

원자력발전소의 온배수 영향 저감방안 연구

○강금석*, 김종학**, 이대수***, 이종립**

1. 서론

1.1 연구목적 및 배경

발전소의 냉각용으로 사용되고 배출되는 온배수의 양은 950MW급 원전의 경우 초당 약 60m³라는 막대한 양에 이르며, 이는 직·간접적으로 주변환경 및 생태계에 영향을 미침과 동시에 확산정도에 따라서는 인접한 취수설비에도 영향을 미침으로써 재순환 온도상승에 따른 발전효율 저하를 유발시키게 된다. 특히 최근 발전소 부지확보가 난제로 대두됨에 따라 전력공급 확충방안으로 단위 기당 용량의 대형화와 함께 기존 부지에 다수기를 건설하는 발전단지화가 불가피하게 추진되고 있는 바 온배수방출의 양적인 증가와 집중화 현상은 피할 수 없는 실정으로서 이로 인한 연안지역의 환경에 미치는 영향과 민원발생 등은 전원개발사업의 추진에 커다란 장애요인으로 작용하고 있다.

국내의 경우, 온배수방출 자체는 수질환경 보전법상의 폐수방출에 준할 뿐 아직까지 실질적인 규제기준은 없는 상황이나 원자력발전소에 있어서는 건설허가전 환경영향평가와 운영시 사후 환경영향조사를 실시하고 필요시 보전조치를 취하도록 되어 있는 환경영향평가법 및 원자력법에 의거, 온배수를 주요항목으로 다루고 있으며 사회적인 관심의 고조에 따라 이들 환경기준은 날로 강화되고 있는 추세에 있다.

이에 본 연구는 위와 같은 상황에 대처하기 위하여 4개 원자력발전소 지점의 온배수확산 영향을 저감할 수 있는 구체적인 대책안을 제시할 목적으로 총 약 4개년(1992. 6~1996. 12) 계획으로 마련되었다.

1.2 연구내용 및 범위

현장관측, 수온모니터링 작업과 함께 온배수영향 저감기본계획안을 수립하였으며, 이를 바탕으로 해수유동, 파랑변형, 퇴적물이동 또는 해안선변형, 온배수확산 수치모형실험을 통하여 최적저감안을 도출하는 방법으로 연구가 진행되었다. 현장관측은 4개원전에 대하여 4개년동안 계절별로 조석, 조류, 파랑, 부유사의 계류관측과 수온, 해저퇴적물 채취, 부표추적 등의 이동관측을 실시하였다.

본 연구는 방수로 연장안, 심층방류안, 방출수 회석안, 냉각탑안 등 여러 저감방안을 고려하였으며, 각 안별 시공성 및 경제성 분석, 수치모델을 이용한 온배수영향범위예측, 항공측량 및 인공위성 영상분석 등 국내 최초의 종합적인 온배수 연구라 할 수 있다.

* 한국전력공사 전력연구원 일반연구원

** 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

*** 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

2. 원자력발전소 주변해역 현황

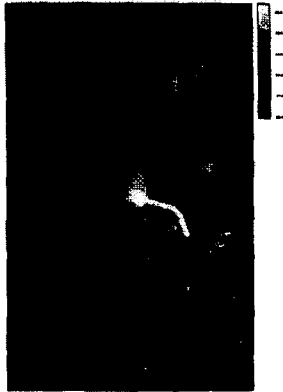


그림 1. 항공탐사에 의한 온배수 확산범위 관측

현장관측 결과, 파악한 4개 원전의 해역현황은 다음과 같다. 영광의 경우, 조석은 대조시 평균조차는 5.43m, 소조시 평균조차는 2.20m이고, 조류는 등수심선과 대체로 평행하게 창조류는 북동방향, 낙조류는 남서방향으로 흐르며, 최대유속은 취수구 전면지점에서 약 60cm/s, 배수구 전면지점에서 약 40cm/s, 배수구 전면으로부터 약간 외해측에 위치한 정점에서는 약 80cm/s였다. 파랑은 대부분이 풍파로서 파향은 WNW가 61%, W가 9%, NW가 16%로 W~NW가 86%를 차지하였고, 해저 표층퇴적물은 수심이 기본수준면 기준 약 2m 이하인 천해 정점들은 sand함유비가 90%이상인 사질 퇴적상을 보이며, 외해측은 sand함유비가 급격히 낮아진다. 부유퇴적물 농도는 평상시 10~50mg/l이며, 곰소만의 영향으로 낙조시 농도가 창조시 농도보다 높다. 항공기를 이용한 원격탐사를 대조기 간조시와 대조기 만조시를 택하여 AA3600 다중분광주사시스템을 이용하여 1993년 10월19일 수행하였으며 LANDSAT 5호 위성 영상 자료를 이용하여 확산범위를 파악하였다.

월성의 경우, 조석은 일주조에 가까운 혼합형 조석으로서 일조부등이 심하며, 남쪽안선 방향의 창조류가 북쪽안선 방향의 낙조류보다 강하다. 관측된 최대유속은 배수구 남측 정점에서 69cm/s, 배수구 북측 정점에서 32cm/s, 배수구 동측 정점에서 40cm/s이다. 하계에 배수구 동측 10.5km 지점에서 관측된 파랑은 NE방향이 가장 우세하고 NNE~ENE가 전체의 68%를 차지하고, 하계 최대 파고는 4.98m, 유의파고는 2.29m였고 동계 최대파고는 3.59m, 유의파고는 2.26m이다. 퇴적물 분포 양상은 절벽과 암초의 풍화작용에 의한 조립질 퇴적물이 널리 분포하고 대중천과 나아천 등 하천으로부터 유입된 모래가 하구 부근에 퇴적되는 것으로 나타났다. 해안선 방향 소류사의 이동은 북쪽에서 남쪽으로의 이동이 우세하였다.

고리의 경우, 조석은 고리 외해측에서 M2 22cm, S2 11cm, K1 1.5cm, O1 1.0cm로 반일주조가 우세한 혼합형 조석이고, 조류는 해안선에 평행하게 창조류는 남서쪽으로, 낙조류는 북동쪽으로 흐르며, 최대유속은 외해측에서 대조시 70~80cm/s, 소조시 20~30cm/s이며, 발전소 전면에서는 20~40cm/s이다. 전면해역에는 sand가 발달하였고 전면부를 제외한 대부분의 안선을 따라서는 기반암이 노출되어 있으며, 외해로 갈수록 세립화하는 특성을 보인다.

울진의 경우, 조석은 일주조중 O1, K1과 반일주조중 M2의 진폭이 약 5cm 정도이고 Mf, MSf 등 장주기 분조가 약간 클뿐 기타 분조의 크기는 미약하다. 평균조차는 추계에 10.5cm, 동계에 10.4cm, 춘계에 10.1cm, 하계에 9.7cm로서 추계에 가장 큰 평균조차를 보이며, 목호항보다는 2.5~3.9cm 작다. 파랑은 하계시 유의파고 최대치는 2.37m, 유의파 주기는 6.73s이고, 동계시 유의파고 최대치는 2.94m, 유의파 주기는 11.10s이다.

3. 온배수 저감방안 수립

국내와 같이 온배수 규제기준이 없는 경우의 저감안 도출의 기본방향은 후속기 증설시에도 취수구에서 수온상승이 설계치 이하로 유지되고 주변해수의 온도상승 및 온도상승의 범위를 가능한 축소하는 것으로, 각각의 원전에 따라 특수성이 존재하나 도류제 및 방류제 축소안, 분산방류안, 다중분류관 설치안이나 유공방파제 축소안과 같은 저층, 심층방류안, 배출 basin 설치안, 냉각탑 설치안 등을 온배수 저감방안으로 고려할 수 있다. 본 연구에서 각 원전에 대하여 고려한 저감안은 표 1과 같다.

표 1. 각 원전의 온배수영향 저감 기본안

지 점	저감기본안	지 점	저감기본안
영 광 원 전	<ul style="list-style-type: none"> ○ 방수로 연장안 ○ 방수로 단말에서의 배수관로 설치안 ○ 혼합회석 방류안 ○ 고리포 이용 방류안 ○ 방류제 축조안 ○ 부지해안선 방향 분산방출안 ○ 배출 basin 방류안 ○ 다중분류관 설치안 ○ Pond식 유공방파제 설치안 ○ 냉각탑 설치안 	고 리 원 전	<ul style="list-style-type: none"> ○ 사석도류제 축조안 ○ 유공케이슨 설치안 ○ Box Culvert안 ○ 강관설치안
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 배수구 방파제 축조에 의한 표층방류안 ○ 유공방파제 축조에 의한 저층방류안 ○ 다중분류관 설치에 의한 분산방류안 ○ 단일방류관 설치에 의한 실층방류안 ○ Curtain Wall 설치에 의한 저층취수안 		<ul style="list-style-type: none"> ○ 남방파제 연장축조안 ○ 남방파제 및 도류제 연장축조안 ○ Box Culvert 직선배치안 ○ 남방파제, 도류제 연장 및 Box Culvert 직선배치 혼용안 ○ Box Culvert 도류제 후회안 ○ 유공방파제 설치안
월 성 원 전	<ul style="list-style-type: none"> ○ 배수구 방파제 축조에 의한 표층방류안 ○ 유공방파제 축조에 의한 저층방류안 ○ 다중분류관 설치에 의한 분산방류안 ○ 단일방류관 설치에 의한 실층방류안 ○ Curtain Wall 설치에 의한 저층취수안 	월 성 원 전	<ul style="list-style-type: none"> ○ 남방파제 연장축조안 ○ 남방파제 및 도류제 연장축조안 ○ Box Culvert 직선배치안 ○ 남방파제, 도류제 연장 및 Box Culvert 직선배치 혼용안 ○ Box Culvert 도류제 후회안 ○ 유공방파제 설치안

4. 온배수확산예측

2차원 수심적분 유한차분모델을 이용, 저감안별 온배수이동, 확산범위를 개략예측하여 유망저감안들을 일차 선별하고, 유망안에 대하여 3차원 온배수이동·확산을 검토하였다. 본 연구에서는 해양연구소에서 개발된 모형이 사용되었다.

4.1 모형의 개요

2차원 온배수확산모형은 수심적분한 Navier-Stokes 유체방정식인 2차원 해수유동 방정식에 수심적분한 2차원 에너지보존식을 이용하였으며, 3차원 온배수확산 수치모형은 한국해양연구소의 TRIQAM이다. 이 모형은 유한차분법을 이용하며, 배출구 주변 중간해역 및 광역에의 온배수확산 계산에 적합하다. 배출구 인근을 자세히 재현하기 위해 격자간격을 축소할 경우 계산시간이 크게 증대되는 점을 감안하여 수평방향으로는 장방형 가변격자를 채택하였고 연직방향으로는 불규칙 수심을 단위구간으로 바꾸는 정규화 과정을 도입하여 천해 및 심해부에 일정수의 층을 구성한다. 수치기법상 두드러진 특징으로는 조위분포와 유속의 연직분포를 분리계산하는 모드분리 기법을 채택하고 있으며 성층에 따른 난류확산계수의 보정은 stability function에 근거하고 있다. 연직난류 확산계수는 Richardson수를 이용한 준경험적 기법을 사용하고 수평난류확산계수는 2차원 모델의 함수식을 확장한 형태로 정의된다.

4.2 모형의 수립

4.2.1 영광원전

영광 2차원 모델은 외부모델과 내부모델 두가지로 구성되며, 격자크기는 배출수로 평균폭의 약 3배인 180 m × 180 m로 총 격자수는 약 8,207개이다. 모델의 북측경계는 죽도 부근, 남측경계를 칠산도 3 km 북측에 위치케 하였으며 서측경계는 외해방향 약 10 km까지 확장된다. 외해경계에서의 조위변화는 주요 2개 분조(M2, S2)의 합성으로 주어지며 열교환계수 K 는 전영역에 $32 \text{ Watt/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 로 일정하게 정의되었다. 모델 계산은 전 영역의 조위, 유속을 0으로 하여 총 11조석주기(M2 분조 기준) 동안 실시되었다. 온수방출은 2조석주기부터 시작하였으며 마지막 조석주기값이 결과 비교에 이용되었다.

3차원 모델은, 북측경계는 변산반도 격포리 부근까지 확장되어 곰소만이 포함되고 남측 경계는 송이도 부근에 위치하여 남북으로 모델범위가 약 58 km에 이르며, 배출수로 끝에서 외해측으로 약 23 km까지 확장된다. 배출구 주변과 안산부근에 소격자(최소간격 180 m)를 배치 시키고 외해 및 남북경계로 가면서 대격자(최대 2700 m)를 배치시켜 총 모델격자는 약 2,000개이며 연직으로 9개층을 구성하였다. 외해경계에서는 M2, S2 분조의 진폭, 위상이 정의되었다. 초기조건으로 전해역의 조위, 유속값을 0으로 총 30조석동안 지속되며 열손실계수는 $32 \text{ Watt/m}^2\text{C}$ 가 사용되었다. 실제 온수방출은 2조석주기째부터 시작되어 29조석주기 동안 계속되며 마지막 1조석주기의 계산치를 검증에 사용하였다.

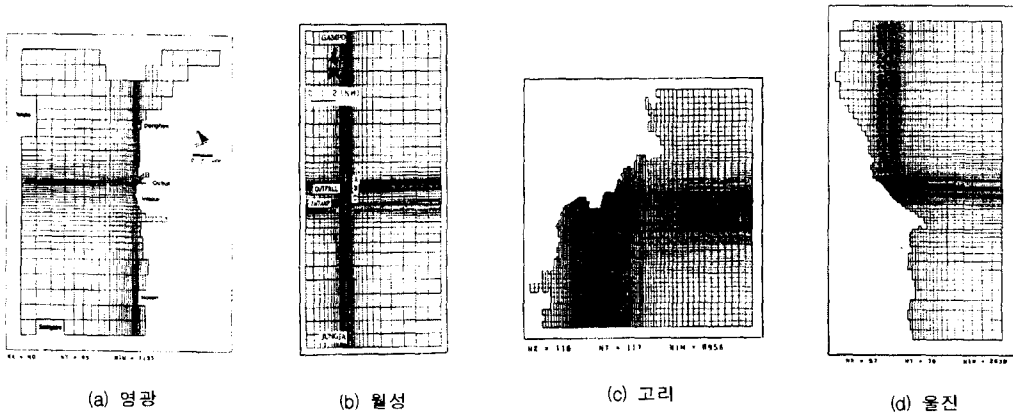


그림 2. 3차원 온배수확산모형 격자망도

4.2.2 월성원전

사용된 모형은 대상해역을 일련의 직사각형 격자로 분할하여 계산하는 유한차분모형으로 수평 방향으로는 가변격자를, 연직방향으로는 정규화된 좌표를 사용하며, 연직 확산계수의 계산에 $k-\epsilon$ 난류모형을 도입하였다. 또한, 수치계산상의 효율성을 기하기 위하여 수치해석방법으로 음해법과 양해법이 혼합된 반음해법(semi-implicit method)을 사용한다. 그림 2와 같이 배수구와 취수구 부근에서 최소격자 30~50 m, 외해역에서 최대격자 1 km인 가변 격자망을 남북으로 24 km, 동서로 11 km인 영역에 대해 구성하였다. 해수유동 계산시 모형의 외해 경계조건으로는 감포항과 정자항에서 조사된 주요 4개분조(M2, S2, K1, O1)의 혼합조석을 사용하여 조류 및 온배수 확산을 3차원 수치모형에 의하여 계산하였다.

4.2.3 고리원전

모델 격자망의 최소격자의 크기는 $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$, 최대격자는 $600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ 로 총 격자수는 약 8,956개이다. 연직으로는 해수표면으로부터 0.05, 0.10, 0.15, 0.275, 0.425 두께로 5개층을 구성하였다. 외해경계에서의 조위변화는 M2, S2분조의 합성으로 주어지며 항류는 무시된다. 열교환계수 γ 는 전영역에 $25 \text{ Watt/m}^2\text{C}$ 로 일정하게 정의되었다. 온수확산범위 예측을 위한 모델계산은 총 13 조석주기동안 실시되는데, 처음 11주기는 2차원 모델을 사용하며 나머지 2주기는 최근에 방출된 온수가 형성하는 primary plume을 재현하기 위해 3차원 모델을 이용하였다. 온수방출은 2조석주기부터 시작하였으며 마지막 조석주기의 계산치가 결과로 제시된다. 광역수온장(background temperature field)이 평형상태에 도달하는 데에는 수주간의 기간이 필요하나 실제 기상변화 때문에 이러한 평형상태는 자연현상에 존재하지 않으며 또한 모델수행을 장기간 실시하는 것도 비현실적

이다. 계산에서는 처음 5주기 동안은 수평확산계수를 대폭 크게 취하여 가능한 신속히 광역 수온장이 형성되도록 하였다.

4.2.4 울진원전

수치모형의 격자망에서 모델의 북쪽경계를 발전소 위치로부터 약 15 km 떨어진 임원말 부근, 남쪽경계를 약 18 km 거리인 갈마말 부근으로 잡았으며 동쪽경계는 발전소 동쪽 약 10 km(129° 30′ E)까지 확장하였다. 격자의 크기는 발전소 배수구를 중심으로 배치된 최소격자의 크기가 100 m × 100 m, 모델범위의 가장자리에 배치된 최대격자는 1,000 m × 1,000 m이며, 격자수는 동서방향 57개, 남북방향 79개로 총 격자수가 약 4,503개이다. 연직으로는 해수면으로부터 해저면까지 동일 두께로 5개층을 구성하였다. 외해경계면에서는 O1, K1, M2분조의 합성된 조위변화를 주었으며 남·북향으로 각각 5 cm/s의 항류를 고려했다. 대기-해수간의 열교환계수 γ 는 전영역에 32 W/m²°C로 일정하게 정의되었다. 2차원 모델의 경우 조위와 유속만을 계산하는 처음 2조석주기(M2분조 기준) 동안의 예비실험을 포함해 총 32조석주기 동안 수치모형 계산을 수행하여 마지막 2조석주기의 값을 계산결과로 사용하였으며, 3차원 모델의 경우 2차원 모델의 최종 결과를 초기조건으로 입력하였으며, 동일한 조건하에서 6조석주기 동안 실험을 진행하여 마지막 2조석주기의 값을 계산결과로 취하였다.

4.3 모형의 적용

4.3.1 영광원전

영광해역은 수심이 얇은 탓으로 대부분 저감효과가 적은 것으로 나타났으며 오직 조류의 흐름을 크게 변화시키는 긴 연장의 구조물(방류제 및 basin) 건설이나 대규모의 diffuser 및 냉각탑 설치시에만 뚜렷한 저감효과가 확인되었다. 3차원 해수유동 및 온배수 수치모형을 이용하여 현배출수로하 2, 4, 6개호기 가동시의 온수분포와 취배수구측의 방류제를 연장하는 3개의 유망저감안에 대하여 온배수영향 저감효과를 예측하였다.

2차원 모형과는 달리 대-소조류의 조석변화와 대기로의 열손실을 고려하여 검토한 결과 3개안 모두 2차원 모델에서 예측되었던 것보다 희석효과가 양호하며 방류제안이 저감효과 및 재순환 측면에서 배출 basin안보다 유리한 것으로 나타났다.

4.3.2 월성원전

3, 4호기 방류위치 선정과 관련하여 기존 1호기 배수구 북측에 인접해서 방류하는 안과 취수구 남쪽에 방류하는 안에 대하여, 모델링 결과에 의하면 1호기 배수구 북측에 인접해서 방류하는 것이 취수구 남측에 방류하는 안보다 온배수영향 범위가 크게 축소되어 나타나고, 재순환에 미치는 영향도 적어 유리하였다. 따라서, 기존 1호기 배수구 북측에 방류하는 온배수 저감안들을 설정하였다. 각 안별 온배수영향 저감효과를 살펴보면, 유공방파제를 축조하여 저층방류하는 안은 비교적 양호한 저감효과를 보였다. 그러나, 2개호기분만을 저층방류하는 경우는 방류위치의 선정에 따라 저감효과가 많은 차이를 보였으며, 부지북측 경계에 인접해서 유공방파제를 설치하여 저층방류하는 것이 비교적 좋은 저감효과를 보였다. 심층에서 다중분류관을 통하여 방류하는 경우는 검토된 안 중에서 저감효과가 가장 양호하였으며, 수심 15 m에 방류하는 것이 온배수 영향을 가장 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.

4.3.3 고리원전

1, 2호기 취수구측 방류제 연장 1 km 축조시의 온배수영향 저감효과를 예측하였다. 이 안은 고리원전 서측안선으로의 확산 및 1, 2호기 재순환온도를 낮추는데는 약간 유효하나 북동안선방향으로는 오히려 불리할 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 심층취수안의 경우 부지확보 문제 및 시공시의 난점 때문에 현실적으로 수용불가하기는 하나 고리해역의 수심조건이 양호하므로 뚜렷한 저감효과가 나타나는 것으로 계산되었다.

4.3.4 울진원전

울진원전의 경우는, 유공케이슨 설치안, 남방파제 및 도류제 연장안, box culvert안의 순으로 저감효과가 큰 것으로 나타났으며, 연장안중에서는 남방파제와 도류제를 모두 연장축조하는 안의 저감효과가 더 큰 것으로 나타났다. 또한 box culvert안중에서는 방류위치가 취수구로부터 남쪽으로 멀수록 저감효과가 크고 다중분류관 방식보다는 오히려 단일방류관 방식의 저감효과가 큰 것으로 나타났다. 2차원 모델링에서 검토한 저감안 가운데 다중분류관 방식과 남방파제, 도류제연장 및 Box Culvert 직선배치 혼용안을 제외한 안들을 대상으로 3차원 온배수모형을 이용하여 온배수영향 저감효과를 예측하였다.

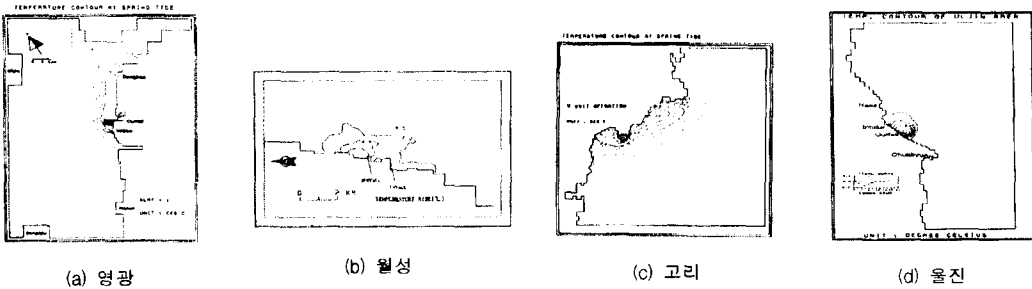


그림 3. 온배수확산범위 예측

5. 침식퇴적예측/해안선변형예측

선정된 온배수 저감방안에 대하여 발전소 주변의 퇴적환경 변화에 미치는 영향을 사전에 예측하여 퇴적환경 변화 측면에서 구조물의 최적배치안을 도출하기 위하여 퇴적물이동 수치모형실험을 실시하였다. 수립된 퇴적물이동 수치모형은 조석·조류 모듈과 퇴적물이동 모듈로 구성된다. 파랑은 독립적인 파랑수치모형들을 이용하여 계산한 후 그 결과를 퇴적물모형의 입력자료로 이용하였다. 본 연구에 사용된 모델은 해양연구소의 퇴적물이동(TWIST), 해수유동(HYDE), 파랑변형(ECORD) 모형이다.

6. 결론

수치모형실험 결과에 대하여 각 안의 시공성과 경제성을 고려하여 각 원전에 대한 최적안이 선정되었다. 현재 국내에는 대부분의 발전소가 표층방류를 채택하고 있을뿐 입지특성에 적합한 다양한 방류시스템을 적용하고 있지 못하다. 새로운 방류시스템에 대한 연구 및 적용이 필요하며, 한편으로는 온배수영향 범위에 대하여 사업자와 학계, 주민 등의 합의가 이루어지지 못하는 상황에서 적절한 관측망의 구성 및 생태계에 대한 영향 분석 등이 필요한 실정이다.

參考文獻

한국전력공사(1996). 원자력발전소의 온배수 영향 저감방안 연구, 연구보고서.