

해양 방류시스템에 따른 온배수 혼합특성의 비교
Comparisons of Near-Field Mixing Characteristics of Heated-Water Discharge by Various Ocean Outfall Systems

이재형*, 서일원**

1. 서론

원자력 발전소에서 해양으로 배출되는 온배수는 높은 온도와 더불어 그 양이 방대하여 인근 해양 환경에 미치는 영향이 지대할 뿐 아니라 온배수 귀환에 의하여 발전시 냉각수 확보에 어려움을 초래함으로써 취수구 위치 선정에 중요한 인자로서 작용한다. 따라서 온배수 배출에 의하여 야기되는 주변 해역의 온도 상승 영향 범위를 정확하게 예측하는 모형의 개발과 더불어 초기 희석률을 극대화하여 인근 해역 생태계에 미치는 악영향을 최소화하는 방류시스템의 개발이 요망된다. 본 연구는 원자력 발전소에서 해양으로 방류되는 온배수의 초기 희석률을 주어진 해양 환경 조건하에서 극대화시키기 위한 방법에 관한 것이다. 본 연구에서는 하.폐수 및 온배수 방류 시스템중 희석효과가 우수한 것으로 밝혀진 수중 다공확산관(submerged multi-port diffuser)을 현재 가동중인 고리 원자력 발전소의 온배수 배출 방식으로 채택하여 온배수 배출에 따른 인근 해역의 온도 분포를 예측하고, 수치모형에 의하여 계산된 온도 상승 범위와 기존의 수표면 배출방식에 대한 실측 자료 및 수중 단일방류 시스템에 의한 결과와 비교하였다.

2. 확산관 이론

2.1 근역 흐름의 안정성

방류구 근처의 흐름은 방류수와 인근 주변수의 밀도차에 의해서 발생하는 부력 플럭스와 방류수가 갖고 있는 유속에 의한 모멘텀 플럭스 그리고 수심이 깊을 외해에서 확산관을 통해 해저에서 방류를 하고 이 방류수는 부력제트 형태로 상승하여 수표면에서 층상 흐름 형태로 확장되는 안정된 흐름구조를 형성한다. 그러나 천해에서 방류되는 온배수는 부력제트 형태의 흐름이 발생치 않고 방류구 근처에서 흐름이 파괴되어 전 수심에 걸쳐 재순환 영역이 발생하는 불안정한 흐름구조를 형성한다. 수중 다공확산관에 대한 근역 흐름의 안정해석(Jirka, 1982)에 따르면 온배수 확산관은 통상 불안정한 근역에 위치하여 안정된 근역에 위치한 하수 및 폐수 확산관의 해석에 이용되는 부력제트이론(Fischer et al, 1979)과 다른 천해 확산관 이론이 적용된다.

2.2 천해 확산관 이론 : 일방향 확산관

비교적 수심이 깊지 않은 천해 지역에서 수중 다공확산관에 의하여 발생하는 흐름은 불안정하고 따라서 확산관의 형태와 플럭스 변수가 중요한 요소로 작용한다. 이러한 불안정한 근역에서의 흐름은 통상 수심방향으로 완전혼합의 형태가 되고 원역으로 진행 하면서 재성층화된다. 일방향 확산관에 의한 흐름 (그림 1)은 방류수에 의해서 주변수로 전달되는 모멘텀에 의하여 야기되는 압력구배로 인하여 발생된다. 발생된 흐름은 확산관의 끝단에서 소위 가속구역이라고 하는 contracting slipstream 속으로 유입 된다. 일방향 확산관에 관련된 식들은 contracting slipstream 에 대한 흐름 해석을 통해서 얻을 수 있다. (Lee and Jirka, 1980)

1) 정체수역

가속 구역에서의 희석률은 다음과 같다.

$$S = \sqrt{\frac{H}{2l_q}} \quad (1)$$

여기서 H는 방류수심, $l_q (=q_0^2/m_0)$ 는 방류 길이축척이며, q_0 는 단위 길이당 체적 플럭스, m_0 는 단위 길이당 모멘텀 플럭스이다. 수평방향의 수축은 유선의 접근각도 θ_1 , 궤적을 따른 거리 x와 확산관의 길이 L_0 에 관계된다. 주변수의 흐름이 없는 경우, 접근각도 θ_1 은 60°에 접근하고 확산구역이 되기까지는 약 $L_0/2$ 의 거리가 된다. Contracting slipstream의 반폭 b_1 에 대한 근사식은 다음과 같다.

* 서울대학교 토목공학과 박사과정
 ** 정회원, 서울대학교 토목공학과, 조교수

$$b_h = \frac{L_D}{2} [\sigma_1 + (1 - \sigma_1) \exp(-3x'(1 + x'^3))] \quad (2)$$

여기서 $x' = 2x / L_D$, σ_1 은 수축율($=1/2$)이다.

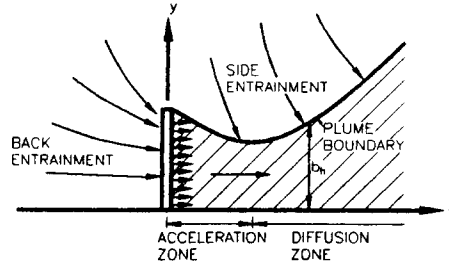


그림 1 일방향 확산관에 의한 흐름

2) 가로흐름이 존재하는 경우

① 수직배치 ($\gamma \approx 90^\circ$): 일방향 확산관

전희석률 S 와 수평반폭 b_h 는 다음과 같다. (Adams, 1982, Lee and Jirka, 1980)

$$S = \frac{H}{2} \sqrt{l_m l_q} + \sqrt{\frac{H^2 + 2Hl_m}{l_m l_q}} \quad (3)$$

$$b_h = \frac{L_D}{2} [\sigma_1 + (1 - \sigma_1) \exp(-3x'(1 + x'^3))] \quad (4)$$

여기서 $x' = 2x / L_D$, $\sigma_1 = \left(S \sqrt{\frac{l_m}{l_q}} + 0.5 \right) / \left(S \sqrt{\frac{l_m}{l_q}} + 1 \right)$, l_m 은 jet/crossflow scale 이다.

일방향 확산관은 일방향 유속만이 존재하는 흐름영역에서 효과적이나 조석의 영향을 받아 흐름방향이 변동하는 경우, 그 효과가 떨어진다.

② 평행배치 ($\gamma \approx 0^\circ$): T형 확산관

확산관의 축이 주변수의 흐름방향과 평행할 때의 거동은 일방향 확산관의 경우와 다소 다르다. 연구 결과에 따르면, 혼합이 되는 정도는 m_a 가 단위 길이당 주변수 모멘텀 플럭스 일때 방류모멘텀속, m_a/m_0 혹은 H/l_m 에 의존한다. 주변수의 유속이 작은 경우, 즉 $H/l_m < 1$ 일때 희석률 S 는 식 3과 유사하나, H/l_m 의 값이 큰 경우 방류구 근처의 희석률은 떨어진다. 폭 넓은 범위의 값에 대한 해석을 통해서 얻어진 평행배치에 대한 희석률의 경험적 감소계수는 다음과 같다. (Jirka, 1982)

$$r_s = \frac{1}{\sqrt{1 + 5 \left(\frac{H}{l_m} \right)}} \quad (5)$$

이러한 희석률의 감소는 각 방류공에서 나오는 제트의 상호작용에 관련된 것으로서, 주변수에 의하여 발생되는 압력분포로 인하여 확산관 배면에서 유입되는 주변수의 양을 제한하기 때문인 것으로 판단되고 있다. 수평 반폭은 일방향 확산관에 대한 수평반폭 식인 4와 같다. 일반적으로 T형 확산관은 확산관에 의한 흐름이 발생하게 됨으로 후면 포획흐름을 위한 공간을 확보하기 위하여 해안에서 떨어져 외해에 설치한다. 실험결과(Lee, 1979)에 의하면, 해안으로부터 확산관의 축까지의 거리가 확산관 길이의 반보다 작은 경우 희석률이 상당히 작아진다는 것이 밝혀져 있다.

2.3 완전 혼합된 확산관 plume (중간역)

일방향 확산관 혹은 단계적 확산관의 가속구역을 벗어나 점진적으로 확장하는 확산관 plume을 중간역이라 한다. 이 구역은 2개의 영역으로 나누어진다. 구역 1은 가속구역 끝에서 바로 시작되어 제성층이 일어나는 거리까지의 구역으로서, 구역 1의 천이거리, s_1 는 다음과 같다.

$$S_1 = cL_M^4 / F_c^4 H^3 \quad (6)$$

여기서 c 는 상수, L_m 은 jet/plume transition scale, $F_c = \frac{u_c}{(g'_c H_s)^{1/2}}$, $g'_c = g'_0 / S$, u_c 는 plume 중심선 속도이다. 또한 이 구역에서의 꺾적, 희석률 식은 다음과 같다.

$$\frac{z}{d_m} = t_1 \left(\frac{x}{d_m} \right)^3 \quad (7)$$

$$S = s_1 \left(\frac{z}{d_q} \right)^2 \quad (8)$$

여기서 $d_m = l_m L_D / H$, $d_q = l_q L_D / H$ 이고, t_1 , s_1 은 각각 꺾적과 희석률 상수이며 z 는 연직 거리이다. 구역 2 에서 확산관 plume 은 성장화가 되고 수평 부력확장(lateral buoyant spreading)에 의하여 확산 plume 에 중첩된다. 구역 1과 같은 희석, 꺾적식을 사용하는 한편, 부가적인 확장을 고려 할 필요가 있다. 부력확장은 횡방향 확장속도와 plume의 중심선 속도 의 비에 의하여 주어진다. 따라서 제트 중심선의 유속 u_c 가 폭 b 에 관한 미분 방정식에 포함된다.

$$\left(\frac{db}{dx} \right)_B = \left(\frac{g'_0}{u_c^2 C_D} \right)^{1/2} \quad (9)$$

여기서 h 는 확산plume의 연직두께, C_D 는 항력계수이다. 또한 수평 반폭, b_h 는 다음과 같다.

$$b_h = b_c \left(\frac{H^{1/2}}{J_M^{1/2} L_D^{1/6}} \right) (S^{7/4} - s_1^{7/4})^{2/3} + b_{hi} \quad (10)$$

여기서 b_{hi} 는 천이구간 s_1 에서의 초기 반폭이고 b_c 는 폭 상수이다. 또한 s_1 가 천이구간 s_1 에서의 초기 반폭일 때, 수직폭, b_v 는 다음과 같고 재성층에 의해서 감소한다.

$$b_v = \frac{S_1 b_{hi} H}{s b_h} \quad (11)$$

3. 모형의 적용 및 결과

온배수를 해양으로 방류하는 원자력 발전소의 방류시스템에 대하여 다양한 방류 시스템을 적용하여 방류구 근처의 흐름 양상과 혼합 특성을 분석하였다. 본 연구에서 각 방류시스템에 따른 혼합특성을 분석하기 위하여 사용되어진 모형은 CORMIX(Cornell Mixing Zone Expert System) 모형으로서 수중 단일방류, 수중 다공방류 및 수표면 방류시스템에 의한 보존성 오염물질의 혼합 특성을 예측하는 모형이다. (Doneker et al, 1990, Akar et al, 1991, 이재형 등, 1994)

3.1 해양 환경조건 및 방류조건

본 연구에서는 고리 원자력 발전소의 온배수가 배출되는 발전소 부지 전면해역을 연구 대상 지역으로 선택하였다. 발전소 부지 전면해역의 해저 구배는 외해 방향으로 약 3%정도이고 해안선에 평행한 동서방향의 해저경사는 동쪽 방향으로 가면서 다소 급해지는 양상을 보인다. 해안수심은 해안선으로부터 기존 수표면방류구 전면 약 500m 위치에서 15m, 1000m 에서 20m 정도를 유지하고 있다. (그림 2) 조석은 1일 2회조로서 간조시에는 동쪽방향으로, 만조시에는 서쪽방향으로 조류흐름이 일어나고 있다. 본 연구에서 사용된 해양 수리학적 자료 및 수표면 방류에 의한 수온분포 자료는 해양연구소(KORDI, 1979) 자료를 이용하였고 이 자료중 1978년 9월 26일 (간조) 과 1979년 4월 20일(만조) 를 온배수 확산 비교 시기로 선정 하였다. 그리고 이 시기의 해수 밀도분포는 그림 3 과 같고, 해양 환경 조건 및 방류 조건은 표 1 과 같다.

표 1. 대상 해역의 해양 환경조건 및 방류조건

시간	발전량 (MW)	방류량 (M ³ /S)	방류 수온 (°C)	주변수 수온 (°C)	조류속 (M/S)	방향	
78-09-26	400	40	27	20	0.15	E	EBB
79-04-20	440	40	20	13	0.15	W	FLOOD

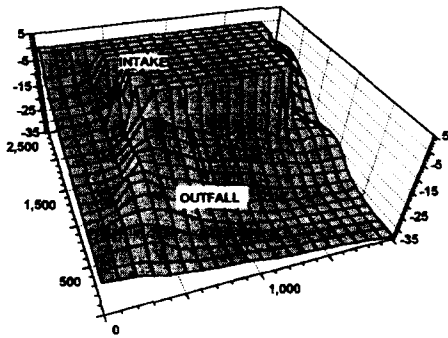


그림 2. 발전소 부지 전면해역 해저지형

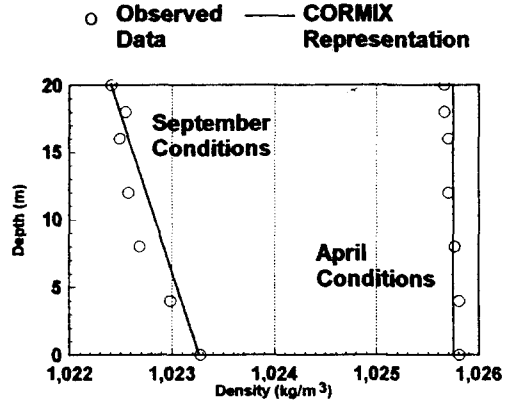


그림 3. 해역의 수심에 따른 밀도 분포

3.2 적용 방류 시스템 및 결과

본 연구에서 수표면 방류시스템에 의한 온배수 확산 거동과의 비교를 위하여 적용된 방류시스템은 표 2에 요약되어 있다. 해양연구소에서 시행한 수표면방류에 대한 온도 분포 실측자료와 같은 해양 환경조건 및 방류 조건하에서 수중 단일방류구와 수중 다공방류구를 적용하여 각 방류 방법에 따른 온배수 확산 거동을 비교하였다. 수중 다공방류시스템은 일방향 확산관과 T형 확산관을 적용하였다. 그림 4.는 각 방류 시스템에 따른 온배수 plume의 궤적과 방류구로부터 300 m 하류 지점의 궤적 중심선에서의 초과 수온으로서 수표면 방류에 비해 방류구 인근에서 높은 희석률을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 특히 T형 확산관은 온배수 배출에 따른 영향이 가장 작은 것으로 나타났다. 그림 5.는 78년 9월 26일과 79년 4월 20일의 실측 수온 분포와 T형 확산관을 적용하여 모의된 결과를 도시한 것으로서 1°C를 초과하는 영역이 상당히 넓은 기존 수표면 방류에 비해 T형 확산관은 방류구 주위 300 m 이내에서 초과 수온이 1°C 이하로 떨어지고 있다. 그림 6은 주변수 유속 변화에 따른 온배수 plume 궤적의 변화로서 유속이 증가함에 따라 수평 반폭이 감소하고 있다. 그림 7과 8은 확산관 길이 및 방류 수심의 변화에 따른 초과 수온의 변화를 흐름 방향의 거리에 따라 도시한 것이다. 또한 그림 9와 10은 주변수 유속의 변화와 확산관의 길이에 따른 귀환 길이의 변화로서 주변수의 유속이 증가함에 따라 온배수 plume이 해안으로 다시 돌아오는 거리가 증가함을 알 수 있고 확산관의 길이에 따라서는 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

표 2. 적용 방류 시스템

수중단일/확산관	L_p	θ	β	α	γ	방류단속	주변수유속	수심
	L (m)	°	°	°	°	V_c (m/s)	V_a (m/s)	H (m)
수표면방류	-	45	-	90	0	3.0	0.15	15
확산관 길이	100	45	90	0	0	3.0	0.15	15
	150	45	90	0	0	3.0	0.15	15
	200	45	90	0	0	3.0	0.15	15
	250	45	90	0	0	3.0	0.15	15
	300	45	90	0	0	3.0	0.15	15
주변수유속	300	45	90	0	0	3.0	0.15	15
	300	45	90	0	0	3.0	0.20	15
	300	45	90	0	0	3.0	0.25	15
	300	45	90	0	0	3.0	0.30	15
	300	45	90	0	0	3.0	0.35	15
수심	300	45	90	0	0	3.0	0.15	15
	300	45	90	0	0	3.0	0.15	20
	300	45	90	0	0	3.0	0.15	25

4. 결론

다양한 방류시스템을 해양으로 방류되는 온배수 배출시스템으로 채택하여 인근 해역에 발생되는 온도 상승 범위를 모의하여 본 결과, 수중 다공확산관에 의한 방류시스템은 방류구 주위에서 높은 희석률을 나타내어 기존 수표면 방류시스템 및 수중 단일방류시스템에 비해 효율적임을 알 수 있었으며

온도 상승범위가 1°C를 초과하는 범위는 방류구 주위 약 300m 이내로 나타났다. 또한 온배수 혼합의 중요 변수인 해양 수리학적 자료와 방류구의 기하학적 변화에 의한 온도 상승 범위 및 부력류 궤적의 변화 양상을 검토함으로써 주어진 해양 환경 조건하에서의 최적 방류시스템을 유도할 수 있는 발판을 제시하였다.

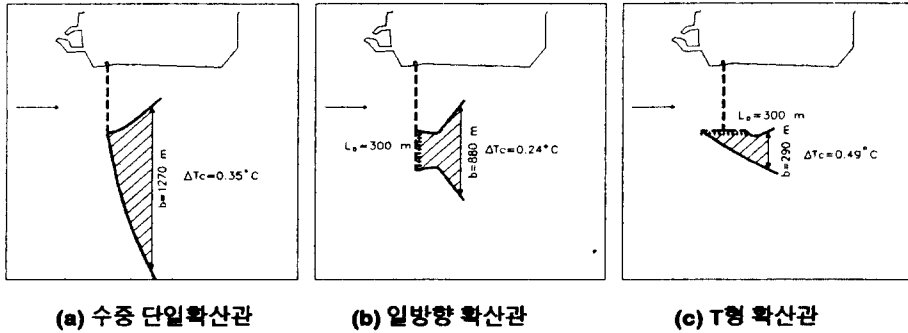


그림 4. 방류시스템에 따른 plume의 궤적 및 초과 수온

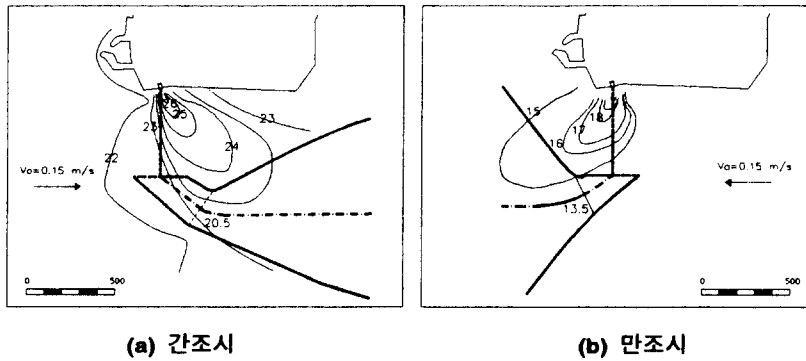


그림 5. 수표면 방류(실측치)와 T형 확산관(계산치)에 의한 수온 분포의 비교

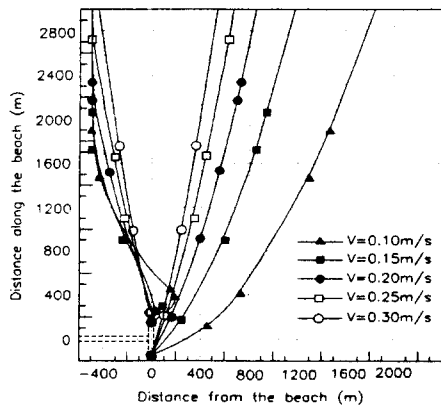


그림 6. 주변수 유속변화에 따른 plume 궤적의 변화

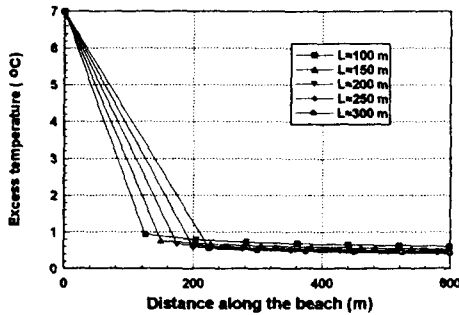


그림 7. 확산관 길이에 따른 초과수온의 변화

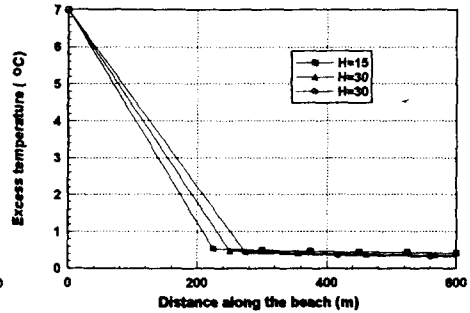


그림 8. 방류 수심에 따른 초과수온의 변화

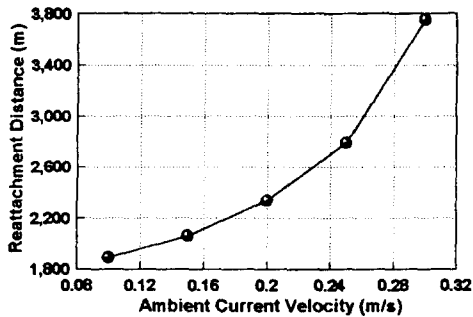


그림 9. 주변수 유속에 따른 귀환거리의 변화

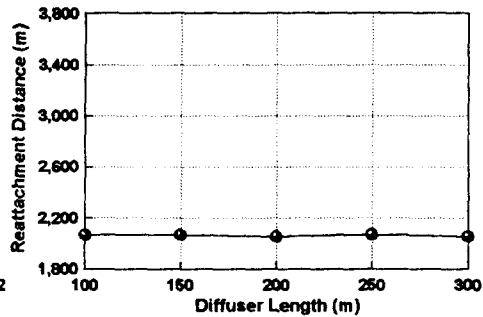


그림 10. 확산관 길이에 따른 귀환거리의 변화

5. 참고 문헌

- 이재형, 서일원, "CORMIX 모형을 이용한 오염물질의 혼합거동 해석", 1994년도 대한토목학회 학술 발표회 논문집, pp. 93-96, 1994
- Doneker, R.L. & G.H. Jirka, "CORMIX1: An Expert System for Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Single Port Aquatic Discharges", U.S. EPA, Env. Res. Lab., Athens, Ga., EPA 600/600/3-90/012, 1990
- E. Eric Adams, "Dilution Analysis for Unidirectional Diffusers", Journal of the Hydraulics Div., Proceedings of the ASCE, Vol. 108, No. HY3, Mar., 1982
- H.B. Fischer et al., "Mixing in Inland and Coastal Waters", Academic Press, 1979
- G.H. Jirka, "Multiport Diffusers for Heat Disposal: A Summary", J. of Hydraulics Div., Vol. 108, No. HY12, Dec., 1982
- I.R. Wood and et al., "Ocean Disposal of Wastewater", World Scientific, 1993
- J.H.W. Lee et al., "Heat Recirculation Induced by Thermal Diffusers", Journal of the Hydraulics Div., Proceedings of the ASCE, Vol. 105, No. HY10, Oct., 1979
- J.H. Lee, G.H. Jirka, "Multiport Diffuser as Line Source of Momentum in Shallow Water", Water Resources Research, Vol. 16, No. 4, 695-708, 1980
- KORDI, "Oceanographic studies for Kori nuclear power plants", 1979
- P.J. Akar and G.H. Jirka, "CORMIX2: An Expert System for Hydrodynamic Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Multiport Diffuser Discharges", U.S. EPA, Env. Res. Lab., Athens, Ga., EPA ,1991
- P.J.W. Roberts, "Line Plume and Ocean Outfall Dispersion", J. of Hydraulics Div. Vol. 105, No. HY4, Apr., 1979
- R.C.Y. Koh and N.H. Brooks, "Fluid Mechanics of Wastewater Disposal in the Ocean", Annual Review of Fluid Mechanics, 1975