

CORMIX를 이용한 온배수 심층방류시스템의 설계 사례

○강금석*, 이대수**, 이재형***

1. 서 론

발전소에서 냉각수로 이용되는 해수의 취배수 방식으로 기존에는 표층취배수 방식을 주로 이용하였으나, 이 방법은 운전효율 및 환경영향 측면에서 불리하여, 최근에는 심층취수를 통한 운전효율 향상과 심층방류를 통한 온배수 확산범위의 축소방안을 적극적으로 검토하여 국내에 적용하고자 하고 있다.

심층방류 방식으로 단일방류관, 수중다공확산관 등을 고려할 수 있으나, 다량의 온배수가 방출되는 원자력발전소의 경우는 가장 희석율이 좋은 수중다공확산관을 이용하는 것이 바람직할 것이다. 본 연구는 국내 원자력발전소에 최초로 수중다공확산관을 통한 심층방류시스템을 적용하기 위한 과정의 일부분으로서, 미국의 EPA에서 제공하는 방류구 설계 전문가시스템인 CORMIX2를 원자력발전소의 건설을 계획하고 있는 고리 효암·비화지역에 적용하였다. CORMIX2의 실제 해역에의 적용 과정을 통하여 해석의 방법론과 한계를 파악하고자 하였으며, 심층방류방식의 효과를 확인하였다.

해역특성 및 방류조건을 고려하여 수중다공확산관의 형태를 우선 결정하고, 조류속, 방류수심, 확산관길이, 방류유속 등 다공확산관의 제원과 해역특성의 초기희석효과에 대한 영향을 CORMIX의 민감도 분석을 통하여 규명하였다. 이 결과를 바탕으로 확산관의 최적구조 및 배치 형태를 결정하였다.

2. 본 론

가. 수중다공확산관의 형식 결정

확산관의 형태를 선정하기 위해서는 조류속과 같은 주변해역의 해양수리학적 인자와 지형조건, 그리고 확산관에 의한 유도흐름 등을 고려하여야 한다. 효암·비화지점 신규원전의 확산관 형태는 양방향 조류이며, 조류속이 비교적 작은 해역조건과 등수심선이 해안선과 평행하고, 비교적 깊은 수심의 확보가 용이한 지형조건, 유도흐름, 재순환 현상 및 냉각수 방류량 등을 고려하였을 때 Tee형 확산관이 타당성이 있으리라 판단되었다. 검토된 Tee형 확산관의 제원은 표 1과 같다.

표 1 Tee형 확산관의 제원

확산관 형태	확산관 길이 L_D [m]	PORT			γ [deg]	방류유속 [m/s]	조류속 [m/s]	방류수심 [m]
		수평각도, θ [deg]	직경[m]	간격[m]				
TEE형 확산관	234, 465, 470	20	0.5	1.5-3.0	0	3.0	0.2 - 0.4	10 - 20

* 한국전력공사 전력연구원 일반연구원

** 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

*** (주)대우/건설 엔지니어링본부 과 장

나. 입력자료

(1) 흐름단면의 결정

흐름단면으로는 주된 혼합과정이 일어나는 지역의 실제 수심을 고려하여 수리학적 등가단면 (equivalent rectangular cross-sectional area)을 이용하게 된다. 방류수심(HD)은 실제 수심이 이용되며, 다음과 같은 cumulative ambient discharge 를 이용하여, 실제해역과 직사각형 단면에서의 volume flux가 일치되는 주위수 수심(HA)과 주위수 유속(UA), 해안선으로부터의 거리 (DISTB)를 구한다.

$$q(y') = \int_0^{y'} \overline{u_a(y')} H(y') dy', \quad \text{DISTB} = \frac{q(y')}{UA \cdot HA}$$

여기서, y' 은 해안선으로부터 흐름방향과 직교하는 방향으로의 거리, H 는 실제수심, $\overline{u_a}$ 는 수심평균 유속, q 는 cumulative discharge이다.

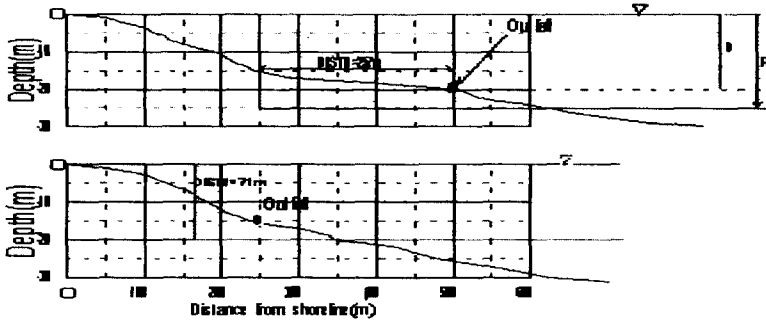


그림 1 흐름단면의 결정

그림 1에서 신규원전 냉각수 방류지역의 실제 해저지형과 근사화된 단면을 보이고 있다. 해안선으로부터 방류구까지의 실제 거리는 각각 약 250m(15m지점), 500m(20m지점)이나, 직사각형 단면으로 근사화시키면 각각 71m, 257m이다.

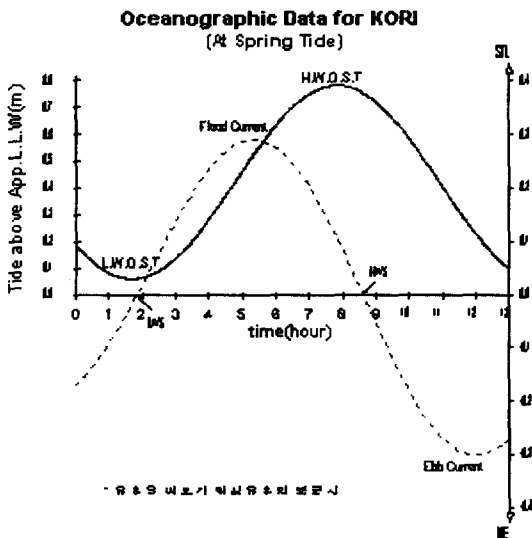


그림 2 Oceanographic Data

(2) 조석 조건의 반영

해안에서의 조석현상(Tidal Reversing Ambient Conditions)을 CORMIX에 반영하기 위해서는 그림 2와 같은 조석에 대한 정보가 있어야 한다. 전류(slack tide)가 발생하고, 고저조와 창낙조 사이의 시간 간격이 존재하여, 서해안과 같이 조차가 매우크고 조류속이 빠른 곳에 대한 모의시에는 조시에 따라서 주위수 수심과 방류구 수심이 큰폭으로 변화하기 때문에 초기회석을 또한 조시에 따라 변화하게 된다. 전류시에는 concentration build-up이 발생하여 방류수의 유효 회석량을 감소시킨다. 즉, 흐름의 방향이 바뀔 경우 방류플룸의 재유입이 발생하여 유효 회석량을 감소시킨다. 그러므로, LWS(Low Water Slack)과 HWS(High Water Slack)일때의 회석율이 중요하게 된다.

CORMIX에서는 조석조건을 고려하여 반복적인 모의를 통하여 계산한다.

(3) 다공확산관 특성자료 및 발전소 Process 특성

방류수심, 확산관길이, Port의 개수, 직경, 간격, 높이, 방류량, 초과온도, mixing zone 등

다. 예비 수치실험

각각의 입력변수의 특성을 분석하고, 혼합구조를 파악하기 위하여 표 1의 조건으로 민감도 분석 차원에서 예비 수치실험을 수행하였다.

(1) 온수 jet의 형태

방류 유량이 크고 이에 따른 방류모멘텀이 매우 큰 상황에서 방류수심이 작기 때문에 경계면인 해저바닥과 수표면이 흐름의 형태에 직접적인 영향을 미치면서 방류수와 해수가 전 수심에 걸쳐 완전 혼합(fully mixed)되는 그림 3과 같은 형태가 된다. 이 완전 혼합흐름은 조류속에 의해 하류로 진행함에 따라 곧 바닥으로부터 혼합수, 즉 초과온도 수온을 가진 플룸의 바닥이 해저 바닥으로부터 이탈하여 플룸의 연직 두께가 수표면으로부터 유한한 깊이를 가지면서 이송되는 층상 흐름(stratified flow) 형태로 바뀐다.

(2) 초과수온 분포

표 2는 방류된 온배수 제트가 수표면에 도달했을 때의 최대 초과수온(방류구 근역에서의 ΔT_{max})의 방류수심 및 확산관 길이에 따른 변화를 나타낸 것이다. 방류량이 같은 경우 방류수심과 확산관 길이가 증가함에 따라 수표면에서의 최대 초과수온이 감소함을 알 수 있다.

조류속 변화에 따라 방류구 근역에서의 초과온도 분포는 큰 변화를 나타내지 않는데, 이는

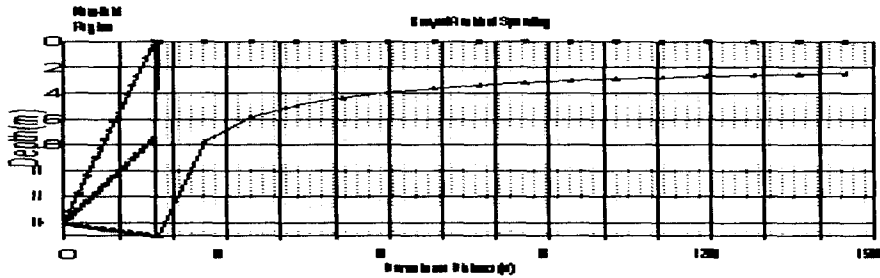


그림 3 온수 jet의 연직형태

Tee형 확산관의 일반적인 특성이다. 그러나 온배수 플룸이 하류로 진행함에 따라 온배수 플룸의 폭이 조류속이 커짐에 따라 폭이 좁아진다.

표 2 방류구 근역에서의 최대 초과수온

	방류수심	조류속	방류구 근역에서의 ΔT_{max} [°C]	거리 [m]		비고
				조류 방향	제트궤적 중심선	
(1) 확산관길이 =234m	10	20	1.15	167	386	TSH-1
	15	20	0.93	192	301	TSH-4
	20	20	0.80	217	278	TSH-7
(2) 확산관길이 =465m	10	20	0.92	283	448	TLH-1
	15	20	0.72	308	385	TLH-4
	20	20	0.61	333	376	TLH-7
(3) 확산관길이 =470m	10	20	1.30	285	747	TTH-1
	15	20	1.02	310	555	TTH-4
	20	20	0.86	335	480	TTH-7

* (1),(2)는 1개 호기의 방류유량(92.3cms)에 대한 모의 결과이고, (3)은 2개 호기의 방류유량 (184.6cms)에 대한 결과임.

라. 수중다공확산관의 최적설계

(1) 확산관 길이의 결정

일반적으로 확산관을 설계할 때 확산관의 길이와 방류유속간에는 반비례관계가 성립한다. 즉 방류유속이 큰 경우 요구되는 확산관의 길이는 짧아지게 되고(Short diffuser), 방류유속을 작게 하는 경우는 그 만큼 소정의 회석률을 얻기위해서 확산관의 길이가 길어져(Long diffuser)야만 한다. Long diffuser는 회석에 필요한 주변수를 초기의 배면포획(back entrainment)에서 많이 흡수하는 반면에 Short diffuser는 초기의 배면포획보다 측면포획(side entrainment)에 의한 주변수의 유입이 더 큰 특징을 갖고 있다. 따라서 확산관 배치와 제원을 결정할 때에는 회석메카니즘과 주변 지형여건 그리고 경제성 등을 고려하여 결정하여야 한다.

184.6cms의 냉각수를 수중다공확산관을 통해 방류하기 위해 요구되는 확산관의 길이를 결정하기 위하여 표 3과 같이 방류구 근역에서의 회석률에 가장 지배적인 영향을 미치는 인자인 방류유속을 변화시키면서 확산관 길이를 변화시켜 수치모의를 시행하였다. 방류유속은 확산관 포트에서 요구되는 최소 유속인 3m/s에서부터 6m/s까지 고려하였으며, 각 방류포트의 직경은 50cm, 각 포트간의 간격은 1.5m로 고정시킨 상태에서 방류유속 변화에 따른 소요 포트갯수를 산정하였고 이에 따라 확산관 길이가 결정된다.

표 3 방류유속 변화에 따른 확산관 길이

방류유속, V [m/s]	포트유량, q [cms]	포트갯수, N	소요확산관 길이, Lp [m]	비 고
3.0	0.59	313	469	Long Diffuser
4.0	0.79	235	351	
5.0	0.98	188	281	
6.0	1.18	157	234	Short Diffuser

표 4 CASE별 1℃ 초과온도 범위의 폭과 거리

CASE	Discharge Velocity [m/s]	Discharge Depth [m]	Current Speed [cm/s]	Plume Width [m]	Plume Centerline Distance[m]
S3-11	3.0	10	20	350	800
S3-12	"	"	40	200	550
S3-21	"	20	20	200	250
S3-22	"	"	40	150	200
S4-11	4.0	10	20	300	1000
S4-12	"	"	40	200	500
S4-21	"	20	20	150	250
S4-22	"	"	40	100	130
S5-11	5.0	10	20	250	1000
S5-12	"	"	40	180	450
S5-21	"	20	20	200	300
S5-22	"	"	40	150	130
S6-11	6.0	10	20	300	1700
S6-12	"	"	40	150	450
S6-21	"	20	20	130	320
S6-22	"	"	40	150	100

수치모의를 시행하였다. 방류유속은 확산관 포트에서 요구되는 최소 유속인 3m/s에서부터 6m/s까지 고려하였으며, 각 방류포트의 직경은 50cm, 각 포트간의 간격은 1.5m로 고정시킨 상태에서 방류유속 변화에 따른 소요 포트갯수를 산정하였고 이에 따라 확산관 길이가 결정된다.

(2) 수치모의 결과 분석

수치모의 결과(표 4)를 분석하면 1℃ 초과온도 범위를 규정하는 요소들은 방류유속, 조류속, 방류수심, 그리고 해안으로부터 확산관까지의 거리인 것으로 나타났다. 여기서 해안으로부터의 거리(DISTB)의 대하여 민감도를 분석한 결과, 그 거리가 100m이상이면 1℃ 초과온도 범위는 DISTB의 영향을 거의 받지 않고 방류수심에 따라 민감하게 변화되는 것을 확인할 수 있다. 동일한 방류수심에 대한 조류속과 방류유속을 영향을 검토한 결과, 방류수심이 10m인 경우는 조류속과 방류수심에 따른 1℃ 초과온도

범위가 민감하게 변화되는 것으로 나타났고, 방류 유속이 클수록 조류속에 의한 회절이 작아 확산관으로부터 먼 해역까지 확산됨을 알 수 있다. 또한 방류 수심이 10m인 경우, 조류속의 크기에 상당히 민감하게 반응하는 것으로 분석되었는데 이는 수심이 낮아 유입수체의 조류영향이 방류수의 제적에 상당한 영향을 주고 있는 것으로 판단된다.

한편, 수심이 20m인 경우에는 조류속 또는 방류유속의 변화에도 1℃ 초과온도 범위의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 즉 수심이 깊어지면 조류속과 방류 유속은 방류수의 혼합에 미치는 영향이 작아져서 방류량에 따라 1℃ 초과온도 범위가 변화된다.

혼합에 기여하는 방류수의 주변의 해수의 포획 영향을 검토하기 위하여 방류수심이 10m인 경우, 주변 수역의 수심을 7.7m, 8.0m, 9.0m, 10.0m로 변화시켜가며 초과온도 범위를 검토한 결과, 해안으로부터의 거리가 180m, 수심이 7m이상에서 주변수역의 수심의 변화는 온배수의 혼합에 영

향을 주지 않는 것으로 분석되었다. 실제로 현장의 해저지형은 방류 수심과 동일한 수심을 유지하기보다는 원해쪽으로 경사를 가진 형상이므로 이러한 접근이 타당할 것이다.

마. 기존의 방류조건 및 비정상 해역조건의 고려

(1) 입력조건

방류수 초과수온은 기존 호기의 재순환 영향을 고려하여 냉각수 설계초과수온($\Delta t=9.16^{\circ}\text{C}$)에 기존 호기의 냉각수 방류에 따른 재순환 온도(약 3.6°C)를 더한 13°C 를 방류수의 초과수온으로 채택하여 수치모의를 시행하였다. 이 값은 실제의 초과온도보다 크게 설정된 값이나 조석의 영향에 의한 비정상 흐름조건을 고려하였을 때 의미있는 예측이 될 것이다.

표 5 방류수심 변화에 따른 영향평가

	방류수심 [m]	초기 회석률	표층 최고온도 [$^{\circ}\text{C}$]	플룸의 표층유속 [m/s]	1 $^{\circ}\text{C}$ 도달거리 [km]	1 $^{\circ}\text{C}$ 초과수온 영역의 최대 면적[km 2]
고조시	10.0	5.0	2.6	0.6	2.6	5.0
	12.5	5.6	2.3	0.5	2.2	3.9
	15.0	6.1	2.1	0.5	1.4	1.0
	17.5	6.7	2.0	0.4	1.2	0.8
	20.0	7.1	1.8	0.4	0.9	0.4
	25.0	8.0	1.6	0.4	0.5	0.1
저조시	30.0	8.7	1.5	0.4	0.4	0.1
	10.0	5.0	2.6	0.6	3.4	5.8
	12.5	5.6	2.3	0.5	2.9	4.6
	15.0	6.1	2.1	0.5	2.4	3.5
	17.5	6.7	2.0	0.4	1.5	1.9
	20.0	7.1	1.8	0.4	1.0	0.9
	25.0	8.0	1.6	0.4	0.5	0.2
	30.0	8.7	1.5	0.4	0.4	0.1

(2) 모형의 적용결과

동일한 확산관에 대하여 방류수심을 10m에서 30m까지 변화시키며 확산특성을 비교하였다(표 5). 수심이 깊어 질수록 초기회석율이 높아져 15m 이상의 수심에 수중다공확산관을 설치할 경우에는 1 $^{\circ}\text{C}$ 확산거리가 1.5km이하로 기존호기에의 영향이 아주 미약할 것으로 판단된다.

저조시의 경우를 살펴보면, 방류지점 북측해안의 온배수 영향은 방류지점으로부터 해안을 따라 약 500m 이상 지역부터 해안선에 방류 플룸이 붙어 해안선까지 온배수의 영향을 받게 되

어, 수심 15m일 경우도 1 $^{\circ}\text{C}$ 도달거리가 2.4km에 달해 남측방향보다 북측으로의 온배수의 확산범위가 넓은 것으로 해석되었다. 이는 부지북측의 경우 방류플룸과 해안선과의 거리가 남측보다 짧고 주된 회석이 남측보다 낮은 수심에서 발생하므로 해석시 주위수심을 낮게 평가했기 때문이다. 그러나, 충분한 초기회석을 얻을만큼의 수심이 확보되어 방류가 진행되는 수심 17.5m 이상의 경우는 북측과 남측방향의 확산거리가 비슷하게 나타난다.

심층방류의 경우는 고유속의 방류를 행하기 때문에 방류구 인근의 유속 및 흐름교란이 표층방류에 비하여 크다. CORMIX에 의한 실험결과는 0.4~0.6m/s가 될 것으로 예측되었다.

바. 수중다공확산관의 선형 배치

이상의 수치실험을 통하여 그림 5과 같이 다공확산관을 배치하였다. CORMIX 수치실험시 예상된 북쪽 해안으로의 방류plume의 해안선 부착을 방지하기 위하여 실제 해역의 흐름과 직각이 되도록 diffuser를 북동-남서방향으로 배치하였다.

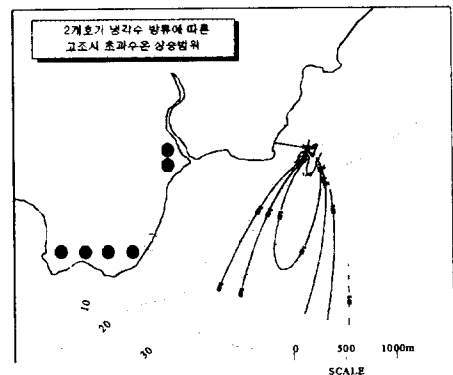


그림 4 고조시의 확산양상

실제 해역의 흐름과 직각이 되도록

3. 결론

일반적으로 확산관의 위치 및 설치수심, 방향, 확산관 길이, 그리고 방류유속 등 수중다공확산관의 배치 및 제원결정을 위해서는 초과수온범위, 취수구로의 재순환 영향, 확산관 배면에서의 포획흐름의 확보 여부, 확산관 및 도수관 설치 비용, 냉각수 방류에 따른 유도흐름, 방류유속 유지를 위한 펌핑 비용, 유도흐름에 의한 해안선 변형 및 세굴문제, 유도흐름에 의한 항행 문제 등과 같은 항목이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 위와 같은 사항을 고려하여 고리 후속기 냉각수 방류시스템으로서 수중다공확산관을 적용한 경우에 대해 CORMIX을 이용하여 초과수온 범위를 예측하였고, 이 결과를 이용하여 기존 호기의 취수구에 영향을 최소화하고 신규호기에 의한 초과수온범위를 적정선에서 유지시키면서 경제성을 갖는 확산관 배치방법에 대한 검토를 실시하였다.

이상의 내용을 토대로 신규원전에 대한 수중다공확산관의 배치 최적안은 확산관 길이가 호기당 약 100m, 방류수심은 15-20m가 가장 타당하리라 판단되었다(그림 6). 그러나, 상세설계 단계에서는 고리 전면해역을 재현한 수리모형실험을 통해서 세부특성이 규명되어야 할 것이다.

4. 참고문헌

전력연구원(1998). 발전소 온배수 심층방류기술 연구(중간보고서).
 기초전력공학공동연구소(1996). 원자력발전소 온배수 방류시스템 설계기법 개발을 위한 연구 최종 보고서.
 電力土木技術協會(1995). 火力・原子力發電所土木構造物の設計.
 Akar, P.J. and Jirka, G.H.(1991). CORMIX2 : An expert system for hydrodynamic mixing zone analysis of convenient and toxic multipoint diffuser discharges, Environmental Reserach Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia, 30613-0801.
 Tsanis, I. K., C. Valeo(1994). Mixing Zone Models for Submerged Discharges, Computational Mechanics Publications.

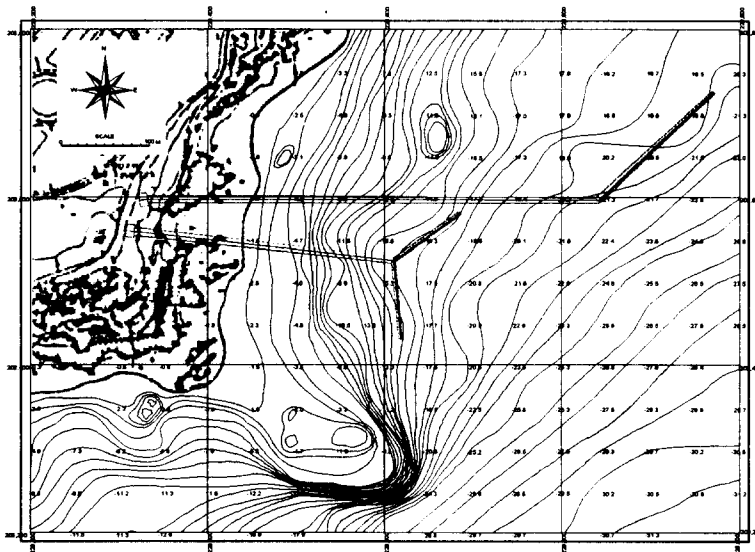


그림 5 수중다공확산관 배치도