

냉·온배수 해양환경 연구를 위한 장기전략  
수립 및 예비연구

Long-term strategies and the pilot study for  
marine environmental studies of cold/warm water  
discharges

2018. 11

한 국 해 양 과 학 기 술 원

# 제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “냉·온배수 해양환경 연구를 위한 장기전략 수립 및 예비 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 11.

총괄연구책임자 : 송 규 민

참 여 연 구 원 : 강돈혁, 권재일, 권영연,  
김동성, 김경태, 김근용,  
김범준, 나공태, 박은석,  
박용주, 박준성, 백승재,  
소재귀, 송유재, 오승용,  
오경희, 유옥환, 유주형,  
이문숙, 이석, 이윤경,  
이재학, 이종찬, 이창열,  
황득재

## 보고서 초록

과제고유 번호	PE99567	해당단계 연구기간	2017/03/01 ~ 2017/12/31	단계 구분	단년도
연구사업명	중사업명				
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	국가사회적 해양과학기술 수요 예측 및 대응 연구(1)			
	세부과제명	냉·온배수 해양환경 연구를 위한 장기전략 수립 및 예비 연구			
연구책임자	송 규 민	해당단계 참여연구원수	총 : 26명 내부: 18명 외부: 8명	해당단계 연구비	정부: 100,000천원 기업: 천원 계 : 100,000천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 26명 내부: 18명 외부: 6명	총 연구비	정부: 100,000천원 기업: 천원 계 : 100,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 해양순환·기후연구센터		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	105
<p>○ 최종목표</p> <p>연안으로 배출되는 냉·온배수로 인해 발생하는 사회적인 갈등을 해소 또는 완화를 위한 해양환경 영향의 과학적 평가기술과 효율적인 관리 기술의 확립에 필요한 연구 기획 및 대응연구</p> <p>○ 주요연구내용</p> <p>1. 냉·온배수의 배출현황</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 주요 온배수의 배출시설과 현황</li> <li>- 주요 냉배수의 배출시설과 현황</li> </ul> <p>2. 냉·온배수의 해양환경 영향 진단 및 평가 기술</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 해양환경 환경 특성의 공간 구조 감시 및 냉·온배수 탐지 기술</li> <li>- 생태계 구성 인자에 미치는 영향과 피해 산출 기술</li> <li>- 냉·온배수에 관련 수중구조물의 안전망 구축 기술</li> </ul> <p>3. 냉·온배수에 의한 해양환경 변동 예측 및 대응 기술</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 냉·온배수의 거동 및 생태계 반응 예측 모형 기술</li> <li>- 해양환경 영향 저감 및 활용 기술</li> <li>- 냉·온배수 영향 생물검정 및 해양생태계 복원 기술</li> </ul> <p>4. 체계적인 냉·온배수에 관리를 위한 법령/제도의 개선방안 제안</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 주민, 배출원, 공공 분야의 협력을 위한 협의기구 구성</li> <li>- 배출안전진단제도, 분담금제도 등 법률 검토</li> </ul>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	온배수, 냉배수, 해양환경, 예측/평가, 관리방안, 장기전략			
	영 어	warm water, cold water, marine environment, prediction / evaluation, management plan, long-term strategy			

# 요 약 문

## I. 제 목

냉·온배수 해양환경 연구를 위한 장기전략 수립 및 예비 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

### ○ 최종목표

연안으로 배출되는 냉·온배수로 인해 발생하는 사회적인 갈등을 해소 또는 완화를 위한 해양환경 영향의 과학적 평가기술과 효율적인 관리 기술의 확립에 필요한 연구 기획

### ○ 필요성

- 냉·온배수와 관련한 수십 년간의 조사연구 성과에도 불구하고 아직 사회적인 갈등 해소에 도달하지 못함.
- 많은 연구에도 불구하고 과학적 성과가 누적되어 있지 않은 상황에서 냉·온배수 관련 역량을 정비하고 체계적인 연구를 수행하여 현안 해결에 기여할 필요가 있음
- 주요 1개소 현장에 대한 예비 조사 연구를 통해 관련 기술을 검증하고 핵심기술로 발전시켜 향후 연구 수요에 대비함

## III. 연구개발의 내용 및 범위

### ○ 냉·온배수의 배출현황

- 주요 온배수의 배출시설과 현황
- 주요 냉배수의 배출시설과 현황

### ○ 냉·온배수의 해양환경 영향 진단 및 평가 기술

- 해양환경 환경 특성의 공간 구조 감시 및 냉·온배수 탐지 기술
- 생태계 구성 인자에 미치는 영향과 피해 산출 기술
- 냉·온배수에 관련 수중구조물의 안전망 구축 기술

### ○ 냉·온배수에 의한 해양환경 변동 예측 및 대응 기술

- 냉·온배수의 거동 및 생태계 반응 예측 모형 기술
- 해양환경 영향 저감 및 활용 기술
- 냉·온배수 영향 생물검정 및 해양생태계 복원 기술

### ○ 체계적인 냉·온배수에 관리를 위한 법령/제도의 개선방안 제안

- 주민, 배출원, 공공 분야의 협력을 위한 협의기구 구성
- 배출안전진단제도, 분담금제도 등 법률 검토

#### IV. 연구개발결과

##### ○ 냉·온배수의 배출현황 분석

- 국내에서는 30개소의 발전단지에서 연간 약 725억톤의 온배수를 해양으로 배출하고 있으며 제철소에서도 연간 0.85억톤의 온배수를 배출
- LNG 생산기지에서는 연간 약 17억톤의 냉배수를 해양으로 배출
- 향후 2029년까지 약 110억톤이 온배수 배출이 증가 할 것으로 예측

##### ○ 냉·온배수의 해양환경 영향 진단 및 평가 기술 분석

- 보다 과학적이고 논리적인 냉·온배수의 영향 범위의 진단/평가 기술의 확립을 위해 다양한 기법의 시·공간적인 변화의 종합적인 판단 필요
  - . 현장조사와 원격탐사 이용 종관적 수온분포 파악
  - . 열수지 모델 개념의 도입
  - . 냉·온배수 최대 확산 범위의 제시
  - . 수치모델링과 상호 보완
  - . 다중 플랫폼을 이용한 모니터링
  - . 데이터 수집을 위한 IoT 플랫폼 개발
- 해역의 수질 및 환경에 영향을 미칠 수 있는 화학물질의 안전한 배출수 관리를 위한 정책 및 제도적 방안의 제시가 필요
  - . 생물 오손을 방지하기 위한 염소 처리
  - . 거품을 저감시키기 위한 소포제 배출
- 냉각계통 및 배출수의 해양생태계 영향 분석 기술
  - . 냉각계통에 유입되는 해양생물의 폐사 및 해양생태계의 변화 발생
  - . 냉·온배수의 강도, 노출 시간에 따른 해양생물에 미치는 영향 변화
  - . 생태계 영향 평가를 위한 표준화된 조사 및 분석 방법이 필요
- 냉·온배수의 해양환경 영향 예측 모델 기술
  - . 냉·온배수 예측은 3차원 유동 및 온배수확산 예측 모델 구축
  - . 과학적이고 객관적인 영향 평가 및 관리 체계 정립에 활용 필요

##### ○ 냉·온배수 관리제도 개선 방안

- 국내 냉·온배수 관리제도 현황
  - . 냉·온배수의 오염원에 대한 정의가 부족
  - . 어떠한 법도 냉·온배수의 관리에 대하여 구체적인 규정 없음
  - . 대법원은 온배수의 배출을 환경오염으로 판단
- 국외 냉·온배수 관리제도 현황
  - . 미국은 배출물질의 배출 자체보다 확산되는 구역에 대한 규제를 실시하고 있으며, 각 주는 연방법에 근거하여 환경에 따라 서로 다른 기준의 규제
  - . 일본은 온배수와 관련하여 발전소 가동 이후 온배수 이용을 관리하고 있으며, 1년간

- 사후조사와 발전소 가동 이후 3년간 모니터링 조사를 규정
- 프랑스는 수온 상승폭과 배출 최고수온을 정하여 관리
- 현행 국내 냉·온배수 관리제도의 현황과 문제점
  - 냉·온배수의 오염원에 대한 정의가 부족
  - 어떠한 법도 냉·온배수의 관리에 대하여 구체적인 규정 없음
  - 대법원은 온배수의 배출을 환경오염으로 판단
  - 실질적 냉·온배수의 배출기준 부재
  - 정부내에 냉·온배수를 전문적으로 다루는 위원회가 없음.
  - 냉·온배수의 영향에 대한 조사는 수온의 변화에 대한 피상적인 조사에 그치고 있어, 냉·온배수가 실질적으로 해양생태계에 어떠한 부분에 영향을 주고 있는지에 대한 객관적 자료가 부재함
- 냉·온배수 관리제도 개선 방안
  - “해양환경관리법” 제2조를 통하여 냉·온배수에 대한 새로운 정의규정을 마련하여 폐기물이 아닌 미활용에너지로 분류하여 냉·온배수의 배출을 위한 법적 근거 마련 필요
  - 냉·온배수의 배출기준을 설정하고 이를 관리 및 규제할 필요
  - 사업자에게 일정한 부담금을 부과하고 이를 통해 해양환경을 개선하고 지역인과의 갈등해소 조치를 취하는 단계 접근 필요.
  - 냉·온배수 관리방안은 갈등조정, 신뢰구축, 상호부조 측면에 다양한 역할 수행이 병행되어야 하는바, 관련 부처와 사업자의 적극적인 참여와 협조가 필요하므로 부처 실무자 위주의 냉·온배수 관리방안 협의체 구성이 필요

## V. 연구체계 정립을 위한 예비연구

### ○ 조사선 및 표층뜯개를 활용한 공간분포 조사

- 온배수 배출해역에 대한 수온분포와 해수유동 구조에 대한 정밀조사를 실시
  - 기존 연구결과와 해양환경특성을 고려하여 조사영역 설정
  - 조석 주기에 따라 동시적이고 반복적인 해수 물성 관측을 수행
  - 해수유동 특성은 고정점 부이와 뜯개 관측을 병행하여 수행
  - 전체적으로 온배수 배수구 인근 해역에서 수층의 수온변화가 크고 배수구에서 먼 해역에서는 수온이 비교적 일정
  - 조석 주기에 따라 수온의 구조 변화 발생

### ○ 헬리카이트를 활용한 표층수온 관측

- 풍선형 저고도 원격탐사 관측체 (Helikite)와 자체 제작 전용 관측 장비 활용
  - 배수구 인근 해역에 대한 매핑자료를 산출하고 온배수의 거동 관측
  - 온배수 관측을 위해 열화상카메라를 활용 카메라의 측면촬영(push broom)을 통해 관역의 관측을 수행
  - 33,721 매수의 관측 이미지를 사용 원자력 발전소 부근 수온 분포 확인
  - 기존의 수온관측 정점보다 더 넓은 범위의 고해상도 온도자료 산출
  - 배수구 인근에서 온배수의 확산동향 및 그 범위를 대략적으로 확인
  - 저고도 원격탐사 시스템을 통해 광범위한 매핑자료의 산출 가능성을 확인

○ 고정익 무인관측기를 활용한 표층수온 관측

- 직접 제작한 고정익 무인항공기를 활용하여 광범위 공간에 대해 영상 획득
  - . 기존 무인항공기 대비 운항 가능한 시간이 2~3배 증가 (약 2시간)
  - . 위성영상 대비 높은 해상도로 인해 미세한 온·배수 거동특성 탐지 가능
  - . 지상제어시스템을 통해 현장상황에 즉시 대처토록 설계
- 열적외선 무인항공기 시스템 구축
  - . 영상의 기하보정을 위해 GPS/INS 시스템을 결합한 무인플랫폼 구축
  - . 전천후 관측시스템으로 적시에 해양관측이 가능하며 저비용 고효율 시스템으로 기성품 대비 연구효율의 증가 예상
  - . 인공위성에 비해 관측범위는 좁지만 고해상도 열적외선 영상 획득 가능

○ 수치모형을 이용한 온배수의 이동·확산 모의

- 발전소 주변해역의 3차원 수치모형을 구축
  - . 온배수의 이동 및 확산 모의실험 체계를 구성
  - . 설계치 및 단기의 실시간 취배수량을 적용한 시험 적용
  - . 장기적인 모니터링과 연계하여 배출수의 장기 영향을 검토 가능

## VI. 연구개발결과의 활용계획

- 부처별 현안에 대한 대형 국가연구개발과제 제안
- 냉온배수 관련 핵심기술 확보 및 연구 역량 강화
- 냉·온배수에 의한 해양환경 피해 저감 및 사회적 갈등 해소

**키워드:** 온배수, 냉배수, 해양환경, 예측/평가, 관리방안, 장기전략

# S U M M A R Y

## (영 문 요약 문)

### I. Title

Long-term strategies and the pilot study for marine environmental studies of cold/warm water discharges

### II. Objectives and Necessity

- Scientific evaluation of marine environmental impacts is necessary to eliminate or mitigate social conflicts caused by cold / warm water discharge to the coast and research planning necessary to establish efficient management technology
- Despite decades of research on cold and warm water, it has not yet reached social conflict resolution.
- Despite many researches, it is necessary to improve the competency related to cold / warm water discharge and contribute to the solution of the problem by carrying out systematic research
- Preliminary research on one major site will verify relevant technologies and develop them into core technologies to prepare for future

### III. Content and Scope

- Emissions of cold / warm water discharge
  - Emissions facilities and status of major warm water discharge
  - Emissions facilities and status of major cold water discharge
- Marine environmental impact diagnosis and evaluation technology of cold and warm water discharge
  - Monitoring the spatial structure of marine environmental characteristics and detecting warm / cold water discharge
  - Influence on ecosystem constituents and damage calculation technology
  - Safety net construction technology of related underwater structures for cold and warm water discharge



## IV. Results

- Analysis of the emission status of cold and warm water
  - In Korea, about 75.25 billion tons of warm water is discharged to the ocean from 30 power plants in the year, and the steel mill releases about 85 million tons of warm water per year
  - LNG production base discharges about 1.7 billion tons of cold water per year to the ocean
  - Approximately 11 billion tons in the year will be increased till 2029
  
- Analysis and evaluation of marine environmental impacts of cold and warm water
  - Comprehensive judgment of temporal and spatial changes of various techniques is needed to establish diagnosis / evaluation technology of more scientific and logical influence range of cold and warm water discharge.
    - . Observation of the distribution of water temperature by using field survey and remote sensing
    - . Introduction of the concept of the thermodynamic model
    - . Presenting the maximum spread range of cold and warm water
    - . Numerical modeling and complementary
    - . Multi-platform monitoring
    - . Developed IoT platform for data collection
  - It is necessary to present policies and institutional measures for the safe management of effluents of chemical substances that may affect water quality and environment in the sea area.
    - . Chlorine treatment to prevent bio-contamination
    - . Anti-foaming agent
  
  - Analysis technology of marine ecosystem effect of cooling system and effluent
    - . Occurrence of marine life and marine ecosystem changes in cooling system
    - . Changes in the effects of cold and warm water on the marine life with exposure time
    - . Need for standardized survey and analysis methods for ecosystem impact assessment
  - Marine environmental impact prediction model technology of cold and warm water
    - . Three-dimensional flow and warm-water diffusion prediction model for cold / warm water prediction
    - . Need to apply to establish scientific and objective impact
  
- Improvement plan of cold / warm water discharge management system
  - Status of foreign cold / warm water management system
    - . In the United States, regulations on the spreading of emissions are more

- stringent than those of emissions, and each state is subject to different standards
- . Japan has been managing the use of warm water since the operation of the power plant in relation to warm water, and has conducted a one-year follow-up survey and three-year monitoring survey
- . In France has been managing water temperature rise and highest temperature
- Status and problems of the current domestic cold / warm water discharge management system
  - . Insufficient definition of pollution source of cold and warm water
  - . No regulations on the management of cold / warm water
  - . The Supreme Court judged the discharge of warm water as environmental pollution
  - . Absence of a reference standard for the actual cold / warm water discharge
  - . There is no committee dealing professionally with cold / warm water in the government.
  - . The investigation of the effects of cold and warm water is only superficially investigating the changes in water temperature, so there is no objective data on what part of cold and warm water is actually affecting the marine ecosystem.
- Improvement plan of cold and warm water management system
  - . Through the Article 2 of the 「Marine Environment Management Act」, a new definition for cold and warm water shall be prepared and classified as unused energy, not waste, so as to establish a legal basis for discharging cold and warm water
  - . Establishment of standards for the discharge of cold and warm water and need to manage and regulate them
  - . It is necessary to impose a certain burden on the operators, to improve the marine environment and to take steps to resolve conflicts with local people.
  - . As the management of cold and warm water is required to carry out various roles in the aspect of conflict adjustment, trust building, and mutual assistance, active participation and

## V. Pilot study for establishing research system

- Spatial distribution survey using survey line and surface layer
  - Detailed investigation of water temperature distribution and seawater flow structure for discharge of warm water discharge
    - . Establish survey area considering existing research results and marine environment characteristics

- . Simultaneous and repeated seawater property observations are performed according to the tidal cycle.
  - . The seawater flow characteristics are performed in parallel with the fixed point part and the irrigation observation part.
  - . As a whole, the water temperature changes in the water layer in the vicinity of the warm water discharge port are large, and the water temperature is comparatively constant
  - . Change in water temperature depending on tidal cycle
- Observation of surface water temperature using Helikite
- Inflatable low-altitude remote sensing observer (Helikite) and its own observation equipment
    - . Calculate mapping data for the waters near the drainageway and observe the behavior of the warm water
    - . Thermal imaging camera is used for observing the warm water. Observation of the station is performed through push broom of the camera.
    - . 33,721 Using observation images of number of sheets Confirmation of water temperature distribution near nuclear power plant
    - . Generate a wider range of high-resolution temperature data than existing water temperature observation vertices
    - . Approximate the diffusion trend of warm water and its range near the drainage
    - . Identify the possibility of producing a wide range of mapping data through low-level remote sensing systems
- Observation of surface water temperature using a fixed wing unmanned observer
- Acquisition of images for wide space by using a fixed-wing unmanned aircraft
    - . 2 ~ 3 times longer than conventional unmanned aircraft (about 2 hours)
    - . High resolution compared to satellite image enables detection of fine temperature and drainage behavior characteristics
    - . Designed to respond immediately to field conditions via ground control system
  - Construction of thermal infrared unmanned aircraft system
    - . Unmanned platform combined with GPS / INS system for geometric correction of image
    - . All-weather observing system enables timely observation of the ocean and low-cost high-efficiency system is expected to increase the efficiency of the research compared to the ready-made products
    - . Compared to satellites, observation range is narrow, but high-resolution thermal infrared images can be acquired

- Numerical model of moving and diffusion simulation of warm water
  - Construction of three-dimensional numerical model of the waters around the power plant
    - . Composition of migration and diffusion simulation system of warm water
    - . Application of design and application of short-term real-time discharge capacity
    - . Long-term monitoring of effluents in conjunction with long-term

## VI. Applications

- Proposal of national R & D project on issues by ministries
- Securing core technologies related to cold and warm water discharge and strengthening research capacity
- Reducing marine environmental damage and social conflicts by cold and warm water

Keywords: warm water, cold water, marine environment, prediction / evaluation, management plan, long-term strategy

# C O N T E N T S

Summary	iii
Chapter 1. Outline of the study	1
Section 1. Necessities of the study	1
Section 2. Trends of study in Korean and foreign countries	2
Section 3. Objectives of the study	3
Section 4. Contents and extents of the study	3
Chapter 2. Present emissions and main issues	5
Section 1. Operating states of discharging facilities	5
Section 2. Emissions states	8
Chapter 3. States of assessment and evaluation for marine environment	20
Section 1. Technics of assessment/evaluation for extent of impact	
Section 2. Analytic technics for discharging pollutants	28
Section 3. Analytic technics for impacts on marine ecosystem	31
Section 4. Prediction modeling for marine environment	37
Chapter 4. Improvements of management	41
Section 1. States of management system	41
Section 2. Problems of management system	42
Section 3. Improvement Methods	43
Chapter 5. Other technics for facilities	48
Section 1. Analyses of underwater inlet & outlet	48
Chapter 6. Pilot study for developing system	53
Section 1. Spatial research using ships and drifters	53
Section 2. Observation of surface temperature using helikite	68
Section 3. Observation of surface temperature using fixed-wing UAV	77
Section 4. Simulations of advection-dispersion using numerical model	87
Chapter 7. References	103

# 목 차

요약문.....	iii
제 1 장 서론.....	1
제1절 연구의 목적 및 필요성.....	1
제2절 관련 국내·외 동향.....	2
제3절 연구의 목표.....	3
제4절 연구의 내용 및 범위.....	3
제 2 장 냉·온배수 배출 현황과 주요 쟁점.....	5
제1절 주요 온배수 배출 시설의 운영 현황.....	5
제2절 주요 온배수 배출 현황.....	8
제 3 장 냉·온배수의 해양환경 영향 진단 및 평가 기술 현황.....	20
제1절 냉·온배수의 영향 범위의 진단/평가 기술.....	20
제2절 배출수의 오염물질 영향 분석 기술.....	28
제3절 냉각계통 및 배출수의 해양생태계 영향 분석 기술.....	31
제4절 냉·온배수의 해양환경 영향 예측 모델 기술.....	37
제 4 장 냉·온배수 관리제도 개선 방안.....	41
제1절 냉·온배수 관리제도 현황.....	41
제2절 현행 국내 냉·온배수 관리제도의 문제점.....	42
제3절 냉·온배수 관리제도 개선 방안.....	43
제 5 장 기타 냉·온배수 시설 관련 기술.....	48
제1절 냉·온배수 수중 취·배수 효과 분석.....	48
제 6 장 연구체계 정립을 위한 예비연구 수행.....	53
제1절 조사선 및 표층뜯개를 활용한 공간분포 조사.....	53
제2절 헬리카이트를 활용한 표층수온 관측.....	68
제3절 고정익 무인관측기를 활용한 표층수온 관측.....	77
제4절 수치모형을 이용한 온배수의 이동·확산 모의.....	87
제 7 장 참고문헌.....	103

## 〈그림 차례〉

그림 1. 발전전력량 추이 .....	7
그림 2. 우리나라 발전설비 추이 .....	8
그림 3. 연안지역에서의 천연가스 생산 공정도 .....	10
그림 4. 최종에너지와 전력소비량 .....	11
그림 5. 한국가스공사 본사 및 각 생산기지 전경 .....	19
그림 6. Landsat 8 TIR 밴드를 활용한 표층수온 분석 .....	25
그림 7. Landsat 8 OLI 영상의 클로로필 알고리즘을 분석 .....	26
그림 8. KOMPSAT-3A 위성으로 획득한 열적외선 영상 .....	27
그림 9. 고정익 무인항공기로 촬영한 열적외선 영상자료 .....	27
그림 10. 디메틸폴리실록산의 대표적인 분자 구조 .....	31
그림 11. 냉각계통에 의한 해양생태계 영향 평가 방법 모식도 .....	32
그림 12. 배수구 주변에서 거리에 따른 격자망 또는 방사상 정점 .....	35
그림 13. 온배수 배출에 의한 해양생태계 영향 범위 설정 방법 .....	37
그림 14. 모델 격자망도 및 수심도 .....	38
그림 15. 모델 검증 시계열 .....	39
그림 16. 온배수 확산 범위 .....	39
그림 17. 원전 취수구에 유입되는 해양생물 요소 .....	49
그림 18. 원전 취·배수구에 접근하는 인위적 요소 .....	49
그림 19. 원전 취·배수구 외해 및 인접 구역의 감시망 구축 개념도 .....	50
그림 20. 해양생물 실시간 통합 감시 체계 구축 개념안 .....	52
그림 21. 원전 취·배수구 통합 감시체계의 전체 흐름도 .....	52
그림 22. CTD 공간 분포조사 정점도 (Black dot)와 부이계류 정점도(red dot) .....	54
그림 23. 온배수 배수구 인근에 계류된 해양부이의 모습. 부이 하단에 해류계 장착됨. ....	54
그림 24. 수온계를 장착한 표층뜰개의 측면도. 수온센서는 수면하 0.05m, 0.5m, 1m에 각각 장 착됨. ....	55
그림 25. 동계시기에 해양부이에서 획득된 수온과 해수 유동 자료의 시계열분포. 각각의 패널 은 조석, 수온(표층, 1m, 2m, 4m), 수온차(표층-1m, 표층-2m, 표층-4m), 유속, 유향 의 시계열 분포를 나타낸다. ....	56
그림 26. 하계시기에 해양부이에서 획득된 수온과 해수 유동 자료의 시계열분포. 각각의 패널 은 조석, 수온(표층), 유속, 유향의 시계열 분포를 나타낸다. ....	56
그림 27. 동계시기에 조사선을 이용하여 관측한 정점 I05와 O05의 수온자료. T_pump (선상에 서 수온센서를 이용하여 표층수의 수온측정). 수온센서를 선박측면에 설치하여, 표층	

( $< 0.1\text{m}$ ),  $0.5\text{m}$ ,  $1\text{m}$ 의 수온 측정. CTD는 표층에서 바닥까지 연직관측 수행. (1)과 (2)는 낙조시기 (3/28일), (3)과 (4)는 창조시기(3/30일)의 수온 프로파일..... 58

그림 28. 정점별 표층수온과 수층수온의 수온차. 실선은 표층수온에서 수면하  $1\text{m}$  수온을, 점선은 표층수온에서 수면하  $0.5\text{m}$  수온을 뺀 수온차를 나타낸 것이다. .... 59

그림 29. 조사선을 이용해 관측한 동계 표층 수온의 공간분포 (낙조실험, 3/28일). 총 5회에 걸쳐서 관측이 이루어졌으며 (여기서는 4회 결과 제시), 각각의 그림은 (1) 시간에 따른 조석 변화, (2) 선박에 설치한 수온센서에서 얻은 연직분포도, (3) 조사선 이동 거리, (4) 수온차의 수평분포도 (CTD\_TEMPbottom - CTD\_TEMPsurf) (5) 수온차의 수평분포도 (CTD\_TEMPbottom - CTD\_TEMP1.5m) 로 구성되었다. .... 60

그림 30. 조사선을 이용해 관측한 동계 표층 수온의 공간분포 (창조실험, 3/30일). 총 4회에 걸쳐서 관측이 이루어졌다. 각각의 그림은 (1) 시간에 따른 조석 변화, (2) 선박에 설치한 수온센서에서 얻은 연직분포도, (3) 조사선 이동 거리, (4) 수온차의 수평분포도 (CTD\_TEMPbottom - CTD\_TEMPsurf) (5) 수온차의 수평분포도 (CTD\_TEMPbottom - CTD\_TEMP1.5m) 로 구성되었다. .... 61

그림 31. 수온계가 장착된 표층 뜰개 (총 5대)의 궤적과 표층( $<0.1\text{m}$ ) 수온값. 동계시기인 3월 28일 낙조시기 동안의 실험 결과를 나타낸 것이다. .... 63

그림 32. 수온계가 장착된 표층 뜰개 (총 5대)의 궤적과 표층( $<0.1\text{m}$ ) 수온값. 동계시기인 3월 30일 창조시기 동안의 실험 결과를 나타낸 것이다. .... 64

그림 33. 수온계가 장착된 표층 뜰개 (총 5대)의 궤적과 표층( $<0.1\text{m}$ ) 수온값. 하계시기인 9월 7일 낙조시기 동안의 실험 결과를 나타낸 것이다. .... 65

그림 34. 수온계가 장착된 표층 뜰개 (총 5대 중 4대 결과)의 궤적과 표층( $<0.1\text{m}$ ) 수온값. 하계시기인 9월 8일 창조시기 동안의 실험 결과를 나타낸 것이다. .... 66

그림 35. 뜰개 자료에서 획득한 수층 수온자료의 수온차 (표층-수면하  $1\text{m}$ )의 시계열분포. (1)은 그림 31, (2)는 그림 32에 제시된 뜰개 자료의 결과를 나타낸 것이다. .... 67

그림 36. 뜰개 자료에서 획득한 수층 수온자료의 수온차 (표층-수면하  $1\text{m}$ )의 시계열분포. (1)은 그림 33, (2)는 그림 34에 제시된 뜰개 자료의 결과를 나타낸 것이다. .... 67

그림 37. 본 과제에서 사용하는 저고도 원격탐사 관측체. 풍선형 관측체인 Helikite는 탑재될 수 있는 다양한 센서를 통해 연안범위에서 고해상도의 항공관측자료를 산출할 수 있다. .... 69

그림 38. 관측 장비에 탑재된 GPS의 위치정보를 통한 관측 별 비행체의 이동경로. (가) 2017.09.07. 13:12~17:31. (나) 2017.09.08. 10:35~13:00. (다) 2017.09.08. 15:13~17:45. ... 70

그림 39. Push broom 형식의 관측 방법. (좌) Push broom 형태를 이용하여 약  $10 * 20 \text{ km}$  영역 관측, (우) 관측 경로. .... 71

그림 40. (가), (나) 열화상 카메라를 통해 관측된 단일 관측이미지. (다) IMU 정보를 통해 모자이크 처리한 산출 결과물 예시(온배수 배수구 인근 지역). .... 71



그림 41. 3차원 공간 자세정보.....	72
그림 42. 온배수 배출구 남북 통합 전체 관측 이미지 매핑자료.....	73
그림 43. 온배수 배출구 남측 전체 관측 이미지 매핑자료.....	74
그림 44. 온배수 배출구 북측 전체 관측 이미지 매핑자료.....	74
그림 45. FLIR VUE PRO 열적외선 센서.....	78
그림 46. 비행 모니터링 및 제어 소프트웨어.....	79
그림 47. 무인항공기 운항경로.....	79
그림 48. 이륙 전 무인항공기.....	79
그림 49. 센서 내부 파라미터 추정 행렬.....	80
그림 50. 시스템 캘리브레이션의 각 요소별 개념도.....	80
그림 51. KOMPSAT-3A 인공위성.....	81
그림 52. Planck's Function.....	81
그림 53. KOMPSAT-3A 열적외선 영상의 자료처리 단계.....	82
그림 54. 고정익 무인항공기를 이용하여 촬영된 열적외선 영상자료.....	83
그림 55. 영광 원자력발전소 배수로 고정익 무인항공기 일부 열적외선 영상.....	84
그림 56. 영광 원자력발전소 배수로 고정익무인항공기 열적외선 전체 영상.....	84
그림 57. KOMPSAT-3A 데이터 검증을 위한 정점위치.....	85
그림 58. 모델 격자망도.....	93
그림 59. 모델 수심도.....	93
그림 60. 보검증 위치도.....	94
그림 61. 관측치와 모델치 조위 재구성 시계열.....	95
그림 62. 관측치와 모델치 조류 재구성 시계열.....	96
그림 63. 취수구 및 배수구의 수온 시계열 (한국수력원자력).....	97
그림 64. 부이 표층수온 시계열 (한국해양과학기술원).....	97
그림 65. 온배수 확산범위.....	99
그림 66. 초과수온 제시 정점.....	99
그림 67. 정점별 초과수온 시계열.....	100

## <표 차례>

표 1. 발전회사별 발전소운영 현황 및 위치.....	6
표 2. 한국전력공사(주) 6개사 및 민자 발전의 연간 발전소 온배수 배출 현황(2016년).....	9
표 3. 한국전력공사(주) 6개사의 연간 해역별 온배수 배출 현황(2016년).....	9
표 4. 생산 기지별 냉각용 온배수 해양 배출 평균량.....	10
표 5. 우리나라 LNG생산기지의 냉배수 연간 배출량.....	10
표 6. 생산 업종별 기화용 해양배출 냉배수 평균량(2014).....	11
표 7. 발전원별 발전설비 규모 및 비중.....	12
표 8. 발전원별 발전량 규모 및 비중.....	12
표 9. 공기업 및 민간설비 비중 및 용량.....	12
표 10. 목표수요 전력소비량 및 최대전력 예측결과 .....	13
표 11. 전력수급기본계획과 제7차 전력수급기본계획의 설비비중 (출처: 산업통상자원부).....	14
표 12. 적정 설비규모 및 전원구성 방안 .....	15
표 13. 연료별 사업 준비기간.....	15
표 14. 기존 계획설비 및 신규 의향설비 종합.....	16
표 15. 연차별 확정설비 및 신규 의향설비 내역.....	17
표 16. 국내 LNG 생산설비 용량.....	18
표 17. 수온 조사 방법의 비교.....	21
표 18. 해수유동 조사 방법의 비교.....	22
표 19. 각 플랫폼 별 센서의 촬영 영역 및 데이터 정보.....	24
표 20. 거품 형성에 따른 문제점.....	30
표 21. 미생물 조사 방법.....	33
표 22. 식물플랑크톤 조사 방법.....	34
표 23. 최대확산거리 및 최대 확산범위 .....	40
표 24. 취·배수구 위협 요소 및 특성.....	48
표 25. 감시체계 구성 시스템 .....	51
표 26. 고정익 무인항공기 시스템 제원.....	77
표 27. FLIR VUE PRO 스펙.....	78
표 29. 2017년 9월 8일 13시 30분 경 KOMPSAT-3A, 부이 자료 비교.....	85
표 30. 모델 보정 및 검증 개요.....	94
표 31. 조석 검정 결과.....	95
표 32. 조류검정결과.....	96
표 33. 온배수 확산 실험안.....	98

# 제 1 장 서론

## 제1절 연구의 필요성

### 1. 냉·온배수의 해양환경 영향과 국가·사회적 갈등

- 우리나라의 많은 국가기간산업 시설이 효율을 높이기 위하여 연안에 건설되어 운영되고 있음. 발전소와 제철소의 경우 열교환 과정의 폐열의 처리를 해수를 이용하며 이 과정에서 주변의 해수보다 5~10℃ 가량 수온이 높은 온배수가 해양으로 배출함. 대규모 LNG 저장시설에서 액화상태의 LNG를 기화하기 위하여 해수를 사용하며 주변 해수보다 5℃ 가량 수온이 낮은 냉배수를 배출함.
- 우산업시설에서 연안에 배출하는 전체 온배수와 냉배수의 양은 2016년 기준으로 각각 약 726 억톤과 17 억톤으로 알려져 있으며 장래 전력수급 계획을 고려하면 온배수의 배출량은 연간 110억톤 규모의 증가가 예상됨.
- 연안에서 냉·온배수는 주변의 자연적으로 해양환경의 해수와 다른 온도로 인해 해양환경에 직접적인 충격으로 작용하여 해양생물의 치사에 직접 영향을 주지 않더라도 해양생태계의 종다양성, 생산성, 해양생태계의 건전성에 영향을 미칠 수 있음. 또한 냉·온배수는 해수의 밀도에 직접적으로 영향을 미쳐 주변해역의 해수순환체계의 변화를 초래하여 해양환경 전반에 걸친 변화를 유발할 수 있음. 결과적으로 냉·온배수의 배출이 주변해역의 수산생산성에 영향을 주어 어업피해를 유발한다는 민원이 발생하여 지역주민들과의 갈등이 지속되고 있음.

### 2. 냉·온배수 관련 갈등의 고착화 원인

- 1980년대 이후 온배수에 의한 어업피해 보상액은 5,000 억원에 이르고 있으나 보상을 통해 갈등이 해소되지 않아 민원이 지속되어 갈등이 지속되고 있으며 이로 인한 사회적·경제적 손실은 더욱 크다고 할 수 있음. 이러한 갈등의 시초는 안정적인 에너지 수급의 국가적인 대명제와 건강한 해양생태계 보전이라는 사회적 요구가 상충하고 있는 현실에서 기인하며 피해보상체계와 복잡하게 연계되어 있는 이해당사자들의 사이의 불신이 배경하고 있음.
- 갈등의 고착화에는 온배수의 경우 40년 이상의 조사연구에도 불구하고 자료의 공개가 제한되어 있고 이해당사자들의 상호의 약한 신뢰가 근본적인 이유로 지적되고 있음. 약하기 때문임. 자체 또는 되어 있지 않아 공공의 목적으로 활용 가능한 과학적인 축적자료가 취약하여 이해당사자들의 사이에 신뢰가 약함.

### 3. 갈등의 해소와 냉·온배수의 체계적 관리

- 갈등해소를 위해서는 냉·온배수의 영향에 대한 합리적인 판단의 근거를 마련하여 이해당사자들의 공감과 신뢰를 구축하는 과정을 선행하여야 함.
- 이를 위해 과학적인 자료의 축적과 해양환경영향에 대한 진단 및 평가 방법의 표준화가 시급히 요구됨.
- 이러한 과학적이고 합리적인 판단 근거를 통해 냉·온배수의 체계적 관리를 위한 제도적 보완이 요구되며 관련 법률의 개정이 필요함.
- 이 과정을 통해 냉·온배수 관련 분쟁을 사전에 예방하거나 단기에 갈등을 해소하는 것이 가능할 것으로 기대됨.

#### 4. 관련된 주요 핵심기술과 판단 근거

- 과학적이고 합리적인 판단의 근거를 확보하기 위해서는 다음과 같은 기술들에 대한 핵심기술을 확보하고 표준화할 필요가 있음.
  - 해양에 배출된 냉·온배수를 효과적으로 탐지할 수 있는 기술
  - 냉·온배수의 거동을 감시하고 거동을 감시하는 기술
  - 냉·온배수의 변동을 진단/예측하는 모델 기술
  - 냉·온배수와 관련된 해양구조물의 안전 기술
- 해양에서 냉배수는 낮은 수온으로 인해 해저면을 따라 이동·확산하는 특성이 있어 표층으로 이동·확산하는 온배수와 달리 탐지가 쉽지 않아 그 거동 및 해양환경 영향에 대해 상대적으로 잘 알려져 있지 않음. 다만, 해양환경에 대한 열적인 충격과 해수순환체계에 영향을 미치는 점에서 공동이 있어 유사한 분석방법이 적용 가능하지만 상이한 탐지방법의 적용이 필요함.

#### 5. 냉·온배수의 체계적인 관리제도 정비

- 냉·온배수의 체계적인 관리를 위해서는 다음과 같은 제도적 검토와 개선방안의 도출이 요구됨.
  - 국내·외 냉·온배수 관련 제도의 현황
  - 현행 국내 냉·온배수 관리제도의 문제점
  - 냉·온배수 관리제도의 개선방안

## 제2절 관련 국내·외 동향

### 1. 국내 연구 및 관리체계 동향

- 국내에서는 1970년대 이후 해양에서의 온배수의 거동, 해양환경영향 평가, 온배수의 재활용을 위한 연구가 본격적으로 시작되었으며 온배수와 관련된 많은 과학적인 성과와 제언이 발표됨 (김영환, 1999; 김영환 2000; 김광수 외, 2000; 김영환 외 2007, 박용철 외, 2007, 이재학 외, 2007)
  - 그러나 많은 연구에서 현장조사가 어업피해보상의 산정 또는 민원의 대응 목적으로 이루어져 공개가 제한적인 경우가 많고 법적인 의무로서의 공개되고 있는 환경영향평가 또는 사후 환경영향조사의 경우 표준화된 조사 및 평가 방법이 아직 수립되어 있지 않아 결과에 대한 이해당사자들의 신뢰나 공신력을 확보하지 못하고 있음.
  - 2000년대 이후 냉·온배수의 효율적인 관리를 위한 제도개선연구가 수차례에 걸쳐 수행되었음. 해양수산부 (2008)는 해양생태계 보전을 위한 온배수 관리방안 연구에서 온배수의 배출기준 수립과 온배수관리시스템 수립을 위한 연구를 수행하여 온배수관리위원회, 관련 전문연구기관 설립 등의 최초로 제안함. 한국환경정책·평가연구원 (2013)은 발전소 냉각수 배출에 따른 해양환경 영향예측 및 최소화방안 연구를 통해 온배수의 수중배수효과에 의한 해양환경 영향 최소화 방안을 검토하고 배출기준의 수립을 다시 제안하였음. 해양수산부 (2015)는 해양배출 냉·온배수 실태조사 연구를 통해 온배수와 함께 냉배수를 포함한 해양배출수의 해양환경영향에 대해 현황 및 문제점을 도출하고 관리방안을 제시하였으며 큰 기조에서는 해양수산부 (2008)의 결과를 보다 세밀하게 보완하고 있음. 그러나 이해당사자들의 합의가 도출되지 못하

여 제안된 배출기준의 수립이나 제도개선 등이 실제로 이루어지지 못하여 현재의 갈등해소로 이어지지 못하고 있음.

- 정부에서는 기후변화 대응을 위한 ‘에너지 신산업 활성화 및 핵심기술 개발전략’ 이행계획에 발전소 온배수열 활용 사업을 포함하여 농업과 수산업에 활용하는 사업을 지원하고 있으나 아직 활용도는 1%도 미치지 못하고 있음.

## 2. 국외 연구 및 관리체계 동향

- 온배수와 관련된 선진 각국의 동향은 온배수를 인위적인 에너지의 해양 유입인 하나의 해양오염 형태로 규정한 유엔해양법협약(1994. 11. 16)을 근거로 함. 원자력발전 초기인 1960년대부터 미국을 중심으로 한 국제원자력기구와 미국원자력위원회 주축으로 온배수와 해양생태계 변화에 대한 다양한 심포지움들이 개최되었으며, 1974년에 국제원자력기구 주최로 열린 “원자력발전소 냉각계통과 온배수가 환경에 미치는 물리적 및 생물학적 영향”에 관한 심포지움에서는 다양한 연구 결과가 발표되었음. 이후에도 많은 연구자들이 다양한 해양생물들을 이용하여 온배수의 영향을 정량화하기 위해 연구와 논문들을 발표하였음. 또한 원자력발전소의 냉각계통이 미치는 환경 영향(IAEA, 1974)이나 주변해양의 생태계에 미치는 영향 등에 대한 연구 결과들이 단행본으로 발간되었음.

- 미국은 연방수질오염관리법(Federal Water Pollution Control Act; CWA, 1996 개정) 제 316항에 열에너지 배출(thermal discharge)에 대한 별도의 조항을 두고 관리하고 있으며 자연적인 수온변화와 온배수 배출에 의한 해양생태계의 영향을 해양생물의 열 내성과 열 스트레스에 대한 정량적 분석 결과를 근거로 각 주정부는 독자적인 배출규정을 제정하여 관리하고 있음.

- 일본의 경우는 국내와 같이 해수를 발전소 냉각수로 이용하고 있어 가장 많은 연구가 수행되고 있음. 정부와 발전사의 지원을 받아 운영되는 민간기관인 일본해양생물환경연구소(2011)는 발전소 온배수의 환경영향과 관련된 표준 조사방안을 제시하였으며, Masaharu et al.(2013)이 화력 및 원자력발전소의 환경영향평가 시 해양생태계 영향예측 절차를 제안함. 일본의 경우 국가차원의 온배수 배출규정은 없으나 발전소 계획 당시의 환경영향평거나 지자체 규정에 의하여 취수구와 배수구 사이의 온도차 7~9℃ 또는 최고온도 38~40℃ 등의 규정이 존재. 다만, 일본은 우리나라와 다르게 냉·온배수에 대한 해양생물의 온도 반응에 대한 방대한 실험 자료를 축적하고 있으며 대체로 온배수에 의한 피해보다는 온배수가 영향을 미치는 주변 연안의 해양환경의 유지의 관점에서 조사가 진행되는 것으로 보임. 이는 일본이 상대적 온배수에 의한 사회적 갈등이 우리나라보다 적은 이유로 보임.

## 제3절 연구의 목표

연안으로 배출되는 냉·온배수로 인해 발생하는 사회적인 갈등을 해소 또는 완화하기 위한 해양환경 영향의 과학적 평가기술과 효율적인 관리 기술의 개발을 위한 연구

## 제4절 연구의 내용 및 범위

### 1. 냉·온배수의 배출현황

- 주요 온배수의 배출시설과 현황
- 주요 냉배수의 배출시설과 현황

- 냉·온배수의 배출 관련 주요 갈등 현황

2. 냉·온배수의 해양환경 영향 감시 및 피해 분석 기술

- 해양환경 환경 특성의 공간 구조 감시 및 냉·온배수 탐지 기술
- 생태계 구성 인자에 미치는 영향과 피해 산출 기술
- 냉·온배수에 관련 수중구조물의 안전망 구축 기술

3. 냉·온배수에 의한 해양환경 변동 예측 및 대응 기술

- 냉·온배수의 거동 및 생태계 반응 예측 모형 기술
- 해양환경 영향 저감 및 활용 기술
- 냉·온배수 영향 생물검정 및 해양생태계 복원 기술

4. 체계적인 냉·온배수에 관리를 위한 법령/제도의 개선방안

- 주민, 배출원, 공공 분야의 협력을 위한 협의기구 구성
- 배출안전진단제도, 분담금제도 등 법률 검토

## 제 2 장 냉·온배수 배출 현황과 주요 쟁점

### 제1절 주요 온배수 배출 시설의 운영 현황

#### 1. 발전시설 운영현황

우리나라 전력수급에 이용되는 대표적 에너지원으로는 수력, 화력(석탄, 중유, 천연가스(LNG), 원자력, 기타, 그리고 최근 주목받는 태양력, 조석, 풍력 등의 신재생에너지가 있다. 특히 이들 가운데 화력발전과 원자력발전은 각각 63.3%, 31.1%씩 차지하고 있어 두 에너지원에 대한 의존도가 94.4%로 매우 높은 수준에 있다(맹, 2013).

국내의 화력발전 및 원자력발전회사는 남부발전, 서부발전, 동서발전, 남동발전, 중부발전, 한수원(원자력) 등 총 6개가 있으며 그 외 기타발전소가 있다. 이들 발전회사에서 운영되고 있는 발전소는 표 1에서 보는 바와 같이 약 158개소이며 이중 30개소의 발전단지에서 온배수를 해양으로 배출하고 있었다.

1980년대 이후 총 발전량(KW)은 산업화 및 전력수요의 증가율로 증가하고 있으며, 원자력 발전량은 1978년 고리 1호기 준공이후 30여 년간 1.5년마다 원전을 1기씩 건설함에 따라 지속적으로 증가하여 국내 발전량의 31%를 공급하고 있다(맹, 2013). 그러나 최근 정부의 탈원전 정책으로 인하여 기존의 건설중인 원자력 발전소를 제외하고 계획중인 원자력 발전소는 모두 건설을 중단하기로 하므로써 앞으로는 원자력발전소의 건설 증가는 없을 것으로 본다. 이를 대체하기 위한 수단으로 정부는 신재생에너지 정책을 적극적으로 추진함으로써 앞으로 신재생에너지 시설은 급격히 증가 할 것으로 판단된다. 화력발전소의 경우 국내 소비전력의 62.6%를 생산하고 있으며 석탄, LNG, 유류를 에너지원으로 사용한다. 화력발전의 전력생산비율을 보면 석탄을 연료로 이용하는 발전이 41.1%, LNG가 17.9%, 유류가 3.7%를 차지한다(해양과학기술원.2015).

2016년을 기준으로 국내 총 전력소비량은 497,039 GWh이며, 지난 6년간 연평균 1.7%의 증가율을 보였다, 발전에 가장 많은 비율을 차지하고 있는 석탄은 수입 유연탄이 대부분이다(한국전력, 2016).

#### ▽ 발전원별 발전설비별 분류 체계

- 수력 (Hydro)
  - 물의 낙차를 이용하여 물의 위치에너지가 운동에너지로 전환하는 과정에서 수차를 구동하여 발전하는 발전소 일반양수 심야 경부하시 하부 저수지 물을 상부 저수지로 펌핑 양수 주간 최대 부하시 이 물로 침두부하 전력을 공급하는 발전소 소수력 설비용량 이하의 수력발전수차 발전기 및 전력변환장치 등으로 구성된다.
- 기력 (Steam)
  - 증기 터빈을 이용한 화력발전소.
- 복합화력 (Combined cycle)
  - 1차 가스터빈 2차 증기터빈 열공급 발전형식
- 내연력(Internal combustion)
  - 연소실내에서 공기와 연료를 혼합 고온 고압의 동작가스를 만들어 기계적인 일로 변화하는 내연 기관으로 발전하는 발전소

- 원자력(Nuclear)
  - 핵분열 에너지를 이용하는 발전방식으로 화력발전소의 보일러 부분이 원자로 계통으로 치환되어 포화 증기를 발생하고 그 이외는 화력발전소와 유사
- 대 체 (Alternative energy)
  - 화석에너지의 대체용으로 원칙적으로 수력 포함. 단 양수발전은 제외하며, 종 류는 풍력, 태양광, 매립가스 및 부생가스 등이 있음

표 1. 발전회사별 발전소운영 현황 및 위치

발전회사명	발전소	비고 (해양온배수배출발전소)
한국남부발전(주) (부산혁신도시)	신인천발전본부, 영월천연가스발전소, 안동천연가스발전소, 영남화력, 부산천연가스본부, 하동화력본부, 남제주화력	5개소 (신인천, 영남, 부산천연, 하동, 남제주)
한국서부발전(주) (충남 태안읍)	서인천발전본부, 평택발전본부, 태안발전본부, 군산발전처	4개소 (서인천, 평택, 태안, 군산)
한국동서발전(주) (울산광역시 혁신도시)	당진화력, 울산화력, 호남화력, 동해바이오화력, 일산열병합	4개소 (당진, 울산, 호남, 동해바이오)
한국남동발전(주) (경남진주 혁신도시)	삼천포화력본부, 영흥화력본부, 영동화력발전처, 분당화력본부, 여수화력발전처	4개소 (삼천포, 영흥, 영동강릉, 여수)
한국중부발전(주) (충남 보령시)	보령화력본부, 인천화력본부, 서울화력본부, 서천화력본부, 제주화력발전소, 세종천연가스발전소	4개소 (보령, 서천, 인천복합, 제주)
한국수력원자력발전(주) (경북 경주시)	고리원자력발전소, 신고리원자력발전소, 한울원자력발전소, 한빛원자력발전소, 월성원자력발전소, 화천수력 등 15개소, 무주양수발전 등 7개소	5개소 (고리, 신고리, 울진, 월성, 영광원자력)
한전 및 민자 LNG 발전소	제주GT, 포스코PPA, 포스코에너지, GS EPS, GS 부곡, GS Power(안양), GS power(부천), MPC대산, MPC광양, MPC울촌, SK광양, 오성복합 평택, 포천복합, 안산복합, 동두천복합	4개소 (포스코, 대산, SK광양, MPC광양)
기타, 신재생, 양수, 일반수력, 집단에너지	소양강수력 9개소, 광천 등 41개소, 농어촌공사 1개소, 시화호조력 1개소, 기타민자신재생에너지 1, 난방공사 7개소, 기타집단 송도복합 등 21개소	신재생에너지

## 2. 발전전력량 추이

2011년부터 2016년 까지의 우리나라 발전전력량 추이를 보면 그림 1에서 보는 바와같이 2011년부터 2016년 까지의 발전사업자 발전전력량 및 상용자가 발전량이 꾸준히 증가하는 양상을 보여 2011년 518,168Gwh의 생산량이 2016년에는 560,985Gwh로 6년간 약 43,000Gwh의 전력생산량이 증가 하였다.



그림 1. 발전전력량 추이

(출처: 한국전력백서)



(단위 : Gwh)

구분	2011	2012	2013	2014	2015	2016
수력 Hydro	7,831	7,695	8,394	7,820	5,796	6,634
기력 Steam	211,205	216,336	218,585	211,172	216,378	221,335
복합 Combined Cycle	101,479	110,882	124,400	111,711	100,598	98,210
내연력 Internal Combustion	821	752	741	656	643	573
원자력 Nuclear	154,723	150,327	138,784	156,407	164,762	161,995
집단 Group	12,429	12,913	14,403	18,948	22,019	32,537
신재생 New & Renewable	7,592	8,618	10,160	14,696	17,318	18,936
<b>사업자 Public Utility</b>	<b>496,893</b>	<b>509,574</b>	<b>517,148</b>	<b>521,971</b>	<b>528,091</b>	<b>540,441</b>
상용자가 Non-utility in common use	21,274	21,628	20,021	18,408	19,711	20,544
<b>합계</b>	<b>518,168</b>	<b>531,202</b>	<b>537,169</b>	<b>540,379</b>	<b>547,802</b>	<b>560,985</b>

※ 상용 자가설비 발전량은 자체소비량임. Gross generation of non-utility in common use is self-consumption.  
 ※ 그래프는 사업자용 발전량 기준임. The graphs exclude non-utility generation.

### 3. 발전설비 추이

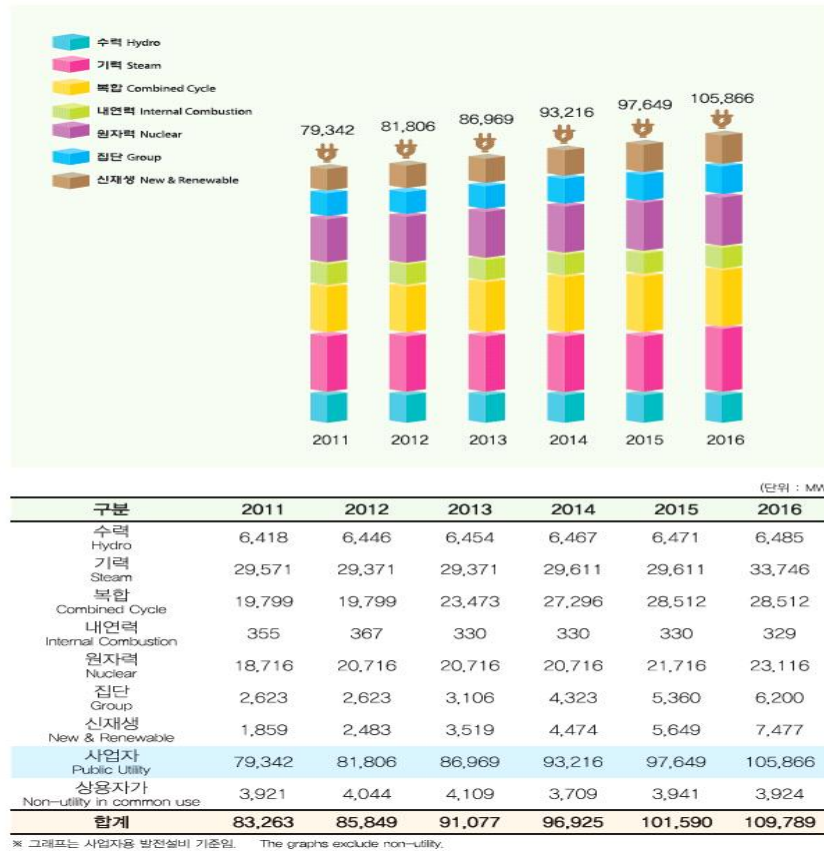
전력 공급을 위한 발전설비의 추이를 보면 우리나라의 발전설비는 다른 나라에 비해서 높은 증가추이를 나타내는 것으로 알려져 있다. 개별 에너지원별로 발전설비에 대한 추세를 살펴보면 역시 원자력발전과 화력발전 설비는 꾸준히 증가추세에 있으며, 반면에 수력발전 설비에 대한 증가추세는 매우 미미하다. 세부적으로는 LNG를 주원료로 하는 복합화력 발전설비가 크게 증가하고 민간회사인 집단에너지설비와 신재생에너지설비가 급격히 증가하는 것으로 나타나고 있다.

발전설비 증가의 추이를 보면 2011년부터 2016년 까지 꾸준히 증가하는 양상을 보이거나 특히 복합화력이 2011년 19,799MW 설비에서 2016년 28,512MW로 증가하여 약 144%의 증가율을 보였으며, 집단복합설비는 2011년 2,623MW 설비에서 2016년 6,200MW로 증가 236% 증가율, 신재생에너지는 2011년 1,859MW 설비에서 2016년 7,477MW로 402%가 증가하였다. 이는 이산

화탄소 규제정책으로 LNG와 신재생에너지 개발원이 증가한 것으로 생각된다.

2011년부터 2016년 까지의 발전설비 총 증가율은 그림 2에서 보는바와 같이 26,526 MW 증가하였다.

그림 2. 우리나라 발전설비 추이 (출처: 한국전력백서)



## 제2절 주요 온배수 배출 현황

### 1. 발전소

2016년도 5개 화력발전소 회사와 1개 원자력발전 회사 및 민자 발전회사의 발전용량과 온배수 배출량은 표 2와 같다. 각 회사별 온배수 방류량(m<sup>3</sup>)은 한국수력원자력이 약 374.6억m<sup>3</sup>, 5개 화력발전소 중 남동발전 약 83.9억m<sup>3</sup>, 남부발전 56.5억m<sup>3</sup>, 중부발전 63.0억m<sup>3</sup>, 동서발전 61.4억m<sup>3</sup>, 서부발전 50.9억m<sup>3</sup>로 나타났다(2016년). 그리고 민자발전 7개사(광양복합, 포스코파워(주), 포항포스코, 대산복합, 울촌, 부곡, 광양포스코(주)가 34.2억톤(5.0%) 정도로 나타났다.

이는 2015년 우리나라 발전소에서 연간 700억톤의 온배수가 배출되었음(해양과기원,2015)과 비교 하였을 때 2016년에는 약 15억톤의 온배수가 증가하여 배출 되었음을 알 수 있다. 원자력 발전소의 경우는 고리원자력 1호기가 가동을 중단하고 신고리 3호기가 가동 됨 으로서 온배수 배출량은 미미하게 차이가 있으나, 전체 배출량은 발전소 정기점검 및 미세먼지방지를 위한 발전중지 등으로 인한 배출량의 증감은 필연적으로 발생 함으로 2016년 기준 우리나라 발전소 온배수 총배출량은 700억톤 내외로 추정한다.

우리나라 총 온배수 배출량의 95%를 차지하고 있는 주요발전 6개사에서 연간 약 690.4억m<sup>3</sup>과 민자부분 34.2억톤으로 나타났다. 따라서 연간 총 배출량은 724.8억톤의 온배수가 배출되고

있으며, 발전소별 연간 발전량 및 온배수 배출량은 해역별 배출되는 한국전력공사(주) 6개사의 연간 온배수의 배출량은 동해안(원자력 포함) 32,573,180천 톤, 남해안(제주포함) 8,016,467천 톤, 서해안(원자력 포함) 28,467,077천 톤이다. 그리고 민자 부분은 3,425,000천 톤이었다(표 3).

표 2. 한국전력공사(주) 6개사 및 민자 발전의 연간 발전소 온배수 배출 현황(2016년)

발전소	용량(MW)	배출량(천톤)	합계(천톤)
남동발전	9,355	8,391,453	31,593,082
남부발전	9,193	5,652,846	
중부발전	7,943	6,301,844	
동서발전	8,800	6,149,845	
서부발전	8,398	5,097,094	
한국수력원자력	24,500	37,463,642	37,463,642
민자발전	7,992	3,425,000	3,425,000
합계	76,181	72,481,724	72,481,724

표 3. 한국전력공사(주) 6개사의 연간 해역별 온배수 배출 현황(2016년)

발전소	배출량(천톤)	비고
동해안	32,573,180	
남해안	8,016,467	
서해안	28,467,077	
민자부분(7개)	3,425,000	동해, 서해, 남해
합계	72,481,724	

## 2. 제철소

제철소의 냉각수로 사용되는 용수량을 조사하기 위하여 제철소 설비 증감량을 조사한 결과 2015년 이후 증설 제철소가 없으므로 기존의 자료를 활용하였다.

제철소는 냉각수로 사용되는 용수를 1차, 2차, 3차 수처리를 통하여 98%이상의 용수를 재 활용하고 있으며 여기에서 배출되는 해양 배출수는 현대제철의 경우 연간 35,983천톤에 달하며 포스코 포항제철 22,500천톤, 광양제철은 27,000천톤의 온배수를 수처리 후 연간 총 85,483천톤의 온배수를 해양에 배출하고 있다(표 4).

표 4. 생산 기지별 냉각용 온배수 해양 배출 평균량

구분	현대제철	포항제철	광양제철	합 계
배출량(톤)	35,983,000	22,500,000	27,000,000	85,483,000

### 3. 냉배수

LNG 생산기지에서 방류되는 냉배수는 일반 해역 수온보다 3~5℃ 낮은 온도의 물이 방류되므로 밀도차로 인한 수층이 저층부에 형성 된다(그림 3). 그러므로 밀도차에 의한 표층과의 수층교반이 되지 않아 산소소비 인자들로 인한 산소소비가 빈산소수괴가 형성되기도 하며, 수온의 온도차는 해양생태계 생물의 성성숙, 산란, 성장, 사망, 생산 등에 결정적으로 악영향을 미치므로 이에 대한 대책이 시급하다.

LNG기지의 냉배수 배출량을 조사하기 위하여 증설량을 조사하였으나 제철소와 같이 2015년 이후 증설이나 신규로 건설한 LNG기지가 없으므로 기존의 자료를 활용 하였다.

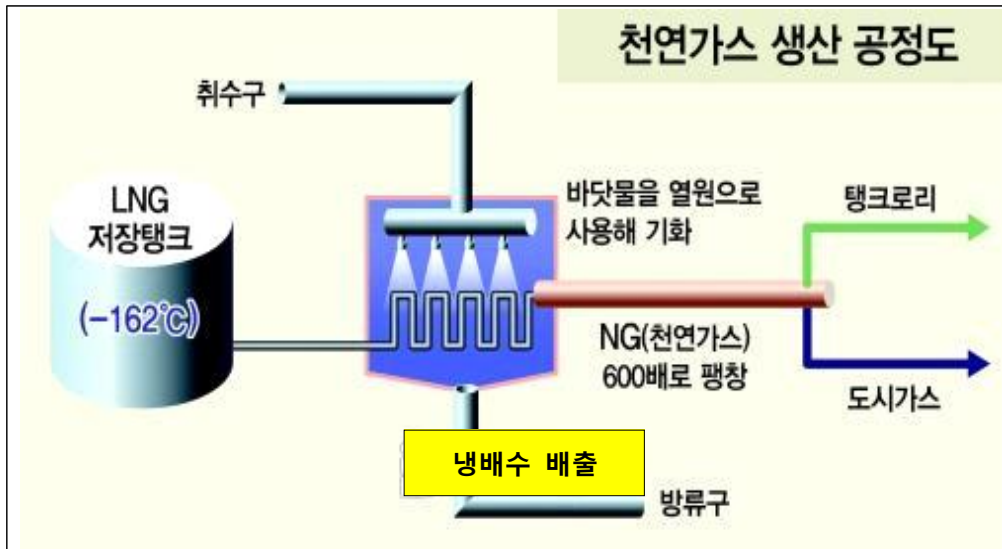


그림 3. 연안지역에서의 천연가스 생산 공정도

우리나라의 냉배수 해양배출은 대부분 LNG 생산기지에서 배출되고 있으며 대규모 LNG 생산기지로는 인천, 평택, 통영, 삼척에 위치하고 있으며 이곳에서 배출되는 냉배수는 연간 2014년 기준으로 17억 7백만 톤이 해양으로 배출되고 있다(표 5).

표 5. 우리나라 LNG생산기지의 냉배수 연간 배출량 (단위: 톤/년)

구분	평택기지	인천기지	통영기지	삼척기지	합 계
배출량	677,689,476	537,379,740	286,951,740	205,257,888	1,707,278,844

※ 공유수면 점사용료 납부를 위해 관련 지자체에 제출하는 자료임

※ 평택기지는 평택화력 배출수 활용으로 납부방식이 상이하여 타기지 해수사용량 산정방식을 준용함

#### 4. 우리나라 연간 총 냉·온배수 배출 현황

2014년도 우리나라 연간 냉·온배수의 총 배출량은 표 6과 같으며, 연간 총 배출량은 74,274,486천톤이며, 이중 온배수가 72,481,724천톤으로 전체 배출량의 97.6%를 차지하였다.

표 6. 생산 업종별 기화용 해양배출 냉배수 평균량(2014)

(단위: 천톤/년)

원료별	원자력	화력/민자	LNG 생산기지	제철소	합계
온배수	37,463,642	35,018,082		85,483	74,274,486
냉배수			1,707,279		

#### 5. 장래 예측 배출량

##### 가. 제6차 전력수급기본계획의 평가

제7차 전력수급기본계획(2013~2023)에서 정부는 전력수급의 기본방향, 장기전망, 발전설비 및 주요 송변전설비계획에 관한사항, 수요관리에 대한사항, 제6차 전력수급기본계획의 평가 등에 관한사항에 대하여 전력수급기본 계획을 수립하였다. 이에 대한 평가 및 수요예측을 통하여 제7차 전력수급기본계획(2015~2029)을 수립하였다.

##### (1) 전력 소비량

2014년말 기준 국내 총 전력소비량은 477,592Gwh로 지난 10년간 연평균 4.1%증가하는 양상을 보였다. 전력소비량 증가율이 최종에너지 소비증가율을 상회하고 있으며, 최종에너지 소비량 중 전력소비량 비중(13년, 19.4%)도 지속적 증가 추세에 있다(그림 4).

(출처: 산업자원통상부)

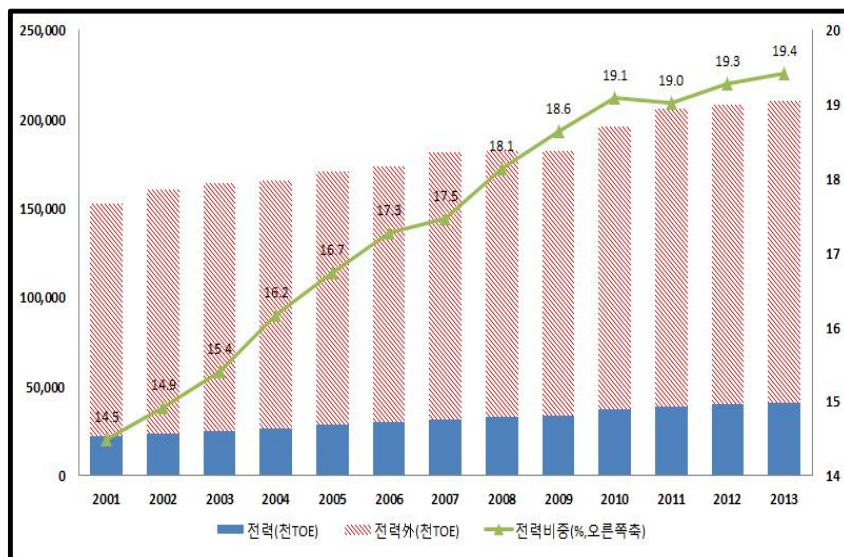


그림 4. 최종에너지와 전력소비량

(2) 전력 공급

전력공급 설비규모는 2014년말 기준 우리나라 발전설비 총규모는 93,216MW로, 2005년 62,258MW 대비 50% 증가하였으나(표 7) 총 발전설비 규모는 세계 13위 수준으로 전력수요 규모(세계 9위)에 비해 설비규모는 작은 편임.

발전원별 설비용량 비중은 LNG, 석탄, 원자력 순이며, 발전량은 석탄, 원자력, LNG 순으로 나타났다(표 8). 그중 민간사업자 설비비중은 '05년 8.2%에서 '14년 19.2%로 증가하였다(표 9).

표 7. 발전원별 발전설비 규모 및 비중 (단위: MW)

구분	원자력	석탄	LNG	석유	기타	합계
'05년	17,716	17,965	16,447	4,710	5,420	62,258
	28.5	28.9	26.4	7.6	8.7	100
'14년	20,716	26,274	26,742	3,850	15,634	93,216
	22.2	28.2	28.7	4.1	16.8	100

표 8. 발전원별 발전량 규모 및 비중 (단위: GWh)

구분	원자력	석탄	LNG	석유	기타	합계
'05년	146,779	134,892	57,962	16,385	8,352	364,370
	40.3	37.0	15.9	4.5	2.3	100.0
'14년	156,407	203,765	111,705	7,759	41,773	521,409
	30.0	39.1	21.4	1.5	8.0	100.0

\* 출처 : 한국전력통계 2015 , \* 기타 : 신재생, 양수, 집단에너지 포함

표 9. 공기업 및 민간설비 비중 및 용량 (단위: MW, %)

년도	총설비		공기업		민간	
	용량	비중	용량	비중	용량	비중
'05	62,258	100	57,178	91.8	5,080	8.2
'14	93,216	100	75,282	80.8	17,934	19.2

\* 민간사업자 원별 비중: '05년 LNG 75%, 석탄(집단) 4%, 유류(집단) 17%, 신재생 4%  
'14년 LNG 70%, 석탄(집단) 4%, 유류(집단) 4%, 신재생 22%

제6차 전력수급기본계획(2013~2023)에서 목표수요 전력소비량 및 최대전력 예측결과를 보면 2027년 까지 설비규모는 110,886MW, 전력소비량은 665,305Gwh로 계획기간 평균 2.3%, 2.5% 증가하는 양상을 보였으며 나타났으며 이를 근거로 제7차 전력수급기본계획을 2029년 까지 전력소비량 및 최대전력을 예측한 결과 설비규모는 111,929Mw, 전력소비량은 656,883Gwh로 계획기간 평균 2.2%, 2.2%증가하는데 그쳐 6차 전력수급기본계획 기간보다는 전력소비량이 1.4% 감소하는 경향을 보였다(표 10).

표 10. 목표수요 전력소비량 및 최대전력 예측결과

연도	6차 계획		7차 계획	
	최대전력 (MW)	전력소비량 (GWh)	최대전력 (MW)	전력소비량 (GWh)
'15	82,677	516,156	82,478	489,595
'16	84,576	532,694	84,612	509,754
'17	88,218	548,241	88,206	532,622
'18	91,509	564,256	91,795	555,280
'19	93,683	578,623	94,840	574,506
'20	95,316	590,565	97,261	588,352
'21	97,510	597,064	99,792	600,063
'22	99,363	602,049	101,849	609,822
'23	100,807	605,724	103,694	617,956
'24	102,839	611,734	105,200	625,095
'25	105,056	624,950	106,644	631,653
'26	108,037	640,133	107,974	637,953
'27	110,886 (100)	655,305 (100)	109,284 (98.6)	644,021 (98.3)
'28			110,605	650,159
'29			111,929	656,883
계획 기간평균*	2.3%	2.5%	2.2%	2.2%

\* 연평균 전력소비 증가율 예측(출처: 산업통상자원부)

#### 나. 제7차 전력수급기본계획

##### (1) 전력수급기본계획의 기본 방향

제7차 전력수급기본계획은 우선 안정적인 전력수급을 최우선과제로 추진하였다. 그동안 「전력수요 과소예측→전력설비 확충억제→전력소비증가→전력수급위기」 등이 반복적으로 재현되었고, '11년의 전력순환단전도 제3차 전력수급기본계획에서의 수요과소예측이 단초가 되었다는 전문가 견해가 많았음. 그리고 기온 변동성 확대, 설비건설 차질 등 만일의 수급불안 가

능성에 대비하여 안정적 전력수급에 가장 중점을 두고 설비 확충 추진 하였다.

특히, 최대전력 수요는 평균기온이 아니라, 최고·최저기온에 따라 결정되므로, 한파·폭염 등 이상기후 발생 가능성을 고려하여 필요 적정예비율 22%수준을 유지할 수 있는 설비 확충 계획을 수립 하였다.

제7차 전력수급기본계획은 우선 안정적인 전력수급을 최우선과제로하고, 수요전망의 정밀성과 객관성확보, 에너지 신산업을 적극 활용한 전력수요관리, POST 2020 온실가스 감축을 위한 저탄소 전원믹스강화, 분산형 전원확산 기반구축, 발전사업 이행력강화 등을 골자로 하는 전력수급 기본계획을 수립하였다.

제7차 계획은 6차 계획 대비, 원전, LNG 비중이 다소 상승하고 석탄설비 비중이 감소하였다. 이는 2차 에너지기본계획, 4차 신재생에너지기본계획의 신재생 설비용량, 발전량 목표를 준수하여 믹스를 구성하므로써 나타나는 경향으로 보인다(표 11).

표 11. 전력수급기본계획과 제7차 전력수급기본계획의 설비비중 (출처: 산업통상자원부)

구분	원전	석탄	LNG	신재생	집단	석유·양수
6차(27년)	27.4%	34.7%	24.3%	4.5%	4.6%	4.5%
7차(29년)	28.2%	32.3%	24.8%	4.6%	5.8%	4.3%

### (2) 목표수요 전망

우리나라 전력 소비량은 2029년 기준 656,883GWh로 15년간('15년~'29년) 연평균 2.1% 증가율을 전망 (6차 계획 기간 연평균 증가율 2.2%)하고 있으며, 최대 전력은 2029년 기준 111,929MW, 15년간('15년~'29년) 연평균 2.2% 증가율을 전망(6차 계획 기간 연평균 증가율 2.4%)하고 있으며, 7차 계획의 '27년 목표 최대전력(109,284MW)은 6차 계획(110,886MW)대비 1.4% 감소 할 것으로 예측하고 있다.

### (3) 제7차 전력수급 기본계획에 의한 신규 발전설비 계획

제7차 전력수급기본계획의 신규발전계획은 적정설비규모 136,553MW에서 확정설비 133,097MW를 제외하면 추가적으로 필요한 신규 소요는 3,456MW로 나타났다. 신규 물량에 대한 구성표는 계획수립 전산모형(WASP)에 국제적 기준에 부합하는 전원별 경제적·사회적 비용을 반영하여 신규물량 전원구성을 도출하여 발표하였다(표 12).

#### <전원구성 결과>

- 2028년, '2029년에 원전 총 3,000MW 도출 (각 1,500MW, 2기)



표 12. 적정 설비규모 및 전원구성 방안

연도	최대전력	확정설비	적정 설비규모				
			원전	석탄	LNG	누적용량	설비예비율
2015	82,478	92,438				92,438	12.1%
2016	84,612	102,722				102,722	21.4%
2017	88,206	111,367				111,367	26.3%
2018	91,795	114,624				114,624	24.9%
2019	94,840	117,283				117,283	23.7%
2020	97,261	119,809				119,809	23.2%
2021	99,792	126,502				126,502	26.8%
2022	101,849	130,092				130,092	27.7%
2023	103,694	129,890				129,890	25.3%
2024	105,200	128,719				128,719	22.4%
2025	106,644	129,292				129,292	21.2%
2026	107,974	131,001				131,001	21.3%
2027	109,284	132,702				132,702	21.4%
2028	110,605	132,894	1,500			134,394	21.5%
2029	111,929	133,097	1,500			136,097	21.6%
신규소요			3,000				
* 신규 설비 : 적정 규모 3,000MW (원전 2기) * 신재생 4,477, 집단 3,739							

- \* 1. 최대전력, 설비용량, 설비예비율은 연말, 동계기준 적용
- 2. 신재생에너지 및 집단에너지의 경우 피크기여도 기준으로 반영
- 3. 연도별 확정설비 물량에는 용량 및 준공일정 조정 등이 기 반영
- 4. 영구정지가 결정된 고리 1호기는 확정설비에서 제외

(4) 기준계획에 따른 신규 의향조사 결과

사업자 설명회를 통해 7차 계획기간(‘15~’29)중 도출된 전원별·연도별 필요 물량을 대상으로 발전사업 의향 조사를 한 결과, 6차 계획에 반영된 건설 중 또는 건설 준비단계 설비 43,487MW (45기)와 7차 계획에 신규 발전사업의향을 제출한 설비 : 3,000MW(원전2기)가 신청 되었다. 연료별 사업준비 기간을 보면 아래 표 13과 같이 사업소요기간을 예측 할 수 있다. 그리고 기존의 계획설비 및 신규 의향설비를 종합하여 표 14와 같이 분석하였다. 또한 연차별 확정설비 및 신규의향 설비계획은 표 15와 같다.

표 13. 연료별 사업 준비기간

구 분	원자력 수 력	석탄		천연가스	신재생 및 기타
		500MW 이하	500MW 초과		
준비기간	10년	7년	8년	6년	10년의 범위에서 별도 지정

표 14. 기존 계획설비 및 신규 의향설비 종합

(단위: MW)

구 분		원 전	석 탄	LNG	신재생·집단	계
기 계 획 설 비	확정 반영	신고리#3 ('16. 4) 1400 #4 ('17. 2) 1400 #5 ('21. 3) 1400 #6 ('22. 3) 1400 천 지' #1 ('26.12) 1500 #2 ('27.12) 1500 신한울#1 ('17. 4) 1400 #2 ('18. 4) 1400 #3 ('22.12) 1400 #4 ('23.12) 1400 신월성#2 ('15. 7) 1000	당 진 #9 ('15.12) 1020 #10('16. 6) 1020 삼척그린 #1 ('16. 6) 1022 #2 ('16.10) 1022 북 평 #1 ('16. 2) 585 #2 ('16. 6) 585 태 안 #9 ('16. 6) 1050 #10('16.12) 1050 신 보 령 #1 ('16. 6) 1000 #2 ('17. 6) 1000 여 수 #1 ('16. 8) 350 당진에코 #1 ('21.11) 580 #2 ('22. 3) 580 신 서 천 #1 ('19. 9) 1000 고성하이 #1 ('20.10) 1040 #2 ('21. 4) 1040 강릉안인 #1 ('19.12) 1040 #2 ('20. 6) 1040 삼척화력 #1 ('21. 6) 1050 #2 ('21.12) 1050	포스코복합#9 ('15. 1) 376 동두천복합#1 ('15. 3) 858 #2 ('15. 1) 858 서울복합 #1 ('17.12) 400 #2 ('17.12) 400 장문복합 #1 ('17. 3) 900 #2 ('17. 7) 900 GS당진복합 #4 ('17. 7) 950 영남복합 ('17.10) 470 대우포천 #1 ('17. 2) 960 여주복합 ('20. 6) 1000 신평택복합#1 ('19.11) 951 통영복합 #1 ('18.12) 920 제주신규 ('18. 6) 200	신재생 26,649 집 단 4,276	페지 -6,760
		15,200 (11기)	18,144 (20기)	10,143 (14기)	30,925	74,412 (67,652)
	반영 제외		영 흥 #7 ('23. 1) 870 #8 ('23. 6) 870 동부하슬라#1 ('21. 6) 1000 #2 ('21.12) 1000			
		3,740 (4기)			3,740	
신규 의향 설비	신규원전#1 ('28.12) 1500 #2 ('29.12) 1500					
	3,000 (2기)				3,000	
반영 합계	18,200 (13기)	18,144 (20기)	10,143 (14기)	30,925	77,412 (70.652)	

출처: 산자부

- \* 계의 ( )는 폐지용량 포함
- \* 기확정설비인 신고리 #7~8은 사업자가 의향을 「천지 #1,2」로 제출
- \* 신규원전은 사업자가 의향을 「대전 #1,2 또는 천지 #3,4」로 제출 (인허가 단계에서 입지확정)
- \* 강릉안인화력#1,2 삼척화력#1는 송전건설 시점을 고려하여, 예비력 산정시 '21.12월 활용을 고려

표 15. 연차별 확정설비 및 신규 의향설비 내역

[단위: MW]

년도	기존 계획설비		신규의향설비	폐지설비	신재생 집단
	확정 반영	반영제외		반영	
2015	신월성#2 (7월, 1000) 당진#9 (12월, 1020) 포스코복합#9 (1월, 376) 동두천복합#1(3월, 858) 동두천복합#2(1월, 858)			포스코복합#2 (1월, -450) 서울#4 (12월, -138)	신재생 26,649 집단 4,276
2016	신고리#3 (4월, 1400) 당진#10 (6월, 1020) 삼척그린#1 (6월, 1022) 삼척그린#2 (10월, 1022) 북평#1 (2월, 595) 북평#2 (6월, 595) 태안#9 (6월, 1050) 태안#10 (12월, 1050) 신보령#1 (6월, 1000) 여수#1 (8월, 350)			서울#5 (12월, -250)	
2017	신고리#4 (2월, 1400) 신한울#1 (4월, 1400) 신보령#2 (6월, 1000) 대우포천#1 (2월, 960) 장문복합#1 (3월, 900) 장문복합#2 (7월, 900) GS당진복합#4 (7월, 950) 영남복합 (10월, 470) 서울복합#1 (12월, 400) 서울복합#2 (12월, 400)			고리#1 (6월, -587) 평택복합 (12월, -480)	
2018	신한울#2 (4월, 1400) 통영복합#1 (12월, 920) 제주신규 (6월, 200)			서천#1~2 (9월, -400) 제주GT#3 (1월, -55)	
2019	신서천#1 (9월, 1000) 강릉안인#1* (12월, 1040) 신평택복합#1 (11월, 951)				
2020	강릉안인#2* (6월, 1040) 고성하이#1 (10월, 1040) 여주복합 (6월, 1000)				
2021	신고리#5 (3월, 1400) 고성하이#2 (4월, 1040) 삼척화력#1 (6월, 1050) 삼척화력#2 (12월, 1050) 당진에코#1 (11월, 580)	동부하슬라#1 (6월, 1000) 동부하슬라#2 (12월, 1000)		울산#4~6 (12월, -1200)	
2022	신고리#6 (3월, 1400) 신한울#3 (12월, 1400) 당진에코#2 (3월, 580)				
2023	신한울#4 (12월, 1400)	영흥#7 (1월, 870) 영흥#8 (6월, 870)		서인천복합#1~8 (12월, -1800)	
2024				평택#1~4 (12월, -1400)	
2025					
2026	천지#1 (12월, 1500)				
2027	천지#2 (12월, 1500)				
2028			신규원전#1 (12월, 1500)		
2029			신규원전#2 (12월, 1500)		
<b>합계</b>	<b>43,487</b> <b>(45기)</b>	<b>3,740</b> <b>(4기)</b>	<b>3,000</b> <b>(2기)</b>	<b>- 6,760</b> <b>(23기)</b>	<b>30,925</b>

출처:산업자원통상부

\* 계의 ( )는 폐지용량 포함

\* 기 확정설비인 신고리 #7~8은 사업자가 의향을 「천지 #1,2」로 제출

\* 신규원전은 사업자가 의향을 「대진 #1,2 또는 천지 #3,4」로 제출 (인허가 단계에서 입지확정)

(5) 장래배출 예측량 결과

장래 온배수 배출 예측량 결과를 보면 6차 전력수요기본계획시 보다 3,000MW 정도의 원자력 발전소를 증설하는 것으로 나타나고 있으므로, 원자력 발전소의 1,000MW당 온배수의 배출량이 일일 최대 1,000만톤(70톤/초당)으로 계산했을 때 연간 약 110억톤이 온배수 배출이 증가할 것으로 예측 된다.

다. 주요 냉배수 배출 시설과 배출 현황

○ 국내 주요 LNG 생산기지 시설 현황 및 위치

국내의 LNG생산기지는 한국가스공사를 모기업으로 4개의 평택기지본부, 인천기지본부, 통영기지본부, 삼척기지본부가 있다. 가스저장시설은 총 63기 946kl을 갖추고 있다(표 16).

표 16. 국내 LNG 생산설비 용량

(용량단위: kl)

생산기지	운전개시	저장탱크 (2014,2월)	최대생산능력	합 계
평택생산기지	1986년6월	10만kl급 x 10기 14만kl급 x 4기 20만kl급 x 9기	3,376 T/H	9,916 T/H
인천생산기지	1996년11월	10만kl급 x 10기 14만kl급 x 2기 (지중식) 20만kl급 x 8기 (지.중식)	3,690 T/H	
통영생산기지	2002년 9월	14만kl급 x 13기 20만kl급 x 4기	1,530 T/H	
삼척생산기지	2014년 7월	20만kl급 x 9기 27만kl급 x 3기	1,320 T/H	

한국가스공사는 천연가스의 공급을 통한 국민생활의 편익 증진 및 복리 향상을 위하여 1983년 8월에 설립된 시장형 공기업이며, 천연가스의 제조, 공급 및 그 부산물의 정제, 판매, 생산기지과 공급망의 건설, 운영, 천연가스와 액화석유가스의 개발 등을 담당한다. 2014년 9월 30일 대구광역시로 본사를 이전하였고 대구 신서혁신도시에서 2014년 10월 1일부터 업무를 시작하였으며 위치 및 현황은 그림 5과 같다.

우리나라의 냉배수는 주로 LNG 생산기지에서 배출되므로 이에 대한 철저한 관리가 필요하다. 냉배수는 낮은 온도로 해양으로 배출되므로 자연해수와의 밀도차로 인하여 여름에는 해저면에 수괴를 형성 할 수 있고, 또한 연속적인 가입으로 인하여 누적에 의한 대형수괴 형성으로 빈산소수괴가 형성 될 수 있으며 이는 주변의 해양생물에 사망, 성장, 성숙에 직·간접적인 영향을 줄 수 있다.

일본의 경우, 냉배수 배출기준을 법적으로 규제하지는 않지만 기화기의 동결을 방지하기 위하여 취수온도에 대해 -3℃ ~ -5℃ 정도 배출하도록 권고하고 있다. 부화기를 통과하는 과정 중에 취수수질이 변화하지 않다는 원칙을 가지고 있지만 부화기 내의 부착생물을 제거하기 위

해 주입하는 차아염소 등 잔류농도는 규제의 대상이 되고 있다.

이 자료는 2년간 변동이 없으므로 2015년 냉·온배수 배출현황연구(해양연,2015)의 자료를 인용하였다.



한국가스공사 본사(대구신서지구)



평택항 LNG생산기지

인천송도 LNG생산기지



경남통영 LNG생산기지

강원 삼척 LNG 생산기지

그림 5. 한국가스공사 본사 및 각 생산기지 전경

## 제 3 장 냉·온배수의 해양환경 영향 진단 및 평가 기술 현황

### 제1절 냉·온배수의 영향 범위의 진단/평가 기술

냉·온배수의 정의가 자연 상태의 수온이 아닌 임의로 조정되어 온도가 높거나 낮아진 상태로 배출되는 해수이기 때문에 이들의 영향 범위를 진단/평가하는데 방법적으로 구분할 필요는 없다. 수온은 냉·온배수의 영향 분포를 추정하기 위한 조사에서 가장 중요한 항목이며 해수유동은 해수의 운동과 확산을 지배하는 해양물리적 과정으로 수온 분포와 다른 해양 환경 인자들의 분포를 결정하는 조절하는 요소의 하나이다.

지금까지 수행된 관련 사업들에서 조사 방법, 기간 및 해역 선정 등에서 방법적으로 다른 사항들이 있을 수 있겠지만 수온과 같은 해수물성 분포와 해수 유동을 조사하여 해양물리적 특성을 파악하고자 할 때 기본적인 조사 방법은 유사하다. 수온 분포를 결정하는 물리적 기작은 해수유동과 해수물성의 확산이다. 이 과정 자체만의 과학적 이해는 수온 분포를 해석하는데 무리가 없으나 냉·온배수의 영향을 진단하고 평가하는데 이 과정을 변형시키는 복잡한 요인들을 고려해야하는 난점이 대두된다. 현실적으로 냉·온배수의 영향이 문제가 되는 영역이 연안 가까이 국한되기 때문에 이의 진단/평가는 연안 해역에서의 해양물리학적 조사 방법의 틀 내에서 이루어진다.

냉·온배수의 영향 진단은 매우 단순한 산술적 계산으로 충분하다. 즉, 특정 시기의 수온분포와 (냉·온배수 배출이 없던) 기준이 되는 시기의 수온분포를 비교하면 된다. 그러나 비교 기준이 되는 수온분포의 자료가 없거나 매우 불충분하다는 점에서 어려움과 문제가 나타난다. 이를 보완하는 최선의 방법으로 어떤 해역에서 자연 해수만 분포한다는 전제하에 대표성을 갖는 지점(대조구)을 설정하고 동 지점에서의 수온 변화를 비교하는 것이다. 대조구 설정 자체도 매우 어려운 부분이다. 지금까지 관련 사업의 보고서들에서는 대조구 설정에 대한 명확한 해양과학적 설명 제시가 부족하고 단지 외해역에서 자연 해수가 분포할 것이라는 판단 하에 대조구를 설정한 경우가 많았다. 연안역은 수심이 얕고 육지와 가깝기 때문에 바람과 같은 외력에 대하여 빠른 반응을 보이는 특성이 있다. 이는 해수 운동이 역동적일 가능성이 높다는 것을 의미하며 절대적인 대조구 설정의 제한 요소가 된다. 실제로 냉·온배수의 영향을 받지 않는 곳에 대조구를 설정하였더라도 자연적인 (특히, 국지적인) 해양 현상에 의하여 대조구의 수온 변화가 발생하는 경우 비교 수온 값 설정에 문제가 발생한다. 이와 관련하여 조사 해역보다 훨씬 넓은 해역의 일반적인 해황(예, 여름철 서해 남동부의 냉수괴 분포, 동해안의 연안 용승과 냉수대 분포 등)을 논리적으로 제시하고 정확한 특성 설명이 필수적이다. 일부 보고서에서는 특정한 대조구 설정 없이 관측 자료 자체만을 분석하여 매 관측시마다 온배수에 의한 수온 상승 영역을 제시한 경우가 있는데 이는 조사 영역이 충분히 넓다는 가정 하에서는 타당할 수 있지만 절대적인 방법으로 받아들이기에는 불확실성이 있다. 냉·온배수에 의한 영향 범위와 그 크기를 판단하기 위해서 가장 바람직한 방법은 시계열 자료의 확보이다. 냉·온배수 배출 시설 건설전의 평균적, 계절별 및 조석 주기별 수온 분포를 알고 있다면 건설 후 수온 분포로부터 원전 온배수 영향을 추정하는 것은 상대적으로 용이하고 과학적이다. 즉, 공간적인 영역에 대한 대조구 설정에 근거한 온배수 영향 추정보다 시간적인 변화 판단에 근거한 냉·온배수 영향 추정이 보다 과학적이며 논리적인 접근이다.

해양 조사영역 설정은 대부분 해당 사업의 계약서에 명시된 범위로 하고 있으며 냉·온배수

배출 시설 보유자 자체 환경조사의 경우에는 해마다 동일한 범위에서는 이루어지고 있지는 않은 것으로 나타났다. 이는 냉·온배수 영향의 이해 당사자들의 민원이 행정적 단위 (군 또는 면 단위 등)로 나타난 결과이며 해양학적 판단 근거에 의하지는 않은 설정이다. 자연 현상은 연속성을 가지고 있는 만큼 조사 영역을 행정적 경계만을 고려하여 설정한다면 실제 온배수 확산 범위를 판단하는데 제약이 될 수 있다. 조사 해역을 무한정 넓힐 수는 없겠지만 해양학적인 판단에 영향을 줄 수 있는 좁은 해역을 조사 영역으로 제한한다면 냉·온배수 영향 범위 해석의 오류의 가능성을 배제할 수 없을 것이다. 냉·온배수 배출 시설의 위치와 관계없이 우리나라 연안에서 수온분포 설명을 목적으로 조사를 하는 경우 조석 특성을 반드시 고려하여야 한다. 조석 현상의 지배하에 있는 연안역에서 최대 수온 확산 범위를 보고자 하려면 신중한 조사 시간의 선택이 필수적이다. 수온의 확산 속도보다 이류에 의한 수온변화의 속도가 더 크기 때문에 간조 및 만조 때 수온 분포를 측정하는 것이 보다 과학적이다.

해수유동 조사는 관련 조사 중에서 가장 취약한 분야이다. 해류계를 계류하여 해류 또는 조류를 조사하였던 경우에 대부분 연안에 근접한 취수구 또는 배수구 부근 등에서 이루어졌고 지형을 고려하여 조사한 경우는 매우 드문 것으로 나타나고 있다. 오일리언 방법에 의한 유속 조사시 몇 군데에서 조사하여야 하는지 또는 계류장소의 설정이 조사 목적과 어떠한 관계가 있는지에 대한 근거 설명이 제시되어야 한다. 한편, 라그랑쥐안 방법에 의한 부표 추적의 경우에는 조석 잔차류에 의한 해수 이동을 보기 위하여 여러 조석 주기 동안 조사가 이루어지는 것이 바람직하지만 한 번의 창조류 또는 낙조류 기간 조사보다는 통계적 유의치를 가질 수 있도록 많은 관측이 필요하다. 라그랑쥐안 조사를 확산계수 추정을 위한 목적으로 수행한 경우라도 그 결과를 온배수 영향 분포를 판단하는데 어떻게 활용할 수 있는지의 방법론적 근거도 제시되어야 한다. 즉, 이러한 조사들이 해수 유동의 단편적인 기술은 가능하지만 냉·온배수 확산과 어떻게 관련 있는지를 설명할 때는 통계적 유의성 및 해양과학적 해석을 근거로 해야 한다. 단시간에 종관적 관측을 위하여 선박에 수온센서를 장착하여 이동하면서 연속적으로 표층 수온을 조사하는 경우에는 선박 이동 경로 설정에 대한 근거를 제시하여야 한다. 많은 보고서에서는 1회 왕복 관측인 경우를 보여주고 있는데 이러한 경우라 할지라도 외삽에 의한 자료 제시(도면)가 있어 수온 분포를 파악하는데 오류를 줄 가능성이 있다.

이상은 대부분 지금까지 수행되고 있는 기본적인 방법과 문제점 발생 가능성을 설명하였다. 표 17, 18은 수온조사와 유동 조사 방법을 정리한 것이다(이 등, 2007).

표 17. 수온 조사 방법의 비교

	광역성	동시성	반복성	분해능	경제성	제약성
정점조사(선박)	△	×	×	×	○	기상, 조석주기
계류 조사	△	○	○	△	△	유실가능
연속조사(선박)	○	△	△	△	○	기상, 조석주기, 표층조사
항공기 탐사	○	○	○	○	×	기상, 표층조사
인공위성 자료	○	○	△	○	△	기상, 통과시간, 표층조사

표 18. 해수유동 조사 방법의 비교

	광역성	동시성	반복성	분해능	경제성	제약성
계류조사	×	○	○	×	×	유실가능
부표추적	△	△	×	△	○	표층조사
선박이동 (ADCP 장착)	△	△	×	△	△	표층조사 어려움

다음은 이 등 (2007) 내용을 위주로 냉·온배수의 영향 범위의 진단/평가지 고려하여야 할 사항들을 기술하였다.

### 1. 종관적 수온분포 파악

우리나라 연안과 같이 조석현상이 지배적인 해양에서는 종관적 수온분포 파악을 위한 조사가 이루어져야 한다. 관측 자료의 동시성이 중요하다는 의미이다. 이러한 해양조사의 시간적인 고려사항 외에 공간적인 조사 방법의 설정도 수온 분포의 파악에 중요하다. 수평 및 수직적인 지형, 해수 특성에 영향을 주는 특이 사항 (하구, 조간대, 연안류 세기 등) 모두 고려되어야 한다.

### 2. 냉·온배수 영향 평가

냉·온배수 영향 평가 과정에서 해양물리 분야의 역할은 배출된 냉·온배수에 의한 해수특성 변화의 범위와 그 크기를 제시하는 것이다. 조사해역의 해수 특성에 영향을 주는 원인과 다른 열원(예, 조간대)이 있거나 담수 공급원(하천)이 있는 경우 냉·온배수의 영향만을 분리하여 판단하는 것이 어려우므로 가능한 한 이의 해결을 위한 조사 방법을 고려해야 한다. 영향 평가 결과로 제시하는 수온 변화의 크기를 어떻게 할 것인지(1도, 2도, 또는 0.5도 등)와 제시하는 방법을 단순 수치로 할 것인지 아니면 통계적인 개념을 도입할 것인지도 중요한 고려 대상이다.

### 3. 열수지 모델 개념의 도입

서해안처럼 조석간만의 차가 커서 조간대 퇴적층이 태양복사열을 흡수/방출하여 해수에 재방출/흡수하는 경우 냉·온배수 영향을 정성적으로 분리할 열수지 모델에 적용할 수 있는 조사가 고려되어야 한다. 관측 자료만을 이용한 열수지 계산에는 분해능에 한계가 있어 냉·온배수 영향 범위 설정 결과의 유의성을 검토하는 데에만 사용할 수 있다. 즉, 어느 기간 동안 공급/소비된 열의 총량이 냉·온배수 영향 해역내의 수온 변화에 의한 열 총량보다 큰지 작은지의 결과에 따라 냉·온배수 영향 해역이 사실보다 좁게 설정되었는지 아니면 넓게 설정되었는지 일차적인 판단만 가능하다. 다양한 열원이 공존하는 경우 (원전, 조간대, 연안, 하구역 등)에는 열수지 계산 분해능을 높여야 하는데 매우 조밀한 관측점에서의 시계열 자료가 필요한데 관측에 의한 계산은 고비용의 한계가 있기 때문에 덜 조밀한 관측 자료를 동화시킨 수치모델링 결과를 활용한 열수지 계산이 바람직하다.



#### 4. 냉·온배수 최대 확산 범위의 제시

냉·온배수 영향 평가에서 수온 변화 또는 냉·온배수 확산 범위의 판단은 가장 기본적인 요소이다. 수온 변화가 해양생태계에 영향을 미치는 것은 분명한 것이지만 단 한 번의 수온 변화에도 영향을 받는 부분도 있고 수온 변화가 장시간 지속되어야 영향을 받는 부분도 있을 것이므로 조사에서 제시하는 냉·온배수 최대 확산 범위가 순간 최대 확산 범위를 의미하는 것인지 평균적인 최대 확산 범위를 뜻하는 것이냐가 조사 시행 전에 결정되어야 할 것이다. 평균적인 확산범위가 목적인 경우에는 계절평균인지 연평균인지의 시간적인 개념 설정도 사전에 정의되어야 한다.

#### 5. 수치모델링과 상호 보완

수온 분포의 조사만을 본다면 충분한 수량의 수온 측정기기를 이용하여 연속적으로 감시하는 것이 수온 분포 변화 파악에 매우 유용하지만 이는 조사 경비로 보아 실현 가능성이 낮다. 가장 현실적인 대안은 수치모델을 활용하는 것이다. 현장 조사의 제약성과 수치모델의 검증 과정이 상호 보완으로 해결된다면 해양물리 분야의 조사 방법은 이 방향으로 가야 할 것이다. 또한, 수치모델링은 현상 재현뿐만 아니라 예측이라는 측면에서도 매우 바람직하다.

#### 6. 인공위성 관측

##### 가. 관측 개요

해양환경의 변화는 시간적 또는 공간적으로 지속적인 변화를 나타내고 있으므로, 해양환경 개발을 효과적으로 실시하기 위해서는 대상지역에 대한 종합적인 조사와 개발에 따른 변화를 예측하는 것은 필수적이다.

해양환경 특성을 결정하는 인자 중 하나인 해양표층수온은 해양환경 변화에 결정적인 영향을 미치며 해양 연구의 기초가 되는 중요한 자료이다.

인공위성 원격탐사 연구를 통해 해양에 대한 표층수온 데이터를 획득 할 수 있으며, 특히 무인플랫폼의 활용은 빠르게 변화되는 해양표층수온 변화탐지에 적합하며, 해양의 냉·온배수 영향 범위 진단 및 평가를 위해 각 플랫폼별 획득 가능한 데이터의 정량적 비교를 수행한다 (표 19).

- 인공위성, 무인기 플랫폼, 현장조사를 통해 획득 가능한 열적외선 영상 자료를 비교 하였으며, 고도별 촬영영역, 공간해상도, 시간해상도를 분석함.
- 인공위성 원격탐사를 통한 해양표층수온 탐지는 공간 및 시간해상도가 낮으므로 좁은 해양 환경과 빠르게 변화되는 해양환경에는 적용하기 어려움.
- 무인플랫폼 원격탐사와 현장조사의 경우 공간해상도와 시간해상도가 우수하고 적시에 해양 관측이 가능하며 특히 무인플랫폼 원격탐사는 사람이 접근할 수 없는 해양에 대해 저비용 고효율의 데이터를 획득 가능.

표 19. 각 플랫폼 별 센서의 촬영 영역 및 데이터 정보

플랫폼	종류	센서	촬영 영역		공간 해상도	시간 해상도	
			고도	영역			
인공 위성	Landsat 8 TIRS 	Thermal	고도	영역	100 m	16일	
	705 km		185 km (swath)				
인공 위성	KOMPSAT-3A 	Infrared	고도	영역	5 m	28일	
	528 km		12 km (swath)				
무인기	고정익 	FLIR vue pro (Thermal)	고도	영역	해상도	1시간 이내 또는 상시 관측	
	회전익 		500 m	414 × 334 m			64 cm
			400 m	331 × 267 m			51 cm
	헬리카이트 	FLIR vue pro (Thermal)	300 m	248 × 200 m	38 cm		
200 m			165 × 133 m	25 cm			
현장 조사	선박, 부이 	FLIR vue pro (Thermal)	고도	영역	1 cm	상시 관측	
			약 2 m	1.6 × 1.3 m			
		수온 측정기	point data	1 pixel			
CTD, 부이 등							

나. 냉·온배수의 영향 범위 분석 사례

(1) 인공 위성을 활용한 냉·온배수의 영향 범위 분석 사례

(가) Landsat 8 인공위성 열적외선 영상자료

- Landsat 8 TIR 밴드를 활용하여 영광 원자력 발전소 배수로 표층수온 분석
- 2013년 1장의 영상과 2016년 3장의 Landsat 영상을 획득하여 분석을 수행
- 그림 6의 8, 9월 영상에 비해 3월 발전소 온배수의 수온분포가 약 20°C 가량 낮음을 확인할 수 있으며, 공간해상도는 100 m 임
- Landsat 8 의 경우 광범위한 표층수온 분석은 가능하지만 공간해상도가 낮음

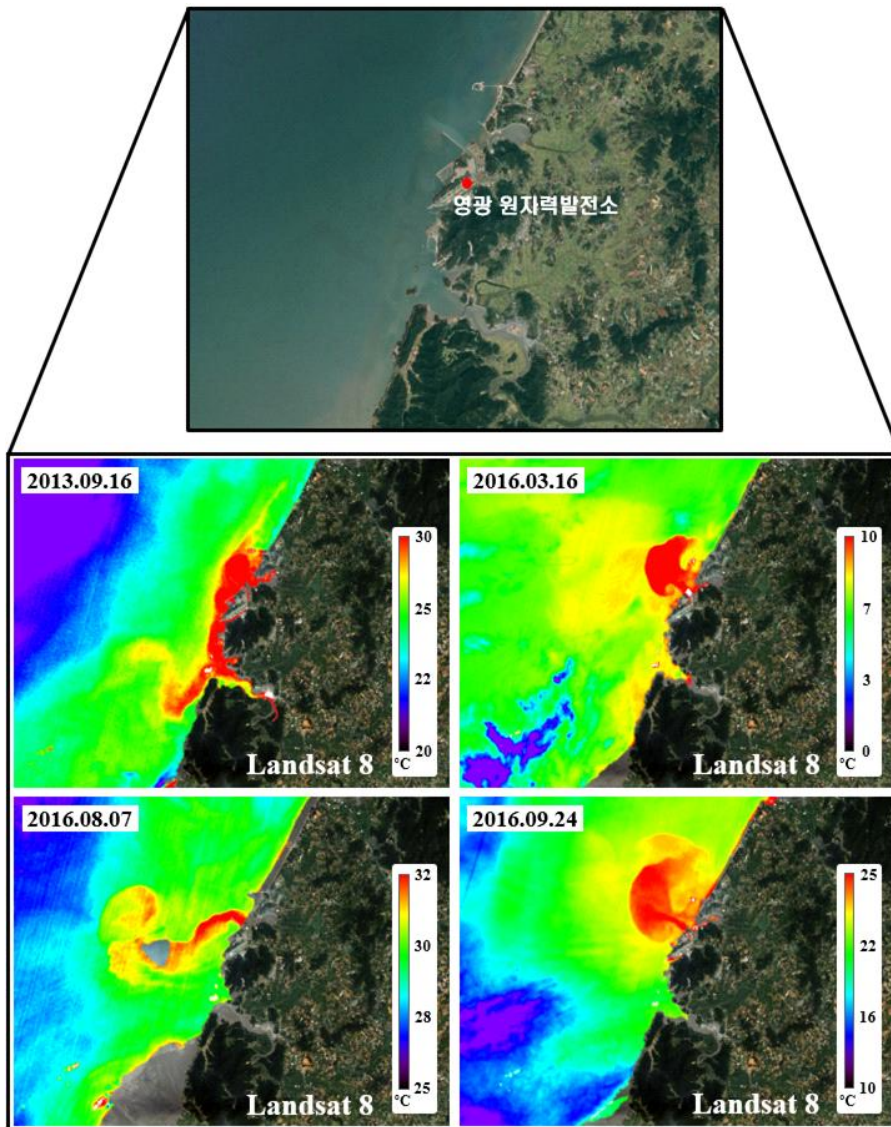


그림 6. Landsat 8 TIR 밴드를 활용한 표층수온 분석

(나) 클로로필 알고리즘을 활용한 냉·온배수 영향 범위 진단 및 평가

- 그림 7 는 Landsat 8 OLI 영상의 클로로필 알고리즘 적용 결과를 나타냄
- 영광 원자력발전소와 곰소만 입구에 걸쳐 넓은 해역에 대해 10 mg m<sup>-3</sup> 의 높은 클로로필 값이 형성됨
- 클로로필 분포 특성만으로 냉·온배수에 의한 영향인지 쉽게 판단 할 수 없음

- 다른 요인으로 곰소만 연안에서의 영양염 유입에 의한 영향일 가능성 존재함
- 따라서 추가적인 표층수온 자료를 이용한 검증이 필요함

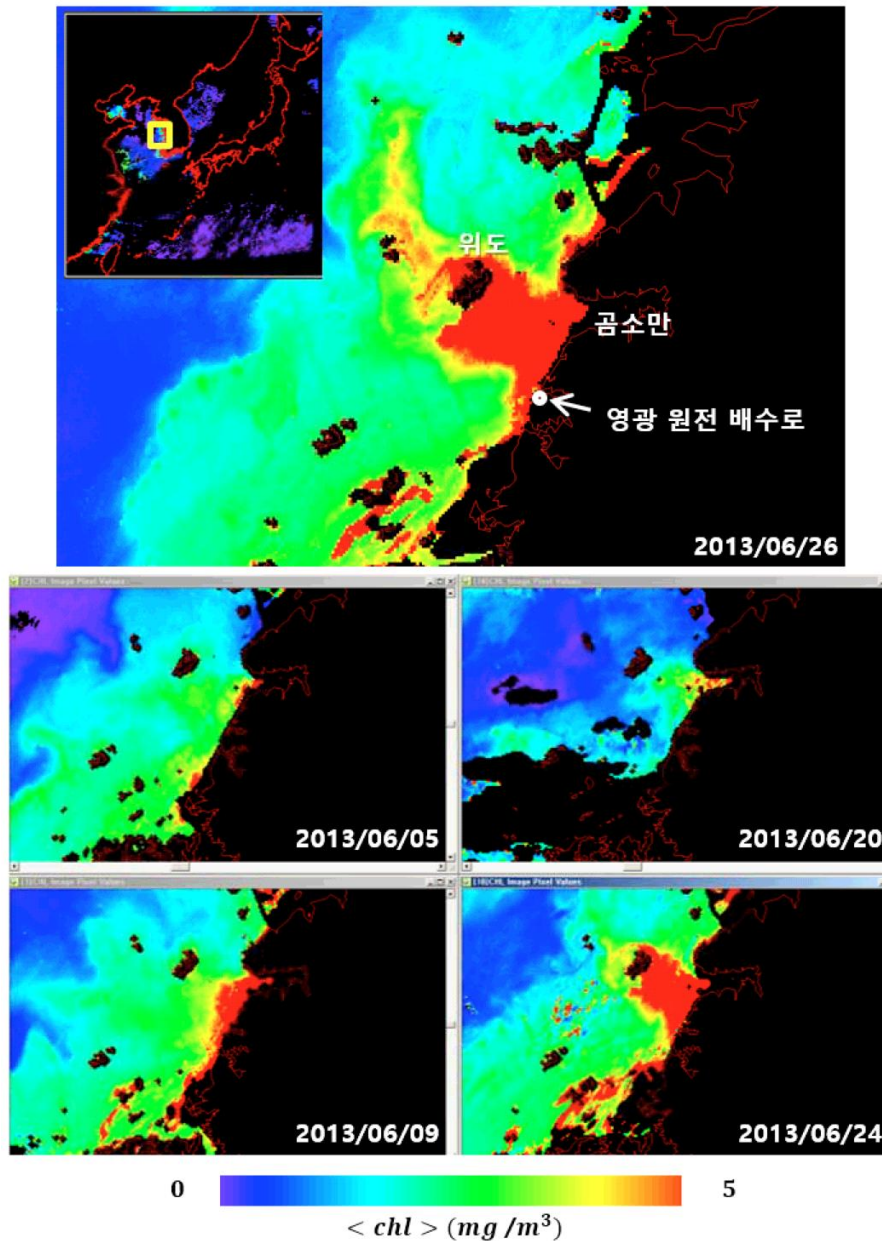


그림 7. Landsat 8 OLI 영상의 클로로필 알고리즘을 분석

(다) KOMPSAT-3A 인공위성

- 2017년 9월 8일 획득된 KOMPSAT-3A 영상의 표층수온 분석 수행 (그림 8)
- KOMPSAT-3A 열적외선 영상은 Landsat 8 위성에 비해 관측 범위는 좁지만 공간해상도가 5.5 m 로 세밀한 표층수온 변화 탐지에 상대적으로 우수함

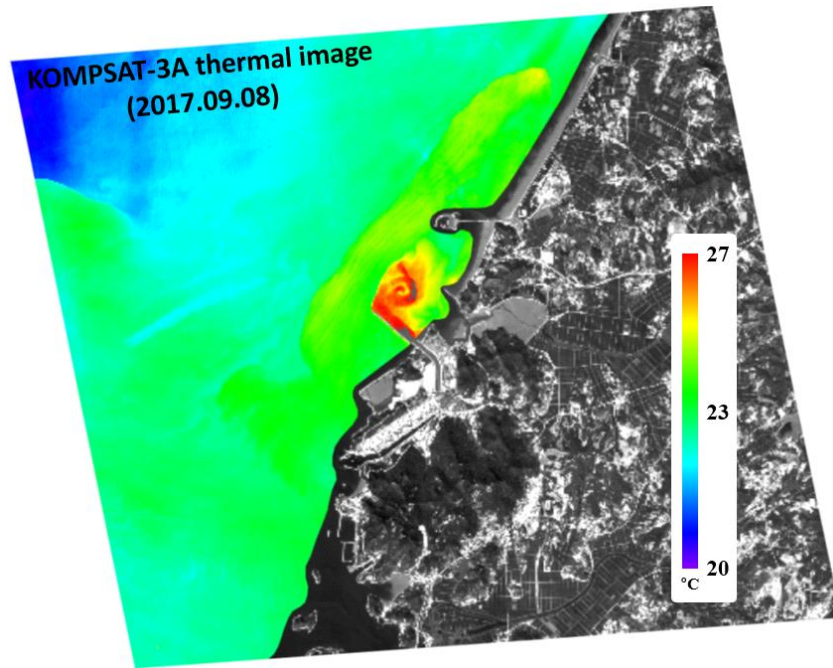


그림 8. KOMPSAT-3A 위성으로 획득한 열적외선 영상

(2) 무인기플랫폼을 활용한 냉·온배수 영향 범위 진단 및 평가

○ 고정익 무인항공기 열적외선 영상자료

- 그림 9 는 고정익 무인항공기로 500 m 고도에서 획득한 2장의 열적외선 영상을 나타내며 표층수온, 방과제, 선박의 위치를 60 cm 해상도로 관측함.
- 방과제 왼쪽 해양의 표층수온 분포는 20°C ~ 22°C 로 형성되어 있으며, 방과제 오른쪽 해양은 17°C ~ 19°C, 방과제는 25°C ~ 27°C 로 온배수 거동현상에 따른 온도 분포를 명확히 분석할 수 있음.

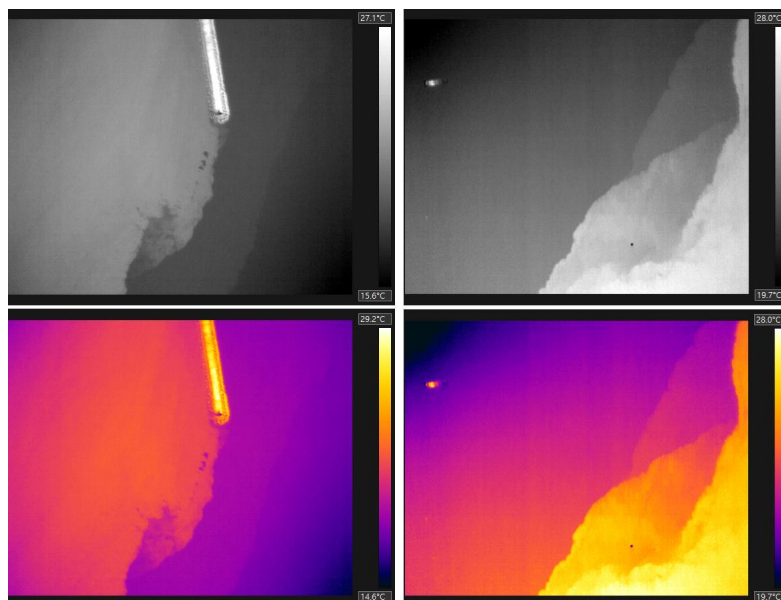


그림 9. 고정익 무인항공기로 촬영한 열적외선 영상자료

(3) 냉·온배수 데이터 수집을 위한 IoT 플랫폼 개발

냉·온배수 환경 정보를 실시간 정보를 원격에 위치한 End-user에 제공하기 위한 해양 IoT 기술 개발이 필요하며 그 세부 연구 주제는 아래와 같다.

개발내용	세부 연구 주제
저전력 센서 기반 냉·온배수 탐지 센서 개발	- 냉·온배수 정보의 실시간 획득을 위한 저비용·광범위 냉·온배수 센서 개발 - 장시간 운용이 가능한 저전력 센서 개발
냉·온배수 실시간 감시를 위한 해양 센서 네트워크 구축·운용 기술 개발	- 센서로부터 획득되는 냉·온배수 정보를 실시간으로 End-user에게 제공하기 위한 해양 센서 네트워크 구축 - 고 신뢰 IoMT 지원을 위한 해양 센서 네트워크 최적 운용 기술 개발
빅데이터 분석을 통한 냉·온배수 사전 대응 기술 개발	- 딥러닝 기반 실시간 냉·온배수 정보 취합 및 빅데이터 분석을 통한 사전 대응 기술 개발

IoT 기반 실시간 냉·온배수 탐지 및 데이터 수집 시스템 개발을 통해 급변하고 있는 해양 생태계 변동에 적극적으로 대처하고 냉·온배수로 인한 국민의 인적·물적 피해를 사전에 예방할 수 있다. 또한 국가 차원에서 냉·온배수 관리방안을 수립하고 적극적인 관리를 목표로 하고 있는 만큼, IoT 기반 냉·온배수 데이터 수집 플랫폼 개발은 이러한 국가 차원의 목표의 달성에 기여 할 수 있는 적절한 해결책이 될 수 있다.

해양·ICT 융복합 기술 개발을 수행함으로써 제4차 산업혁명에 부합하는 신산업 생태계 조성 및 주력산업 구조 고도화에 기여할 수 있다.

- 해양/생태 분야에서 획득한 지식을 기반으로 냉·온배수 탐지 센서를 개발하고 이를 ICT분야와 융합함으로써 보다 효율적인 유해 생물 구제 및 해양 생물 생태 파악을 가능케 함
- 해양 센서라이제이션 기반한 Internet of Maritime of Thing (IoMT) 구축을 통해 제4차 산업혁명에 부합하는 해양 분야 신사업 제시

## 제2절 배출수의 오염물질 영향 분석 기술

### 1. 냉·온배수의 화학적 특성

냉·온배수의 해양 배출에 따른 수질의 변화는 취수한 물의 초기 조성, 냉·온배수 계통 시스템의 유형과 설계, 그리고 수처리에 사용하는 화학물질에 의해 나타날 수 있다. 원수의 조성에 비해 변화하는 것은 수온 상승 또는 저하에 따른 수질의 생지화학적 변화, 그리고 냉·온배수 계통 시스템의 운영과정에서 발생하는 수질의 변화로 구분할 수 있다(박 등, 2007).

냉·온배수는 수량이 풍부한 연안 해역이 취수원으로 많이 이용되고 있으며, 이곳은 하천수 유입 및 인위적 활동으로 수질의 시공간적 변화가 근해 및 외해보다 상대적으로 크게 나타난다. 냉·온배수에 의한 영향 예측하기 위해서는 취수하는 원수의 화학적 변화를 파악하고, 냉·온배수의 배수구 배출해역에 대한 수질 자료를 확보하여야 한다.

냉·온배수 계통 시스템에서 발생하는 물리적 과정은 수질의 화학적 변화를 가져오게 된다. 특히 계통 내의 수온의 변화, 압력의 차이로 인하여 취수 원수 내 포함된 기체의 용해도에 변화가 나타난다. 일반적으로 기체는 수온이 상승하면 용해도가 감소하고, 수온이 감소하면 용해도가 증가한다. 대표적인 생지화학 관련 원소인 산소의 경우 수온이 5°C에서 30°C로 올라가면 용해도는 약 1/2로 줄어들며, 포화농도가 낮아지게 된다. 또 다른 측면에서 수온의 변화는 생화학 반응에 영향을 미치는데 수온이 상승하면 반응은 증진된다(맹 등, 2013 재인용).

냉·온배수 계통 시스템의 효율적인 운영 관리를 위하여 다양한 화학물질들이 투입되고 있는데 대표적으로 생물 오손을 방지하기 위한 염소 처리, 거품을 저감시키기 위한 소포제가 있다. 이들 물질은 냉·온배수에 포함되어 배수구를 통하여 해역으로 배출되어 해역의 수질 및 환경에 영향을 미칠 수 있는 화학물질이다.

## 2. 염소

한편 냉·온배수 계통의 열 전달 효율에 영향을 미치는 요인으로 관로의 부식, 생물부착, 물 때가 있으며 이러한 것의 생성을 억제하기 위하여 다양한 화학물질이 사용된다. 특히 생물의 부착 제어는 계통 관리에 있어 가장 중요한 부분으로 오손 방지를 위하여 황산구리, 수은 화합물, 과망간산염 등으로 처리하게 된다. 대형 무척추동물의 부착 방지를 위하여 염소가 많이 사용되며, 브롬과 같은 산화제도 사용된다. 염소처리를 위하여 약품(차아염소산 나트륨, NaClO) 형태로 투입되기도 하지만 최근에는 해수 전기 분해로 만들어 주입하는 방식이 많이 사용되고 있다.

염소의 주입 방법 고농도의 간헐적 주입과 저농도의 연속 주입 방식을 사용하는데 전자는 미국과 유럽, 후자는 일본에서 많이 채택하고 있다(맹 등, 2013 재인용). 주입하는 염소의 양(염소 요구량)은 냉·온배수 계통 시스템에서의 수온, 희석, 냉·온배수의 염소 주입 후 관로 체류시간과 연관된 소모량, 최종적으로 배수구 물에 잔류하는 염소의 허용농도 기준을 고려하여 산정된다. 미국, 유럽 및 일본은 배수구 및 혼합지역에서 잔류염소 또는 유리염소의 농도의 허용치를 제시하고 있다. 프랑스는 원자력발전소의 배수구와 혼합지역에서 잔류염소 농도를 0.3~0.5mg/L 미만, 미국은 유리염소와 잔류염소의 최대 허용치를 각각 0.5mg/L와 0.2mg/L 이하로 있으나 일부 EU 국가는 0.1mg/L 미만으로 운영하기도 한다. 연속 주입 방식을 채택하고 있는 일본은 수산용수의 사용을 고려하여 검출한계치(o-tolidine법 0.01mg/L, DPD법 0.05mg/L) 미만으로 하고 있다(맹 등, 2013 재인용).

해양생물에 대한 잔류염소의 만성적 영향이 나타나지 않는 농도는 0.02mg/L로 추정되고 있으며, 국내에서 발전소 온배수 방류수(잔류염소 0.13mg/L)와 방류수 희석수(잔류염소 0.03mg/L 이하)에서도 가 박테리아와 종속영양 미소편모조류의 성장률에 영향을 미치는 것으로 나타났다(Choi et al., 2002).

냉·온배수의 잔류염소 영향을 평가하기 위해서는 염소 투입에 따른 각 종 화학종의 생성과 농도 변화 등 거동 특성에 대한 정확한 이해가 필요하다. 또한 각 화학종과 다양한 생물 종에 대한 영향(치사, 성장률 저하, 세포 파괴, 스트레스 증가, 부하율 감소 등)이 파악되어야 한다.

이러한 자료는 냉·온배수 배수구 주변해역의 해양생태계에 미치는 영향을 종합적으로 평가하거나 해양생태계 영향 예측 모델을 수행하는데 기초 자료가 될 것이다.

### 3. 거품 및 소포제

온배수의 방류시 발생하는 거품은 심미적인 혐오감은 물론 환경 영향을 미칠 수 있으며, 거품은 조위차가 연안 온배수 배수로 주변에서 많이 나타난다. 거품에는 각종 해양 동식물 플랑크톤을 포함하여 다량의 유기물질이 포함되어 있으며, 거품의 색은 광반응으로 갈색 또는 검정색을 띠게 된다(맹 등, 2013 재인용). 거품의 배수구의 수두 낙차에 의한 물리적 교반으로 공기가 포집되고, 해수에 포함된 유기물질의 계면활성화 작용으로 포집된 기체가 빠져나오지 못하고 소규모 거품들이 뭉치면서 점점 커지고 넓게 퍼져나가게 된다. 온배수 배출 시설에서 거품 발생의 다른 요인으로 액체폐기물 및 폐수처리 계통에 대한 자체 조사 결과 연관성은 없는 것으로 평가되었다. Fazilet(1998)은 거품의 형성으로 인한 물리적, 생물학적 영향을 표 20과 같이 요약하였다.

거품을 제거하거나 감소시키기 위하여 소포제를 사용하여 왔으며, 국내에서는 대표적으로 디메틸폴리실록산(PDMS, Polydimethylsiloxane)이 사용되었다. 디메틸폴리실록산은 실리콘(Si)과 산소(O)가 연결된 기본구조 Si에 메틸기(CH<sub>3</sub>)가 다수 붙은 디메틸실록산 단위체가 결합된 것이다(그림 10). 물리·화학적 특성은 물에 쉽게 녹지 않고, 상온에서 휘발성도 낮으며, 낮은 표면장력, 높은 열 안정성, 화학적 안정성이 큰 물질이다. 그 용도로는 거품을 제거하는 소포제 외에도 개인기호품(향수, 샴푸, 로션, 스킨 등)의 첨가제, 산업용품(의료기기, 조리기구, 전기 절연제 등)의 첨가제로 이용되고 있다.

표 20. 거품 형성에 따른 문제점

<p>물리적 효과 (Physical Effects)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 기체 - 액체 간 산소 교환 강화</li> <li>■ 이질성 증가</li> <li>■ 수중 기체 체류(Gas hold-up)의 증가</li> <li>■ 기포의 크기와 구성의 변화</li> <li>■ 이기종 분산에 의한 용해 가스의 변화 패턴</li> <li>■ 걸보기 점도의 감소</li> <li>■ 질량 및 열전달 속도 감소</li> <li>■ 순환 속도의 감소</li> <li>■ 통기의 감소 및 혼합</li> <li>■ 가스 필터의 입구부(inlet)와 출구부(exit)의 폐쇄(Blockage)</li> </ul>
<p>생물적 효과 (Biological Effects)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 기포 주변의 고인 액막(liquid film) 세포의 농축</li> <li>■ 미생물 용해</li> <li>■ 생물 반응기(bioreactor)의 상부에 세포의 증착</li> <li>■ 영양 제한으로 인한 미생물의 신진대사(metabolism)의 변화</li> <li>■ 거품 층(foam layer)에 있는 단백질 변성</li> <li>■ 살균 작용(sterile operation)의 문제</li> <li>■ 에어로졸 형성으로 인한 환경적 오염의 위험가능성</li> <li>■ 표면활성제(surface active agents)의 선택적 제거로 인한 거품부유선별 및 분리</li> </ul>

자료: Fazilet Vardar Sukan(1998).



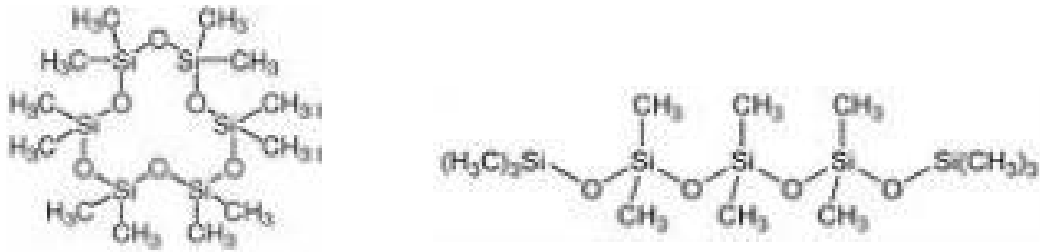


그림 10. 디메틸폴리실록산의 대표적인 분자 구조

해양수산부는 폴리디메틸실록산을 Y류 유해액체물질로 지정하여 배출제한(100L 이상 배출 시 신고) 물질로 지정하고 있으나 유해성이나 배출허용기준이 마련되어 있지 않았다. 국내 산업안전보건법, 화학물질관리법, 위험물안전관리법에서도 유해물질로 미지정 상태이며, 규제사항도 없는 실정이다. 물질안전보건자료 피부부식성, 호흡기과민반응, 발암성, 자극성 등은 없는 것으로 제시되고 있고 분자의 크기가 크고 높은 분자량으로 생체흡수가 어려운 물질로 알려져 있다. 해양생물에 대한 고농도의 노출 실험결과 중 구조류에서 생체량에 변화가 있다고 보고되었으나 많은 해양 생물에서 부정적 여향이 관찰되지 않았다고 하였다.

최근 들어 이 물질에 퇴적물 환경에서의 연구가 급격히 증가하였으며, 이는 하여 많은 환경 내에서의 일부 독성 연구 결과 호르몬 변형, 류마티스 관절염, 간과 폐에 위험성이 있는 것으로 알려져 있다.

국내에서 PDMS의 온배수 소포제로 사용으로 환경영향 가능성이 사회적 이슈로 부각되면서 이물질의 사용은 감소되었다.

그러나 PDMS의 유해성에 대한 상반된 의견을 해소하고 관리를 위한 연구가 필요하다고 판단된다. 따라서 PDMS 등 소포제에 대한 해양환경 유해성 여부 판단과 해양 생태계 영향 정도를 파악하기 위한 과학적 근거를 마련하여야 하며, 이에 바탕을 두고 안전한 배출수 관리를 위한 정책 및 제도적 방안이 제시되어야 할 것이다.

### 제3절 냉각계통 및 배출수의 해양생태계 영향 분석 기술

#### 1. 냉각계통이 해양생태계에 미치는 영향

다량의 바닷물을 냉각수(500만톤/일/호기 이상)로 이용하고 있는 발전소에 해양생물이 무리를 지어 빈번하게 유입되어, 해양생물의 대량 폐사 및 해양생태계의 변화 등이 일어나고 있으나, 이에 대한 영향 분석 연구가 매우 제한적이다.

80년대 후반부터 대량의 해수를 사용하고 있는 원자력발전소를 대상으로, 냉각계통으로 유입되는 해양생물의 영향 평가 연구가 진행되었다. 1988년부터 고리원자력발전소 취수구에 큰가시고기가 대량유입되어 사망하는 사고를 평가하기 위한, “발전소 취수구 어류 유입방지 대책연구(한전기술연구원, 1991)”와 “고리 원자력발전소 취수구 스크린에 의해 사망하는 어류에 관한 연구(호와 황, 1997)”의 결과, 큰가시고기가 산란하기 위해 이동하는 과정 중에 발전소 냉각계통으로 대량유입되는 것을 방지하기 위하여, 하천으로 이동하는 큰가시고기의 유입 길목을 만들어주어 큰가시고기의 대량 폐사를 방지하였다.

울진원자력발전소에서는 1998년부터 2008년까지 크릴새우와 보름달물해파리 그리고 어류의 치어가 냉각계통에 유입되는 생물량 평가 및 각 생물의 이동 경로 패턴과 생활사 연구를 실시

하였다(한국수력원자력, 2009). 울진원자력발전소 취수로 그물망에 유입되는 해양생물량은 평균 3,330톤이며, 그중 해파리류가 2,718톤으로 가장 우점한 생물군으로 나타났다. 수거 생물량에 기초한 주요 유입생물은 보름달물해파리, 크릴새우, 멸치, 살파, 해조류 등 기타유입생물 순이었다. 또한, 냉각계통의 입구에 설치된 스크린에 충돌하는 어류는 연도별로 13 ~ 36종 이었으며, 멸치, 전갱이, 망상어, 쥐치, 물메기, 복섬, 노래미 등이 우점적인 충돌어종으로 나타났다. 충돌개체수는 연도별 29 ~ 3,187개체로 변동 폭이 크게 나타났으며, 생체량은 연도별로 1.7 ~ 114.3 kg을 보였다(한국수력원자력, 2009).

2005년에 수행된 해양생물에 의한 취수구 폐쇄현상 방지기술 연구에서, 냉각계통에 유입되는 해양생물의 영향을 분석하기 위하여, 크게 현장조사와 생리실험이 실시되었다. 첫 번째로, 현장조사에서는 유입생물이 분포하는 해역의 환경조건과 개체군의 이동을 유발하고 조절하는 환경요인을 분석하고, 생물의 이동에 영향을 주는 먹이 환경 조건을 조사하였다(과학기술부, 2005). 또한, 해양생물의 분포깊이, 일일이동, 시기에 다른 이동 등을 정확히 파악하기 위하여, 개폐가 가능하며 여러 깊이에서 동시 채집이 가능한 플랑크톤 네트와 대형네트를 이용하였으며, 계량어군탐지기 조사를 병행하였다. 두 번째로, 생리실험에서는 유입생물의 생리생태를 파악하기 위하여, 생물의 행동, 생리변화, 성장률, 사마임계범위 등에 대한 실험을 실시하였다(과학기술부, 2005).

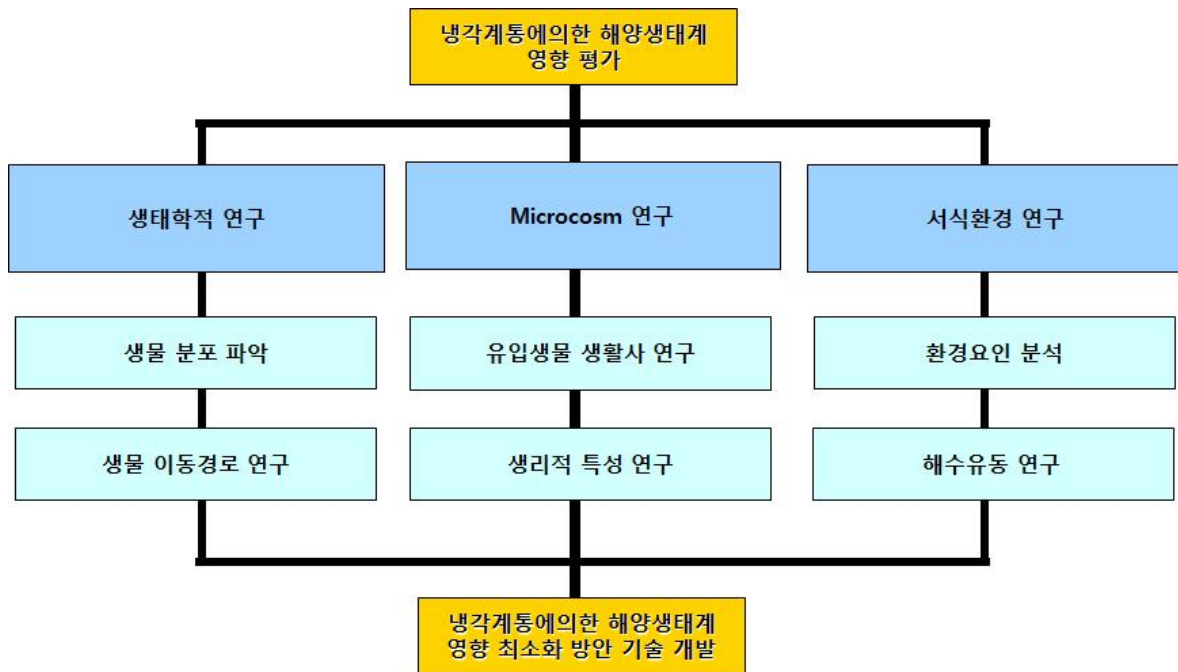


그림 11. 냉각계통에 의한 해양생태계 영향 평가 방법 모식도

## 2. 냉·온배수가 해양생물에 미치는 영향

연안에 위치한 발전소들은 발전소 터빈 냉각을 위해 사용한 다량의 온배수를 배출하고 있으며, 온배수가 부근 해역의 물리, 화학적 환경과 서식하는 해양생물에 여러 가지 변화를 야기시킬 수 있다. 즉 냉각으로 인한 온도상승과 발전과정에서 유출되는 각종 화학폐기물, 냉각기 내의 압력, 마찰 등에 의한 피해는 해양환경에 영향을 미칠 뿐만 아니라 어패류의 유생이나 부유생물의 생존능력을 저하시켜 결국 수산자원의 감소를 초래할 수 있다.

온배수에 의한 해양생물 및 수산자원의 영향을 평가하기 위하여 어업피해영향조사가 실시

되고 있으며, 어업피해영향조사에서는 영향을 평가하기 위하여 해양환경과 해양 동·식물상을 조사하고 있다. 특히 해양 동·식물상을 바탕으로 한 해양생태조사의 목적은 공사이전에 생물다양성측면의 환경평가가 우선이며 동시에 공사이후에 나타나는 해양생태계변화추이를 예측하는데 있다. 그러나 해양생태 변화예측은 우리나라와 같이 동일 장소에서 장기간의 조사 자료가 불충분한 곳에서는 거의 불가능한 현실이다. 따라서 일차적으로 물리·화학적 환경요인의 정도에 따라 결정되는 경우가 많다. 온도와 같은 물리적인 변화는 해양생태계를 수산생물의 직접적인 생존이나 간접적으로 서식하는데 자연에 역행하는 변화를 일으키게 된다.

해양에서의 수온의 변화는 생물의 종류에 따라 반응하는 정도가 다르고 같은 생물이라 할지라도 영향을 주는 환경요인의 강도 또는 시간에 따라 반응이 크게 다르게 나타난다. 그러므로 온배수에 의한 해양생물 및 생태계 영향을 평가하기 위한 표준화된 조사 및 분석 방법이 필요한 실정이다. 이를 위해 2004년에 한국해양학회와 한국수산학회 주관으로 원전온배수관련 어업손실평가 표준지침에 수록된 해양생물 영향 평가 방법 및 조사를 실시할 때 고려해야 할 상황에 대한 내용을 정리하였다.

#### 가. 미생물

일반적으로 온도의 상승은 해양 박테리아에게 대사 활동도의 증가를 가져온다. 전형적으로 수온이 10도 상승하면 활동도가 2배 정도 증가하는 것으로 (즉, Q10 ratio = 2) 알려져 있다. 박테리아가 장기적으로 온도 변화에 노출되면, 박테리아 군집 구조와 개체수에서 변화가 일어날 수 있으나, 단기간의 온도 노출은 온배수 배출에서 흔히 발견되는 온도범위에선 별 영향을 주지 않는다(Langford 1990).

온배수가 주변 해수와 희석되는 정도는 배수구부터의 거리의 제곱에 비례하기 때문에, 조사 정점은 배수구 주변을 중심으로 밀집하고, 거리가 멀어질수록 정점 간 거리가 증가하는 방식으로 선정하고, 온배수의 영향이 표층에서 더 예민하게 나타나기 때문에, 표층에서만 시료를 채취한다. 박테리아 계수는 해양 박테리아 군집 전체를 계수하는 것이 바람직하고, 나아가서 Live/Dead Kit를 이용하여 활성이 있는(live) 박테리아를 계수하는 방법이 바람직한 것으로 보여진다. 그리고 특정 박테리아의 분류군을 계수하고자 할 경우는 분자생물학적 방법을 사용하는 것이 바람직하다.

표 21. 미생물 조사 방법

채집	- 총별 채수 - 채집방법 : 표층 - Bucket (물통), 수층 - van Dorn 채수기
분석	- 박테리아 총개체수, 활성박테리아 수 - 박테리아 생산력 - 3H-methylthymidine(TdR) 이용 - 희석효과 실험 - 희석 온배수배양 (개체수, 생산력변화 측정)

#### 나. 식물플랑크톤

식물플랑크톤의 성장과 일차생산력은 수온 변화에 따라 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다. 발전소 인근수역의 식물플랑크톤은 냉각수와 함께 발전소로 유입되어 냉각계통을 연행하는 동안 수온증가와 화학물의 독성에 노출됨으로서 대사활동에 큰 변화를 나타내게 된다. 또한 온배수 형태로 해양생태계에 부하되는 발열 또한 발전소 주변해역의 수온분포를 변화시켜

식물플랑크톤 성장과 일차생산력에 직접적인 영향을 초래하며, 이는 먹이망 및 영양염 순환 등의 변화를 통해 전체 생태계로 영향이 전달될 수 있다.

식물플랑크톤은 계절적으로 온배수에 의한 영향이 다르게 나타난다. 봄과 가을에는 자연수역보다 온배수가 유입되는 해역에서 식물플랑크톤의 생산력이 증가하는 경향을 보이지만, 여름철에는 자연 해수의 온도와 온배수의 고온이 더해져, 식물플랑크톤의 최적 생육 온도를 넘기 때문에, 생산력이 감소한다. 즉, 식물플랑크톤의 광합성은 일주기와 계절주기를 가지고, 각 종의 적응력이 계절별 차이를 보이고 있다.

온배수에 의한 영향을 평가하기 위해서는 식물플랑크톤을 정량화하는 방향으로 조사항목과 방법이 개선이 필요하다. 이를 위해서는 객관적이며, 정밀하고, 재현성 높은 분석방법이 HPLC를 이용한 색소분석방법과 일차생산력 조사가 필요하다. 또한 식물플랑크톤의 종 조성과 현존량조사는 대상 분류군을 명확히 하고 정점 수를 줄여 자료의 정밀도를 높이는 변화가 필요하다. 환경영향평거나 피해보상조사는 그 목적에 맞게 일차생산력 조사 등에 집중하여 온배수의 영향을 정량화 하는 조사가 이루어져야 한다. 또한 정점 수나 조사주기도 조사목적에 맞게 조정이 필요하다

표 22. 식물플랑크톤 조사 방법

채집	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 채수</li> <li>수심 5m 이내 - 표층수</li> <li>수심 10m 이상- 표층, 저층수</li> <li>채집방법 : 표층 - Bucket (물통)</li> <li style="padding-left: 20px;">수층 - van Dorn 채수기 이용 층별 채수</li> <li>채수량 : 500ml 또는 1 l</li> <li>- 네트</li> <li>Kitahara net : 망구 25cm ,망목 100m</li> <li>식물 플랑크톤 net : 망구 30cm, 망목 60<math>\mu</math>m</li> </ul>
분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 식물플랑크톤 색소: HPLC 분석</li> <li>- 일차생산력 측정 “ 방사능동위원소</li> </ul>

다. 동물플랑크톤

동물플랑크톤은 표영생태계 내에서 일차생산자의 주요한 소비자일 뿐만 아니라 어류 등 유용수산자원의 먹이로서 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러므로 동물플랑크톤 조사는 해양생태계의 구조와 기능을 조사하는데 필수적인 요소이다. 동물플랑크톤의 조사에 있어 정량 자료를 얻기 위해서 고려하여야 할 사항을 정리해보면 채집 장소의 물리적 상황을 고려한 예망방법(경사채집)과 사용할 네트(망목 200 $\mu$ m와 330 $\mu$ m를 표준망목)를 포함한 채집계획을 세우고, 조사 정점은 방사상으로 선정한다. 동물플랑크톤의 정량측정을 위해 유량계를 부착한 후, 시·공간적인 변이가 있으므로 목적과 조사해역에 맞는 계획을 세워 일정기간의 매월 조사 또는 시간별 조사가 병행되어 분석하며, 정량적인 자료 확보를 위해 3회 이상 반복채집이 필요하다.

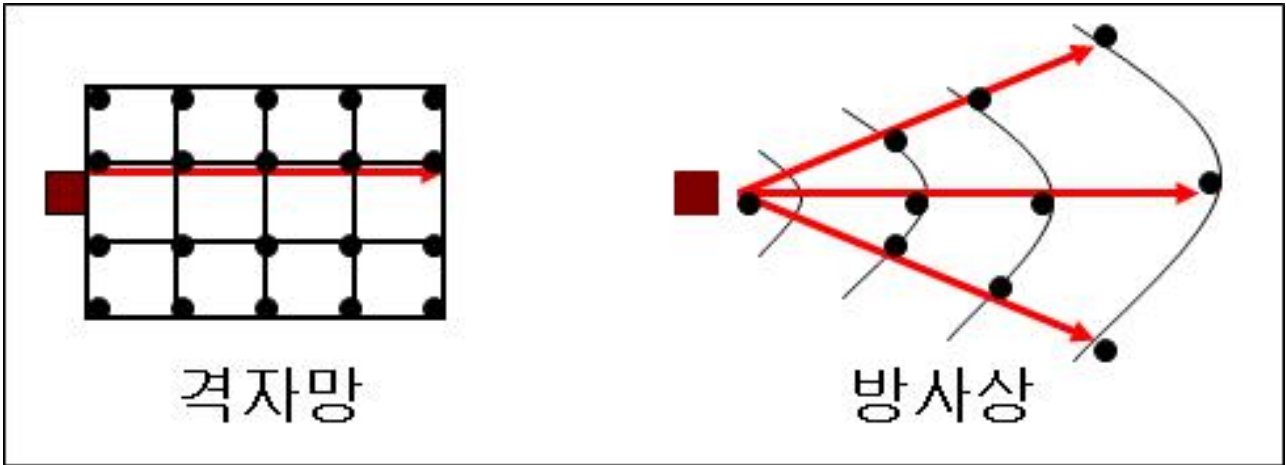


그림 12. 배수구 주변에서 거리에 따른 격자망 또는 방사상 정점

라. 난자치어 및 어류

온배수가 어류에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 시공간에 따른 어류 분포를 파악하여 그 변이 요인(noise)을 제외하고 온배수만의 영향을 분리하여야 하는데 이를 위해서는 어류가 분포하는 넓은 범위에서 자료를 수집하고 생활사에 따른 계절변화 양상을 파악하여야 한다. 난자치어 어류의 경우 시공간 자료 변이가 심한 경우 시공간 변이 폭을 파악하고, 온배수에 따른 온도 구배를 감안하여 해석하여야 한다.

한 해역에서 각 조사 시기마다 표준화 방법으로 정점별 신뢰도 높은 자료를 수집하여 온도 구배에 따라 비교하고, 시간이 지난 후 같은 방법으로 자료를 수집하여 비교 분석함으로써 온배수가 군집 혹은 특정 종에 대한 영향을 분석한다. 어류의 경우 이동력이 커서 적합한 환경을 찾아 이동하기 때문에 한 조사 시기 공간에 따른 자료 변이가 크고, 계절에 따라 종조성이 크게 바뀐다. 온대 해역인 한반도 주변에서는 한 조사 시기 정점에 따른 종조성의 자료 변이 보다 계절에 따른 변이가 크고 같은 계절이라도 해에 따른 차이가 있다. 따라서 각 계절 자료를 수집하는 경우 각 계절을 대표할 수 있는 시기(월)를 선정하고, 각 조사 시기 정점을 대표할 수 있는 자료를 수집하는 방안이 요구된다.

마. 연성저서동물

연성저서동물은 대부분 퇴적물에 고착하여 생활하거나 이동능력이 미약하고, 수중에서 유입되는 먹이를 걸러먹거나 퇴적물 표층에 침전된 먹이를 섭취한다. 따라서 해양에서 일시적 환경 교란에 의한 영향이나 환경 스트레스 등을 판정하는데 주 모니터링 대상이 되는 동물군이다. 대부분의 저서동물의 경우 알에서 부화된 후 일정 기간 유생시기를 거치는데, 이때 수괴내 환경변화에 매우 민감하게 작용하며, 특히 발전소는 냉각수 운용에 따라 온배수가 배출되므로 냉각계통 통과시 영향을 받게 되며, 온배수 배출에 의한 물리적 효과는 저서생물의 착저 범위와 영구적 서식환경을 좌우 할 수 있다. 따라서 발전소 주변에서의 환경변화와 발전소 운용에 따른 연안 생태계 감시 체계에서 저서생태계 모니터링은 영향을 평가할 수 있는 중요한 인자가 되고 있다.

저서동물의 경우 온배수 배출에 따른 단기간 내 직접적인 영향은 지역적으로 나타나지만, 장기간의 걸친 세대 교번에 따른 군집구조 변화는 크게 나타난다. 이러한 요인은 수온변화에 따른 수괴 영향이 주로 표층 부근에서 나타나기 때문이다. 정점은 가능한 폭넓게 선정하는 것

이 분석에 매우 효율적이지만 경제적 여건으로 인하여 한정되기 때문에, 배수구로부터 일정 등간격(격자망)으로 정점을 유지하는 것이 가장 바람직하다. 저서동물의 분포에 주요한 영향을 주는 퇴적물은 온배수 방류에 의한 직접적인 영향이 적지만 실제 생물 군집구조의 영향에 있어 부지 정리, 매립 등 발전소 건설 이전의 환경 변화에 따른 퇴적상의 변화와 발전소 가동 후 온배수의 영향과 복합적으로 작용할 수 있다. 따라서 발전소 가동이전의 저서 환경을 파악하여 복합적으로 나타나는 변수를 줄이는 작업이 필요하다. 또한 초기 일시적인 저서생태계 조사결과는 온배수 영향만을 판정하기 어렵게 되므로, 단기적 조사보다는 장기적 조사가 필요하다.

#### 바. 경성저서동물

경성저서동물의 영향을 파악하기 위해서는 대상해역 내 암반 지역의 분포양상을 먼저 파악한 후, 접근의 용이성을 고려하여 온배수 배출 해역으로부터 지형적 특성을 파악한다. 조하대 암반의 경우 해조류 분포를 고려하여 정점범위가 선정되어야 하며, 암반 주변의 퇴적상 분포나 백화현상이 빈번히 발생하는 해역의 경우 온배수에 의한 영향 여부를 평가하기 어렵기 때문에 범위 선정 시 주변 생태환경에 대한 충분한 사전 조사가 이루어져야 한다.

암반해역을 선정하는데 있어, 정점간 유사성을 고려하여야 한다. 조간대 해역 조사시 암반의 위치 등 방향과 재질, 경사도 등에 따라 생물 분포대가 상이하게 나타나기 때문에 자칫 해석에 영향을 미칠 수 있다. 또한 전반적인 정점을 선정하기 전에 전선 위치를 결정하고, 정점의 경우 조위를 감안하여 동일 조위상에 선정하여야 한다. 계절별 반복조사시 시료 채취의 유사성을 고려하여, 서식분포대 일정 위치를 정하여 시료를 채취하고, 반복된 채취를 통한 시료 감소를 고려하여야 한다.

#### 사. 해조류

해조류는 암반 또는 적당한 기질에 부착하여 살아가는 생물로서 환경이 치명적으로 변화할 때 도피 또는 이동이 불가능하기 때문에, 발전소 구축과 가동 시 수반되는 환경변화의 부정적 영향을 평가함에 매우 유용하다. 해조류는 10-25℃의 좁은 수온범위에서 살아가기 때문에, 해조류의 영향은 종내 온배수로 인해 증가된 수온이 해조류의 인내범위의 상한에 얼마나 가까운가에 따라 다르게 나타난다. 이러한 수온 인내는 한 종 내에서도 달라지며, 시·공간적으로 변동하는 빛, 염분, 영양염, 그리고 기타 오염물질의 농도에 따라 달라질 수 있다. 열대 또는 온대 천해역에서 여름철 수온은 해조류가 인내할 수 있는 수온의 상한에 거의 가깝다. 그러므로 단지 몇 도의 수온상승만으로도 해조류를 치사 또는 아치사 상태로 만들 수 있고, 적정범위 이상의 수온에서는 성장률을 현저하게 낮출 수 있다. 반면 온대역 중 해수 순환율이 비교적 높은 곳에서는 온배수에 의한 국지적 수온상승이 오히려 일차생산과 성장률을 증가시킬 수 있다. 일반적으로 해조류 군집은 좁은 장소 내에서도 크게 변화하며, 이 변화를 일으키는 주요 요인은 파도에 의한 노출, 기질의 경사도, 기질의 견고성(hardness) 등이다. 따라서 가능한 유사한 지형특성을 지닌 곳을 골라 조사지점으로 선정하여야 한다. 조사를 실시하기 위해서는 line transect의 수, line transect에 의해 포함되는 수직범위, line transect의 상부 기준점의 위치(조위), line transect 위에 설치되는 방형구의 위치, 방형구 내에서의 측정항목(종류별 피도, 현존량), 측정 시 표본채집방법(destructive sampling method vs non-destructive sampling method), 그리고 정량조사 외 정성조사의 별도실시 유무 등이 이 부분에서 고려되어야 한다.

### 3. 배출이 해양생태계에 미치는 영향

배출에 따른 해양생태계 영향을 평가하기 위하여 고려되어야 할 사항은 우선, 국내 해양 여건을 고려해야 한다. 우리나라의 경우, 삼면의 바다가 물리·화학 및 생태계 구성이 상호 현격히 다르고, 통일된 조사 범위 및 정점 수는 오히려 상이한 결과를 나타낼 수 있다. 또한, 연안의 물리 특성 즉, 조석 변화가 수괴 흐름에 중요한 영향을 미칠 수 있으므로, 충분히 고려하여야 한다. 또한, 조사를 실시하기 전에, 그 지역에 대한 유향, 유속 등 물리적 자료를 바탕으로 한 사전 환경 분석을 통해 정점 수, 조사 기간 등을 선정하여야 한다. 또한, 생태계 구조별 정점 수를 사전에 협의하여, 환경조사 및 생태조사의 정점을 동일하게 유지하여 상호 보완 가능한 조사를 수행하여야 한다.

배출이 해양생태계에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 해양생물이 가지는 생태학적 변화 분석을 실시한다.

- 수온에 민감한 종, 종수의 변화, 온수성 생물의 종류와 밀도
- 종다양성 지수의 변화, 공간 군집분석과 환경요인분석
- 환경요인분석 중에서 수온의 요인이 차지하는 비중으로 분석
- 원격자료(위성: 엽록소)의 수온변화와의 관계

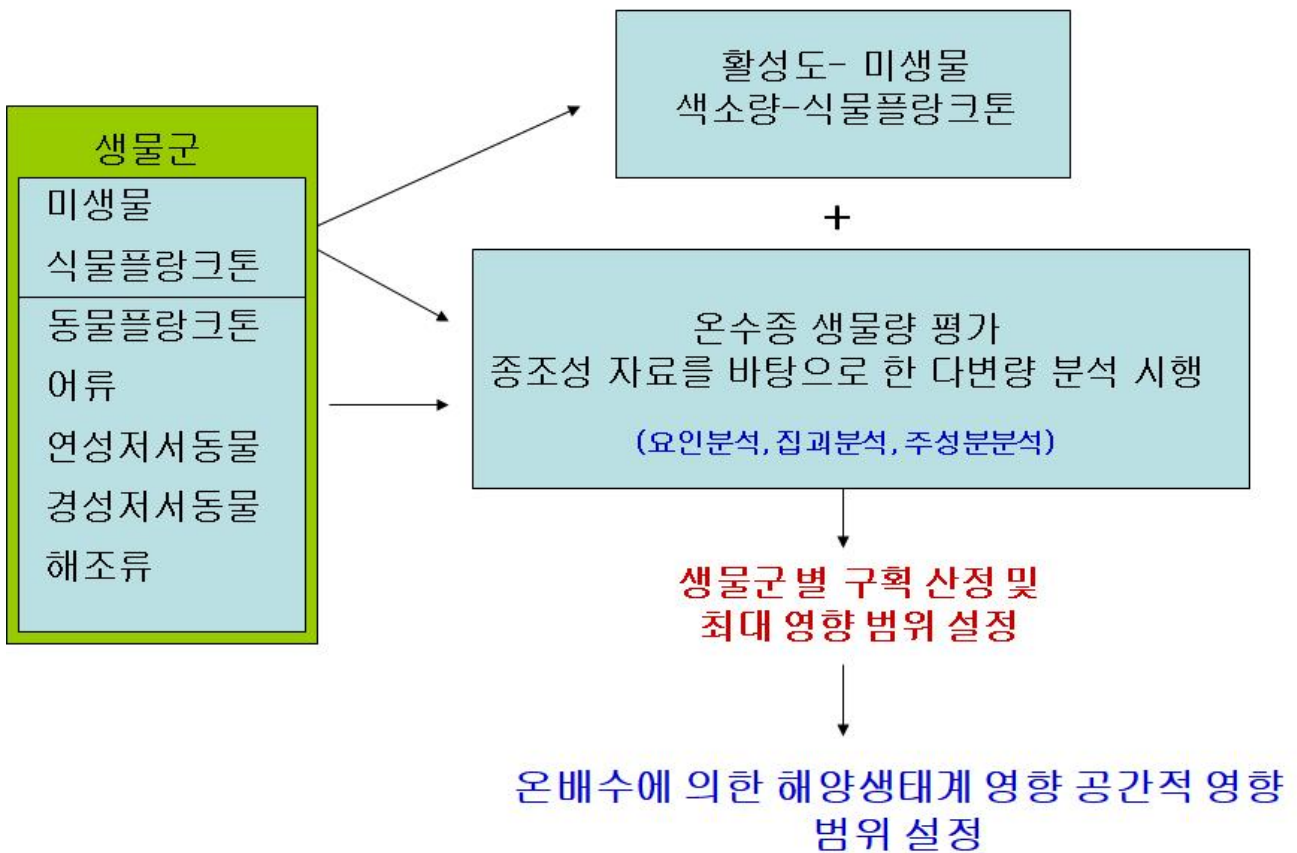


그림 13. 온배수 배출에 의한 해양생태계 영향 범위 설정 방법

### 제4절 냉·온배수의 해양환경 영향 예측 모델 기술

우리나라의 원자력 발전소 또는 화력발전소는 해안에 인접해 있으며, 터빈의 증기 냉각을 위해 사용되는 냉각수가 해양으로 방류되면서 해양 물리 및 해양 생태계에 직접 또는 간접적

인 영향을 미친다. 과거부터 최근까지 냉·온배수에 의한 해양환경, 생태계변화 유발 및 수산물 피해에 따른 갈등이 심화되고 있으나 냉·온배수로 인한 주변해역의 영향 범위 및 영향 정도에 대한 객관적인 연구가 시행되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 수치모델링을 이용하여 발전소 주변해역에서의 냉·온배수 배출에 따른 과학적이고 객관적인 영향 평가 및 관리 체계 정립을 위한 냉·온배수 예측 시스템을 구축하여 운용하고자 하였다.

냉·온배수 예측은 3차원 유동 및 온배수확산 모의가 가능하고 조건대 재현 및 해양-대기 열교환이 가능하며 또한 공인된 모델을 사용하는 것이 바람직하다. 냉·온배수 연구에 국내외적으로 사용된 모델은 Delft3D, EFDC, FVCOM, MOHID, ROMS 등이 있고, 예측 모델의 기본 방정식은 유사하다. 본 절에서는 한국해양과학기술원에서 EFDC를 이용한 한빛원자력발전소의 온배수 연구 결과를 예로 기술하였다.

### 1. 모델 구축 및 검증 방법

모델은 해역별 특성을 잘 재현할 수 있도록 대상 발전소의 설치위치 및 규모를 고려하고, 최신의 수심 및 해안선 자료를 적용하여 구축한다(그림 14).

또한 신뢰할 수 있는 조석 경계조건, 수온·염분의 초기 및 경계조건, 발전소 취배수량, 초과수온, 해양-대기 열교환 조건, 바람 등의 입력조건을 사용하여 모델의 조위, 조류 및 수온의 재현성을 검증해야하며, 검증에 사용되는 자료는 장기관측을 수행한 자료를 활용한다. 모델의 검증 결과는 시계열 및 RMS 오차 등을 제시한다. 그림 15의 빨간색은 관측값, 검은색은 EFDC 모델을 사용하여 구한 계산값이다.

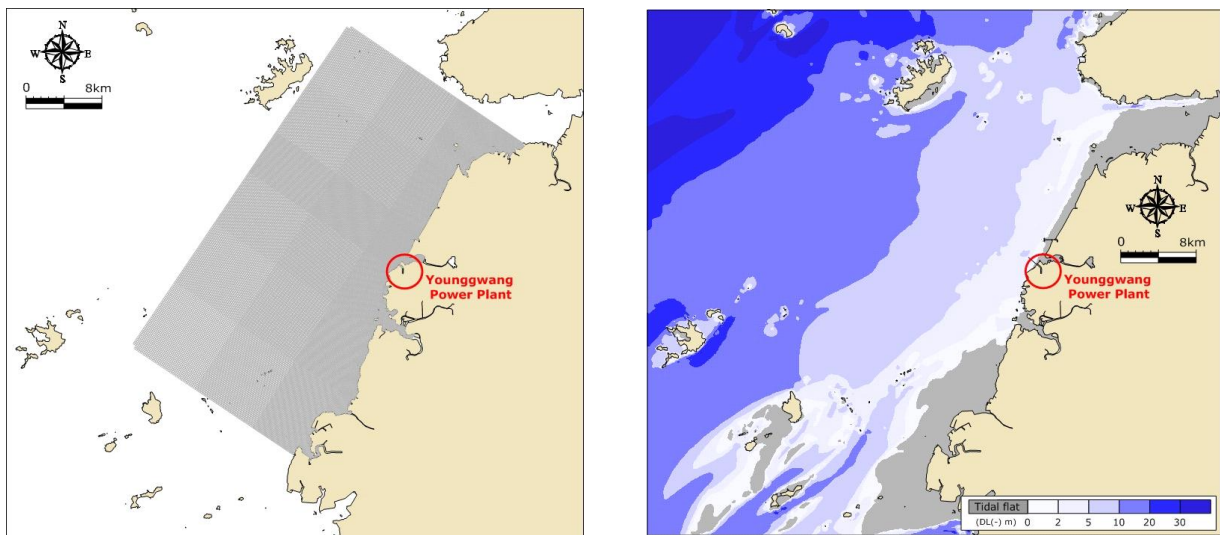


그림 14. 모델 격자망도 및 수심도



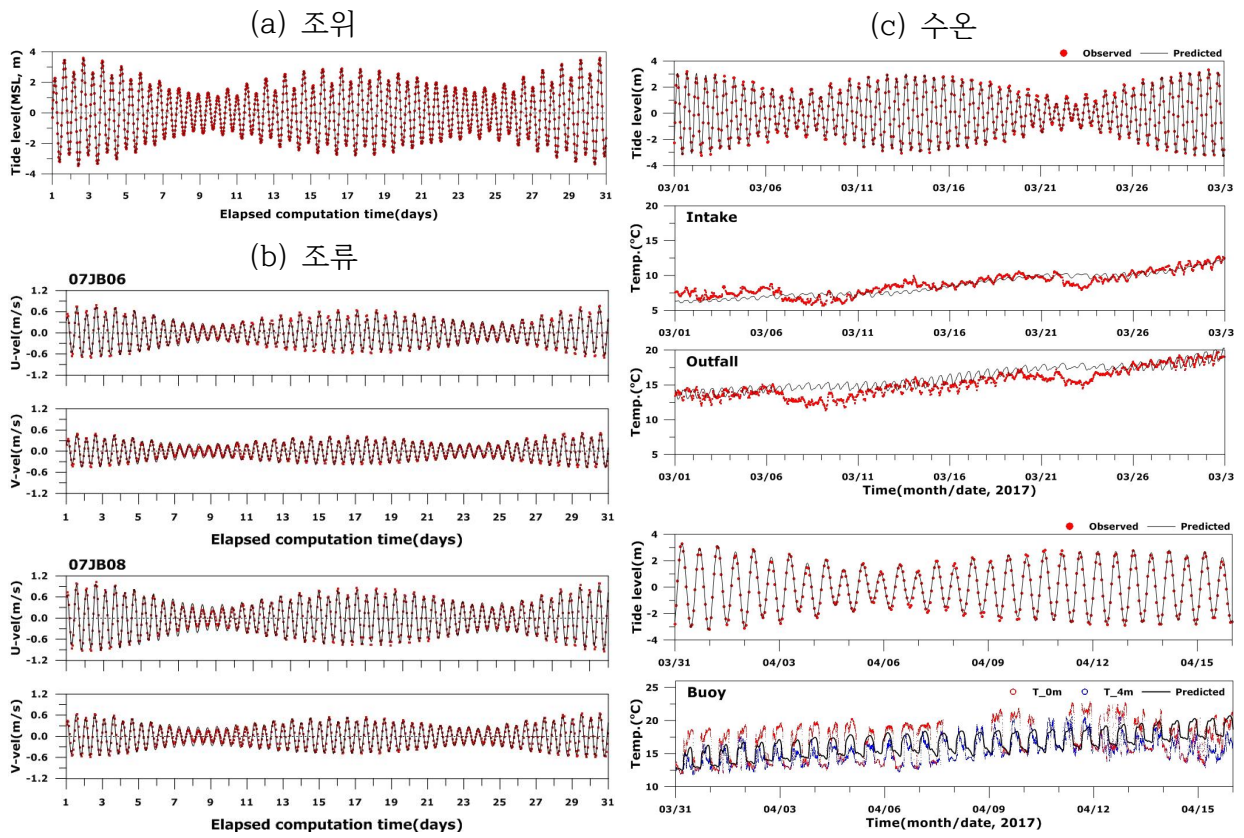


그림 15. 모델 검증 시계열

2. 온배수 확산 결과 제시방법

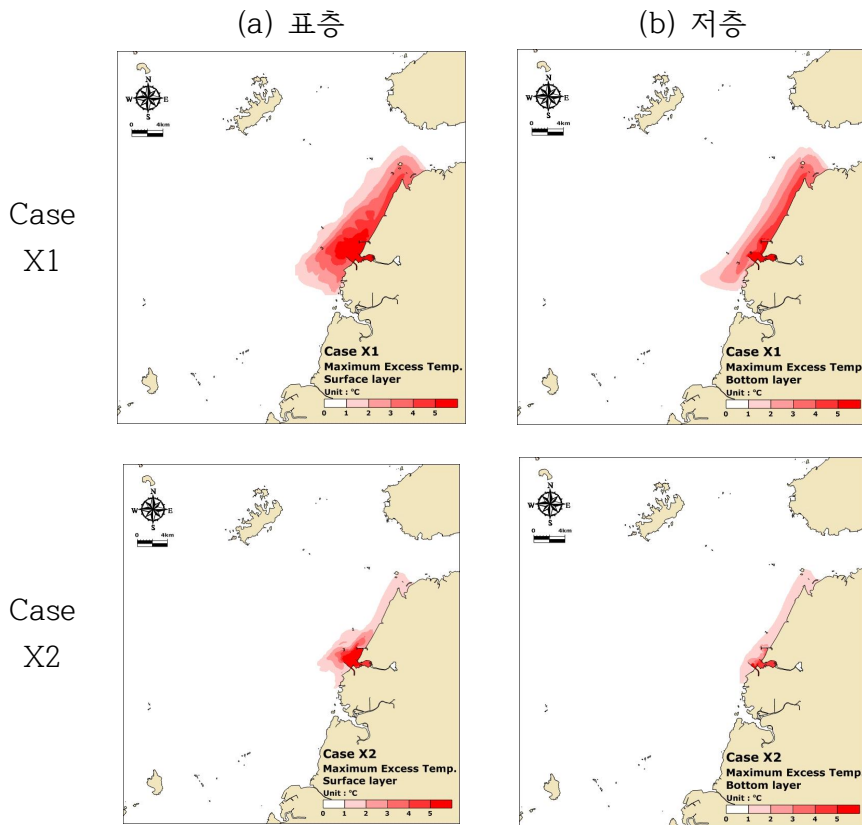


그림 16. 온배수 확산 범위

해역별 특성에 맞는 시나리오를 결정하고, 보정 및 검증된 모델을 이용하여 온배수를 배출하지 않는 실험을 수행한 후, 시나리오 실험 결과와의 차를 구하여 온배수 방류에 의한 초과수온별 최대확산 거리와 최대 확산면적을 산정한다(그림 16).

제시된 결과는 한빛원자력발전소의 설계치 취배수량 적용 실험(Case X1)과 실시간 평균 취배수량 적용 실험(Case X2)의 시나리오 실험 결과이며, 배수구로부터 초과수온 1, 2, 3 °C의 최장 직선거리를 최대 확산거리로, 초과수온이 1, 2, 3 °C보다 높은 면적을 각각 최대 확산면적으로 정의하였다. Case X1과 X2의 표층 초과수온 1 °C 최대 확산 거리는 각각 북동쪽으로 15.95, 14.12 km, 남서쪽으로 7.32, 3.45 km이며, 최대확산 면적은 각각 104.28, 39.91 km<sup>2</sup>으로 나타났다(표 23).

표 23. 최대확산거리 및 최대 확산범위

실험안	층	초과수온 (°C)	확산거리 (km)		확산면적 (km <sup>2</sup> )
			북동측	남서측	
Case X1	표층	1	15.95	7.31	104.28
		2	15.19	6.04	73.48
		3	14.00	4.83	51.44
	저층	1	15.86	7.15	76.76
		2	15.01	4.89	49.28
		3	13.92	2.73	28.99
Case X2	표층	1	14.12	3.45	39.91
		2	5.60	1.88	15.23
		3	4.25	1.70	8.70
	저층	1	14.12	2.75	25.99
		2	3.38	0.64	4.33
		3	2.93	0.64	2.67

※ 확산거리는 배수구로부터 직선거리임

## 제 4 장 냉·온배수 관리제도 개선 방안

### 제1절 냉·온배수 관리제도 현황

#### 1. 국내 관리제도 현황

현재 우리나라는 냉·온배수를 이용하는 발전시설 건설과 냉·온배수의 이용과 관련하여 일부 관련법에 따라 규율하고 있음.

- 발전회사는 건설단계에서 “환경영향평가법” 제22조에 따라 환경영향평가를 받도록 되어 있어 환경영향평가 단계에서 온배수 배출에 대한 관리가 이루어지나, 사후관리가 3년 내지 5년으로 제한되어 있는 한계가 있음.

- 이후, 이용단계에서 발전회사는 “공유수면관리법” 시행규칙에 정한 바에 따라 해수의 냉각수 사용에 대한 일정한 사용료를 납부하고 있음.

그러나 냉·온배수 관리를 목적으로 하는 법률 또는 제도가 마련되어 있지 않아 냉·온배수로 인한 환경문제 발생 방지 및 해결방안이 시급함.

- 현재 법률에는 냉·온배수에 대한 명확한 정의조항이 존재하지 않아서 이를 오염물질로 볼 수 있을지 이견이 있음.

- 해양환경에 유입되어 그 결과가 해양환경에 악영향을 유발할 가능성이 있는 경우”를 해양환경의 오염으로 규정하고 있는 유엔해양법협약의 규정을 따를 경우 냉·온배수가 해양환경에 악영향을 미치는지 여부에 대한 과학적 판단이 요구됨.

- 냉·온배수와 관련된 현행 법률로 “해양환경관리법”, “수질 및 수생태계 관리에 관한 법률”, “해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률”, “신에너지·재생에너지 개발·이용·보급 촉진법”, “물의 재활용 촉진 및 지원에 관한 법률”을 들 수 있으나 어떠한 법도 냉·온배수의 관리에 대하여 구체적인 규정이 없음.

- 대법원은 온배수의 배출로 인한 해수의 상승이 해양환경의 변화에 악영향을 줄 수 있다는 점을 인정하고 있으며, 온배수의 배출은 사람의 활동에 의하여 자연환경에 영향을 주는 수질오염 또는 해양오염으로서 환경오염에 해당한다고 보고 있음.

#### 2. 주요 국가 관리제도 현황

##### 가. 미국

- 미국은 연방수질오염관리법 제402절에 “국가오염배출감소제도(National Pollutant Discharge Elimination System)”를 규정하여 배출물질의 배출 자체보다 확산되는 구역에 대한 규제를 실시하고 있으며, 각 주는 연방법에 근거하여 환경에 따라 서로 다른 기준의 규제를 하고 있음.

- 미국은 온배수 사업자가 환경영향평가를 통하여 허가받은 수역을 혼합수역으로 확정하고 혼합수역 이내의 경우 수온의 상승폭 상한선을 규제하는 반면, 혼합수역 밖의 경우 최대 수온을 정하여 규제하고 있음.

- 그러나 대부분 주의 경우 해당 사업자가 해양생물에 영향이 없다는 것을 증명하지 못할 경우 혼합수역에서 0.8℃를 넘지 못하도록 하고 있음.

- 각주는 물의 수질에 따라 다른 기준을 규정하고 있으며, 혼합수역의 크기를 정함에 있어 해당수역의 물리학적, 생물학적, 화학적 특징, 해양생물에 영향을 줄 수 있는 물질 등 해양수역에 대한 현재와 미래의 영향을 모두 고려함.

#### 나. 일본

- 일본은 온배수와 관련하여 “환경영향평가법”과 “전기사업법”에 근거하여 발전소 가동 이후 온배수 이용을 관리하고 있으며, 사전환경영향평가와 동일한 방법으로 1년간 사후조사를 실시하도록 하고 지자체와 협의하여 발전소 가동 이후 3년간 모니터링 조사를 규정하고 있음.
- 일본은 원자력 발전소의 온배수로 인한 환경문제가 발생하기 시작하자 온배수 문제 해결을 위한 과학적 입증이 필요함에 따라 온배수에 의한 해양생태계를 예측하고 피해를 규명하기 위한 전문기관을 설립함.
- 1975년 설립된 “사단법인 해양생물환경연구소”는 온배수 영향 종합조사, 냉각수 취수 및 온배수 배출에 대한 환경영향평가 매뉴얼, 온배수가 해조류에 미치는 영향조사, 열오염 등 복합 영향 조사, 대량취수에 따른 어업자원 영향검토 등 다양한 연구 사업을 실시하였음.

#### 다. 프랑스

- 프랑스는 담수를 냉각수로 사용하는 경우 수온 상승폭과 미국과 달리 배출 최고수온을 정하여 관리하고 있으며, 해수를 냉각수로 사용하는 경우 지역적 특성에 따라 각기 다른 수준으로 규정하고 있음.
- 또한 발전소의 용량에 따라 초당 배출 수량을 규제하고 있으며, 온배수의 최대 허용수온은 6월에서 10월까지 35℃, 그리고 11월부터 5월까지는 30℃이하로 규제하고 있음.

#### 라. 중국

- 중국은 냉각수의 사용량을 점차 제한하고 있기 때문에 관류냉각방식과 함께 보조수단으로 소형 냉각탑을 운영하는 방식으로 냉각수 사용량을 줄이고 있음
- 또한 중국은 발전소의 폐열을 이용한 탈염시설과 해수 담수화 시설을 가지고 있으며, 생산한 담수를 보조냉각수로 사용하고 있음.

## 제2절 현행 국내 냉·온배수 관리제도의 문제점

### 1. 냉·온배수 관리방안 부재

냉·온배수와 관련성 있는 여러 법률이 존재하나, 온배수의 경우 “수질 및 수생태계 보전에 관한 법률” 시행규칙에 오염물질 배출수의 온도를 40℃로 규정한 것 이외 관련 규정이 없으며 이 또한 온배수 배출기준이 될 수 없으며 냉배수의 경우 이러한 규정조차 존재하지 않음.

- 전력회사가 자체적으로 온배수에 대한 관리방안으로 배출수의 수온의 상승폭을 7℃ 이내로 정하고 있지만 계절 등의 환경요인으로 인한 배출수의 수온을 감안하지 못하고 있으며, 이는 냉배수의 경우도 마찬가지임.

- 냉·온배수의 영향 조사의 표준화, 배출기준, 환경영향평가, 부담금 등에 관한 관리 방안이 부재하여 냉·온배수에 대한 관리에 흠결이 존재.

해양수산부는 물론 환경부 산하 30여개의 환경관리위원회에도 냉·온배수를 전문적으로 다루는 위원회가 없음.

- 냉·온배수에 대한 관심은 냉·온배수 배출 지역의 어민들에 의한 민원 제기와 지속적인 갈등 유발에서 비롯되었으나, 정부 주도의 부처간 협의체가 구성되어 있지 않아 단편적인 해결에 그치고 있음.

## 2. 냉·온배수 오염원 정의 부재

냉·온배수의 오염원에 대한 정의가 부족하여 냉·온배수를 어떻게 취급해야할지 법적 지위를 정해야 하는 문제가 있음.

- 물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률” 제2조 제1항은 온배수를 “발전소 온배수를 취급한 해수를 발전소의 발전과정에서 발생한 폐열을 흡수하는 냉각수로 사용하여 수온이 상승된 상태로 방출되는 배출수”로 정의하고 있으나, 온배수를 오염물질로 정의하기보다 폐수와 구분하여 활용대상으로 보기 위한 목적으로 좁게 정의하고 있음
- “해양환경관리법”은 해양오염을 “해양에 유입되거나 해양에서 발생하는 물질 또는 에너지로 인하여 해양환경에 해로운 결과를 미치거나 미칠 우려가 있는 상태”로 정의하고 있어 과학적 입증에 따라 온배수를 해양오염원으로 해석이 가능하나 동법의 오염물질의 정의를 폐기물 등으로 제한적으로 규정하고 있어 한계가 있음
- “수질 및 수생태계보전에 관한 법률”은 수질오염원으로 폐수, 수질오염물질, 특정수질유해물질을 규정하고 있으나 온배수가 이에 속하는지 명확하지 않음

## 3. 현황 조사 자료 및 신뢰성 부족

냉·온배수의 영향에 대한 조사는 수온의 변화에 대한 피상적인 조사에 그치고 있어, 냉·온배수가 실질적으로 해양생태계에 어떠한 부분에 영향을 주고 있는지에 대한 객관적 자료가 부재함.

- 수온 변화에 대한 조사 자료는 있으나 수온의 변화가 생물에 미치는 영향에 대한 조사 자료가 부족하여 수온 변화에 대한 반응을 측정하기 위한 객관적 기준이 부재함.
- 사업자가 작성한 피해영향평가 보고서는 정확한 생물검정을 한 사례가 없으며 추상적 영향 평가에 그치고 있음.

냉·온배수의 영향에 대한 평가를 사업자가 스스로 조사하여 발표하고 있어 조사 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 어려움.

- 현재 산업자원부 고시에 따라 전기사업자는 원자력 발전의 가동으로 인하여 주변 환경에 미치는 영향을 파악하기 위하여 환경조사를 실시하도록 하고 있음.
- 이해관계자의 입장에서 가해자인 사업자가 제시한 결과를 신뢰하기 어려운 점이 있으며, 실제 조사 자료가 영향의 인과관계를 밝히기보다 현황 파악에 그치고 있어 관련 대책 마련이 필요함.

# 제3절 냉·온배수 관리제도 개선 방안

## 1. 법·제도 정비

○ 냉·온배수의 배출과 관리 및 규제의 법적 근거 마련을 통하여 냉·온배수의 활용과 환경문제의 개선을 위한 제도 수립에 활용.

- “해양환경관리법” 제2조를 통하여 냉·온배수에 대한 새로운 정의규정을 마련하여 폐기물이 아닌 미활용에너지로 분류하여 냉·온배수의 배출을 위한 법적 근거 마련 필요
- 다만 배출될 수 있는 기준을 함께 제시하여 동시에 일정한 과학적 증명을 통하여 기준 미만의 냉·온배수는 오염물질로 분류하여 냉·온배수의 관리와 규제에 관한 법적 근거를 마련해야 함.

- 냉·온배수 배출 사업자에 대한 부담금 부과를 위한 법적 근거를 마련하고 부담금의 활용 목적을 냉·온배수 배출 해역의 환경개선으로 한정
  - 냉·온배수 부담금은 해양환경 및 생태계 보전과 개선 사업에 활용되어야 하며, 부담금 제도를 통하여 사업자가 친환경적 사후관리를 위한 시설투자 등의 제도개선에 참여할 수 있도록 유인, 이는 어민들에 대한 피해보상금과는 구별이 필요함
- 냉·온배수는 중국적으로 해양환경에 영향을 준다는 점에서 관리 및 규제 대상이 되어야 함.
  - 냉·온배수가 해양환경과 해양생물 및 해양생태계에 영향을 주고 있다는 사실 자체는 명확한 바 영향정도에 대한 과학적 입증을 통하여 배출기준을 설정하고 이를 관리 및 규제할 필요가 있음

## 2. 해양환경개선 부담금 부과

- 해양생태계에 대한 지속적 훼손행위를 최소화하고 해양환경 이해관계자와의 갈등을 해소하기 위한 정책적 대안으로 사업자에게 일정한 부담금을 부과하고 이를 통해 해양환경을 개선하고 지역인과의 갈등해소 조치를 취하는 단계 접근 필요.
  - 부담금은 특정 공익사업과 관련하여 법률이 정하는 바에 따라 부과하는 조세 외의 금전지급 의무로써 부과대상과 특정 공익사업 간 밀접한 관련성이 요구됨.
  - 부담금 도입을 위해서는 효율성, 형평성, 사업자의 수용가능성, 최소의 행정비용을 고려하여 단순하고 명시적인 부담금 산정표준 및 부과요율의 선택이 필요하며, 부담금 수입은 사업자의 환경 친화적 개발방법의 고안으로 줄어들 수 있으므로 해양생태계 보전 또는 복원을 위해 우선 사용될 수 있도록 용도를 지정할 필요가 있음.
- 해양환경관리법의 적용범위에 냉·온배수를 포함시키는 경우 현행 해양환경개선부담금과 해양생태계보전협력금을 활용하거나 또는 냉·온배수 배출부담금 신설하는 방안 고려 가능.
  - 해양오염과 관련하여 현재 오염원 배출자에게 처리비용을 부담시키는 수질배출부과금, 해양생태계에 현저한 영향을 미치거나 해양생물다양성의 감소를 초래하는 사업자에게 부과하는 해양생태계보전협력금, 해양환경에 현저한 영향을 미치는 행위에 대하여 부과하는 해양환경개선 부담금이 있음.
  - 냉·온배수는 해양환경 및 생태계에 영향을 미치고 있으므로 해양환경개선비용을 활용하는 방안이 가능하나, 이를 위해서는 해양환경관리법상 냉·온배수를 오염수 또는 오염물질로 규정하고 냉·온배수의 배출기준을 정해야 함.
  - 냉·온배수를 배출하는 발전소를 환경영향평가법 제22조에 따라 영향평가대상사업 중 공유수면 내에서 이루어지는 개발사업으로 포함시킬 경우 해양생태계보전협력금 부과 가능.
  - 냉·온배수를 통해 전력을 생산하여 전력을 판매한다는 점에서 발전사업자에 대한 수익자부담원칙에 따라 수익의 일부를 온배수배출부과금으로 부과하는 규정을 신설하는 방안 가능.
- 해수의 사용을 위한 공유수면 점용·사용료와 해수의 사용으로 발생하는 결과에 대한 부과금의 구분 필요.
  - 현재 냉·온배수를 배출하는 발전소는 해수 사용을 위하여 공유수면 점용·사용허가를 받고 사용하고 있으며 이에 대하여 취수한 해수량, 해수관거 면적 및 점용·사용기간에 따라 공유수면 점용·사용료를 납부하고 있음.
  - 따라서 공유수면 점용·사용료의 납부 이외에 추가적인 부담금의 부과는 발전소 사업자에

이중부담의 문제가 제기될 수 있음.

- 그러나 공유수면 점용·사용료는 해수의 이용에 대한 대가의 지불인 반면 해양환경개선 부담금은 해수를 이용하여 발생하는 냉·온배수의 배출에 대한 일종의 책임부담이므로 중복되지 않음.

### 3. 냉·온배수 전문연구기관 설립

○ 일본은 냉·온배수의 과학적 증명을 위한 객관적 자료의 축적의 필요성을 인지하고 냉·온배수의 문제 발생과 동시에 냉·온배수 전문연구기관을 설립하여 운영하고 있음.

- 일본의 냉·온배수 전문연구기관인 해양생물환경연구소는 온배수의 생태학적 영향평가를 주요 임무로 수행하고 있으며 최근 발전소의 취수 및 배수에 관한 친환경적 기술 검토와 온배수에 의한 해양생물과 환경 전반에 걸친 영향을 규명, 그리고 생태계의 영향변화 예측 시스템의 구축 연구로 임무를 확대해가고 있음

○ 현재 우리나라는 냉·온배수가 해양환경 및 생태계에 미치는 영향의 조사를 전기발전 사업자가 주도하고 있으며, 객관적 조사방법 및 피해조사에 관한 지침이 없어 조사 결과의 신뢰성을 얻지 못하고 있음.

- 온배수의 영향조사를 사업자가 전문기관(대학 및 연구소)의 연구 용역 발주를 통하여 실시하고 있어 이들 전문기관의 용역 수주 경쟁으로 인하여 조사결과에 대한 객관성을 지탱하지 못하고 있음.

- 전기발전사업자와 이해관계가 없는 독립된 주체에 의한 냉·온배수의 영향조사가 필요하므로 투명하고 공정하게 조사 및 연구를 수행할 수 있도록 하기 위하여 해양수산부 산하 또는 독립재단법인 형태의 냉·온배수 전문연구기관의 설립 및 운영에 대한 수요가 증가하고 있음.

○ 냉·온배수 전문연구기관은 냉·온배수 영향의 연구조사를 위한 매뉴얼 및 기준 마련, 다각적 관점에서의 냉·온배수 영향의 실증조사, 냉·온배수로 인하여 파괴된 해양환경 및 해양생태계의 복원 연구를 주요 임무로 수행할 수 있음.

- 구체적으로 냉·온배수 영향 종합조사, 환경영향평가 매뉴얼, 냉온열 오염 등의 복합영향 조사, 냉·온배수의 이용 및 활용방안 연구, 발전소 취배수구 주변 어업영향 조사 등이 필요 조사 내용으로 제시되고 있음.

○ 상술한 주요 임무 수행을 위하여 냉·온배수 전문연구기관의 적절한 조직 및 예산 수립 필요 .

- (조직) 냉·온배수 정책 및 법 제도 개선과 자료 관리를 위한 연구기획부서, 해양물리평가 및 온배수 확산역 모델링과 저감방안 연구를 위한 해양물리연구, 해양수질 및 해양퇴적물 평가를 위한 해양화학연구, 영향해역 주변의 해양생물 영향평가를 위한 해양생물연구, 해양생태계 복원 및 저감방안과 냉·온배수 이용 수산물 양식 연구를 위한 온배수이용연구, 그리고 행정지원 부서가 필요하며 약 35명 정도 규모의 인력 예상.

- (예산) 운영예산은 온배수 배출 부담금의 일부로 충당하며, 초기 시설확보와 냉·온배수 영향에 대한 표준화 연구가 완료되기까지 약 5년 정도 초기투자 비용과 초기투자 비용을 제외하고 연간 40억 원 정도의 예산 소요예상.

### 4. 냉·온배수 관리 협의체

○ 냉·온배수 관리방안은 갈등조정, 신뢰구축, 상호부조 측면에 다양한 역할 수행이 병행되어

야 하는바, 관련 부처와 사업자의 적극적인 참여와 협조가 필요하므로 부처 실무자 위주의 냉·온배수 관리방안 협의체 구성이 필요.

- (조직) 해양수산부, 산업통상자원부, 환경부, 미래창조과학부의 실무자, 가스생산 및 발전사업자의 대표, 냉·온배수 전문가 10명 내외로 구성.

- (기능) 발전소 주변 해양환경 조사지침과 냉·온배수 배출기준에 관한 냉·온배수 관리방안의 법제화 추진, 냉·온배수 영향의 생물학적 영향표준화 기준 정립과 냉·온배수의 활용방안, 그리고 해양생태계 영향저감 및 복원 계획 수립을 위한 관리방안의 효율적인 추진을 위한 대책 수립, 냉·온배수 전문연구기관 설립협의, 예산확보 등의 기능을 가짐.

#### 5. 냉·온배수 효율적 활용 방안

○ 냉·온배수가 가진 열에너지를 재활용하여 가스생산기지 및 발전소 지역 농어민의 생활 향상에 기여할 수 있는 냉·온배수 활용방안 강구 필요.

- 냉·온배수는 인근 해역과 수온의 차이로 인한 해양환경 및 해양생물에 대한 영향이 있을 뿐, 유해성분이 함유되지 않은 순수한 바닷물이므로 인위적인 수온을 유지해야 하는 특정 수산양식에 이용 가능.

- 겨울철의 저수온기에 어류나 무척추동물은 양식하기 위하여 수온을 인위적으로 높여주어야 하고, 여름철에는 낮추어 주어야 하는데, 이에 별도의 에너지를 소모하지 않고 냉·온배수를 활용 가능.

- 다만, 계절의 변화에 따른 해양환경의 변동을 세밀하게 파악하고 특정 어류, 패류, 또는 해조류에 적절한 양식 환경을 조성하는 선결조건을 잘 갖추어야 함.

○ 온배수의 확산해역에 바다목장을 조성하여 이를 관광 자원으로 활용하는 해양생태공원이 온배수의 활용방안으로 언급되고 있으나, 이는 인위적 생태환경을 조성하는 것이므로 다른 해역에 미치는 영향에 대한 안정성 검토가 면밀히 이루어진 이후 시행되어야 할 것임.

#### 6. 해양환경영향평가 및 사후 관리

○ 현재 환경영향평가법에 따라 냉·온배수를 사용하는 발전 사업자에 대하여 시설 건설 단계에서 환경영향평가를 실시하도록 하여 냉·온배수에 대한 사전관리가 가능함.

- 일정량 규모 이상의 전기를 생산하는 발전 사업자는 시설 건설 단계에서 환경영향평가를 실시하여야 하는데 환경영향평가의 대상 사업은 모두 냉·온배수를 사용하는 시설에 해당하여 환경영향평가를 통한 냉·온배수의 사전관리 가능.

- 전원개발촉진법 제2조 제2호와 전기사업법 제2조 제16호에 해당하는 설비를 설치하는 경우 에너지 개발사업에 해당하여 환경영향평가법 제22조에 따라 환경영향평가를 실시해야 함.

- 이는 발전시설의 건설 단계에서 냉·온배수가 인근 해역의 해양환경에 미치는 영향을 평가하는 것으로서 사전환경영향평가에 해당.

○ 환경영향평가법 제36조에 따라 냉·온배수를 배출하는 발전 사업자에 대하여 사후환경영향평가를 실시하도록 하여 냉·온배수 배출에 대한 사후관리 수행이 가능함.

- 환경영향평가법 제36조, 환경영향평가법 시행규칙 제19조 별표 1의 에너지 개발사업에 해당하는 경우 사업 착공 시부터 사업 준공 후 5년까지 사후환경영향평가를 실시하고, 가스사업자의 경우 사업 착공 시부터 사업 준공 후 3년까지 사후환경영향평가를 실시하여야 함.

- 사후환경영향평가를 통하여 사업 건설 단계에서 실시한 환경영향평가의 예측과 실제 관측



결과의 비교를 통하여 추가적인 환경영향 저감방안 등의 조치를 취할 수 있음.

○ 해양환경관리법상 해역이용협의제도와 해양환경영향평가 규정에 따라 해양환경영향조사를 실시하여 냉·온배수 배출에 대한 지속적 관리 실시.

- 환경영향평가법상 사후환경영향평가는 기간이 정해져 있어 기간이 종료된 경우 더 이상의 관리가 어려운 반면, 해양환경관리법상 해역이용협의제도와 해양환경영향평가는 지속적인 관리가 가능.

- 해양환경관리법 제84와 제85조는 공유수면 관리 및 매립에 관한 법률 제8조에 따라 공유수면 점용·사용허가를 받은 사업자에 대하여 해역이용의 적정성 및 해양환경에 미치는 영향에 관하여 해역이용영향평가를 실시하여 협의하도록 규정하고 있음.

- 냉·온배수를 배출하는 사업자는 동법 규정에 따라 사후환경영향을 모니터링 하기 위하여 냉·온배수가 해양환경에 미치는 영향에 대하여 해양환경영향조사를 실시하여야 함.

- 또한 냉·온배수를 오염물질로 지정하게 된다면 일정 규모 이상의 냉·온배수를 배출할 경우 해양오염영향조사를 실시하여야 할 것임.

## 제 5 장 기타 냉·온배수 시설 관련 기술

### 제1절 냉·온배수 수중 취·배수 효과 분석

#### 1. 냉·온배수의 수중 취·배수구 감시망 구축 세부 기술

##### 가. 수중 취·배수구 위협 요인 및 현황

##### (1) 수중 생물 위협 요소

- 원전 방과제 부근에서의 조업 선박 혹은 주민에 의한 목시 관측을 불규칙하게 접수하여 대처.
- 울진 원전의 경우 취수구 유입구 200 m 전방에 그물 차단막을 설치하여 생물을 제거하고 있음.
- 생물 유입 탐지를 위한 사전 예보망 미구축 상태.

##### (2) 인위적 위협(수중 테러 미 침투) 요소

- 원전에 대한 방어는 육상으로부터의 위협 요소에 초점을 두고 육군이 지원하는 체계로 운영됨.
- 수중 세력으로부터의 인위적 위협에 대한 사전 감시 체계는 현재 미구축 상태임.

##### 나. 수중 취·배수구 위협 요소 분석

- 총 23기의 원전이 운영되고 있으나 원전의 안전 요소 가운데 하나인 수중 취·배수구에 대한 안전 확보를 위한 수중 감시망은 미비함.
- 후쿠시마 원전 이후 해양 냉각수 유입은 원전의 안전과 직결되는 중요한 요소이나 국내 원전의 경우 인위적인 감시망 운영을 통해 취수구에 유입되는 해양생물 제거 방법만을 사용하는 수준임.
- 원전 구역의 해양 취·배수구 안전을 위한 중요 위협 요소 분류 및 특성은 아래 표 24와 같음.

표 24. 취·배수구 위협 요소 및 특성

위협 요소	요소 분류	피해 형태	현 상황
해양생물	생물 유입에 따른 발전소 피해 (멸치, 해파리, 새우떼 등)	냉각수 유입 성능 저하에 따른 발전소 효율 저감	인위적인 위협 탐지 및 제거
인위적 요소	적성국에 의한 인위적인 수중 공격 및 테러 (수중침투 및 폭파)	취·배수구 기능 마비로 발전소 기능 정지	수중 감시 체계 전무

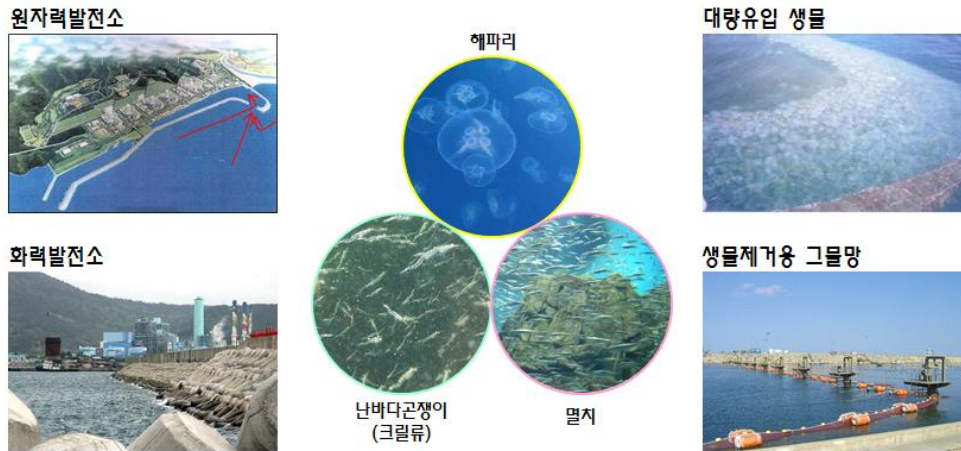


그림 17. 원전 취수구에 유입되는 해양생물 요소



그림 18. 원전 취·배수구에 접근하는 인위적 요소

다. 수중 취·배수구 감시망 구축 세부 기술

(1) 광역 감시 기술: 4단계 감시망 구축 개념

- 1단계: 취·배수구 외해 접근 인위적 요소(수중 물체) 감시망으로 수동 음향탐 지 체계로 구성
- 2단계 : 취·배수구 인접 구역의 인위적 요소(수중 물체) 감시망으로 자기·음향 체계로 구성
- 3단계 : 취·배수구 유입 방파제 구역의 인위적 요소(수중 침투자) 및 해양생물 유입 감시망으로 능동 음향탐지 체계로 구성
- 4단계 : 취·배수구 방파제 구역의 인접 구역의 인위적 요소(수중 침투자) 감시망으로 광학 체계로 구성

(2) 집중 감시 기술 : 2단계 감시망 구축 개념

- 1단계 : 취·배수구 유입 방파제 구역의 인위적 요소(수중 침투자) 및 해양생물 유입 감시망으로 능동 음향탐지 체계로 구성
- 2단계 : 취·배수구 방파제 구역의 인접 구역의 인위적 요소(수중 침투자) 감시망으로 광학 체계로 구성

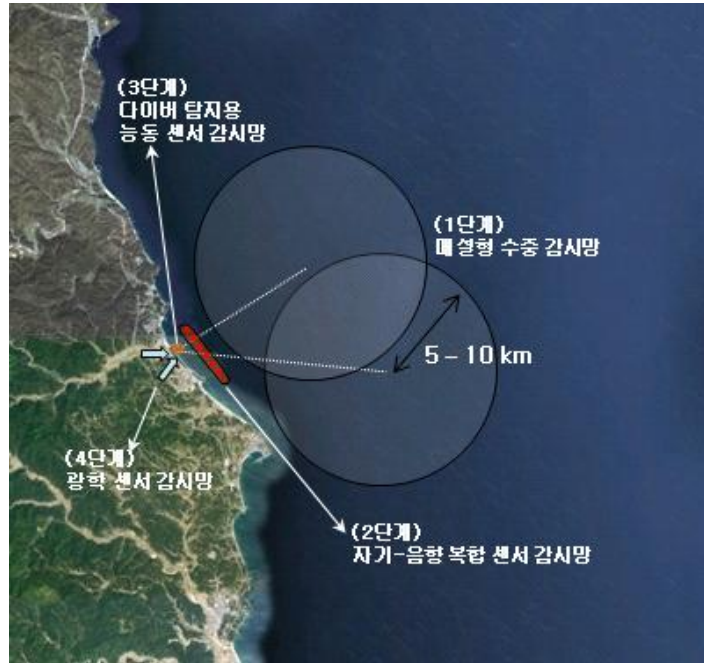


그림 19. 원전 취·배수구 외해 및 인접 구역의 감시망 구축 개념도

라. 수중 취·배수구 감시망 구축

- 음향 탐지 시스템 구축 및 운용은 크게 하드웨어와 소프트웨어 구성
- 소프트웨어는 체계 구축 요소
  - ① 원전 설치 해역의 해양환경(대기, 수중) 특성 파악
  - ② 원전 설치 해역의 지형 및 지질 특성 파악
  - ③ 위협 표적(수중 다이버, 수중 생물) 음향탐지 요인 특성 파악
  - ④ 위협 표적(수중 다이버, 수중 생물)의 음향탐지 알고리즘 구축
  - ⑤ 설치 시스템 최적화 구축
- 하드웨어는 시스템 체계 요소
  - ① 수중의 능·수동 센서부 매설
  - ② 해저 케이블 매설
  - ③ 육상집 구성
  - ④ 실시간 감시 육상 센터 구축

마. 수중 취·배수구 감시망 구축 감시 범위

(1) 광역 감시 기술

- 1 단계 외해 : 매설형 수동 탐지 센서<sup>1)</sup>, 방파제 바깥 5 km 설치  
(센서 반경 5 ~ 10 Km 감시망 구축)
- 2 단계 방파제 인접 외해 : 자기-음향 복합 센서<sup>2)</sup> 및 생물탐지 능동 센서  
(센서 반경 0.5 ~ 5 km)

1) Underground passive line-array sensor system

2) Magnetic and passive sensor system

- 3 단계 방파제 입구 : 다이버 탐지용 능동 센서<sup>3)</sup> 및 생물탐지 능동 센서  
(방파제 주변 0 ~ 750 m)
- 4 단계 방파제 부근 : 전자광학 센서<sup>4)</sup>

(2) 집중 감시 기술

- 3 단계 방파제 입구 : 다이버 탐지용 능동 센서 및 생물탐지 능동 센서  
(방파제 주변 0 ~ 750 m)
- 4 단계 방파제 부근 : 전자광학 센서

표 25. 감시체계 구성 시스템

구 성		광역 감시체계	집중 감시체계
단 계		4단계	2단계
장·단점		· 장점 : 탐지 영역 확대 및 장기적 운용성 · 단점 : 설치 비용 증가	· 장점 : 설치 비용 감소 · 단점 : 탐지 영역 축소 및 단기적 운용성
체계 구성 시스템	1단계: 선배열 수동 음향센서	2축 (각 세트 400 m)	-
	2단계: 자기 - 음향 복합센서	10km X 2축	10km X 2축
	3단계: 다이버 탐지 능동센서	2대	2대
	2-3단계: 생물탐지 능동센서	4대	4대
	4단계: 전자광학센서	2대	2대

2. 수중 취·배수구의 통합감시 및 운영기술 개발

- 음향 및 광학 조기 경보 시스템 구축 (Acoustic/Optic Early Warning System)
- 4단계 혹은 2단계 감시망 구축을 통한 인위적 요소(수중침투자 등) 및 해양생물 유입 감시 체계 구축
- 수중 표적 혹은 생물 표적에 대한 탐지 효과도 분석
- 시스템 설치안 분석을 통한 최적 배치안 도출
- 육상 감시 통합 체계와 연동 체계 구축
- 인접 해군 혹은 육군 세력과 원전 자체 보안팀과 실시간 자료 공유 및 통합 체계 구축을 통한 대응 체계 구축
- 통합 시스템 시범 운영 후 (가칭)원전 보안팀에서 운영 이관
- 통합 시스템 유지 관리는 전문 업체에서 실시

3) Diver detection active sensor system  
4) Electronic visible sensor system

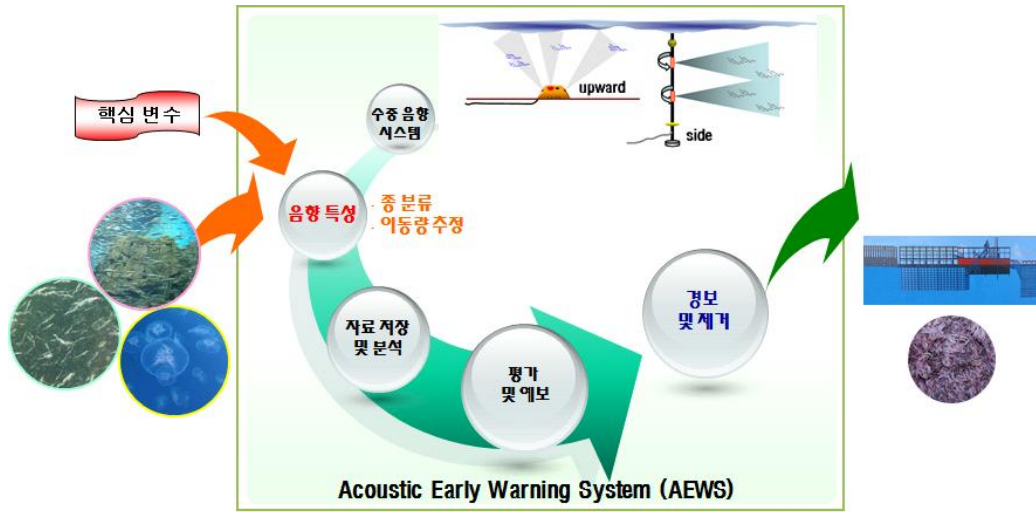


그림 20. 해양생물 실시간 통합 감시 체계 구축 개념안

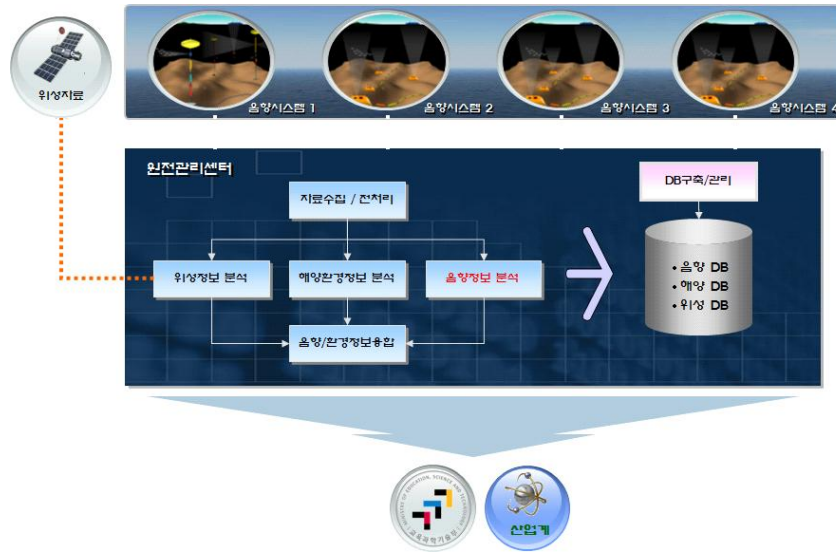


그림 21. 원전 취·배수구 통합 감시체계의 전체 흐름도

## 제 6 장 연구체계 정립을 위한 예비연구 수행

### 제1절 조사선 및 표층뜯개를 활용한 공간분포 조사

#### 1. 연구개요

냉·온배수의 해양환경 영향 진단과 국가차원의 대응관리 기술 확립을 위한 장기전략 수립을 위해 주요배출 시설에 대한 예비조사를 실시하였다.

원자력발전소 온배수 배출로 인한 주변 해양의 영향은 주로 어업활동에 대한 손실평가와 관련된 조사가 수행되어져 왔다. 그러나 최종 결과에 따른 어민의 이익 제기와 민원이 지속되었는데 이는 조사방법의 표준화가 이루어지지 않아 담당 연구자의 결과에 대한 객관성을 뒷받침할 근거가 부족했기 때문이다. 이에 따라 이 등(2007)은 온배수 영향조사 과정상 문제점을 평가하고 그 대안으로서 조사 표준 지침을 제시한 바 있다. 그들의 연구에 따르면 온배수 배출해역에서 시간에 따른 온배수에 의한 수온 분포의 변화를 정량적으로 파악하기 위해서는 관측과 온배수 확산 수치모델링의 상호 보완적인 조사가 병행되어야 한다. 현장관측의 경우는 원자력발전소 인근 해역의 모든 자연적 열원의 영향을 고려한 열수지 모형의 개념에 근거한 조사가 중요하다. 수온 변화에 대한 자연적 열원과 인위적 열원의 영향을 각각 분리하는 것이 필요하지만 (Yanagi et al., 2005), 이 또한 쉽지 않은 부분이다.

온배수의 영향을 파악하기 위해서는 수온분포와 해수유동에 대한 연구가 선행되어야 하는데, 과거 온배수 영향을 파악하기 위한 물리적 특성 조사 방법에서는 일부 문제점들이 나타나고 있다. 수온 조사 방법에서는 특히 정점 조사시 조사영역이 제한적이고, 기상과 조석주기에 따라 동시적이고, 반복적인 관측이 어려웠다. 해수 유동조사에서도 조사 영역이 제한적이라는 문제가 있었고, 부표나 수층별 해수유동 관측이 어려웠다.

본 연구에서는 온배수 배출해역의 기존 관측 조사에 대한 문제점을 조사하기 위해 물리적 특성에 대한 정밀 조사를 수행하였다. 고정부표를 이용하여 연속관측을 통해 시간에 따른 영향을 파악하였고, 조석주기에 따른 해수의 흐름변화가 나타나는 영역을 조사영역으로 구성하여 공간적 분포변화를 파악하였다. 또한, 온배수 배출수의 확산과 이동에 따른 주변해역의 영향을 파악하기 위해 표층 뜯개를 이용한 표층해류 관측을 수행하였다.

#### 2. 자료 및 방법

##### 가. 온배수 배출역의 수온/유속 구조 시계열 관측

온배수 배출수의 영향을 확인하기 위해 온배수 배수구 인근 해역에 고정부표를 설치하여, 해수의 수온과 해수유동에 대한 연속관측을 실시하였다. 온배수 배수구 인근 해역에 1대의 해양부이를 계류하였으며 (그림 22), 해양부이에는 해류계(Recording Current Meter, RCM)와 자기저장 수온센서(Temperature Gauge, RBR)가 설치되었다 (그림 23). 해류계는 해양부이 아래 수면하 2m에 장착되었다. 동계시기 관측 자료는 3월 30일부터 4월 17일까지 계류한 후 획득되었고, 하계시기 관측 자료는 9월 5일부터 10월 16일까지 약 40일정도 계류한 후 획득되었다. 동계시기에는 표층을 포함하여 수심 1m, 2m 4m에 각각 수온센서를 설치하여 총 4개 수심에서 층별 수온자료를 획득하였다. 하계에는 표층에만 수온센서를 설치하였다.

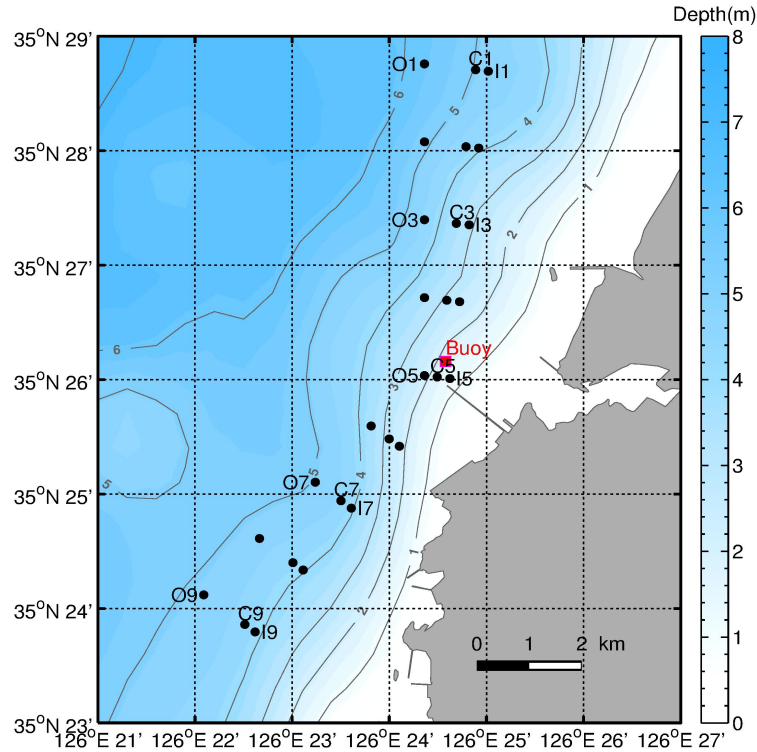


그림 22. CTD 공간 분포조사 정점도 (Black dot)와 부이계류 정점도(red dot)



그림 23. 온배수 배수구 인근에 계류된 해양부이의 모습. 부이 하단에 해류계 장착됨.

#### 나. 온배수의 주변해역 이동·확산 추적 및 공간분포 조사

온배수의 이동과 확산을 추적하기 위해 온배수 배수구 주변해역에 대한 수온의 공간분포 조사를 실시하였다. 수온특성의 공간분포 정밀조사는 동계시기에 초점을 맞추었다. 동계 표층 수온의 공간분포조사는 조사선을 이용하여 2017년 3월 28일과 30일에 이루어졌다 (그림 22). 조사영역은 기존 연구결과와 더불어 조류에 의한 해수유동을 고려하여, 온배수 배수구를 중심으로 배출수가 영향을 미칠 가능성이 있는 최대 영역으로 구성하였다.

수온자료를 얻기 위해 자기저장 수온센서 (RBR) 와 SBE 19plus V2 CTD 관측을 수행하였다. 조사선의 측면에 파이프를 연결하여 표층과 수면하 수심 0.5m, 1m 지점에 각각 수온센서를 설치한 후 선박이 이동하는 동안 관측영역에 대한 시공간 자료를 획득하였다. CTD는 고정점을 선정한 후 조석 주기를 고려하여 왕복관측을 수행하였다. 3월28일에는 낙조시기의 자료를 획득하기 위해 12:30~19:50 사이에 총 5회 관측을 수행했고, 3월 30일에는 창조시기의 자료를



획득하기 위해 08:20~13:50 사이에 총 4회 관측을 수행했다. 하계에는 CTD 관측은 수행하지 않았고, 선박에 수온센서를 장착하여 표층뜯개 실험을 위해 이동하면서 표층수온을 관측하였다.

온배수 배출수의 확산범위를 추적하기 위해, 표층뜯개에 수온계를 장착하여 수면하 1m 이내의 표층수온을 측정하였다 (그림 24). 총 8대의 뜯개를 투하했지만, 일부는 분실되어 5대의 자료만을 분석하였다. 표층뜯개에 장착된 수온센서는 총 3개로, 수면하 0.05m, 0.5m, 1m의 수온을 측정할 수 있다. 표층 뜯개는 2회에 걸쳐 관측이 되었는데, 1차시기는 3월 28일 15:55분에 투하해서 29일 13:54분에 수거하였고, 2차시기는 3월 30일 11:37분에 투하했지만 기상악화로 관측이 불가능한 것을 고려해 2시간 후인 13:47분에 회수하였다.



그림 24. 수온계를 장착한 표층뜯개의 측면도. 수온센서는 수면하 0.05m, 0.5m, 1m에 각각 장착됨.

### 3. 연구내용 및 결과

#### 가. 온배수 배출역의 수온/유속 구조 시계열 관측

그림 25와 26는 각각 동계와 하계시기에 온배수 배수구 인근에 설치된 해양부이에서 획득된 수층의 수온과 유속, 유향의 시계열분포를 나타낸 것이다. 동계시기에는 약 17일 정도 관측이 이루어졌다 (그림 25). 수온자료는 표층, 수면하 1m, 2m, 4m, 총 4개층으로 구분하여 관측하였다. 전반적으로, 해수 물성과 해수 유동의 변화는 조석주기에 따라 영향을 받고 있다. 수온 변화는 전체적으로 유사하나, 수온 값은 소조기때보다 대조기때가 약 2°C정도 높게 나타나고 있다. 동계 관측시기 동안의 평균유속은 약 33.8 cm/s이며, 대조기 동안은 약 25.3 cm/s, 소조기 동안은 약 32.0 cm/s의 유속값을 보였다.

하계시기에는 해양부이 회수가 지연되면서 약 40일정도 계류가 지속되었다 (그림 26). 그러나, 수온센서의 경우 기존 구성대로 약 15일간 자료가 획득되었고, 표층자료를 획득할 수 있었다. 이 시기에도 수온 값은 소조기때보다 대조기때가 약 2°C정도 높게 나타나고 있다. 관측시

기 동안의 평균유속은 약 23.4 cm/s로 동계시기보다는 약하게 나타났다. 그러나 대조기 시기에는 동계보다 높은 약 30.8 cm/s을 보였고, 소조기 시기에는 약 29.3 cm/s로 낮은 유속값을 보인다.

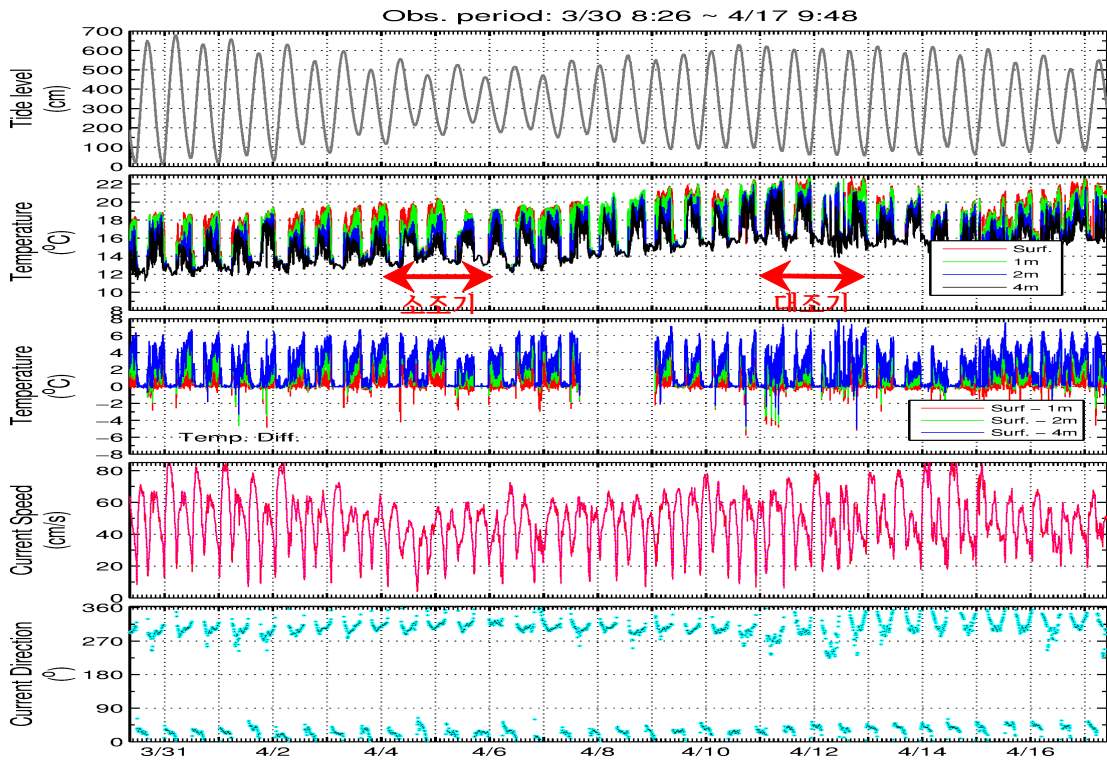


그림 25. 동계시기에 해양부이에서 획득된 수온과 해수 유동 자료의 시계열분포. 각각의 패널은 조석, 수온(표층, 1m, 2m, 4m), 수온차(표층-1m, 표층-2m, 표층-4m), 유속, 유향의 시계열 분포를 나타낸다.

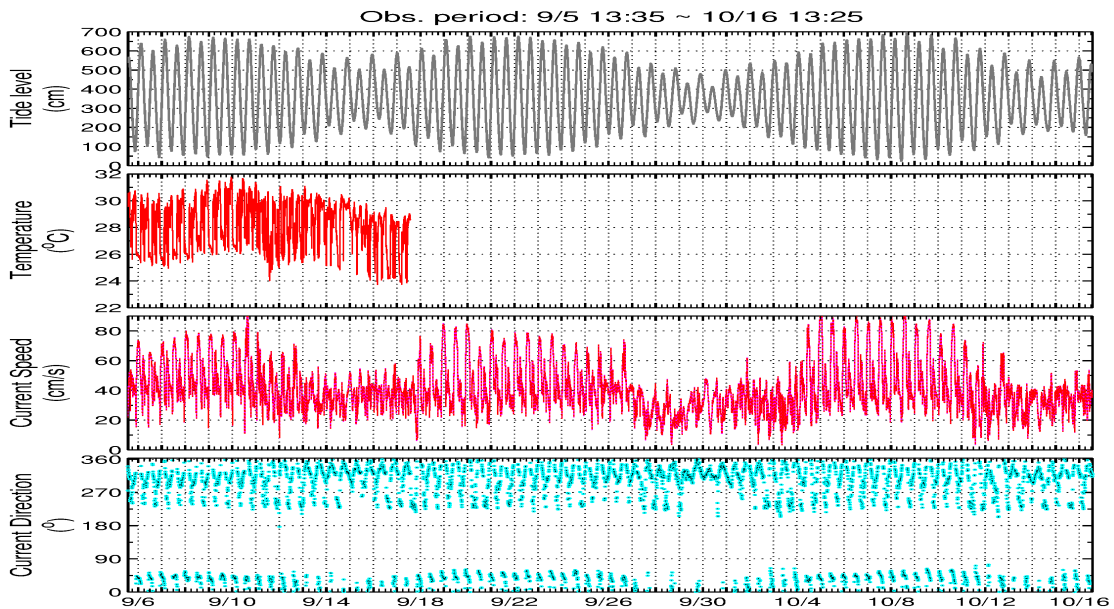


그림 26. 하계시기에 해양부이에서 획득된 수온과 해수 유동 자료의 시계열분포. 각각의 패널은 조석, 수온(표층), 유속, 유향의 시계열 분포를 나타낸다.

## 나. 온배수의 주변해역 이동·확산 추적 및 공간분포 조사

### (1) 조사선을 이용한 표층 수온의 공간 분포 조사

온배수의 확산 영향을 조사하기 위해 조사선을 이용하여 배수구 인근 해역에 대한 해수물성의 공간분포를 조사하였다.

그림 27은 동계시기에 CTD와 조사선에 장착한 수온센서를 가지고 관측한 수온 프로파일 중 배수구와 가장 인접한 I05와 O05정점에 대한 낙조시기와 창조시기의 관측 자료를 나타낸 것이다. 수온센서는 총 4개로 선상에서 펌프를 이용하여 표층수온을 측정했고, 선박 측면에 파이프를 설치하여 표층(<0.1m)과 0.5m, 1m의 수온을 측정하였다. CTD는 표층부터 1m까지의 프로파일 자료만을 제시했다.

그림 27에서 (1)과 (2)는 낙조실험 5차시기, (3)과 (4)는 창조실험 4차시기 관측 결과를 나타낸 것으로, 시기에 따른 수온차를 보여주고 있다. 수온센서에 의한 수온값과 CTD로 관측한 수온값이 조금 차이를 보이고 있어 검증과정이 필요하지만, 각 시기의 수온 특성을 확인할 수 있다.

정점 I05에서는 낙조시기(1)와 창조시기(3)에 표층 수온은 약 3℃정도 차이가 나며, 수심 1m 지점에서는 약 4℃정도 수온차를 보인다. 정점 O05에서는 낙조시기(2)와 창조시기(4)에 표층 수온은 약 1℃정도, 수심 1m 지점에서도 약 1℃정도 차이가 난다. 정점 I05는 O05보다 외해쪽으로 약 500m정도 떨어져 있는데, 표층 수온은 약 4℃, 수심 1m의 수온은 약 8℃정도 높은 값을 보이고 있다.

그림 28은 각 조사정점에서 조사선에 장착된 수온센서를 이용하여 관측한 표층과 0.5m, 표층과 1m의 수온차를 나타낸 것이다. 전체적으로 1℃ 이하의 수온차를 보이지만, 온배수 배수구에 인접한 정점 (I05, O05)에서는 약 5℃까지 수온차를 보이고 있다.

그림 29과 30은 선박을 이용해 관측한 동계 표층 수온의 공간 분포를 나타낸 것이다. 그림 29는 낙조시기의 실험을 위해 3월 28일에 수행된 총 5번의 실험 중 4번의 실험 결과를 나타낸 것으로, 2차실험은 16:00~17:05분, 3차실험은 16:58~18:02분, 4차실험은 17:58~18:53분, 5차실험은 18:46~19:52분에 이루어졌다. 표층수온과 바닥수온의 차를 통해 표층수온의 공간 변화를 살펴보았다. 여기서는 표층수온과 바닥수온의 차(4), 수심 1.5m 지점의 수온과 바닥수온의 차(5)를 나타냈다. 온배수 배수구에서 먼 지점에서의 수온차의 변화는 0.5℃이하로 그다지 크지 않다. 그러나, 배수구 인근 지점에서는 저층과 표층과의 수온차가 최대 5℃까지 나타나고 있다. 관측지점 전반에 걸친 수온차의 변화는 4차실험시기에 가장 크게 나타났다. 이 시기에는 온배수 배수구에서 먼 지점까지 1℃이상의 수온차를 보이고 있다.

그림 30은 창조시기의 실험을 위해 3월 30일에 수행된 총 4번의 실험 결과를 나타낸 것으로, 1차실험은 08:18~09:20분, 2차실험은 09:15~10:07분, 3차실험은 11:40~12:50분, 4차실험은 12:44~13:46분에 이루어졌다. 이 시기의 수온차는 온배수 배수구에서 먼 지점에서는 0.3℃이내로 큰 차이를 보이고 있지 않지만, 배수구 인근 지점에서는 약 4℃까지 차이를 보이고 있다. 그러나 1℃ 이상의 온도 편차를 보이는 해역이 낙조실험 시기보다 넓지 않다.

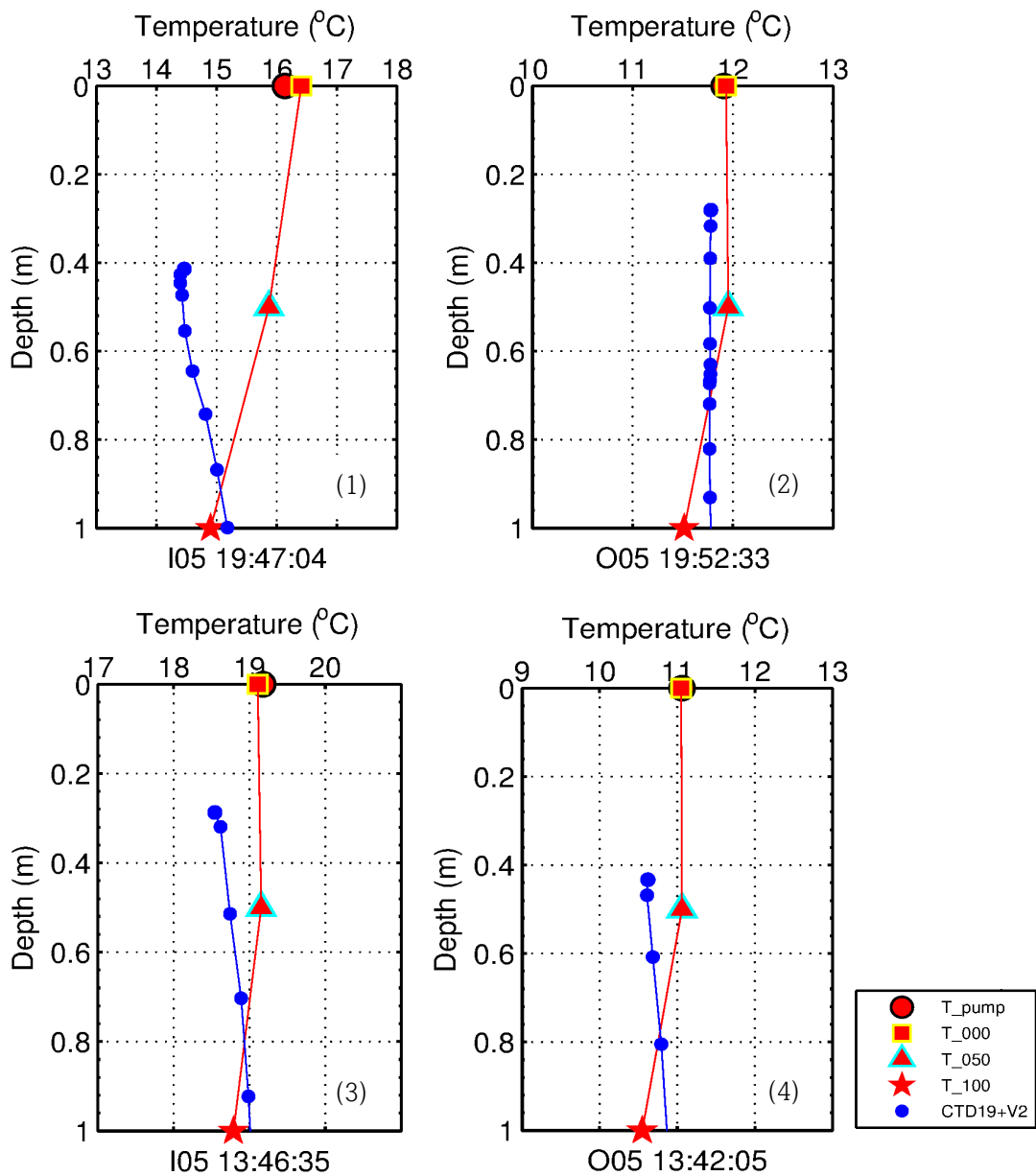


그림 27. 동계시기에 조사선을 이용하여 관측한 정점 I05와 O05의 수온자료. T\_pump (선상에서 수온센서를 이용하여 표층수의 수온측정). 수온센서를 선박 측면에 설치하여, 표층(< 0.1m), 0.5m, 1m의 수온 측정. CTD는 표층에서 바닥 까지 연직관측 수행. (1)과 (2)는 낙조시기 (3/28일), (3)과 (4)는 창조시기(3/30일)의 수온 프로파일.

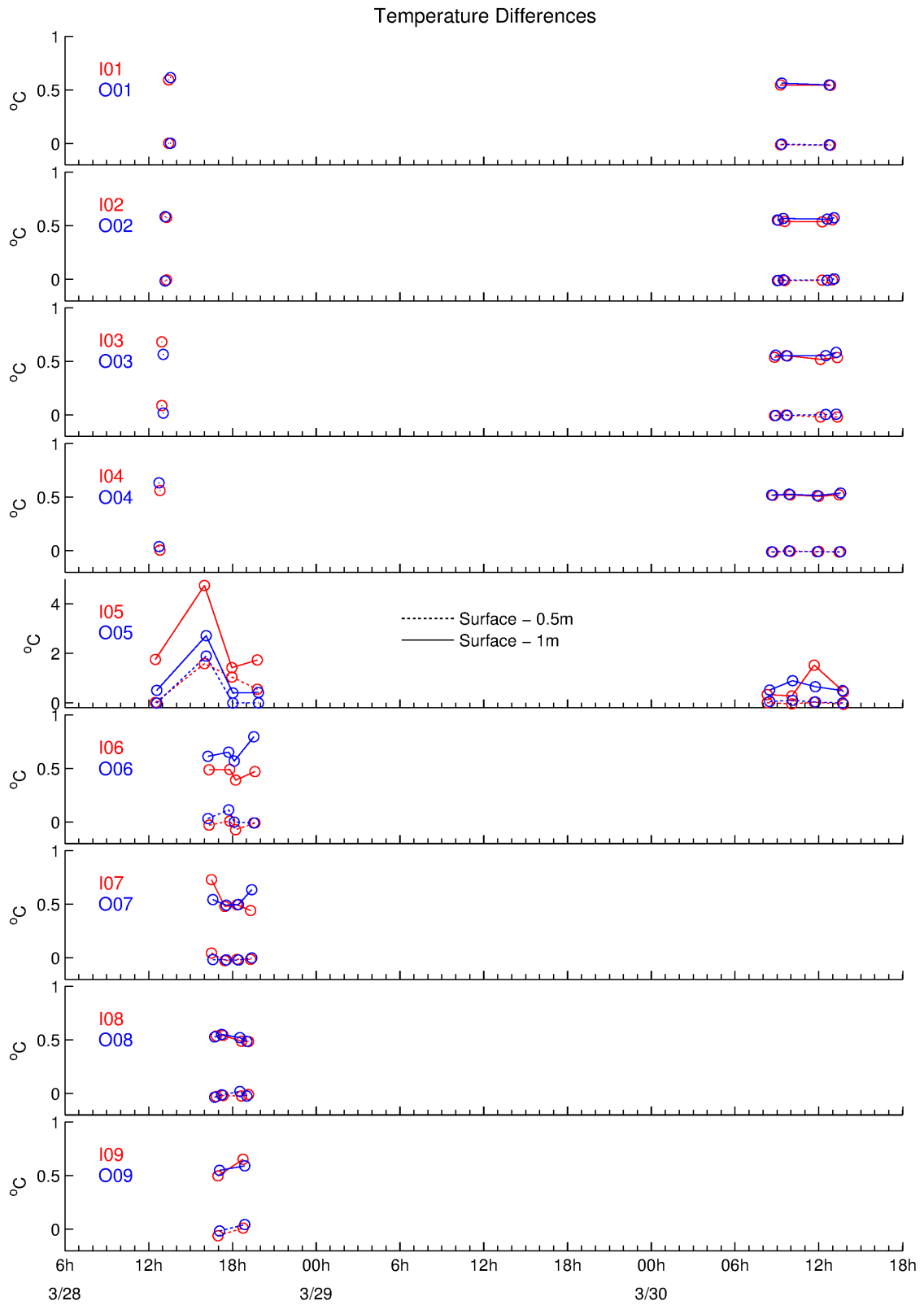


그림 28. 정점별 표층수온과 수층수온의 수온차. 실선은 표층수온에서 수면하 1m 수온을, 점선은 표층수온에서 수면하 0.5m 수온을 뺀 수온차를 나타낸 것이다.

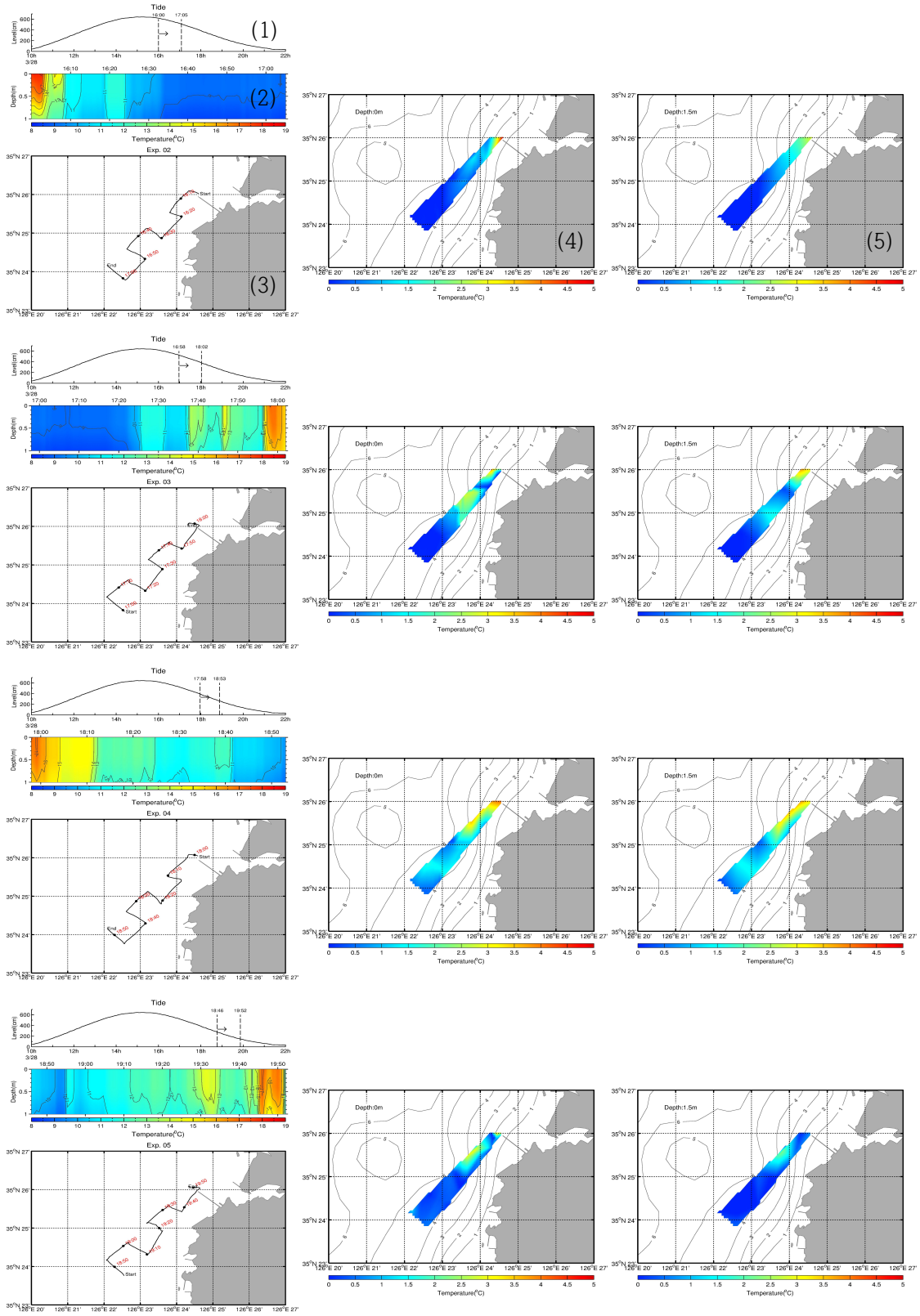


그림 29. 조사선을 이용해 관측한 동계 표층 수온의 공간분포 (낙조실험, 3/28일). 총 5회에 걸쳐서 관측이 이루어졌으며 (여기서는 4회 결과 제시), 각각의 그림은 (1) 시간에 따른 조석 변화, (2) 선박에 설치한 수온센서에서 얻은 연직분포도, (3) 조사선 이동 거리, (4) 수온차의 수평분포도 (CTD\_TEMPbottom - CTD\_TEMPsurf) (5) 수온차의 수평분포도 (CTD\_TEMPbottom - CTD\_TEMP1.5m) 로 구성되었다.

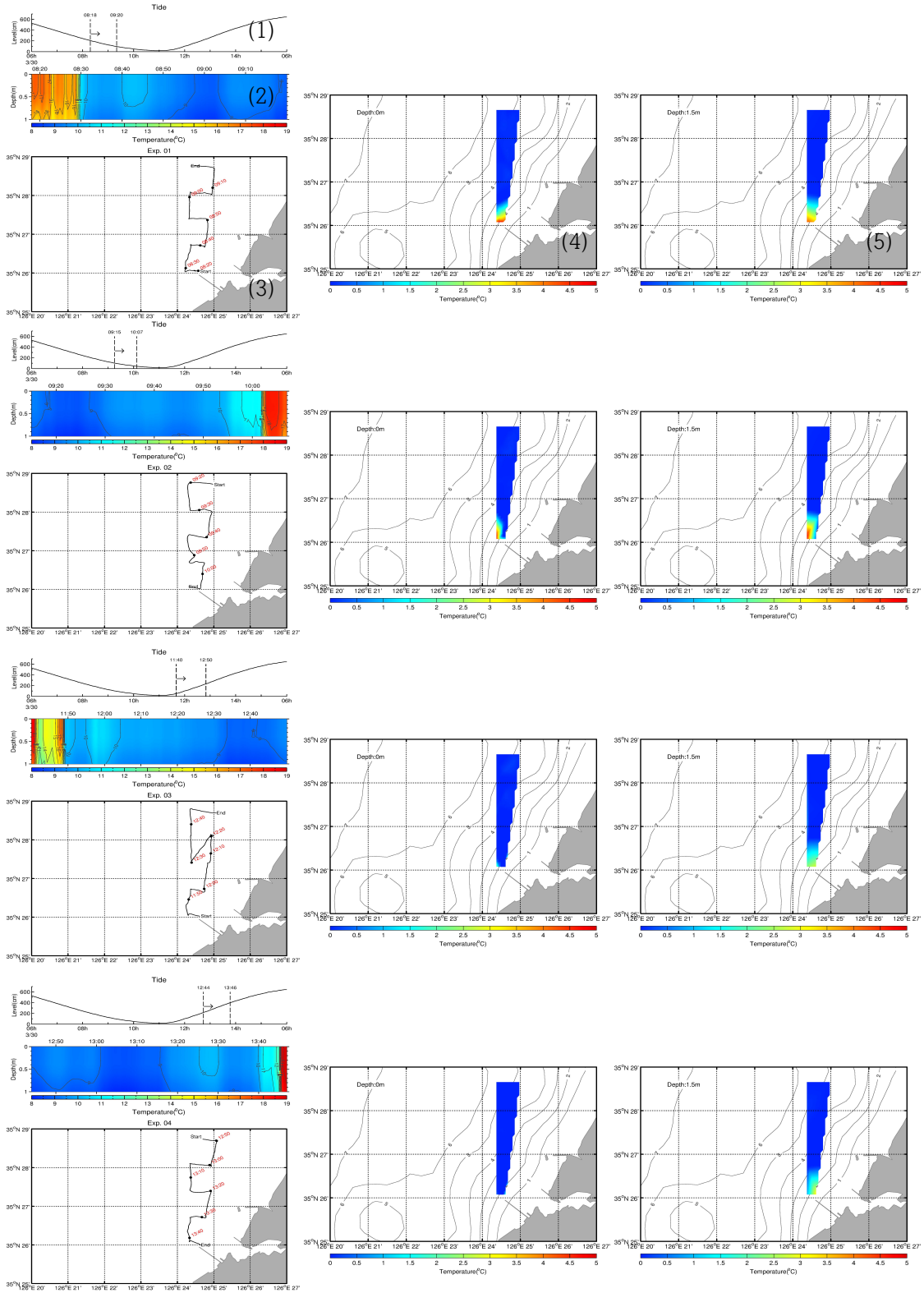


그림 30. 조사선을 이용해 관측한 동계 표층 수온의 공간분포 (창조실험, 3/30일). 총 4회에 걸쳐서 관측이 이루어졌다. 각각의 그림은 (1) 시간에 따른 조석 변화, (2) 선박에 설치한 수온센서에서 얻은 연직분포도, (3) 조사선 이동 거리, (4) 수온차의 수평분포도 (CTD\_TEMPbottom - CTD\_TEMPsurf) (5) 수온차의 수평분포도 (CTD\_TEMPbottom - CTD\_TEMP1.5m) 로 구성되었다.

### (2) 수온계를 장착한 표층 뜰개를 이용하여 온배수의 확산범위 추적

온배수의 확산범위를 추적하기 위해 표층 뜰개를 이용한 표층해류의 거동을 관측하였다. 표층 뜰개에 수온센서를 장착하여, 표층 흐름과 더불어 표층 수온의 특성을 관측하였다 (그림 31과 32).

총 5대의 표층 뜰개에 대한 실험 결과를 분석하였다. 그림 31은 동계시기 수온계가 장착된 표층 뜰개의 궤적과 표층 수온값을 나타낸 것이다. 수온센서는 수면하 1m 이내 (약 0.05m, 0.5m, 1m)에 총 3대가 설치되었으며, 여기서는 표층(<0.1m) 자료만을 제시하였다.

이 실험은 낙조시기의 온배수 확산 정도를 파악하기 위한 것으로, 3월 28일 15:55분경에 시작된 실험은 다음날인 29일 13:54분까지 지속되었다. 온배수 배수구 근처에서 투하된 뜰개는 조류의 흐름에 따라 연안에서 멀어졌다가 다시 연안으로 유입되는 궤적을 그리고 있다. 조류의 주기에 따라 뜰개의 궤적도 영향을 받고 있는데, 이 시기 뜰개는 주로 배수구에서 서남방향으로 외해쪽으로 빠지고 있으며, 궤적의 범위는 배수구에서 최대 약 14km 정도이다. 표층수온은 배수구 주변해역에서 상대적으로 높게 나타나고 있다.

그림 32은 동계시기의 창조시기에 투하된 표층 뜰개의 궤적과 표층수온 (<0.1m)을 나타낸 것이다. 3월 30일 11:37분경에 시작된 실험은 기상악화로 인해 13:47분까지만 지속되었다. 온배수 배수구 근처에서 투하된 뜰개는 조류의 흐름에 따라 연안으로 유입되는 궤적을 그리고 있다. 실험시간이 길지 않아 뜰개가 조류에 따라 어떻게 움직이는 지는 정확히 파악되지 않지만, 뜰개가 조류의 흐름에 따라 외해로 빠져나가지 못하고 연안으로 밀리는 양상을 보이고 있다. 전반적으로 표층수온은 배수구 주변해역에서 상대적으로 높게 나타나고 있다.

그림 33는 하계시기에 표층 뜰개의 궤적과 표층 수온값을 나타낸 것이다. 관측시간은 낙조시기로 9월 7일 15:59분에 투하된 뜰개는 9월 8일 10:11분에 회수되었다. 이 시기에는 표층수온은 온배수 배수구 인근해역에서 상대적으로 높게 나타나고 있지만, 동계시기와 달리 뜰개의 거동은 동계시기의 남서방향과 상응하는 남동방향으로의 거동을 보이고 있다.

그림 34은 창조시기 동안의 뜰개의 거동을 나타낸 것으로, 9월 8일 11:46분부터 16:38분까지 약 5시간 동안 관측한 결과이다. 뜰개는 모두 해안과 일치하는 남동방향으로 거동하고 있으며, 낙조시기때와는 달리 모두 연안 방면으로 치우쳐 분포하고 있다. 표층수온은 배수구 인근이 높게 나타나고 있다.

### (3) 확산과정의 표층수온 변화와 표층과 수면하 1m 층의 수온차 변화 분석

동계와 하계시기 뜰개자료에서 획득된 수층 수온 자료를 통해 수면하 1m 층의 수온과 표층수온과의 수온차를 살펴보았다. 그림 35는 그림 31과 32에 제시된 각각의 동계 관측시기에 획득한 수층 수온자료의 수온차 (표층 - 수면하 1m)를 나타낸 것이다. 그림 36는 그림 33과 34에 제시된 각각의 하계 관측시기에 획득한 수층 수온자료의 수온차 (표층 - 수면하 1m)를 나타낸 것이다.

그림 35(1)은 낙조시기에, 35(2)는 창조시기에 관측한 실험 결과이다. 뜰개는 모두 온배수 배수구 인근에서 투하되었는데, 배수구 인근해역에서 관측된 수온의 경우에 수층의 수온차가 상대적으로 크게 나타나고 있다. 배수구에서 멀어지는 해역에서는 수층의 수온차가 거의 나지 않고 있다. 낙조시기에 관측된 자료에서는 수층의 수온이 최대 2℃정도 수온차를 보이고 있고, 창조시기에서는 최대 4℃정도의 수온차를 보이고 있다.



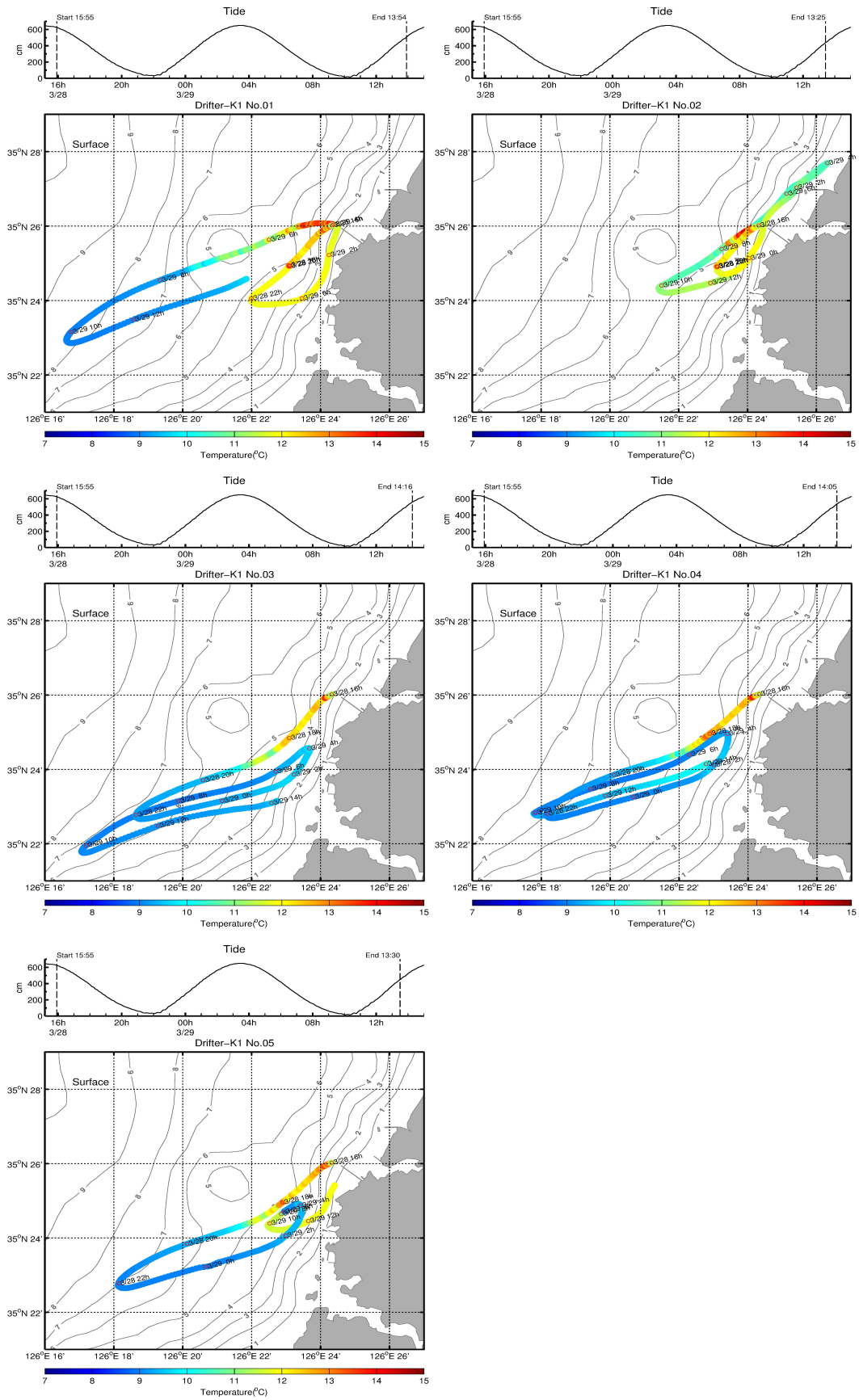


그림 31. 수온계가 장착된 표층 뜰개 (총 5대)의 궤적과 표층(<0.1m) 수온값. 동계시기인 3월 28일 낙조시기 동안의 실험 결과를 나타낸 것이다.

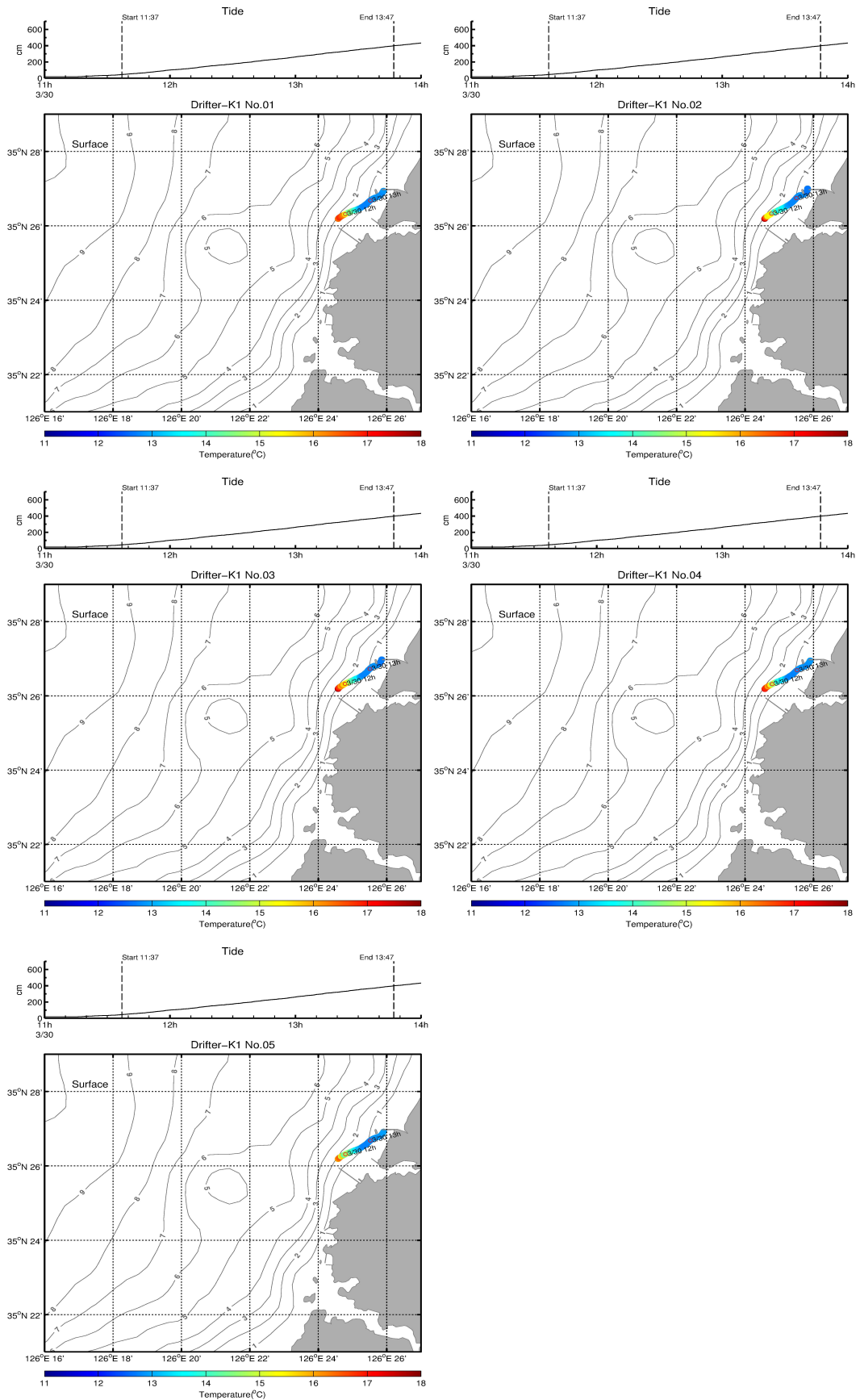


그림 32. 수온계가 장착된 표층 뜰개 (총 5대)의 궤적과 표층(<0.1m) 수온값. 동계시기인 3월 30일 창조시기 동안의 실험 결과를 나타낸 것이다.

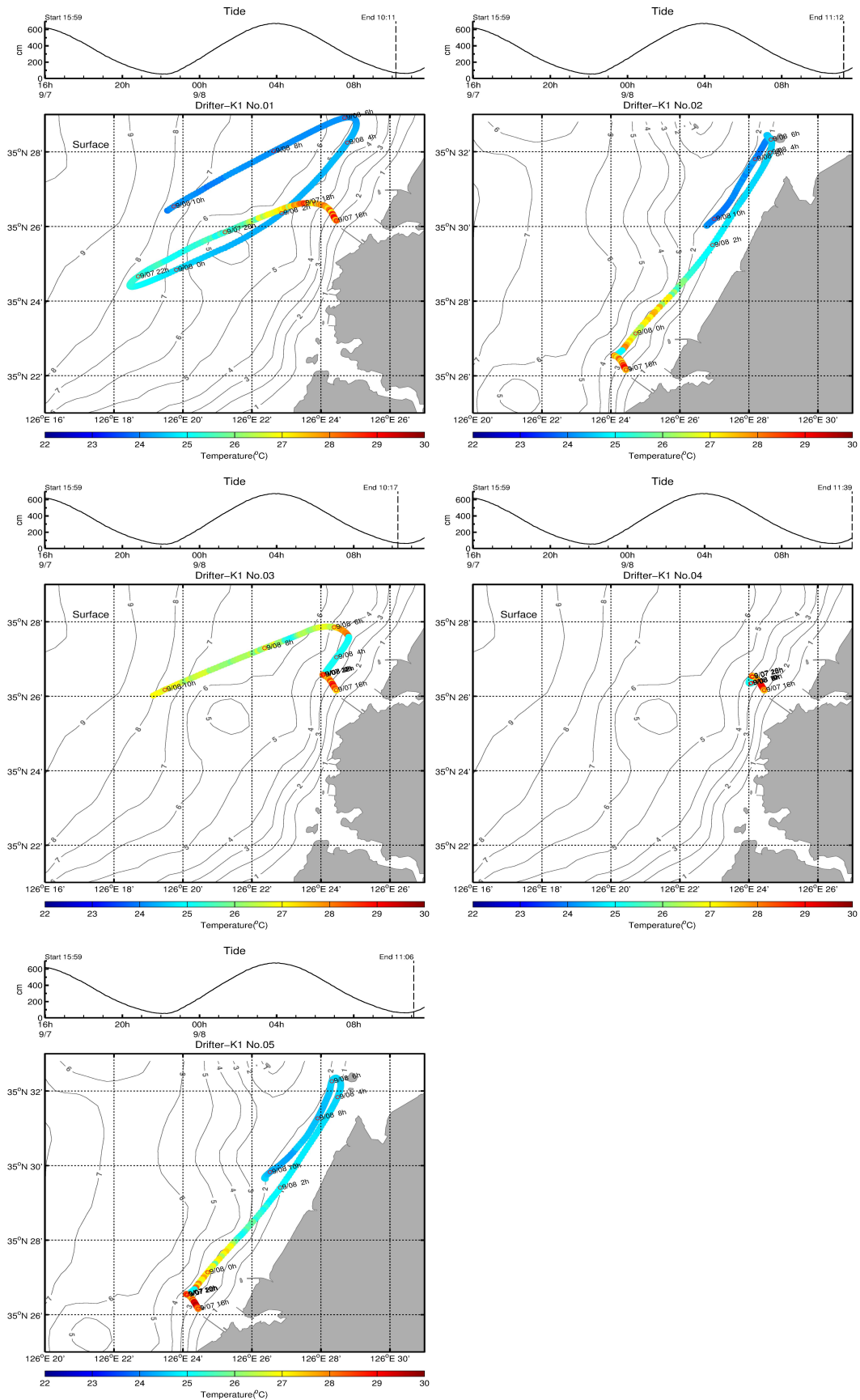


그림 33. 수온계가 장착된 표층 뜰개 (총 5대)의 궤적과 표층(<0.1m) 수온값. 하계시기인 9월 7일 낙조시기 동안의 실험 결과를 나타낸 것이다.

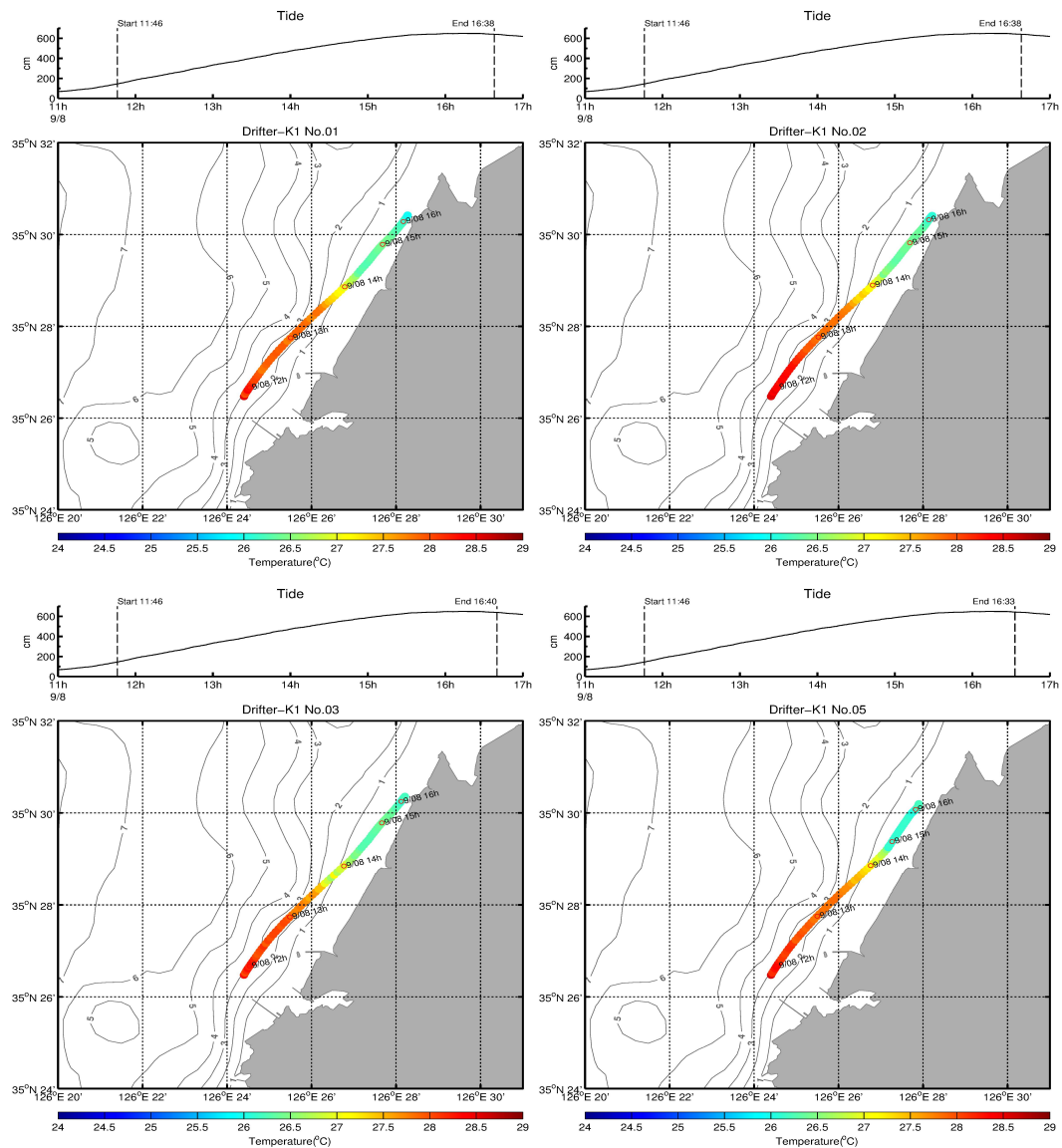


그림 34. 수온계가 장착된 표층 뜰개 (총 5대 중 4대 결과)의 궤적과 표층 (<0.1m) 수온값. 하계시기인 9월 8일 창조시기 동안의 실험 결과를 나타낸 것이다.

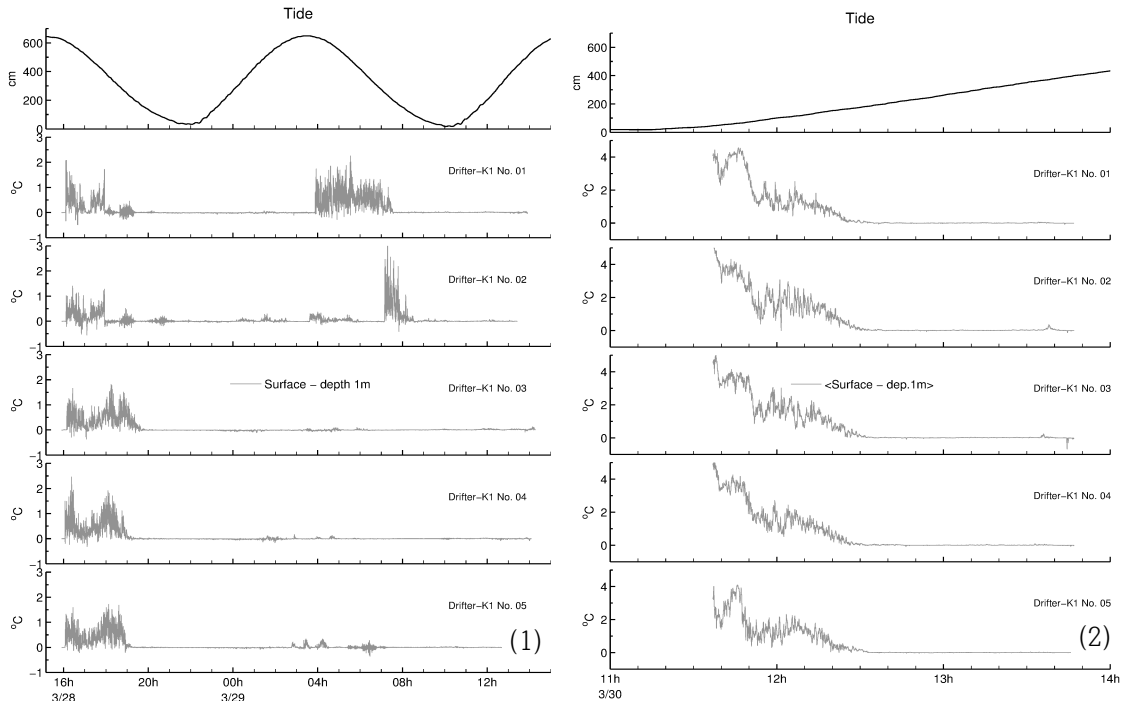


그림 35. 뜰개 자료에서 획득한 수층 수온자료의 수온차 (표층-수면하 1m)의 시계열 분포. (1)은 그림 31, (2)는 그림 32에 제시된 뜰개 자료의 결과를 나타낸 것이다.

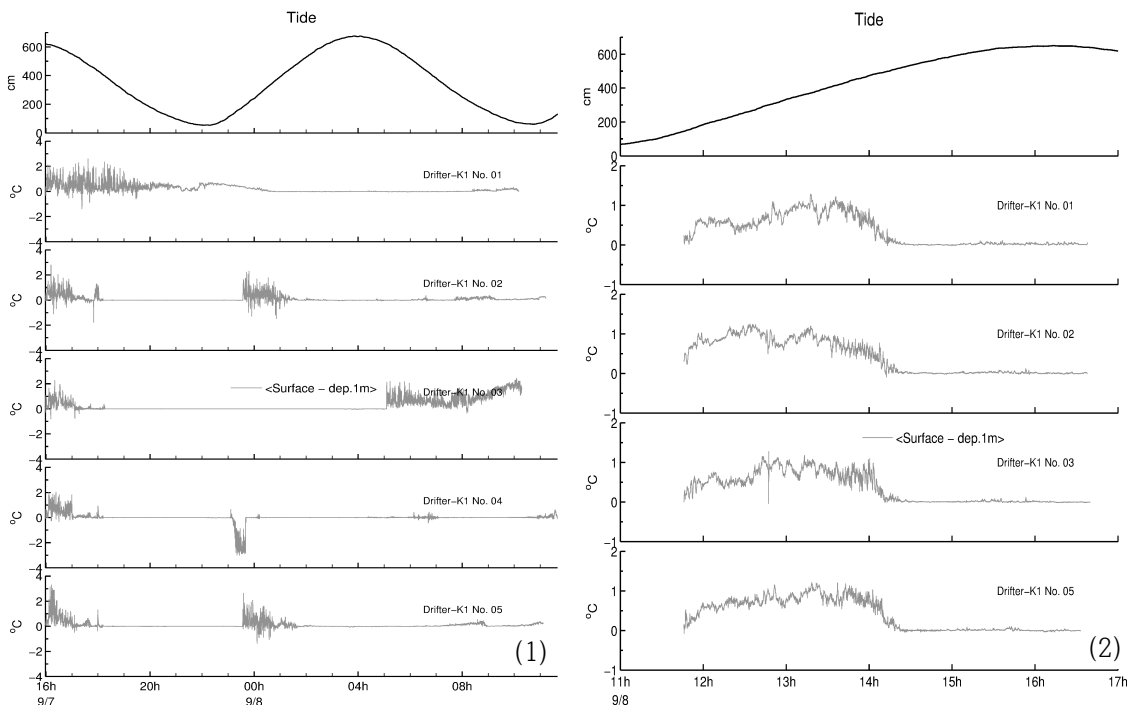


그림 36. 뜰개 자료에서 획득한 수층 수온자료의 수온차 (표층-수면하 1m)의 시계열 분포. (1)은 그림 33, (2)는 그림 34에 제시된 뜰개 자료의 결과를 나타낸 것이다.

그림 36(1)은 낙조시기에, 36(2)는 창조시기에 관측한 실험 결과이다. 뜰개는 모두 온배수 배수구 인근에서 투하되었는데, 배수구 인근해역에서 관측된 수온의 경우에 수층의 수온차가 상대적으로 크게 나타나고 있다. 배수구에서 멀어지는 해역에서는 수층의 수온차가 거의 나지 않

고 있다. 낙조시기에 관측된 자료에서는 수층의 수온이 약 2℃정도 수온차를 보이고 있고, 창조시기에서는 약 1℃정도의 수온차를 보이고 있다.

#### 4. 결론

온배수의 영향을 파악하기 위해서는 온배수 배출해역에 대한 수온분포와 해수유동 구조에 대한 정밀조사를 실시하였다. 조사영역은 기존 연구결과와 조석에 따른 해수 유동 변화를 고려하여 최대한 확장하였다. 이전 연구에 의하면 기존 온배수의 영향을 파악하기 위한 조사에서는 수온분포와 해수유동 특성에 대한 시공간적인 제한성이 문제시 되어 왔다.

따라서, 본 연구에서는 기존 연구에서 문제시 되었던 조석주기에 따른 해수 물성 변화를 파악하기 위해 조석 주기에 따라 동시적이고 반복적인 해수 물성 관측을 수행하였다. 해수유동 특성은 고정점과 뜰개를 이용하여, 조석주기는 물론 조사영역의 제한성도 고려하였다. 조석주기에 따른 해수의 흐름변화가 나타나는 영역을 고려하여 조사영역을 확장하였고, 시·공간적인 수온분포와 해수유동 구조를 파악하였다.

전체적으로 온배수 배수구 인근 해역에서 수층의 수온변화가 크게 나타나고 있으며, 배수구에서 먼 해역에서는 수온변화가 거의 일정하다. 조석 주기에 따라 수온의 구조도 변화가 나타나고 있으며, 낙조시기보다 창조시기에 수온차가 크게 나타났다. 배수구와 가장 인접한 정점(I05)에서는 낙조와 창조시기에 표층에서는 3℃, 1m층에서는 약 4℃정도 차이가 나고 있다. 약 500m 떨어진 O05 지점보다는 낙조시기에는 4℃ 이상, 창조시기에는 8℃ 이상 큰 차이를 보이고 있다.

## 제2절 헬리카이트를 활용한 표층수온 관측

### 1. 연구개요

원자력발전소는 주로 원자로의 냉각을 위해 다량의 냉각수를 필요로 하며, 대부분 이를 해수로 사용하기 때문에 연안지역에 위치해 있다. 따라서 다량의 해수가 유입되고 유출되는 원자력발전소 인근 해역에는 해수온도의 상승과 같은 인위적인 환경변화 요소가 발생하기 때문에, 환경보존 및 이해당사자들과 원만한 소통을 위해서는 반드시 이를 모니터링하고 대응 할 필요가 있다.

발전소에서 배출되는 온배수의 온도와 그 거동을 관측하는 방법은 조사선을 이용하여 관측정점을 따라 정기적으로 현장관측하거나, 고정된 부이를 사용한 관측자료를 획득하는 것이 일반적인 방법으로 알려져 있다. 이러한 현장관측은 정량적인 해양환경을 파악하기 위하여 반드시 필요하지만, 대부분 정점에서의 관측으로 국한되어 있기 때문에 관측자료의 공간해상도가 낮다. 따라서 조석 등에 의해 일단위로 크게 변동하는 연안해수의 거동과 이에 따른 온배수의 확산범위를 정밀하게 모니터링하기 위해서는 이를 극복할 수 있는 다른 관측방법이 요구된다.

이러한 현장관측의 제한점을 보완하기 위하여 다양한 원격 탐사 방법이 연안환경의 관측에 활용될 수 있다. 이러한 연안관측을 위한 원격탐사 기법 중, 항공기의 경우 높은 운용비용과 기상조건에 영향이 크며, 위성의 경우 일정 지역에 대한 한정된 관측 시간, 연안 근처에서의 부정확성 등의 문제점이 있다고 알려져 있다.

따라서 최근 드론과 같은 무인탐사체를 활용한 유사한 관측 및 연구가 수행하고 있지만, 현재 이러한 시스템의 활용이 대부분 육상에서 이루어지며 해양에 적용되는 사례는 아직 드물다. 또한 회전익, 고정익과 같은 드론의 경우 원자력발전소와 같은 비행금지구역의 경우 설계상 비

행이 불가능한 모델이 많으며, 항공촬영 허가와 관련된 다양한 제한사항이 존재한다고 알려져 있다.

본 연구에서는 이와 같은 실측자료의 한계점을 보완하여 높은 공간해상도 및 관측범위를 제공할 수 있는 풍선형 저고도 원격탐사 관측시스템을 제안하였고 이를 통한 관측 및 분석을 수행하였다.

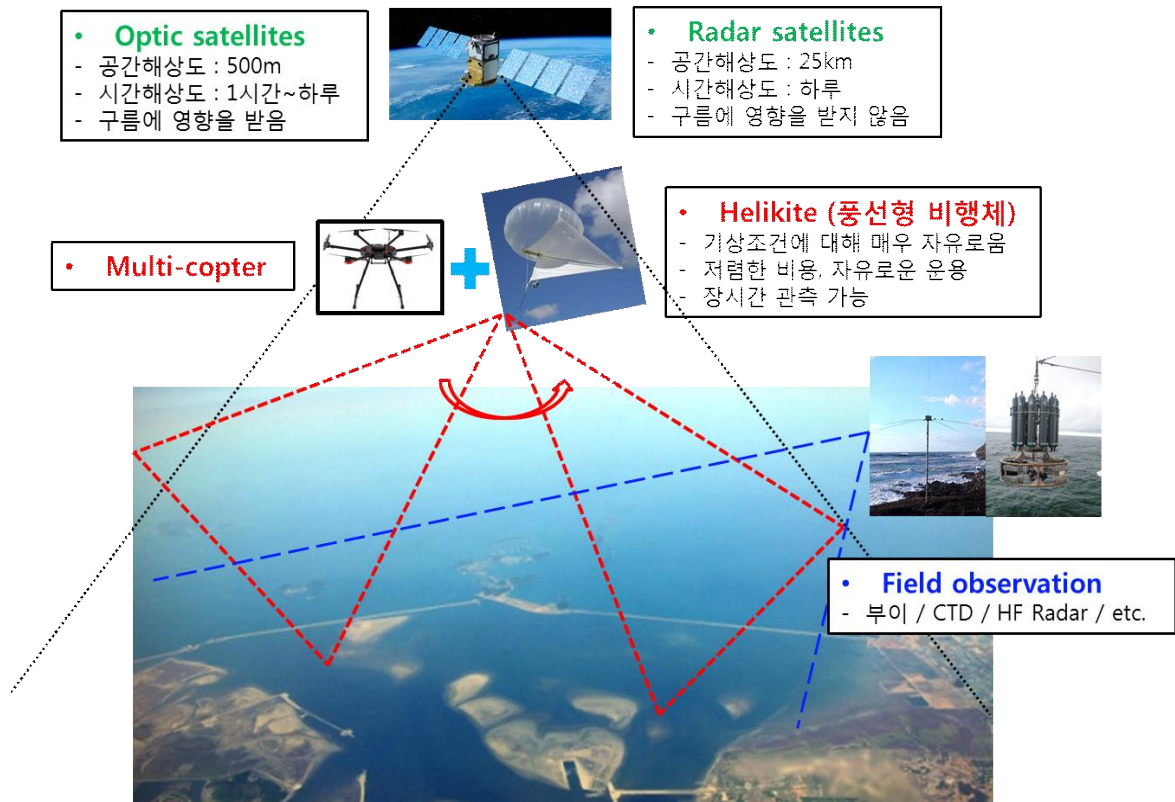


그림 37. 본 과제에서 사용하는 저고도 원격탐사 관측체. 풍선형 관측체인 Helikite는 탑재될 수 있는 다양한 센서를 통해 연안범위에서 고해상도의 항공관측자료를 산출할 수 있다.

우선 본 연구에 활용된 저고도 원격탐사 관측체는 관측 시스템은 비행체 부분과 관측센서가 탑재되어 있는 관측부로 나뉘어져 있다. 관측체의 경우 풍선형 비행체 Aerostat의 일종인 ‘Helikite’이며, 이는 헬륨이 주입되는 풍선(balloon)에 연(kite)이 결합되어 있는 형태에 의해 강한 부력과 비행안정성을 확보할 수 있는 비행체이다. Helikite는 강력한 줄 (Tether)을 통해 육상 또는 움직이는 선박에서 계류시켜 관측체의 크기에 따라 최대비행고도 내에서 자유롭게 고도를 조절할 수 있으며(~2km), 유체역학적인 구조에 의해 강한 바람(~15m/s)에서도 최대 30일 연속 운용이 가능하다. 또한 연이 결합된 구조에 의해 맞바람에 의해 비행체의 양력이 발생함과 동시에 안정적인 자세를 유지할 수 있기 때문에 탑재된 센서의 위치 및 자세의 안정성도 확보할 수 있다. 또한 해당 비행체에 탑재되는 관측부에는 해양 표층 수온을 관측할 수 있는 열화상 카메라, 바람과 같은 외력 및 비행체의 진동 등에 의한 센서의 움직임을 최소화하기 위한 짐벌, 전용 GPS/IMU (FC :Flight Controller)와 데이터 송수신장치가 장착되어 있다.

따라서 본 연구에서는 영광 원자력 발전소에서 위와 같은 저고도 원격탐사 시스템을 적용하여 넓은 범위의 표층 수온을 관측하고자하였고, 이를 통해 영광 원자력 발전소에서 배출되는

온배수의 확산 및 거동 범위를 확인하고자하였다.

## 2. 자료 획득 처리 및 방법

### 가. 저고도 원격탐사 시스템(Helikite)을 통한 관측

해양에서의 관측을 위해 선박에 Helikite를 계류하여 온배수의 배출 및 확산 지역에서의 이동관측을 수행하였다. 관측선박은 사전에 계획된 관측경로를 향해 시스템에 입력하여 경로에 따른 운항을 수행하였으며, 비행체의 고도는 평균 400m로 운용하여 계획된 관측범위(남북 약 400 km<sup>2</sup>, 10x20 km)에 대한 관측을 수행하였다. 관측은 총 2일에 걸쳐 각각 2017.09.07. (13:10 ~ 17:31, 창조~낙조기), 2017.09.08. (10:35~ 13:00, 낙조기) 그리고 2017.09.08. (15:13 ~ 17:45, 창조기)의 총 3회 관측으로 수행되었으며, 각 관측 일자의 창조, 낙조시기에 맞춰 관측을 범위를 설정하였으며 이는 그림 38.와 같다.

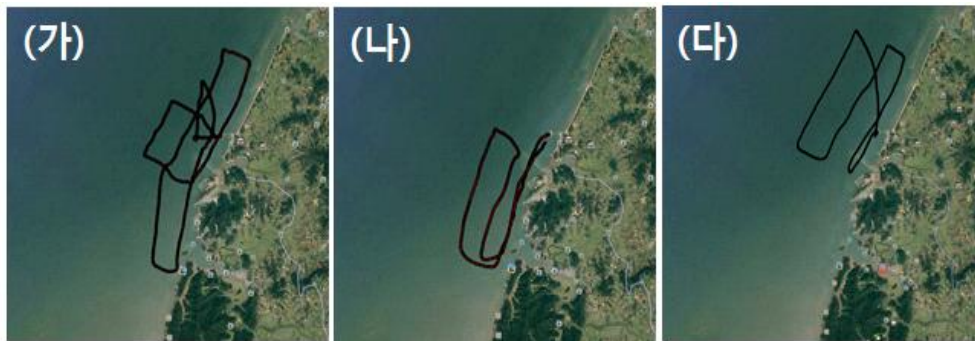


그림 38. 관측 장비에 탑재된 GPS의 위치정보를 통한 관측 별 비행체의 이동경로. (가) 2017.09.07. 13:12~17:31. (나) 2017.09.08. 10:35~13:00. (다) 2017.09.08. 15:13~17:45.

원자력발전소에서 배출되는 해양 표층의 온배수를 관측하기 위해서, FLIR사의 Thermal Capture 2.0 모델을 사용하였다. 본 센서는 약 0.04°C의 온도분해능을 가지며 640\*512의 화소를 약 32°화각으로 관측한다. 시중에 판매되는 무인기에 장착 가능한 소형 열화상카메라의 경우 대부분 상대적인 온도 값을 제공하지만, 해당 센서는 모든 픽셀에 대한 온도 값을 제공하므로 실제로 발전소에서 배출되는 온도를 대략적으로 추정할 수 있다.

하지만 초점 거리가 긴 열화상 카메라의 특성상 화각이 좁아지기 때문에 본 연구에서 요구하는 관측영역을 커버하기에 제한적이기 때문에, 이를 극복하기 위한 방법으로 짐벌의 스크립팅을 이용한 Push broom 형태의 관측을 수행하였다. Push broom 관측 방식이란 그림 39과 같이 일정 경로를 이동하는 센서를 진행방향의 측면 방향으로 회전시켜 넓은 범위의 관측을 가능케 하는 방법으로, 이는 주로 위성에서 사용되는 관측 개념이다. 위성의 경우 고도가 매우 높기 때문에(극궤도 위성, 700~800 km) 실제 센서가 경로 상에서 회전하는 각도가 크지 않다. 이는 저고도에서의 관측과는 대기의 영향 등에 의해 큰 차이점이 있지만, 해당 기법을 통해 센서의 화각이 가지는 한계를 극복하여 넓은 영역을 관측하고자 하였다.

항공사진의 정의상 정밀한 기하보정을 위해서는 센서의 기울기를 최소화 시킬 필요성이 있으며, 광축과 관측면 사이의 경사각이 3도 이상일 경우 측면촬영 또는 경사사진이라고 한다. 경사사진의 경우 넓은 지역을 관측하기에 용이하지만, 육상의 경우 지형 및 건축물 등의 표고에 의해 2차원 평면으로 보이는 이미지 내부 공간정보의 왜곡이 크게 발생한다. 따라서 기하보



정을 위해서는 일반적으로 측면사진을 활용하지 않지만, 해양의 경우 연안범위에서는 해수표면의 표고를 무시할 수 있다는 가정이 전제로 측면사진을 활용하였다.

본 연구에서는 Push broom 형식의 관측방법을 사용한 측면사진을 획득하였고 이를 통해 광범위한 관측범위에 대한 관측을 수행할 수 있었으며 2017.09.07. 14,787매, 2017.09.08. 18,934매, 총 33,721 매의 관측 이미지를 획득하였다.

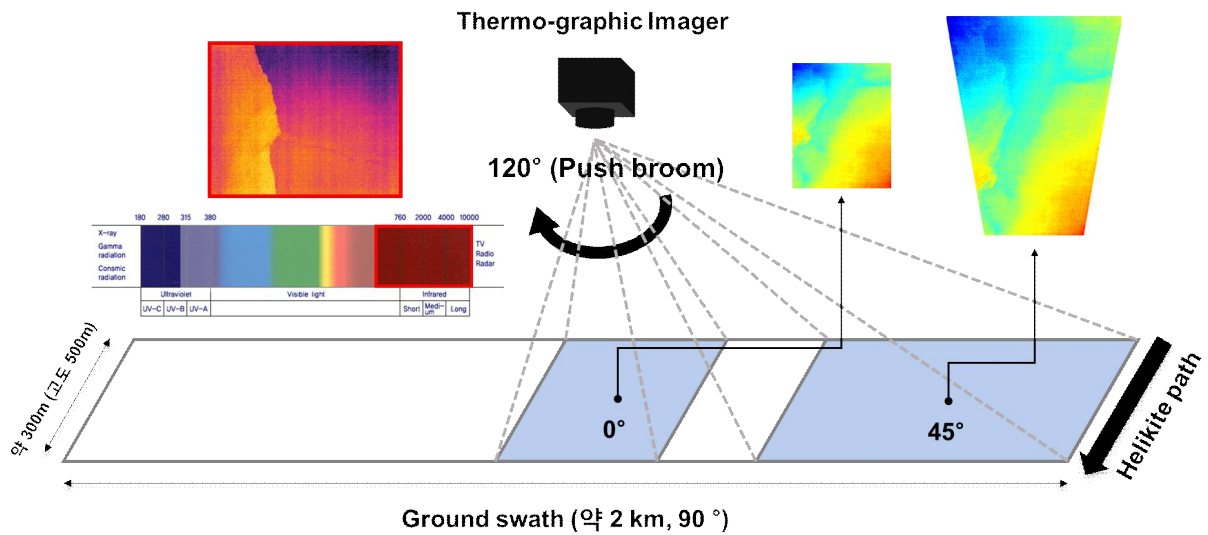


그림 39. Push broom 형식의 관측 방법. (좌) Push broom 형태를 이용하여 약 10 \* 20 km 영역 관측, (우) 관측 경로.

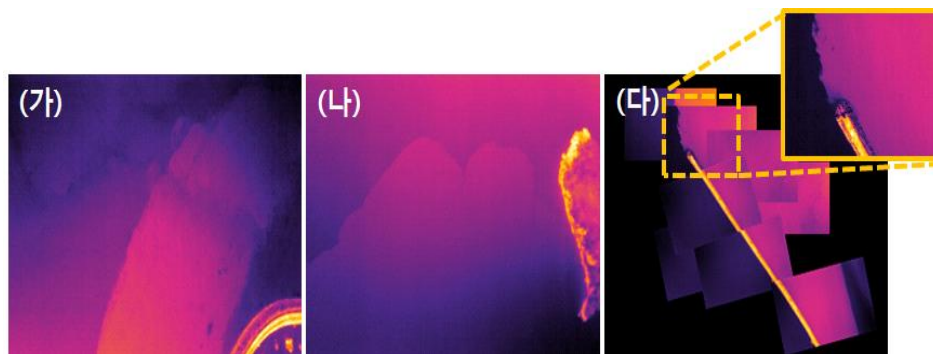


그림 40. (가), (나) 열화상 카메라를 통해 관측된 단일 관측이미지. (다) IMU 정보를 통해 모자이크 처리한 산출 결과물 예시(온배수 배수구 인근 지역).

#### 나. Orthomosaic photo 제작

##### (1) 관측 영상과 GPS/IMU 데이터 획득 및 동기화

항공사진의 GPS/IMU 기반 지리정보화를 위해서는 센서의 위치 및 고도 (x, y, H) 와 3차원 공간에 대한 자세정보 (Pitch, Roll, Yaw) 가 필요하다.

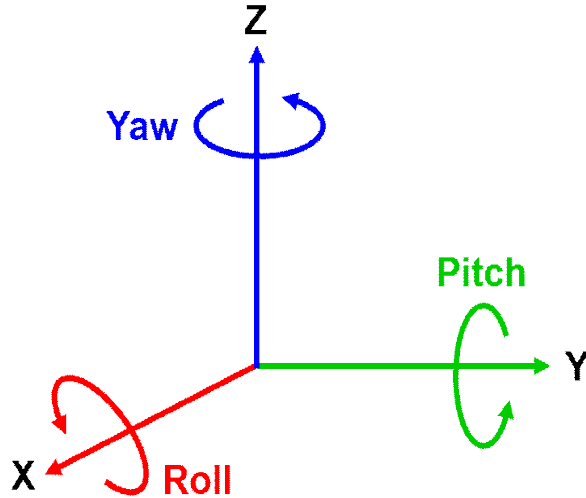


그림 41. 3차원 공간 자세정보  
(Pitch, Roll, Yaw).

관측에 사용된 ThermalCapture의 경우 전용 GPS모듈만 장착 가능하기 때문에, IMU 정보는 본체에 장착된 N3의 데이터를 사용했다. Push broom 관측을 위해 열화상카메라가 장착된 짐벌의 움직임을 roll의 경우 총 120도의 가동범위 내에서 15도 마다 4초 간격으로 분리하여 움직이도록 스크립팅 하였고 해당 IMU 정보를 삽입 후 본체의 roll 정보와 병합하여 사용했다. 짐벌의 pitch는 0도(연직방향)로, Yaw는 default(정면)로 설정하여 기체 본체와 동기화시켰으며, 짐벌이 잡지 못하는 센서의 미세한 움직임은 N3의 pitch와 yaw 정보를 활용하였다. 최종적으로 전체 약 3만매의 열화상카메라 이미지의 관측 영상에 GPS/IMU 정보 및 카메라 내부 변수 정보를 tagging한 뒤 분석을 수행했다.

### (2) Georeferencing (Orthoprojection)

일반적으로 항공사진의 기하보정은 GPS/IMU 정보를 사용하기도 하지만, 주로 횡, 종중복을 가지는 일련의 연속된 이미지 사이의 특이점을 이용하여 센서의 촬영 당시 자세를 계산하고 이를 정합에 사용한다. 이러한 일련의 과정은 Fix4D, Photoscan 등의 엔드유저가 활용 가능한 전문 프로그램이 존재하지만, 해당 프로그램은 육상데이터의 처리를 기반으로 하고 있기 때문에 해상에서 관측된 이미지의 경우 참조 가능한 지상의 좌표를 획득하기 제한적이므로 이들 프로그램을 통한 이미지 처리가 불가능하다. 따라서 GPS/IMU 정보만을 통해 영상의 시점 투영(perspective projection)을 수행하였으며, 최종적으로 일련의 이미지들을 정합하여 광범위한 지역에 대한 매핑자료를 산출하였다.

### (3) Direct georeferencing (Image rectification)

일반적으로 이미지의 정사투영은 항공삼각측량법을 이용하여 수행한다. 항공삼각측량에서 이미지의 정사투영을 위해서는 절대 표정이 필요하며, 절대표정을 위해서는 그 모델 내에 평면 좌표가 알려진 2점(축적조절)과 높이좌표가 알려진 3점(경사조절)을 확보하기 위한 지상기준점(Ground Control Points, GCP)이 있어야 한다.

그러나 해양의 경우 유동적인 표층환경에 의해 RTK-GPS등을 활용한 고정된 한 점에 대

한 좌표정보(GCP)를 획득하기 어려우며, 육상과 달리 고정된 지형지물 또한 존재하지 않기 때문에 항공삼각측량법을 사용하기 부적합하다.

따라서 본 연구에서는 GCP를 사용하지 않고 항공기의 GPS, 자세정보(IMU)와 카메라의 외, 내부표정요소를 이용하여 회전행렬을 산출하였고 이를 통해 영상의 크기 및 위치를 조절한 뒤 좌표정보를 입력하는 Direct georeferencing을 수행하였다. 제작된 정사영상에서 이미지의 왜곡을 고려하여 보간법을 이용해 데이터를 수정한 후 정사영상 이미지의 중앙좌표, 카메라 렌즈의 초점거리, 이미지의 크기를 이용하여 각 픽셀의 해상도를 계산하고 좌표 정보를 입력하는 georeferencing 과정을 수행하였다. 이때, 계산의 편의성을 위하여 중앙점 좌표를 월드좌표계(WGS)에서 UTM좌표계로 변경하여 계산한 뒤, 계산된 UTM 좌표계를 월드 좌표계로 재변경하여 좌표를 입력하였다. 최종적으로 좌우(roll,  $-60^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ) 총  $120^{\circ}$ 각도로 관측된 모든 영상은 Direct georeferencing 기법을 통해 해상기준면에 대한 시점투영이 수행되었으며, 관측 순차별로 고도 100m 이상에서 관측된 이미지들만 메인 좌표계에 투영시켰다.

하지만 Direct georeferencing의 경우 GPS/IMU 정보를 기반으로 영상의 투영을 수행하기 때문에 GPS의 위치오차에 크게 영향을 받는다. 이 경우 센서의 기울기가 커질수록 먼 거리의 이미지 오차는 매우 크게 발생할 수 있다는 단점이 있다. 또한 좌표정보의 오차 이외에도 측면 이미지의 경우, 이미지 내부의 대기투과율이 차이로 인해 각 화소의 값에 편차가 발생할 수 있다. 그러나 이번 관측의 목적이 정량적인 온배수의 온도관측뿐만 아니라, 그 확산 범위를 관측하는 것이 가장 중요하므로 이러한 오차범위를 유효범위로 산정한 뒤 자료처리를 수행하였다.

### 3. 연구내용 및 결과

#### 가. 온배수 배출구 남북 통합관측(2017.09.07. / 13:12~17:31)

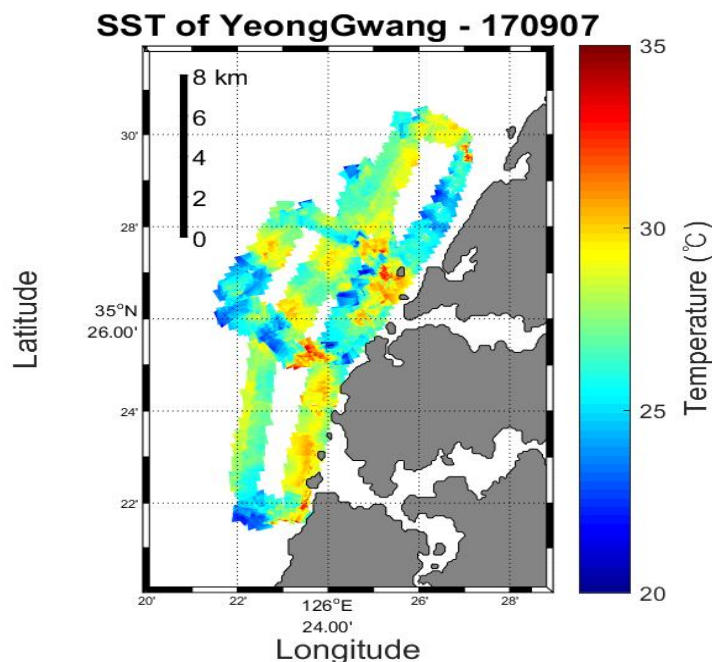


그림 42. 온배수 배출구 남북 통합 전체 관측 이미지 매핑자료.

관측경로는 구시포항을 시작으로 낙조 시(~15:37) 남측, 창조 시(15:37~) 북측에 대한 관측을 한 번의 항해 경로 상에서 수행하였다. 그림 42은 2017.09.07. 약 5시간 동안 관측된 약

14,787매의 이미지 자료를 정합한 자료로써, 온도가 높은 온배수가 배수구 인근뿐만 아니라 시간에 따라 남북방향으로 조석을 타고 넓게 퍼져나가는 것을 확인할 수 있다. 특히 북측(창조기)의 경우 배수구에서 나온 온배수가 연안에서 떨어진 지역까지 확산됨을 확인할 수 있었고, 남측(낙조기)의 경우 연안을 따라 수로 이동하는 형태로 확산됨을 확인할 수 있었다.

나. 온배수 배출구 남측(2017.09.08. / 10:35~13:00)

관측 경로는 구시포항을 시작으로 낙조 시(10:35~13:00) 온배수 배수구의 남측에 대한 관측을 수행하였다. 그림 43은 2017.09.08. 약 2시간 25분 동안 관측된 약 10,407매의 이미지 자료를 정합한 자료로써, 7일 자료의 남측과는 달리 연안에서 떨어진 지역까지 온배수가 넓게 확산된 것을 확인할 수 있었다.

다. 온배수 배출구 북측(2017.09.08. / 15:13~17:45)

관측 경로는 구시포항을 시작으로 창조 시(15:13~17:45) 온배수 배수구의 북측에 대한 관측을 수행하였다. 그림 44은 2017.09.08. 약 2시간 30분 동안 관측된 약 8,527매의 이미지를 정합한 자료로써, 주로 북측 연안을 따라 고온의 해수가 분포하는 것을 확인할 수 있었으며 이는 서풍이 강했던 당시 기상환경에 따라 나타난 것으로 판단된다.

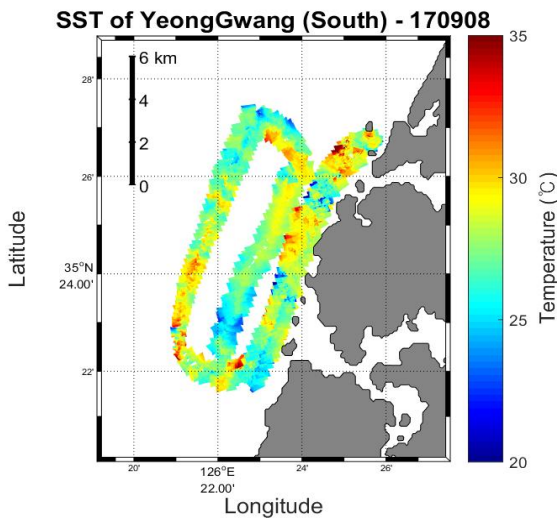


그림 43. 온배수 배출구 남측 전체 관측 이미지 매핑자료.

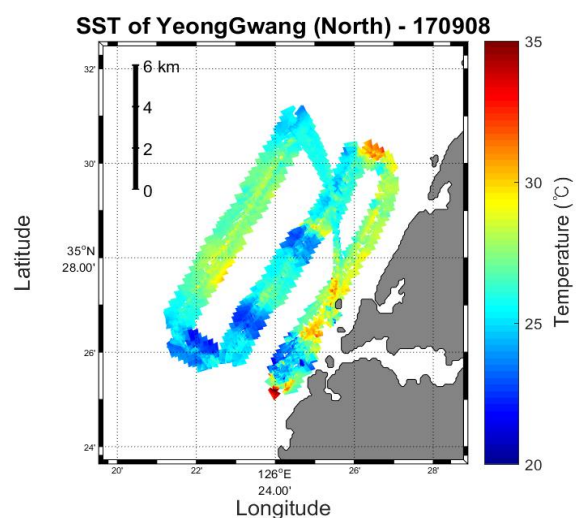


그림 44. 온배수 배출구 북측 전체 관측 이미지 매핑자료.

라. 수온 데이터 처리 결과

자료처리 과정에서 앞에서 언급한 센서의 측면(roll) 기울기가 증가할수록 데이터 자체의 왜곡과 대기투과 길이에 의한 오류를 일정 부분 확인할 수 있었기 때문에, 좌우 최대화각인 -60/+60°의 영상은 자료처리에 사용하지 않고 총 -45~+45 각도 범위 내에서 2km의 swath를 가지는 수온의 경로자료를 획득할 수 있었다. 또한 ThermalCapture는 해수 표면 온도의 정량적인 관측에 활용될 수 있지만, 기기공정 과정에 따른 장비 각각의 고유한 민감도에 의해 온도 자료의 편차가 발생할 수 있으며 대기에 의한 효과에 의해 절대적인 해수 온도값과의 편차가 발생할 수 있다. 이는 향후 실측 해수자료와의 비교분석을 통해 센서의 민감도 및 보정 방법을 고려할 필요가 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 발전소에서 배출되는 온배수가 거동하는 광범위한 영역의 관측을 위해 풍선형 저고도 원격탐사 관측체인 'Helikite'와 자체 제작된 전용 관측 장비를 활용하여 배수구 인근 해역에 대한 매핑자료 산출하였고, 물리적 환경에 따른 온배수의 거동을 살펴보고자 하였다. 온배수 관측을 위해 열화상카메라를 활용하였으며 화각이 좁은 열화상카메라의 특성 상 넓은 범위의 관측이 제한적이므로, 본 연구에서는 카메라의 측면촬영(push broom)을 통해 이를 보완한 관측을 수행하였다. 따라서 총 33,721 매수의 관측 이미지를 사용하여 원자력 발전소 부근 해수 온도차를 알아 볼 수 있었으며, 결과적으로 기존의 수온관측 정점보다 더 넓은 범위의 고해상도 온도자료를 산출하였다. 그러나 관측 여건 상 한 대의 관측시스템만 운용 가능하였으며, 해무와 같은 기상조건에 의해 일정부분 관측경로 및 시간을 축소하였기 때문에 선박의 이동경로 사이의 자료 공백이 발생하였다. 그럼에도 불구하고 배수구 인근에서 조석에 따른 온배수의 확산동향 및 그 범위를 대략적으로 확인할 수 있었으며, 본 연구에서 제안하는 저고도 원격탐사 시스템을 통해 광범위한 매핑자료의 산출 가능성을 확인할 수 있었다.

#### 5. 연구수행 결과의 활용 방안 및 기대효과

##### 가. 활용방안

이번 연구를 통해 발전소 주변으로 배출되는 온배수의 대략적인 온도와 그 확산 범위를 파악할 수 있었으며, 이를 통해 온배수 배출 시, 적정량의 배출 속도와 양을 발전소 내부 자체적으로 조절할 수 있을 것으로 기대된다. 광역적 관측을 통한 원자력 발전소 주변 해역 온배수 확산 거동에 대한 추적이 가능하므로, 장기적으로 인근 해역에 대한 환경 모니터링에 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 이를 통해 온배수에 의한 인근 어업 및 양식장에 대한 환경영향규모를 모의할 수 있으며, 해파리와 적조 등의 해양유해/교란생물의 감시 등의 다양한 분야에서 활용할 수 있을 것이다. 연구에서 사용된 저고도 관측 시스템과 지상과의 송수신 시스템을 통한 실시간 온배수 온도 및 온배수 확산 범위의 모니터링이 가능하였으므로, 향후 다른 해역의 실시간 수질 모니터링이 가능할 것으로 판단된다.

##### 나. 기대효과

본 연구에서 개발된 온배수 확산 범위 분석 알고리즘을 통해 영광 원자력 발전소 뿐만 아니라 국내에 포진한 다른 원자력 발전소 주변 해역에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 발전소에서 사용하는 냉각수는 해수를 사용한다. 그렇기 때문에 대부분의 발전소가 해안가 근처에 건설되어있고, 폐열을 흡수한 냉각수는 온배수가 되어 다시 해수로 배출하는 시스템을 가진다. 이때 해수의 온도보다 높은 온배수가 배출됨에 따라 해양 생태계에 다양한 환경적 변화를 일으킬 수 있다. 대부분 온배수 확산 범위 주변 해역으로 어민들의 어업활동이나 양식업이 활성화된 지역이 많다. 따라서 이번 연구를 통해 온배수의 확산 범위 및 거동 파악에 따라 주변 해역의 어업활동이나 양식장에 주는 피해를 최소화할 수 있을 것으로 보이며, 장기적으로 해양 생태계 변화를 방지할 수 있는 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

##### (1) 기술적 측면

기존에 사용하던 현장 관측 및 인공위성 관측으로는 고해상도의 온배수 확산 범위를 볼 수 없던 문제점을 보완할 수 있는 방안으로, 특히 기상현상에 구애받지 않고 해양에서의 관측을

할 수 있는 기술력은 해양 외, 대기, 지질 등의 분야를 가리지 않고 통용될 수 있는 기술이기 때문에 여러 분야에서 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

저고도 원격 관측과 데이터 분석을 상호 연계하여 저고도 원격 관측 시스템 개발 및 보완과 알고리즘 개발을 동시에 수행함으로써 인공위성과 유/무인 항공기의 한계를 극복하는 새로운 원격탐사 기술을 창출, 또한 향후 온배수 확산 및 거동 분석 알고리즘을 발전시킨다면 영광 원자력 발전소 뿐 아니라 다양한 원자력 발전소 해역에도 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

### (2) 경제,산업적 측면

기존의 주된 해양 관측방법인 현장관측과 인공위성과 같은 원격탐사 등과 비해 'Helikite'는 장비의 개발, 운용 및 유지에 드는 비용을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 'Helikite'는 해양 관측 시, 고정점에서 최대 8시간 이상을 연속 관측할 수 있기 때문에 넓은 범위의 매핑자료 산출뿐만 아니라, 한 지역에 대한 장기적인 모니터링 또한 가능하기 때문에 기존의 현장관측 및 항공기 관측 등에 비해 경제적으로 높은 효율성을 가진다고 볼 수 있다. 기존의 인공위성 원격탐사 분야에서 우리나라는 미국 등 선진국과 비교하여 부족한 부분이 있으나 저고도 원격탐사를 기반으로 하는 복합원격 분석 기술은 새로이 시도되는 영역이기에 새로운 연구 분야 창출이 가능하여 산업적 파급 효과도 클 것으로 판단된다.

### (3) 사회적 측면

본 연구에서 사용한 'Helikite'는 해양 관측에 있어 높은 효율을 가지므로 향후 국내 연안 해역 관측에 있어 새롭고 선구적인 관측 방법으로 사용될 수 있을 것으로 기대한다. 본 연구에서 제안하는 저고도 원격탐사 관측시스템은 해양 사고 재난에 가장 효과적으로 초기 대응 및 사후의 환경변화 및 영향 평가에도 활용할 수 있으므로, 관련 이해당사자들에게 다양한 방면의 결과물을 제공할 수 있는 도구로 사용될 수 있다. 원자력 발전소 주변의 온배수 모니터링 뿐만 아니라, 해파리 이동 경로 추적, 양식장 모니터링 등 다양한 해양 환경에 적용이 가능하기 때문에 연안에서의 어업 및 관광산업 종사자들에게 관련 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 과제에서 사용한 저고도 관측 시스템은 해양 관측에 있어 국내/외를 통틀어 최초로 적용하여 온배수 확산 범위 및 거동을 파악하였으므로, 국내 대학들 내에서의 공동연구 뿐만 아니라, 국제 공동연구까지 이끌어 낼 수 있어 다양한 분야에서 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 6. 추가연구의 필요성 및 향후개선에 대한 의견

본 연구에서는 저고도 관측 시스템을 이용하여 원자력발전소 인근 해역에서의 온배수 거동을 관측할 수 있는 가능성을 제시하였다. 하지만 이를 위한 준비기간이 부족하였기 때문에 장비의 안정성 및 요구 사양이 제한적이었다. 또한 본 연구에서는 연구담당자가 기존에 보유하고 있던 저고도 원격탐사 관측시스템을 응용하여 활용했기 때문에, 앞으로 추가적인 연구가 진행됨에 따라 온배수 관측에 적합한 방향으로 장비를 개선할 필요성이 있으며, 추가적인 시스템을 구성하여 더 높은 시공간해상도의 자료를 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구가 진행됨에 따라, 원격탐사를 통해 관측된 수온자료와 동일한 위치에서 관측된 실측 온도자료와의 검증이 필수적이며, 관측자료 정밀도 상승 및 자료처리과정의 체계화를 통해 자료의 정확성을 상승시킬 예정이다.

### 제3절 고정익 무인관측기를 활용한 표층수온 관측

#### 1. 연구개요


해양환경의 변화는 시간적 또는 공간적으로 지속적인 변화를 나타내고 있으므로, 해양환경 개발을 효과적으로 실시하기 위해서는 대상지역에 대한 종합적인 조사와 개발에 따른 변화를 예측하는 것은 필수적이다. 해양환경 특성을 결정하는 인자 중 하나인 해양표층수온은 해양환경 변화에 결정적인 영향을 미치며 해양 연구의 기초가 되는 중요한 자료이다. 해양표층수온을 관측하기 위한 방법은 부이 및 선박을 이용한 방법이 존재하며 점, 선형으로 이루어진 해양표층수온 데이터를 획득할 수 있다. 해양에 대해 실제 관측을 수행하기에는 경제적, 시간적인 어려움이 존재하며 이를 위해 광범위 해양을 관측 할 수 있는 KOMPSAT-3A, MODIS, AVHRR 등의 인공위성 원격탐사 연구를 통해 전 지구적 해양에 대한 표층수온 데이터를 획득할 수 있다. 그러나 인공위성 원격탐사를 통한 해양표층수온 탐지는 공간 및 시간해상도가 낮으므로 좁은 해양환경과 빠르게 변화되는 해양환경에는 적용하기 어렵다. 이러한 단점을 극복하고자 공간해상도와 시간해상도가 우수하며 적시에 관측이 가능하고 상대적으로 비용이 저렴한 무인항공플랫폼을 해양표층수온 변화탐지에 적극 활용 하고자 한다. 무인항공플랫폼을 통해 획득된 해양표층수온 데이터를 부이 및 선박 조사 자료, 인공위성 데이터와 비교 및 검증을 수행하였다.

#### 2. 자료처리 및 방법

##### 가. 고정익 무인항공기 제원 및 기능

다양한 임무수행이 가능하도록 임무장비를 탑재하고, 지상제어시스템에서 임무계획 및 실시간 비행조종, 통제를 통해 정밀자동비행을 수행할 수 있는 중형 급 고정익 무인항공기 시스템을 표 26과 같이 제작하였다. 지상제어시스템을 연동하여 지상에서 무인항공기의 비행상태(위치, 속도 등)에 대한 실시간 도시가 가능하며, 비행 중 비행체의 상태를 모니터링 함으로써 적절한 대응을 할 수 있는 시스템을 사용하였다. 바람에 대한 저항력이 강한 폭 2 m 급의 고정익 무인항공기 시스템을 사용하였으며, 지상제어시스템과 플랫폼 간 송·수신 가능거리가 최대 40 km 이므로 광범위한 영역에 대한 해양표층수온 분포 모니터링 수행이 가능하다.

표 26. 고정익 무인항공기 시스템 제원

모델	고정익 무인항공기	 <p>&lt;고정익 무인항공기&gt;</p>
무게	약 3 kg (센서 포함)	
길이	220 cm	
비행 시간	약 90분	
비행 속도	10 ~ 20 m/s	
송·수신거리	약 40 km	
비행 형식	자동 이·착륙 및 경로비행	

##### 나. 무인 플랫폼용 열적외선 센서

무인플랫폼용으로 개발된 FLIR 사의 VUE PRO 모델은 비접촉 방식으로 대상체의 온도 값

측정이 가능하며, 자체적인 온도 교정 알고리즘을 통해 각 픽셀 마다 정확한 절대온도 값을 산출할 수 있다(그림 45). 초점거리 9, 13, 19 mm 렌즈 옵션이 존재하며 광범위한 해양표층수온 분석을 위해 영상 왜곡을 및 화각(FOV)을 고려하여 13 mm 렌즈를 활용하였다. 스틸컷 촬영, 동영상 녹화 기능을 사용할 수 있으며, 이 연구에서는 스틸컷 촬영을 활용하였고 개별 영상의 크기는 640 × 512 pixel 이다. 측정 가능한 파장대역은 7.5 ~ 13.5  $\mu\text{m}$  이고 VUE PRO의 상세한 스펙은 표 27에 정리하였다.



그림 45. FLIR VUE PRO 열적외선 센서

표 27. FLIR VUE PRO 스펙

해상도	640 × 512 pixel	336 × 256 pixel
렌즈 옵션 (FOV)	9 mm (69° × 56°) 13 mm (45° × 37°) 19 mm (32° × 26°)	6.8 mm (45° × 35°) 9 mm (35° × 27°) 13 mm (25° × 19°)
분광 범위	7.5 ~ 13.5 $\mu\text{m}$	
사이즈	63 × 44 × 44 mm (렌즈포함)	
무게	92 ~ 113 g (구성에 따라)	
입력 전압	4.0 ~ 6.0 VDC	
사용가능한 고도	12,000 m	

#### 다. 무인항공기 영상획득 방법

##### - 비행모드 및 자동조종 알고리즘 설계

고정익 무인항공기의 수동, 반자동, 자동비행 모드 지원을 위해 자동조종 알고리즘을 설계 하였으며 고도, 속도, 방향조종 및 경로점 및 프로그램 자동항법 가능하도록 설계 하였다.

##### - 지상제어시스템 (Ground Control System)

그림 46의 지상제어시스템은 컴퓨터, 송신기, 통신장치, flight controller, GPS, IMU 와 연



동되는 시스템이며 지상에서 다양한 정보를 확인할 수 있으며 조종사가 필요로 하는 정보 및 조종명령을 모니터링 및 제어할 수 있다. 고정익 무인항공기 비행운용 편리성을 위해 최적화된 소프트웨어를 설계하였으며 비상상황을 대비한 사용자 인터페이스 수동 입력 기능을 사용할 수 있도록 설계하였다. 고정익 무인항공기의 현재 상태정보(위치, 자세, 방위각)를 실시간 도시할 수 있으므로 임무 수행에 안정성을 확보하였고 이를 통해 적절한 시간에 원하는 영상자료 획득이 가능하다.

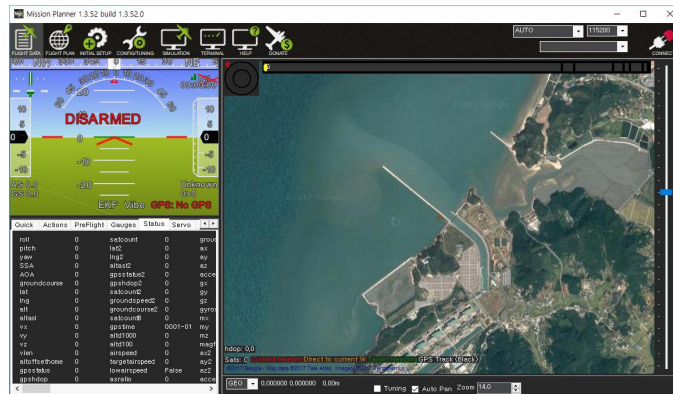


그림 46. 비행 모니터링 및 제어 소프트웨어

- 비행계획 및 항로 설정

2017년 9월 7일 영광 원자력 발전소 배수로 부근 해양환경 촬영을 위해 사전 비행계획 및 항로 설정을 수행하였다. 그림 47과 같이 영광 원자력 발전소 배수로 부근 2.5 × 2.5 km 영역에 대한 운항경로를 설정하였으며 운항고도는 500 m, 운항 거리는 약 16 km 로 설정하였다. 그림 47의 노란색 실선은 고정익 무인항공기의 실제 운항경로를 나타낸다. 초점거리 13 mm 열적외선 센서를 500 m 고도로 운항하였을 때 촬영 커버리지는 415 × 335 m로 형성되며, 2.5 × 2.5 km 영역에 대한 표층수온 분포도를 획득하기 위해 총 530 장의 열적외선 영상을 획득하였다. 이륙과 착륙은 수동으로 진행하였고 사전 계획된 약 16 km의 비행경로를 자동으로 운항하였으며 촬영된 열적외선 영상자료는 육지 및 건물을 제외한 해양과 방파제로만 이루어져 있다(그림 48).

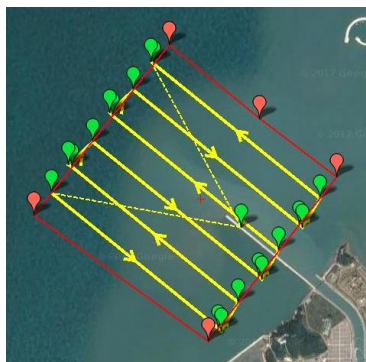


그림 47. 무인항공기 운항경로



그림 48. 이륙 전 무인항공기

라. 무인항공기 자료처리 방법

- 열적외선 센서 데이터 처리방법

열적외선 센서는 해양표층으로부터 반사된 복사에너지가 렌즈의 중심을 통과하여 센서에 중심투영 됨으로써 영상 데이터가 형성된다. 이 연구에 사용된 FLIR VUE PRO 센서는 자체적인 온도추정 알고리즘을 사용하여 대상체의 절대온도 값을 산출 가능하므로 획득된 온도 데이터의 추가적인 온도보정을 수행할 필요가 없다. 실제 영상에 투영되는 데이터(pixel)는 열적외선 센서와 렌즈 간의 거리, 센서와 렌즈가 이루는 각, 렌즈의 왜곡 등 다양한 요소에 의해 영향을 받으며 이는 3차원 점이 2차원 영상으로 투영될 때 오차의 요인으로 작용하게 된다. 열적외선 센서 내부 파라미터를 추정하는 행렬을 그림 49 와 같이 나타낼 수 있다.

- $U, V, S$ : 영상의 homogeneous 좌표
- $u_0, v_0$ : 센서의 주점
- $T$ : 지상좌표계와 센서좌표계의 원점거리
- $f_u, f_v$ : 카메라의 초점거리
- $R$ : 지상좌표계와 센서 좌표계의 회전 행렬
- $X^{(w)}, Y^{(w)}, Z^{(w)}$ : 지상좌표계상의 지상점

$$\begin{bmatrix} U^{(new)} \\ V^{(new)} \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & -f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^{(w)} \\ Y^{(w)} \\ Z^{(w)} \\ 1 \end{bmatrix}$$

그림 49. 센서 내부 파라미터 추정 행렬

획득된 열적외선 영상의 정확한 왜곡 및 기하보정을 위해 센서의 외부표정 파라미터 보정 과정이 필요하며, 이를 위해 센서와 GPS/INS 장비 사이의 기하학적 관계인 탑재변수를 결정하는 시스템 캘리브레이션 과정이 필요하다. 그림 50은 센서와 GPS/INS 장비 시스템에 대한 각각의 개별 좌표계를 정의하고 상대적인 관계를 나타낸다.

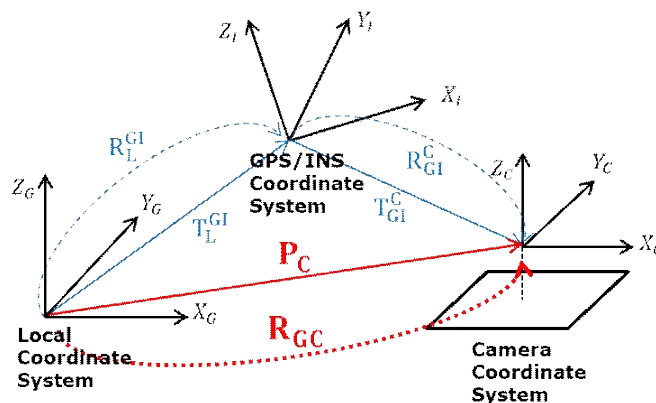


그림 50. 시스템 캘리브레이션의 각 요소별 개념도

마. KOMPSAT-3A 위성영상

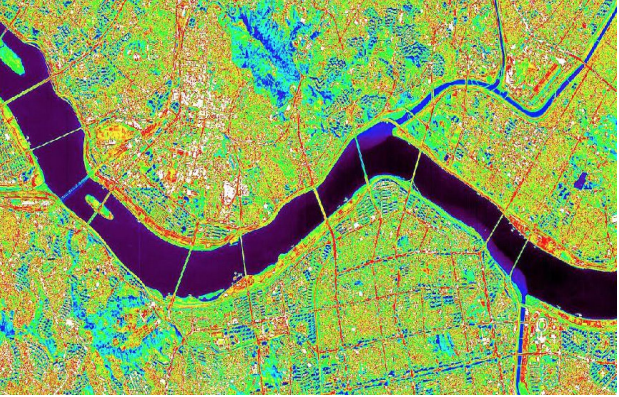
KOMPSAT-3A 다른 말로 다목적실용위성 아리랑3A 위성은 한국항공우주연구원에서 2015

년 3월 26일 발사된 전지구 관측위성이다(그림 51). KOMPSAT-3 기반으로 개발되어 향상된 해상도 0.55 m 급의 광학센서와 5 m 급의 적외선 센서를 탑재한 고성능, 고해상도 위성이며 KOMPSAT-3, 5와 서로 상호보완적으로 운용된다. 위성영상을 촬영함과 동시에 획득된 영상을 지상국으로 전송할 수 있으며 KOMPSAT-3A의 자세한 스펙과 샘플 영상을 표 28에 정리하였다.



그림 51. KOMPSAT-3A 인공위성

표 28. KOMPSAT-3A 스펙 및 샘플 영상

Parameter	KOMPSAT-3A	Sample image (Infrared)
Payload	EO, IR	
Altitude	528 km	
Inclination	97.513°	
Orbital period	95.2 minutes	
Orbit velocity	7.60 km/s	
Ground speed	7.02 km/s	
Revisit time	28 days	

#### 바. KOMPSAT-3A 자료처리 방법

절대온도 0 K(Kelvin) 이상의 모든 물체는 온도에 따른 복사에너지를 방출하며 이는 파장 대역과 온도에 따른 함수로써 그림 52와 같이 수식으로 나타낼 수 있다. KOMPSAT-3A 인공 위성은 약 3 ~ 5 um 파장대역을 이용하여 해양의 열적외선 영상자료를 획득 가능하며, 이때 획득되는 해양의 신호는 복사에너지 이므로 Plank's function을 이용하여 온도자료로 변환이 가능하다. 정확한 해양표층 온도 자료 추정을 위해 현장조사자료(부이, 선박 등)와 비교를 통해 관측지역에 적합한 해수온도 보정식을 산출 할 수 있다(그림 53).

$T$  ; temperature in Kelvin ( $^{\circ}\text{C} + 273.16$ )  
 $B_{\lambda}(T)$  ; the spectral radiance ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ )  
of a black body at temperature  $T(\text{K})$   
 $\lambda$  ; wavelength in  $\mu\text{m}$   
 $C_1$  ;  $1.19 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$   
 $C_2$  ;  $1.44 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

$$B_{\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left\{ \exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right\}}$$

그림 52. Planck's Function

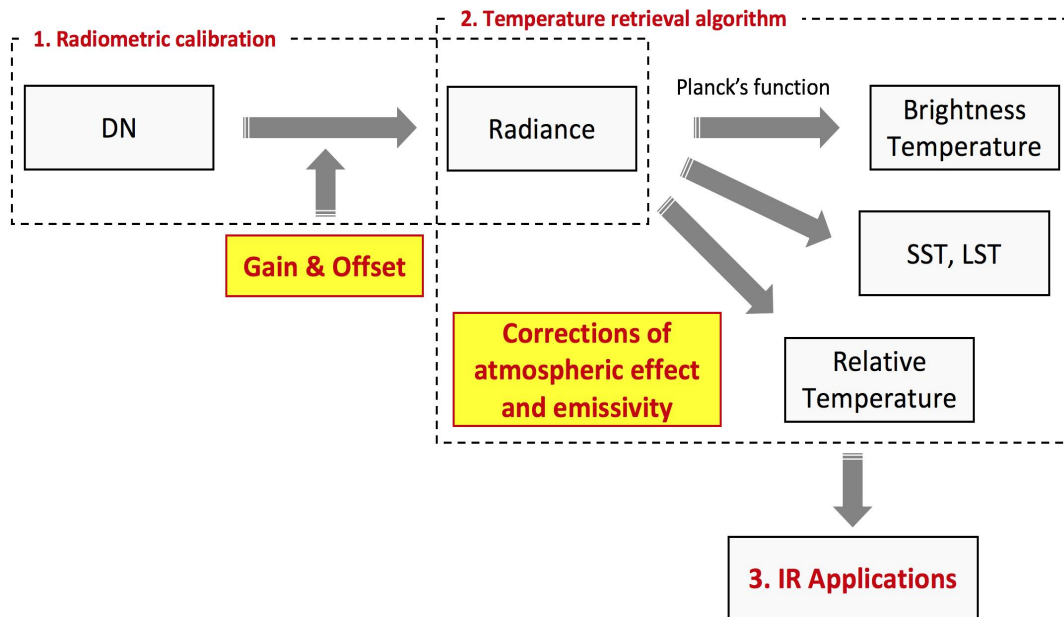


그림 53. KOMPSAT-3A 열적외선 영상의 자료처리 단계

### 3. 연구내용 및 결과

#### 가. 무인항공기에서 분석된 표층수온

##### (1) 무인항공기 시스템 내부 데이터

영광 원자력 발전소 배수로 해양표층수온 분포연구를 위해 고정익 무인항공기에 열적외선 센서를 탑재하여 2017년 9월 7일에 영상을 획득하였다. 오후 3시 19분 ~ 3시 40분 약 20분에 걸쳐 열적외선 영상을 획득하였으며, 촬영 고도는 500 m, 비행속도는 12 m/s 로 유지하였다. 고정익 무인항공기 플랫폼에 사용된 GPS/INS 센서는 저가형으로 무인항공기의 위치(x, y, z) 및 자세(roll, pitch, yaw) 정보가 정확하지 않으며, 실제 위치 및 자세 정보를 획득하는 시점과 저장된 데이터의 시간이 정확히 일치하지 않을 경우가 크다. 이와 같은 이유로 인해 획득된 열적외선 데이터는 기하학적 왜곡이 증가하며 중심 투영된 열적외선 영상에 인위적인 기복변위(relief displacement)가 발생할 가능성이 증가하게 된다. 영광 원자력 발전소 열적외선 영상 획득 당시의 500 m 상공의 풍속은 약 5 m/s 이상의 높은 풍속이 형성되어 있었으며, 정확하지

않은 자세정보 센서와 풍속의 영향을 고려하였을 때 최종적으로 기하보정된 열적외선 영상 데이터의 기하오차는 증가하게 된다.

(2) 무인항공기로 획득한 열적외선 영상

열적외선 센서로부터 탐지되는 데이터는 해양 자체의 내부온도에 의해 방출되는 복사에너지이며 센서 자체의 알고리즘을 통해 절대온도 값 확인이 가능하다. 그림 54는 고정익 무인항공기로 획득한 2장의 열적외선 개별 영상을 나타냈으며, 방파제 및 선박의 위치를 60 cm 해상도로 분석하였다. 그림 54 왼쪽 영상의 중간 영역은 영광 원자력 발전소 배수로에 존재하는 방파제 위치이며 방파제 왼쪽 해양은 발전소로부터 유출된 온배수 영역이다. 방파제 왼쪽 해양의 표층수온 분포는 20° ~ 22° 로 형성되어 있으며, 방파제 오른쪽 해양은 17° ~ 19°, 방파제 지형물은 25° ~ 27° 로 확인한 온배수 거동현상에 따른 온도 분포를 관찰할 수 있다.

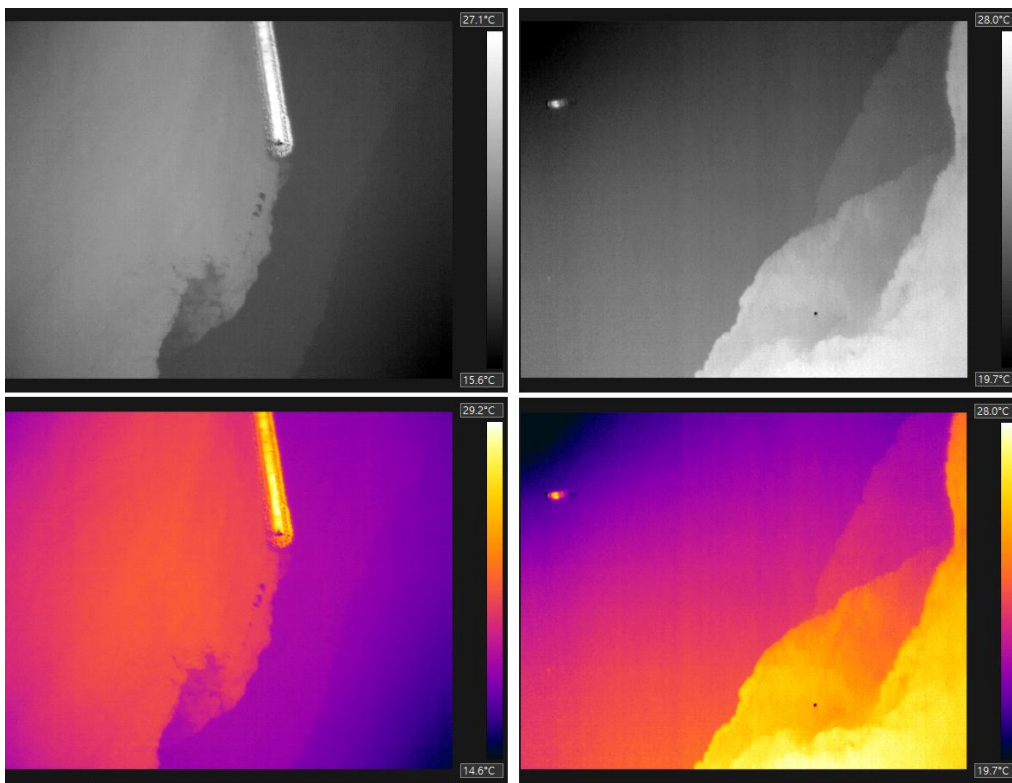


그림 54. 고정익 무인항공기를 이용하여 촬영된 열적외선 영상자료

그림 55 과 그림 56 는 GPS/INS 데이터를 활용하여 열적외선 영상을 기하보정한 결과를 나타내었으며 그림 55의 경우 방파제 일부 영상을 나타냈다. GPS/INS 데이터의 신뢰도는 GPS/INS 센서 자체의 성능으로 인하여 제공되는 위치, 자세정보의 정확도와 정밀도로 평가될 수 있다. 열적외선 센서와 GPS/INS 상호간의 데이터 취득 주기가 다르기 때문에 데이터 동기화 시 센서가 촬영된 동시간대의 GPS/INS 데이터가 존재하지 않을 수 있기 때문에 기하보정 정확도가 감소할 경우가 크다. 이와 같은 이유로 인해 획득된 열적외선 데이터의 기하오차가 발생하였으며, 그림 55 오른쪽 영상 방파제 부분을 통해 문제점을 확인할 수 있다. 그림 56은 영광 원자력 발전소 배수로 부근 2.5 × 2.5 km 영역에 대한 열적외선 영상 기하보정 결과를 나타낸 자료이며, 위에서 언급한 GPS/INS 데이터 기하오차 문제점 외에 열적외선 영상의 방

사보정 문제로 인한 영상 밝기 차이가 발생하는 문제점을 확인하였다. 열적외선 파장대역은 태양복사에너지의 반사 영향을 받기 때문에 낮 영상의 경우 반사 신호를 보정해야만 정확한 온도추정을 수행할 수 있다. 지표복사율의 범위가 열적외선에 비하여 크기 때문에 온도 추정 시 복사율 오차에 다른 온도 오차가 크게 발생하게 된다.



그림 55. 영광 원자력발전소 배수로 고정익 무인항공기 일부 열적외선 영상

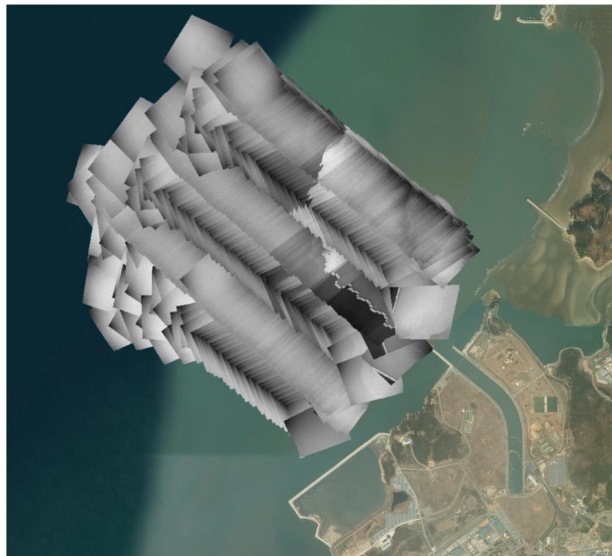


그림 56. 영광 원자력발전소 배수로 고정익무인항공기 열적외선 전체 영상

나. KOMPSAT-3A에서 분석된 표층수온

- 현장부이자료와의 비교

KOMPSAT-3A 인공위성이 2017년 9월 8일 13시 32분 영광 원자력 발전소 주변 해안에 대해 적외선 데이터를 획득하였으며, 이와 동시에 고정식 부이 수온 자료를 획득하였다(그림 57). 표 29 는 KOMPSAT-3A 와 고정식 부이 자료의 표층수온 데이터를 비교한 결과이며 총 5개 부이 정점에 대해 비교를 수행하였다. KOMPSAT-3A 인공위성 자료로 분석된 열적외선 영상에서 해양표층수온이 약  $-1^{\circ} \sim -2^{\circ}$  로 저추정 되었으며 추가적인 알고리즘 개선이 필요하다고 판단된다.

표 29. 2017년 9월 8일 13시 30분 경 KOMPSAT-3A, 부이 자료 비교

정점명	위도	경도	KOMPSAT-3A	고정식 부이
ST04	35.390	126.353	22.880 °	24.473 °
ST05	35.404	126.367	23.350 °	24.892 °
ST06	35.415	126.385	23.662 °	25.648 °
ST08	35.442	126.409	24.217 °	25.656 °
ST10	35.478	126.410	22.901 °	23.997 °

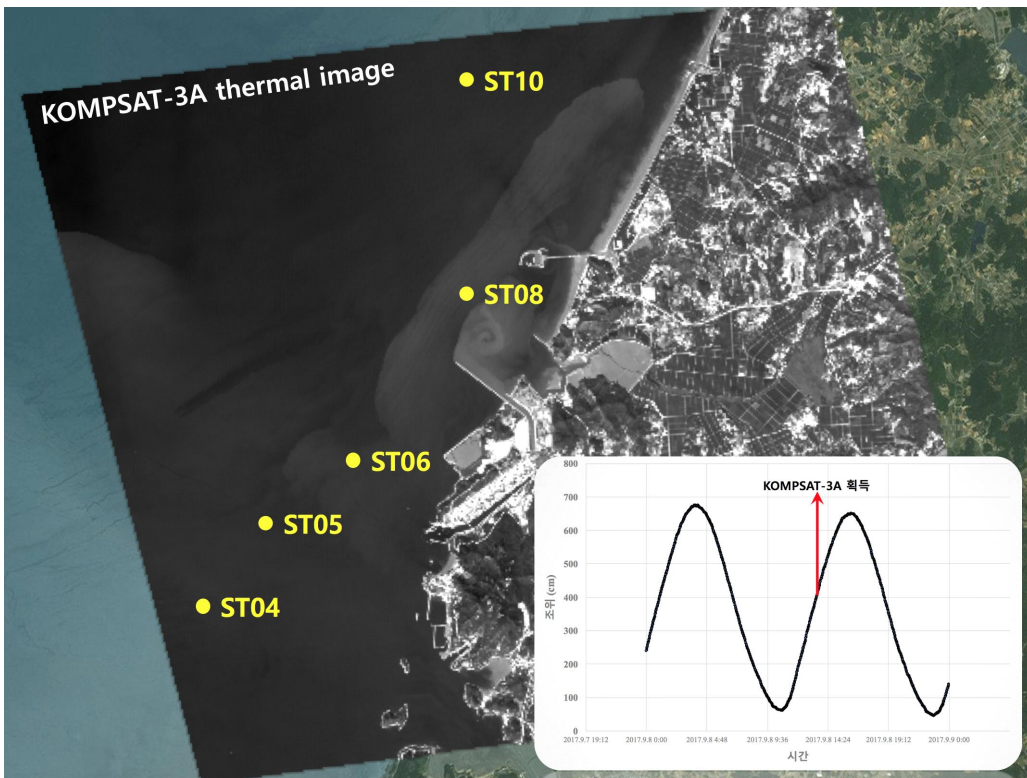


그림 57. KOMPSAT-3A 데이터 검증을 위한 정점위치

4. 결론

○ 광범위 공간에 대해 무인항공기 영상 획득 가능

고정익 무인항공기 직접 제작으로 인해 기존의 무인항공기(회전익) 대비 운항 가능한 시간이 2~3배 증가하였으며, 1회 비행에 약 2시간 촬영이 가능한 플랫폼을 구축하였다. 위성영상

대비 높은 해상도로 인해 미세한 온·배수 거동특성 탐지 가능하며 지상제어시스템을 통해 실시간으로 급변하는 해양표층수온 거동을 탐지하고 영상 획득이 필요한 정점으로 즉시 이동가능 하도록 설계하였다.

#### ○ 열적외선 무인항공기 시스템 구축

광학, 멀티스펙트럴, 하이퍼스펙트럴 센서와 더불어 활용 가능한 무인 열적외선 영상 획득 시스템을 구축하였다. 획득한 열적외선 영상의 기하보정을 위해 GPS/INS 시스템을 결합한 무인플랫폼을 구축하였으며 영상자료와 GPS/INS 센서와의 동기화 시스템을 구축하였다. 무인항공기 시스템은 전천후 관측시스템으로 설계되었으며 획득된 영상은 위성영상에 비해 일시와 날씨 영향이 적으므로 적시에 해양관측이 가능하며 저비용 고효율 시스템으로 기성품 대비 비용절감으로 연구효율이 증가할 것으로 판단된다. 인공위성에 비해 상대적으로 관측범위가 좁은 무인플랫폼용 열적외선 센서는 넓은 해양환경의 시계열적인 분석에는 한계가 존재하지만 고해상도 열적외선 영상 획득 가능성 측면에서는 큰 장점이 존재한다.

### 5. 연구수행 결과의 활용방안 및 기대효과

#### 가. 활용방안

높은 공간해상도의 해양 열적외선 영상은 해양환경 변화를 단기 또는 장기적으로 모니터링 하기 위한 기초자료로 활용될 가능성이 있다. KOMPSAT-3A 탑재된 인공위성 열적외선 센서와 더불어 해상도가 높은 무인항공플랫폼에 탑재된 열적외선 센서는 해수표층수온도 추출 및 연안 모니터링 등 의미 있는 연구에 많은 활용이 될 것으로 판단된다. 이러한 고해상도 열적외선 센서 개발을 통해 저비용 고효율의 센서를 구축한다면 다양한 연구자들 및 기관에서 보다 쉽게 접근하여 환경변화 연구에 적극 활용될 가능성이 높다.

#### 나. 기대효과

##### (1) 기술적 측면

무인항공기 열적외선 시스템 적용을 통해 해양표층수온 탐지 및 모니터링 연구기술향상 및 지상제어시스템 설계/제작에 대해 전반적인 우위 선점이 가능하다. 무인항공기, 인공위성 열적외선 영상자료를 바탕으로 해양의 시공간자료를 추출하고 모델링 기술과 연계하여 해양 환경의 시·공간적 변화 현상을 예측함으로써 국내 해양환경의 변화를 단기 또는 장기적으로 모니터링하기 위한 기초자료로 활용 가능성이 높다.

##### (2) 경제, 산업적 측면

객관적인 열적외선 영상자료 제공을 통해 해양에서의 자연재해를 경감하고 냉·온배수 거동에 따른 해양생물 거동 변화에 신속한 대응 등 위기관리 능력 향상을 통해 국민 보건과 건강을 증진, 해양생태계 보호복원, 생물다양성을 보전하는 등 국가 경제성장과 국민 생명·재산 보호에 기여할 수 있다. 정밀도 높은 해양 열적외선 영상처리 기술 개발을 통해 해양의 효율적인 관리, 해양환경 복원 방안수립 지원, 해양환경 변화 및 환경영향평가에 있어 과학적 근거자료로 활용될 수 있다.



### (3) 사회적 측면

해양환경의 객관적인 기능평가 및 효율적인 관리방안 제시로 해양의 개발 및 보전에 관한 신뢰성 있는 정책적 대안제시로 소모적인 갈등 완화 및 예산 낭비요소 경감, 국민들에게 균형 잡힌 환경지식 전달 할 수 있다. 해양의 인위적 변화와 이에 따른 주변 해양변화 간의 상호관계, 해양 수치모델을 통한 검증 및 기후변화에 의한 영향규명 등 향후 기후변화분야 및 해양환경 보전기술에 기본 자료로 사용될 수 있다는 측면에서 해양 분야의 전문연구 인력을 보유한 한국해양과학기술원의 역량을 최대한 발휘하고 그 고유기능을 발전시킬 수 있는 분야이다.

#### 6. 추가연구의 필요성 및 향후개선에 대한 의견

##### ○ 고정익 무인항공기 시스템 개선

촬영된 열적외선 영상의 기하오차 감소를 위한 정확한 GPS/INS 센서 개선이 필요하며, 개선이 될 고정익 플랫폼에 시스템에 최적화를 수행할 필요가 있다. 고성능 GPS/INS 센서를 이용한 기하보정에 한계가 존재할 경우 고성능 Real Time Kinematic-GPS 추가 장착 또는 지상기준점 활용을 통해 개선 가능할 것으로 판단된다.

##### ○ 위성영상 열적외선 산출 알고리즘 개선

KOMPSAT-3A 위성의 한반도 관측 임무 시 관측 각이 최대 45도까지 변하는 점을 고려하여 위성 촬영 각도에 따른 보정모델 개선 등 축적된 관측 자료와 비교를 통하여 적합한 해양 수온 보정식 산출연구가 필요하다. 단일채널 기반 알고리즘의 한계로 인해 대기보정자료 입력이 필수적이며 기존의 열적외선 추정 알고리즘에서는 현장 관측자료가 필요하였으나, 이를 개선시켜 최근 추세인 수치예보모델을 적극 활용할 필요가 있다고 판단된다.

## 제4절 수치모형을 이용한 온배수의 이동·확산 모의

### 1. 연구개요

온배수는 해수의 열 균형을 교란시켜 주변 환경 및 생태계에 악영향을 초래할 수 있다. 이를 과학적으로 규명하기 위한 장기적 실험, 현장 모니터링에 대한 데이터가 부족한 상황이지만 배출 냉온배수의 영향을 정량적으로 파악하기 위한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구는 온배수의 이동·확산 모형 구축을 통한 냉·온배수 영향 예측 기술을 확보하고, 냉각수 배출로 인한 환경적 영향을 최소화할 수 있는 방안을 모색하기 위해 수치모델링을 수행하였다. 향후 수온변화 예측의 확대를 통한 우리나라의 냉·온배수 관리제도 개선을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 2. 수치모델의 개요

#### 가. EFDC 모델 개요

유동 및 온배수 확산 수치실험에 사용된 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)\_Explorer 모델은 연안, 하구, 호소, 습지, 저수지 등의 유동 및 물질수송을 모의할 수 있는 3차원 수치모델링 시스템이다. 미국 VIMS(Virginia Institute of Marine Science)에서 개발되어 DSI(Dynamic Solution-International)에서 지속적으로 개선되고 있으며, 미국 환경청(US EPA) 공인 모델로 지정되어 있다.

나. 기본방정식

EFDC 모델은 연속방정식과 수평·수직방향 운동방정식, 열·염보존 방정식, 그리고 퇴적물을 포함한 물질보존방정식들로 구성되어 있다. 열·염보존 방정식은 밀도차에 의한 경압력에 의하여 운동방정식과 연계되어 있다.

이 모델은 수직방향으로  $\sigma$ 좌표계를 사용하고, 수평방향으로는 직선 또는 곡선 직교좌표계를 사용한다. 연직 난류확산계수의 산정에는 Mellor and Yamada(1982)의 level 2.5 turbulence closure scheme을 사용하며, 수평 난류확산계수는 Smagorinsky type diffusivity를 사용한다. 질량보존기법을 사용한 조간대 처리가 가능하다(Hamrick, 1994; Hamrick and Moustafa, 2001). 유체 역학적 가정과 Boussinesq 근사를 적용하면 수심 적분된 기본방정식은 다음과 같다. 여기서  $\sigma$ 는 무차원 연직 좌표이며  $z$ 로 표기하였다. 여기서  $\sigma = (z - \eta)/(h + \eta)$  이다.

\* 연속방정식

$$\frac{\partial m\zeta}{\partial t} + \frac{\partial m_y Hu}{\partial x} + \frac{\partial m_x Hv}{\partial y} + \frac{\partial mw}{\partial z} = 0$$

\* 운동방정식

$$\frac{\partial mHu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Huu) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvu) + \frac{\partial}{\partial z}(mwu) - \left( mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) Hv$$

$$= -m_y H \frac{\partial}{\partial x}(g\zeta + p) - m_y \left( \frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( mH^{-1} A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_v$$

$$\frac{\partial mHv}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Huv) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvv) + \frac{\partial}{\partial z}(mwv) + \left( mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) Hu$$

$$= -m_x H \frac{\partial}{\partial y}(g\zeta + p) - m_x \left( \frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( mH^{-1} A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gHb$$

\* 상태방정식

$$\rho = \rho(p, S, T)$$

\* 물질보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(mHS) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y HuS) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x HvS) + \frac{\partial}{\partial z}(mwS) = \frac{\partial}{\partial z} \left( mH^{-1} A_b \frac{\partial S}{\partial z} \right) + Q_S$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(mHT) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y HuT) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x HvT) + \frac{\partial}{\partial z}(mwT) = \frac{\partial}{\partial z} \left( mH^{-1} A_b \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_T$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(mHC) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y HuC) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x HvC) + \frac{\partial}{\partial z}(mwC)$$

$$= \frac{\partial}{\partial z} \left( mH^{-1} A_b \frac{\partial C}{\partial z} + \omega C \right) + mHR_c + Q_C$$

여기서,  $u, v, w$  :  $x, y, z$  방향의 유속

$m_x, m_y, m$  : 수평 방향으로의 scale factor

H	: 총 수심(=h+ζ)
h	: 기준면하 수심
ζ	: 기준면상 수위
p	: 수심 z에서 기준수압(ρ <sub>0</sub> gH(1-z))과의 차를 ρ <sub>0</sub> 로 나눈 값
f	: Coriolis parameter
A <sub>v</sub>	: 운동량의 수직 난류확산계수
A <sub>b</sub>	: 열·염의 수직 난류확산계수
Q <sub>u</sub> , Q <sub>v</sub>	: 운동량의 source-sink 항
ρ	: 밀도
T, S	: 수온, 염분
b	: 부력
ω	: 침강속도
C	: 용존 또는 부유물질의 농도
Q <sub>T</sub> , Q <sub>S</sub>	: 수평 난류확산 및 수온과 염분의 source-sink 항
R <sub>C</sub> , Q <sub>C</sub>	: 수평 난류확산 및 생화학적 또는 외부 source-sink 항

#### 다. 수평난류 확산항

수평 난류 확산항을 통해 모형 격자보다 작은 규모의 난류 혼합을 표현하며, 식물군락에 의한 저항, 파랑의 영향 등도 고려할 수 있다. 운동량과 열·염의 수평 난류확산항은 각각 다음과 같다.

$$Q_u = \frac{\partial}{\partial x} (2A_M \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} [A_M (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})]$$

$$Q_v = \frac{\partial}{\partial y} (2A_M \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} [A_M (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})]$$

$$Q_{T,S,C} = \frac{\partial}{\partial x} [A_H \frac{\partial (T,S,C)}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [A_H \frac{\partial (T,S,C)}{\partial y}]$$

여기서,  $A_M$  : 운동량의 수평 난류확산계수

$A_H$  : 열·염의 수평 난류확산계수

수평난류 확산계수는 격자 크기와 유속 경사에 의해 결정되는 Smagorinsky식을 통해 다음과 같이 계산되며, 일반적으로 운동량의 수평 난류확산계수는 다음과 같다(Smagorinsky, 1963).

$$A_M = C \Delta x \Delta y \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2}$$

여기서, 상수 C는 0.10 ~ 0.20의 값이 사용되며, 계산격자가 충분히 작은 경우 무시될 수 있다 (Oey et al., 1985a, b). Smagorinsky 식에서는 격자 크기가 작아질수록, 그리고 유속 경사가

작을수록 수평 난류확산계수가 감소한다(Mellor, 1998).

라. 경계조건

\* 수평 경계조건

개방경계의 접선 방향 유속 성분은 0으로 지정된다. 유동이 모델영역 외부로 전파될 때는 개방경계면에 직각인 속도 성분을 운동방정식에서 이류항과 수평확산항을 무시한 나머지 항들만으로 계산한다. 육지에 직각방향인 유속 성분은 없다고 가정한다.

\* 수직 경계조건

해수면에서 연직 방향의 유속은 없는 것으로 한다. 그리고 바람응력에 의한 수표면 전단응력은 다음과 같다.

$$K_v H^{-1} \partial_z (u, v)_{z=1} = (\tau_{sx}, \tau_{sy}) = c_s \sqrt{U_w^2 + V_w^2} (U_w, V_w)$$

$$c_s = 0.001 \rho_a \rho_w^{-1} (0.8 + 0.065 \sqrt{U_w^2 + V_w^2})$$

여기서,  $U_w, V_w$  : x, y 방향 풍속(수표면 10 m 상)  
 $\tau_{sx}, \tau_{sy}$  : 바람 응력  
 $c_s$  : 바람 응력계수  
 $\rho_a$  : 공기 밀도  
 $\rho_w$  : 해수 밀도

해저면에서도 해저면에 수직인 방향의 유속은 0으로 지정된다. 저면 전단응력은 다음과 같다.

$$K_v H^{-1} \partial_z (u, v)_{z=0} = (\tau_{bx}, \tau_{by}) = c_b \sqrt{U_1^2 + V_1^2} (U_1, V_1)$$

$$c_b = (\kappa^{-1} \ln(\Delta_1 H / z_0))^{-2}$$

여기서,  $C_b$  : 저면 마찰계수  
 $\kappa$  : von Karman 상수  
 $\Delta_1$  : 저층 무차원 두께  
 $z_0$  : 조도

해양-대기 열교환은 일반적으로 기온이 높을수록 해양으로 유입되는 열에너지가 증가하고, 기온이 낮을수록 해양으로부터의 열 유출이 증가한다. 해양-대기간 열 교환에는 기온뿐만 아니라 습도, 풍속, 이슬점 온도 등 여러 가지 기상요소들이 복합적으로 작용한다. 기상조건에 따른 해양-대기간 상호 작용에 의한 열 교환량은 다음과 같다.

$$Q_T = \frac{\Delta H}{\rho_s c_p h_s}$$

여기서,  $\rho_s$  : 표층 해수 밀도  
 $c_p$  : 해수의 비열(열용량)  
 $h_s$  : 표층 수직 혼합층의 두께  
 $\Delta H$  : 해양-대기 경계면에서 단위 면적당 열 교환율  
 위 식에서  $\Delta H$  는 아래와 같이 정의된다.

$$\Delta H = (H_s - H_{sr}) + (H_a - H_{ar}) - (H_{br} + H_e + H_c)$$

여기서,  $H_s, H_{sr}$  : 해양으로 입사하거나 반사되는 태양 단파 복사열  
 $H_a, H_{ar}$  : 해양으로 입사하거나 반사되는 대기 장파 복사열  
 $H_{br}$  : 해양으로부터 유출되는 장파 복사  
 $H_e, H_c$  : 증발과 전도에 의한 열수지

$\Delta H$ 를 계산하기 위한 여러가지 경험식(bulk formula) 중 평형온도 개념을 도입한 Edinger et al.(1974)의 선형식을 이용하였다.

$$Q_T = \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\Delta H}{\rho_s c_p h_s} = \frac{K(T_e - T)}{\rho_s c_p h_s}$$

여기서,  $T_e$  : 평형온도  
 $K$  : 열 교환계수  
 $T$  : 표층 해수온도

Edinger et al.(1974)의 선형식은  $T_e$ 와  $K$ 라는 두 개의 변수를 이용하여 해수면을 통한 해양-대기간 열 교환을 설명한다.  $T_e$ 는 가상적인 온도로서 풍속, 태양 단파 복사열, 기온, 습도, 이슬점 온도 등이 변하지 않을 경우 궁극적으로 표층 해수온도( $T$ )가 도달하는 온도로 기온과 같다.  $T_e$ 와  $T$ 가 같으면 해수면을 통한 열 교환이 없으므로 표층 수온이 변하지 않는다는 것을 의미하며,  $T_e > T$  인 경우는 해수면을 통해 대기에서 해양으로의 열 이동을 의미하고,  $T_e < T$  인 경우에는 해양에서 대기로의 열 이동을 의미한다. 또한,  $K$ 는 온도  $T$ 가  $T_e$ 에 얼마나 빠르게 도달하는지를 결정하는 표층 열 교환계수로서  $K$ 가 클수록 수온  $T$ 가  $T_e$ 에 빨리 도달하고,  $K$ 가 작을수록 그 반대의 효과를 나타낸다. Edinger et al.(1974)의 선형식에서  $T_e$ 와  $K$ 값을 추정하기 위해 제시한 방법은 아래와 같다.

$$T_e = \frac{H_s + H_a - 1801}{K} + \frac{(K - 1.57)(0.26 T_a + \beta \times T_d)}{K(0.26 + \beta)}$$

$$K = 15.7 + (0.26 + \beta)f(W)$$

여기서,  $T_a$  : 기온

Td : 이슬점 온도

W : 풍속

$$\beta = 0.255 - 0.0085 T_* + 0.000204 T_*^2 ,$$

$$T_* = \frac{T_e + T_d}{2} , \quad f(W) = 70 + 0.7 \times W^2$$

#### 마. 수치해법

기본 방정식의 수치해법은 유한차분법(finite difference method)과 질량 및 부피 보존을 위한 유한체적법(finite volume method)을 사용하며, 수심, 압력, 해저면 경사의 차분화시 2차 정확도를 갖는 중앙차분법(centered-discretization)을 사용한다. 운동방정식에서 Coriolis force항과 curvature항은 2차 정확도를 갖는 에너지 보존 기법(energy conserving scheme)을 사용하며(Arakawa and Lamb, 1977), 빠르게 전파되는 외부 중력파를 모의하는 외부 모드(external mode) 계산시 수평 방향으로, 수직적 구조를 모의하는 내부 모드(internal mode) 계산시 수직 방향으로 음해법(implicit method)을 적용하므로 계산 효율이 높다. 시간 미분항 역시 2차 정확도를 갖는 three-time-level, leap-frog 기법과 반음해법(semi-implicit method)을 적용한다. three-time-level 기법의 사용시 발생하는 time step splitting을 억제하기 위해 two-time-level의 trapezoidal step을 첨가하는 trapezoidal leap-frog 기법을 사용한다.

질량 보존방정식의 이류항을 전방차분법(upwind difference)으로 해석하면 안정적인 결과를 주고 음의 농도를 발생시키지 않는 장점이 있으나, 수치적 확산이 과다하게 발생하며 공간적으로 1차의 낮은 정확도를 갖는 단점이 있다. 반면에 중앙차분법으로 해석하는 경우에는 2차의 정확도를 가지지만 농도 경사가 큰 해역에서 불안정한 결과를 나타내어 음의 농도가 발생할 수 있는 단점이 있다. 따라서 본 모델에서는 정확도를 높이고 음의 농도가 발생하지 않는 MPDATA(Smolarkiewicz and Clark, 1986) 기법을 사용한다. MPDATA 기법은 1차의 정확도를 갖는 전방차분법을 사용하는 첫 번째 step과 수치적 확산을 줄이기 위한 두 번째 step으로 구성되어 있으므로, 시공간에 대하여 적어도 2차의 정확도를 가지며, 시간에 대하여 최대 3차, 공간에 대하여 최대 5차의 정확도까지 가질 수 있다. 본 모형은 staggered grid에 속하는 Arakawa C grid를 사용하며, 동쪽으로 갈수록 x가, 북쪽으로 갈수록 y가, 수직 위쪽으로 갈수록 z가 증가하는 좌표계를 사용한다.

### 3. 연구내용 및 결과

#### 가. 광역의 운용해양학모델 결과를 이용한 영광해역의 수치모델 구축

##### (1) 모형 구축

모델영역은 사업지역을 중심으로 동서방향으로 28 km, 남북방향으로 35 km이다. 발전소 주변의 해안선과 해저지형을 현실적으로 재현하면서 계산의 효율성을 높이기 위하여 가변 격자 체계를 사용하였다. 발전소와 취·배수구 인근은 최소 100 m 크기의 격자를 사용하였다. 계산에 사용된 유효 수평 격자수는 44,725개이다. 수직적으로는 시그마 좌표계를 사용하였고, 총 11개의 층으로 구성하였다. 수직층의 두께는 첫 번째층에서 세 번째층까지 각각 전체의 2, 3, 5%로 설정하였고, 나머지 8개 층은 동일하게 설정하였다.

모델의 해안선 위치와 각 격자의 수심은 국립해양조사원의 최신 수치해도를 기반으로 입력하였으며, 모델에 입력된 격자망과 수심을 그림 58과 그림 59에 제시하였다.

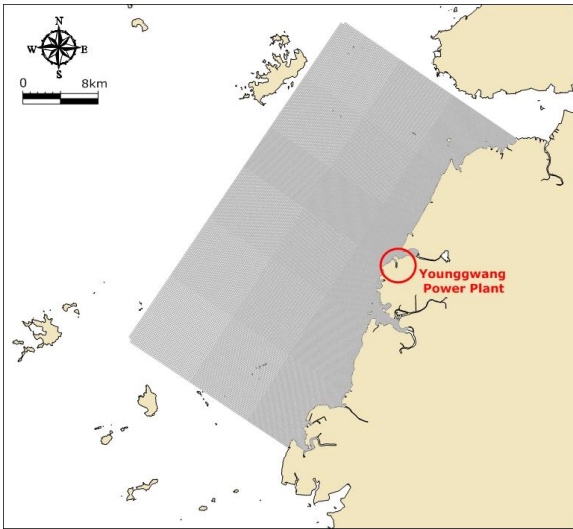


그림 58. 모델 격자망도

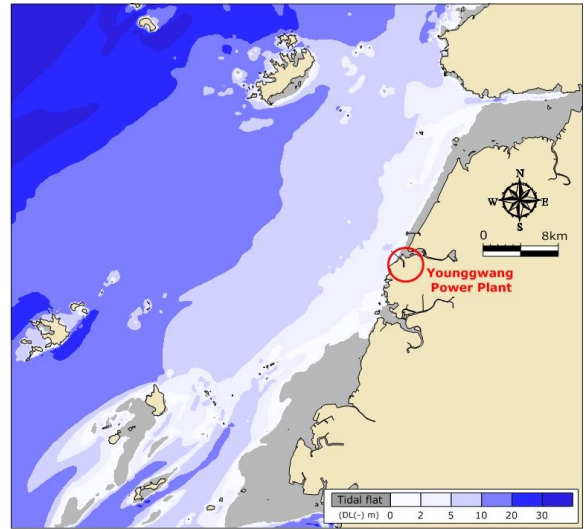


그림 59. 모델 수심도

## (2) 실험 조건

### (가) 초기 조건

계산 초기에는 전 계산영역의 조위와 유속을 0으로 하는 cold start를 부여하였으며, 이 때 조위는 평균해면 (M.S.L) 기준이다. 수온과 염분의 초기조건은 한국해양과학기술원(KIOST)의 운용해양예보시스템(KOOS)에서 제공하는 2017년 2월 15일의 수온·염분 자료를 입력하였으며, 3월 1일부터 4월 15일까지의 결과를 분석하였다.

### (나) 개방경계 조건

개방경계의 조석은 한국해양과학기술원(KIOST)의 운용해양예보시스템(KOOS)의 결과를 이용하여 주요 5개 분조(M2, S2, K1, O1, N2)의 조화상수를 합성하여 매 계산시간마다 입력하였다. 개방경계의 격자별 조화상수는 기존에 관측된 조석, 조류 자료를 기초로 보정과정을 거쳐 결정하였다. 수온과 염분의 개방경계 조건 또한 운용해양예보시스템(KOOS)에서 계산된 결과를 입력하였다. 취수량은 설계치 345 m<sup>3</sup>/s 및 2월 15일에서 4월 1일까지 한국수력원자력에서 제공한 실시간 취수량의 평균치 108.8 m<sup>3</sup>/s를 배수하였다. 배수량은 취수량과 동일한 유량을 적용하였으며, 배수온은 취수온에 설계치 8.59 °C를 상승시켰다.

### (다) 해양-대기 열교환

전술한 Edinger의 선형식을 사용하여 해양-대기간 열 교환조건을 적용하였다. 온배수 확산 및 재순환 검토를 위하여 준계 평균치 평형온도( $T_e$ )와 열교환계수( $K$ )를 각각 9.0 °C,  $4.60 \times 10^{-6}$  W/m<sup>2</sup>로 입력하였다.

### (라) 계산시간 간격

계산시간 간격은 CFL 조건을 만족하도록 3초로 설정하였다.

나. 현장 관측 결과를 이용한 수치모델의 검증과 보정

1개의 조석, 2개의 조류 및 3개의 수온 관측 정점 자료를 이용하여 보정 및 검증을 수행하였다. 모델 보정 및 검정시 사용된 조석 및 조류 정점의 개요를 표 30에, 위치를 그림 60에 제시하였다.

표 30. 모델 보정 및 검증 개요

항목	정점	관측위치		관측기간	출처
조석	YG(영광)	37-25-34 N	126-25-14 E	2016.01.01~12.31	국립해양조사원 (KHOA)
조류	07JB06	35-27-22 N	126-19-39 E	2007.09.13~10.11	
	07JB08	35-21-17 N	126-13-32 E	2007.09.13~10.13	
수온	Intake	35-24-18 N	126-24-30 E	2017.03.01~03.31	한국수력원자력 (KHNP)
	Outfall	35-25-34 N	126-25-14 E		
	Buoy	35-26-03 N	126-24-30 E	2017.03.31~04.16	한국해양과학기술원 (KIOST)

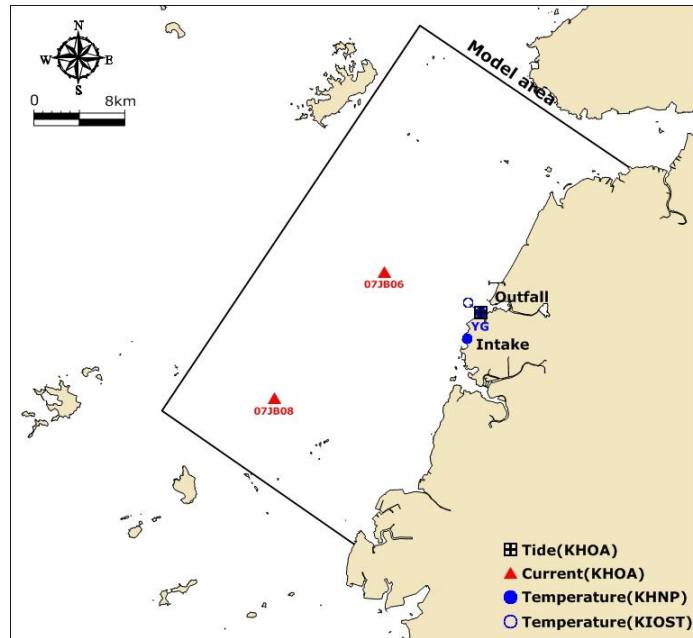


그림 60. 보검증 위치도

(1) 조석

모델 영역에 위치하는 1개 조석 정점에서 관측한 결과와 모델 결과를 조석 조화분석하여 주요 5개 분조의 진폭, 지각, 진폭에 대한 오차(Error) 및 절대상대오차(Absolute relative error: ARE), 그리고 위상에 대한 오차를 표 31에 제시하였다. 절대상대오차(ARE)와 오차(Error)는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{ARE(Absolute relative error)} = \left| \frac{\text{모델치} - \text{관측치}}{\text{관측치}} \right| \times 100$$

$$\text{Error} = \text{모델치} - \text{관측치}$$



관측치와 모델치의 주요 5개 분조를 이용하여 재구성한 시계열을 그림 61에 제시하였다. 조석 조화상수 중 진폭의 오차는 0.4 cm 이하이며, 지각의 오차는 0.4°이하이다. 모델치와 관측치의 조석 조화상수 및 조석 시계열을 비교한 결과, 모델이 대상 해역의 조석을 잘 재현하고 있음을 보여준다.

표 31. 조석 검정 결과

분조	진폭(m)				지각(°)			
	관측	모델	Error	ARE(%)	관측	모델	Error	ARE(%)
M <sub>2</sub>	2.022	2.022	0.000	0.00	70.9	71.0	0.1	0.14
S <sub>2</sub>	0.771	0.772	0.001	0.13	122.9	123.0	0.1	0.08
K <sub>1</sub>	0.334	0.334	0.000	0.00	273.1	273.1	0.0	0.00
O <sub>1</sub>	0.258	0.262	0.004	1.55	233.8	233.8	0.0	0.00
N <sub>2</sub>	0.371	0.372	0.001	0.27	49.5	49.9	0.4	0.81

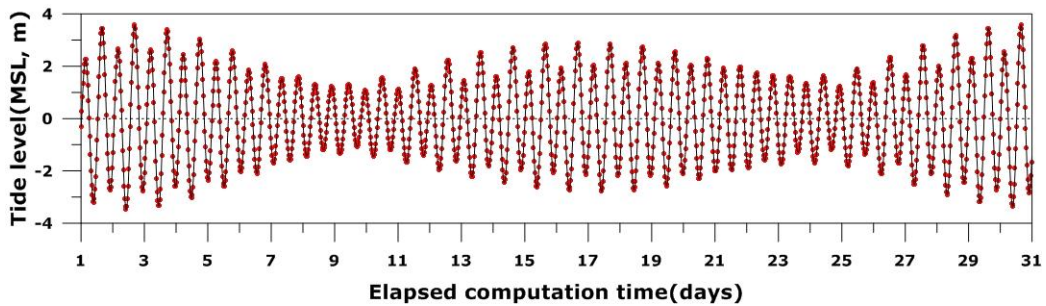


그림 61. 관측치와 모델치 조위 재구성 시계열

## (2) 조류

조류 2개 정점의 관측 결과와 모델결과를 표 32에, 관측 정점을 그림 60에 제시하였다. 제시된 결과는 동방과 북방 성분으로 구분하여 조화분석한 후, 주요 5개 분조의 진폭, 지각, 진폭에 대한 오차(Error)를 표 32에 제시하였다. 발전소 주변해역은 반일주조 성분이 강하며, 관측 조류의 M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub> 분조의 동방성분 진폭은 각각 50 cm/s, 30 cm/s 내외이고, 북방 성분 진폭은 각각 30 cm/s, 15cm/s 내외이다. M<sub>2</sub> 분조의 조화상수 중 동방 성분 진폭의 오차는 -0.5~2.9 cm/s의 범위로 오차 평균은 -1.4 cm/s이며, 지각의 오차는 -9.2~-0.1°의 범위로 오차 평균은 -4.6°이다. 북방 성분 진폭의 오차는 2.7~3.8 cm/s의 범위로 오차 평균은 3.3 cm/s이며, 지각의 오차는 -16.0~-8.3°의 범위로 오차 평균은 -12.2°이다. 관측치와 모델치의 주요 5개 분조를 이용하여 재구성한 시계열을 그림 62에 제시하였다. 모델치와 관측치의 조화상수 및 시계열을 비교해 볼 때, 모델의 계산치가 관측치를 잘 재현하고 있음을 보여준다.

표 32. 조류검정결과

분조	방향	정점	진폭(m/s)				지각(°)		
			관측	모델	Error	SC(%)	관측	모델	Error
M <sub>2</sub>	동서	07JB06	0.412	0.407	-0.005	98.8	10.1	10.2	0.1
		07JB08	0.545	0.574	0.029	94.7	6.0	356.8	-9.2
	남북	07JB06	0.266	0.293	0.027	89.8	34.7	26.4	-8.3
		07JB08	0.351	0.389	0.038	89.2	15.6	359.6	-16.0
S <sub>2</sub>	동서	07JB06	0.232	0.172	-0.060	74.1	46.0	58.0	12.0
		07JB08	0.312	0.229	-0.083	73.4	44.1	39.9	-4.2
	남북	07JB06	0.140	0.099	-0.041	70.7	63.6	59.7	-3.9
		07JB08	0.185	0.138	-0.047	74.6	48.8	31.0	-17.8
K <sub>1</sub>	동서	07JB06	0.040	0.065	0.025	37.5	212.6	193.1	-19.5
		07JB08	0.047	0.062	0.015	68.1	202.4	175.2	-27.2
	남북	07JB06	0.034	0.044	0.010	70.6	227.7	178.7	-49.0
		07JB08	0.032	0.035	0.003	90.6	216.5	187.9	-28.6
O <sub>1</sub>	동서	07JB06	0.045	0.045	0.000	100.0	167.5	162.1	-5.4
		07JB08	0.051	0.041	-0.010	80.4	159.6	140.8	-18.8
	남북	07JB06	0.035	0.029	-0.006	82.9	184.9	144.3	-40.6
		07JB08	0.037	0.026	-0.011	70.3	175.2	155.0	-20.2
N <sub>2</sub>	동서	07JB06	0.080	0.077	-0.003	96.3	349.9	345.9	-4.0
		07JB08	0.111	0.097	-0.014	87.4	358.2	330.0	-28.2
	남북	07JB06	0.057	0.040	-0.017	70.2	25.6	5.2	-20.4
		07JB08	0.067	0.046	-0.021	68.7	8.6	332.6	-36.0

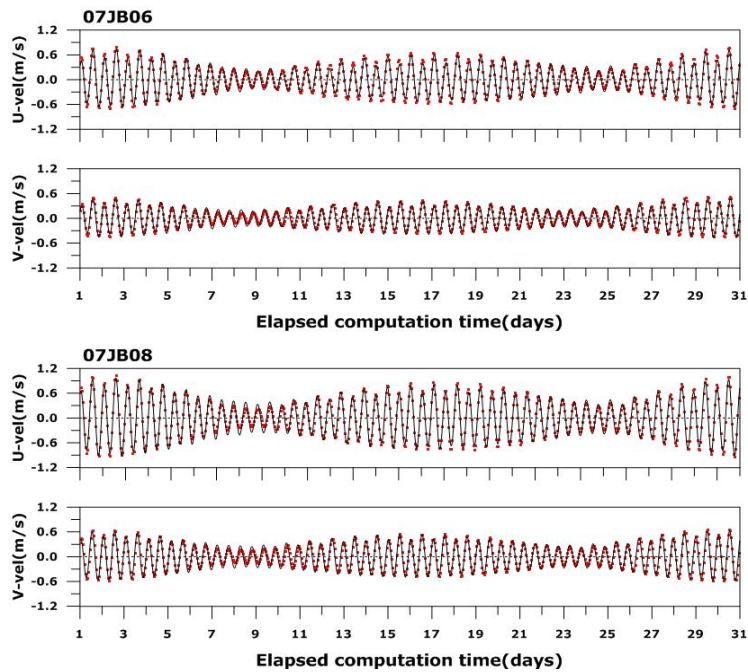


그림 62. 관측치와 모델치 조류 재구성 시계열

(3) 수온

한국수력원자력의 취수구 및 배수구 수온 관측 시계열, 한국해양과학기술원의 부이 표층수 온 관측 시계열과 모델 시계열을 각각 그림 63과 그림 64에 제시하였다. 한국수력원자력에서 2017년 3월 1일부터 4월 1일까지 취수구 및 배수구(그림 60)의 표층 수온관측을 수행하였다.

표층 수온 비교 결과 취수구에서의 관측 수온은 7 °C에서 12 °C로 증가하는 양상을 보이며, 배수구에서의 관측 수온은 13 °C에서 20 °C로 증가하였다. 두 지역 시간에 따른 입력 초과수온의 영향에 따른 취수구와 배수구의 수온 변화 경향을 잘 나타낸다. 배수구의 수온 시계열은 특히 3월 6일에서 11일 사이에 모델이 과대평가되고, 3월 26일에서 31일 사이에 과소평가되나 전반적으로 경향성이 유사하게 나타났다. 취수구와 배수구의 매시별 평균 오차 범위는 각각 -1.85~2.80 °C, -1.76~3.78 °C이며, 오차의 평균은 각각 0.11 °C, 0.79 °C로 나타났다.

한국해양과학기술원에서 2017년 3월 31일부터 4월 16일까지 발전소 전면 해역(그림 60)에서 중심 0, 4 m 부이관측을 수행하였으며, 수온의 범위는 각각 12.12~20.28 °C, 11.83~14.12 °C이고, 표층 수온의 모델 결과는 12.49~20.27 °C이다. 0 m 부이관측 수온과 모델의 표층 수온의 매시별 오차 평균은 -0.50 °C로 전반적으로 모델이 관측치를 잘 재현하고 있다.

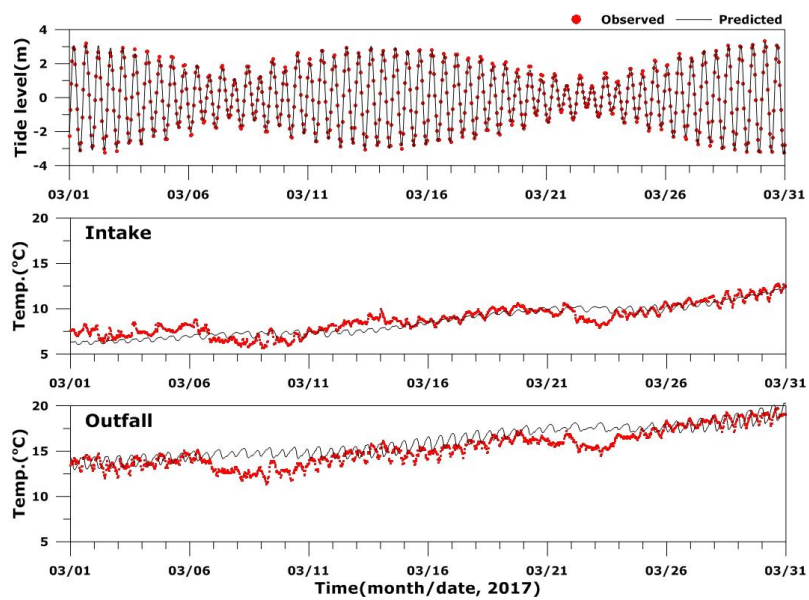


그림 63. 취수구 및 배수구의 수온 시계열 (한국수력원자력)

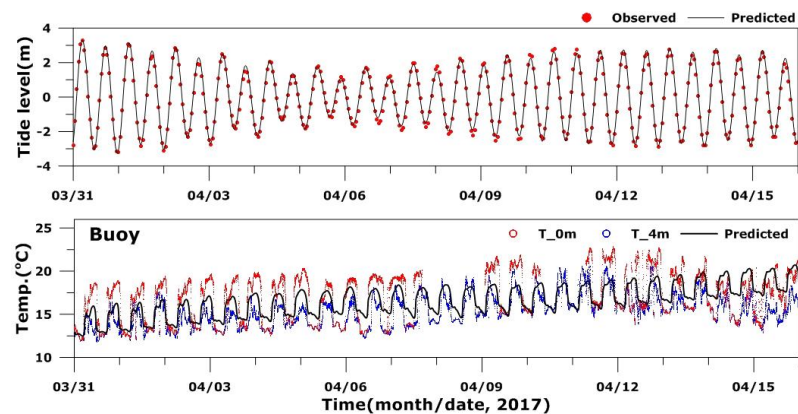


그림 64. 부이 표층수온 시계열 (한국해양과학기술원)

#### 다. 온배수 배출 시나리오별 온배수 확산 모의

##### (1) 실험안

온배수 확산 실험안을 표 33에 제시하였다. 온배수 확산실험은 온배수를 얇은 실험 (Case

N), 설계치 취배수량 적용 실험 (Case X1) 및 실시간 평균 취배수량 적용 실험 (Case X2)의 3개 실험으로 구분하였다.

표 33. 온배수 확산 실험안

실험안	취배수량 (m <sup>3</sup> /s)	내용
Case N	0.0	비교 실험
Case X1	345.0	설계치 적용
Case X2	108.8	실시간 평균 취배수량 적용

(2) 확산범위 산정방법

온배수확산 실험과 동일한 조건에서 온배수를 배출하지 않는 실험을 수행한 후, 두 실험 결과의 차를 구하여 온배수 방류에 의한 초과수온을 산정하였다. 온배수 최대 확산범위는 산정된 초과수온 결과를 중첩시킨 후 최대값을 이용하여 산정하였다. 수직 11개층 중 수면에서 첫 번째 층을 표층으로 정의하였고, 수면에서 11번째 층을 저층으로 정의하였다.

배수구로부터 초과수온 1, 2, 3 °C의 최장 직선거리를 북측, 남측 및 서측으로 구분하여 초과수온별 최대 확산거리로, 초과수온이 1, 2, 3 °C보다 높은 면적을 각각 최대 확산면적으로 정의하였다.

라. 수치모델 결과에 의한 온배수 확산 범위 평가

초과수온의 최대 확산거리 및 면적을 표 34에, 온배수의 최대 확산범위를 그림 65에 제시하였다. 설계치를 적용한 경우(Case X1)의 표층 초과수온 1 °C 최대 확산범위는 배수구 끝단으로부터 북동측으로 15.95 km, 남서측으로 7.31 km이며, 확산면적은 104.28 km<sup>2</sup>이다. 저층의 초과수온 1 °C에 대한 북측과 남측의 최대 확산범위는 표층과 유사하며, 확산면적은 76.76 km<sup>2</sup>이다. 실시간 평균 취배수량을 적용한 경우(Case X2)의 표층과 저층의 최대 확산거리는 Case X1에 비해 북동측으로 각각 1.83, 1.74 km, 남서측으로 3.86, 4.40 km 작게 나타났으며, 확산면적은 Case X1의 약 38.3, 33.9 %로 나타나 근사적으로 확산면적은 취배수량에 비례하는 것으로 판단된다.

표 34. 최대 확산거리 및 최대 확산범위

※ 확산거리는 배수구로부터 직선거리임

실험안	층	초과수온 (°C)	확산거리 (km)		확산면적 (km <sup>2</sup> )
			북동측	남서측	
Case X1	표층	1	15.95	7.31	104.28
		2	15.19	6.04	73.48
		3	14.00	4.83	51.44
	저층	1	15.86	7.15	76.76
		2	15.01	4.89	49.28
		3	13.92	2.73	28.99
Case X2	표층	1	14.12	3.45	39.91
		2	5.60	1.88	15.23
		3	4.25	1.70	8.70
	저층	1	14.12	2.75	25.99
		2	3.38	0.64	4.33
		3	2.93	0.64	2.67

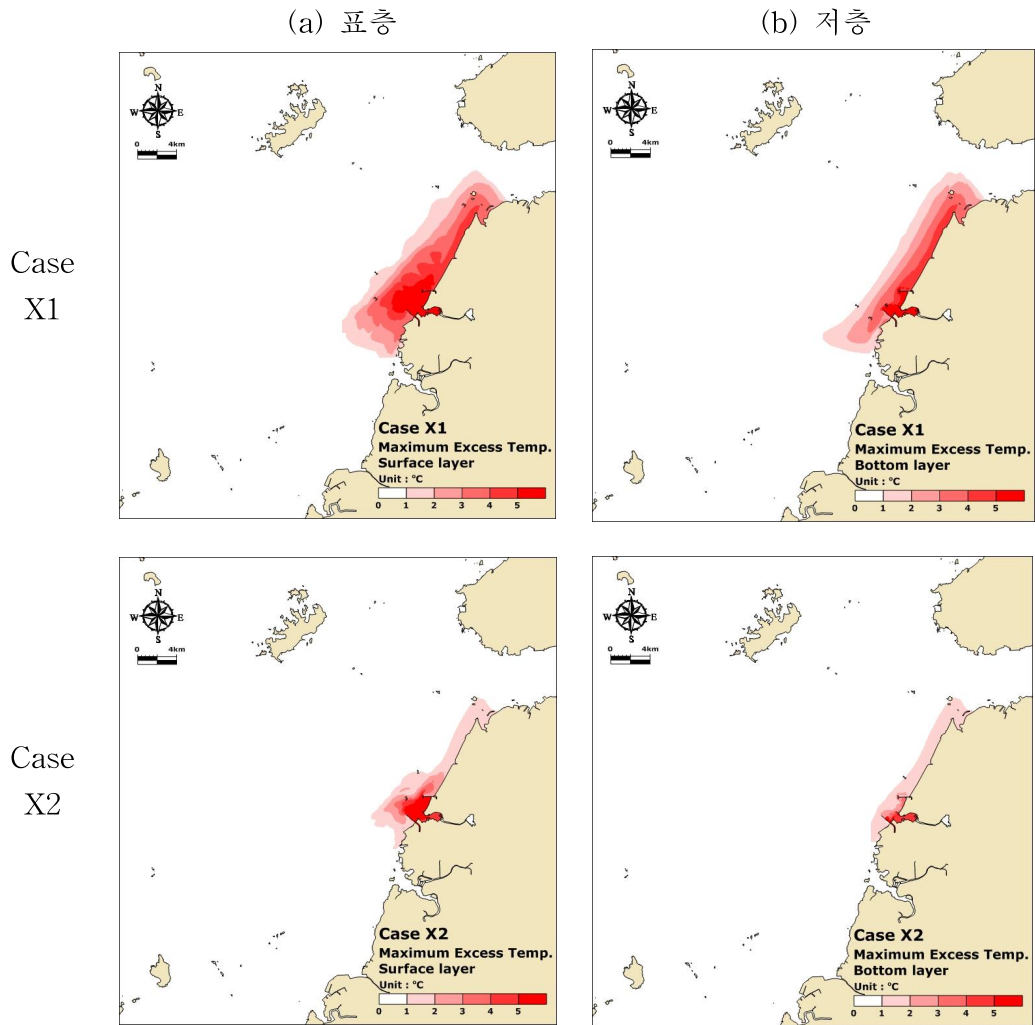


그림 65. 온배수 확산범위

온배수 확산 범위의 공간적인 분포를 확인하기 위해 확산 범위 내의 7개 정점을 선정하여 표층과 저층의 초과수온 시계열 변화를 그림 67에 제시하였다.

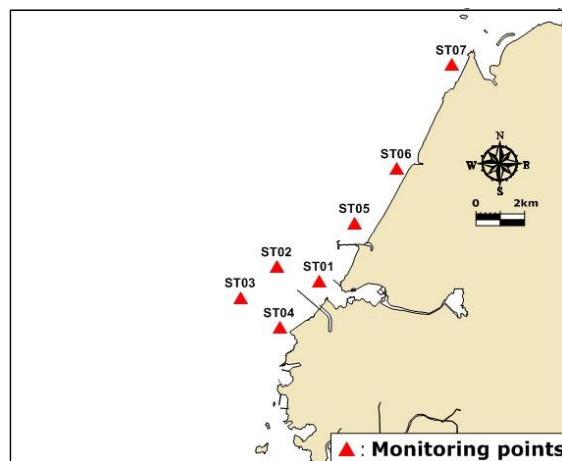


그림 66. 초과수온 제시 정점

7개 정점에서 온배수의 영향으로 수온이 상승하였으며, 배수구에 인접한 정점(ST01)과 배수구로부터 먼 북쪽 정점(ST07)에서 표층의 초과수온은 조석주기에 따라 변동하였으며 최대치는 각각 7.6 °C, 2.4 °C로 나타났다. 배수구에서 멀어지는 남서쪽 방향의 정점(ST02, ST03)과 북동쪽으로 멀어지는 정점(ST05, ST06, ST07)에서 표층의 초과수온은 감소하는 경향이 나타났다. 저층의 경우는 ST01 정점을 제외하고 모든 정점에서 3 °C이하로 표층에 비해 상대적으로 변동폭이 작게 나타났다. 도류제 남측에 위치한 취수구 인근 정점(ST04)에서는 배출수의 영향을 최소화하기 위해 설치된 구조물을 모형에 고려하였기 때문 표층과 저층의 초과수온이 유사하게 나타났다.

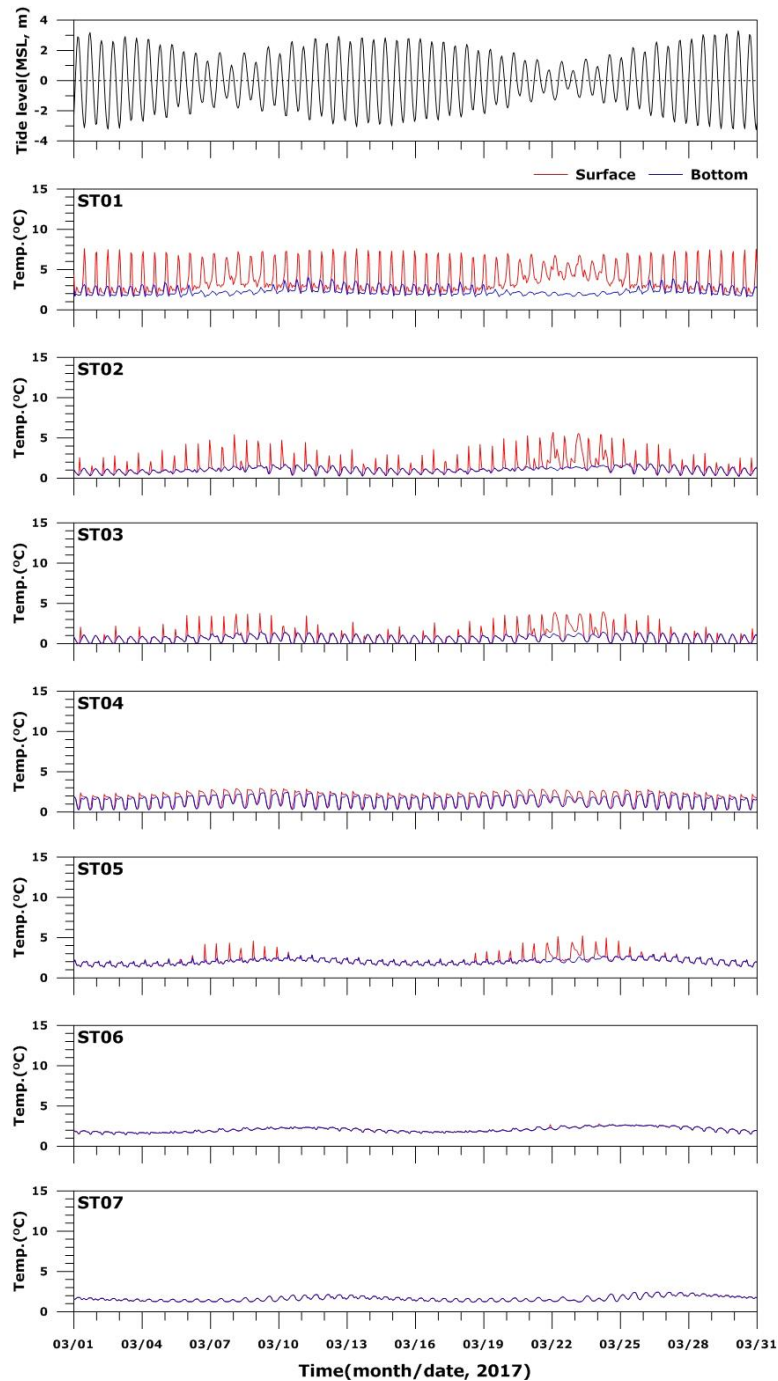


그림 67. 정점별 초과수온 시계열

#### 4. 결론

본 연구를 통해 발전소 주변해역의 해류 및 수온변화 양상을 파악하고, 수치 실험을 통한 온배수의 이동 및 확산결과를 산출하였다. 본 연구는 설계치 및 단기의 실시간 취배수량을 적용한 실험 결과이다. 향후 장기적인 관측과 수치모델링을 수행하여 배출수의 장기 영향을 검토하는 연구가 필요하다고 판단된다.

#### 5. 연구수행 결과의 활용방안 및 기대효과

##### 가. 활용방안

본 연구를 통해 산출한 온배수 확산 결과를 이용하여 발전소 주변해역의 해류 및 수온구조를 파악하고, 온배수 확산 범위를 예측함으로써, 향후 해양환경·생태계 영향을 최소화하고, 체계적인 관리체계 정립을 위한 과학적이고 객관적인 제도개선 방안 수립의 기초 자료로 활용할 수 있다.

##### 나. 기대효과

###### (1) 기술적 측면

본 연구를 통해 영광주변 해역의 온배수 확산 및 이동에 대한 예측 기술을 확보하였다. 본 연구에서는 KOOS의 결과를 초기 및 개방경계 조건으로 사용하여 연안역의 상세 격자를 구축하여 수행하였다. 국립해양조사원, 한국수력원자력 및 한국해양과학기술원에서 관측한 자료를 이용하여 모델의 조위, 유속 및 수온을 검증하였으며, 영광 주변 해역의 온배수 확산 및 이동 결과를 산출하였다. 향후 우리나라 발전소 주변해역의 관측 및 수치모델을 수행함으로써 전 연안의 온배수 영향 평가 및 관리 방안 마련의 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

###### (2) 경제,산업적 측면

발전소 주변해역 정밀 격자 모델을 통해 온배수 배출에 따른 주변해역의 해류, 수온 등의 변동을 예측함으로써, 해양환경 변화에 대한 관리방안 마련에 필요한 기초적인 과학적 자료를 생산하였다. 또한 시나리오 활용을 통한 발전소 주변해역에서의 온배수 확산범위 분석에 필요한 기초자료를 제공하여 해양환경 변화 예측 및 냉온배수 영향에 민감한 연안지역에 대한 정책수립과 사회적 대비책이 구축이 가능할 것으로 판단된다.

###### (3) 사회적 측면

과거부터 최근까지 냉온배수에 의한 해양환경·생태계 변화유발 및 수산물 피해에 따른 갈등이 심화되어 냉온배수 대한 적절한 관리방안 마련이 중요한 사회적 과제로 대두되었다. 냉·온배수로 인한 주변해역 영향 범위 및 영향정도에 대한 객관적인 연구가 시행되지 않고 있으므로 이와 관련한 정책 및 의사 결정을 위해서는 냉온배수에 대한 정확한 과학적 정보가 필수적이다. 이 연구는 발전소 주변해역에서 온배수 배출에 따른 수온변화를 연구함으로써 온배수 영향 평가 및 관리방안 마련에 과학적 근거로 사용될 수 있을 것이다.

#### 6. 추가연구의 필요성 및 향후개선에 대한 의견

온배수 확산 및 이동에 관한 보다 정확한 결과를 위해 최소 연 2회(동계 및 하계) 관측 및 수치모델링이 필요하다. 또한 수치 모델의 표층 수온의 재현성 향상을 위해 여러 모델간의 결

과 비교 검토가 필요할 것으로 사료된다.



## 제 7 장 참고문헌

- 장기목, 김덕진, 김승희, 조양기, 이상호, 2014. 지상용 열적외선 센서의 항공기 탑재를 통한 연안 해수표층온도 추출. 대한원격탐사학회지, 30(6): 797-807.
- 김광수, 최영찬, 이문진. 2000. 화순화력발전소 주변해역의 온배수 환경용량 산정. 한국해양환경공학회지 3(3): 3-12.
- 김영환. 1999. 원자력발전소의 건설과 가동이 저서 해조류에 미치는 영향. 환경·생물: 환경생물학회지 17(4): 379-387.
- 김영환, 2000. 발전소 온배수와 해양생태계. 전파과학사.
- 김영환 외. 2007. 고리원전의 온배수 방출이 주변 해조군집에 미치는 영향. 조류학회지 (Algae) vol.22(4): 297-304
- 김충재, 이원학(2013), 강원도 화력발전소 온배수 활용 방안 - 수신 및 농업분야를 중심으로, 강원발전연구원
- 맹준호, 김태윤, 서동환, 서재인, 손민호, 강태순, 2013. 발전소 냉각수 배출에 따른 해양환경 영향예측 및 최소화 방안 연구. 한국환경정책·평가연구원 보고서(2013-04-01).
- 박용철 외. 2007. 원자력발전 온배수 영향에 대한 해수질 환경조사 지침 연구. 바다: 한국해양학회지 12(1): 50-56
- 손영백, 유주형, 노재훈, 주세중, 김상현, 2012. 남해와 동중국해에서 위성으로 추정된 표층수온 및 클로로필의 장기 변화, Ocean and Polar Research, 34(2): 201-218.
- 윤석, 유주형, 민지은, 안유환, 이석, 원중선, 2009. 열적외선 위성자료를 이용한 새만금 해역 해수표면온도 모니터링. 대한원격탐사학회지, 25(4): 339-357.
- 이재학, 노영재, 조양기. 2007. 원자력발전소 온배수 영향 해양물리분야 조사의 표준지침. 바다: 한국해양학회지 12(1): 43-49.
- 조정희, 김대영, 이정삼(2010), 발전소 온배수를 활용한 저탄소 녹색양식업 발전 방향, 한국해양수산개발원.
- 최승필, 양인태, 1997. Landsat TM 영상에 의한 원자력 발전소로부터의 온배수 확산의 추적조사. 한국측량학회지, 15(2): 231-236.
- 한국환경정책·평가연구원, 2013, 발전소 냉각수 배출에 따른 해양환경 영향예측 및 최소화방안 연구, 사업보고서 2013-04-01. 320.
- 해양수산부, 2008. 해양생태계 보전을 위한 온배수 관리방안 연구 최종보고서. BSPM 448000-1927-3. 431.
- 해양수산부, 2015. 해양배출 냉·온배수 실태조사 연구. BSPG4820-10836-3. 378p.
- Arakawa, A. and V.R. Lamb, 1977. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. Methods in Computational Physics, 17, 174-265.
- Choi, D.H., Park, J.S., Hwang, C.Y., Huh, S.H. Cho, B.C., 2002, Effects of thermal effluents from a power station on bacteria and heterotrophic nanoflagellates in coastal waters. Marine Ecology Progress Series, 229, 1-10.
- Fazilet, V.S., 1998. Foaming : Consequence, prevention and destruction. Biotechnology

- Advances, 16, 913-948.
- Galperin, B., L.H. Kantha, S. Hassid, and A. Rosati, 1988. A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows, *J. Atmos. Sci.*, 45, 55-62.
- Hamrick, J.M. 1994b. Application of the EFDC, environmental fluid dynamic computer code to SFWMD Water Conservation Area 2A. A report to South Florida Water.
- Hamrick, J.M., and M.Z. Moustafa, 1996. Development of the Everglades wetlands hydrodynamic model: 1. Model formulation and physical process representation. In review.
- IAEA. 1974. Thermal Discharges at Nuclear Power Stations : Their Management and Environmental Impacts. Technical Reports Series No. 155. IAEA, Vienna. 155 pp.
- Mellor, G.L., and T. Yamada, 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851-875.
- Mellor, G.L., 1998, Users Guide for a Three-Dimensional, Primitive Equation Numerical Ocean Model, 41p.
- Mian, O., Lutes, J., Lipa, G., Hutton, J. J., Gavelle, E., & Borghini, S. (2015). Direct georeferencing on small unmanned aerial platforms for improved reliability and accuracy of mapping without the need for ground control points. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(1), 397.
- Oey, L.Y., G.L. Mellor, and R.I., 1985a. Hires, A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary. Part I: Description of the model and model simulations, *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1676-1692.
- Oey, L.Y., G.L. Mellor, and R.I., 1985b. Hires, A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary. Part II: Description of the model and model simulations, *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1676-1692.
- Smolarkiewicz, P.K., and T.L. Clark, 1986. The multidimensional positive definite advection transport algorithm: further development and applications, *J. Computational Physics*, 67, 396-438.
- Yanagi, T., K. Sugimatsu, H. Shibaki, H-R. Shin, and H.-S. Kim, 2005. Effect of tidal flat on the thermal effluent dispersion from a power plant. *J. Geophys. Res.*, 110, C03025, doi:10.1029/2004JC002385.
- Masaharu(三浦正治) et al. 2013. 火力、原子力発電所の 環境影響評価に係る 海域生態系の 影響予測手順の提案. 海生研研報, 第17号, 1-56.
- 海洋生物環境研究所. 2011. 平成22年度国内外における 発電所等 からの 温排水による 環境影響に係る 調査業務報告書.

## 주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.