) GOTO 150
GLAT=GLAT1*RADI
GLON=GLON1*RADI
AERR=.0D0
RETURN
END

```

```

C    SUBROUTINE GSCAN
C    FIND THE POSITION OF GLINT USING GRID SCANNING METHOD

```

```

SUBROUTINE GSCAN(TMPJD, SLATI, SLONG, GLAT, GLON, AERR)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
PARAMETER (PI=.3141592654D1)

```

```

RAD=PI/.18D3
RADI=.18D3/PI

```

```

CALL ECCS(TMPJD, ECLAT, ECLON)

```

```

C    OUTPUT : RA, DEC (DEG)
CALL EQCS(TMPJD, ECLAT, ECLON, DEC, RA)
AINC=.1D1/.36D4

DO 201, GLAT=-.85D2, .85D2, AINC
    DO 101, GLON=-.10D2, .160D3, AINC
        GLON2=GLON
        IF (GLON2 .LT. .0D0) GLON2=GLON2+.36D3
        CALL GECS(GLAT, GLON2, SLATI, SLONG, ASAT, ZSAT)
        CALL HOCS(TMPJD, GLAT, GLON2, DEC, RA, ALT, AZI)
        DLAT=DABS(ASAT-ALT)
        DLON=DABS(DABS(ZSAT-AZI)-.18D3)
    
```

IF (DLAT .LE. AINC .AND. DLON .LE. AINC) GOTO 150

101 CONTINUE
201 CONTINUE
AERR=-.1D1
RETURN
150 AERR=.0D0
RETURN
END

C SUBROUTINE HOCS
C FIND POSITION OF SUN IN THE HORIZON COORDINATE SYSTEM
C OUTPUT : ALT, AZI (DEG)

SUBROUTINE HOCS(TMPJD, GLAT, GLON, DEC, RA, ALT, AZI)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
PARAMETER (PI=.3141592654D1)

RAD=PI/.18D3
RADI=.18D3/PI

HANG=HOURANG(TMPJD, GLON, RA)
C CALL GHANG(TMPJD, GHA)
HANG1=HANG*.15D2*RAD

DEC1=DEC*RAD
GLAT1=GLAT*RAD

U1=DSIN(DEC1)*DSIN(GLAT1)+DCOS(DEC1)*DCOS(GLAT1)*DCOS(HANG1)
ALT=DASIN(U1)*RADI
U2=-DCOS(DEC1)*DSIN(HANG1)*DCOS(GLAT1)
V2=DSIN(DEC1)-DSIN(GLAT1)*DSIN(ALT*RAD)
AZI=DATAN2(U2,V2)*RADI

RETURN
END

C SUBROUTINE GECS
C FIND POSITION OF SATELLITE IN THE GEOGRAPHIC COORDINATE SYSTEM
C OUTPUT : ASAT, ZSAT (DEG)

SUBROUTINE GECS(GLAT, GLON, SLATI, SLONG, ASAT, ZSAT)


```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
PARAMETER (HSAT=.35786D8, ERAD=.6378D7)
PARAMETER (PI=.3141592654D1)
RAD=PI/.18D3
RADI=.18D3/PI

GLAT1=GLAT*RAD
GLON1=GLON*RAD
SLAT1=SLATI*RAD
SLON1=SLONG*RAD
DLAT=(GLAT1-SLAT1)
DLON=(GLON1-SLON1)
U1=(HSAT+ERAD)*DCOS(DLAT)*DCOS(DLON)-ERAD
V1=HSAT*.2D1+.2D1*ERAD*(ERAD+HSAT)*(.1D1-DCOS(DLAT)*DCOS(DLON))
U2=DSIN(DLON)
V2=DCOS(DLON)*DSIN(DLAT)
ASAT=DASIN(U1/SQRT(V1))*RADI
ZSAT=(DATAN2(U2, V2)+PI)*RADI
IF (ZSAT .GT. .36D3) ZSAT=ZSAT-.36D3

RETURN
END

```

```

C   CALCULATE GREENICH HOUR ANGLE
C   INPUT  : TMPJD
C   OUTPUT : GHA  (RADIAN)

```

```

SUBROUTINE GHANG(TMPJD, GHA)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
DIMENSION DATE(6)
PARAMETER (PI=3.1415926541D0)
PI2=2.0D0*PI
RAD=PI/.18D3

CALL JUL2GRE(TMPJD, DATE)
TIME=DATE(4)+DATE(5)/.6D2+DATE(6)/.36D4

DJ0=TMPJD+2.4D+6
DJ1=DJ0-2433282.5D0

```

```

C   PRIME MERIDIAN

```

C ADDING +PI2

PM=100.0755426042D0+360.98564734584D0*(DJ1-67.D0/86400.D0)

PM=DMOD(PM+360.0D0, 360.0D0)

C GREENICH HOUR ANGLE

C ADDING +PI2

GHA=PM+(15.0D0*1.00273790935D0)*TIME

GHA=GHA*RAD

GHA=DMOD(GHA+PI2, PI2)

RETURN

END

C FUNCTION GST

C FIND THE GREENWHICH SIDERAL TIME

DOUBLE PRECISION FUNCTION GST(TMPJD)

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)

DIMENSION DATE(6)

DOUBLE PRECISION JDEP

JDEP=.2451545D7

JD=TMPJD

DAYS=JD-JDEP

CALL JUL2GRE(TMPJD, DATE)

TIME=DATE(4)+DATE(5)/.6D2+DATE(6)/.36D4

T=(DAYS)/.36525D5

T0=.6697374558D1+.2400051336D4*T+.25862D-4*T**2D1

TT=DINT(DABS(T0)/.24D2)+.1D1

T0=T0+TT*.24D2

GST1=TIME*.1002737909D1+T0

TT=DINT(GST1/.24D2)

GST1=GST1-TT*.24D2

GST=GST1

RETURN

END

C FUNCTION HOURANG

C FIND THE HOUR ANGLE

DOUBLE PRECISION FUNCTION HOURANG(TMPJD, GLON, RA)

```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
DOUBLE PRECISION LST
GLON1=GLON
IF (GLON1 .GT. .18D3) GLON1=GLON1-.36D3
LST=GLON1/.15D2+GST(TMPJD)
IF (LST .GT. .24D2) LST=LST-.24D2
IF (LST .LT. .0D0) LST=LST+.24D2
HANG=(LST-RA/.15D2)
IF (HANG .LT. .0D0) HANG=HANG+.24D2
HOURANG=HANG
RETURN
END

```

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

```

C   SUBROUTNE CALCULATE GMST (HOUR)
C
C   INPUT PARAMETER
C     AJD : JULIAN DAY (DAY)
C   RETURN VALUE
C     GMST : GREENWICH MEAN SIDEREAL TIME
C   VARIABLES
C     AJD0 : JULIAN DAY AT 0H UT OF AJD
C     GMST0 : GREENWICH SIDEREAL TIME AT AJD0
C     T : THE TIME ELAPSED SINCE JAN 1,2000,12H UT1
C     OMEGAE : THE RATE OF ROTATION OF THE EARTH (RAD/SEC)

```

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

```

SUBROUTINE CAL_GMST(AJD,GMST)

```

```

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

```

```

C   USEFUL CONSTANT
D2S=24.D0*60.D0*60.D0
PI=DASIN(1.D0)*2.D0
RAD=PI/180.D0
OMEGAE=7.29211586D-5

TMP=AJD-DINT(AJD)
IF(TMP.GE.0.5D0) THEN
  TMP=TMP-0.5D0
  AJD0=AJD-TMP
ELSE
  TMP=TMP+0.5D0

```

```

    AJD0=AJD-TMP
  ENDIF
  TMP=TMP*D2S

```

```

C  CALCULATING GMST AT AJD

```

```

    T=(AJD0-2451545.D0)/36525.D0
    TMP1=8640184.812866D0*T+0.093104*T*T-0.000006210D0*T*T*T
    DO WHILE(TMP1 .LT. 0.D0)
      TMP1=TMP1+D2S
    ENDDO
    GMST0=24110.54841D0+TMP1
    GMST0=GMST0/60.D0/60.D0
    FOD=OMEGAE*TMP/RAD/15.D0 ! FRACTION OF DAY(HOUR)
    GMST=GMST0+FOD
    IF(GMST .GE. 24.D0) GMST=GMST-24.D0
  RETURN
  END

```

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

```

C  SUBROUTINE GRE2JUL

```

```

C    PURPOSE

```

```

C      : CALCULATE JULIAN DAY FROM ARBITRARY GREGORIAN DATE

```

```

C    INPUT PARAMETER

```

```

C      YEAR   : 4DIGIT (EX. 1998)

```

```

C      MONTH  : 2DIGIT (EX. 2,11)

```

```

C      DAY    : 2DIGIT (EX. 21 )

```

```

C    RETURN VALUE

```

```

C      JD    : JULIAN DAY (DAY)

```

```

C

```

```

C    REFERENCE

```

```

C      ASTRONOMICAL ALGORITHMS (JEAN MEEUS)

```

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

```

SUBROUTINE GRE2JUL(YEAR,MONTH,DAY,JD)

```

```

DOUBLE PRECISION JD,DAY,D

```

```

INTEGER YEAR,MONTH,Y,M,A,B

```

```

Y=YEAR

```

```

M=MONTH

```

```

D=DAY

```

```

IF (M .LE. 2) THEN

```

```

  Y=Y-1

```

```

M=M+12
ENDIF
A=INT(Y/100)
B=2-A+INT(A/4)
JD=INT(365.25*(Y+4716))+INT(30.6*(M+1))+D+B-1524.5D0
RETURN
END

```

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

```

C  SUBROUTINE JUL2GRE
C  PURPOSE
C    CALCULATE GREGORIAN DATE FROM JULIAN DAY
C  INPUT PARAMETER
C    AJD : JULIAN DAY
C  RETURN VALUE
C    DATE(6) : GREGORIAN DATE
C    YEAR, MONTH, DAY, HOUR, MINUTE, SECOND
C  REFERENCE
C    ASTRONOMICAL ALGORITHMS

```

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

```

SUBROUTINE JUL2GRE(AJD,DATE)

```

```

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION JD,DATE(6)
DIMENSION DATE(6)

```

```

Z=AJD+0.5D0
F=Z-DINT(Z)
Z=DINT(Z)
IF(Z .LT. 2299161) THEN
  A=Z
ELSE
  ALPHA=DINT((Z-1867216.25D0)/36524.25D0)
  A=Z+1.D0+ALPHA-DINT(ALPHA/4.D0)
ENDIF
B=A+1524.D0
C=DINT((B-122.1)/365.25D0)
D=DINT(365.25D0*C)
E=DINT((B-D)/30.6D0)

```

```

C DAY OF MONTH
DAY=B-D-DINT(30.6D0*E)+F

```

C MONTH NUMBER

```
IF(E.LT.14) THEN
  MONTH=E-1
ELSE IF((E.EQ.14).OR.(E.EQ.15)) THEN
  MONTH=E-13
ENDIF
```

C YEAR

```
IF (MONTH.GT.2) THEN
  YEAR=C-4716
ELSE
  YEAR=C-4715
ENDIF
```

```
DATE(1)=YEAR
DATE(2)=MONTH
DATE(3)=DINT(DAY)
TMP=F*24.D0
DATE(4)=DINT(TMP)
TMP=(TMP-DINT(TMP))*60.00001D0
DATE(5)=DINT(TMP)
TMP=TMP-DINT(TMP)
DATE(6)=TMP*60.D0
IF(DATE(3) .EQ. 0) THEN
  DATE(2)=DATE(2)-1
  DATE(3)=31.
ENDIF
```

```
IF(DNINT(DATE(6)*100) .GE. 6000) THEN
DATE(6) = DATE(6) - 60.D0
DATE(5) = DATE(5) +1.D0
ENDIF
IF(DATE(5) .GE. 60.D0) THEN
DATE(5) = DATE(5) -60.D0
DATE(4) = DATE(4) + 1.D0
ENDIF
IF(DATE(4) .GE. 24.D0) THEN
DATE(4) = DATE(4) - 24.D0
DATE(3) = DATE(3) + 1.D0
ENDIF
RETURN
```

END

CC

C SUBROUTINE FOR READING TLE FILE AND CHANGE ELEMENT UNIT TO RADIAN

CC

SUBROUTINE READ_TLE(IFILE,IYR,DAY,ISSC)

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)

COMMON/E1/XMO,XNODEO,OMEGAO,EO,XINCL,XNO,XNDT2O,XNDD6O,BSTAR,

+ X,Y,Z,XDOT,YDOT,ZDOT,EPOCH,DS50,IDEEP

COMMON/C1/CK2,CK4,E6A,QOMS2T,S,TOTHRD,

+ XJ3,XKE,XKMPER,XMNPDA,AE

COMMON/C2/DE2RA,PI,PIO2,TWOPI,X3PIO2,QO,SO,XJ2,XJ4

DE2RA=PI/180.D0

CK2=.5D0*XJ2*AE**2.

CK4=-.375D0*XJ4*AE**4.

QOMS2T=((QO-SO)*AE/XKMPER)**4.

S=AE*(1.D0+SO/XKMPER)

* READ IN MEAN ELEMENTS FROM 2 CARD T(TRANS) OR G(INTERN) FORMAT

READ (IFILE,702) ISSC,EPOCH,XNDT2O,XNDD6O,IEXP,BSTAR,IBEXP,XINCL,

+ XNODEO,EO,OMEGAO,XMO,XNO

IF(XNO.LE.0.) STOP

XNDD6O=XNDD6O*(10.D0**IEXP)

XNODEO=XNODEO*DE2RA

OMEGAO=OMEGAO*DE2RA

XMO=XMO*DE2RA

XINCL=XINCL*DE2RA

TEMP=TWOPI/XMNPDA/XMNPDA

XNO=XNO*TEMP*XMNPDA

XNDT2O=XNDT2O*TEMP

XNDD6O=XNDD6O*TEMP/XMNPDA

BSTAR=BSTAR*(10.D0**IBEXP)/AE

* INPUT CHECK FOR PERIOD VS EPHEMERIS SELECTED

* PERIOD GE 225 MINUTES IS DEEP SPACE

```

A1=(XKE/XNO)**TOTHRD
TEMP=1.5D0*CK2*(3.D0*DCOS(XINCL)**2-1.D0)/(1.D0-EO*EO)**1.5
DEL1=TEMP/(A1*A1)
AO=A1*(1.D0-DEL1*(.5D0*TOTHRD+DEL1*(1.D0+134.D0/81.D0*DEL1)))
DELO=TEMP/(AO*AO)
XNODP=XNO/(1.D0+DELO)
IDEEP=0
IF((TWOPI/XNODP/XMNPDA) .GE. .15625D0) IDEEP=1

```

```

C   ADDED FOR RETURN
      IYR=(EPOCH+2.D-7)*1.D-3
      DAY=EPOCH-IYR*1.D+3

```

```

702  FORMAT(2X,I5,11X,F14.8,1X,F10.8,2(1X,F6.5,I2),/,7X,2(1X,F8.4),
+       F8.7,2(1X,F8.4),1X,F11.8)
      RETURN
      END

```

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

```

C   SUBROUTINE MSGP4(MODIFIED FROM MSGP4)
C   PURPOSE
C   ORBIT PROPAGATOR FROM TLE ELEMENT
C   INITIAL INPUT
C   TLE ELEMENT
C   INPUT PARAMETER
C   T : TIME ELAPSED FROM TLE EPOCH TIME (MINUTE)
C   RETURN VALUE
C   STATE : STATE VECTOR OF SATELLITE->POSITION(3),VELOCITY(3)
C           IN KM, KM/S UNIT
C   NOTE.
C   1.THIS SUB PROGRAM MUST BE WITH 'READ TLE' SUB PROGRAM
C   2.THIS PROGRAM IS PUBLISHED FROM NORAD AND TLE WHICH IS
C   INPUT ORBITAL PARAMETER IS PUBLISHED FROM NORAD
C   (HTTP://CELETRAK.COM)

```

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

```

      SUBROUTINE MSGP4(T,STATE)

```

```

C   WGS-72 PHYSICAL AND GEOPOTENTIAL CONSTANTS
C   CK2= .5*J2*AE**2      CK4=-.375*J4*AE**4

```



```

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION STATE(6)
COMMON/E1/XMO,XNODEO,OMEGAO,EO,XINCL,XNO,XNDT2O,XNDD6O,BSTAR,
1      X,Y,Z,XDOT,YDOT,ZDOT,EPOCH,DS50,IDEEP
COMMON/C1/CK2,CK4,E6A,QOMS2T,S,TOTHRD,
1      XJ3,XKE,XKMPER,XMNPDA,AE
COMMON/C2/DE2RA,PI,PIO2,TWOPI,X3PIO2,QO,SO,XJ2,XJ4

```

```

IFLAG=1
TSINCE=T

```

```

IF(IDEEP .EQ. 1) THEN
  CALL SDP4(IFLAG,TSINCE)
ELSE
  CALL SGP4(IFLAG,TSINCE)
ENDIF
X=X*XKMPER/AE
Y=Y*XKMPER/AE
Z=Z*XKMPER/AE
XDOT=XDOT*XKMPER/AE*XMNPDA/86400.D0
YDOT=YDOT*XKMPER/AE*XMNPDA/86400.D0
ZDOT=ZDOT*XKMPER/AE*XMNPDA/86400.D0

```

```

STATE(1)=X
STATE(2)=Y
STATE(3)=Z
STATE(4)=XDOT
STATE(5)=YDOT
STATE(6)=ZDOT

```

```

RETURN
END

```

CC

C DON'T TOUCH THIS AREA

CC

```

FUNCTION DATAN2(SINX,COSX)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON/C2/DE2RA,PI,PIO2,TWOPI,X3PIO2,QO,SO,XJ2,XJ4
DATAN2=0.D0
IF (COSX.EQ.0.D0 ) GOTO 5
IF (COSX.GT.0.D0 ) GOTO 1

```

```

DATAN2=PI
GOTO 7
1 IF (SINX.EQ.0.D0 ) GOTO 8
  IF (SINX.GT.0.D0 ) GOTO 7
  DATAN2=TWOPi
  GOTO 7
5 IF (SINX.EQ.0.D0 ) GOTO 8
  IF (SINX.GT.0.D0 ) GOTO 6
  DATAN2=X3PIO2
  GOTO 8
6 DATAN2=PIO2
  GOTO 8
7 TEMP=SINX/COSX
  DATAN2=DATAN2+DATAN(TEMP)
8 RETURN
END

```

```

FUNCTION FMOD2P(X)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON/C2/DE2RA,PI,PIO2,TWOPI,X3PIO2,QO,SO,XJ2,XJ4
FMOD2P=X
I=FMOD2P/TWOPI
  FMOD2P=FMOD2P-I*TWOPI
IF(FMOD2P.LT.0.D0) FMOD2P=FMOD2P+TWOPI
RETURN
END

```

C GREENWICH SIDE REAL TIME AT EPOCH (DAYS SINCE 1950)

```

FUNCTION THETAG(EP)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON /E1/XMO,XNODEO,OMEGAO,EO,XINCL,XNO,XNDT2O,XNDD6O,BSTAR,
1      X,Y,Z,XDOT,YDOT,ZDOT,EPOCH,DS50,IDEEP
REAL*8 D,THETA,TWOPI,YR,TEMP,EP
TWOPI=6.28318530717959D0
YR=(EP+2.D-7)*1.D-3
JY=YR
YR=JY
D=EP-YR*1.D+3

IF(JY.LE.50) JY=JY+2000
IF(JY.GT.50) JY=JY+1900
N=(JY-1)/4-(JY-1)/100+(JY-1)/400

```

DS50=365.D0*(JY-1950) + (N-472) + D

THETA=1.72944494D0 + 6.3003880987D0*DS50

TEMP=THETA/TWOPI

I=TEMP

TEMP=I

THETAG=THETA-TEMP*TWOPI

IF(THETAG.LT.0.D0) THETAG=THETAG+TWOPI

RETURN

END

C

C SGP4 3 NOV 80

SUBROUTINE SGP4(IFLAG,TSINCE)

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)

COMMON/E1/XMO,XNODEO,OMEGAO,EO,XINCL,XNO,XNDT2O,

1 XNDD6O,BSTAR,X,Y,Z,XDOT,YDOT,ZDOT,EPOCH,DS50,IDEEP

COMMON/C1/CK2,CK4,E6A,QOMS2T,S,TOTHRD,

1 XJ3,XKE,XKMPER,XMNPDA,AE

IF (IFLAG .EQ. 0) GOTO 100

* RECOVER ORIGINAL MEAN MOTION (XNODP) AND SEMIMAJOR AXIS (AODP)

* FROM INPUT ELEMENTS

A1=(XKE/XNO)**TOTHRD

COSIO=DCOS(XINCL)

THETA2=COSIO*COSIO

X3THM1=3.D0*THETA2-1.D0

EOSQ=EO*EO

BETAO2=1.D0-EOSQ

BETAO=DSQRT(BETAO2)

DEL1=1.5D0*CK2*X3THM1/(A1*A1*BETAO*BETAO2)

AO=A1*(1.D0-DEL1*(.5D0*TOTHRD+DEL1*(1.D0+134.D0/81.D0*DEL1)))

DELO=1.5D0*CK2*X3THM1/(AO*AO*BETAO*BETAO2)

XNODP=XNO/(1.D0+DELO)

AODP=AO/(1.D0-DELO)

C INITIALIZATION

C

C FOR PERIGEE LESS THAN 220 KILOMETERS, THE ISIMP FLAG IS SET AND

C THE EQUATIONS ARE TRUNCATED TO LINEAR VARIATION IN SQRT A AND
 C QUADRATIC VARIATION IN MEAN ANOMALY. ALSO, THE C3 TERM, THE
 C DELTA OMEGA TERM, AND THE DELTA M TERM ARE DROPPED.

ISIMP=0

IF((AODP*(1.D0-EO)/AE) .LT. (220.D0/XKMPER+AE)) ISIMP=1

C FOR PERIGEE BELOW 156 KM, THE VALUES OF
 C S AND QOMS2T ARE ALTERED

S4=S

QOMS24=QOMS2T

PERIGE=(AODP*(1.D0-EO)-AE)*XKMPER

IF(PERIGE .GE. 156.D0) GOTO 10

S4=PERIGE-78.D0

IF(PERIGE .GT. 98.D0) GOTO 9

S4=20.D0

9 QOMS24=((120.D0-S4)*AE/XKMPER)**4

S4=S4/XKMPER+AE

10 PINVSQ=1.D0/(AODP*AODP*BETAO2*BETAO2)

TSI=1.D0/(AODP-S4)

ETA=AODP*EO*TSI

ETASQ=ETA*ETA

EETA=EO*ETA

PSISQ=DABS(1.D0-ETASQ)

COEF=QOMS24*TSI**4.

COEF1=COEF/PSISQ**3.5

C2=COEF1*XNODP*(AODP*(1.D0+1.5D0*ETASQ+EETA*(4.D0+ETASQ))+.75D0*

1 CK2*TSI/PSISQ*X3THM1*(8.D0+3.D0*ETASQ*(8.D0+ETASQ)))

C1=BSTAR*C2

SINIO=DSIN(XINCL)

A3OVK2=-XJ3/CK2*AE**3.

C3=COEF*TSI*A3OVK2*XNODP*AE*SINIO/EO

X1MTH2=1.D0-THETA2

C4=2.*XNODP*COEF1*AODP*BETAO2*(ETA*

1 (2.D0+.5D0*ETASQ)+EO*(.5D0+2.D0*ETASQ)-2.D0*CK2*TSI/

2 (AODP*PSISQ)*(-3.D0*X3THM1*(1.D0-2.D0*EETA+ETASQ*

3 (1.5D0-.5D0*EETA))+.75D0*X1MTH2*(2.D0*ETASQ-EETA*

4 (1.D0+ETASQ))*DCOS(2.D0*OMEGAO)))

C5=2.D0*COEF1*AODP*BETAO2*(1.D0+2.75D0*(ETASQ+EETA)+EETA*ETASQ)

THETA4=THETA2*THETA2

TEMP1=3.D0*CK2*PINVSQ*XNODP

```

TEMP2=TEMP1*CK2*PINVSQ
TEMP3=1.25D0*CK4*PINVSQ*PINVSQ*XNODP
XMDOT=XNODP+.5D0*TEMP1*BETAO*X3THM1+.0625D0*TEMP2*BETAO*
1      (13.D0-78.D0*THETA2+137.D0*THETA4)
X1M5TH=1.D0-5.D0*THETA2
OMGDOT=-.5D0*TEMP1*X1M5TH+.0625D0*TEMP2*(7.D0-114.D0*THETA2+
1      395.D0*THETA4)+TEMP3*(3.D0-36.D0*THETA2+49.D0*THETA4)
XHDOT1=-TEMP1*COSIO
XNODOT=XHDOT1+(.5D0*TEMP2*(4.D0-19.D0*THETA2)+2.D0*TEMP3*(3.D0-
1      7.D0*THETA2))*COSIO
OMGCOF=BSTAR*C3*DCOS(OMGAO)
XMCOF=-TOTHDRD*COEF*BSTAR*AE/EETA
XNODCF=3.5D0*BETAO2*XHDOT1*C1
T2COF=1.5D0*C1
XLCOF=.125D0*A3OVK2*SINIO*(3.D0+5.D0*COSIO)/(1.D0+COSIO)
AYCOF=.25D0*A3OVK2*SINIO
DELMO=(1.D0+ETA*DCOS(XMO))**3.
SINMO=DSIN(XMO)
X7THM1=7.D0*THETA2-1.D0
IF(ISIMP .EQ. 1) GOTO 90
C1SQ=C1*C1
D2=4.D0*AODP*TSI*C1SQ
TEMP=D2*TSI*C1/3.D0
D3=(17.D0*AODP+S4)*TEMP
D4=.5D0*TEMP*AODP*TSI*(221.D0*AODP+31.D0*S4)*C1
T3COF=D2+2.D0*C1SQ
T4COF=.25D0*(3.D0*D3+C1*(12.D0*D2+10.D0*C1SQ))
T5COF=.2D0*(3.D0*D4+12.D0*C1*D3+6.D0*D2*D2+15.D0*C1SQ*(
1      2.D0*D2+C1SQ))
90 IFLAG=0

```

C UPDATE FOR SECULAR GRAVITY AND ATMOSPHERIC DRAG

```

100 X MDF=XMO+XMDOT*TSINCE
OMGADF=OMGAO+OMGDOT*TSINCE
XNODDF=XNODEO+XNODOT*TSINCE
OMEGA=OMGADF
XMP=X MDF
TSQ=TSINCE*TSINCE
XNODE=XNODDF+XNODCF*TSQ
TEMPA=1.D0-C1*TSINCE
TEMPE=BSTAR*C4*TSINCE

```

```

TEMPL=T2COF*TSQ
IF(ISIMP .EQ. 1) GOTO 110
DELOMG=OMGCOF*TSINCE
DELM=XMCOF*((1.D0+ETA*DCOS(XMDF))**3.-DELMO)
TEMP=DELOMG+DELM
XMP=XMDF+TEMP
OMEGA=OMGADF-TEMP
TCUBE=TSQ*TSINCE
TFOUR=TSINCE*TCUBE
TEMPA=TEMPA-D2*TSQ-D3*TCUBE-D4*TFOUR
TEMPE=TEMPE+BSTAR*C5*(DSIN(XMP)-SINMO)
TEMPL=TEMPL+T3COF*TCUBE+
1    TFOUR*(T4COF+TSINCE*T5COF)
110 A=AODP*TEMPA**2.
E=EO-TEMPE
XL=XMP+OMEGA+XNODE+XNODEP*TEMPL
BETA=DSQRT(1.D0-E**E)
XN=XKE/A**1.5

C    LONG PERIOD PERIODICS

AXN=E*DCOS(OMEGA)
TEMP=1.D0/(A*BETA*BETA)
XLL=TEMP*XLCOF*AXN
AYNL=TEMP*AYCOF
XLT=XL+XLL
AYN=E*DSIN(OMEGA)+AYNL

C    SOLVE KEPLERS EQUATION

CAPU=FMOD2P(XLT-XNODE)
TEMP2=CAPU
DO 130 I=1,10
SINEPW=DSIN(TEMP2)
COSEPW=DCOS(TEMP2)
TEMP3=AXN*SINEPW
TEMP4=AYN*COSEPW
TEMP5=AXN*COSEPW
TEMP6=AYN*SINEPW
EPW=(CAPU-TEMP4+TEMP3-TEMP2)/(1.D0-TEMP5-TEMP6)+TEMP2
IF(DABS(EPW-TEMP2) .LE. E6A) GOTO 140
130 TEMP2=EPW

```

C SHORT PERIOD PRELIMINARY QUANTITIES

```
140 ECOSE=TEMP5+TEMP6
    ESINE=TEMP3-TEMP4
    ELSQ=AXN*AXN+AYN*AYN
    TEMP=1.D0-ELSQ
    PL=A*TEMP
    R=A*(1.D0-ECOSE)
    TEMP1=1.D0/R
    RDOT=XKE*DSQRT(A)*ESINE*TEMP1
    RFDOT=XKE*DSQRT(PL)*TEMP1
    TEMP2=A*TEMP1
    BETAL=DSQRT(TEMP)
    TEMP3=1.D0/(1.D0+BETAL)
    COSU=TEMP2*(COSEPW-AXN+AYN*ESINE*TEMP3)
    SINU=TEMP2*(SINEPW-AYN-AXN*ESINE*TEMP3)
    U=DATAN2(SINU,COSU)
    SIN2U=2.D0*SINU*COSU
    COS2U=2.D0*COSU*COSU-1.D0
    TEMP=1.D0/PL
    TEMP1=CK2*TEMP
    TEMP2=TEMP1*TEMP
```

C UPDATE FOR SHORT PERIODICS

```
RK=R*(1.D0-1.5D0*TEMP2*BETAL*X3THM1)+.5D0*TEMP1*X1MTH2*COS2U
UK=U-.25D0*TEMP2*X7THM1*SIN2U
XNODEK=XNODE+1.5D0*TEMP2*COSIO*SIN2U
XINCK=XINCL+1.5D0*TEMP2*COSIO*SINIO*COS2U
RDOTK=RDOT-XN*TEMP1*X1MTH2*SIN2U
RFDOTK=RFDOT+XN*TEMP1*(X1MTH2*COS2U+1.5D0*X3THM1)
```

C ORIENTATION VECTORS

```
SINUK=DSIN(UK)
COSUK=DCOS(UK)
SINIK=DSIN(XINCK)
COSIK=DCOS(XINCK)
SINNOK=DSIN(XNODEK)
COSNOK=DCOS(XNODEK)
XMX=-SINNOK*COSIK
```

```

XMY=COSNOK*COSIK
UX=XXM*SINUK+COSNOK*COSUK
UY=XMY*SINUK+SINNOK*COSUK
UZ=SINIK*SINUK
VX=XXM*COSUK-COSNOK*SINUK
VY=XMY*COSUK-SINNOK*SINUK
VZ=SINIK*COSUK

```

C POSITION AND VELOCITY

```

X=RK*UX
Y=RK*UY
Z=RK*UZ
XDOT=RDOTK*UX+RFDOTK*VX
YDOT=RDOTK*UY+RFDOTK*VY
ZDOT=RDOTK*UZ+RFDOTK*VZ

```

```

RETURN
END

```

C SDP4 3 NOV 80

```

SUBROUTINE SDP4(IFLAG,TSINCE)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON/E1/XMO,XNODEO,OMEGAO,EO,XINCL,XNO,XNDT2O,
1 XNDD6O,BSTAR,X,Y,Z,XDOT,YDOT,ZDOT,EPOCH,DS50,IDEEP
COMMON/C1/CK2,CK4,E6A,QOMS2T,S,TOTHRD,
1 XJ3,XKE,XKMPER,XMNPDA,AE

```

```

IF (IFLAG .EQ. 0) GOTO 100

```

C RECOVER ORIGINAL MEAN MOTION (XNODP) AND SEMIMAJOR AXIS (AODP)
C FROM INPUT ELEMENTS

```

A1=(XKE/XNO)**TOTHRD
COSIO=DCOS(XINCL)
THETA2=COSIO*COSIO
X3THM1=3.D0*THETA2-1.D0
EOSQ=EO*EO
BETAO2=1.D0-EOSQ
BETAO=DSQRT(BETAO2)

```



```

DEL1=1.5D0*CK2*X3THM1/(A1*A1*BETAO*BETAO2)
AO=A1*(1.D0-DEL1*(.5D0*TOTHRD+DEL1*(1.D0+134.D0/81.D0*DEL1)))
DELO=1.5D0*CK2*X3THM1/(AO*AO*BETAO*BETAO2)
XNODP=XNO/(1.D0+DELO)
AODP=AO/(1.D0-DELO)

```

C INITIALIZATION

C FOR PERIGEE BELOW 156 KM, THE VALUES OF
C S AND QOMS2T ARE ALTERED

```

S4=S
QOMS24=QOMS2T
PERIGE=(AODP*(1.D0-EO)-AE)*XKMPER
IF(PERIGE .GE. 156.D0) GOTO 10
S4=PERIGE-78.D0
IF(PERIGE .GT. 98.D0) GOTO 9
S4=20.D0
9  QOMS24=((120.D0-S4)*AE/XKMPER)**4.
   S4=S4/XKMPER+AE
10 PINVSQ=1.D0/(AODP*AODP*BETAO2*BETAO2)
   SING=DSIN(OMEGAO)
   COSG=DCOS(OMEGAO)
   TSI=1.D0/(AODP-S4)
   ETA=AODP*EO*TSI
   ETASQ=ETA*ETA
   EETA=EO*ETA
   PSISQ=DABS(1.D0-ETASQ)
   COEF=QOMS24*TSI**4.
   COEF1=COEF/PSISQ**3.5
   C2=COEF1*XNODP*(AODP*(1.D0+1.5D0*ETASQ+EETA*(4.D0+ETASQ))+.75D0*
1  CK2*TSI/PSISQ*X3THM1*(8.D0+3.D0*ETASQ*(8.D0+ETASQ)))
   C1=BSTAR*C2
   SINIO=DSIN(XINCL)
   A3OVK2=-XJ3/CK2*AE**3.
   X1MTH2=1.D0-THETA2
   C4=2.D0*XNODP*COEF1*AODP*BETAO2*(ETA*
1     (2.D0+.5D0*ETASQ)+EO*(.5D0+2.D0*ETASQ)-2.D0*CK2*TSI/
2     (AODP*PSISQ)*(-3.D0*X3THM1*(1.D0-2.D0*EETA+ETASQ*
3     (1.5D0-.5D0*EETA))+.75D0*X1MTH2*(2.D0*ETASQ-EETA*
4     (1.D0+ETASQ))*DCOS(2.D0*OMEGAO)))
   THETA4=THETA2*THETA2

```

```

TEMP1=3.D0*CK2*PINVSQ*XNODP
TEMP2=TEMP1*CK2*PINVSQ
TEMP3=1.25D0*CK4*PINVSQ*PINVSQ*XNODP
XMDOT=XNODP+.5D0*TEMP1*BETAO*X3THM1+.0625D0*TEMP2*BETAO*
1 (13.D0-78.D0*THETA2+137.D0*THETA4)
X1M5TH=1.D0-5.D0*THETA2
OMGDOT=-.5D0*TEMP1*X1M5TH+.0625D0*TEMP2*(7.D0-114.D0*THETA2+
1 395.D0*THETA4)+TEMP3*(3.D0-36.D0*THETA2+49.D0*THETA4)
XHDOT1=-TEMP1*COSIO
XNODOT=XHDOT1+(.5D0*TEMP2*(4.D0-19.D0*THETA2)+2.D0*TEMP3*(3.D0-
1 7.D0*THETA2))*COSIO
XNODCF=3.5D0*BETAO2*XHDOT1*C1
T2COF=1.5D0*C1
XLCOF=.125D0*A3OVK2*SINIO*(3.D0+5.D0*COSIO)/(1.D0+COSIO)
AYCOF=.25D0*A3OVK2*SINIO
X7THM1=7.D0*THETA2-1.D0
90 IFLAG=0
CALL DPINIT(EOSQ,SINIO,COSIO,BETAO,AODP,THETA2,
1 SING,COSG,BETAO2,XMDOT,OMGDOT,XNODOT,XNODP)

C UPDATE FOR SECULAR GRAVITY AND ATMOSPHERIC DRAG

100 XMDF=XMO+XMDOT*TSINCE
OMGADF=OMGEO+OMGDOT*TSINCE
XNODDF=XNODEO+XNODOT*TSINCE
TSQ=TSINCE*TSINCE
XNODE=XNODDF+XNODCF*TSQ
TEMPA=1.D0-C1*TSINCE
TEMPE=BSTAR*C4*TSINCE
TEMPL=T2COF*TSQ
XN=XNODP
CALL DPSEC(XMDF,OMGADF,XNODE,EM,XINC,XN,TSINCE,OMGDOT)
A=(XKE/XN)**TOTHDR*TEMPA**2.
E=EM-TEMPE
XMAM=XMDF+XNODP*TEMPL
CALL DPPER(SINIO,COSIO,E,XINC,OMGADF,XNODE,XMAM,TSINCE)
XL=XMAM+OMGADF+XNODE
BETA=DSQRT(1.D0-E*E)
XN=XKE/A**1.5

C LONG PERIOD PERIODICS

```

```

AXN=E*DCOS(OMGADF)
TEMP=1.D0/(A*BETA*BETA)
XLL=TEMP*XLCOF*AXN
AYNL=TEMP*AYCOF
XLT=XL+XLL
AYN=E*DSIN(OMGADF)+AYNL

```

C SOLVE KEPLERS EQUATION

```

CAPU=FMOD2P(XLT-XNODE)
TEMP2=CAPU
DO 130 I=1,10
SINEPW=DSIN(TEMP2)
COSEPW=DCOS(TEMP2)
TEMP3=AXN*SINEPW
TEMP4=AYN*COSEPW
TEMP5=AXN*COSEPW
TEMP6=AYN*SINEPW
EPW=(CAPU-TEMP4+TEMP3-TEMP2)/(1.D0-TEMP5-TEMP6)+TEMP2
IF(DABS(EPW-TEMP2) .LE. E6A) GOTO 140
130 TEMP2=EPW

```

C SHORT PERIOD PRELIMINARY QUANTITIES

```

140 ECOSE=TEMP5+TEMP6
ESINE=TEMP3-TEMP4
ELSQ=AXN*AXN+AYN*AYN
TEMP=1.D0-ELSQ
PL=A*TEMP
R=A*(1.D0-ECOSE)
TEMP1=1.D0/R
RDOT=XKE*DSQRT(A)*ESINE*TEMP1
RFDOT=XKE*DSQRT(PL)*TEMP1
TEMP2=A*TEMP1
BETAL=DSQRT(TEMP)
TEMP3=1.D0/(1.D0+BETAL)
COSU=TEMP2*(COSEPW-AXN+AYN*ESINE*TEMP3)
SINU=TEMP2*(SINEPW-AYN-AXN*ESINE*TEMP3)
U=DATAN2(SINU,COSU)
SIN2U=2.D0*SINU*COSU
COS2U=2.D0*COSU*COSU-1.D0
TEMP=1.D0/PL

```

TEMP1=CK2*TEMP
TEMP2=TEMP1*TEMP

C UPDATE FOR SHORT PERIODICS

RK=R*(1.D0-1.5D0*TEMP2*BETAL*X3THM1)+.5D0*TEMP1*X1MTH2*COS2U
UK=U-.25D0*TEMP2*X7THM1*SIN2U
XNODEK=XNODE+1.5D0*TEMP2*COSIO*SIN2U
XINCK=XINC+1.5D0*TEMP2*COSIO*SINIO*COS2U
RDOTK=RDOT-XN*TEMP1*X1MTH2*SIN2U
RFDOTK=RFDOT+XN*TEMP1*(X1MTH2*COS2U+1.5D0*X3THM1)

C ORIENTATION VECTORS

SINUK=DSIN(UK)
COSUK=DCOS(UK)
SINIK=DSIN(XINCK)
COSIK=DCOS(XINCK)
SINNOK=DSIN(XNODEK)
COSNOK=DCOS(XNODEK)
XMX=-SINNOK*COSIK
XMY=COSNOK*COSIK
UX=XMX*SINUK+COSNOK*COSUK
UY=XMY*SINUK+SINNOK*COSUK
UZ=SINIK*SINUK
VX=XMX*COSUK-COSNOK*SINUK
VY=XMY*COSUK-SINNOK*SINUK
VZ=SINIK*COSUK

C POSITION AND VELOCITY

X=RK*UX
Y=RK*UY
Z=RK*UZ
XDOT=RDOTK*UX+RFDOTK*VX
YDOT=RDOTK*UY+RFDOTK*VY
ZDOT=RDOTK*UZ+RFDOTK*VZ

RETURN
END

C DEEP SPACE

31 OCT 80

```

SUBROUTINE DEEP
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON/E1/XMO,XNODEO,OMEGAO,EO,XINCL,XNO,XNDT2O,
1  XNDD6O,BSTAR,X,Y,Z,XDOT,YDOT,ZDOT,EPOCH,DS50,IDEEP
COMMON/C1/CK2,CK4,E6A,QOMS2T,S,TOTHRD,
1  XJ3,XKE,XKMPER,XMNPDA,AE
COMMON/C2/DE2RA,PI,PIO2,TWOPI,X3PIO2,QO,SO,XJ2,XJ4
REAL*8
C  DAY,PREEP,XNODCE,ATIME,DELT,SAVTSN,STEP2,STEPN,STEPP
DATA      ZNS,      C1SS,      ZES/
A      1.19459D-5,  2.9864797D-6, .01675D0/
DATA      ZNL,      C1L,      ZEL/
A      1.5835218D-4, 4.7968065D-7, .05490D0/
DATA      ZCOSIS,   ZSINIS,   ZSINGS/
A      .91744867D0, .39785416D0, -.98088458D0/
DATA      ZCOSGS / .1945905D0/
DATA Q22,Q31,Q33/1.7891679D-6,2.1460748D-6,2.2123015D-7/
DATA G22,G32/5.7686396D0,0.95240898D0/
DATA G44,G52/1.8014998D0,1.0508330D0/
DATA G54/4.4108898D0/
DATA ROOT22,ROOT32/1.7891679D-6,3.7393792D-7/
DATA ROOT44,ROOT52/7.3636953D-9,1.1428639D-7/
DATA ROOT54/2.1765803D-9/
DATA THDT/4.3752691D-3/

C  ENTRANCE FOR DEEP SPACE INITIALIZATION

ENTRY DPINIT(EQSQ,SINI,Q,COSIQ,RTEQSQ,AO,COSQ2,SINOMO,COSOMO,
1  BSQ,XLLDOT,OMGDT,XNODOT,XNODP)
THGR=THETAG(EPOCH)
EQ = EO
XNQ = XNODP
AQNV = 1.D0/AO
XQNCL = XINCL
XMAO=XMO
XPIDOT=OMGDT+XNODOT
SINQ = DSIN(XNODEO)
COSQ = DCOS(XNODEO)
OMEGAQ = OMEGAO

C  INITIALIZE LUNAR SOLAR TERMS

```

```

5 DAY=DS50+18261.5D0
  IF (DAY.EQ.PREEP)   GOTO 10
  PREEP = DAY
  XNODCE=4.5236020D0-9.2422029D-4*DAY
  STEM=DSIN (XNODCE)
  CTEM=DCOS (XNODCE)
  ZCOSIL=.91375164D0-.03568096D0*CTEM
  ZSINIL=DSQRT (1.D0-ZCOSIL*ZCOSIL)
  ZSINHL= .089683511D0*STEM/ZSINIL
  ZCOSHL=DSQRT (1.-ZSINHL*ZSINHL)
  C=4.7199672D0+.22997150D0*DAY
  GAM=5.8351514D0+.0019443680D0*DAY
  ZMOL = FMOD2P(C-GAM)
  ZX= .39785416D0*STEM/ZSINIL
  ZY= ZCOSHL*CTEM+0.91744867D0*ZSINHL*STEM
  ZX=DATAN2(ZX,ZY)
  ZX=GAM+ZX-XNODCE
  ZCOSGL=DCOS (ZX)
  ZSINGL=DSIN (ZX)
  ZMOS=6.2565837D0+.017201977D0*DAY
  ZMOS=FMOD2P(ZMOS)

```

C DO SOLAR TERMS

```

10 LS = 0
  SAVTSN=1.D20
  ZCOSG=ZCOSGS
  ZSING=ZSINGS
  ZCOSI=ZCOSIS
  ZSINI=ZSINIS
  ZCOSH=COSQ
  ZSINH=SINQ
  CC=C1SS
  ZN=ZNS
  ZE=ZES
  ZMO=ZMOS
  XNOI=1.D0/XNQ
  ASSIGN 30 TO LS
20 A1=ZCOSG*ZCOSH+ZSING*ZCOSI*ZSINH
  A3=-ZSING*ZCOSH+ZCOSG*ZCOSI*ZSINH
  A7=-ZCOSG*ZSINH+ZSING*ZCOSI*ZCOSH
  A8=ZSING*ZSINI

```

$$A9=ZSING*ZSINH+ZCOSG*ZCOSI*ZCOSH$$

$$A10=ZCOSG*ZSINI$$

$$A2= COSIQ*A7+ SINIQ*A8$$

$$A4= COSIQ*A9+ SINIQ*A10$$

$$A5=- SINIQ*A7+ COSIQ*A8$$

$$A6=- SINIQ*A9+ COSIQ*A10$$

C

$$X1=A1*COSOMO+A2*SINOMO$$

$$X2=A3*COSOMO+A4*SINOMO$$

$$X3=-A1*SINOMO+A2*COSOMO$$

$$X4=-A3*SINOMO+A4*COSOMO$$

$$X5=A5*SINOMO$$

$$X6=A6*SINOMO$$

$$X7=A5*COSOMO$$

$$X8=A6*COSOMO$$

C

$$Z31=12.D0*X1*X1-3.D0*X3*X3$$

$$Z32=24.D0*X1*X2-6.D0*X3*X4$$

$$Z33=12.D0*X2*X2-3.D0*X4*X4$$

$$Z1=3.D0*(A1*A1+A2*A2)+Z31*EQSQ$$

$$Z2=6.D0*(A1*A3+A2*A4)+Z32*EQSQ$$

$$Z3=3.D0*(A3*A3+A4*A4)+Z33*EQSQ$$

$$Z11=-6.D0*A1*A5+EQSQ *(-24.D0*X1*X7-6.D0*X3*X5)$$

$$Z12=-6.D0*(A1*A6+A3*A5)+EQSQ *(-24.D0*(X2*X7+X1*X8)-6.D0*(X3*X6$$

$$1 \quad +X4*X5))$$

$$Z13=-6.D0*A3*A6+EQSQ *(-24.D0*X2*X8-6.D0*X4*X6)$$

$$Z21=6.D0*A2*A5+EQSQ *(24.D0*X1*X5-6.D0*X3*X7)$$

$$Z22=6.D0*(A4*A5+A2*A6)+EQSQ *(24.D0*(X2*X5+X1*X6)-6.D0*(X4*X7+$$

$$1 \quad X3*X8))$$

$$Z23=6.D0*A4*A6+EQSQ *(24.D0*X2*X6-6.D0*X4*X8)$$

$$Z1=Z1+Z1+BSQ*Z31$$

$$Z2=Z2+Z2+BSQ*Z32$$

$$Z3=Z3+Z3+BSQ*Z33$$

$$S3=CC*XNOI$$

$$S2=-.5D0*S3/RTEQSQ$$

$$S4=S3*RTEQSQ$$

$$S1=-15.D0*EQ*S4$$

$$S5=X1*X3+X2*X4$$

$$S6=X2*X3+X1*X4$$

$$S7=X2*X4-X1*X3$$

$$SE=S1*ZN*S5$$

$$SI=S2*ZN*(Z11+Z13)$$

SL=-ZN*S3*(Z1+Z3-14.D0-6.D0*EQSQ)
 SGH=S4*ZN*(Z31+Z33-6.D0)
 SH=-ZN*S2*(Z21+Z23)
 IF(XQNCL.LT.5.2359877D-2) SH=0.0D0
 EE2=2.D0*S1*S6
 E3=2.D0*S1*S7
 XI2=2.D0*S2*Z12
 XI3=2.D0*S2*(Z13-Z11)
 XL2=-2.D0*S3*Z2
 XL3=-2.D0*S3*(Z3-Z1)
 XL4=-2.D0*S3*(-21.D0-9.D0*EQSQ)*ZE
 XGH2=2.D0*S4*Z32
 XGH3=2.D0*S4*(Z33-Z31)
 XGH4=-18.D0*S4*ZE
 XH2=-2.D0*S2*Z22
 XH3=-2.D0*S2*(Z23-Z21)
 GOTO LS

C DO LUNAR TERMS

30 SSE = SE

SSI=SI
 SSL=SL
 SSH=SH/SINIQ
 SSG=SGH-COSIQ*SSH
 SE2=EE2
 SI2=XI2
 SL2=XL2
 SGH2=XGH2
 SH2=XH2
 SE3=E3
 SI3=XI3
 SL3=XL3
 SGH3=XGH3
 SH3=XH3
 SL4=XL4
 SGH4=XGH4
 LS=1
 ZCOSG=ZCOSGL
 ZSING=ZSINGL
 ZCOSI=ZCOSIL
 ZSINI=ZSINIL


```

ZCOSH=ZCOSHL*COSQ+ZSINHL*SINQ
ZSINH=SINQ*ZCOSHL-COSQ*ZSINHL
ZN=ZNL
CC=C1L
ZE=ZEL
ZMO=ZMOL
ASSIGN 40 TO LS
GOTO 20
40 SSE = SSE+SE
SSI=SSI+SI
SSL=SSL+SL
SSG=SSG+SGH-COSIQ/SINIQ*SH
SSH=SSH+SH/SINIQ

```

C GEOPOTENTIAL RESONANCE INITIALIZATION FOR 12 HOUR ORBITS

```

IRESFL=0
ISYNFL=0
IF(XNQ.LT.(.0052359877D0).AND.XNQ.GT.(.0034906585D0)) GOTO 70
IF (XNQ.LT.(8.26D-3) .OR. XNQ.GT.(9.24D-3)) RETURN
IF (EQ.LT.0.5D0) RETURN
IRESFL =1
EOC=EQ*EQSQ
G201=-.306D0-(EQ-.64D0)*.440D0
IF(EQ.GT.(.65D0)) GOTO 45
G211=3.616D0-13.247D0*EQ+16.290D0*EQSQ
G310=-19.302D0+117.390D0*EQ-228.419D0*EQSQ+156.591D0*EOC
G322=-18.9068D0+109.7927D0*EQ-214.6334D0*EQSQ+146.5816D0*EOC
G410=-41.122D0+242.694D0*EQ-471.094D0*EQSQ+313.953D0*EOC
G422=-146.407D0+841.880D0*EQ-1629.014D0*EQSQ+1083.435D0*EOC
G520=-532.114D0+3017.977D0*EQ-5740.D0*EQSQ+3708.276D0*EOC
GOTO 55
45 G211=-72.099D0+331.819D0*EQ-508.738D0*EQSQ+266.724D0*EOC
G310=-346.844D0+1582.851D0*EQ-2415.925D0*EQSQ+1246.113D0*EOC
G322=-342.585D0+1554.908D0*EQ-2366.899D0*EQSQ+1215.972D0*EOC
G410=-1052.797D0+4758.686D0*EQ-7193.992D0*EQSQ+3651.957D0*EOC
G422=-3581.69D0+16178.11D0*EQ-24462.77D0*EQSQ+12422.52D0*EOC
IF(EQ.GT.(.715D0)) GOTO 50
G520=1464.74D0-4664.75D0*EQ+3763.64D0*EQSQ
GOTO 55
50 G520=-5149.66D0+29936.92D0*EQ-54087.36D0*EQSQ+31324.56D0*EOC
55 IF(EQ.GE.(.7D0)) GOTO 60

```

G533=-919.2277D0+4988.61D0*EQ-9064.77D0*EQSQ+5542.21D0*EOC
G521=-822.71072D0+4568.6173D0*EQ-8491.4146D0*EQSQ+5337.524D0*EOC
G532=-853.666D0+4690.25D0*EQ-8624.77D0*EQSQ+5341.4D0*EOC
GOTO 65
60 G533=-37995.78D0+161616.52D0*EQ-229838.2D0*EQSQ+109377.94D0*EOC
G521=-51752.104D0+218913.95D0*EQ-309468.16D0*EQSQ+146349.42D0*EOC
G532=-40023.88D0+170470.89D0*EQ-242699.48D0*EQSQ+115605.82D0*EOC
65 SINI2=SINI* $SINI$
F220=.75D0*(1.D0+2.D0* $COSI$ + $COSQ$)
F221=1.5D0*SINI2
F321=1.875D0*SINI*(1.D0-2.D0* $COSI$ -3.D0* $COSQ$)
F322=-1.875D0*SINI*(1.D0+2.D0* $COSI$ -3.D0* $COSQ$)
F441=35.D0*SINI2*F220
F442=39.375D0*SINI2*SINI2
F522=9.84375D0*SINI*(SINI2*(1.D0-2.D0* $COSI$ -5.D0* $COSQ$)
1 +.33333333D0*(-2.D0+4.D0* $COSI$ +6.D0* $COSQ$))
F523 = SINI*(4.92187512D0*SINI2*(-2.D0-4.D0* $COSI$ +10.D0* $COSQ$)
* +6.56250012D0*(1.D0+2.D0* $COSI$ -3.D0* $COSQ$))
F542 = 29.53125D0*SINI*(2.D0-8.D0* $COSI$ + $COSQ$ *(-12.D0+8.D0* $COSI$
* +10.D0* $COSQ$))
F543=29.53125D0*SINI*(-2.D0-8.D0* $COSI$ + $COSQ$ *(12.D0+8.D0* $COSI$ -
1 10.D0* $COSQ$))
XNO2=XNQ*XNQ
AINV2=AQNV*AQNV
TEMP1 = 3.D0*XNO2*AINV2
TEMP = TEMP1* $ROOT2$
D2201 = TEMP*F220*G201
D2211 = TEMP*F221*G211
TEMP1 = TEMP1*AQNV
TEMP = TEMP1* $ROOT3$
D3210 = TEMP*F321*G310
D3222 = TEMP*F322*G322
TEMP1 = TEMP1*AQNV
TEMP = 2.D0*TEMP1* $ROOT4$
D4410 = TEMP*F441*G410
D4422 = TEMP*F442*G422
TEMP1 = TEMP1*AQNV
TEMP = TEMP1* $ROOT5$
D5220 = TEMP*F522*G520
D5232 = TEMP*F523*G532
TEMP = 2.D0*TEMP1* $ROOT5$
D5421 = TEMP*F542*G521

```

D5433 = TEMP*F543*G533
XLAMO = XMAO+XNODEO+XNODEO-THGR-THGR
BFACT = XLLDOT+XNODOT+XNODOT-THDT-THDT
BFACT=BFACT+SSL+SSH+SSH
GOTO 80

```

C SYNCHRONOUS RESONANCE TERMS INITIALIZATION

```

70 IRESFL=1
ISYNFL=1
G200=1.0D0+EQSQ*(-2.5D0+.8125D0*EQSQ)
G310=1.0D0+2.0D0*EQSQ
G300=1.0D0+EQSQ*(-6.0D0+6.60937D0*EQSQ)
F220=.75D0*(1.D0+COSIQ)*(1.D0+COSIQ)
F311=.9375D0*SINIQ*SINIQ*(1.D0+3.D0*COSIQ)-.75D0*(1.D0+COSIQ)
F330=1.D0+COSIQ
F330=1.875D0*F330*F330*F330
DEL1=3.D0*XNQ*XNQ*AQNV*AQNV
DEL2=2.D0*DEL1*F220*G200*Q22
DEL3=3.D0*DEL1*F330*G300*Q33*AQNV
DEL1=DEL1*F311*G310*Q31*AQNV
FASX2=.13130908D0
FASX4=2.8843198D0
FASX6=.37448087D0
XLAMO=XMAO+XNODEO+OMEGAO-THGR
BFACT = XLLDOT+XPIDOT-THDT
BFACT=BFACT+SSL+SSG+SSH
80 XFACT=BFACT-XNQ

```

C INITIALIZE INTEGRATOR

```

XLI=XLAMO
XNI=XNQ
ATIME=0.D0
STEPP=720.D0
STEPN=-720.D0
STEP2 = 259200.D0
RETURN

```

C ENTRANCE FOR DEEP SPACE SECULAR EFFECTS

```

ENTRY DPSEC(XLL,OMGASM,XNODES,EM,XINC,XN,T,OMGDT)

```

```

XLL=XLL+SSL*T
OMGASM=OMGASM+SSG*T
XNODES=XNODES+SSH*T
EM=EO+SSE*T
XINC=XINCL+SSI*T
IF(XINC .GE. 0.D0) GOTO 90
XINC = -XINC
XNODES = XNODES + PI
OMGASM = OMGASM - PI
90 IF(IRESFL .EQ. 0) RETURN
100 IF (ATIME.EQ.0.D0) GOTO 170
IF(T.GE.(0.D0).AND.ATIME.LT.(0.D0)) GOTO 170
IF(T.LT.(0.D0).AND.ATIME.GE.(0.D0)) GOTO 170
105 IF(DABS(T).GE.DABS(ATIME)) GOTO 120
DELT=STEPP
IF (T.GE.0.D0) DELT = STEPN
110 ASSIGN 100 TO IRET
GOTO 160
120 DELT=STEPN
IF (T.GT.0.D0) DELT = STEPP
125 IF (DABS(T-ATIME).LT.STEPP) GOTO 130
ASSIGN 125 TO IRET
GOTO 160
130 FT = T-ATIME
ASSIGN 140 TO IRET
GOTO 150
140 XN = XNI+XNDOT*FT+XNDDT*FT*FT*0.5D0
XL = XLI+XLDOT*FT+XNDOT*FT*FT*0.5D0
TEMP = -XNODES+THGR+T*THDT
XLL = XL-OMGASM+TEMP
IF (ISYNFL.EQ.0) XLL = XL+TEMP+TEMP
RETURN

```

C DOT TERMS CALCULATED

```

150 IF (ISYNFL.EQ.0) GOTO 152
XNDOT=DEL1*DSIN (XLI-FASX2)+DEL2*DSIN (2.D0*(XLI-FASX4))
1 +DEL3*DSIN (3.D0*(XLI-FASX6))
XNDDT = DEL1*DCOS(XLI-FASX2)
* +2.D0*DEL2*DCOS(2.D0*(XLI-FASX4))
* +3.D0*DEL3*DCOS(3.D0*(XLI-FASX6))
GOTO 154

```

```

152 XOMI = OMEGAQ+OMGDT*ATIME
    X2OMI = XOMI+XOMI
    X2LI = XLI+XLI
    XNDOT = D2201*DSIN(X2OMI+XLI-G22)
*       +D2211*DSIN(XLI-G22)
*       +D3210*DSIN(XOMI+XLI-G32)
*       +D3222*DSIN(-XOMI+XLI-G32)
*       +D4410*DSIN(X2OMI+X2LI-G44)
*       +D4422*DSIN(X2LI-G44)
*       +D5220*DSIN(XOMI+XLI-G52)
*       +D5232*DSIN(-XOMI+XLI-G52)
*       +D5421*DSIN(XOMI+X2LI-G54)
*       +D5433*DSIN(-XOMI+X2LI-G54)
    XNDDT = D2201*DCOS(X2OMI+XLI-G22)
*       +D2211*DCOS(XLI-G22)
*       +D3210*DCOS(XOMI+XLI-G32)
*       +D3222*DCOS(-XOMI+XLI-G32)
*       +D5220*DCOS(XOMI+XLI-G52)
*       +D5232*DCOS(-XOMI+XLI-G52)
*       +2.*(D4410*DCOS(X2OMI+X2LI-G44)
*       +D4422*DCOS(X2LI-G44)
*       +D5421*DCOS(XOMI+X2LI-G54)
*       +D5433*DCOS(-XOMI+X2LI-G54))
154 XLDOT=XNI+XFACT
    XNDDT = XNDDT*XLDOT
    GOTO IRETN
C
C   INTEGRATOR
C
160 ASSIGN 165 TO IRETN
    GOTO 150
165 XLI = XLI+XLDOT*DELT+XNDOT*STEP2
    XNI = XNI+XNDOT*DELT+XNDDT*STEP2
    ATIME=ATIME+DELT
    GOTO IRET

C   EPOCH RESTART

170 IF (T.GE.0.D0)   GOTO 175
    DELT=STEPN
    GOTO 180
175 DELT = STEPP

```

180 ATIME = 0.D0

XNI=XNQ

XLI=XLAMO

GOTO 125

C ENTRANCES FOR LUNAR-SOLAR PERIODICS

ENTRY DPPER(SINIQ,COSIQ,EM,XINC,OMGASM,XNODES,XLL,T)

SINIS = DSIN(XINC)

COSIS = DCOS(XINC)

IF (DABS(SAVTSN-T).LT.(30.D0)) GOTO 210

SAVTSN=T

ZM=ZMOS+ZNS*T

205 ZF=ZM+2.D0*ZES*DSIN (ZM)

SINZF=DSIN (ZF)

F2=.5D0*SINZF*SINZF-.25D0

F3=-.5D0*SINZF*DCOS (ZF)

SES=SE2*F2+SE3*F3

SIS=SI2*F2+SI3*F3

SLS=SL2*F2+SL3*F3+SL4*SINZF

SGHS=SGH2*F2+SGH3*F3+SGH4*SINZF

SHS=SH2*F2+SH3*F3

ZM=ZMOL+ZNL*T

ZF=ZM+2.D0*ZEL*DSIN (ZM)

SINZF=DSIN (ZF)

F2=.5D0*SINZF*SINZF-.25D0

F3=-.5D0*SINZF*DCOS (ZF)

SEL=EE2*F2+E3*F3

SIL=XI2*F2+XI3*F3

SLL=XL2*F2+XL3*F3+XL4*SINZF

SGHL=XGH2*F2+XGH3*F3+XGH4*SINZF

SHL=XH2*F2+XH3*F3

PE=SES+SEL

PINC=SIS+SIL

PL=SLS+SLL

210 PGH=SGHS+SGHL

PH=SHS+SHL

XINC = XINC+PINC

EM = EM+PE

IF(XQNCL.LT.(.2D0)) GOTO 220

GOTO 218

C APPLY PERIODICS DIRECTLY

218 PH=PH/SINIQ

PGH=PGH-COSIQ*PH

OMGASM=OMGASM+PGH

XNODES=XNODES+PH

XLL = XLL+PL

GOTO 230

C APPLY PERIODICS WITH LYDDANE MODIFICATION

220 SINOK=DSIN(XNODES)

COSOK=DCOS(XNODES)

ALFDP=SINIS*SINOK

BETDP=SINIS*COSOK

DALF=PH*COSOK+PINC*COSIS*SINOK

DBET=-PH*SINOK+PINC*COSIS*COSOK

ALFDP=ALFDP+DALF

BETDP=BETDP+DBET

XLS = XLL+OMGASM+COSIS*XNODES

DLS=PL+PGH-PINC*XNODES*SINIS

XLS=XLS+DLS

XNODES=DATAN2(ALFDP,BETDP)

XLL = XLL+PL

OMGASM = XLS-XLL-DCOS(XINC)*XNODES

230 CONTINUE

RETURN

END

BLOCK DATA

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)

COMMON/E1/XMO,XNODEO,OMEGAO,EO,XINCL,XNO,XNDT2O,XNDD6O,BSTAR,

1 X,Y,Z,XDOT,YDOT,ZDOT,EPOCH,DS50,IDEEP

COMMON/C1/CK2,CK4,E6A,QOMS2T,S,TOTHRD,

1 XJ3,XKE,XKMPER,XMNPDA,AE

COMMON/C2/DE2RA,PI,PIO2,TWOPI,X3PIO2,QO,SO,XJ2,XJ4

DATA E6A,PI,PIO2,QO,SO,TOTHRD,TWOPI,X3PIO2,XJ2,XJ3,

1 XJ4,XKE,XKMPER,XMNPDA,AE / 1.D-6,

2 3.14159265358979D0,1.570796326794D0,120.0D0,78.0D0,

3 .666666666667D0,

4 6.283185307179D0,4.712388980382D0,1.082616D-3,

5 -.253881D-5,

6 -1.65597D-6,.743669161D-1,6378.135D0,1440.D0,1.D0/
END

CC

C SUBROUTINE : GEOD2ECF
C PURPOSE : TRANSFORM FROM GEODETIC COORDINATE SYSTEM
C TO BODY FIXED ECF COORDINATE SYSTEM
C
C INPUT
C RLONG : EAST LONGITUDE (RAD)
C RLAT : GEODETIC LATITUDE (RAD)
C DHGT : THE PERPENDICULAR HEIGHT OF THE STATION
C ABOVE THE REFERENCE SPHEROID (KM)
C
C OUTPUT
C ECFX(3) : BODY FIXED ECF POSITION VECTOR (KM)

CC

SUBROUTINE GEOD2ECF(RLAT,RLONG,DHGT,ECFX)
IMPLICIT DOUBLEPRECISION (A-H,O-Z)

DIMENSION ECFX(3)
AEG = 6378.137D0
EGSQ = 6.694384999587980D-3

DN=AEG/DSQRT(1-EGSQ*DSIN(RLAT)*DSIN(RLAT))

ECFX(1)=(DN+DHGT)*DCOS(RLAT)*DCOS(RLONG)
ECFX(2)=(DN+DHGT)*DCOS(RLAT)*DSIN(RLONG)
ECFX(3)=(DN+DHGT-EGSQ*DN)*DSIN(RLAT)

RETURN
END

CC

C TITLE : EQNOX
C
C PURPOSE : COMPUTES THE EQUINOCTIAL ELEMENTS A,H,K,P,Q,LAMDA AND


```

C          CLASSICAL ELEMENTS E,I,NODE,W,M AND OTHER MISC VARIABLES
C
C INPUT
C   X      : 6-D CARTESIAN COORD X,Y,Z,XD,YD,ZD (KM,KM/SEC)
C   GM     : GRAVITATION CONSTANT * MASS OF EARTH (KM**3/SEC**2)
C
C OUTPUT
C   Y(1)   : A, SEMI-MAJOR AXIS (KM)
C   Y(2)   : H, E * SIN(W + NODE)
C   Y(3)   : K, E * COS(W + NODE)
C   Y(4)   : P, TAN(I/2) * SIN(NODE)
C   Y(5)   : Q, TAN(I/2) * COS(NODE)
C   Y(6)   : LAMDA, M + NODE + W (RAD)
C   Y(7)   : E, ECCENTRICITY
C   Y(8)   : I, INCLINATION (RAD)
C   Y(9)   : NODE, RIGHT ASCENSION OF ASCENDING NODE (RAD)
C   Y(10)  : W, ARGUMENT OF PERIAPSIS (RAD)
C   Y(11)  : MA, MEAN ANOMALY (RAD)
C   Y(12)  : TA, TRUE ANOMALY (RAD)
C   Y(13)  : EA, ECCENTRIC ANOMALY (RAD)
C   Y(14)  : L, TRUE LONGITUDE (RAD)
C   Y(15)  : F, ECCENTRIC LONGITUDE (RAD)
C   Y(16)  : R, RADIUS (KM)
C   Y(17)  : V, VELOCITY (KM/SEC)
C   Y(18)  : ORBITAL PERIOD (SEC)
C   Y(19)  : WS, SIN(I) * SIN(NODE)
C   Y(20)  : WC, SIN(I) * COS(NODE)
C
C COMMENTS
C   THIS PROGRAM DOES NOT WORK FOR PARABOLIC OR HYPERBOLIC OR
C   RETROGRADE EQUATORIAL ORBITS.
C   IF EITHER INCLINATION OR ECCENTRICITY IS NEAR ZERO, THE
C   CLASSICAL ORBITAL ELEMENTS MAY NOT BE DEFINED AND THE USER
C   SHOULD INTERPRET ACCORDINGLY.
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
      SUBROUTINE EQNOX(X,GM,Y)
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      DIMENSION X(6),Y(20)
      DIMENSION V1(3),V2(3),V3(3)
      DATA ZERO,ONE,TWO/0.D0,1.D0,2.D0/
      DATA TPI/6.283185307179586D0/
C   D2 = V2

```

```

C   D3 = RDV
Y(16)=DSQRT(X(1)*X(1)+X(2)*X(2)+X(3)*X(3))
D2=X(4)*X(4)+X(5)*X(5)+X(6)*X(6)
D3=X(1)*X(4)+X(2)*X(5)+X(3)*X(6)
Y(17)=DSQRT(D2)
Y(1)=ONE/(TWO/Y(16)-D2/GM)
Y(18)=TPI/DSQRT(GM/(Y(1)*Y(1)*Y(1)))
C   D4 = V2/GM - 1/R
C   D5 = RDV/GM
D4=D2/GM-ONE/Y(16)
D5=D3/GM
C   V1 = ECCENTRICITY VECTOR
DO 10 I=1,3
10 V1(I)=D4*X(I)-D5*X(I+3)
C   V2 = VECTOR W = R CROSS V, ANGULAR MOMENTUM VECTOR
V2(1)=X(2)*X(6)-X(3)*X(5)
V2(2)=X(3)*X(4)-X(1)*X(6)
V2(3)=X(1)*X(5)-X(2)*X(4)
C   D1 = MAGNITUDE OF W
D1=DSQRT(V2(1)*V2(1)+V2(2)*V2(2)+V2(3)*V2(3))
DO 20 I=1,3
20 V2(I)=V2(I)/D1
C   D1 = 1 + WZ
D1 = ONE+V2(3)
Y(4)=V2(1)/D1
Y(5)=-V2(2)/D1
C   D1 = P**2
C   D2 = Q**2
D1=Y(4)*Y(4)
D2=Y(5)*Y(5)
C   D3
C   D4
D3=ONE+D1+D2
D4=TWO*Y(4)*Y(5)
C   V2 = UNIT VECTOR G
C   V3 = UNIT VECTOR F
V2(1)=D4
V2(2)=ONE+D1-D2
V2(3)=TWO*Y(5)
V3(1)=ONE-D1+D2
V3(2)=D4
V3(3)=-TWO*Y(4)

```

```

DO 30 I=1,3
V2(I)=V2(I)/D3
30 V3(I)=V3(I)/D3
Y(2)=V1(1)*V2(1)+V1(2)*V2(2)+V1(3)*V2(3)
Y(3)=V1(1)*V3(1)+V1(2)*V3(2)+V1(3)*V3(3)
C   D1 = X1
C   D2 = Y1
D1=X(1)*V3(1)+X(2)*V3(2)+X(3)*V3(3)
D2=X(1)*V2(1)+X(2)*V2(2)+X(3)*V2(3)
Y(14)=DATAN2(D2,D1)
C   D3 = DSQRT(1-H*H-K*K)
C   D4 = A * DSQRT(1-H*H-K*K)
C   D5 = BETA = 1/(1+A*DSQRT(1-H*H-K*K))
D3=DSQRT(ONE-Y(2)*Y(2)-Y(3)*Y(3))
D4=Y(1)*D3
D5=ONE/(ONE+D3)
C   D6 = COS(F)
C   D7 = SIN(F)
D6=Y(3)+((ONE-Y(3)*Y(3)*D5)*D1-Y(2)*Y(3)*D5*D2)/D4
D7=Y(2)+((ONE-Y(2)*Y(2)*D5)*D2-Y(2)*Y(3)*D5*D1)/D4
Y(15)=DATAN2(D7,D6)
Y(6)=Y(15)-Y(3)*D7+Y(2)*D6
Y(7)=DSQRT(Y(2)*Y(2)+Y(3)*Y(3))
Y(8)=TWO*DATAN(DSQRT(Y(4)*Y(4)+Y(5)*Y(5)))
IF (Y(8).NE.ZERO) THEN
  Y(9)=DATAN2(Y(4),Y(5))
ELSE
  Y(9)=ZERO
ENDIF
IF (Y(7).NE.ZERO) THEN
  Y(10)=DATAN2(Y(2),Y(3))-Y(9)
ELSE
  Y(10)=ZERO
ENDIF
Y(11)=Y(6)-Y(9)-Y(10)
Y(12)=Y(14)-Y(9)-Y(10)
Y(13)=Y(15)-Y(9)-Y(10)

C   MAKE ALL ANGLES BETWEEN ZERO AND TWO PI

Y(6)=DMOD(Y(6)+TWO*TPI,TPI)
DO 40 I=8,15

```

```
40 Y(I)=DMOD(Y(I)+TWO*TPI,TPI)
   Y(19)=DSIN(Y(8))*DSIN(Y(9))
   Y(20)=DSIN(Y(8))*DCOS(Y(9))
   RETURN
   END
```