

# 정지수체에서 축방향확산관을 통해 방류된 온배수의 거동 해석

○유대영\*, 서일원\*\*

## 1. 서론

원자력 발전소에서 냉각수로 사용되어 방류되는 온배수는 방류되는 수체보다 약 4 ~ 10°C 높은 온도로 전력 100만kw당 약 60m<sup>3</sup>/s의 양이 배출된다. 이러한 엄청난 양의 온배수는 수역의 물리적 특성을 변화시킬 뿐만 아니라 열 균형을 깨뜨리게 되어 주변 환경 및 생태계에 영향을 미치며, 방류된 온배수의 취수구로의 재순환은 발전소 냉각기능에 부진을 초래하게 되어 발전효율을 저하시키게 된다(한국전력공사, 1999).

다공확산관을 이용한 심층방류는 온배수로 인한 피해를 최소화하는 방식으로 널리 인정되었다(Harleman and Stolzenbach, 1972). 다공확산관 중에서 축방향확산관은 강한 양방향 흐름이 있는 경우에 가장 큰 희석을 결과를 나타내는데(Almquist and Stolzenbach, 1980) 이는 축방향확산관의 배치가 대칭적이며 또한 주변류의 방향과 수직을 이루고 있어 흐름이 있는 경우 효과적으로 주변수를 유입시키기 때문이다. 이러한 특성으로 인해 조석으로 인한 양방향의 강한 흐름이 주로 발생하는 해안에서 축방향확산관이 특히 유리하다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 정지 수체 내에서 축방향확산관으로부터 방류된 온배수의 유속과 온도 분포, 그리고 희석 구조를 설명하는 해석적 모형을 제시하고 이를 실험적으로 구명하는 것이다.

## 2. 연구동향

축방향확산관에 관한 연구의 대부분은 특정한 발전소의 건설을 위한 모형실험의 일부로서 수행되기 시작되었다. 그 이후 축방향확산관으로부터의 온수배에 대한 이론적인 연구가 수행되었는데 Almquist와 Stolzenbach(1980)과 Lee(1980) 등은 방류되는 온수제트를 전 수심에서 존재하는 평면제트로 가정하고 확산관을 따라 모멘텀이 계속적으로 발생한다는 가정을 사용하여 적분모형을 축방향확산관에 적용하였다. Jirka(1982)는 축방향확산관에서의 온배수의 모멘텀이 보존된다는 점과 중첩의 원리를 사용하여 수표면 최소희석을 예측식을 제안하였다.

다공확산관을 이용한 심층방류에 대한 국내의 연구로 한국전력공사(1999)에서는 확산관 형태의 선정에 관한 연구를 실험과 수치모형을 통하여 수행하였다. 김홍식 등 (1999)은 차원해석 방법을 적용하여 축방향확산관의 최소희석률 식을 제안하고 실험연구를 통해 이를 검증하였다.

---

\* 서울대학교 토목공학과 박사과정 수료

\*\* 서울대학교 토목공학과 부교수

### 3. 이론적 모형의 유도

#### 3.1 개념적 모형

축방향확산관의 개별적인 방류구로부터 부력제트의 형태로 방류된 온배수는 강한 방류 모멘텀과 같은 수심으로 인해 곧 병합되어 전 수심에 대해 일정한 유속 및 온도 분포를 갖는 평면제트로 해석할 수 있다고 가정하였다(그림 1). 방류된 부력제트는 연속적인 평면제트의 유입으로 해석할 수 있고 따라서 확산관 길이 내부에서의 유속 및 초과수온의 분포는 평면제트의 유속 및 초과수온이 연속적인 존재로 인한 영향을 중첩의 원리로서 유도하였다.

확산관 길이 이후 구간인 중간역에서도 방류된 온배수는 연직방향으로 일정한 유속 및 온도분포를 갖는 부력제트로 해석할 수 있다. 중간역의 시작점에서의 부력제트의 분포는 이미 상당한 폭과 체적플럭스를 가지고 있는 상태이기 때문에 가상의 원점에 존재하는 단일 평면제트로부터 발생한 제트가 상당한 거리를 진행된 상태로 근사시켜 해석하였다.

#### 3.2 수학적 모형

모형을 구성하는데 사용된 축방향확산관의 각 변수의 정의는 그림 2에 도시하였다.

##### 3.2.1 근역

전 수심에서 일정한 유속 및 초과수온분포는 방류되는 온배수의 모멘텀 및 열 흐름률의 보존식으로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$u'_0 = u_0 \sqrt{\frac{B}{H_e}} \quad \Delta T_0 = \Delta T_e \sqrt{\frac{B}{H_e}} \quad (1)$$

여기서  $B$ 는 등슬롯확산관의 폭이다.

중심축 유속과 초과수온의 분포는 제트원점으로부터의 거리의 제곱근에 반비례하는 분포라는 점과 횡방향 분포는 Gaussian 분포를 갖는다는 사실로부터 연속적인 평면제트의 영향을 적분형태로 고려함으로써 유속과 초과수온의 분포는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$u(x, y) = \int_0^{x-y} u'_0 \frac{\exp\left[-x^2 / (k_{sv}^2 (y - y_1)^2)\right]}{\sqrt{a_v (y - y_1) + 1}} dy_1 \quad (2)$$

$$\Delta T(x, y) = \int_0^{x-y} \Delta T_0 \frac{\exp\left[-x^2 / (k_{st}^2 (y - y_1)^2)\right]}{\sqrt{a_t (y - y_1) + 1}} dy_1 \quad (3)$$

이때  $a_v$ 와  $a_t$ 는 평면제트의 초과수온감소상수이며  $k_{sv}$ 와  $k_{st}$ 는 각각 평면제트의 유속과 초과수온의 확장계수이고  $y_p$ 는 평면제트 시작 지점이다.

##### 3.2.2 중간역

중간역에서의 중심축을 따른 분포는 거리의 제곱근에 반비례하는 형태로 감소하게 된다. 또한 횡방향 분

포는 Gaussian 분포를 이루며 그 폭은 거리에 따라 선형적으로 증가한다. 이를 수식으로 표현한 유속 분포와 초과수 분포는 다음과 같다.

$$u(x, y) = \frac{u_{v0}}{\sqrt{a_v(y - L_d + y_{v0}) + 1}} \exp\left[-\frac{x^2}{k_v^2(y - L_d + y_{v0})^2}\right] \quad (4)$$

$$\Delta T(x, y) = \frac{\Delta T_{v0}}{\sqrt{a_T(y - L_d + y_{vT}) + 1}} \exp\left[-\frac{x^2}{k_T^2(y - L_d + y_{vT})^2}\right] \quad (5)$$

여기서  $y_{v0}, y_{vT}$ 는 각각 유속 및 초과수온의 가상평면제트 위치이며  $u_{v0}, \Delta T_{v0}$ 는 가상평면제트의 초기 유속 및 초과수온값이다.

#### 4. 실험 시설

실험은 온배수 실험을 위해 제작된 3차원 수조에서 실시되었다. 수조의 재원은 20.0 X 4.0 X 0.6m이다. 실험에서 사용되는 온수는 0.8 m<sup>3</sup> 용량의 온수공급장치에서 공급되었다. 온수공급장치는 예열수조와 항온정수 두수조로 구성되어있으며 원하는 온도로 물을 가열 시킨 후 실험 수조 내에 설치된 모형 확산관으로 공급한다. 모형 확산관의 길이는 120cm이며 최대 31개의 방류포트를 4cm 간격으로 설치할 수 있다.

유속의 측정을 위해서는 Acoustic Doppler Velocimeter(ADV)가 사용되었고 온도 측정은 온도센서와 데이터 로거를 이용하여 이루어졌다. 온도와 유속의 측정이 이루어진 3차원 격자간의 간격은 확산관 길이의 0.2 ~ 0.5배 가량으로 결정되었고 측정 범위는 확산관 길이의 약 5배 이상되는 지점까지를 포함하였다.

#### 5. 실험결과 및 분석

##### 5.1 실험 조건

온배수로 인한 온도장과 유속장의 3차원적 분포를 측정하기 위해 온도측정은 21회, 유속측정은 40회 각기 다른 실험조건에서 실험을 수행하였다. 주요 실험매개변수의 범위를 표 1에 정리였다.

표 1. 주요 실험 매개변수의 범위

	유효수심 (cm)	방류포트 직경 (cm)	방류포트 간격 (cm)	총 방류유량 (cm <sup>3</sup> /s)	방류 유속 (cm/s)	$\Delta T_0$ (°C)
범위	5.0 ~ 30.0	0.43 ~ 1.0	4.0 ~ 12.0	106.6 ~ 1027.2	45.3 ~ 100.7	11.1 ~ 23.6

##### 5.2 실험 결과 및 분석

수온분포의 수심방향분포를 분석한 결과 근역에서의 방류 온배수로 인한 온도장은 적은 폭을 갖고 수심 방향으로는 비교적 일정한 수온값을 갖는 중심부분이 형성됨을 확인할 수 있었다. 그림 3은 확산관의 시작점에서 방류방향으로 각각 0.5, 1.0, 3  $L_d$  떨어진 지점에서의 10번 온도측정실험 자료의  $x-z$  평면 등수온도를 도시한

것이다. 10번 온도측정실험의 실험조건은 온도유효수심 10cm, 방류유속 46.7cm/s, 초기 온도차 22.1°C이며 실험 결과는 전형적인 수온분포를 나타내었다. 그림 3에 도시된 결과로부터 근역에서는 방류된 온배수로 인한 평면 제트의 형상을 뚜렷히 확인할 수 있다.

그림 4에 초기 초과수온으로 무차원화된 10번 실험의 중심축 수온분포 결과를 본 연구에서 제안한 중심축 수온분포와 비교하여 도시하였다. 제시된 결과로부터 근역에서는 유속분포가 거리에 따라 증가하며 중간역에서는 감소하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있으며 그러한 경향을 제안된 모형이 근역에서는 거리의 제곱근에 비례하여 증가하는 함수로, 중간역에서는 거리의 제곱근의 반비례하는 함수로서 적절히 모의하고 있음을 알 수 있다.

10번 실험 결과와 제안된 모형에 의한  $x$ - $y$ 평면에서의 무차원 초과온도분포를 그림 5에 도시하였다. 두 결과의 비교를 통해 제안된 모형은 초과수온분포의 전반적 분포, 최고 수온의 값과 발생 위치, 온수플룸 폭의 확장비 등을 적절히 모의하고 있는 것으로 판단할 수 있다. 특히 강한 모멘텀의 효과 때문에 수조의 경계의 영향을 적게 받는 근역에서 모형과 실험결과가 더 잘 일치하였다.

방류 온배수로 인한 유속장 역시 모형과 실험결과가 잘 일치함을 확인하였다. 유속장의 전반적인 형태를 확인하기 위하여 유효수심 10cm이고 방류 유속 101.7cm/s인 1번 유속측정실험의 결과를 그림 6에 제시하였다. 유속장의 벡터도를 통해 유속장의 형상과, 폭 그리고 주변류의 유입양상을 확인할 수 있다.

## 6. 결론

정지 수체에서 축방향확산관에서 방류되는 온배수의 거동 특성을 이론적, 실험적으로 구명하였다. 축방향확산관을 통해 방류된 온배수를 전 수심에 걸쳐 동일한 유속 및 온도분포를 갖는 평면제트로 가정하여 중첩의 원리를 이용하여 유속 및 온도장 분포의 모형을 제안하였다. 제안된 모형과 유속 및 수온의 3차원 분포를 측정 한 실험 결과를 비교한 결과 제안된 모형은 축방향확산관을 통해 방류된 온배수의 거동 특성을 잘 모의하는 것으로 판단되었다.

## 참고문헌

1. 김홍식, 서일원, 유대영. (1999). "천해에서 축방향확산관의 회석 거동", 대한토목학회논문집, 19(II-5), pp. 585-595
2. 한국전력공사. (1999). "발전소 온배수 심층방류기술 연구"
3. Almquist, C. W., and Stolzenbach, M. (1980). "Staged Multiport Diffusers." *Journal of Hydraulic Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers*, 106(HY2), 285-302.
4. Harleman, D. R. F., and Stolzenbach, K. D. (1972). "Fluid Mechanics of Heat Disposal from Power Generation." *Annual Review of Fluid Mechanics*, 4, 7-32.
5. Jirka, G. H. (1982). "Multiport Diffuser for Heat Disposal: A Summary." *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 108(HY12), 1425-1467.
6. Lee, J. H. W. (1980). "Near Field Mixing of Staged Diffuser." *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 106(HY8), 1309-1324.

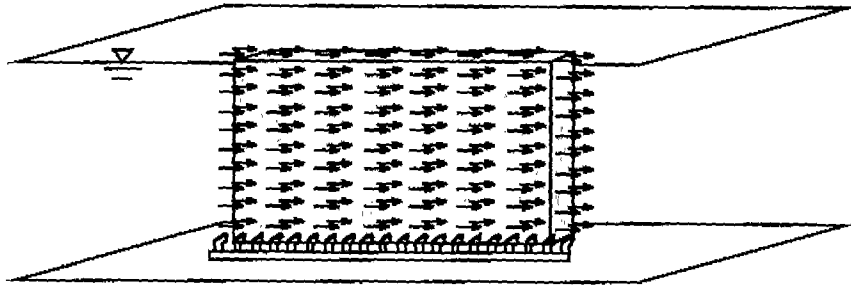


그림 1. 측방향 확산관과 평면제트 가정

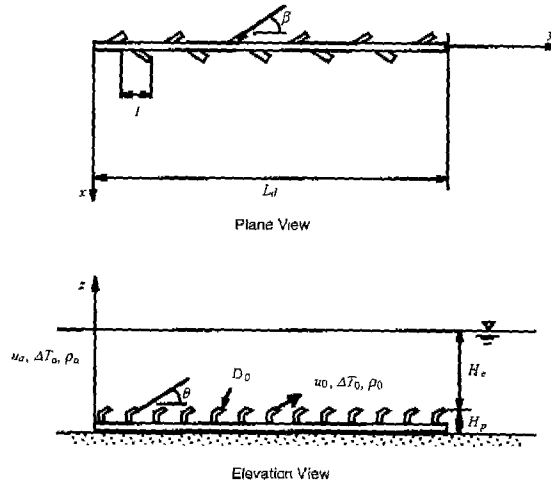


그림 2. 측방향 확산관의 모식도

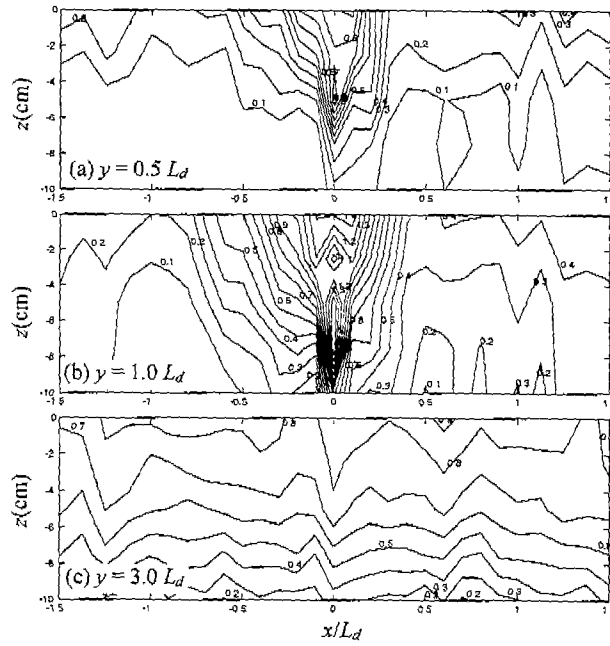


그림 3. x-z 평면의 등온도도

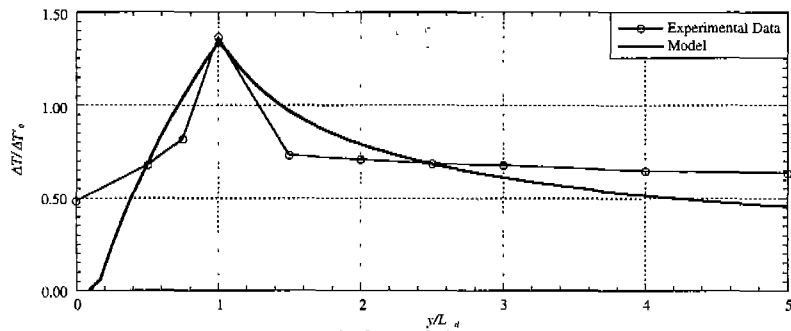


그림 4. 무차원 초과수온의 중심축 분포

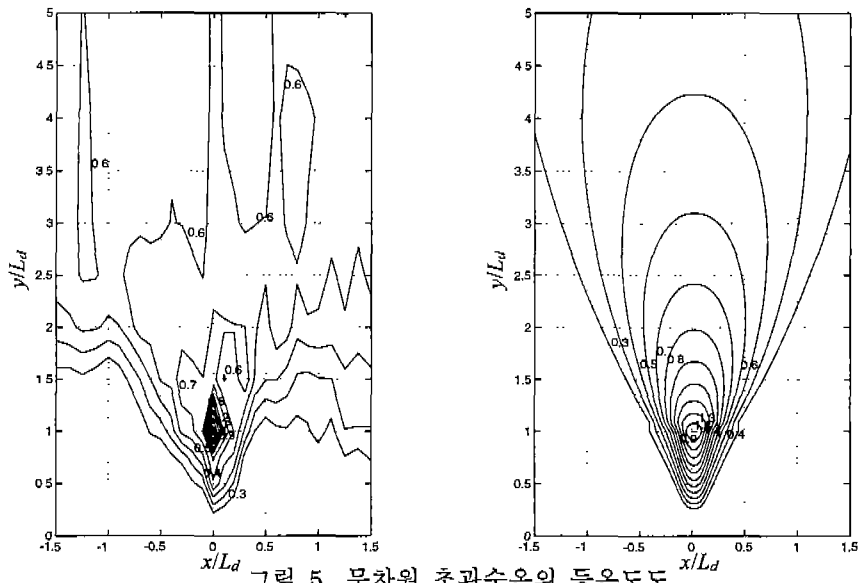


그림 5. 무차원 초과수온의 등온도도

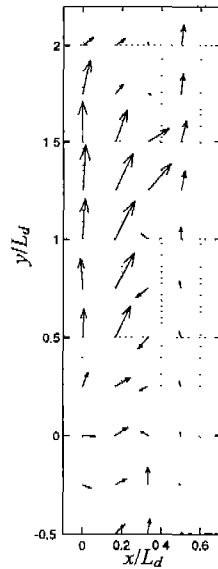


그림 6. 수표면 유속의 벡터도