

온수확산관의 회석특성에 관한 실험적 연구

○김홍식* / 서일원** / 유대영*

1. 서론

본 연구에서는 국내 발전소의 운영 특성과 해역의 특성을 고려하여 주변 환경 영향을 최소화시킬 수 있는 최적 방류시스템을 도출하기 위하여 온배수 심층방류용 확산관에 대한 수리실험을 수행하였다.

실험의 세부적 목표는 다음과 같다. 첫째, 국내 해역 조건에 적합한 수중다공확산관의 개발을 위해서 국내 해역의 조류 운동량 특성을 고려하여 기존의 연구에서 다루지 않았던 넓은 범위의 조류 운동량에 대해 실험을 수행하고 이의 결과를 분석한다. 둘째, 확산관 근역에서의 온배수 확산 특성을 세부적으로 측정하여 온배수 확산 메커니즘에 영향을 미치는 인자와 그 효과를 규명한다. 셋째, 일반적으로 조류의 방향이 바뀌는 해역에 많이 설치되어 온 T형확산관과 축방향확산관에 대한 실험을 수행하여, 근역회석률을 비교·분석하고, 국내 해역 특성에 적합한 확산관 형태를 제시한다.

2. 이론적 연구

2.1 T형확산관

주변수가 있는 경우의 T형확산관(그림 1 참조)의 회석률은 주변류가 증가함에 따라 감소하는 경향이 있다고 알려져 왔다. Adams (1982)는 강한 주변류가 존재할 때 T형확산관의 회석률이 감소하는 현상에 대해 다음과 같이 해석을 시도하였다. 첫째, 각각의 방류구를 통해 나오는 제트들이 주변류에 의해 궤적이 굴절되면서 유효제트단면적이 줄어들어 회석률이 감소한다. 둘째, 방류수의 강한 운동량으로 인한 압력의 증가뿐만 아니라 주변류의 정체현상으로 인한 추가적인 압력 상승효과를 가져온다. 즉, 이러한 압력의 증가분은 확산관 하류 부근에서의 정지수체의 경우보다 더 큰 수위 상승을 가져오게 되어 회석률이 감소하게 된다. Adams (1972, 1982)는 T형확산관의 회석률 공식을 점근류와 가속류에 대해서는 베르누이 식을, 확산관축을 따른 압력의 불연속 현상이 발생하는 지점에서는 운동량방정식을 적용하여 산정하였고, 확산관의 배면과 전면에서 운동량방정식을 적용할 때 주변류의 정체현상으로 인해 발생된 운동량 손실을 고려하였다. 그는 정체현상으로 인한 운동량 손실을 수위 상승분, Δh_d 로 나타내었다. 에너지 방정식과 운동량방정식을 결합하여 산정된 근역에서의 T형확산관 근역회석률 공식은 다음과 같이 유도된다.

$$S_r = S_{0U} \left(1 - \frac{\Delta h_d g H}{U_0^2 B} \right) \quad (1)$$

여기서 S_r 는 흐름수체에서 T형확산관의 회석률, S_{0U} 는 정지수체 회석률, U_0 는 방류유속, H 는 방류수심, $B (= \frac{\pi D^2}{4l})$; D 는 방류구의 직경, l 은 방류구간의 간격)는 방류구의 등평면확산관 폭(equivalent slot width), g 는 중력가속도, 그리고 Δh_d 는 주변류의 정체현상으로 인한 수위상승분이다.

Adams는 Δh_d 가 주변류의 정체현상과 관련되어 있다는 점에 착안하여 다음과 같은 형태로 제시하였다.

$$\Delta h_d = \frac{c_d u_a^2}{g} \quad (2)$$

여기서 c_d 는 주변류의 정체현상과 관련된 계수이며, u_a 는 주변류의 유속이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같은 무차원 회석률식이 유도된다.

$$\frac{S_r}{S_{0U}} = 1 - c_d m_r \quad (3)$$

* 서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료

** 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수

여기서 m_r 은 방류수와 주변류의 운동량흐름률의 비로서 다음과 같이 주어진다.

$$m_r = \frac{u_a^2 H}{U_0^2 B} \quad (4)$$

식 (3)은 주변류가 증가함에 따라 근역에서의 근역회석률이 감소함을 보여준다. Adams와 Stolzenbach (1977), 그리고 Adams (1982)는 실험자료에 보다 적합한 예측식을 도출하기 위하여 회귀분석을 통해 실험자료에 근접한 경험식을 제시하였는데 이는 다음과 같다.

$$\frac{S_t}{S_{0U}} = (1 + 5 m_r)^{-1/2} \quad (5)$$

Lee 등(1977)은 T형확산관에서 m_r 에 따른 근역회석률의 관계를 제시하였다. $m_r < 0.1$ 인 구역의 경우 근역회석률은 주변류의 영향을 받지 않는 반면에 $m_r > 0.1$ 인 경우에는 근역회석률이 정지수체의 경우보다 상당히 감소한다고 제시하였다.

2.2 축방향확산관

일반적으로 온수방류의 거동을 해석할 경우에 근역회석률에 영향을 미치는 주요인자는 다음과 같다.

$$S = f_1(q_0, m_0, u_a, H, \gamma, \beta, \theta_0) \quad (6)$$

여기서 $q_0 (= U_0 B)$ 는 단위길이 당 체적흐름률, $m_0 (= U_0^2 B)$ 는 운동량흐름률, 그리고 $j_0 (= U_0 g_0 B)$ 는 부력흐름률이다. 그리고 γ 는 주변수 흐름방향과 확산관 축이 이루는 각, β 는 확산관 축과 방류구가 이루는 각이고, θ_0 는 방류구와 바닥면이 이루는 각을 나타낸다.

축방향확산관(그림 1 참조)은 통상적으로 $\beta = 0^\circ$, $\gamma = 90^\circ$ 이고 본 실험의 경우 $\theta_0 = 22.5^\circ$ 이므로 식 (6)을 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$S_s = f_2(q_0, m_0, u_a, H) \quad (7)$$

위의 식을 차원해석하면 다음과 같은 결과가 도출된다(한국전력공사 전력연구원, 1999).

$$\frac{S_s q_0 u_a}{m_0} = f_3\left(\frac{H}{l_m}\right) \quad (8)$$

여기서 $l_m (= m_0/u_a^2)$ 은 제트/주변류의 상대적 영향을 나타내는 길이 척척이다. 식 (8)에서 주변류의 유속에 비해 방류운동량이 지배적인 경우($H/l_m \ll 1$)에는 주변수 유속의 영향을 무시할 수 있고 이 구역을 운동량지배근역(Momentum-Dominated Near Field, MDNF)이라고 정의한다. 이 경우에 식 (8)은 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{S_s q_0 u_a}{m_0} = c_1 \left(\frac{H}{l_m}\right)^{1/2}, \quad H/l_m \ll 1 \quad (9)$$

운동량지배근역에서 식 (9)의 우변의 지수 값이 1/2을 갖는 이유는 이 식의 좌변과 우변에 기초항을 대입하여 전개하였을 때 주변수 유속, u_a 가 소거되도록 식의 형태를 결정하였기 때문이다. 위의 경우와는 반대로 주변수의 유속이 지배적인 경우($H/l_m \gg 1$)에는 방류운동량흐름률을 무시할 수 있으며 이 경우에 해당하는 구역을 운동량지배원역(Momentum-Dominated Far Field, MDFF)이라고 정의한다.

$$\frac{S_s q_0 u_a}{m_0} = c_2 \left(\frac{H}{l_m}\right), \quad H/l_m \gg 1 \quad (10)$$

운동량지배원역에서 식 (10)의 우변의 지수 값이 1을 갖는 이유는 이 식의 좌변과 우변에 기초항을 대입하여 전개하였을 때 방류운동량흐름률, m_0 가 소거되도록 식의 형태를 결정하였기 때문이다. 식 (9)와 식 (10)의

c_1 과 c_2 는 흐름수체에서 축방향확산관의 회석률 상수인데 이는 본 실험자료를 통해 산정한다.

3. 온수확산관 실험

3.1 실험시설 및 계측기기

방류구 근역 유속장의 3차원적인 거동과 원역에서의 온도분포 및 재순환류의 거동을 규명할 목적으로 온배수 심층방류 수리실험을 위한 전용수조를 설계, 제작하였다(그림 2 참조). 수조의 폭과 길이는 각각 4.9m와 15.5m이며, 수심은 최대 60cm까지 재현할 수 있다. 온배수 확산실험에 이용되는 온수를 공급하는 장치를 설계, 제작하였다. 이 온수공급장치의 가장 중요한 기능은 일정한 온도의 온수를 원하는 유량만큼 안정적으로 공급하여 온배수와 주변수와의 밀도차가 일정하게 유지된 상태에서 실험을 가능하게 하는 것이다. 실험에 사용된 유속측정장치는 미국 SonTek사의 3차원 음파유속계(Acoustic Doppler Velocimeter, ADV)이다. 수온을 측정하기 위해서 30개의 CC형 열전대 온도센서(thermocouple)와 데이터로거가 사용되었다.

3.2 실험 조건

실험을 통한 결과의 분석은 대부분 방류되는 온수와 주변수의 특성을 나타내는 무차원변수를 사용해서 이루어진다. 따라서 실험의 조건을 설정할 때 무차원변수의 범위를 재현하고자 하는 원형의 범위에 부합되게 설정하는 것은 매우 중요하다. 온수방류실험에 있어서 고려해야 할 중요한 무차원변수는 등평면확산관의 밀도 Froude수, F_s , 상대 수심, H/B , 그리고 방류수와 주변수의 운동량흐름률 비, m_r 등이다. 또한 온수확산관의 경우 흐름이 불안정한 것이 일반적이기 때문에 다음의 식으로 주어지는 불안정조건이 만족되도록 실험 조건을 수립하였다.

$$\frac{l_M}{H}(1 + \cos^2 \theta_o)^2 + \frac{l_M}{l_m} > 0.54 \quad (11)$$

여기서 $l_M (= m_o / j_o^{2/3})$ 은 운동량/부력 길이축척이고, $l_m (= m_o / u_o^2)$ 은 제트/주변류 길이축척이다. 본 실험에서 수행된 각 무차원변수의 범위는 다음과 같다. 등평면확산관의 밀도 Froude수는 130~660, 상대수심은 약 20~2600, 운동량흐름률 비는 최대값이 약 144이다. 본 실험 조건을 위에 제시된 무차원변수의 범위와 불안정 조건을 만족할 수 있도록 설정하고, 특히 기존의 연구에서 미비한 m_r 의 범위에 대해 중점적으로 실험을 수행하였다.

4. 실험결과

4.1 근역회석률

(1) T형확산관

정체수역에 관한 T형확산관의 회석률을 도시한 것이 그림 3a)이다. 실험치에 최적합한 공식을 유도하면 다음 식과 같으며, 이는 Adams(1982)가 제안한 식과 동일한 것으로 밝혀졌다.

$$S_{0U} = 0.71 \sqrt{\frac{H}{B}} \quad (12)$$

흐름수역에서 실험한 T형확산관의 회석률을 무차원화하여 m_r 에 대해 도시하면 그림 3b)와 같이 나타난다. 이 그림에서 밝혀진 사실은 Adams(1982)의 이론(식 3 및 식 5)과는 달리 m_r 이 1이상인 경우 주변류가 증가함에 따라 회석률이 점차 증가하여 정체수역의 회석률에 점근적으로 근사함을 알 수 있다. 따라서 이러한 회석거동을 적절하게 표현할 수 있는 경험식을 제시하면 다음과 같다.

$$\frac{S_t}{S_{0U}} = \frac{m_r}{m_r + 3/2}, \quad m_r > 1 \quad (13)$$

(2) 축방향확산관

축방향확산관의 정체수역에서의 회석률을 도시한 것이 그림 4a)이다. T형확산관보다 회석률이 저조함을 알 수 있으며, 실측치를 최적합시킨 식은 다음과 같다.

$$S_{0S} = 0.43 \sqrt{\frac{H}{B}} \quad (14)$$

흐름이 존재하는 경우, 축방향확산관의 회석률을 무차원화하여 도시하면 그림 4b)와 같다. 이 그림에서 $m_r < 1$ 인 경우와 $m_r > 1$ 인 경우에 대해 각각 식 (9)와 식 (10)을 적용하여 회석률 상수를 결정하면 다음과 같다.

$$c_1 = c_2 = 0.58 \quad (15)$$

표 1에 확산관별 회석률을 무차원화하여 비교하였다.

표 1 확산관 형태별 근역회석률 예측식

흐름 구분	정체수역	흐름 수역	
		$m_r < 1$	$m_r > 1$
T형 확산관	$S_{0U} = 0.71\sqrt{\frac{H}{B}}$	$\frac{S_t}{S_{0U}} = (1+5m_r)^{-1/2}$	$\frac{S_t}{S_{0U}} = \frac{m_r}{m_r+3/2}$
축방향 확산관	$S_{0S} = 0.43\sqrt{\frac{H}{B}}$	$\frac{S_s}{S_{0S}} = 1.35$	$\frac{S_s}{S_{0S}} = 1.35\sqrt{m_r}$
		$\frac{S_s}{S_{0U}} = 0.82$	$\frac{S_s}{S_{0U}} = 0.82\sqrt{m_r}$

4.2 온수확산관들의 회석 특성 비교

본 실험연구를 통해 제안된 근역회석률 예측식을 사용하여 각 확산관의 특성에 대하여 비교·분석하여 도시한 것이 그림 5이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 주변류의 영향이 매우 약한 경우($m_r < 0.1$)에는 T형 확산관이 높은 회석효과를 보이거나 $m_r > 0.1$ 인 구간에서는 축방향확산관보다 회석효과가 떨어지는 것으로 나타났다. 이처럼 확산관의 회석효과를 비교할 때는 확산관이 설치되는 해역의 주된 조건에 따라 효율이 좋은 확산관을 선정해야 한다고 사료된다. 즉, 주된 해역조건이 $m_r < 0.1$ 인 경우에는 T형확산관이 가장 회석효과가 좋고 $m_r > 0.1$ 인 경우에는 축방향확산관이 회석효과가 가장 좋다.

5. 결 론

국내 해역조건과 온배수 방류 특성을 고려하여 주변 환경에 대한 영향을 최소화할 수 있는 최적방류시스템을 도출하기 위하여 T형확산관과 축방향확산관의 근역회석률식을 비교·분석하였다. $m_r < 0.1$ 인 구간에서는 T형확산관의 근역회석률이 축방향확산관에 비해 높게 나타났으며, $m_r > 0.1$ 인 구간에서는 축방향확산관이 T형확산관에 비해 높게 나타났다. 따라서 이 구간별로 적합한 확산관 형태가 상이함을 알 수 있다. 그러나 발전소 건설사업에서 최적확산관의 선정은 현장조건 및 시공성, 경제성 등을 복합적으로 고려하여 결정되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

한국전력공사 전력연구원, (1999). 발전소 온배수 심층방류기술 연구.

Seo, I.W., Kim, H.S. (1998). "Dilution Characteristics of Unidirectional Multiport Diffuser." The 3rd International Conference on Hydrodynamics, Seoul, Korea.

Adams, E.E. (1982). "Dilution Analysis for Unidirectional Diffusers." *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 108(HY3), 327-342.

Adams, E.E. and Stolzenbach, K.D. (1977). "Comparison of Alternative Diffuser Designs for the Discharge of Heated Water into Shallow Receiving Water." *Proc. Conf. On Waste Heat Management and Utilization*, 1, 26-171.

Lee, J.H.W., Jirka, G.H. and Harleman R.F. (1977). *Modelling of unidirectional thermal diffusers in shallow water*. Report No. 228, Electric Power Program of the M.I.T. Energy Laboratory, M.I.T..

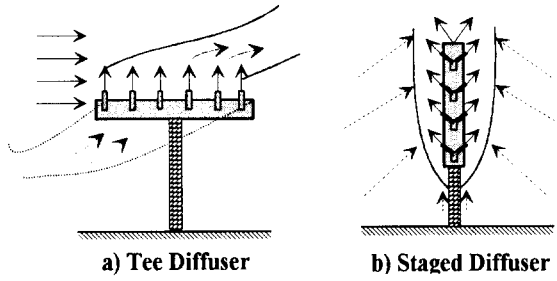
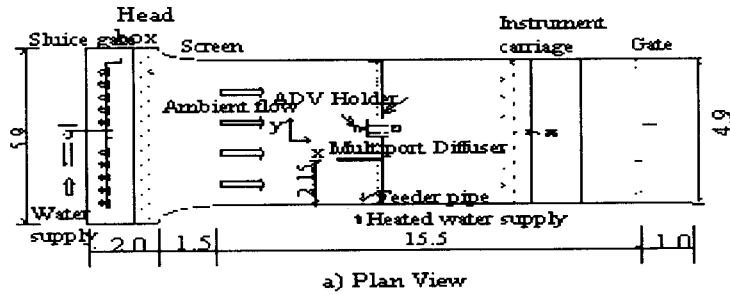
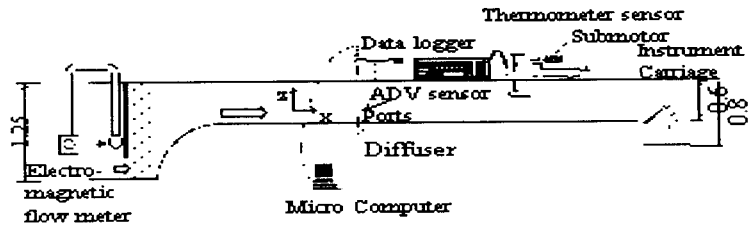


그림 1. 온수 확산관의 종류



a) Plan View



b) Side View

그림 2 실험수조 및 계측기기

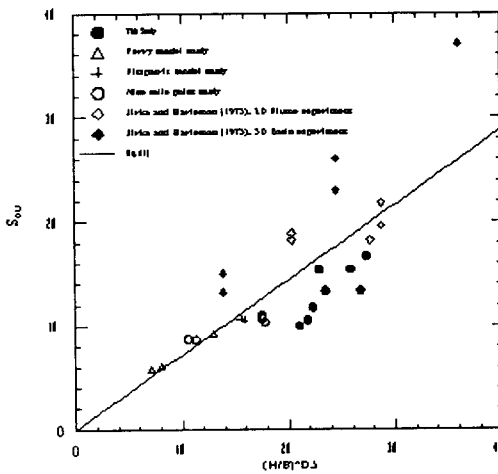


그림 3a 정지수체에서 T형확산관의 회석률

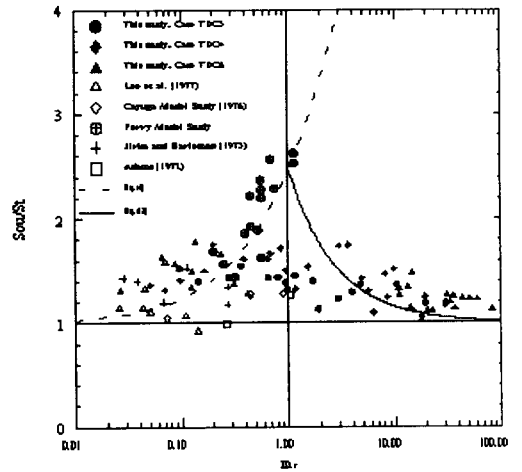


그림 3b 흐름수체에서 T형확산관의 회석률

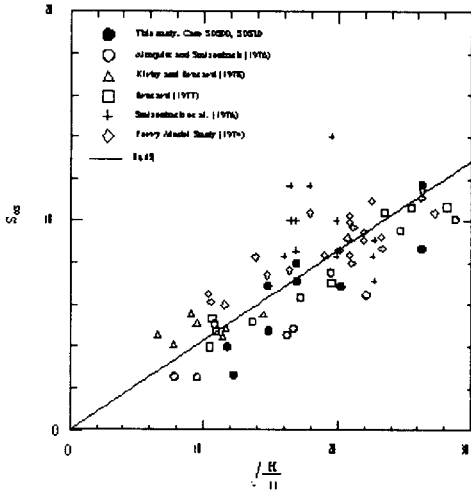


그림 4a 정지수체에서 축방향확산관의 회석률

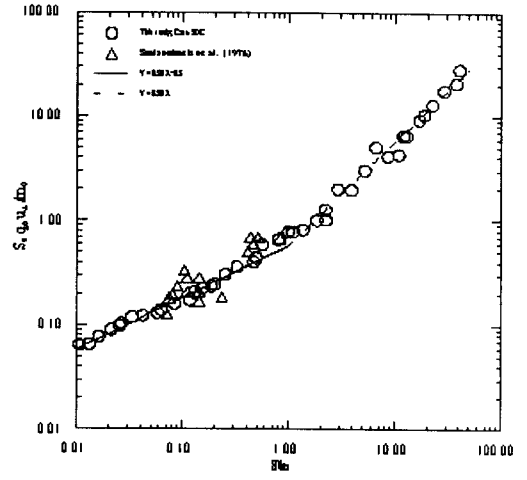


그림 4b 흐름수체에서 축방향확산관의 회석률

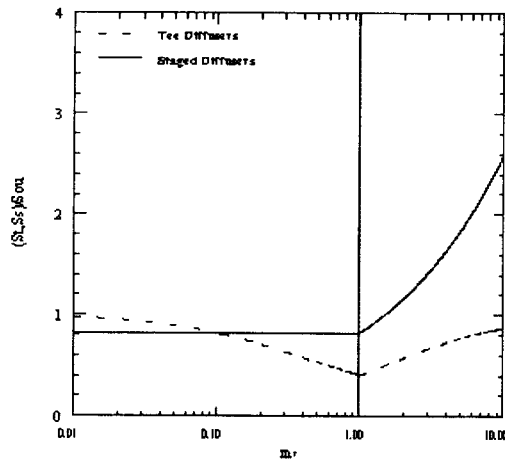


그림 5 흐름수체에서 온수확산관의 근역회석률 예측치의 비교