

원자력 발전소 온배수 피해역 산정을 위한 영향지수 시안

노 영 재*
충남대학교 해양학과

Thermal Index for the Assessment of the Impacted Area by the Thermal Discharge from Nuclear Power Plant in Korea

YOUNG JAE RO*

Dept. of Oceanography, Chungnam National University, Taejon, Korea

국내 원자력 발전소의 온배수 배출을 둘러싸고 제기된 각종 수산업 피해 민원이 발생한지도 20년이 가까워 온다. 온배수에 의한 연안환경 및 수산업 피해를 보다 과학적이고 합리적으로 산정하기 위한 지침이 한국 해양학회, 수산학회 공동의 노력으로 마련되었다. 피해역 산정 방안을 보다 합리적으로 마련하기 위하여 기존의 특정 상승온도 기준을 탈피하고 환경과 생태계의 다양한 영향을 포괄적으로 고려할 수 있는 온배수 영향지수를 제안하였다. 이 영향지수는 UNEP (2002)의 권고안에 따른 지침을 수용하고, 현실성과 경제성 및 미래지향적 특성을 갖출 수 있다. 특정 원자력발전소 현장에 적용 가능한 영향지수의 구현을 위하여 예비 실험의 노력이 요구된다.

Thermal discharges from the nuclear power plants into neighboring Korean coastal waters have raised serious disputable arguments from the two parties of local fishermen and scientists involved since late 1970's. To meet the social demands and provide scientific and reasonable solutions, new set of standards have been established which will guide through measuring and processing the various variables and parameters in environmental and fishery impact assessment procedures for the thermal discharge from the nuclear power plants. These are made possible for the first time by the combined efforts by Korean Oceanography Society and Fishery Society. In this paper, Thermal Discharge Impact Index (TI) is proposed by the probability of the local temperatures exceeding critically to local fishery multiplied by the weighted sum of diverse environmental and ecological factors. The TI is essentially conceived to overcome the long-existing bad practices based on the particular excess temperature such as 1. The proposed TI based on the guideline principle proposed by the UNEP(2002) is expected to be practical, economic and self-adaptive. To prove the usefulness of the TI, it is highly recommended to conduct prototype experiments and exercises in a particular nuclear power plant site in the near future.

Keywords: Nuclear Power Plant, Thermal Discharge, Environmental Assessment, UNEP, Thermal Discharge Impact Index, Excess Temperature

들어가는 말

1978년 고리 원자력 발전소 1호기가 상업 운전 들어간 이래로 전국 네개소에서 현재 가동중에 있는 원자력 발전소는 총 20기로 17,726 Mw 전력을 생산하고 있다 (원자력문화재단). 최초 운전을 시작한 고리원자력 발전소 1호기의 온배수 배출량이 20 cms(cubic meter/second) 인 것에 비해 전원원자력 발전소에서 발생하는 총 배출량은 약 950 cms이다. 원자력 발전소 (이하 원전)의 가동에 따라 발생하는 온배수의 배출은 원자로의 폐열을 적절하게 냉각시켜 외부로 배출하는 once-through 냉각 방식의 부산물이다. 이 때 막대한 양의 바닷물을 취수하여 복수기내의 가열된 증기를 냉각시킨 후 더

워진 냉각수를 주변 해양환경으로 배출하게 되면서 환경문제가 발생하게 된다. 원전 주변의 연안에서 수산업에 종사하는 어민들에게는 수산물 생산의 감소로 인한 민원의 제기로 귀결되고, 장기간에 걸친 사업자 (한국수력원자력 발전소)와 지방 어민들 간의 다툼은 사회적 이슈로 대두되지 오래 되었다.

온배수에 의한 연안환경 및 수산업 피해를 보다 과학적이고 합리적으로 산정하기 위한 지침이 한국 해양학회, 수산학회 공동의 노력으로 마련되었다 (한국수력원자력 주, 2006). 해양 생태의 복잡 다양한 현상을 이해하고 정량화하기 위한 전문 분야의 현장 측정과 분석에 관련된 지침이 마련되었으며, 그에 따라 보다 과학적인 자료 생산과 평가가 이루어 질 것이라는 기대는 그 어느 때 보다 높다. 그러한 노력의 결실은 최종적으로는 피해역 산정 방안으로 구체화 될 것으로 기대된다.

*Corresponding author: royoungj@cnu.ac.kr

기존의 온배수에 의한 피해역 산정은 전적으로 특정 온도 상승역을 기준으로 하였다. 여기에는 그간의 많은 논란과 비판이 있었다. 논란은 크게 두가지로 구분할 수 있는데, 첫째, 특정 상승온도(예를 들어 1°C) 선정에 대한 합리적 근거의 유무, 둘째, 상승온도 분포역의 산정 방법을 둘러싼 비판과 논의이다. 이를 좀 더 자세히 살펴 보면 특정 상승온도가 가지는 해양환경 및 수산업에서의 의미가 동일한 온도값이라도, 위치 및 해역에 따라 크게 다르다는 사실이다. 즉, 천해 내만의 서해와 같은 입지와 외해에 면하고, 수심의 변화가 심하고, 해안선인 단조로운 동해에 면한 입지에서는 동일한 양의 온배수가 배출되어도, 단위 표면적당 상승 온도가 크게 달라질 것은 누구나 이해할 수 있다. 그에 더해 천해 내만의 생태 환경과 그 속에 서식하는 생물자원들이 입계되는 영향의 정도 또한 외해에 면한 환경의 서식 생물과 비교하면 크게 다를 것도 능히 짐작할 수 있는 문제다. 첫째 논란의 문제는 차치하고 둘째의 논란에 대한 현실적 행태는 다음과 같다. 일반적으로 온배수 배출에 따른 수온상승 분포에 대한 이해는 다음의 복잡한 물리적 과정에 대한 이해를 요구한다; ① 주변 해역의 해수 순환과정, ② 주변 해역에서의 난류혼합과정, ③ 온배수 배출 해역에서의 대기-해양 열교환 환경, ④ 기타 앞의 세가지 과정에 영향을 미치는 간헐적, 급변 현상의 유무(예를 들어, 태풍의 내습, 풍파, 쓰나미)이다. 이러한 전물리적 과정에 대한 완전한 과학적 이해는 현실적으로 어렵고, 꼭 요구되는 것은 아니다.

UNEP (2002)의 환경영향평가 매뉴얼에는 평가를 위한 상세한 가이드라인을 제공하고 있다(부록 참조). 온배수에 의한 수산업 피해 조사 또한 특정한 산업(원자력 발전소 가동)의 환경에 대한 영향평가의 테두리 속에서 존재하므로, 이 가이드 라인을 준수할 필요가 있다. 평가의 요체는 지수를 산정할 때는 대표성이 있는 몇 개의 지표(경계성, 효용성, 현실성, 집중성을 견지하여 선정하기를 권고하고 있다. 우리나라의 현실적 문제에도 지극히 타당하다.

복잡한 생태계의 건전성과 위해도 환경영향평가를 위한 최근 선진국의 연구경향도 UNEP (2002)의 그것과 다르지 않다. 여러 학자들에 의해 특정지수의 산정을 통한 방안이 제시되고 있는데(참고 부록 2절 표 1), Odum (1986, 1996)에 의해 *emergy*의 개념과 환경 평가를 위한 응용틀 (Odum, *et al.*, 2000; Brown과 Ulgiati, 2004)이 제시된 이후 많은 학자들이 생태계 내의 위해도와 기여도를 정량적으로 평가하는데 활용을 하고 있다. *exergy*를 이용한 연안 해양생태계의 최근의 적용 사례는 다음의 연구에서 볼 수 있다(Herendeen, R. A, 2004; Brown, *et al.*, 2006.; Laganis and Debeljak, 2006; Lane and Brown, 2006; Tilley and Brown, 2006; Xu *et al.*, 1999; Xu, 2002). Hau *et al.* (2004)은 *emergy*의 적용 및 개념상의 문제점을 지적하였으며, Bastianoni와 Marchettini (1997)은 *emergy*와 *exergy*를 함께 활용하였다. Inyang *et al.* (2003)은 총환경 민감도 지수를, Xu *et al.* (2005)은 생태계 건강지수를 정의하였고, Fan *et al.* (2005)은 생태 위험 평가를 위하여 확률론적 접근을 시도하였다. 보다 자세한 내용은 부록을 참조하기 바란다.

본 연구의 목표는 세가지로 나눌 수 있다.

- 첫째, 기존 피해역 산정 관행에 대한 문제 제기,
- 둘째, 온배수 배출에 따른 충격지수의 제안,
- 셋째, 충격 지수의 산정을 위한 준비 단계에 대한 제안이다.

피해역 산정 방식

기존 피해역 산정에 대한 문제 제기

온배수 배출과 관련한 과거의 온배수 분포 조사 방식 및 피해역 산정안에 대한 본격적인 논의는 지난 20여년의 온배수 관련 수산 피해 보상이 이루어져 왔음에도 불구하고 본 과업 이전까지 부재하였다고 할 수 있다. 이에 대한 논의는 차치하고 본 연구에서는 과거 피해역 산정안과 관련된 문제점을 지적하고, 그에 대한 새로운 방안 모색의 필요성을 강조하고자 한다.

기존의 수산 피해역 산정은 특정 상승온도 (δT , 주로 1°C)를 기준으로 하였다. 문제의 핵심은 특정 상승온도가 기준으로서의 조건에 부합할 수 있는가에 대한 비판으로서 그것의 사용을 정당화할 수 있을 학문적 배경이 미약하고 오히려 학문외적 차원의 고려가 과중하게 작용되어온 관행을 지적하지 않을 수 없다. 이러한 관행은 결과적으로 피해역에 소속되지 않는 어장이나 어로 활동 영역의 어민들에 의한 민원 제기의 동기로 발전되어 왔으며, 온배수 이슈가 학문외적 문제로 비화되는 구조를 만들게 되었다. 또한 그러한 사회적 변천에 더해 특정 상승온도 피해영역이 원자력 발전소의 증설로 인하여 증대되므로, 그 기준에 대한 시비가 끊이지 않고 제기되어 오는 것이 현실이다.

이 과정에서 두가지 문제점이 노출된 바, 첫째는 특정 상승 온도의 선정과 관련된 학제적 조사와 그를 정당화 할 각종 생태 및 환경 변수의 측정 방식의 문제이고, 둘째는 특정 상승 온도역을 결정할 때의 수온 측정 방법과 수치 모델링을 이용한 온도역 산정 방식의 문제이다. 이러한 제 문제를 총괄적으로 또한 근원적으로 해결하기 위하여 측정 방식의 지침을 조사 항목 별로 표준화 하였다(박용철 등, 2007; 이재학 등, 2007).

온배수 영향지수의 정의와 계산 과정

전제 조건: 원자력 발전소 온배수에 의한 환경, 생태, 수산에 대한 영향은 다각도로, 광범위한 시간 스케일에 따라 발생하게 된다. 일차적으로는 온배수의 취수 과정시 발생하는 가입 (*entrainment*)을 통하여 여러 경로상 이동중 기계적 충격에 의한 미생물 사멸효과에 더해, 온배수가 주변 해양환경으로 유입된 후 발생하는 중장기적 환경의 변이에 따른 생태계의 변화와 그에 기초된 수산물의 생산 감소로 이어지는 일련의 복잡한 단계를 거쳐서 최종적 수산업의 피해를 정량화하는 작업은 해양학 및 수산학의 모든 전문분야와 관련을 갖는 복잡한 시스템적 접근을 요구하게 된다.

과거 정성적 혹은 특정 상승온도에 기초한 피해역 산정의 단점을 보완하기 위하여는 다음과 같은 기본적 요구 사항을 충족할 필요가 있다.

- ① 정량화를 가능하게 하는 기준 지수 (*index*)의 도입,
- ② 기준 지수는 해양 및 수산의 다양한 현상을 포괄적으로 대표할 수 있는 과정과 요소를 반영할 것,
- ③ 기준 지수는 현실적으로 실현 가능할 것,
- ④ 미래 지향적이고, 진보적 입장에서 개선 가능할 것 등이다.

특정 사건(예, 개발에 의한 환경 스트레스에 의한 생태계 충격, 온배수에 의한 주변 해양환경의 변화와 그 충격)의 환경 충격 평가를 위한 기본 원리로서 UNEP (2002)는 Fig. 1과 같이 14개 항

2.4 Basic Principles

Environmental Impact Assessment should be:

Purposive - the process should inform decision making and result in appropriate levels of environmental protection and community well-being.

Rigorous - the process should apply "best practicable" science, employing methodologies and techniques appropriate to address the problems being investigated.

Practical - the process should result in information and outputs which assist with problem solving and are acceptable to and able to be implemented by proponents.

Relevant - the process should provide sufficient, reliable and usable information for development planning and decision making.

Cost-effective - the process should achieve the objectives of EIA within the limits of available information, time, resources and methodology.

Efficient - the process should impose the minimum cost burdens in terms of time and finance on proponents and participants consistent with meeting accepted requirements and objectives of EIA.

Focused - the process should concentrate on significant environmental effects and key issues; i.e., the matters that need to be taken into account in making decisions.

Adaptive - the process should be adjusted to the realities, issues and circumstances of the proposals under review without compromising the integrity of the process, and be iterative, incorporating lessons learned throughout the proposal's life cycle.

Participative - the process should provide appropriate opportunities to inform and involve the interested and affected publics, and their inputs and concerns should be addressed explicitly in the documentation and decision making.

Interdisciplinary - the process should ensure that the appropriate techniques and experts in the relevant bio-physical and socio-economic disciplines are employed, including use of traditional knowledge as relevant.

Credible - the process should be carried out with professionalism, rigor, fairness, objectivity, impartiality and balance, and be subject to independent checks and verification.

Integrated - the process should address the interrelationships of social, economic and biophysical aspects.

Transparent - the process should have clear, easily understood requirements for EIA content: ensure public access to information; identify the factors that are to be taken into account in decision making; and acknowledge limitations and difficulties.

Systematic - the process should result in full consideration of all relevant information on the affected environment, of proposed alternatives and their impacts, and of the measures necessary to monitor and investigate residual effects.

Fig. 1. UNEP의 환경영향평가 기본 원리.

목의 속성을 제시하고 있다.

온배수 영향지수의 정의: Table 1에서 제시한 기본 원리와 조건을 만족하는 지수를 소위 '온배수 영향지수'(TI)로 도입하고 다음과 같이 정의한다.

온배수 영향지수(Thermal Discharge Impact Index, TI)는 온배수 상승온도 발생확률과 다양한 해양의 수산물 생산에 기여하는 인자들과의 곱의 합으로 정의될 수 있다.

$$TI = \sum_i P(T_i)F_i \tag{1}$$

여기서 TI; Thermal Discharge Impact Index(온배수 배출 영향지수),

$P(T_i)$; 주요 요소별(i index로 표현) 임계 상승온도(T_i)의 특정 정점에서의 발생 확률,

F_i ; 모든 생태, 환경 요인의 수산물 생산에 대한 기여도

여기서 두 항목을 살펴보면 $P(T_i)$ 는 생물군집, F_i 에 대응하는 임계상승온도의 발생확률이고, F_i 는 다양한 인자들의 수산물 생산에 대한 기여도이다. 즉 큰 기여도를 갖는 인자가 임계 온도 상승에 노출되게 되면 그것에 대한 환경영향 지수는 크게 되고 결과적으로 큰 충격을 받는다고 볼 수 있다.

이때 F_i 의 값들의 산정이 요구되게 되는데, 기존의 문헌연구를 통하여 결정할 수 있을 것이다. $P(T_i)$ 의 확률값은 순수하게 물리

Table 1. UNEP (2002)의 환경영향평가 원리의 온배수 문제 평가에 대입

항 목	온배수 문제에 대응
합목적성	온배수와 관련 현상과 수산업 피해에 국한
엄밀성	과학적 합리성에 기반
실용성	실현 가능해야 하며 문제 해결에 도움이 되어 함
합당성	의사 결정에 도움이 되는 정보 제공
비용경제성	문제 해결에 드는 최소한의 비용으로 가능하여야 함.
효율성	시간 및 경비의 최소화
집중성	주요 이슈에 집중하여야 하며 백화점식의 접근 방식 배제
적응성	지역 특성에 적용할 수 있는 조사 지침이 필요
참여성	지역 주민 및 전문가 집단의 공동 참여
학제적	관련 학문의 학제적 접근
신뢰성	전문가의 양심에 따라 충분한 신뢰성을 확보
통합성	사회, 경제 및 생태물리적 다양한 견해를 통합
투명성	조사 및 분석, 평가이 전단계가 투명하게 드러나야 함.
체계성	피해 영향을 받는 환경에 대한 충분한 고려가 체계적으로 이루어져서 필요한 조사와 모니터링이 이루어져야.

적 과정(온배수의 이류 및 확산)을 통하여 지배되므로, 현실적으로는 온배수 확산 모델링 결과를 이용하여 각 격자점 상에 수치적으로 산정하게 되며, 확률값이기 때문에 0부터 1사이의 값을 갖는다.

F_i 의 산정을 위해 보다 구체적으로 살펴 보면 한국해양학회에서는 크게 생물군과 환경인자의 두 group으로 구성하고 있으며, 생물군에서는 7개의 sub-group (동물, 식물성 플랑크톤, 어류, 경성, 연성 저서생물, 미생물, 대형 조류)과 환경의 sub-group에는 크게 6개의 인자, ① 염소 농도, ② 용존산소 포화도, ③ 구리농도, ④ 유기탄소 농도, ⑤ 엽록소 농도, ⑥ SPM 를 고려하고 있다. 이러한 두 group은 편의적 양분법이나, 대체로 해양의 생물군을 전부 포괄하고 있으며, 수질 및 저질 환경의 주요 인자를 현실적으로 대표한다고 볼 수 있다.

따라서 F를 다시 생물군 영향과 환경인자의 합으로 대별하면

$$F = B + E \tag{2}$$

두 개의 그룹간 가중치를 고려하면 식 (2)는

$$F = \alpha B + \beta E \tag{3}$$

여기서 α , β 는 B E에 대한 가중치이고 $\alpha + \beta = 1$ 이다.

α , β 은 수산물 생산에 대한 생물과 환경인자들의 그룹 별 기여도로서 일종의 가중치 역할을 하며, 그 합은 항상 1이 된다. 이때 가장 현실적으로 어려운 결정은 수산물 생산에 대한 각각의 기여도가 얼마가 될 것인가인데, 서로 등가로 보면 각각 0.5가 되며, 생태군의 역할이 환경인자의 간접적 역할에 비해 크다면 $\alpha > 0.5, \beta < 0.5$ 가 될 것이다. 궁극적으로는 생태계 (eco-system) 모델링이 연동되어 이루어 질 경우, 특정 수산물의 환경에 대한 민감도를 결정할 수 있으므로, 가중치는 이 민감도를 이용하여 결정할 수 있다.

UNEP (2002)의 권고안 7,8 항에 의거 집중성과 적응성을 고려, 모든 생물군을 항상 고려하기 보다는 각 지역특성을 따라 수산물 가치 위주의 우점종을 고려하여 2-3개 내의 생물군으로 압축할 수 있을 것이다.

환경 영향지수 산정의 과정과 예

상승 온도 발생 확률, P(T_i): 상기 (1) 식의 산정을 위해 다음의 보기를 통하여 현실적 활용 가능성을 제시하고자 한다. 이는 전적으로 가상적 조건하에서의 계산 과정을 보여 주기 위함이다.

특정 상승온도의 발생 확률은 온배수 확산 수치모델링의 결과를 이용하면 산정할 수 있다. 생물군 Bi에 대응하는 임계 상승 수온이 0.74°C(이 온도는 수산화회의 임계상승온도 정의를 원용할 수 있음)이라고 가정할 때 특정 정점에서의 발생확률은

$$P(T_{xy}) = Prob[T_{xy} \geq \delta T_i = 0.74] \tag{4}$$

여기서 δT_i 는 I 생물군의 임계수온으로서 0.74°C이고, T_{xy} 는 xy 정점에서의 상승온도인데, 임계수온보다 큰 값 이상으로 발생할 확률은 총 발생빈도가 15일 동안 1750회 발생했을 경우

$$\frac{1750}{6 \times 24 \times 15} = \frac{1750}{2160} = 0.81$$

이는 온배수 확산 모델링 결과를 매 10분 단위로 15일 결과를 출력 저장하여 기준했을 경우 얻어지는 확률값이 된다. 이와 유사한 방법으로 온배수가 존재하는 모든 정점에서의 확률은 0 이상 1 이하의 값을 가지게 되고, 0인 경우는 온배수의 영향이 전혀 없는 구역이 된다.

각 구간에 대하여 모든 정점(발전소 배수구에서 온배수 수온상승역을 포함한 최대 면적의 3배역에 대하여 격자 간격 100m로 구분하여)에서 각 계절별 출현 상승온도의 발생 확률은 온배수 확산 모델링의 결과를 이용하여 산정할 수 있다.

주요 요소의 그룹 별 수산생산 기여도 산정에 대한 고려: 해양에서의 수산 생물에 관여하는 각종 요소는 무수히 존재한다. 이를 크게 대별하면, 수산물 생산에 직접 기여하는 생물군과 간접적으로 기여하는 해양 생태계 속의 환경인자들이다. 앞서 기술하였듯이 현재 해양학회의 생태 지침 대상으로는, 서식생물의 특성에 따라 7개 생물군 6개의 환경 인자를 고려하였다.

각각의 생물군은 서식지역의 특성에 따라 다 달라질 수 있을 것 이나 가시적으로 표현되는 현상은 매우 국부적이다. 따라서 생물생태 기여도로서 구분하기 위해선 모든 생물군을 대상으로 온수종의 변화 특성과 요인분석에 의한 다변량 통계분석 (Multivariate Data Analysis)으로서 결정된 최대영향범위로서 기준하였다.

해역에 따라서는 7개 생물군 중에서 선별적으로 고려할 수 있을 것이다. 예를 들어 고리해역에는 대형조류(미역)과 어류(농어와 삼치) 및 연성저서동물(해삼) 등이 우점 한다든지 영광해역에는 어류(실뽀장어, 우럭) 및 연성저서동물(낙지, 갯지렁이), 식물성 플랑크톤이 우점 한다든지 할 경우 이 3개의 생물군으로부터 총생산량을 기준하여 기여도를 산정할 수 있을 것이다.

식 (1)에 식 (3)을 대입하면

$$TI = \sum_i P(T_i) [B_i + E_i] \tag{5}$$

식 (2)는 생물군과 환경 요인 별 수산생산에 대한 기여도를 분리한 식이 되고

여기서 두 항을 독립적으로 산정하게 되는데, 이 때 생물군 전체와 환경의 수산 생산 기여도를 가중치, α , β 로 가정하여 식 (2)를 구체적으로 쓰게 되면

$$TI = \sum_i P(T_i) B_i + \sum_j P(T_j) E_j + \alpha \sum_{i=1}^7 P(T_{B_i}) B_i + \beta \sum_{j=1}^6 P(T_{E_j}) E_j \tag{6}$$

식 (5)에서 7개의 생물군 요소와 6개의 환경인자는 앞에서 기술한 바와 같다.

생태 유형 별 TI 산정 예: 수산물 생산 결과를 다음의 다섯 유형으로 구분할 수 있다.

- i) 생물군 지배 유형
- ii) 등가형 유형 $\alpha = \beta$
- iii) 환경요인 지배 유형 $\alpha < \beta$
- iv) 극단형 I, $\alpha = 1, \beta = 0$
- v) 극단형 II, $\alpha = 0, \beta = 1$

Table 2. 생태 유형별 기여도와 임계온도의 계산에 사용한 수치 예

생태 유형	I 생물군 지배 유형	$\alpha = 0.8, \beta = 0.2$
	II 등가형 유형	$\alpha = 0.5, \beta = 0.5$
	III 환경요인	$\alpha = 0.2, \beta = 0.8$
	IV 극단형 A	$\alpha = 1, \beta = 0$
	V 극단형 B	$\alpha = 0, \beta = 1$
지표종	생물군 3종, 환경인자 2종	
생물군 기여도	$B_1 = 0.55, B_2 = 0.31, B_3 = 0.14$	
환경인자 기여도	$E_1 = 0.73, E_2 = 0.27$	
생물의 임계온도	$T_{B1} = 0.75, T_{B2} = 1.0, T_{B3} = 1.5$	1: 협온성 온도 민감 대형조류 2: 보통의 온도 내성 부유생물 3: 광온성 온도 둔감 어종
환경인자의 임계온도	$T_{E1} = 1.5, T_{E2} = 3.0$	클로로필 용존산소 포화도
상승온도 발생확률	$P(T_{B1} = 0.75) = 0.82, P(T_{B2} = 1.0) = 0.65, P(T_{B3} = 1.5) = 0.32$	
	$P(T_{E1} = 1.5) = 0.21, P(T_{E2} = 3.0) = 0.08,$	

특정 해역이 위의 5개 유형 중 어디에 속하게 될지는 해역 별 특성에 따라 결정해야 할 추후의 문제가 될 것이고, 본 연구에서는 산정 과정의 이해를 돕기 위해 다음과 같은 보기를 고려하고자 한다.

1) 유형 I $\alpha > \beta$

식 (3)으로 부터 $i=1, 2, 3$ 이고 $j=1, 2$ 인 경우를 풀어 쓰면

$$\begin{aligned}
 TI &= \sum_i P(T_i)B_i + \sum_j P(T_{E_j})E_j = \alpha \sum_{i=1}^3 P(T_{B_i})B_i + \beta \sum_{j=1}^2 P(T_{E_j})E_j \\
 &= \alpha [P(T_{B_1}) * B_1 + P(T_{B_2}) * B_2 + P(T_{B_3}) * B_3] + \beta [P(T_{E_1}) * E_1 + P(T_{E_2}) * E_2] \\
 &= 0.8 * (0.82 * 0.55 + 0.65 * 0.31 + 0.32 * 0.14) + 0.2 * (0.21 * 0.73 + 0.08 * 0.27) \\
 &= 0.55 + 0.03 = 0.58
 \end{aligned}$$

2) 유형 II $\alpha = \beta$

$$\begin{aligned}
 TI &= \sum_i P(T_i)B_i + \sum_j P(T_{E_j})E_j = \alpha \sum_{i=1}^3 P(T_{B_i})B_i + \beta \sum_{j=1}^2 P(T_{E_j})E_j \\
 &= \alpha [P(T_{B_1}) * B_1 + P(T_{B_2}) * B_2 + P(T_{B_3}) * B_3] + \beta [P(T_{E_1}) * E_1 + P(T_{E_2}) * E_2] \\
 &= 0.5 * (0.82 * 0.55 + 0.65 * 0.31 + 0.32 * 0.14) + 0.5 * (0.21 * 0.73 + 0.08 * 0.27) \\
 &= 0.35 + 0.09 = 0.44
 \end{aligned}$$

3) 유형 III $\alpha < \beta$

$$\begin{aligned}
 TI &= \sum_i P(T_i)B_i + \sum_j P(T_{E_j})E_j = \alpha \sum_{i=1}^3 P(T_{B_i})B_i + \beta \sum_{j=1}^2 P(T_{E_j})E_j \\
 &= 0.2 [P(T_{B_1}) * B_1 + P(T_{B_2}) * B_2 + P(T_{B_3}) * B_3] + \beta [P(T_{E_1}) * E_1 + P(T_{E_2}) * E_2] \\
 &= 0.2 * (0.82 * 0.55 + 0.65 * 0.31 + 0.32 * 0.14) + 0.8 * (0.21 * 0.73 + 0.08 * 0.27) \\
 &= 0.14 + 0.14 = 0.28
 \end{aligned}$$

4) 유형 IV 극단 B형 1: $\alpha = 1, \beta = 0$

$$\begin{aligned}
 TI &= \sum_i P(T_{B_i})B_i = \sum_{i=1}^3 P(T_{B_i})B_i \\
 &= [P(T_{B_1}) * B_1 + P(T_{B_2}) * B_2 + P(T_{B_3}) * B_3] \\
 &= 0.82 * 0.55 + 0.65 * 0.31 + 0.32 * 0.14 = 0.70
 \end{aligned}$$

5) 유형 V 극단 E형: $\alpha = 0, \beta = 1$

$$\begin{aligned}
 TI &= \sum_j P(T_{E_j})E_j = \sum_{j=1}^2 P(T_{E_j})E_j \\
 &= [P(T_{E_1}) * E_1 + P(T_{E_2}) * E_2] = (0.21 * 0.73 + 0.08 * 0.27) = 0.17
 \end{aligned}$$

위의 다섯 가지 생태 유형 별 온배수 영향지수의 산정 결과를 Table 3에 요약하였다. 이것은 동일한 조건하에서 유형 별로 영향지수의 값이 상이하게 산정될 수 있다는 사실을 보여주고 있다. 생물군이 지배하면 생태군의 기여도가 상대적으로 커지고, 반대로 환경인자들의 영향이 크면 환경 기여도가 증가하게 된다. 결과적으로 기중치의 선정 작업이 결과에 심각한 영향을 주기 때문에 신중하게 선정과 그에 대한 검증 및 평가 작업이 중요하다.

4. 결어 및 제언

원자력 발전소 온배수에 의한 피해역 산정의 문제는 이해당사자(어민과 사업자)간의 가장 첨예하게 대립되고 논란의 소지가 있는 핵심적 사안이다. 그렇기 때문에 더더욱 과학적이고 합리적 기준을 설정하며, 산정과정의 투명하여, 쌍방간에 이해가 되어야 할 것이다.

Table 3. 생태 유형 별 환경 영향지수 산정 예.

유형	생태군 기여도	환경 기여도	영향 지수	기여도 비 생태 : 환경	비고
I	0.56	0.03	0.59	4:1	생물 우세형
II	0.35	0.09	0.44	1:1	혼합형
III	0.14	0.14	0.28	1:4	환경 우세형
IV	0.70	0	0.70	1:0	생물 지배형
V	0	0.17	0.17	0:1	환경 지배형

지난 20 여년의 관행에 의해 특정 수온 상승온도역을 기준으로 피해역을 산정하여 왔으나, 작금 해양학회 및 수산학회에서의 비판이 높아, 그 관행을 버려야할 시점인 것으로 사료된다.

이러한 시대적 요구에 부응하여, 한국해양학회에서는 합리적인 기준으로 상승온도와 생물군 및 환경인자들의 기여도를 기준으로 환경 영향지수를 도입하였다. 국내에서는 아직 도입된 사례가 없으나, 이미 선진국에서는 유사한 환경 영향지수를 이용하는 것이 정례화 되어 있으며, UNEP (2002)의 환경영향 평가에는 체계적으로 이러한 지수를 도입하도록 권고하고 있는 실정이다.

현실적으로 새로운 방안의 도입은 몇가지 실용상의 난점을 수반할 것이다. 그렇다고, 과거의 불합리한 안을 맹목적으로 추종한다는 것은 전문학자 사회에서는 수용되기 힘들다. 온배수 영향지수가 현실적으로 적용 가능할 것인가? 과거의 특정 상승온도 기준에 비해 한차원 높은 과학적이고 합리적 대안이 될 수 있는가? 이에 대한 답은 특정 해역에서의 활용을 위한 실험적 적용연구와 노력이 있는 다음의 평가로 유보하고, 가까운 장래에 현장 적용실험이 있기를 기대한다.

온배수 피해역 산정을 둘러싼 민원의 제기는 사회적 중요한 이슈로 등장한지 20년이 되었다. 보다 합리적인 대안을 마련하고자 한 모처럼의 양대학회의 노력이 밑받침이 되어 보다 진일보하는 계기가 되기를 바란다.

사 사

본 연구는 한국수력원자력 발전소 (주)와 한국해양학회의 계약에 의해 수행된 ‘원전온배수관련 어업손실평가 표준지침 개발’ 연구과제의 보고서를 기초로 작성되었음.

참고문헌

- Bastianoni, Simonea Marchettini, Nadia, 1997. Emergy/exergy ratio as a measure of the level of organization of systems, *Ecological Modelling* **99**(1):
- Brown, M.T. and S. Ulgiati, 2004. Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems, *Ecological Modelling* **178**: 201-213.
- Brown, M.T., Cohen, M.J., Bardi, E., Ingwersen, 2006. Species diversity in the Florida Everglades, USA: A systems approach to calculating biodiversity, *Aquatic Sciences*, **68**(3): 254-277.
- Fan, M. et al., 2005. Using a probabilistic approach in an ecological risk assessment simulation tool test case for depleted uranium (DU). *J. Chemosphere*, **60**: 111-125.
- Hau, Jorge, L., Bakshi, Bhavik R, 2004. Promise and problems of emergy analysis, *Ecological Modelling*, **178**(1-2): 215-225.
- Herendeen, R.A., 2004. Energy analysis and EMERGY analysis-a comparison, *Ecological Modelling*, **178**(1-2): 227-237.
- Inyang, H.I. et al., 2003. A Quantitative Methodology for Indexing Environmental Sensitivity and Pollution Potential. *Environmental Monitoring and Assessment* **84**: 159-173.
- Laganis, J. and M. Debeljak, 2006. Sensitivity analysis of the emergy flows at the solar salt production process in Slovenia *Ecological Modelling*, **194**(1-3): 287-295.
- Lane, C.R. and M.T. Brown, 2006. Energy-Based Land Use Predictors of Proximal Factors and Benthic Diatom Composition in Florida Freshwater Marshes, *Environmental Monitoring and Assessment* **117**(1-3): 433-450.
- Odum, H.T., 1986. Emergy in ecosystems. In: Polunin, N. (Ed.), *Environmental Monographs and Symposia*, John Wiley, NY, pp. 337-369.
- Odum, H.T., 1996. *Environmental Accounting : Emergy and Environmental Decision making*, John Wiley & Son, New York.
- Odum, H.T., Brown, M.T., Williams, S.B., 2000. *Handbook of Emergy Evaluation: A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios. Folio #1 - Introduction and Global Budget*. Center for Environmental Policy.
- Sankoh, O.A., 1996. An evaluation of the analysis of ecological risks method in environmental impact assessment. *Environmental impact assessment review*, **16**: 183-188.
- Tilley, D.R. and Brown, M., 2006. Dynamic emergy accounting for assessing the environmental benefits of subtropical wetland stormwater management systems, *Ecological Modelling*, **192**(3-4): 327M.361.
- Xu, F.-L., Jorgensen, S.E., Tao, S. and Li, B.-G., 1999. Modeling the effects of ecological engineering on ecosystem health of a shallow eutrophic Chinese lake (Lake Chao). *Ecological modelling*, **117**: 239M.260.
- Xu, F.-L., Dawson, R.W., Tao, S., Li, B.-G. and J. Cao, 2002. System-level responses of lake ecosystems to chemical stresses using emergy and structural emergy as ecological indicators. *Chemosphere*, **46**(2): 173-185.
- Xu, Fu-Liu Zhao, Zhen-Yan Zhan, Wei Zhao, Shan-Shan Dawson, R.W. Tao, Shu, 2005. An ecosystem health index methodology (EHIM) for lake ecosystem health assessment, *Ecological Modelling*, **188**: 327-339.
- IAIA (International Association for Impact Assessment), 1999. *STRATEGIC ENVIRONMENTAL ASSESSMENT (SEA), Training Course Manual, current practices, future demands and capacity-building needs*.
- UNEP (United Nations Environment Programme), 2002. *Environmental Impact Assessment Training Resource Manual, 2nd edition*, editors; Barry Sadler and Mary McCave, 561 pp.
- 박용철, 김성준, 김은수, 이희준 이효진, 김동화, 2007. 원자력발전 온배수 영향에 대한 해수질 환경조사 지침 연구, **12**(1): 50-56.
- 이재학, 조양기, 노영재, 2007. 해양물리 분야의 조사 방법 표준화, **12**(1): 43-49.
- 원자력 문화재단 <http://www.knef.or.kr/>.
- 한국수력원자력발전소, 2006. ‘원전온배수관련 어업손실평가 표준지침 개발’ 연구 보고서, 한국 해양학회, 수산학회 작성 pp. 152.

2007년 1월 12일 원고접수

2007년 2월 5일 수정본 채택

담당편집위원: 이재학

부 록 UNEP(2002) 매뉴얼과 최근 관련연구 동향

1) UNEP 매뉴얼

UN 산하의 환경 프로그램 내의 기술, 산업, 경제 분과에서는 환경영향평가 (Environmental Impact Assessment, EIA)를 위한 매뉴얼을 작성하여, 전세계 각국에 평가와 관련된 교육, 정책 및 의사 결정 도구를 제공하고 있다. Fig. 1은 환경영향평가 과정속의 영향 분석의 흐름을 보여 주고 있다.

온배수의 수산업 피해 조사도 결국은 특정한 산업 (원자력 발전소 사업)의 환경에 대한 영향평가의 테두리 속에서 존재하므로, UNEP (2002)에서 추천하는 환경영향 평가 가이드 라인을 준수할 필요가 있다. 다음은 UNEP (2002)에서 제공하는 가이드 라인의 온배수 배출문제와 관련 고려 사항을 간추려 보았다.

환경 영향 (Environmental Impacts)을 평가하기 위하여, 환경 위해 요소 및 사업의 다음과 같은 속성을 파악하고,

- 유형과 속성 (type and nature); 온배수
- 크기 (강도, magnitude); 배출량

- 범위(extent); 확산 범위
- 시기(timing); 년중
- 지속기간(duration); 년중
- 불확실성(uncertainty); 없음
- 가역성(reversibility); 가역성 존재
- 유의성(significance); 대단히 유의함

영향의 식별 (Impact Identification)을 위하여는 다음 단계를 밟는다.

- 체크 목록(checklist); 각종 환경 및 생태 변수 및 주요 생물종
- 매트릭스(matrices); 각 변수간 연계 관계
- 연계(networks)
- 오버레이와 GIS(overlays and GIS); 지역별 위치도 및 GIS 정보
- 전문가 시스템(expert system); 현재 미비
- 전문적 판단(professional judgement); 특정 전문가의 주관적 판단

영향의 중요도의 판단과정

- 중요성을 결정하는 척도와 판단 기준의 설정

Table 4. 선진국에서의 최근 관련연구 동향.

논문명	저자 및 출처	사용 지수 및 특기 사항
Using a probabilistic approach in an ecological risk assessment simulation tool test case for depleted uranium (DU)	Fan <i>et al.</i> (2005) Chemosphere 60:111-125	생태 위해 평가에 대한 확률론적 접근, Monte Carlo Simulation 기법 도입
An ecosystem health index methodology (EHIM) for lake ecosystem health assessment	Xu <i>et al.</i> Ecological Modelling 188 (2005) 327-339	EHIM 도입 5단계: (1) 기초 지표종 선정 (2) 선정된 지표종으로부터 sub-EHIs (3) 지표종에 대한 가중치 결정 (4) sub-EHIs로부터 전체 EHI에 대한 계산과 가중치 결정 (5) 생태계 건강도 평가
Marine coastal ecosystem health assessment a case study of the Tolo Harbour Hong Kong China	Xu <i>et al.</i> (2004) Ecological Modelling 173:355-370	연안 해양생태계의 스트레스에 대한 반응 분석 ecosystem health indicators 개발과 생태계 건강도 평가, exergy 및 structural exergy 활용
System-level responses of lake ecosystems to chemical stresses using exergy and structural exergy as ecological indicators	Xu <i>et al.</i> (2002) J. Chemosphere, 46(2): 173-185	화학물질의 생태계에 대한 반응연구, exergy 와 structural exergy을 지시자로 활용
A Quantitative Methodology for Indexing Environmental Sensitivity and Pollution Potential	Inyang <i>et al.</i> (2003) Environmental Monitoring and Assessment 84:159-173,	in selecting a coal-fired power plant location, scaling and weighting of environmental sensitivity factors, used Total Environmental Sensitivity Index, GT . $G_N = \sum_{i=a}^j F_i W_i = F_a + F_b W_b + \dots + F_j W_j$
PRINCIPLES OF ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT BEST PRACTICE	INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR IMPACT ASSESSMENT (IAIA), 1999.	환경 영향 평가를 위한 원리와 최선의 실행 지침
Modeling the effects of ecological engineering on ecosystem health of a shallow eutrophic Chinese lake	Xu <i>et al.</i> (1999). Ecological Modelling, 117(2/3):239-260	생태계 건강 지표종 정의 Ecosystem health indicators; exergy(Ex), structural exergy(Ex _{st}), ratio of zooplankton to phytoplankton biomass (R _{BZBA}), transparency in Secchi Disc depth (SD).
STRATEGIC ENVIRONMENTAL ASSESSMENT (SEA)	International Association for Impact Assessment IAIA, 1999	Training Courses Manual current practices, future demands and capacity-building needs
An evaluation of the analysis of ecological risks method in environmental impact assessment	Sankoh, (1996) ENVIRONMENT IMPACT ASSESSMENT REVIEW 16:183-188	This article provides an evaluation of a method of EIA, analysis of ecological risks (AER) based on clear cause-effect relation and weighting.

- 배출기준의 존재 여부
- 환경의 질적 평가: 아주 중요한 생태계 혹은 수산물 생산의 여부
- 환경의 지속 가능성
- 중요도의 주요 판단 기준
 - 환경의 훼손 및 질저하
 - 사회적 충격
 - 위해도의 가능성
 - 사회 법 및 관련 규정과 합치 유무

2) 최근 선진국 연구동향

최근의 환경영향평가와 관련한 주요 연구 결과를 Table 4에 나열하였다. 그 중에서 특기할 만한 것으로 환경영향평가 과정에서 Xu *et al.* (1998; 2004)은 다섯종의 지표중(indicator)인 exergy(Ex), structural exergy(Ex_{st}), 동,식물 플랑크톤의 생물량 비(R_{BZBA}), Secchi Disc 깊이를 이용한 투명도(SD) 도입하였고, Inyang *et al.* (2003)은 총환경민감도 지수(Total Environmental Sensitivity Index)를 각 환경요소에 대한 가중치를 곱하여 그 합으로 다음 (A1), (A2) 식과 같이 정의하여 사용하였다.

$$G_N = \sum_{i=a}^j F_i W_i = F_a + F_b W_b + \dots + F_j W_j \quad (A1)$$

$$G_T = \sum_{N=1}^n G_1 + G_2 \dots + G_n \quad (A2)$$

여기서 F_i는 인자 i에 대한 민감도 지수, W는 가중치이고 가중치의 합은 1이며, G_T는 총환경민감도 지수이다.

Xu *et al.* (2005)은 생태계 건강지수(ecosystem health index)를 식물성 플랑크톤 현존량(BA)이나 클로로필 농도(Ch_a)를 이용하여 다음 (3) 식과 같이 정의하였다.

$$EHI(BA) = 100 * \frac{\ln C_x - \ln C_{min}}{\ln C_{max} - \ln C_{min}} \quad (A3)$$

Fan *et al.* (2005)은 생태 危害 평가(ecological risk assessment)를 하기위하여 위해 요소를 규정하고, Monte Carlo Simulation 기법을 도입하여 危害 정도의 불확실성을 평가하기 위한 확률론적 접근을 시도하였다.