

## 원자력발전소 온배수 영향 해양물리분야 조사의 표준지침

이재학\* · 노영재<sup>1</sup> · 조양기<sup>2</sup>

\*한국해양연구원 해양기후환경연구사업단,

<sup>1</sup>충남대학교 지구환경과학부

<sup>2</sup>전남대학교 지구환경과학부

### A Standard Guide to Physical Oceanographic Survey of the Effect of Thermal Discharge from a Nuclear Power Plant

JAE HAK LEE\*, YOUNG JAE RO<sup>1</sup> AND YANG KI CHO<sup>2</sup>

\*Ocean Circulation & Climate Research Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan 425-600, Korea

<sup>1</sup>Dept. of Oceanography, Chungnam National University, Taejeon, Korea

<sup>2</sup>Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Institute of Marine Science, Chonnam Natinal University, Gwangju 500-157, Korea

원자력발전소 온배수 영향 조사 과정상 문제점을 평가하고 대안으로서 조사 표준 지침을 제시하였다. 관측이나 온배수 확산 모델링 단독으로 이루어진 지금까지의 방법으로는 시간에 따른 온배수에 의한 수온 분포의 변화를 정량적으로 파악하는데 한계가 있으므로, 관측과 온배수 확산 수치모델링의 상호 보완적인 조사를 병행하는 것이 바람직하다. 현장 관측은 원자력발전소 인근 해역의 모든 자연적 열원의 영향을 고려한 열수지 모형의 개념에 근거한 조사가 중요하며, 수치모델링의 결과를 기준 수온분포로서 활용하고자 할 경우에는 수치모델링에 의한 현상 재현이 통계적 유의수준에 도달한 경우에 한정하도록 하였다. 또한, 과거의 순환 및 확산 모델링의 문제점을 개선하기 위한 대안으로서 표준코드의 개발을 제안하였다.

The methods of physical oceanographic surveys to examine the effect of thermal discharge from nuclear power plants in Korea have been reviewed and a standard guide to the survey is proposed. It is desirable that *in situ* observation and numerical thermal diffusion modeling are conducted simultaneously to describe the variation in temperature distribution affected by thermal discharge from a power plant because any observation or numerical modeling alone has limits to do so quantitatively. It is suggested that the field observation must be based on the concept of heat budget modeling considering all artificial and natural heat sources/sinks around the power plant. Any results from numerical modeling must reach to a certain statistical significance level to use for a standard temperature distribution. In addition, the development of standard numerical codes is proposed to improve the problems shown in the past numerical circulation and diffusion modelling.

**Keywords:** Thermal Discharge, Nuclear Power Plant, Physical Oceanography, Standard Guide

### 서 론

원자력발전소 온배수 배출로 인한 주변 해양의 영향에 대하여 주로 어업활동에 대한 손실 평가와 관련된 조사가 수행되어 왔다. 그동안 대부분의 어업손실 평가는 온배수에 의한 수온분포 변화 산정, 수온변화에 따른 생태환경 변화 산정 및 이에 따른 어업피해 판정과 어업피해를 결정의 순서로 진행되어 수온분포 변화의 산정이 가장 기본적인 판단 요소로 작용되어 왔다. 즉, 해수 특성을 나타내는 수온과 수온 분포를 결정짓는 해수 유동의 조사와 해석이 가장 필수적인 항목에 포함되어 왔다.

새로운 발전설비 건설이나 방류제 건설과 같은 연안 구조물 변경이 있을 경우 마다 온배수 영향에 의한 어업손실평가의 조사가 수행되어 왔지만 최종 결과에 따른 어민의 이익의 제기와 민원이 지속되고 있는 실정이다. 이러한 상황의 가장 큰 이유는 조사 방법의 표준화가 이루어지지 않아 담당 연구자의 결과에 대한 객관성을 뒷받침할 근거가 부족하기 때문이다. 이는 관측 자료에 대한 사항뿐만 아니라 온배수 확산모델링의 과정과 결과 해석의 과정도 마찬가지이다. 또한, 최근 Yanagi *et al.*(2005) 등의 연구 결과에 따르면 수온 분포는 자연적 열원과 인위적 열원의 영향이 섞여 나타나기 때문에 온배수 영향을 추정하는데 있어서 수온 변화에 대한 두 요인을 각각 분리하는 것이 필요하다. 그러나 그동안 이 부분에 대한 고려가 배제된 상태에서 온배수 영향을 판단하여 왔기

\*Corresponding author: jhlee@kordi.re.kr

때문에 이 문제를 어떻게 접근해야하는가의 논의는 전혀 없는 상태다.

우리나라의 원자력 발전소 건설은 계속 증가하고 있으며 국가 에너지 수급 정책과 관련하여 이러한 경향은 앞으로도 지속될 것이다. 결과적으로 향후 온배수 영향에 의한 어업손실 평가를 위한 해양조사가 계속 필요할 것이며, 표준화된 조사 지침의 근거 없는 어업손실 평가 결과는 과거의 사례에서 보듯이 이의 제기과 민원 반복의 결과를 초래할 것임은 자명하다.

온배수 관련 어업손실 평가와 관련된 조사 방법, 조사 기간 및 조사해역 선정 등의 문제도 일반적 해양조사의 범위를 크게 벗어나지 않는다. 다만 특정 연안역의 특성을 충분히 고려하여, 수온, 염분 등의 해수물성 분포, 해수 유동, 난류확산, 대기-해양 열교환 등을 조사하게 되며 원자력 발전소 배출 온배수 현상에 초점을 맞추어 이에 필요한 방법론적 지침을 합목적으로 마련할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 한국해양학회와 한국수산학회가 공동으로 수행한 원전온배수 관련 어업손실평가 표준지침 개발 연구(한국수산학회·한국해양학회, 2006)의 결과를 바탕으로 해양물리 분야의 표준 지침을 제시하였다. 다음 절에서는 그동안 관련 조사 방법의 문제점을 기술하였고, 3절에서는 표준지침을 제시하는 기본 방향을 설명하였다. 이어서 4절과 5절에서는 각각 관측 분야와 온배수 확산 모델링에 대한 표준 지침을 제시하였고 6절에 결론을 기술하였다.

### 기존 조사 방법 분석

#### 조사기간 및 조사영역의 설정

원자력발전소 온배수의 영향을 조사하기 위한 용역의 연구 기간은 1-2년 정도였다. 최근에 기간이 길어지는 경향이나, 발전소 자체에서 시행하는 해양환경 조사의 경우는 1년 단위로 시행되는 것인 대부분이었다. 두 경우 모두 대부분 계절별 조사 위주로 이루어졌다. 조사 영역 설정은 대부분 용역 계약서상에 명시된 범위로 하고 있으며 발전소 자체 환경조사의 경우에는 해마다 동일한 범위에서 이루어지고 있지는 않은 것으로 나타났다. 이는 어업 피해 이해 당사자들의 민원이 행정적(군 또는 면 등) 단위로 나타난 결과이며 해양학적 판단 근거에 의하지는 않은 실정이다. 자연 현상은 근본적으로 연속성을 가지고 있는 만큼 조사 영역을 행정적 경계만을 고려하여 설정한다면 실제 온배수 확산 범위를 판단하

는데 제약이 될 수 있다. 조사 해역을 무한정 넓힐 수는 없겠지만 해양학적인 판단에 영향을 줄 수 있는 좁은 해역을 조사 영역으로 제한한다면 온배수 영향 범위 해석의 오류의 가능성을 배제할 수 없을 것이다.

#### 조사 방법 및 관측 장비

조사 항목은 대부분 수온과 해수 유동이었으며 염분까지 관측한 경우는 매우 드물었다. 연안은 수심변화와 조간대의 영향 등으로 자연 상태에서 수온의 수평적 변화가 순 온배수 확산에 의한 수온 변화와 함께 나타날 수 있다. 이는 원자력 발전소의 온배수 확산 범위 설정에 있어서 대기나 조간대와의 열교환이 고려되어야 함을 의미한다. 그러나, 해양 기상과 조간대와 해수 사이의 열 교환을 보고자 한 관측이 최근에는 시도되었으며 그 조사 방법의 표준화는 전혀 시도되지 않은 상태다. 수온 및 해수유동 조사 방법은 조사 담당 기관에 따라 또는 계약에 따라 각기 다른 것으로 나타났다. 검토 대상 보고서에서 이용되었던 조사 방법들은 Table 1과 Table 2에 표시한 바와 같이 각각 장단점이 있어 표준 지침의 마련이 필요함을 보여주고 있다.

관측 기기와 센서는 발달 속도가 빠르기 때문에 조사에 보다 적합한 새로운 기장비가 있을 수 있다. 예를 들어, ADCP와 같은 초음파식 유속계는 수직적으로 여러 층의 유속을 동시에 관측할 수 있고 선박에 장착하여 이동하면서 조사할 수 있는 이점이 있지만 아직 어떠한 보고서에서도 이의 사용은 나타나고 있지 않았다. ADCP의 이용이 절대적으로 좋다고 볼 수는 없으나 심층취배수 유속장 판단의 경우처럼 다층 유속 조사가 필요한 경우 이의 이용이 필수적일 수 있다. 한편, 자료 획득에 사용된 측정 기장비는 검교정은 필수적이다. 기장비 구입시 제공되는 증빙 서류만으로는 자료의 정확성이 보장되지 않기 때문에 정기적인 센서의 검교정이 매우 중요하지만 많은 보고서에서 이 부분의 설명이 없거나 미흡한 것으로 나타났다.

#### 조사 과정

우리나라 연안역에서 수온 분포의 단기 변화는 조류의 영향을 많이 받기 때문에 조사과정에서 조석 특성을 고려하여야 한다. 대부분 수온 조사에서 이를 고려하여 관측을 하였으나 실제 조사 시간의 선택에서는 기준이 없는 것으로 나타났다. 조석 현상의 지배

Table 1. 수온 조사 방법의 비교 (○: 양호, △: 중간, ×: 취약)

	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

Table 2. 해수유동 조사 방법의 비교 (○: 양호, △: 중간, ×: 취약)

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

하에 있는 연안역에서 최대 수온 확산 범위의 분석을 위해서는 신중한 조사 시간의 선택이 필수적이다. 수온의 확산 속도보다 해수의 흐름 속도가 더 크기 때문에 최대 확산 범위 추정을 위하여 간조 및 만조 때 수온 분포 측정이 되어야 하나 낙조류 및 창조류가 진행 중일 때 조사한 경우가 있었다. 만일 이러한 자료로부터 해석한 수온 확산 범위를 어업피해 조사 산정에 이용한다면 오류가 커질 가능성이 높다.

조사 과정상 다른 문제점은 해수 유동 조사에서 나타났다. 해류계를 계류하여 해류 또는 조류를 조사하였던 경우에 대부분 연안에 근접한 취수구 또는 배수구 부근 등에서 이루어졌고 지형이나 다른 해양학적 특성을 고려하여 조사한 경우는 많지 않았다. 오일리언 방법에 의한 유속 조사시 및 군데에서 조사하여야 하는지 또는 계류장소의 설정이 조사 목적과 어떠한 관계가 있는지에 대한 근거 설명이 부족하였다. 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 수행된 조사가 대부분이었다. 라그랑쥐안 조사를 확산계수 추정을 위한 목적으로 수행한 경우라도 그 결과를 온배수 영향 분포를 판단하는데 어떻게 활용할 수 있는지의 제시가 부족하였다. 즉, 온배수 확산과 어떻게 관련 있는지를 설명하기 위하여 이러한 조사들의 표준화가 되어있지 않기 때문으로 보인다. 한편, 선박에 수온센서를 장착하여 이동하면서 연속적으로 표층 수온을 조사한 경우 선박 이동 궤적에 대한 명확한 표준이 없었다. 부족한 자료에 근거하여 외삽에 의한 자료 제시(도면)를 할 경우 수온 분포를 파악하는데 오류의 가능성이 높다.

### 온배수 확산 모델링 및 결과 평가

1992년 이후 2002년까지 4개 기관 [한국해양연구소(한국전력기술, 1992, 1994); 여수 수산대학교, 1995; 부경대학교, 1996; 군산대학교, 2002]에 의해 수행된 온배수 모델링 실험 결과를 종합 검토하였다. 이러한 온배수 확산 모델링은 수행자와 실험목적이 달라 일률적인 기준에 의한 평가는 불가능하였다. 본 연구에서는 일반적 모델링에서 결과의 도출 과정과 확산 모의 결과의 평가시 발생하는 문제에 국한하여 평가를 실시하였다. 환경영향 평가와 수산업 피해 영향 평가를 목표로 확산 모델링을 실행하는 경우에 사용 모델의 성능 검증과 모델링 과정 및 결과 도출의 방식에 대한 평가가 엄격히 수행되어야 모델 결과를 이용한 저감방안 도출이나, 수산업 피해 영향을 평가하는데 기초 자료로 활용할 수 있다. 그러나 과거 모델링의 일반적 문제점은 신뢰도 검증의 부족과 성능 평가 부재의 경우가 있어 2차적 활용단계에서의 근본적 문제점이 제기될 수밖에 없었다. 현재 온배수 모델링은 소위 광역(far field)에서 주변수의 난류 특성에 의해 확산 퍼짐의 결과를 모의하는 것으로, 인위적 구조물(돌체 및 도류체 등) 등을 이용하여, 강제된 난류(크기가 자연 상태보다 100~10000 정도 큼)에 의한 온배수의 희석 효과는 모의하기가 현실적으로 불가능하며, 전혀 다른 계통의 모의실험이 필요하다.

온배수 영향을 보기 위한 확산 모델링의 경우 부분적으로 다음과 같은 취약점을 보여주었다. (1) 모델링의 결과 검증 및 분석은 해수 유동 모델링 보다 본질적으로 더욱 중요한데도 불구하고 기술과 분석이 상대적으로 미흡, (2) 확산 모델의 다양한 검증 분석

을 수행하지 않아서 모델 결과의 타당성 신뢰도가 낮음, (3) 사용한 모델 코드는 온배수 확산 목적으로 만들어 진 것이 아니라 일반적 이류 확산 모델로서, 유동 모델과 연계되어 있지 않아 시간에 따른 수 주내의 밀도장의 변화에 따른 유속 성분의 구분이 불가능하여 온배수의 고유한 부력 특성을 재현하는데 한계가 있음, (4) 수직 적분 2차원 모델로서 온배수의 성층화현상과 경압성분에 의한 흐름을 재현하지 못함, (5) 사용한 조류 재현 모델이 2차원과 3차원인 경우 각각 다른 코드에 근거하여 2차원 모델과 3차원 모델의 성능에 대한 교차 비교 검증이 없음, (6) 이류향과 확산향에 사용된 2nd order upwind 및 centered 스킴은 계산 과정에 수치 확산의 오차가 발생함, (7) 밀도장이 수온의 함수만으로 계산되어 밀도장의 재현이 충분하지 못할 경우 온배수 자체 부력에 의한 상승 플룸(rising plume)의 재현이 어렵게 됨, (8) 비교우위를 분석하기 위한 모델링 실험이므로 바람에 의한 취송류동 조류장외의 흐름 효과는 배제되어 온배수 확산 영역의 산정용으로 부적합, (9) 모델 격자망이 구조물 크기에 비해 너무 커 (예, 방류제 360 m 격자 간격 180 m) 현상 재현에 한계가 있음, (10) 모델링 결과의 검증을 위한 조위, 조류 및 수온의 연속자료와의 비교 검증이 되어 있지 못하여 결과의 신뢰도를 떨어뜨림, (11) 열수지 및 체적 균형에 대한 검증이 없어 배출된 열이 모델내에서 보존되는지의 여부를 가릴 수 없고, 부록과 같이 배출열량이 유입열량 보다 많아 문제점을 가지고 있음.

### 대조구 설정

대조구 설정 문제는 온배수 확산 범위 추정 조사에서 가장 중요하고 어려운 부분이다. 그 동안 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 의미이며 절대적인 대조구 설정의 제한 요소가 된다. 실제로 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 필수적이지만 이의 기술이 거의 없어 자연 해수의 분포를 단정적으로 판단하는 경우도 있었다. 최근 보고서에서는 특정한 대조구 설정 없이 관측 자료 자체만을 분석하여 매 관측시마다 온배수에 의한 수온 상승 영역을 제시한 경우가 있었는데 이는 조사 영역이 충분히 넓다는 가정 하에서는 일리가 있다고 보지만 절대적인 방법으로 받아들이기에는 불확실성이 남아있다. 온배수에 의한 수온의 영향 범위와 그 크기를 판단하기 위해서 가장 바람직한 방법은 시계열 자료의 확보이다. 원전 건설전의 평균적, 계절별 및 조석 주기별 수온 분포를 알고 있다면 건설후 수온 분포로부터 원전 온배수 영향을 추정하는 것은 상대적으로 용이하고 과학적이다. 즉, 공간적인 영역에 대한 대조구 설정에 근거한 온배수 확산 추정보다 시간적인 변화 판단에 근거한 추정이 더 과학적이며 논리적인 접근이다.

## 표준 지침의 기본 고려 사항

### 관측 자료의 신뢰도 및 종관적 수온분포 파악

관측 자료는 세 가지의 다른 목적에 이용된다. 첫째, 모든 이용 가능한 관련 자료를 살펴보고 분석함으로써 인접 연안의 대규모 순환을 지배하는 수송 과정에 관한 통찰력을 얻을 수 있다. 둘째로 수치모델에서의 입력 외력 함수로서 해류와 혼합을 생성하기 위해 필요하다. 마지막으로 온도와 염분과 같은 여러 변수들의 측정치들은 보정/정당화 과정에서 해수특성 변화(즉, 수온 변화) 분포의 정확성을 판단하는 데 필수적이다. 우리나라 연안과 같이 조석현상이 지배적인 해양에서는 수 시간 내에 수괴의 이동이 있으므로 종관적 수온분포 파악을 위한 조사가 고려되어야 한다. 즉, 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 사항들(하구, 조간대, 연안류 세기 등) 모두 고려하여야 한다.

### 온배수 영향 판단

온배수에 의한 어업손실 평가 과정에서 해양물리 분야의 역할은 온배수에 의한 해수특성변화의 범위와 그 크기를 제시하는 것이다. 조사해역의 해수 특성에 영향을 주는 원전과 다른 열원(예, 조간대)이 있거나 담수 공급원(하천)이 있는 경우 원전 온배수의 영향만을 분리하여 판단하는 것이 어려우므로 가능한 한 이의 해결을 위한 조사 방법이 고려되어야 한다. 해양생태계에 대한 온배수 영향 판단에 있어 온배수에 의한 수온 상승의 크기는 절대적인 변수가 되기 때문에 사전에 알고 있는 조사해역의 해양생태계적 특성도 조사 방법 설정 (영역, 시기 등) 결정시 고려되어야 한다. 한편, 제시하는 수온 상승의 크기를 어떻게 할 것인지(1°C, 2°C, 또는 0.5°C 등)와 제시하는 방법을 단순 수치로 할 것인지 아니면 통계적인 개념을 도입할 것인지도 매우 중요한 고려 대상이다.

### 열수지 모델 개념의 도입

연안의 수심은 크게 변한다. 수심변화에 따라 수층의 두께가 달라져, 대기로부터 같은 양의 열이 해수로 유입되어도 가열효과가 다르게 나타나, 수평적으로 온도 차이를 나타낼 수 있다. 이러한 요인에 의해 발생하는 수평적 온도 변화는 순수 온배수 확산에 의한 수온 변화와 구별이 되지 않을 수 있다. 또한, 조석간만의 차가 큰 조간대에서는 해수와 대기, 퇴적층과 대기 사이의 열교환이 교대로 진행되어 조간대 퇴적층이 태양복사열을 흡수/방출하여 해수에 방출/흡수한다 (Cho *et al.*, 2005; Harrison and Phizacklea, 1985). 따라서 순수한 온배수 영향을 파악하기 위해서는 자연적인 열원의 영향을 정성적으로 분리할 수 있는 열수지 모델에 적용할 수 있는 조사가 고려되어야 한다. 관측 자료만을 이용한 열수지 계산에는 분해능에 한계가 있어 온배수 영향 범위 설정 결과의 유의성을 검토하는 데에만 사용할 수 있다. 즉, 어느 기간 동안 원전으로부터 공급된 열의 총량이 온배수 영향 해역내의 수온 상승에 의한 열 총량보다 큰지 작은지의 결과에 따라 온배수 영향 해역이 사실보다 좁게 설정되었는지 아니면 넓게 설정되었는지 일차적인 판단만 가능하다. 원전, 조간대, 연안, 하구역 등 다양한 열원이 공존하는 경우에는 열수지 계산 분해능을 높여야 하는데 매

우 조밀한 관측점에서의 시계열 자료가 필요하여 관측에 의한 계산은 고비용의 한계가 있기 때문에 덜 조밀한 관측 자료를 동화시킨 수치모델링 결과를 활용한 열수지 계산이 바람직하다.

### 온배수 최대 확산 범위의 제시

온배수에 의한 어업손실 평가에서 수온 상승 또는 온배수 확산 범위의 판단은 가장 기본적인 요소이다. 수온의 변화가 해양생태계에 영향을 미치는 것은 분명한 것이지만 단 한 번의 수온 상승에도 영향을 받는 부분도 있고 수온 상승이 장시간 지속되어야 영향을 받는 부분도 있을 것이므로 조사에서 제시하는 온배수 최대 확산 범위가 순간 최대 확산 범위를 의미하는 것인지 평균적인 최대 확산 범위를 뜻하는 것인지가 조사 시행 전에 결정되어야 할 것이다. 평균적인 확산범위가 목적인 경우에는 계절평균인지 연평균인지의 시간적인 개념 설정도 사전에 정의되어야 한다.

### 관측과 확산모델링의 상호 보완

수온 분포의 조사만을 본다면 충분한 수량의 수온 측정기기를 이용하여 연속적으로 감시하는 것이 수온 분포 변화 파악의 좋은 방법이지만 이는 조사 경비로 보아 실현 가능성이 낮다. 가장 현실적인 대안은 수치모델을 활용하는 것이다. 수치모델링 자체는 Table 1과 Table 2에 제시된 조사 방법이 갖는 제약 사항들을 모두 해결해 주지만 결과의 검증이라는 중요한 단계가 필요하다. 따라서 현장 조사의 제약성과 수치모델의 검증 과정이 상호 보완으로 해결된다면 해양물리 분야의 조사 표준화는 이 방향으로 가야 할 것이다. 또한, 수치모델링은 현상 재현뿐만 아니라 예측이라는 측면에서도 매우 바람직하다. 관측 자료와 수치모델링의 상호 보완은 단순 비교뿐만 아니라 자료동화라는 기법을 통하여 이루어진다. 관측 자료를 수치모델링의 자료동화에 활용하는 경우를 고려한다면 그 효율성을 높이기 위하여 조사 방법 설정이 달라질 수 있다.

### 확산 모델링의 기본 요건

온배수 확산 모델은 발전소 온배수의 배출, 인근해의 해수유동, 인근해와 대기 경계면에서의 열교환 등을 사실적으로 모사할 수 있는 3차원 모델에 기초하고 다음과 같은 기능을 포함하여야 한다: (1) 대상해역의 조석의 사실적 모사, (2) 2주 이상의 조석 주기와 바람응력장을 부과하면서, 간사지의 침수와 노출 모사, (3) 대기와 인근 연안해의 표면 열교환 모사, (4) 온배수의 재순환 (배출된 온배수가 취수구를 통해 재순환될 경우) 모사, (5) 순간 수온 확산의 공간적 온도 분포 계산 (6) 온배수 확산 모델 코드는 수치적으로 안정되어 있어야 하고 지배 유체역학 방정식과 일관성이 있어야 하며 수렴해야 한다. (7) 계산결과는 격자의 수직, 수평 크기에 대한 민감도가 낮아야 하고, (8) 과거 현상에 대한 재현실험의 성공적인 실적을 근거로 미래의 새로운 온배수 배출 설계 조건을 부과하여 결과를 도출할 수 있어야 한다.

### 비교 표준 수온의 설정

우리나라 연안역에서는 외력에 의한 해수 반응이 빠르고 국지적 혼합이나 용승이 발생하기 때문에 대조구를 설정하는 방법의 절대적인 표준화 설정은 거의 불가능하다고 할 수 있다. 대조구 자체의 자연적인 수온 변화가 온배수 영향에 의한 수온 변화와 시

간적 크기(수온 변화가 일어난 시간의 정도)가 작은 경우가 있는 경우에 대조구로서의 의미를 상실하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 비교 표준 수온 설정 방법에 대한 대안을 제시하고자 한다. 앞에서 설명한 바와 같이 특정한 시간에 대하여 광역 관측 결과를 해석할 때 어떠한 정점을 비교 기준의 대상으로 설정하는 것 보다는 전체 해역의 수온 시계열 자료를 바탕으로 시간적 변화 경향으로부터 온배수 영향 정도를 분석하는 것이 보다 논리적이다. 그러나 관측 자료는 현재 상태를 분석하기 위한 비교 기준이 되는 시점의 자료를 확보하는 것은 이미 불가능하다. 본 논문에서 제시하는 조사표준 지침은 향후의 온배수 영향 판단에 사용하고자 하는 것이기 때문에 지금부터라도 앞에서 제시한 조사 방법에 따라 상시 수온 분포의 조사가 이루어져야 하고 이 자료가 온배수 영향 용역 연구자에게 제공되어야 한다. 그렇지 못한 경우에는 수치모형을 통한 계절별 및 조석주기별 기준 수온 분포를 제시하는 것이 바람직하다. 수치모형을 활용하는 경우에는 방법의 특성상 여러 가지 가상적인 경우에 대한 실험이 가능하기 때문에 현상 재현이 통계적으로 유의한 수준까지 달성된 경우에 기준 수온 분포로서의 유용성이 있다. 이 방법을 수용하기 위해서는 사용할 수치모형의 표준화를 전제로 하며 원전별로 과거 관측 자료를 이용하여 수치모형을 이용한 현상 재현 실험 연구가 선행되어야 한다.

### 조사 방법의 표준 지침

앞절의 설명 내용을 고려하여 다음과 같이 조사 방법의 표준 지침을 정리하였다. 대조구 설정의 문제에 대해서는 대조구 설정 표준 방법을 제시하지 않고 비교 표준 수온 방법에 대한 대안을 제시하였다.

#### 가. 해수 유동

##### ① 이동 관측 (라그랑쥐안 조사)

항 목	내 용
관측장비	GPS 부착 부표
관측방법	2개 이상 동시 투하 및 위치추적
관측시기	계절별 및 관측월 기준 최강 창낙조류 시기
최소관측기간	- 확산계수 추정 목적 : 조석 1주기 - 조석잔차류 산출 목적 : 조석 2주기
조사영역	해양물리학적 특성을 고려하여 결정
기타	- 수온센서(정확도 0.2℃, 해상도 0.02℃ 이상) 부착 - 근접 관측소나 자동기상관측시스템(AWS)으로 바람 측정

##### ② 고정점 관측

항 목	내 용
관측장비	RCM, DCM 또는 천해용 음파유속계
관측방법	계류
관측시기	계절별 및 관측월 기준 최강 창낙조류 시기
최소관측기간	계절별 2주
관측시간 간격	30분 이내
관측수심	취배수 방식 관계없이 다층 관측 권장
관측정점	배수구 200 m 이내 1정점 외 관측해역의 해양물리학적 특성에 따라 수치모형에 활용도가 높은 2정점 이상

#### 나. 해수 특성

항 목	내 용
관측항목	- 표층취배수: 수온 - 심층취배수: 수온, 염분
관측장비	- 수온 연속 측정기기 또는 CTD - 수온: 정확도 0.2℃, 해상도 0.02℃ 이상 - 전기전도도: 정확도 0.005 S/m, 해상도 0.0005 S/m 이상
관측방법	고정점 또는 선박 이동 연속 관측
관측시기	- 계절별 - 조사 월중 최강조 또는 최만조시기 - 간조 및 만조시 연속 2회 관측 - 해양물리학적 온배수 확산 특성이 뚜렷한 경우 확산이 큰 계절 집중 관측
관측기간	이동 선박을 이용하는 경우 정조 전후 총 3시간 이내
관측간격	- 고정점 관측: 수치모형 자료로서 사용 가능한 격자점, 수온 0.5℃ 및 염분 0.1 psu 이내 분해능 가능한 간격 - 선박이동 관측: 수온 0.5℃ 및 염분 0.1 psu 이내 분해능 가능한 간격
관측수심	- 표층취배수: 표층 (수면하 1 m 이내) - 심층취배수: 표층, 취배수 수심, 저층
적외선 영상자료 이용	컴퓨터 모니터링 상 단순 가시화 지양 및 DN 고려 정밀분석

#### 다. 연안 기상

관측 항목	관측 방법	관측 시간 간격	최소 관측 기간	최소 정확도	최소 해상도
바람	AWS 또는 인근 관측소 자료	10 분	1 년	방향 : 5 도 속력 : 0.2 m/sec	방향 : 1 도 속력 : 0.1 m/sec
기온	AWS 또는 인근 관측소 자료	10 분	1 년	0.1	0.01
일사량	AWS 또는 인근 관측소 자료	10 분	1 년	20 W/m <sup>2</sup>	4 W/m <sup>2</sup>
상대습도	AWS 또는 인근 관측소 자료	10 분	1 년	2 %	0.1 %
기압	AWS 또는 인근 관측소 자료	10 분	1 년	0.2 hPa	0.2 hPa
운량	인근 관측소 자료	3 시간	1년	기상청 목적자료	

#### 라. 조간대 지온과 수온

관측 항목	관측 공간 간격	관측 시간 간격	최소 관측 기간
지온	수평: 노출율이 다른 3정점 이상 수직: 표층, 5, 10, 20, 30, 40 cm 깊이	10 분	계절별 15 일
수온	지온 관측 정점의 표층과 저층	10 분	계절별 15 일
수위변화	한 정점에서 수위 관측	10 분	계절별 15 일

#### 마. 관측장비 관리

항 목	내 용
장비검교정	최초 사용시 검교정 필수
검교정자	생산자 또는 국가공인 검교정 기관
검교정주기	생산자가 제공하는 장비 특성에 의거
검교정 증명서류	반드시 제출

### 온배수 표준 모델 지침

앞절에서 제시한 전제 조건을 고려하면서 온배수 확산 모델링에 사용할 코드의 표준화와 모델링 방법 및 결과의 평가에 이르는 모든 단계를 표준화할 필요가 있다. 장기적으로는 한국형 온배수 확산 모델 코드의 표준화 작업이 필요하나 본 연구에서는 그 전단계로서 코드 표준화 작업의 방향을 제시하고, 모델링 지침을 단계별로 제시하고자 한다.

#### 가. 온배수 확산모델 표준화 순차도

- (1) 전문가 포럼 결성
- (2) 표준 모델 요건의 심의
- (3) public domain 상의 모델 검토
- (4) 표준 모델 개발을 위한 기본 코드 작성
- (5) 특정 해역의 그리드와 수심 체계 작성
- (6) 초기 조건 선정
- (7) 특정 조건하의 수치 실험

구체적인 요건을 현 단계에서 제시하는 것은 기술적으로 어려운 문제다. 다만 다음과 같은 기본적인 요건을 고려할 필요가 있다.

##### 해수 유동 모델

- ◆ 3차원 양해법 코드
- ◆ advection과 diffusion의 수치 오류를 최소화 할 수 있는 스킴
- ◆ 조건대의 dry and wet control을 할 수 있는 스킴

##### 온배수 확산 모델

- ◆ 해수 유동 모델과 연결 (coupled)
- ◆ 수온의 advection과 diffusion의 수치 오류를 최소화 할 수 있는 스킴
- ◆ 다양한 확산계수의 option을 제공
- ◆ 표면 열교환을 제어할 수 있어야 함.
- ◆ 개방 경계에서의 열 플럭스를 제어할 수 있어야 함.

#### 나. 표준 모델링의 운영 및 결과 제시 지침

##### (1) 모델 코드의 선정시 고려사항

모델 특성	조건	비고
순환 및 확산 모델	순환 및 확산 상호 연계 (coupled)	
수평 격자 크기 및 구성, 수심	가변격자 허용 near field : 50-100 m far-field : 100- 500 m	해도상 수심 (최근 전자해도 수심값을 평균 해면으로 보정후 사용)
수직 격자 크기	수온 약층을 충분히 해상할 수 있는 격자크기 선정	
시간 간격	CFL 조건을 만족	일반적으로 최강조류 $dt \leq 0.1 * \min(dx, dy) / \max(U, V)$
차원	3차원	
점성계수, 확산계수	다양한 option 제공	

기본방정식	3차원 운동방정식 및 확산 방정식	
수치 스킴 및 계산 방식	양해법, 유한차분 혹은 유한 요소법	
이류항 및 확산항 차별화 및 수치스킴	MPDATA 스킴 추천	수치 확산에 의한 왜곡을 최소화 할 수 있는 스킴 사용
온배수 부과 조건	특정 정점 별 가변 조건 부과	
열교환계수	계절별 계수 부과	

##### (2) 모델링 실험 조건의 부과

항 목	부과 방식	비고
흐름장의 개방경계 조건	조석 4대분조 및 항류 조건 부과	실측치로부터 조화분해 결과 이용
온도장의 개방경계 조건	개방 경계에서의 온도 및 염분의 계절 평균값 부과	실측치 이용
해표면 열교환 방식	계절 별 열교환 계수값 부과	
밀도의 변화 허용 여부	수온 및 염분 변화에 따른 밀도장의 변화 허용 및 밀도류의 재현이 가능하여야 함.	필수 사항
재순환 허용 여부	허용	
간사지 처리 기법	조간대 간사지 발달 해역은 필수적으로 창낙조시에 따른 수역, 육지역의 구분 방식 부과 필수	필수 사항
체적의 보존	모델 영역내 수체적의 보존	필수 사항
열수지 균형	개방경계 및 표층에서의 열손실을 고려한 열배출 총량의 보존 조건 만족이 필수	
3 차원모델의 수직 확산계수 처리 방식	코드내 계산 혹은 계절별 확산 계수 상수값 부과	
모델링 기간	계절별 (4회/년) 17일/1회	결과는 계절 별 및 년 평균 값으로 제시
수온 및 염분의 초기장 부과	실측에 의한 계절 평균값을 3차원 코드 격자에 내삽하여 부과	
자료동화 스킴의 종류와 적용 여부	필요시 부과	향후 적극적으로 실측치 값을 부과하여 모델의 재현성을 높임.

##### (3) 모델링 결과의 분석 및 제시

항목	내용	비고
유속장	실측 값과 모델 계산치의 비교 분석	정량적 skill 분석 조류는 4대분조 반조차 및 위상, 항류는 85% 이상의 재현율 요구
수온장	실측 값과 모델 계산치의 비교 분석	수층별 온도 분포 특정 정점의 시계열 온도 변화
결과물 제시	모델링 결과는 17일 4회에 대한 모든 변수 값을 출력하고 저장 매체에 기록, 추후 필요시 검증 자료로 활용	출력 양식은 netcdf format
결과물의 통계분석	결과는 기술 통계 및 확률 통계를 기반으로 작성하여서, 온배수 상승온도의 거동 양상과 확률적 유의미성 파악에 주안점을 둠.	과거 특정 온도 분포도 제시 방식을 지양함. 온도 구간별 4계절별 발생 빈도 통계 제시 (그림 및 수치)

## 결어 및 제언

본 연구에서는 원자력 발전소의 온배수에 의한 어업손실 평가를 위한 해양물리 분야의 조사 지침을 제시하였다. 관측이나 온배수 확산 모델링 단독으로는 온배수에 의한 수온 분포의 시간에 따른 변화를 파악하는데 한계가 있으므로 관측 자료와 수치모델링을 상호 보완적으로 병행하는 것을 원칙으로 제시하였고 원자력 발전소 인접 해역의 모든 자연적 열원의 영향을 고려한 열수지 모형의 개념에 근거한 조사를 제시하였다.

그 동안 어업피해조사 보고서에서 가장 큰 문제였던 대조구 설정 문제에 대하여 대조구 설정이 자연적인 해양 상태 변화에 매우 민감하기 때문에 본 연구에서는 비교 표준 수온 설정 방법에 대한 대안을 제시하였다. 특정한 시간에 대하여 광역 관측 결과를 해석할 때 어떤 정점을 비교 기준의 대상으로 설정하는 것보다는 전체 해역의 수온 시계열 자료를 바탕으로 시간적 변화 경향으로부터 온배수 영향 정도를 분석하는 것이 보다 논리적이다. 그러나 현재 상태를 분석하기 위한 비교 기준이 되는 시점의 관측 자료를 확보하는 것은 이미 불가능하다. 지금부터라도 앞에서 제시한 조사 방법에 따라 상시 수온 분포의 조사가 이루어져야 하고 이 자료가 온배수 영향 용역 연구자에게 제공되어야 하며 그렇지 못한 경우에는 수치모델을 통한 계절별 및 조석주기별 기준 수온 분포를 제시하는 것이 바람직하다. 수치모델을 활용하는 경우에는 방법의 특성상 여러 가지 가상적인 경우에 대한 실험이 가능하기 때문에 현상 재현이 통계적으로 유의한 수준까지 달성된 경우에 기준 수온 분포로서의 유용성이 있다.

온배수 확산 모델링과 관련하여 현재 해양에서 사용되는 수치 모델은 개발 시기에 따라 그 성능과 특징이 현격하게 차이가 난다. 오늘날의 잣대로서 과거의 모델을 평가하는 데에는 문제점이 없을 수 없지만 모델링은 엄격한 검증 과정을 통하여 그 결과의 타당성을 입증해야 할 의무를 수반한다. 이러한 측면에서 과거의 순환 및 확산 모델링은 많은 문제점을 안고 있는 것으로 나타났으며 이러한 문제점을 극복하기 위한 대안으로서 표준코드의 개발을 제안하였다. 표준 코드가 개발되기 전단계에서는 표준 모델링의 운영 및 결과 제시 지침을 준수하여 모델링을 수행하고 그 결과를 평가함으로써 과거의 문제점을 어느 정도 극복할 수 있을 것이다. 차후 별도의 과제를 통하여 전문가 포럼을 구성하여 한국적 현실에 적합한 표준코드를 개발한다면 온배수 문제를 합리적으로 해결하는데 진일보할 수 있을 것으로 기대된다.

해양물리 분야의 조사결과, 즉, 온배수 영향에 의한 수온분포 변화는 지금까지 관행처럼 사용되었던 소위 특정 상승 수온 1°C 증가 해역 판단과 이의 피해역 산정에 직접 이용을 벗어나 노 (2007)

가 제시한 것과 같은 온배수 충격을 판단하는 하나의 평가 지수로 활용되는 것이 바람직하다. 본 연구에서 제시한 표준 지침이 그 동안 관행처럼 되풀이되었던 어업손실민원과 조사 과정에 대한 건설적인 해결의 실마리가 될 것을 기대하지만 이는 모든 이해 당사자들이 표준지침을 받아들이는 이해와 노력 없이는 불가능한 일이 될 수 있다.

## 사 사

본 연구는 한국수력원자력(주)(H04-S0424-000)의 협약에 의한 한국해양학회 연구사업으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 군산대학교, 2002. 영광 5, 6호기 건설 및 가동으로 인한 고창지역 광역해양 피해조사 중간 보고서, 58 pp.
- 노영재, 2007. 원자력 발전소 온배수 피해역 산정을 위한 영향지수 시안, 바다, 12(1): 35-42
- 부경대 해양과학공동연구소, 1996. 영광원전 주변 해양 환경 조사 보고서.
- 여수수산대학교 수산과학연구소, 1995. 영광원자력발전소 1,2,3,4호기 온배수로 인한 어업피해조사 최종보고서 (별책).
- 여수수산대학교 수산과학연구소, 1995. 영광원자력발전소 1,2,3,4호기 온배수로 인한 어업피해조사 최종보고서. 865pp.
- 여수수산대학교 수산과학연구소, 1995. 영광원자력발전소 1,2,3,4호기 온배수로 인한 어업피해조사(수정 및 보완본).
- 한국수산학회·한국해양학회, 2006. '원전온배수 관련 어업손실평가 표준지침 개발연구' 한국수력원자력(주) 연구과제보고서, 152pp.
- 한국전력기술(주), 1992. 영광원자력발전소 주변 해양환경조사 보고서 (1,2호기 가동으로 인한 영향).
- 한국전력기술(주), 1994. 영광원자력 5,6호기 건설사업 환경영향평가.
- Cho, Y.-K. T.-W. Kim, K.-W. You, L.-H. Park, H.-T. Moon, S.-H. Lee and Y.-H. Youn, 2005. Temporal and spatial variability in sediment temperature on a macro tidal flat: the Baeksu Tidal Flat on the western coast of Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 65: 302-308.
- Harrison, S. J. and A. P. Phizacklea, 1985. Seasonal changes in heat flux and heat storage in the intertidal mudflats of the Forth estuary, Scotland. *J. Climatology*, 5: 473-485.
- 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.