

BSPE 00300-576-1

열대 서태평양에서의 수온의 수직구조 분석연구

Vertical Thermal Structure in the Tropical
Western Pacific

1993. 6.

한국해양연구소

제 출 문

한국해양연구소장 귀하

본 보고서를 “열대 서태평양에서의 수온의 수직구조 분석연구”사업의 최종 보고서로 제출합니다.

1993년 6월 30일

주관연구기관명 : 한국해양연구소

연구원 : 석문식, 방인권

이하웅, 황상철

남수용, 최현우

연구조원 : 장영석, 김희운

요 약 문

I. 제 목

열대 서태평양에서의 수온의 수직구조 분석연구

II. 연구의 필요성과 목적

전지구적 기후변동을 파악하기 위하여 열대해양의 역할을 함께 이해하여야 하겠다는 인식이 대두되어 1985년부터 국제공동으로 TOGA (Tropical Oceans and Global Atmosphere) 연구사업이 시작되었는데 가장 성공적인 국제 협력사업으로 그동안 많은 성과가 있었다. 그러나 TOGA 연구사업의 상당한 진전에도 불구하고, 해양과 대기를 연계하여 수 개월에서 수 년에 이르는 변동성을 예측하여야 하는 기본적인 학술목표를 성취하기 위해서는 아직도 해결하여야 할 근본적인 문제점이 상당히 남아 있다. 이러한 문제점 중에서 무엇보다 중요한 것은 서태평양에서 Warm-Pool의 변이가 어떻게 유지되는가를 이해하는 것이며, 특히 Warm-Pool에서 대기-해양간의 플럭스, 해수면수온, 그리고 해양의 상층구조 등을 재현하는 연구가 필요하다. 전지구 기후변화, 그리고 계절간의 변동성을 이해하기 위하여 해양-대기를 연계하는 보다 향상된 설정이 필요하고, 이것은 Warm-Pool 해역에서 특히 중요하다. 여기서, 현상의 이해부족과 오차로 인하여 생길 수 있는 영향이 극대화될 소지가 있으므로 이 해역에서 일어나는 상호작용과 역학과정은 전지구 해양-대기 시스템을 이해하는데 필수적이다.

그리하여 TOGA 후반기의 중요한 노력으로 Warm-Pool에서 정밀하고 집중적인 자료 획득을 위한 IOP (Intensive Observation Period; 집중관측기간)를 설정하였다. 1992년 11월부터 1993년 2월까지 집중적이고 종합적인 실험 및 관측(IOP)이 적도

서태평양에서 실시되는데 본 연구사업을 통하여 우리나라의 참여를 유도한다. 연구인력의 참여를 포함하는 부분적인 참여일지라도 우리나라가 TOGA연구사업에 기여한다는 점을 국제사회의 인식시킬 수 있으며, 앞으로 기후변동성 연구에 중요한 기초자료가 되는 TOGA 연구사업의 국제적 성과를 공유하게 되는 최소한의 기반을 갖게 된다.

열대해양에는 중고위도 해역과 구별되는 고유하고 독특한 현상이 있는데 이것은 그 역학적 특성이 다름으로 설명할 수 있다. 열대해양에서의 역학적 특성은 적도에 접근함에 따라 소멸되는 Coriolis 변수로 인하여 모멘텀 방정식에서의 역학적 균형이 중고위도 해역과 크게 다름에 기인한다. 본 연구사업에서는 그 동안에 확보된 자료 중에서 열대해양의 상층구조를 분석하고 토의하였다.

III. 연구개발의 내용

1. TOGA COARE EQ-1 현장조사에 참여하여 ATLAS부이의 계류 및 CTD관측.
2. TOGA COARE IOP의 집중적이고 종합적인 현장조사시 연구인력 참여.
3. 경험적직교함수(EOF) 분석을 통한 수온의 수직구조 계산.

IV. 연구개발의 결과

1. 1992년 4월 중순부터 5월 중순까지 미국 하와이대학 조사선 (R/V Moana Wave)에 1명의 연구원이 승선하여 연구 참여; TOGA COARE EQ-1 현장조사.
2. 1992년 11월 상순에 일본 동경대학 조사선 (R/V Hakuho-maru)에 2명의 연구원이 승선하여 연구 참여; TOGA COARE IOP 현장조사.
3. 한국 ATLAS부이 자료를 사용하고 경험적직교함수(EOF) 분석을 통한 수온의 수직구조 계산.

V. 결론 및 토의

1992년에서 1993년으로 이어지는 4개월간은 전세계적으로 해양학자와 기상학자에 게는 금세기에 가장 의미있는 기간이었다고 할 수 있다. 왜냐하면 1985년에 시작한 국제 TOGA 연구사업이 그 동안의 연구 성과를 바탕으로 제시한 정밀하고 집중적인 관측(IOP)이 바로 이 기간에 이루어졌기 때문이다. 우리나라는 연구인력의 참여라는 부분적인 참여가 본 연구사업을 통하여 가능하였다.

열대해양에는 중고위도 해역과 구별되는 고유하고 독특한 현상이 있는데 이것은 그 역학적 특성이 다름으로 설명할 수 있다. 열대해양에서의 역학적 특성은 적도에 접근함에 따라 소멸되는 Coriolis변수로 인하여 모멘텀 방정식에서의 역학적 균형이 중고위도 해역과 크게 다르다. 열대해양에서는 확산계수를 포함하는 항이 중요한 역할을 하게 되는데, 그로 인하여 얻어지는 대표적인 현상은 적도반류이다. 본 연구사업에서는 열대해양의 수온 수직구조를 분석하기 위하여 우리나라 ATLAS부이 자료인 ATLAS-137E2N(동경 137도 북위 2도의 ATLAS 계류 정점)의 1992년 4월부터 1993년 5월까지의 자료를 사용하였다.

각 수심층의 수온의 표준편차를 살펴보면 중위도 해역과 달리 열대해양의 특징적인 면을 보여준다. 해수면수온의 표준편차가 낮은 값을 갖는 것은 대기와의 열교환이 활발하게 이루어지고 조정단계를 거치면서 년중으로 높은 수온을 유지함으로써 그 편차범위가 제한되고 있기 때문이다. 250미터 수심층에서도 큰 표준편차 값을 보이는 것은 이 수심층까지 열적교환이나 외력의 작용 또는 이류에 의한 변동이 활발하게 이루어지고 있음을 나타낸다. 수심이 300미터 보다 깊어지면서 수온의 표준편차가 낮아지는 것은 해양 내부로 들어가면서 단순감소하는 현상으로 중위도 해역을 포함한 대부분의 해역에서 나타나는 일반적 경향이다. 즉 열대 해양의 특징적 현상은 주로 수심이 300미터 보다 얇은 상층부에 주로 나타남을 알 수 있다.

기존자료가 내포하고 있는 수직구조적 특성을 추출하여 사용하기 위하여 경험적 직교함수(EOF; Empirical Orthogonal Function)를 사용하였다. 제1모드와 제2모드의 극값을 나타내는 수심층에 대한 현상적 해석이 가능하다. 50미터 수심층에 나타난 극값은 열대해양의 상층구조이고, 200미터 수심층이 제1모드와 제2모드 양쪽에서

모두 극값을 갖고 있는 것은 200미터의 수심층이 본 연구 해역에서 매우 의미있는 수심층으로 받아들일 수 있다. 이것은 열대해양에서는 대기와 곧바로 반응하는 상층이 있으며 그 아래에 약 100미터의 두께를 갖는 적도반류가 존재하고 그 아래에 존재하여 적도반류와 뚜렷히 구별되는 것이 200미터 수심층이다.

경험적직교함수로 대표되는 각 모드의 크기를 시계열로 살펴보면, 제1모드에서는 뚜렷한 연간 진동을 보여주고 있다. 연간 진동이 중위도 해역과 같이 현저하지는 않지만 열대해역에서도 가장 크게 나타나는 현상은 연간 진동에 따른 계절변화이다. 제2모드는 약 100일의 주기 진동을 보여주는 것이다. 그런데 적도 태평양에서 가장 특징적인 변동은 Madden and Julian (1972) 이후 많은 관측 자료의 분석을 통해 밝혀진 30-60일 주기를 갖는 진동이지만 이와 같은 진동이 뚜렷하게 보이지는 않는다. 제3모드와 제4모드는 자료의 전기 200일과 후기 200일에서 차이가 있는데, 후기 200일 동안은 짧은 주기의 작은 변동을 포함하고 있다. 이것은 시기적으로 1992/93년의 엘니뇨가 존재했던 때와 일치하는 것으로 보이는데 그 역학적 해석은 더 연구해야 할 과제이다.

SUMMARY

I. Title

Vertical Thermal Structure in the Tropical Western Pacific.

II. Significance and Objectives of the Study

In step with the rising interest the tropical ocean plays on global climate, internationally-coorporated TOGA experiment has been conducted succesfully putting forth some exciting results. It is to be noted that the TOGA experment is one of the most prominent studies bring the international academic community together.

In spite of past progress, there still remains some basic academic questions to be asked in forecasting the mid-range climatic variation, covering the time span of several month to years, because of the complex ocean-atmosphere dynamic interrelationship. Among these, questions related with the long-time sustenance of 'Warm Pool' in the Western Tropical Pacific is the most interesting one. Especially, studies on the sea surface temperature (SST), flux of dynamic quantities between atmosphere-ocean, and the upper ocean dynamic structure are in dire need. It is without the question that studies on ocean-atmosphere dynamics is a prerequisite in understanding the global climatic variation and inter-seasonal variability. Because of its effect on the global climatic pattern, studies on the Western Tropical Pacific ocean-atmosphere dynamics is evidently clear. Ignorance of its dynamics would result in possible maximum prediction error.

TOGA thus established IOP (Intensive Observation Phase) with the targeted aim of measuring dynamic quantities in a concentrated and exact manner as its later stage purpose. By our first participation in the IOP, Korean researchers are also urged to participate in TOGA. Although it is a small portion of TOGA, our efforts and contribution will be recognized in the world ocean research community and we can share the fruits of TOGA programme.

The tropical ocean has its own characteristic phenomena distinguished from those occurring in mid and high latitudes and it can be explained by the differences in the dynamical feature. In the tropical ocean, the momentum balance is different from the mid and high latitudes because of the diminishing Coriolis parameter. In this study, structure of the upper ocean is analysed using the data collected so far.

III. Scope of the Study

1. Participation in the TOGA COARE EQ-1
2. Participation in the TOGA COARE IOP
3. EOF analysis of the vertical temperature structure

IV. Result of the Study

1. Collaboration with USA by letting one researcher on board Univ. of Hawaii R/V Moana Wave from April through May, 1992: field survey of TOGA COARE EQ-1
2. Collaboration with Japan by letting one researchers on board Univ. of Tokyo R/V Hakuho-maru in the early December, 1992: field survey of TOGA COARE IOP

3. Understanding of the vertical temperature structure through the EOF analysis of the Korean Atlas buoy data

V. Conclusions and Discussions

Four months from the end of 1992 through the beginning of 1993 was the most important period for the oceanographers and meteorologists around the world. This is because IOP was conducted during this period as the final and most intensive observation of the international TOGA programme which has begun in 1985. Korean researchers also participated in IOP during the EQ-1 and Hakuho-maru cruises.

The tropical ocean has its own characteristic phenomena distinguished from those occurring in mid and high latitudes and it can be explained by the differences in the dynamical feature. In the tropical ocean, the momentum balance is different from the mid and high latitudes because of the diminishing Coriolis parameter. The diffusion term plays an important role in the tropical ocean and one typical example is the Equatorial Counter Current. In this study, structure of the upper ocean is analysed using the data from April 1992 to May 1993 collected by the Korean ATLAS buoy at ATLAS-137E2N (ATLAS buoy station at 137° E, 2° N).

Standard deviations at various water depths show a typical pattern of the tropical ocean. The low standard deviation at the sea surface is due to the intense heat exchange with the atmosphere, thus maintaining high water temperature throughout the year. The high standard deviation at 250 m means that the influences by the heat exchange, external forcing and advection are strong to this depth. The linearly diminishing trend of the standard deviation at deeper depths is the general pattern found both at low and high latitudes. Therefore, we can conclude that the characteristic phenomena of the tropical ocean occur mainly in the upper 300 m.

To extract the vertical structure from the existing data Empirical Orthogonal

Function was used. It was possible to explain the phenomena at the depths where extreme values of the first and second modes are found. The extreme value at 50 m shows the upper structure of the tropical ocean. At 200m both the first and second modes show extreme values and it indicates that the upper layer interacts directly with the atmosphere, the Equatorial Counter Current exists below it with thickness of about 100 m and the 200 m depth distinguishes clearly from the Equatorial Counter Current.

The time series of the first EOF mode shows a clear annual variation indicating that the seasonal variation is the most dominant phenomena in the tropical ocean although the amplitude is not as large as at mid-latitudes. The second mode has a periodicity of about 100 days. A typical fluctuation with a period of 30-60 days (Madden and Julian 1972) observed in the tropical ocean was not found in our data. T

The third and fourth modes have high-frequency fluctuations mostly in the first 200 days and this period coincides with 1992/93 El Niño. More study is needed for this phenomena.

목 차

요약문	3
영문 요약문	7
표 목차	13
그림 목차	15
제1장 서론	17
제1절 연구의 필요성	17
제2절 연구의 목표 및 내용	18
제2장 국제 TOGA 연구사업의 참여	21
제1절 TOGA COARE EQ-1 현장조사	21
제2절 TOGA COARE IOP 현장조사	32
제3장 열대 서태평양에서의 수온의 수직구조	39
제1절 우리나라 ATLAS부이 자료	39
제2절 경험적직교함수	45
제3절 수온의 수직구조적 특성	48
제4장 결론 및 토의	51
참고문헌	55

CONTENTS

Summary	7
List of Tables	14
List of Figures	16
Chapter I. Introduction	17
Section 1. Significance of the Study	17
Section 2. Objective and Scope of the Study	18
Chapter II. Participation in International TOGA Programme	21
Section 1. TOGA COARE EQ-1 Cruise	21
Section 2. TOGA COARE IOP Cruise	32
Chapter III. Vertical Thermal Structure in the Tropical Western Pacific	39
Section 1. Korean ATLAS Buoy Data	39
Section 2. Empirical Orthogonal Function	45
Section 3. Some Characteristics of Vertical Thermal Structure	48
Chapter VI. Conclusions and Discussions	51
References	55

표 목 차

표 1. ATLAS Buoy 관측점 ATLAS-137E2N에서 관측된 각 요소들의 평균과 표준편차 및 최대.최소치	42
표 2. 경험적직교함수의 각 수직모드의 기여도 및 오차범위	46

LIST OF TABLES

Table 1. Statistical summary of observations at ATLAS Buoy Station ATLAS-137E2N.	42
Table 2. Summary of Empirical Orthogonal Functions considered for vertical structure of temperature.	46

그림 목 차

그림 1. 1992년 4월 17일 - 5월 15일의 해양관측선 Moana Wave에 의한 관측정점	22
그림 2. 1992년 4월 17일 - 5월 15일의 해양관측선 Moana Wave에 의한 전 관측정점의 T-S Diagram	23
그림 3. 143° E 경도선에서 3.5° S - 5° N의 수온(a)과 염분(b)의 연직분포도 ..	26
그림 4. 147° E 경도선에서 1.8° S - 5° N의 수온(a)과 염분(b)의 연직분포도 ..	28
그림 5. 적도를 따라 150° E - 170° E의 수온(a)과 염분(b)의 연직분포도	30
그림 6. 1992년 11월의 해양관측선 Hakuho-maru에 의한 관측정점	34
그림 7. C1에서의 수온, 염분, 밀도의 수직분포도	36
그림 8. C2에서의 수온, 염분, 밀도의 수직분포도	37
그림 9. C1 (plus)과 C2 (circle)의 T-S Diagram	38
그림 10. ATLAS Buoy 관측점 ATLAS-137E2N에서 관측된 요소들의 시계열도	40
그림 11. ATLAS Buoy 관측점 ATLAS-137E2N에서 관측된 수온의 시간-수심 상에서의 등치도	44
그림 12. ATLAS Buoy 관측점 ATLAS-137E2N에서 관측된 모든 요소들로부터 결정된 경험적직교함수의 수직 모드	47
그림 13. 경험적직교함수 진폭의 시계열도	50

LIST OF FIGURES

Figure 1. Oceanographic stations occupied from 17 April to 15 May, 1992 by R/V Moana Wave.	22
Figure 2. T-S Diagram of all observations from 17 April to 15 May, 1992 by R/V Moana Wave.	23
Figure 3. Vertical distribution of temperature (a) and salinity (b) of CTD section from 3.5° S to 5° N along 143° E.	26
Figure 4. Vertical distribution of temperature (a) and salinity (b) of CTD section from 1.8° S to 5° N along 147° E.	28
Figure 5. Vertical distribution of temperature (a) and salinity (b) of CTD section from 150° E to 170° E along the Equator.	30
Figure 6. Oceanographic stations occupied during November, 1992 by R/V Hakuho-maru.	34
Figure 7. Vertical profiles of temperature, salinity and sigma-t at C1.	36
Figure 8. Vertical profiles of temperature, salinity and sigma-t at C2.	37
Figure 9. T-S Diagram of C1 (plus) and C2 (circle).	38
Figure 10. Time series of parameters observed at ATLAS Buoy Station ATLAS-137E2N.	40
Figure 11. Time-depth plot of water temperatures observed at ATLAS Buoy Station ATLAS-137E2N.	44
Figure 12. Vertical modes of Empirical Orthogonal Functions (EOF) determined by using all observed data at ATLAS Buoy Station ATLAS-137E2N.	47
Figure 13. Time series of the EOF amplitudes for each mode.	50

그림 목 차

그림 1. 1992년 4월 17일 - 5월 15일의 해양관측선 Moana Wave에 의한 관측정점	22
그림 2. 1992년 4월 17일 - 5월 15일의 해양관측선 Moana Wave에 의한 전 관측정점의 T-S Diagram	23
그림 3. 143° E 경도선에서 3.5° S - 5° N의 수온(a)과 염분(b)의 연직분포도 ..	26
그림 4. 147° E 경도선에서 1.8° S - 5° N의 수온(a)과 염분(b)의 연직분포도 ..	28
그림 5. 적도를 따라 150° E - 170° E의 수온(a)과 염분(b)의 연직분포도	30
그림 6. 1992년 11월의 해양관측선 Hakuho-maru에 의한 관측정점	34
그림 7. C1에서의 수온, 염분, 밀도의 수직분포도	36
그림 8. C2에서의 수온, 염분, 밀도의 수직분포도	37
그림 9. C1 (plus)과 C2 (circle)의 T-S Diagram	38
그림 10. ATLAS Buoy 관측점 ATLAS-137E2N에서 관측된 요소들의 시계열도	40
그림 11. ATLAS Buoy 관측점 ATLAS-137E2N에서 관측된 수온의 시간-수심 상에서의 등치도	44
그림 12. ATLAS Buoy 관측점 ATLAS-137E2N에서 관측된 모든 요소들로부터 결정된 경험적직교함수의 수직 모드	47
그림 13. 경험적직교함수 진폭의 시계열도	50

LIST OF FIGURES

Figure 1. Oceanographic stations occupied from 17 April to 15 May, 1992 by R/V Moana Wave.	22
Figure 2. T-S Diagram of all observations from 17 April to 15 May, 1992 by R/V Moana Wave.	23
Figure 3. Vertical distribution of temperature (a) and salinity (b) of CTD section from 3.5° S to 5° N along 143° E.	26
Figure 4. Vertical distribution of temperature (a) and salinity (b) of CTD section from 1.8° S to 5° N along 147° E.	28
Figure 5. Vertical distribution of temperature (a) and salinity (b) of CTD section from 150° E to 170° E along the Equator.	30
Figure 6. Oceanographic stations occupied during November, 1992 by R/V Hakuho-maru.	34
Figure 7. Vertical profiles of temperature, salinity and σ_{t-t} at C1.	36
Figure 8. Vertical profiles of temperature, salinity and σ_{t-t} at C2.	37
Figure 9. T-S Diagram of C1 (plus) and C2 (circle).	38
Figure 10. Time series of parameters observed at ATLAS Buoy Station ATLAS-137E2N.	40
Figure 11. Time-depth plot of water temperatures observed at ATLAS Buoy Station ATLAS-137E2N.	44
Figure 12. Vertical modes of Empirical Orthogonal Functions (EOF) determined by using all observed data at ATLAS Buoy Station ATLAS-137E2N.	47
Figure 13. Time series of the EOF amplitudes for each mode.	50

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 필요성

전지구적 기후변동을 파악하기 위하여 열대해양의 역할을 함께 이해하여야 하겠다는 인식이 대두되어 1985년부터 국제공동으로 TOGA (Tropical Oceans and Global Atmosphere) 연구사업이 시작되었는데 가장 성공적인 국제 협력사업으로 그동안 많은 성과가 있었다. 국제 TOGA 연구사업을 통하여 기후변화의 메카니즘을 파악하게 되고, 기후 분야에서 보다 향상된 서비스가 조만간에 가능할 것이며, 또한 향후 지속적 발전을 가능하게 하는 과학적 기반이 적절히 확보될 것이다. 기후변화 경보 시스템의 발전은 농업계획, 가뭄대책, 수자원관리 및 수력이용 등에서 뿐만 아니라 여러 분야에서 활용하게 된다. 그리하여 지구상의 모든 국가들은 국제 TOGA 연구사업의 결과로서 더욱 향상된 기후변화 경보 시스템을 통한 이득을 보게 될 것이다. 당연하게 우리나라도 혜택을 받는 국가이며 우리나라의 국가적 위상에 알맞는 기여를 계획하여야 할 것이다.

열대 서태평양의 평년 해수면온도가 매우 높은 해역을 Warm-Pool이라고 부르는데 이 Warm-Pool은 해양이 대기에 막대한 에너지를 공급하는 창구 역할을 하고 있다. 즉, 이 Warm-Pool이 전지구의 기후 시스템을 움직이는 대기 대순환의 심장 역할을 한다. Warm-Pool의 조그마한 변동성, 그 위치나 해수면 수온에 있어서의 변동성이 전지구의 기후 시스템을 바꾸어 놓는다고 할 때 이상 기후를 이해하기 위하여 해양의 역할이 매우 중요하다. 이 Warm-Pool과 관련하여 엘니뇨현상은 해양에서 가장 큰 장주기 현상으로 오래 전부터 인식되어 왔으며 지역적으로 엘니뇨현상과 동반하여 발생하는 이상기후가 널리 알려져 있다. 그러나 TOGA 연구사업의 상당한 진전에도 불구하고, 해양과 대기를 연계하여 수 개월에서 수 년에 이르는 변

동성을 예측하여야 하는 기본적인 학술목표를 성취하기 위하여서 해결하여야 할 근본적인 문제점이 아직 상당히 남아 있다. 이러한 문제점 중에서 무엇보다 중요한 것은 서태평양에서 Warm-Pool의 변이가 어떻게 유지되는가를 이해하는 것이고, 특히 Warm-Pool에서 대기-해양간의 플럭스, 해수면수온, 그리고 해양의 상층구조 등을 재현하는 연구가 필요하다. 전지구 기후변화, 그리고 계절간의 변동성을 이해하기 위하여 해양-대기를 연계하는 보다 향상된 설정이 필요하고, 이것은 Warm-Pool 해역에서 특히 중요하다. 여기서, 현상의 이해부족과 오차로 인하여 생길 수 있는 영향이 극대화될 소지가 있으므로 이 해역에서 일어나는 상호작용과 역학과정은 전지구 해양-대기 시스템을 이해하는데 필수적이다.

TOGA 연구사업의 전반기에 해당하는 1985년부터 1989년까지는 기존 자료와 수치모델 연구에 많은 성과가 있었다. 이 전반기 5년 동안의 성과를 바탕으로 후반기 연구방향이 정립되었는데 먼저, 전지구 기후의 단기적인 변동성과 관련하여 ENSO (El Niño / Southern Oscillation) 현상이 갖는 중요성에 비추어 열대 태평양에서의 실시간 관측시스템의 개선에 노력을 기울이게 되었다. 이러한 개선에 지대한 공헌을 하고 있는 것은 열대태평양을 지속적으로 모니터링하는 관측망을 형성하고 ARGOS 시스템을 사용하여 실시간으로 자료를 획득하는 TOGA-TAO (TOGA Tropical Atmosphere - Ocean) 사업이다. 이와 같은 모니터링을 통하여서 이상기후 경보체제를 확보할 수 있을 뿐 아니라 모델링 연구에 양질의 입력자료로서 또는 검증자료로서 활용할 수 있으므로 그 효용성은 매우 크다.

제 2 절 연구의 목표 및 내용

국제적으로 지난 10여년 동안은 해양과 대기의 역학적 상호작용에 전례없이 많은 관심이 있어왔다. 그리하여 방대한 자료가 수집되었으며 해양-대기를 연계시킨 모델의 개발에 노력을 경주하였다. 이러한 연구활동의 목적은 수 년의 크기로 나타나는 기후변화와 그 변동성을 예측하기 위한 물리적 기반을 확립하기 위함이다. 이러한 목표를 가지고 국제 학술단체는 TOGA 연구사업을 발족시켰는데, 여러 나라가

상당한 재원을 투입하도록 기여한 바 크다 (Webster & Lukas 1992).

TOGA 연구사업은 수 개월에서 수 년 규모의 기후현상을 예측하는데 목적을 둔 세계기후연구계획 (WCRP 1985)의 주된 요소이다. TOGA 연구사업의 기본 철학은 열대해양과 전지구 대기와의 관계를 의도적으로 강조하는 데 있으며 TOGA 연구사업의 기본 전제는 열대에서 해양의 역학적 적응이 고위도 보다 훨씬 빠르고 따라서 대기와 매우 밀접하게 어울려 있다는 것이다. TOGA (WCRP 1985)의 특별한 목표와 과학적인 목적은 다음과 같다.

- 수 개월에서 수 년 시간 크기로 예측가능한 시스템의 범위를 결정하고 이 예측성에 내포되어 있는 메카니즘과 과정을 이해하기 위하여 열대해양과 전지구 대기를 시간에 따른 시스템으로 서술할 수 있게 함.
- 수 개월에서 수 년의 시간에 대한 변화를 예측하려는 목적에 따라 해양과 대기의 연계된 시스템을 모델링하는 타당성을 검토함.
- 해양과 대기를 연계하는 모델로서 가능성이 보여진다면 운영적 차원의 예측을 시행하기 위한 관측 및 자료전송 시스템을 설계하는데 과학적 배경을 제공함.

TOGA 목표를 완수하기 위해 상층 해양과 대기를 장기간 모니터링하는 것과, 집중적이고 특수한 과정을 이해하기 위한 연구 및 모델링 등의 전략을 개발시켜왔다 (WCRP 1985). 이러한 계획은 국가적, 다국가적, 그리고 국제적인 노력으로 수행되어 왔다 (e.g., National Academy Science 1986; WCRP 1986).

특히 TOGA 후반기의 중요한 노력으로 Warm-Pool에서 정밀하고 집중적인 자료 획득을 위한 IOP (Intensive Observation Period; 집중관측기간)를 설정하였다 (WCRP 1990). 1992년 11월부터 1993년 2월까지 집중적이고 종합적인 실험 및 관측 (IOP)이 적도 서태평양에서 실시되는데 본 연구사업을 통하여 우리나라의 참여를 유도한다. 연구인력의 참여를 포함하는 부분적인 참여일지라도 우리나라가 TOGA 연구사업에 기여한다는 점을 국제사회의 인식시킬 수 있으며, 앞으로 기후변동성 연구에 중요한 기초자료가 되는 TOGA 연구사업의 국제적 성과를 공유하게 되는 최소한의 기반을 갖게 된다.

열대해양에는 중고위도 해역과 구별되는 고유하고 독특한 현상이 있는데 이것은 그 역학적 특성이 다름으로 설명할 수 있다. 열대해양에서의 역학적 특성은 적도에 접근함에 따라 소멸되는 Coriolis 변수로 인하여 모멘텀 방정식에서의 역학적 균형이 중고위도 해역과 크게 다름에 기인한다. 본 연구사업에서는 그 동안에 확보된 자료 중에서 열대해양의 상층구조를 분석하고 토의한다.

제 2 장 국제 TOGA 연구사업의 참여

제1절 TOGA COARE EQ-1 현장조사

국제 TOGA 연구사업의 일환으로 TOGA-TAO와 TOGA-COARE의 관측을 수행하기 위한 COARE EQ-1 항해가 1992년 4월로 계획되고 이 항해에 우리나라의 연구기술진이 승선하여 국제 TOGA 연구사업에 참여하고 경험을 얻는 기회가 있었다. COARE EQ-1 항해의 조사해역은 동경 137도에서 170도까지, 그리고 북위 5도에서 남위 3도에 이르는 적도를 중심으로 하는 열대 서태평양의 Warm-Pool 해역이다. 이 해역은 미국, 일본, 불란서 등 여러나라에서 국제 TOGA 연구사업의 초기인 1985년부터 집중적인 투자와 연구활동 등을 계속하여온 곳으로 근래에 빈번히 발생하는 이상기후 현상을 규명하는데 가장 중요한 연구대상 해역일 뿐 아니라 우리나라와 가장 가까운 열대해양 연구의 대상해역이다.

COARE EQ-1 조사항해를 수행한 조사선은 1,800 톤급으로 하와이 대학 소속의 MOANA WAVE (Ocean Wave) 호인데, 해양물리조사를 비롯하여 해양지질, 지구물리 탐사, 관측장비 계류 및 회수작업에 적합한 종합해양조사선이었다. 연구기술진으로는 하와이대학의 Lukas교수를 수석연구원으로 하여 4명의 하와이대학 연구진과 2명의 PMEL 연구진, 그리고 우리나라에서 서울대와 한국해양연구소에서 각 1명씩 참여하여 8명이 승선하였고, 조사기간은 1992년 4월 17일 괌을 출항하여 예정대로 관측을 실시하고 5월 15일 미크로네시아군도의 Majuro섬에 입항하기까지 29일 동안이었다. 관측내용은 그림 1과 같이 해양 물리 특성조사를 위한 수온, 염분 관측이 총 57개 정점에서 수행되었고, 해수유동을 파악하기 위한 해류계(AMF VACM, RD-ADCP)의 계류를 1개 정점에서, 그리고 7개 정점에서 ATLAS부이를 계류하였다.



ATLAS부이는 해양고정점에 계류하여 기상요소 및 해수면수온 그리고 수온의 수직구조분석에 필요한 자료를 수집하도록 설계된 것이다. 항해 중에 지속적으로 수심 250 미터까지의 해수유동 자료를 수집할 수 있는 ADCP를 활용하고 조사선에 설치된 기상타워로부터 획득되는 일반 기상자료 수집에도 많은 노력을 기울였다. ATLAS부이 계류시 2개 정점에서 추가적으로 수심 100 미터까지 정점마다 6대의 Sea-Cat시스템을 부이의 계류선에 부착하여 수온의 시간별 변화에 관한 연속자료를 수집하는 계류작업도 성공적으로 이루어졌다. 금번의 COARE EQ-1 항해에서 수온과 염분의 관측은 미국 SEABIRD사의 모델명 SBE-25인 CTD (Conductivity, Temperature, Depth)를 사용하였다. 열대해양에서의 역학적 특성을 고려하여 계획한 관측 정선은 그림 1과 같으며 본 조사항해의 책임자인 하와이대학의 Lukas교수가 보내준 자료를 바탕으로 T-S Diagram (그림 2) 및 수온과 염분의 연직분포도 (그림 3, 4, 5)를 작성하였다.

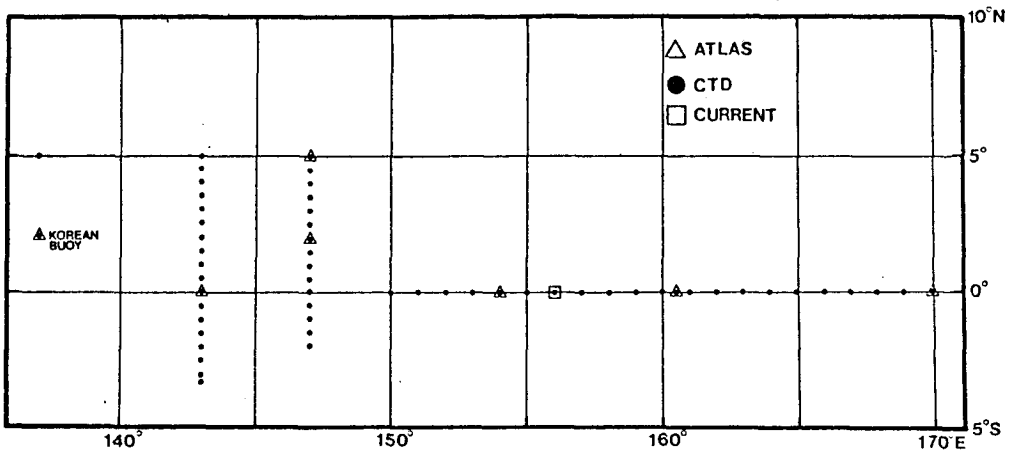


Figure 1. Oceanographic stations occupied from 17 April to 15 May, 1992 by R/V Moana Wave.

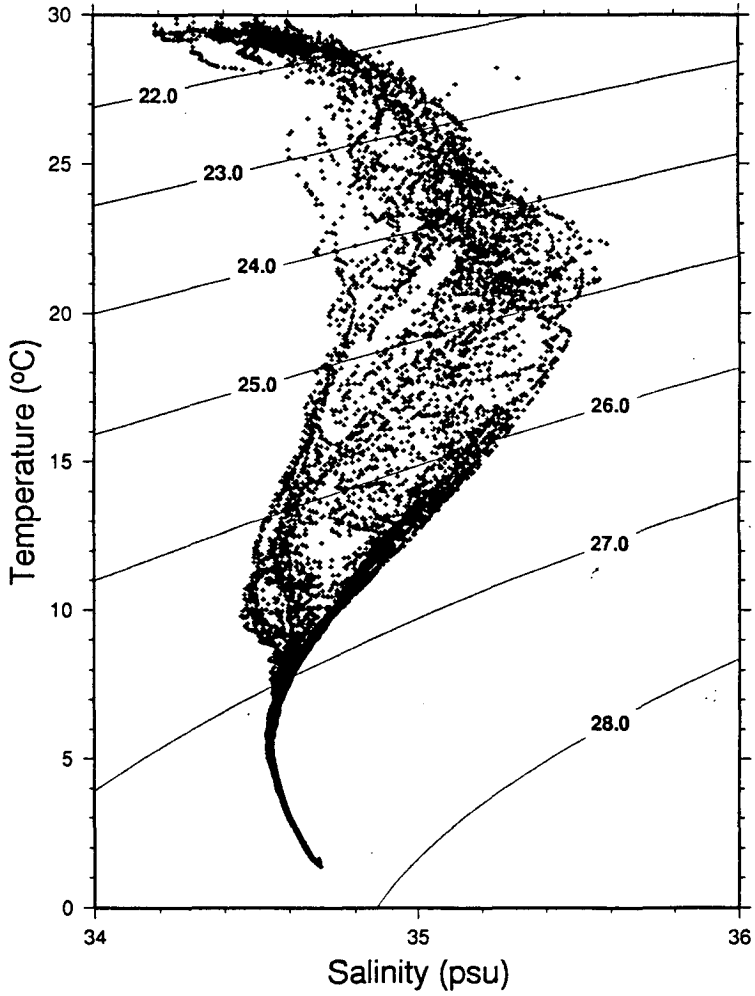


Figure 2. T-S Diagram of all observations from 17 April to 15 May, 1992 by R/V Moana Wave.

그림 3과 4는 각각 동경 143도와 147도의 경도선을 따라 적도를 가로질러 관측이 이루어진 정선의 수온과 염분의 연직분포도이며 그림 5는 동경 150도에서 170도에 이르는 적도를 따라 관측이 이루어진 정선의 것을 보여준다. 이렇게 획득한 모든 자료를 T-S Diagram에 나타내었는데 그림 2와 같이 주어진다. 열대해양의 상층은 대체로 고온이며 염분의 범위는 넓게 분포하기는 하지만 저염의 특성을 가지고 있다. 상중층은 저염과 고염인 해역이 구분되는데 적도권역에서는 이 수심에 존재하면서 고염의 특성을 갖고 있는 적도반류수의 현저한 영향이 고염으로, 그렇지 않고 적도권역을 벗어난 해역은 저염을 나타내고 있다. 심중층은 저염을 보이는데 이 수심층에서도 여전히 적도권역과 그렇지 않은 해역의 염분이 다르게 나타나 현저히 다른 수온과 염분의 조합을 갖는다. 심층에 이르러 T-S Diagram이 합쳐지고 심저층으로 가면서 고염의 경향을 보인다.

그림 3은 동경 143도를 따라 남위 3.5도에서 북위 5도에 이르는 단면으로 상층 500미터에 대한 수온과 염분의 연직분포도이다. 이 단면에서는 남쪽에서 북쪽으로 향하면서 수온약층이 좁아지고, 고염의 특성이 수심 100미터에서 200미터에 이르는 수심층으로 남쪽으로부터 들어와 퍼져있다. 다시 말해서, 상부혼합층의 두께는 남쪽에서 북쪽으로 향하면서 두꺼워지고 수온약층의 하부 경계면은 알아져 수온약층을 더욱 더 뚜렷하게 하고 있다 (그림 3a). 그림 3b에서 고염의 핵이 남위 3.5도에서는 수심 100미터에서 200미터이상으로 넓게 분포하는데 북쪽으로 향하면서 그 두께가 얇아져 북위 4도에 이르러서는 고염의 핵이 사라진다. 이론적으로는 적도를 기준으로 남북이 대칭인 역학적 특성을 갖지만 이 경도선에서는 그 기준이 남쪽으로 치우쳐 있는 것으로 보인다. 그림 3의 경우보다 동쪽에 위치한 동경 147도를 따라 남위 1.8도에서 북위 5도에 이르는 단면은 그림 4에 주어지는데, 그림 3에서와 마찬가지로의 특성을 갖고 있으면서, 특히, 혼합이 활발히 진행되고 있는 것으로 보이는 염분 췌기가 여러 곳에 나타난다. 그러나 동경 143도의 단면과는 달리 그림 4b에서는 고염의 핵이 되는 수심층이 전체 단면을 통하여 존재하고 있다. 적도를 따라 나란하게 동경 150도부터 동경 170도에 이르는 단면은 그림 5에 주어진다. 태평양 전체를 가로지르는 단면은 엘니뇨현상과 관련하여 널리 알려져 있다. 본 조사에서 다루고 있는 범위는 경도로 20도에 해당하는 좁은 구간으로서 대양을 가로지르며 나타나는

특성과 같은 것은 보이지 않는다. 다만 중층의 고염인 핵이 동쪽으로 향하면서 더욱 뚜렷하게 보이는데, 이것은 앞서의 적도를 가로지르는 정선인 그림 3과 4에서 고염의 중심이 남쪽에 치우쳐 있었던 점과 일관성있게 분석할 수 있는 것으로 점차 그 중심이 적도상에 가까운 것으로 해석할 수 있다.

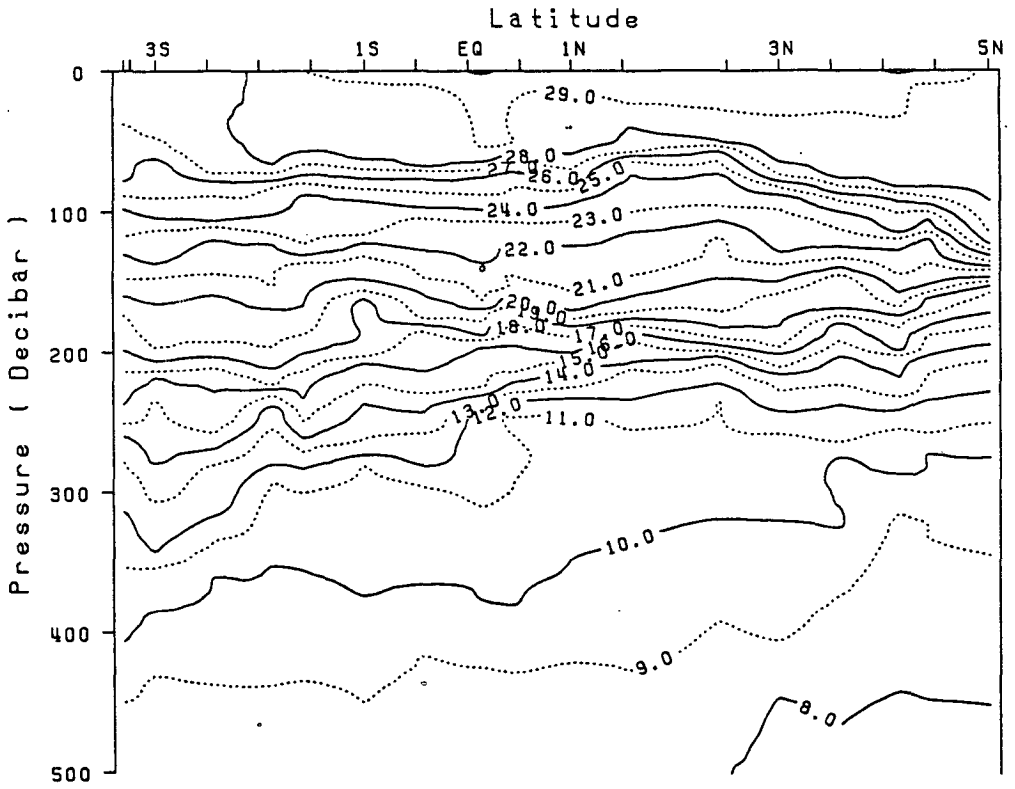


Figure 3 (a). Vertical distribution of temperature (a) and salinity (b) of CTD section from 3.5° S to 5° N along 143° E.

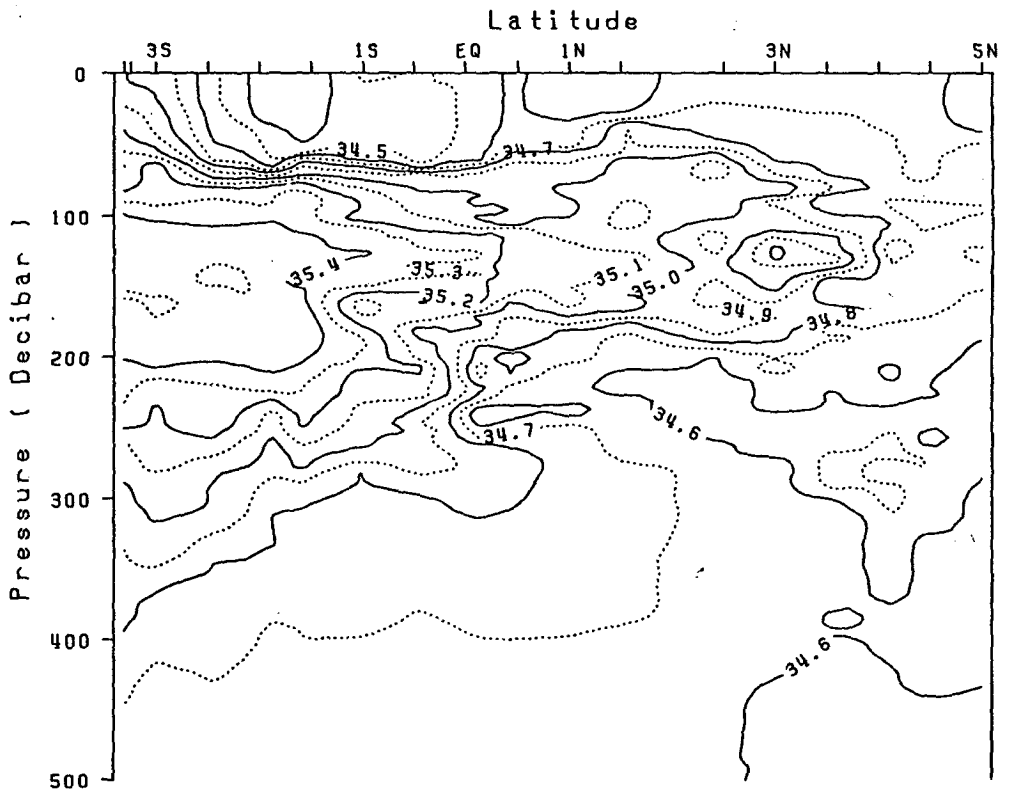


Figure 3 (b). (continued)

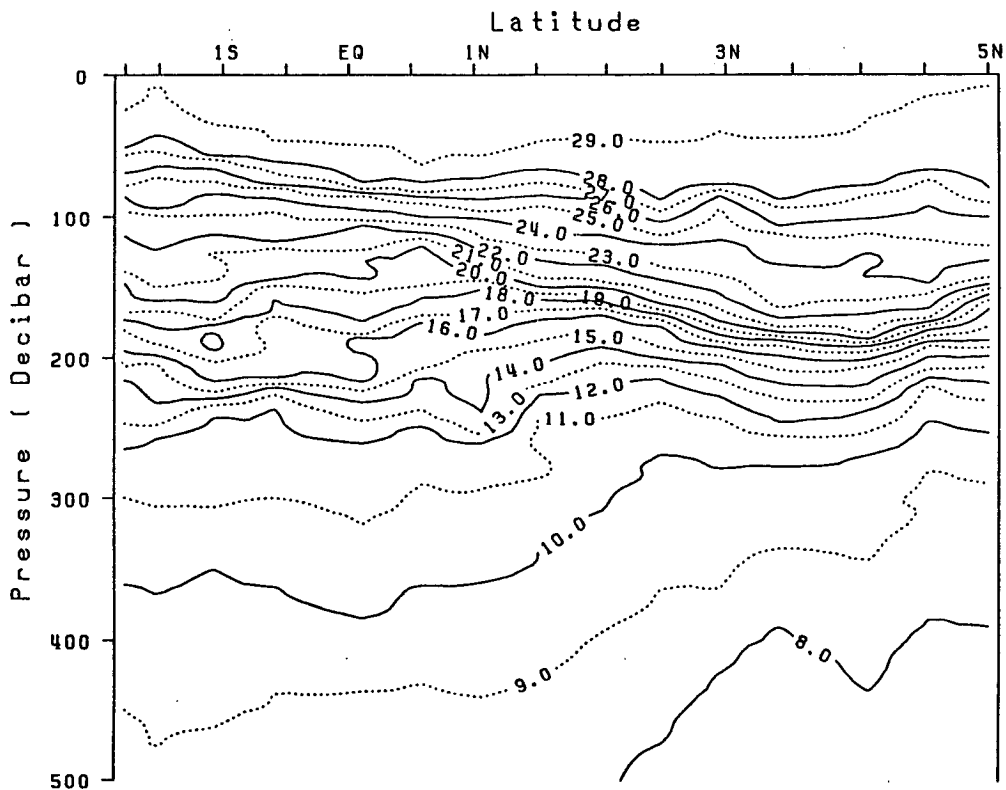


Figure 4 (a). Vertical distribution of temperature (a) and salinity (b) of CTD section from 1.8° S to 5° N along 147° E.

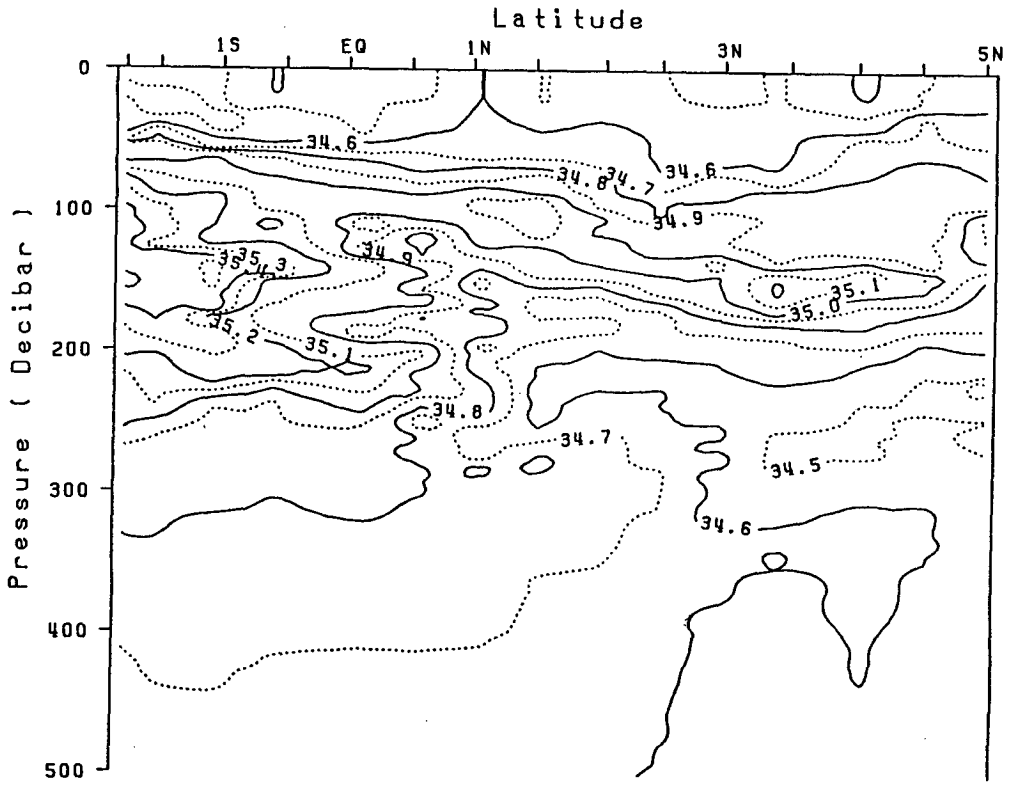


Figure 4 (b). (continued)

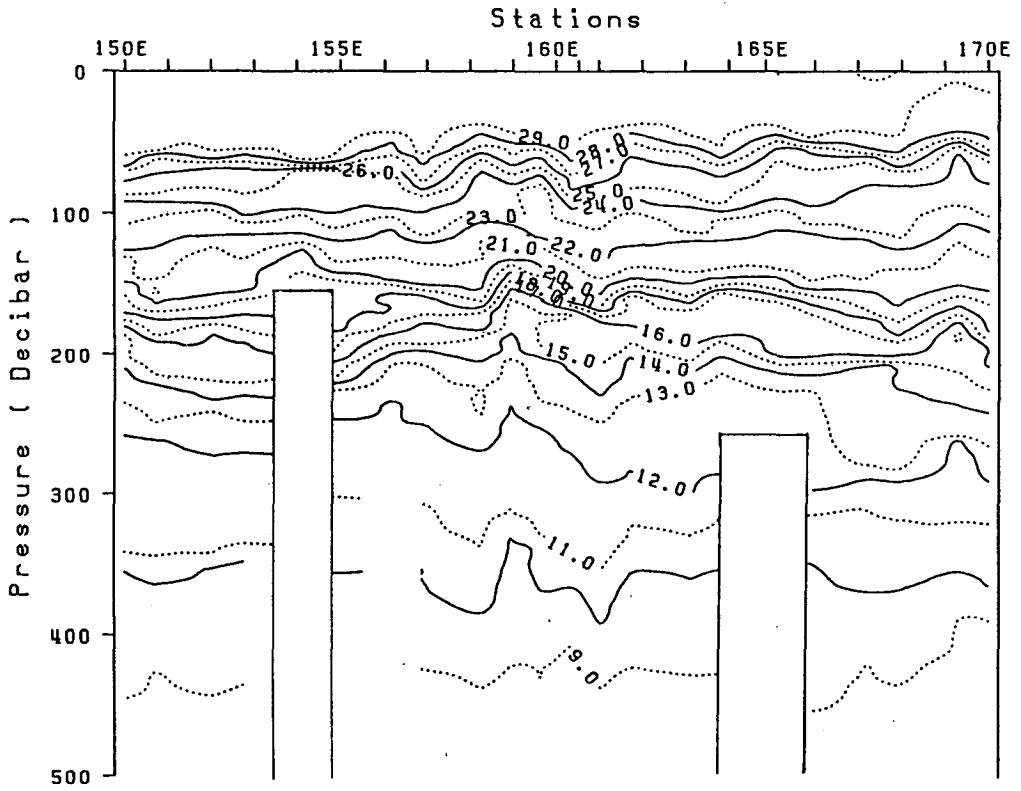


Figure 5 (a). Vertical distribution of temperature (a) and salinity (b) of CTD section from 150° E to 170° E along the Equator.

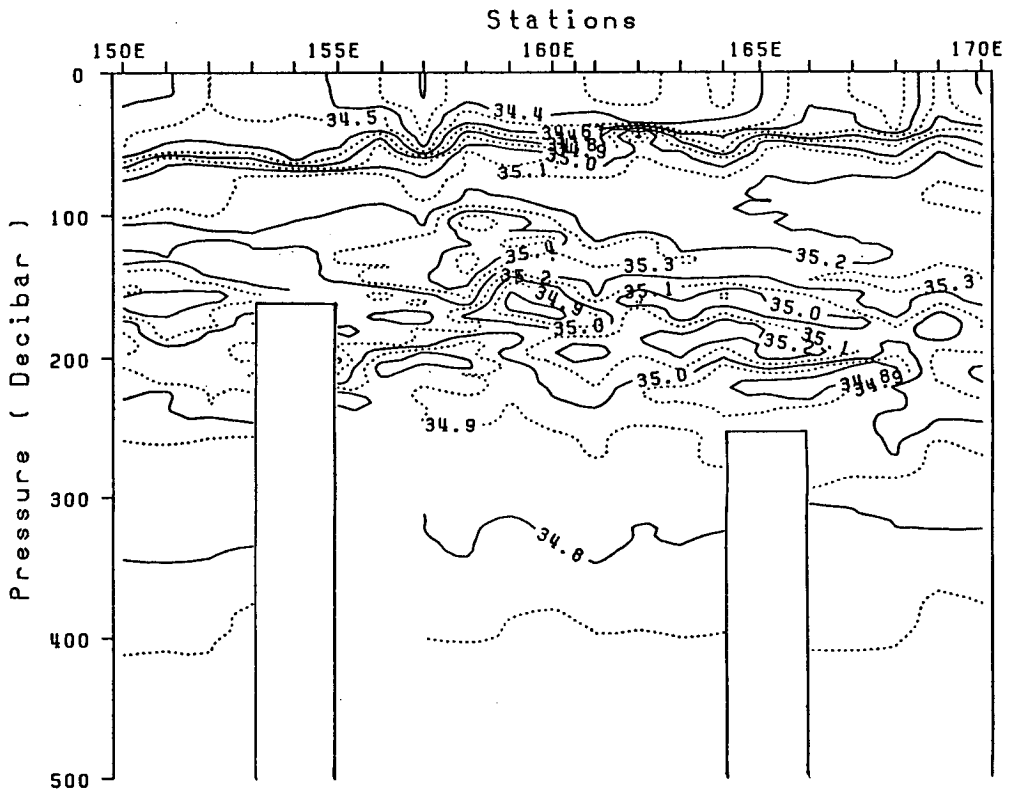


Figure 5 (b). (continued)

제2절 TOGA COARE IOP 현장조사

TOGA 후반기의 중요한 노력으로서 기존자료나 관측망으로는 설명할 수 없는 것으로 제기된 문제점들을 해석하기 위하여 서태평양의 Warm-Pool에서 정밀하고 집중적인 자료의 획득에 중점두고 있는 사업이다. 특히 해당되는 것은 Warm-Pool에서 대기-해양 상호작용의 민감도와 대류를 통한 중규모 크기로 일어나는 표층 플럭스의 되물림 작용(Feed-Back) 등이다. 상호작용의 물리적 실재를 파악하기 위하여 다음과 같은 학술적 목표를 관측하고 이해하기 위하여 TOGA의 집중적 활동으로서 TOGA/COARE (TOGA Coupled Ocean - Atmosphere Response Experiment, TOGA-COARE 1991) 계획이 구성되었다.

- 서태평양의 Warm-Pool 시스템에서 해양과 대기의 연계성을 설명할 수 있는 주된 과정,
- Warm-Pool 해역에서 대류를 조정하는 주된 대기의 과정,
- 서태평양의 Warm-Pool 해역에서 해양 내부의 수직구조와 관련한 부력과 바람 응력 Forcing을 연결하는 해양의 반응,
- 서태평양의 Warm-Pool 시스템에서 다른 해역으로, 또는 그 반대의 방향으로, 해양과 대기의 영향을 확장시키는 여러 scale 간의 상호작용.

특히 해양분야의 학술적 목표는 다음과 같다.

- 표층의 수온과 염분
- 열, 염, 그리고 모멘텀의 혼합 과정
- 서태평양 내에서의 역학 과정과 그 외 해역간의 관계
- COARE 지역 내 해양혼합층으로의 mass, 열, 그리고 염의 순수 이동량

모니터링 강화시기(Enhanced Monitoring)에 속해 있는 IOP는 서태평양 Warm-Pool에서 해양-대기 시스템의 운동량, 열량, 수증기 플럭스와 관련하여 아주 우수한 자료를 제공하게 된다. 이러한 관측은 동시성을 강조하여 현장에서와 원격으로 1992년 11월부터 2월까지 4개월 동안에 이루어졌다. 조사선은 IOP 중 총 12척

(미국 3, 일본 3, 중국 3, 프랑스 2, 호주 1) 이 관측에 동원되었다. 이처럼 얻어진 양질의 자료는 GPCP, TRMM, NSCAT, TOPEX/POSEIDON, Geosat와 같은 연구 사업에서 위성자료 처리 알고리즘을 보정하기 위하여 필요하고, 서태평양의 강수량, 표층 바람, 해수면, 그리고 다른 해양-대기 요소들의 기본적 실체를 제공하게 된다. 이 자료는 해양과 대기의 모델에서 해양-대기 상호작용과 경계층의 매개변수 결정을 개량하는데 사용하고 그리고 연계된 모델의 유효성을 시험하는데 사용하게 된다.

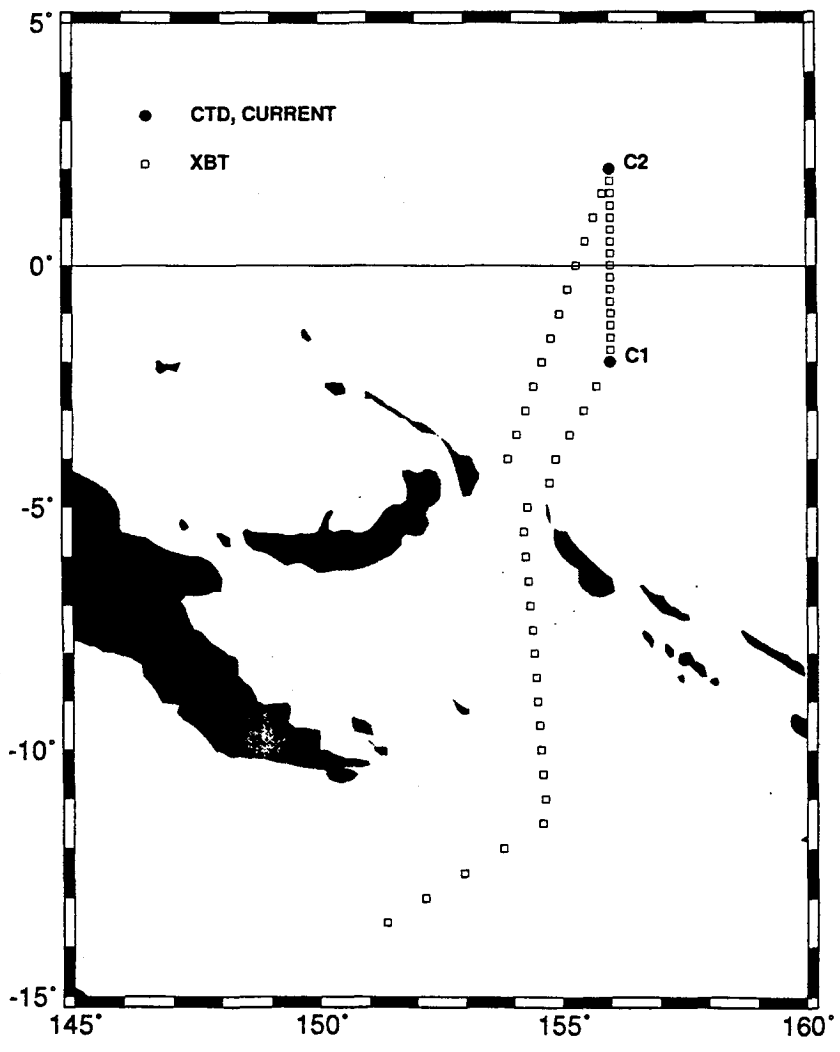


Figure 6. Oceanographic stations occupied during November, 1992 by R/V Hakuho-maru.

IOP의 일환으로 일본 동경대학 해양연구소 소속 조사선인 4,000 톤급의 Hakuho-maru에 의한 열대 서태평양의 해양 및 기상을 관측하는 계획이 있었다. Hakuho-maru에 의한 관측은 2개의 항차로 나누어 실시되었는데 본 연구사업에서는 첫번째 항차에 우리 연구소 소속의 2명의 연구원을 승선하게 하여 연구인력으로 참여하였다. 우리나라 연구원 외에도 일본의 각 대학 및 연구소에서 28명의 인력참여가 있었다. 첫번째 항차는 1992년 10월 31일에 시작되어 11월 7일에 종료되었다. 이 관측항해 기간 중에 XBT 관측은 호주 케안즈항을 떠나 파푸아 뉴기니의 라바올항에 입항하기까지의 항적 중 50개 정점에서 실시되었다 (그림 6). 또한, ADCP를 포함한 전자기식 해류계를 2개 정점에 계류하였으며 CTD 관측도 같은 위치에서 SBE-9/11 Plus를 이용하여 실시되었다. ADCP는 표층류 관측을 위하여 350 미터 수심에 해수면을 바라보게 설치하였으며 해류계는 500, 100, 1500 미터에 계류하였다. 이 외에 오메가존데를 이용한 기상관측이 21개 정점에서 실시되었다.

그림 7과 8은 동경 157도 상에서 남위 2도의 정점 C1과 북위 2도의 정점 C2에서 관측된 수온, 염분, 그리고 밀도의 수심에 따른 변화를 보여준다. 그림 9에는 두 정점에서의 T-S Diagram를 도시하고 있는데, + 표시는 남위 2도의 정점의 것이며 ○ 표시는 북위 2도의 것이다. 이 두 정점의 수심에 따른 변화는 현저한 차이를 갖고 있는데, 특히 상층 500미터의 수심에서의 차이가 크다. T-S Diagram에 보이는 두 정점간의 차이점도 상층 500미터의 수심에서의 차이를 보인 것이다. 상부 층층에 나타나는 고염의 특성은 적도반류수의 존재를 의미하며, 두 정점의 차이는 적도반류와 근접하여 있는 정도에 따라 다르게 나타난 것이다. 남위 2도의 정점 C1에서 보이는 염분 썩기 형태는 이 위도 부근에서 서로 다른 수괴가 만나 생긴 모양으로 적도반류의 한계가 이 위도 부근에 형성되어 있음을 간접적으로 보여주고 있다. 반면에 북위 2도의 정점 C2에서는 고염을 나타내는 층이 매우 안정적으로 보이며 그 아래 층과의 경계에서 혼합이 이루어지고 있는 염분 썩기를 보이고 있다. 이것은 이 정점의 위도가 적도반류의 중심에 해당하는 것을 의미할 수도 있지만 염분이 정점 C1과 비교하여 볼 때 해당하는 수심에서 저염의 한계 값에 해당하는 것이므로 적도반류의 중심에서 벗어나 있는 것으로 판단된다.

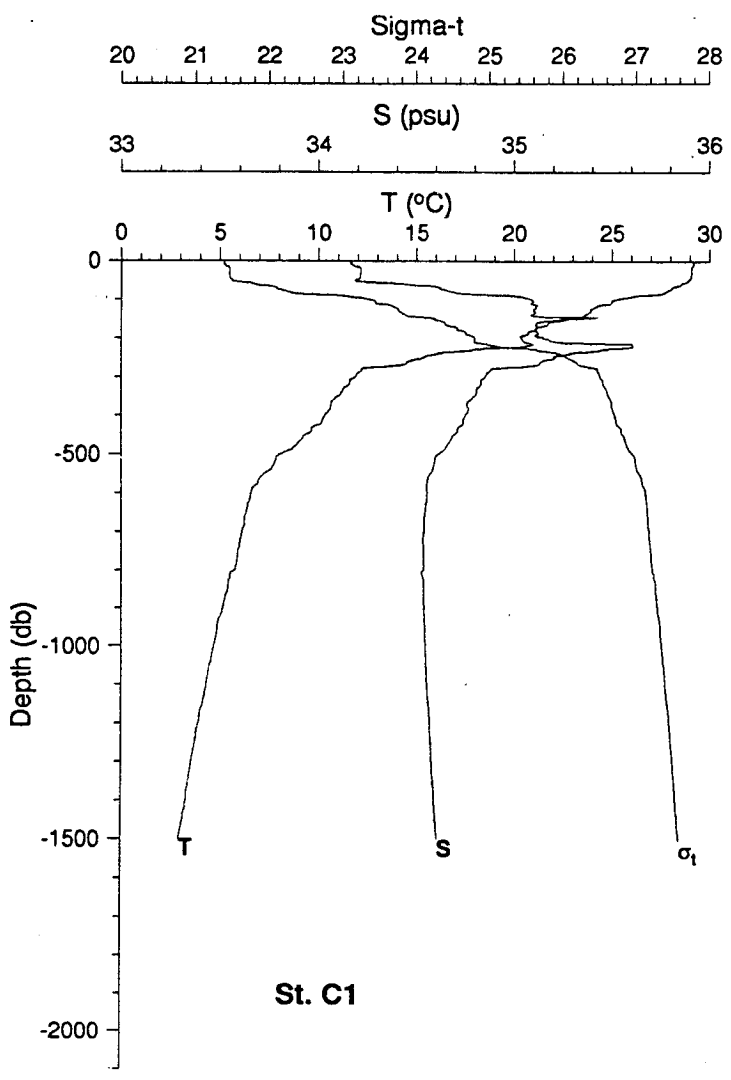


Figure 7. Vertical profiles of temperature, salinity and sigma-t at C1.

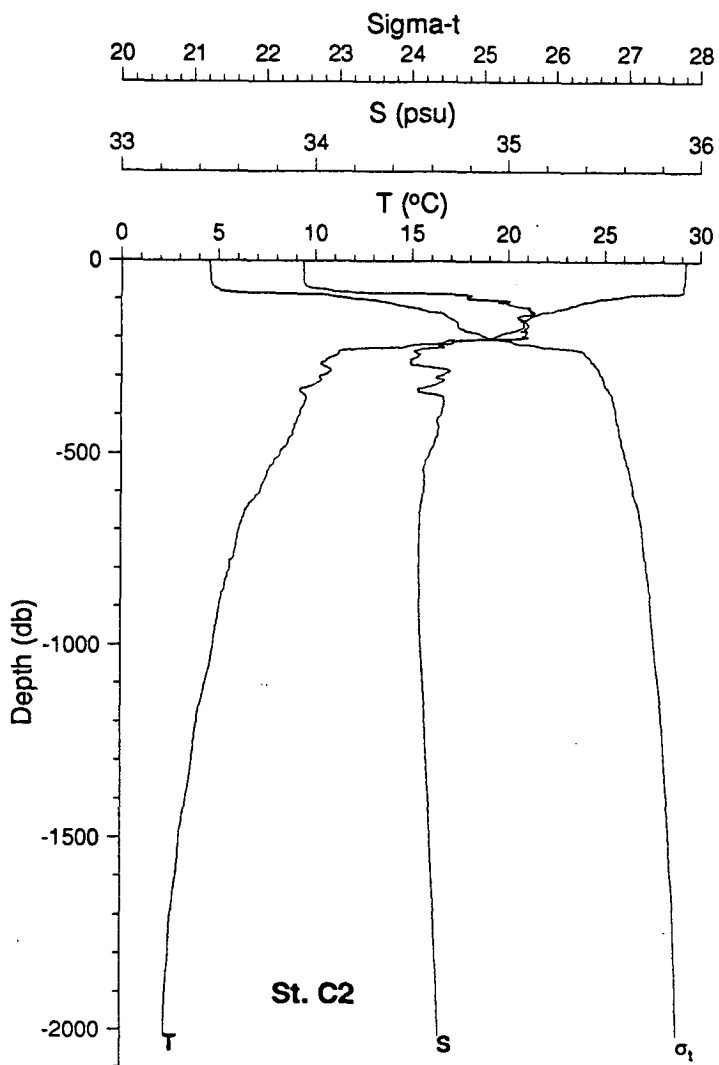


Figure 8. Vertical profiles of temperature, salinity and sigmat-t at C2.

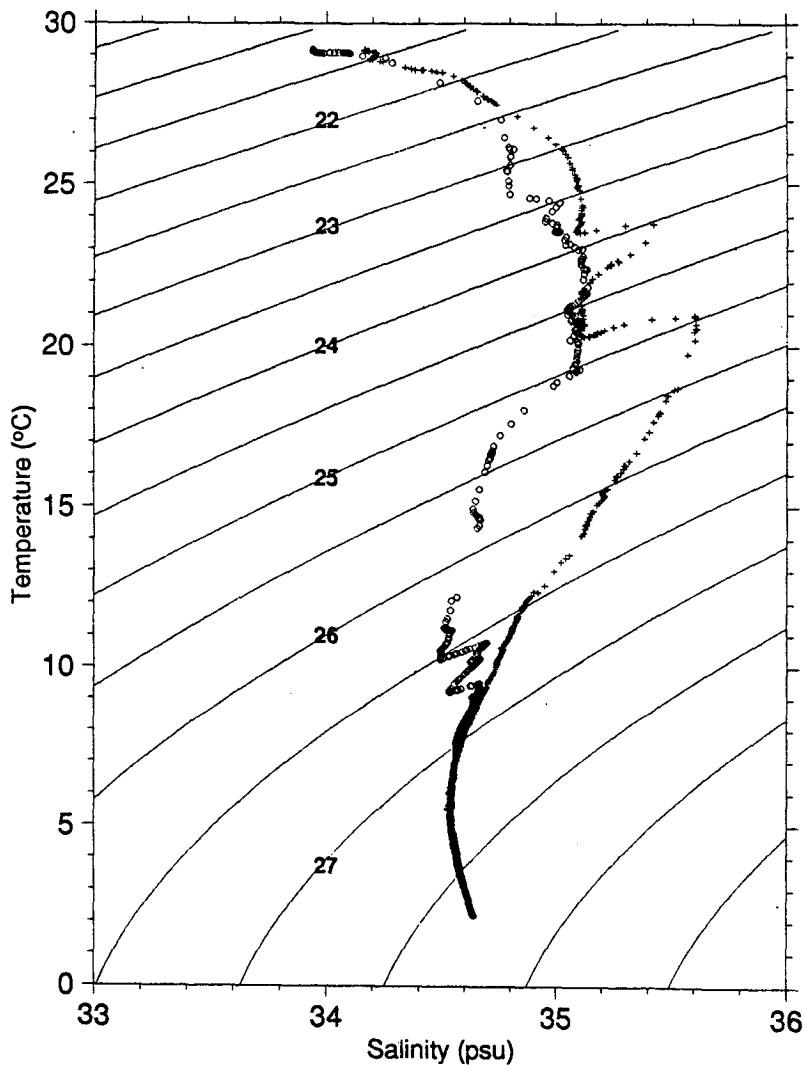


Figure 9. T-S Diagram of C1 (plus) and C2 (circle).

제 3 장 열대 서태평양에서의 수온의 수직구조

제1절 우리나라 ATLAS부이 자료

TOGA 연구사업의 전반기에 해당하는 1985년부터 1989년까지는 기존 자료를 활용하고 수치모델을 이용한 연구에 많은 성과가 있었다. 이 전반기 5년 동안의 성과를 바탕으로 후반기 연구방향이 정립되었는데, 먼저, 전지구 기후의 단기적인 변동성과 관련하여 ENSO (El Niño / Southern Oscillation) 현상이 갖는 중요성에 비추어 열대 태평양에서의 실시간 관측시스템의 개선에 노력을 기울이게 되었다. 이러한 개선에 지대한 공헌을 하고 있는 것은 열대태평양을 지속적으로 모니터링하는 관측망을 형성하고 ARGOS시스템을 사용하여 실시간으로 자료를 획득하는 TOGA-TAO 사업이다 (기상연구소 1992, 한국해양연구소 1992). 이와 같은 모니터링을 통하여서 이상기후 경보체제를 확보할 수 있을 뿐 아니라 모델링 연구에 양질의 입력자료로서 또는 검증자료로서 활용할 수 있으므로 그 효용성은 매우 크다. 이 사업은 미국의 태평양해양환경연구소(PMEL)가 주도적으로 추진하면서 우리나라, 일본, 대만, 프랑스 등의 적극적인 지원을 받고 있다. 우리나라는 1992년부터 참여하였는데 기상연구소의 보고서(1992)에서 이 사업을 상세히 설명하고 있다.

기상연구소에서는 1992년 4월부터 우리나라 ATLAS부이를 동경 137도 북위 2도에 설치하고 미국 PMEL을 통하여 자료를 획득하고 있으며 1993년 4월부터는 북위 5도에 추가로 설치하여 2대의 ATLAS부이가 가동 중이다. ATLAS부이는 해면상 3.8미터의 바람, 상대습도, 기온과 해수면수온을 1시간마다 측정함과 아울러 10개층의 수온을 매일 정오에 측정하고 ARGOS시스템을 이용하여 전송함으로써 실시간 자료획득을 가능하게 한다. 10개층의 관측수심은 25, 50, 75, 100, 125, 200, 250, 300, 500미터 층으로 구성되어 있다.

Korean ATLAS (2°N 137°E)

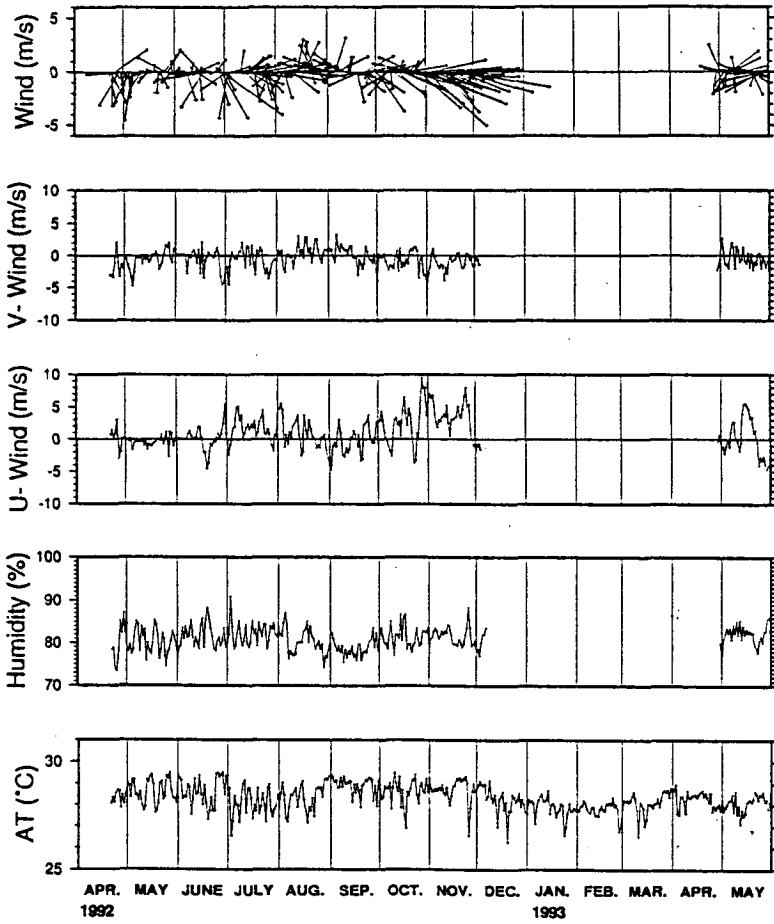


Figure 10 (a). Time series of parameters observed at ATLAS Buoy Station ATLAS-137E2N.

Korean ATLAS (2°N 137°E)

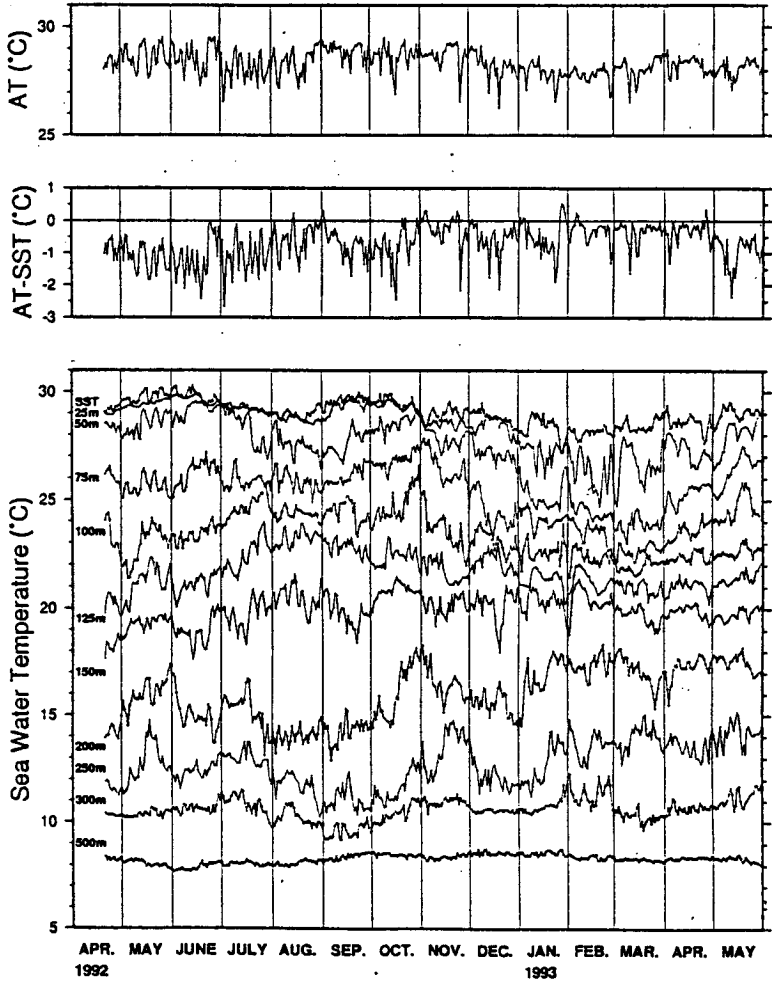


Figure 10 (b). (continued)

ATLAS-137E2N (동경 137도 북위 2도의 ATLAS 계류 정점)은 1992년 4월부터 관측을 시작하였으므로 1년간의 자료가 확보되어 있고, ATLAS-137E5N (동경 137도 북위 5도의 ATLAS 계류 정점)은 1993년 4월부터 관측을 시작하였으므로 아직 몇 개월 지나지 않은 상태이다. 본 연구에서는 ATLAS-137E2N의 1992년 4월부터 1993년 5월까지의 자료를 사용하여 분석하였다. ATLAS-137E2N에서 획득한 관측 요소의 자료를 시간에 따라 그림 10에 제시하였으며 관측요소의 극한값과 표준편차는 표 1에 요약하여 정리하였다. 바람과 습도는 1992년 12월부터 센서에 문제가 발생하여 부이의 유지 및 보수를 위한 항해가 이루어진 1993년 4월까지 결측되었다. 기온과 해수면수온의 평균은 각각 28.35도, 29.03도로 높으며, 기온과 해수면수온의 차이의 평균은 0.68도로 거의 년중을 통하여 해수면수온이 높게 나타나며 년 변화는 크지 않다 (그림 10b).

Table 1.. Statistical Summary of Observations at ATLAS Buoy Station
ATLAS-137E2N.

ITEM	MEAN	STANDARD DEVIATION	MINIMUM	MAXIMUM	NO. OF GOOD DATA
WIND-U	0.95	2.59	-4.69	9.49	261
WIND-V	-0.49	1.53	-5.18	3.29	261
REL. H	81.00	2.90	73.40	91.00	260
AIR T	28.35	0.61	26.26	29.54	406
AT-SST	-0.68	0.57	-2.67	0.53	406
SST	29.03	0.58	27.18	30.29	406
T25	28.36	1.16	24.71	29.90	406
T50	26.98	1.70	22.99	29.57	406
T75	25.11	1.35	22.12	27.82	406
T100	23.32	1.04	21.39	26.60	406
T125	21.74	0.87	19.62	23.98	406
T150	19.92	0.75	17.59	21.56	406
T200	16.00	1.34	12.92	18.37	406
T250	12.73	1.13	10.25	15.20	406
T300	10.60	0.53	9.20	12.30	406
T500	8.31	0.23	7.68	8.79	406

각 수심층의 수온의 표준편차를 살펴보면 중위도 해역과 달리 열대해역의 특징적인 면을 보여준다 (표 1). 해수면을 제외한 250미터 수심층까지의 상층부 수온의 표준편차가 0.75-1.70도 범위에 놓여있는데, 이것은 해수면의 0.58도 보다 모두 큰 값이며, 150미터 수심층에서 가장 작은 0.75도, 그리고 50미터 수심층에서 가장 큰 1.70도이다. 500미터 수심층의 수온의 표준편차는 0.23도로 작지만 300미터 수심층은 0.53도로 해수면의 0.58도와 비슷한 크기, 그리고 250미터 수심층은 1.13도로 해수면 바로 아래의 25미터 수심층의 1.16도와 비슷한 크기이다. 수심이 300미터 보다 깊어지면서 수온의 표준편차가 낮아지는 것은 해양 내부로 들어가면서 단순감소하는 현상으로 중위도 해역을 포함한 대부분의 해역에서 나타나는 일반적 경향이다. 즉 열대 해양의 특징적 현상은 주로 수심이 300미터 보다 얇은 상층부에서 나타남을 알 수 있다. 해수면수온의 표준편차가 작은 것은 대기와의 열교환이 활발하게 이루어지고 조정단계를 거쳐면서 년중으로 높은 수온을 유지함으로 그 편차범위가 제한되고 있기 때문이다. 250미터 수심층에서도 큰 표준편차 값을 보이는 것은 이 수심층까지 열적교환이나 외력의 작용 또는 이류에 의한 변동이 활발하게 이루어지고 있음을 나타낸다.

그림 11은 수심층별 관측수온을 이용하여 시간에 따른 등수온선의 변화를 보인 것이다. 수온약층은 연중을 통하여 수심 300미터까지 형성되어 있으며 상부혼합층의 두께가 변화하고 있는데, 1992년 4월부터 12월까지 50미터 정도를 유지하다가 1993년 1월에 들어와서 사라지고 1993년 4월부터 다시 서서히 상부혼합층이 형성되고 있는 것으로 보인다. 1992년 4월부터 1993년 5월까지의 자료를 분석하고 있는데 수직구조의 연간 진동이 크게 뚜렷하지 보이지 않는다. 반면에, 수온 10도의 등수온선을 보면 짧은 기간 동안에 많은 수심 변화를 보이고 있으나 그 상부에 놓여 있는 수온약층에 의하여 제약되고 있는 것으로 보인다. 1992년 7월부터 10월의 기간 동안에는 수온 10도의 등수온선이 그 상부층의 등수온선을 밀어올린 형태이지만 1993년 3월의 경우에는 그렇지 않다. 1993년 3월의 경우를 제외하고는 수온 11도, 12도 등의 등수온선이 수온 10도의 등수온선과 연동하여 승강 및 하강하고 있다. 그렇지만, 이 수심층 부근에서는 층별 관측이 250미터, 300미터와 500미터의 수심층에서만 이루어졌으므로 좀 더 세밀한 분석을 하기에는 부족하다. 수온약층의 가운데에 해당하는 20도의 등수온선을 살펴보면 그 수심변화가 연중을 통하여 뚜렷하지 않다.

Korean ATLAS (2°N 137°E)

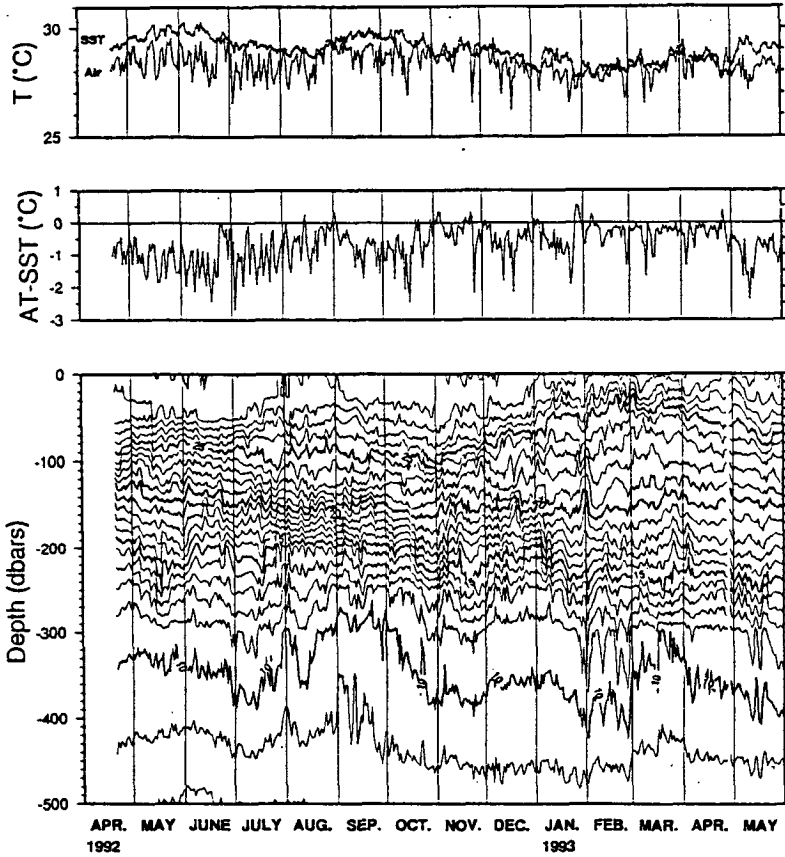


Figure 11. Time-depth plot of water temperatures observed at ATLAS Buoy Station ATLAS-137E2N.

제2절 경험적직교함수

지구물리학의 시간 크기의 관점에서 볼 때 해양현상의 수직적 변화는 수평적 변화보다 매우 느리기 때문에 수직 및 수평 성분을 분리하여 다룰 수 있다는 가정 아래에서 수직구조적 접근방식이 유효하다. 수직구조적 접근방식은 3차원 공간에 대한 수치모델을 구사하는 연구에서 수직성분을 표현하는 개념으로 사용되어 왔다. 본 연구에서는 한 정점에서의 수직구조를 분석하는 것이므로 여러 개의 함수를 선택하여 이 함수들의 합으로서 수직구조를 유사하게 나타낼 수 있다. 연속 함수로서 멱급수나 삼각함수, 로그함수 등이 사용되어지기도 하지만 기존자료가 있는 경우에는 이 기존자료가 내포하고 있는 수직구조적 특성을 추출하여 사용하는 것이 효과적이다. 기존자료가 내포하고 있는 특성을 추출하는 방법으로 많이 사용되고 있는 것은 경험적직교함수(EOF; Empirical Orthogonal Function)이다.

경험적직교함수는 주로 기상학에서 사용하여 왔다. 즉, 주어진 기상관측망(x,y)에서 시간(t)에 따라 축적된 자료를 활용하여 각 기상관측망에서의 시간에 대한 값을 경험적으로 나타낸다. 이러한 목적이기 때문에 일반적으로 기상학에서의 경험적직교함수는 각 기상관측망 간의 교차공분산행렬(Cross-covariance Matrix)의 고유벡터(Eigenvector)로 정의된다. 본 연구에서는 주어진 수심층(p)에서 시간(t)에 따라 축적된 자료를 활용하여 각 수심에서의 시간에 대한 값을 경험적으로 나타내고자 한다. 그러므로 본 연구에서의 경험적직교함수는 수온의 각 수심 간의 교차공분산행렬의 고유벡터로 정의된다. 경험적직교함수를 구하는 방법은 일반적으로 사용되고 있는 것인데 석(1991)에 제시되어 있는 것을 따른다.

전기간에 대하여 고유값이 큰 순서로부터 4개의 경험적직교함수를 그림 12의 윗 칸에 도식화하였으며 아랫 칸은 해당하는 갯수의 경험적직교함수로 계산된 수온값의 평균 및 2배의 표준편차로 나타낸 변동범위와 원시자료의 평균 및 2배의 표준편차가 함께 표시되어 있다. 그림 12의 각 수심층의 변동범위를 보면, 첫번째 함수만으로 계산한 경우에는 수심 50미터 부근은 원시자료의 것과 계산된 변동범위가 유

사하여 첫번째 함수가 이 수심층을 잘 대표하고 있는 반면에 수심 150미터 부근은 이 함수와 관련이 거의 없는 것으로 보인다. 표 2에 요약되어 있는 바와 같이 각 함수가 차지하는 전 수심층에 대한 기여도는 첫번째 함수가 63%, 두번째 함수가 14%, 세번째 함수가 9% 등이다. 첫번째 함수만을 사용하여 계산된 수온으로는 입력된 수온의 총분산의 63%가 설명되어지며, 첫번째와 두번째 함수를 사용하는 경우에는 77%, 세번째까지의 함수를 사용한 경우에는 86%, 네번째까지의 경우에는 90%가 설명되어진다. 해당하는 함수와 이에 각각 해당하는 평균불일치정도가 표 2에 비교되어 있는데, 이것은 목적에 따라 어느 함수까지 사용할 것인가를 결정하여 절사하는 기준으로 참고하게 된다.

Table 2. Summary of Empirical Orthogonal Functions considered for vertical structure of temperature.

i : index of the EOF(mode) considered.

$C(i)$: contribution of each EOF to the total variance in %

$A(i)$: Accumulated contribution of the first i EOFs.

$M(i)$: rms difference between the data and the reconstructed temperature field using the first i EOFs(units: $^{\circ}\text{C}$)

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$C(i)$	62.90	13.83	9.46	4.27	2.72	2.41	1.41	1.08	0.88
$A(i)$	62.90	76.74	86.20	90.47	93.19	95.61	97.03	98.11	99.00
$M(i)$	0.4769	0.3760	0.301	0.2421	0.2039	0.1634	0.1304	0.1011	0.0585

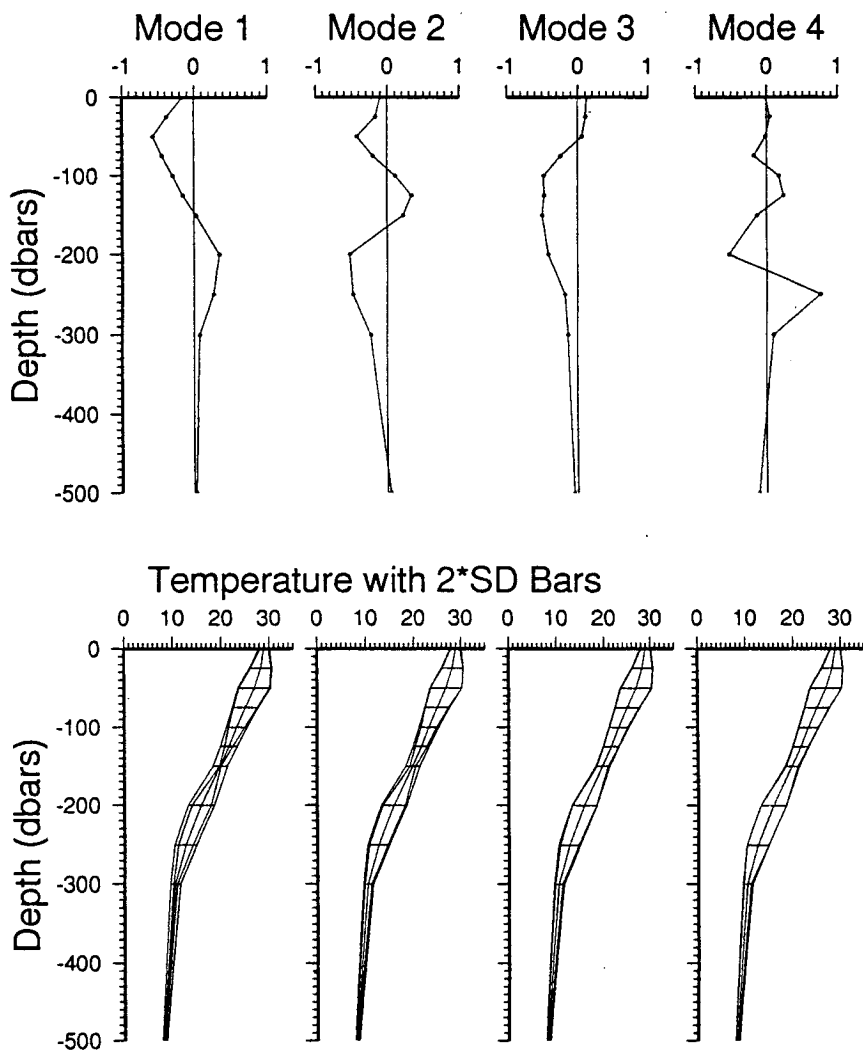


Figure 12. Vertical modes of Empirical Orthogonal Functions (EOF) determined by using all observed data at ATLAS Buoy Station ATLAS-137E2N.

제3절 수온의 수직구조적 특성

중위도 해역의 수온의 수직구조를 분석한 한국해양연구소(1991)의 결과에서 제1모드는 표층으로부터 수심이 깊어질수록 단순감소하는 것으로 표층으로부터의 외력의 작용을 나타내며, 제2모드는 중층의 한 수심층에서 수평적 이류를 통하여 그 변화를 주도하는 형태이다. 이것은 이론적인 경압성 제1모드와 제2모드의 전형적인 형태이다. 그런데 열대해양에서 이처럼 단순감소하는 제1모드나 한 수심층이 주도하는 제2모드가 보이지 않는 것은 매우 특징적이다 (그림 12). 수심 100미터보다 얇은 것은 없는 것으로 간주하고 결과를 검토하면, 제3모드가 수심이 깊어지면서 단순감소하는 이론적인 경압성 제1모드에 해당하고 제1모드가 경압성 제2모드에 해당한다. 그러므로 수심이 얇은 상부혼합층은 열대 해양의 특징을 가지고 있으며, 그 보다 깊은 수심에서 단순감소하는 제3모드의 현상적 해석은 중고위도 해역에서와 마찬가지로 특기할 사항이 아니나 그 기여도가 세번째에 해당하는 점은 특기할 사항이다. 제1모드와 제2모드의 극값을 나타내는 100미터 보다 깊은 수심층에서는 현상적 해석이 가능할 것이다. 앞 절에서 지적한 바와 같이 표층에서 300미터 수심층에 이르기까지 각 수심층 수온의 표준편차가 0.5-1.7도의 범위에 놓여있다. 표층에서는 300미터 수심층과 비슷한 0.5도의 작은 표준편차를 보이며 50미터 수심층과 200미터 수심층에서 큰 표준편차를 보이는데, 이것은 중위도의 경우와는 달리 수심에 따라 연속적으로 특징적 경향을 추출할 수 없을 만큼 산만한 것이다. 이러한 경향은 열대해양에 존재하는 적도반류로 인하여 복잡한 수직구조를 나타내게 되며, 열대해양의 상층구조가 외부로부터 주어지는 힘에 매우 빠르게 변화하고 수직적 변화범위도 중위도와 비교하여 크다는 점에서 기인된다.

제1모드의 수직적 특징은 50미터와 200미터의 수심층에서 극값을 갖는데, 그 부호는 반대로 반대적인 효과가 나타남을 의미한다. 제2모드는 50미터, 125미터와 200미터의 수심층에서 극값을 갖고, 50미터와 200미터 수심층에서는 음의 부호를 그리고 125미터에서는 양의 부호를 갖는다. 50미터 수심층에 나타난 극값은 열대해양의 상층구조이고, 200미터 수심층이 제1모드와 제2모드 양쪽에서 모두 극값을 갖고 있는

것은 200미터의 수심층이 본 연구 해역에서 매우 의미있는 수심층으로 받아들일 수 있다. 이것은 열대해양에서는 대기와 곧바로 반응하는 상층이 있으며 그 아래에 약 100미터의 두께를 갖는 적도반류가 존재하고 그 아래에 존재하여 적도반류와 뚜렷히 구별되는 것이 200미터 수심층이다.

그림 13는 경험적적교함수로 대표되는 각 모드의 크기를 시계열로 나타낸 것이다. 제1모드에서는 뚜렷한 연간 진동을 보여주고 있다. 연간 진동이 중위도 해역과 같이 현저하지는 않지만 열대해역에서도 가장 크게 나타나는 현상은 연간 진동에 따른 계절변화이다. 제2모드는 약 100일의 주기 진동을 보여주는 것이다. 그런데 적도 태평양에서 가장 특징적인 변동은 Madden and Julian (1972) 이후 많은 관측 자료의 분석을 통해 밝혀진 30-60일 주기를 갖는 진동이지만 이와 같은 진동이 뚜렷하게 보이지는 않는다. 제3모드와 제4모드는 자료의 전기 200일과 후기 200일에서 차이가 있는데, 후기 200일 동안은 짧은 주기의 작은 변동을 포함하고 있다. 이것은 시기적으로 1992/93년의 엘니뇨가 존재했던 때와 일치하는 것으로 보이는데 그 역학적 해석은 더 연구해야 할 과제이다.

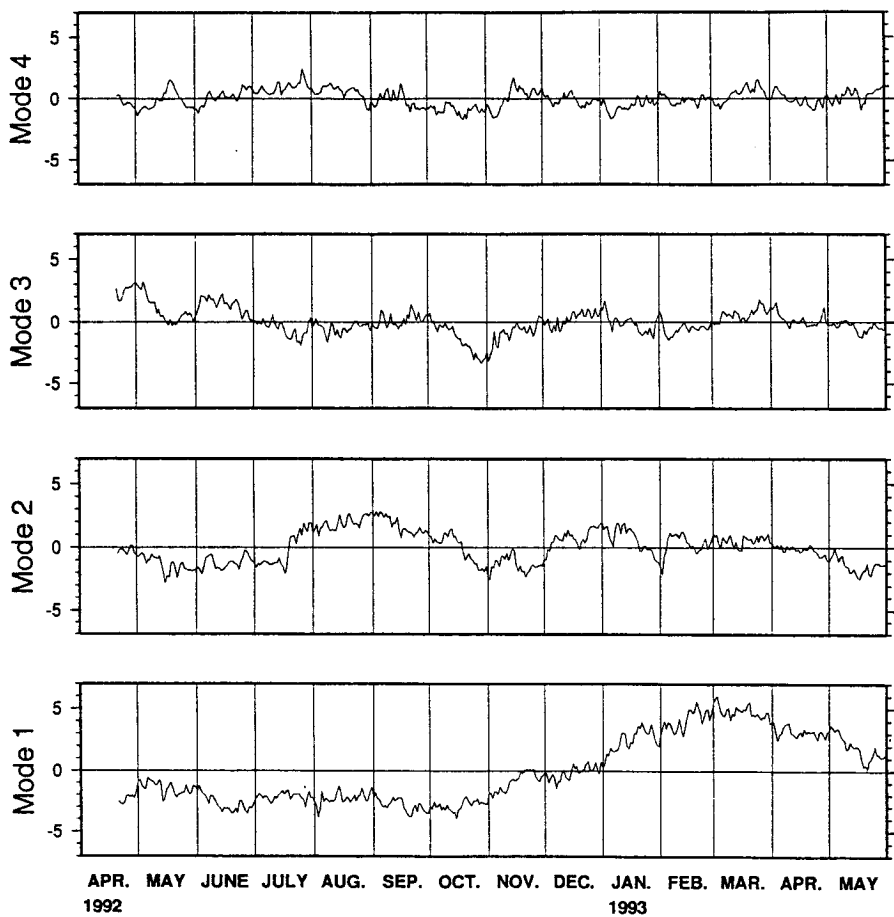


Figure 13. Time series of the EOF amplitudes for each mode.

제 4 장 결론 및 토의

1992년에서 1993년으로 이어지는 4개월간은 전세계적으로 해양학자와 기상학자에 게는 금세기에 가장 의미있는 기간이었다고 할 수 있다. 왜냐하면 1985년에 시작한 국제 TOGA 연구사업이 그 동안의 연구 성과를 바탕으로 제시한 정밀하고 집중적인 관측이 바로 이 기간에 이루어졌기 때문이다. 즉, 열대 서태평양에서 Warm-Pool의 변이가 어떻게 유지되며, 특히 Warm-Pool에서 대기-해양간의 플럭스, 해면수온, 그리고 해양의 상층구조가 어떻게 진동하는가를 실제로 관측하는 IOP 계획이 설정되었다. 이러한 관측은 동시성을 강조하여 현장에서와 원격으로 1992년 11월부터 2월까지 4개월 동안에 이루어졌다. IOP기간 중에 국제 협력 관측에 참가한 조사선은 총 12척(미국 3척, 일본 3척, 중국 3척, 프랑스 2척, 호주 1척)이었다. IOP의 일환으로 일본 동경대학 해양연구소 소속 조사선인 4000 톤급의 Hakuho-maru도 관측에 참가하였는데 본 연구사업에서는 Hakuho-maru의 첫번째 항차에 우리 연구소 소속의 2명의 연구원을 승선하게 하여 연구인력으로 참여하였다. 1992년 10월 31일에 시작되어 11월 7일에 종료한 첫번째 항차는 우리나라 연구원 외에도 일본의 각 대학 및 연구소에서 28명의 인력참여가 있었다. 이와 같은 협력 연구에 참여함으로써 관측 자료를 공유하게 되어 국제적으로 대등한 연구를 가능하게 한다. 본 연구에서는 관측 자료를 일차적으로 처리하고 분석하였다.

전지구 기후의 단기적인 변동성과 관련해서 ENSO(El Niño / Southern Oscillation) 현상이 갖는 중요성에 비추어 열대 태평양에서의 실시간 관측시스템의 개선에 노력을 기울이게 되었다. 이러한 개선에 지대한 공헌을 하고 있는 것은 열대 태평양을 지속적으로 모니터링하는 관측망을 형성하고 ARGOS시스템을 사용하여 실시간으로 자료를 획득하는 TOGA-TAO(TOGA Tropical Atmosphere - Ocean) 사업이다. 이와 같은 모니터링을 통하여서 이상기후 경보체제를 확보할 수 있을 뿐 아니라 모델링 연구에 양질의 입력자료로서 또는 검정자료로서 활용할 수 있으므로 그 효용성은 매우 크다. 그러므로 TOGA-TAO사업이 국제 TOGA 연구사업에서 차지하는 비중은 매우 높으며, 1995년에 현장조사를 완료하는 국제 TOGA 연구사업

이후에도 TOGA-TAO사업은 지속될 것으로 전망된다. 이 TOGA-TAO사업의 일환으로 1992년 4월에 열대 서태평양 해역에 대한 COARE EQ-1 조사항해가 계획되었는데, 우리 연구소에서는 1명의 기술진을 승선하게 하여 연구인력으로 참여하였다. COARE EQ-1 조사항해를 수행한 조사선은 하와이 대학 소속의 MOANA WAVE (Ocean Wave)호이었으며, 연구기술진으로는 하와이대학의 Lukas교수를 수석연구원으로 하여 4명의 하와이대학 연구진과 2명의 PMEL 연구진, 그리고 우리나라에서 서울대와 한국해양연구소에서 각 1명씩 참여하여 8명이 승선하였고, 조사기간은 1992년 4월 17일부터 5월 15일까지 29일 동안이었다. 이와 같이 획득된 자료는 하와이대학에서 일차적으로 처리하여 참여연구자에게 배포되었으며, 본 연구에서는 기초적 분석을 시도하였다.

열대해양에는 중고위도 해역과 구별되는 고유하고 독특한 현상이 있는데 이것은 그 역학적 특성이 다름으로 설명할 수 있다. 열대해양에서의 역학적 특성은 적도에 접근함에 따라 소멸되는 Coriolis변수로 인하여 모멘텀 방정식에서의 역학적 균형이 중고위도 해역과 크게 다르다. 열대해양에서는 확산계수를 포함하는 항이 중요한 역할을 하게 되는데, 그로 인하여 얻어지는 대표적인 현상은 적도반류이다. 본 연구사업에서는 열대해양의 수온 수직구조를 분석하기 위하여 우리나라 ATLAS부이 자료인 ATLAS-137E2N(동경 137도 북위 2도의 ATLAS 계류 정점)의 1992년 4월부터 1993년 5월까지의 자료를 사용하였다.

각 수심층의 수온의 표준편차를 살펴보면 중위도 해역과 달리 열대해양의 특징적인 면을 보여준다. 해수면수온의 표준편차가 낮은 값을 갖는 것은 대기와의 열교환이 활발하게 이루어지고 조정단계를 거쳐면서 년중으로 높은 수온을 유지함으로써 그 편차범위가 제한되고 있기 때문이다. 250미터 수심층에서도 큰 표준편차 값을 보이는 것은 이 수심층까지 열적교환이나 외력의 작용 또는 이류에 의한 변동이 활발하게 이루어지고 있음을 나타낸다. 수심이 300미터 보다 깊어지면서 수온의 표준편차가 낮아지는 것은 해양 내부로 들어가면서 단순감소하는 현상으로 중위도 해역을 포함한 대부분의 해역에서 나타나는 일반적 경향이다. 즉 열대 해양의 특징적 현상은 주로 수심이 300미터 보다 얇은 상층부에 주로 나타남을 알 수 있다.

기존자료가 내포하고 있는 수직구조적 특성을 추출하여 사용하기 위하여 경험적 직교함수(EOF; Empirical Orthogonal Function)를 사용하였다. 중위도 해역의 수심의 수직구조를 분석한 한국해양연구소(1991)의 결과에서 제1모드는 표층으로부터 수심이 깊어질수록 단순감소하는 것으로 표층으로부터의 외력의 작용을 나타내며, 제2모드는 중층의 한 수심층에서 수평적 이류를 통하여 그 변화를 주도하는 형태이다. 이것은 이론적인 경압성 제1모드와 제2모드의 전형적인 형태이다. 그런데 열대해양에서 이처럼 단순감소하는 제1모드나 한 수심층이 주도하는 제2모드가 보이지 않는 것은 매우 특징적이다. 수심 100미터보다 얇은 것은 없는 것으로 간주하고 결과를 검토하면, 제3모드가 수심이 깊어지면서 단순감소하는 이론적인 경압성 제1모드에 해당하고 제1모드가 경압성 제2모드에 해당한다. 그러므로 수심이 얇은 상부혼합층은 열대 해양의 특징을 가지고 있으며, 그 보다 깊은 수심에서 단순감소하는 제3모드의 현상적 해석은 중고위도 해역에서와 마찬가지로 특기할 사항이 아니나 그 기여도가 세번째에 해당하는 점은 특기할 사항이다. 제1모드와 제2모드의 극값을 나타내는 100미터 보다 깊은 수심층에서는 현상적 해석이 가능할 것이다. 50미터 수심층에 나타난 극값은 열대해양의 상층구조이고, 200미터 수심층이 제1모드와 제2모드 양쪽에서 모두 극값을 갖고 있는 것은 200미터의 수심층이 본 연구 해역에서 매우 의미있는 수심층으로 받아들일 수 있다. 이것은 열대해양에서는 대기와 곧바로 반응하는 상층이 있으며 그 아래에 약 100미터의 두께를 갖는 적도반류가 존재하고 그 아래에 존재하여 적도반류와 뚜렷히 구별되는 것이 200미터 수심층이다.

경험적직교함수로 대표되는 각 모드의 크기를 시계열로 살펴보면, 제1모드에서는 뚜렷한 연간 진동을 보여주고 있다. 연간 진동이 중위도 해역과 같이 현저하지는 않지만 열대해역에서도 가장 크게 나타나는 현상은 연간 진동에 따른 계절변화이다. 제2모드는 약 100일의 주기 진동을 보여주는 것이다. 그런데 적도 태평양에서 가장 특징적인 변동은 Madden and Julian (1972) 이후 많은 관측 자료의 분석을 통해 밝혀진 30-60일 주기를 갖는 진동이지만 이와 같은 진동이 뚜렷하게 보이지는 않는다. 제3모드와 제4모드는 자료의 전기 200일과 후기 200일에서 차이가 있는데, 후기 200일 동안은 짧은 주기의 작은 변동을 포함하고 있다. 이것은 시기적으로 1992/93

년의 엘니뇨가 존재했던 때와 일치하는 것으로 보이는데 그 역학적 해석은 더 연구
해야 할 과제이다.

참고문헌

- 기상연구소 (1992): 한국-태평양 기후 시스템 연구 (I), 기상연구소 연구보고서, 254pp.
- 한국해양연구소 (1992): 국제 TOGA사업 참여를 위한 예비연구, 한국해양연구소보고서 BSPE00262-496-1, 49pp.
- 석문식(1991): 수온의 수직구조 분석연구, 한국해양연구소보고서 BSPE00194-349-1, 70pp.
- International TOGA Project Office (1990): The Tropical Ocean & Global Atmosphere Programme., Brochure of International TOGA Project Office, 29pp.
- Madden, R. and P. Julian (1972): Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period., J. Geophys. Res., 96(Suppl.), 3331-3342.
- TOGA-COARE (1991): TOGA-COARE Experiment Design., TOGA-COARE Project Office, 94pp.
- Webster, P.J., and R. Lukas (1992): TOGA-COARE: The Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment., Bull. Amer. Meteor. Soc., 73, 1377-1416.
- World Climate Research Programme (1990): Plan for the TOGA Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment., WCRP Publication Series No. 3 Addendum.
- World Climate Research Programme (1986): International Implementation plan for TOGA. ITPO document #2 (second edition), WMO, Geneva, 96pp.
- World Climate Research Programme (1985): Scientific Plan for the Tropical Ocean and Global Atmosphere Programme., WCRP Publication #3, WMO, Geneva, 146pp.