

정지수체로 방류된 연직다중젯의 최소희석률

Minimum Dilution of Vertical Multijet Discharging into Stagnant Water

김 홍 식* / 서 일 원** / 유 대 영* / 서 용 원***

Kim, Hong Sik / Seo, Il Won / Yu, Dae Young / Seo, Yong Won

Abstract

In this study, mixing and dilution characteristics of vertical multijet discharged by multiport diffuser into stagnant water are investigated. The results obtained from the experiment of multiport diffuser performed in the three dimensional flume are as follows.

As far as merging process of multiport diffuser is concerned, merging starts at about $z/l = 3$ although merging length is dependent upon stability condition and thereafter lateral temperature distribution becomes gradually uniform which is typical distribution of plane jet. Analyses of experimental data for minimum dilution show that characteristics of minimum dilution are described based on three regions which are jet region where momentum is dominated, intermediate region, and plume region where buoyancy is dominated. Minimum dilution coefficient in plume region of multiport diffuser obtained in this study is 15% higher than that of plane diffuser. This is because individual jet of multiport diffuser entrains more ambient water before merging is occurred, and therefore dilution increases.

Keywords: multiport diffuser, vertical multijet, minimum dilution, plane diffuser

요 지

본 연구에서는 정지수체에서 다공확산관을 통해 방류된 연직다중의 혼합 및 희석 특성에 대해 규명하였다. 3차원 실험수조에서 실험을 통해 밝혀진 결과는 다음과 같다.

우선 다공확산관의 병합과정을 살펴보면 흐름의 안정조건에 따라 병합거리가 다소 차이가 있기는 하지만 z/l 가 대략 3인 지점부터 병합이 시작되어 그 이후에는 평면부러질의 거동에 서서히 가까워짐을 알 수 있다. 최소희석률에 대해 분석해 본 결과, 방류운동량이 지배적인 영역, 천이영역, 그리고 부력이 지배적인 부러류영역으로 나누어 희석률 특성을 표현할 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구의 실험결과 다공확산관의 경우 부러류영역의 희석률 상수가 평면확산관에 비해 15% 더 높게 나왔다. 그 이유는 다공확산관의 경우 병합 이전에는 개별의 경계면에서 주변수의 포획이 발생하여 희석이 증대되기 때문이다.

핵심용어 : 다공확산관, 연직다중, 최소희석률, 평면확산관

-
- * 서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정수료
Doctoral Candidate, Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea
 - ** 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수
Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea
 - *** 서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정
Doctoral Student, Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea

1. 서 론

현재까지의 연구 및 시공 사례에 의하면 온배수 방류공법 중에서 초기희석 효과 및 온배수 귀환 억제기능이 가장 우수한 시스템은 수중다공확산관(submerged multiport diffuser)으로 밝혀진 바 있다(Miller와 Brighthouse, 1984; 서일원 등, 1997). 이는 발전소가 위치한 해안에서 멀리 떨어진 해양의 해저에 다공확산관을 설치하여 온배수를 수중에 분사하여 최대의 희석 효과를 확보하는 시스템으로서, 외국의 경우 많은 발전소가 이 시스템을 채택하여 온배수를 방류하고 있다. 그러나 국내에서는 수중다공확산관에 대한 연구가 미흡하며 또한 국내 발전소에서 이 시스템을 이용하여 온배수를 방류하는 곳이 없는 실정이다.

Jirka와 Harleman(1979)은 평면젤의 실험연구에서 특정 깊이에서의 젤의 안정성과 이에 따른 희석률간의 관계에 관해 분석하였다. 그들의 연구에 의하면 안정된 흐름조건에서 연속으로 분사된 젤은 부력젤영역, 수표면접촉영역, 내부도수영역, 그리고 성층화된 역방향흐름영역 등을 거치며 확산되고 안정성이 확산 형상에 큰 영향을 미치는 것으로 밝힌 바 있다. 그리고 주어진 수심에서 흐름이 안정된 경우의 최소희석률이 불안정한 경우보다 크게 나타남을 밝힌 바 있다(Jirka와 Harleman, 1979). Lee와 Jirka(1981)는 Jirka와 Harleman(1979)의 평면젤의 해석방법과 유사한 방법을 사용하여 단일 원형젤에 관한 연구를 수행하였다. Lee와 Jirka(1981)의 연구에서도 젤의 확산과정을 4개의 영역으로 나누어 각 영역에서의 동수역학적 해석을 시도하였고, 실험을 통해 그 결과를 검증하였다. 이 연구에서는 원형 부력젤에서의 희석률은 흐름의 안정성에 크게 영향을 받는다는 결론을 이끌어냈고, 불안정 상태에서의 최소희석률에 관한 식을 차원해석법과 실험결과를 이용하여 제시하였다.

정지수체에서의 평면젤에 관한 연구는 Chen과 Rodi(1980)에 의해 수행되었다. 그들은 젤영역, 천이영역, 그리고 부력류영역으로 나누어 중심선 희석률공식을 제안한 바 있다. Andreopoulos 등(1986)은 천해에서 연속으로 방류된 평면젤 실험을 수행하여 Chen과 Rodi의 중심선 희석률공식을 검증하였다. Cheng 등(1992)은 주변류가 있는 조건에서 병합되는 부력류에 대한 실험적 연구를 하였다. 그들은 실험을 통해 다공확산관에서 방류되는 젤이 단일확산관에 의

해 방류된 젤에 비해서 더 느리게 수표면에 도달함을 보여주었다. 그리고 병합(merging)이 일어난 지점 이후부터라 하더라도 젤의 거동이 3차원적인 특성을 많이 보이므로 등평면확산관으로 가정된 2차원 부력젤 해석 방법이 다소 부적당하다고 주장하였다. Mendez-Diaz와 Jirka(1996)는 심해에 설치된 일방향확산관에 대한 연구에서 주변수가 젤의 거동에 미치는 영향 및 근역에서의 3차원적 특성을 분석하였다. 그들은 방류구들의 높이 및 간격을 포함한 기하학적인 특성들이 개별 젤들의 병합거리와 젤이 바닥면에 포착되는 현상에 미치는 영향을 규명하였다.

본 연구에서는 정지수체에서 다공확산관을 통해 연속적으로 방류된 젤의 거동에 관해 실험적으로 규명하고자 한다. 본 연구에서는 다중젤의 병합과정 및 흐름의 안정성에 따른 수온구조 특성을 분석하고, 나아가서 다중젤의 수표면 최소희석률의 특성에 대해 살펴보고자 한다.

2. 이론적 연구

다공확산관을 통하여 해양으로 방류된 온수젤의 근역희석률에 영향을 미치는 주요인자는 온수젤의 방류 특성, 주변류의 특성, 그리고 확산관 및 방류구의 특성으로 분류된다. 온수젤의 특성에는 온수의 방류유속, 운동량흐름률, 부력흐름률 등이 포함되고, 밀도성층화가 존재하지 않는 수역에서의 주변류의 특성으로는 주변수의 유속과 수심이 중요하며, 확산관 및 방류구의 특성으로는 확산관의 길이, 방류구의 직경, 확산관축과 주변수 흐름방향과의 각도, 방류구와 확산관축과의 각도, 방류구가 해지면과 이루는 각도 등이 포함된다(Fig. 1 참조).

수표면 최소희석률(S_m)은 다음과 같이 정의된다.

$$S_m = \frac{\Delta T_0}{\Delta T_m} = \frac{T_0 - T_a}{T_m - T_a} \quad (1)$$

여기서, T_m 은 수표면에서 측정된 최고수온이고, T_0 는 방류구에서 방류되는 온수의 수온이며, T_a 는 주변수의 수온이다. 일반적으로 다공확산관에서 방류되는 온수젤의 수표면 최소희석률을 관련된 인자로서 나타내면 다음과 같다.

$$S_m = f(U_0, g_0', u_a, H_e, L_D, n, D, l, \gamma, \beta, \theta_0) \quad (2)$$

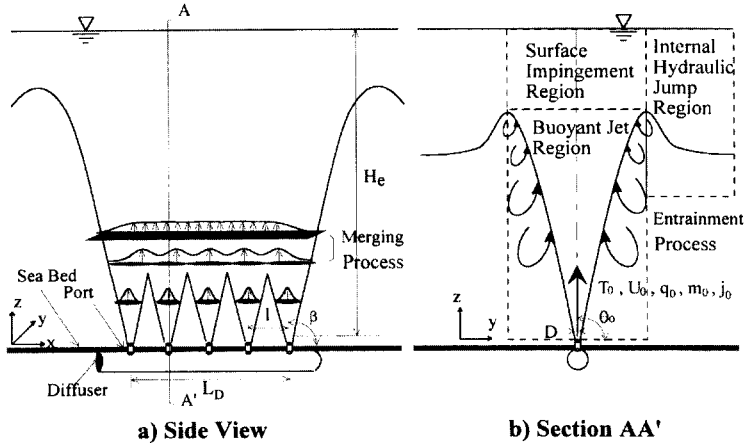


Fig. 1. Definition Sketch of Vertical Multijet

여기서, U_0 는 온수의 방류유속, g_0' ($=g(\rho_a - \rho_0)/\rho_a$)은 변환중력가속도이며 ρ_a 는 주변수의 밀도, ρ_0 는 온수의 밀도이다. 그리고 u_a 는 주변류 유속, H_e 는 방류구로부터 수표면까지의 거리인 주변수의 유효수심, L_D 는 확산관의 길이, n 은 방류구의 개수, D 는 방류구의 직경, l 은 방류구간의 간격, γ 는 주변수 흐름방향과 확산관축이 이루는 각, β 는 확산관축과 방류구가 이루는 각이고, θ_0 는 방류구와 바다면이 이루는 각을 나타낸다.

온수젤이 여러 개의 방류구로부터 방류되는 경우, 초기방류지점에서 일정거리 떨어진 지점 이후에는 인접한 젤간의 병합이 발생하게 된다. 통상적으로 방류구간의 간격, l 의 4~5배 지점부터 병합이 시작되어 12배 지점에서 병합이 완료된다고 밝혀진 바 있다 (Cheng 등, 1992). 그래서 이 지점부터는 일련의 원형젤이 2차원의 평면젤의 형태로 변환되어 2차원적인 거동을 보이게 된다. 따라서 다공확산관을 등평면확산관(equivalent slot diffuser)의 형태로 해석하는 경우가 많다. 이 때 단위길이 당 동일한 체적흐름률과 운동량흐름률을 가지는 등평면확산관의 폭, B 는 다음과 같이 정의한다.

$$B = \frac{\pi D^2}{4L_D/n} = \frac{\pi D^2}{4l} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하면 2차원 평면젤에 해당하는 단위폭 당 유량 (q_0), 운동량흐름률 (m_0), 부력흐름률 (j_0), 그

리고 젤/부력류 특성길이(l_M)는 다음과 같이 정의된다.

$$q_0 = U_0 B \quad (4)$$

$$m_0 = U_0^2 B \quad (5)$$

$$j_0 = U_0 g_0' B \quad (6)$$

$$l_M = \frac{m_0}{j_0^{3/2}} \quad (7)$$

근역에서 혼합과정은 방류된 부력젤이 주변수를 포획하며 수표면으로 상승하고 수표면과 접촉한 이후 수표면을 따라 확장되는 과정을 포함한다. 근역혼합과정에서는 방류되는 온배수의 안정성이 희석률을 결정하는 중요한 요소이다. 불안정 흐름상태에서는 방류된 온배수와 혼합된 주변수가 다시 젤의 경계 내로 재유입하게 되어 희석률이 낮아지게 된다. Jirka(1982)는 정지수체에서 연직다중젤의 불안정 조건을 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{H}{l_M} = \frac{H/B}{F_s^{4/3}} < 1.84 \quad (8)$$

여기서, H 는 주변수의 수심이고 $F_s (= \frac{U_0}{\sqrt{g_0' B}})$ 는 다공확산관의 방류Froude수이다.

한편 식(4)~(7)을 이용하여 식 (2)를 정리하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$S_m = f_1(q_0, j_0, m_0, u_a, H_e, \gamma, \beta, \theta_0) \quad (9)$$

또한 정지수체에서 연직으로 방류된 경우($u_a=0, \beta=90^\circ, \theta_0=90^\circ$)에는 식 (9)가 다음과 같이 간략화 된다.

$$S_m = f_2(q_0, j_0, m_0, H_e) \quad (10)$$

식 (10)을 무차원화하면 다음과 같은 식이 도출된다.

$$\frac{S_m q_0 j_0^{1/3}}{m_0} = f_3\left(\frac{H_e}{l_M}\right) \quad (11)$$

본 연구에서는 다중젤의 회석을 특성을 젤영역, 천이영역, 그리고 부력류영역으로 분류하여, 각각의 영역에 대해 적합한 회석률공식을 유도하고자 하였다. 우선 방류운동량흐름률이 지배적인 경우($H_e/l_M \ll 1$)를 나타내는 젤영역에서는 방류부력흐름률을 무시할 수 있고 이 경우에 식 (11)은 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{S_m q_0 j_0^{1/3}}{m_0} = c_1 \left(\frac{H_e}{l_M}\right)^{1/2}, \quad H_e/l_M \ll 1 \quad (12)$$

젤영역에서 식 (12)의 우변의 지수값이 1/2를 갖는 이유는 이 식의 좌변과 우변을 기초항을 대입하여 전개하였을 때 방류부력흐름률, j_0 가 소거되도록 식의 형태를 결정하였기 때문이다. 위의 경우와는 반대로 방류부력흐름률이 지배적인 경우($H_e/l_M \gg 1$)를 나타내는 부력류영역에서는 방류운동량흐름률을 무시할 수 있으며 이 경우에 해당하는 식은 다음과 같다.

$$\frac{S_m q_0 j_0^{1/3}}{m_0} = c_3 \left(\frac{H_e}{l_M}\right)^1, \quad H_e/l_M \gg 1 \quad (13)$$

부력류영역에서 식 (13) 우변의 지수값이 1이 되는 이유는 이 식의 좌변과 우변을 기초항을 대입하여 전개하였을 때 방류운동량흐름률, m_0 가 소거되도록 식의 형태를 결정하였기 때문이다.

젤영역과 부력류영역 사이의 천이영역의 경우, 다음에 제시된 식 (14)와 같이 우변의 지수값이 젤영역의 지수값 0.5와 부력류영역의 지수값 1의 중간값인 0.75

의 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Chen과 Rodi, 1980).

$$\frac{S_m q_0 j_0^{1/3}}{m_0} = c_2 \left(\frac{H_e}{l_M}\right)^{3/4}, \quad a_1 < H_e/l_M < a_2 \quad (14)$$

식 (12)~(14)의 c_1, c_2, c_3 는 상수로서 다중젤의 확산실험을 통해 결정되는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 다공확산관에서 방류되는 온수젤의 거동에 관한 세부적인 실험을 통하여 이들 상수값이 평면확산관에서의 상수값과 차이가 있음을 밝히고자 하였다.

3. 다공확산관 실험

3.1 실험 시설 및 측정기기

다공확산관에 의한 온수젤의 확산실험은 길이 20m, 폭 4.9m, 높이 0.6m인 장방향의 3차원 수조에서 수행되었다(Fig. 2 참조). 본 수조에는 주변류의 흐름을 재현할 수 있는 유량공급장치와 수위를 조절할 수 있는 경사형수문이 장착되어 있으며, 수조의 측면은 젤의 확산 과정을 보다 용이하게 관찰, 촬영할 수 있도록 투명한 강화유리로 제작되었다.

확산관 모형은 현재 가동중인 발전소의 온수확산관 제원 및 온수방류조건을 분석하여 이들의 대표적인 특성을 재현하도록 제작되었다. 모형의 제원 및 실험 조건을 결정하기 위하여 수리모형이론 및 상사법칙이 일반적인 지침으로 적용되었다. 이렇게 해서 결정된 확산관모형은 전체길이가 120cm이고, 방류구의 개수는 31개로 방류구간의 간격은 4cm이고 방류구 입구의 내경은 1cm 혹은 0.43cm이다. 확산관은 내경 5.5cm의 강철관을 이용하여 제작하였다.

실험용 온수를 공급하는 온수공급장치는 정확한 온도의 온수를 공급할 수 있도록 하기 위하여 예열수조와 항온·정수두수조의 2부분으로 나누어 제작하였다. 예열수조는 약 800 l의 용량을 갖는 수조로서 여기서 물을 가열하여 펌프를 이용하여 항온·정수두수조로 온수를 공급한다. 항온·정수두수조는 정확한 온도와 일정한 수위를 유지하면서 확산관으로 온수를 공급한다. 공급되는 온수의 유량은 전자유량계를 이용하여 측정하였다.

수위는 표준 눈금자를 수조 상하류부에 설치하여 측정하였으며, 오차는 0.01cm이다. 실험구간에서의 수운을 측정하기 위하여 30개의 CC-Type 열전대

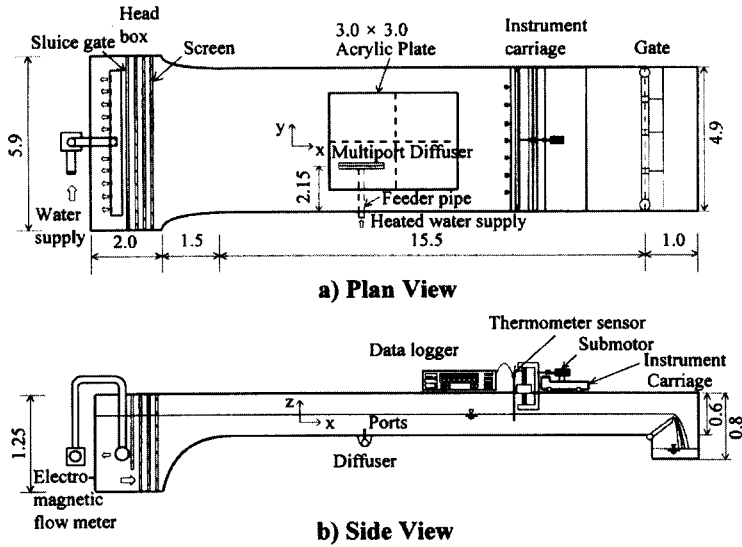


Fig. 2. Schematic Diagram of Laboratory Flume and Experimental Setup (unit: m)

(thermocouple) 온도감지자(직경 3.2mm; 길이 40 cm; 정확도 0.1°C)를 사용하였다. 온도감지자는 특별히 고안·제작된 감지자이송장치에 부착하여 수조의 상·하류방향과 수심방향으로 이동할 수 있도록 하였다. 온도감지자는 40개의 채널을 가진 데이터로거에 연결되어, 취득한 수온자료를 저장하고 실험이 완료된 후 디지털 데이터를 컴퓨터에서 직접 분석하였다.

3.2 실험조건

수온측정실험은 MJS100시리즈 경우 4가지, MJS200시리즈 경우 31가지로 총 35개의 경우에 대해 실험을 수행하였다. MJS200시리즈 경우는 다양한 수심과 방류조건에서의 수표면 최소회석률의 변화를 알아보기 위하여 수표면에서의 수온을 측정하였고, MJS100시리즈 경우는 최소회석률뿐만 아니라 다중셀의 병합현상까지 보기 위하여 수표면 뿐만 아니라 연직방향의 등온분포까지 측정하였다. MJS100시리즈 경우는 직경이 1cm인 5개의 방류구를 4cm간격으로 배열하였고, MJS200시리즈 경우는 직경이 0.43cm인 31개의 방류구를 4cm간격으로 배열하였다. 따라서 등평면확산폭, B는 MJS100시리즈 경우는 0.196cm, MJS200시리즈 경우는 0.036cm이다. 이러한 경우에 대한 실험조건은 Table 1에 제시한 바와 같다.

4. 실험결과 분석

4.1 수온 구조

실험결과로부터 밝혀진 다공확산관으로부터 방류되는 온수셀의 병합특성 및 과정을 Figs. 3~5에 도시하였다. Fig. 3은 MJS100시리즈의 경우 확산관을 따른 종단면(xz 평면)에서의 온수셀의 확산 거동을 촬영한 것이다. 이 경우는 $H/l_M \gg 1.84$ 인 경우로서 매우 안정된 흐름 형상을 보여준다. z/l 의 값이 3정도 지점에서부터 병합이 시작되어 5정도 지점에서는 병합이 완료되었음을 보여준다. 그리고 온수가 수표면에 도달한 이후에 수평방향으로 퍼져나가면서 두꺼운 온수층을 이루고 있다.

Fig. 4는 MJS100시리즈 경우의 xz 평면에서 3번째와 4번째 방류구 사이의 단면에서 측정된 등온분포를 나타낸 등온도도이다. 이 그림에서 등온값은 측정 지점의 수온에서 주변수의 수온을 뺀 값(ΔT)을 방류구에서 방류되는 온수와 주변수의 수온의 차이(ΔT_0)로 나눈 무차원화된 초과수온을 의미한다. 이 그림에서 $x/l = 0$ 은 3번째 방류구의 중심을 의미하고, $x/l = 1$ 은 4번째 방류구의 중심을 나타낸다. 여기서 MJS104를 도시한 Fig. 4d는 x/l 이 0에서부터 0.5까지만 실

Table 1. Experimental parameters

Experiment No.	H_e (cm)	H (cm)	U_0 (cm/sec)	q_0 (cm ² /sec)	m_0 (cm ³ /sec ²)	j_0 (cm ³ /sec ³)	F_s	ΔT_0 (°C)	H/l_M	S_m
MJS101	38.0	39.0	16.06	3.15	50.64	22.99	47.10	33.7	6.23	7.33
MJS102	38.0	39.0	25.57	5.02	128.4	36.40	13.40	33.0	3.34	7.73
MJS103	38.0	39.0	56.16	11.0	619.3	79.95	21.40	33.0	1.17	7.17
MJS104	38.0	39.0	97.84	19.2	1879	139.0	82.10	32.8	0.56	5.86
MJS201	19.3	23.0	239.2	8.97	2077	36.46	613.0	14.3	0.12	12.7
MJS202	21.9	25.6	202.1	7.58	1482	30.28	522.3	14.0	0.17	10.7
MJS203	24.3	28.0	184.6	6.92	1236	27.66	477.0	14.0	0.21	10.6
MJS204	24.6	28.3	138.1	5.18	692.7	19.54	367.5	13.2	0.30	11.1
MJS205	24.7	28.4	134.3	5.04	655.3	19.17	355.8	13.3	0.31	11.4
MJS206	25.5	29.2	94.29	3.54	322.7	13.69	247.6	13.5	0.52	9.93
MJS207	25.3	29.0	115.7	4.34	486.1	16.80	303.8	13.5	0.39	10.3
MJS208	25.8	29.5	98.16	3.68	349.8	13.30	266.7	12.6	0.47	12.6
MJS209	26.4	30.1	88.42	3.32	283.8	12.58	234.5	13.2	0.57	11.7
MJS210	26.8	30.5	80.19	3.01	233.4	11.41	212.7	13.2	0.66	10.3
MJS211	27.3	31.0	68.66	2.58	171.1	9.85	181.3	13.3	0.83	13.3
MJS212	27.3	31.0	60.82	2.28	134.3	8.73	160.6	13.3	0.98	11.4
MJS213	28.6	32.3	59.61	2.24	129.0	8.63	156.7	13.4	1.05	10.6
MJS214	29.4	33.1	57.01	2.14	118.0	8.32	149.3	13.5	1.15	11.4
MJS215	30.0	33.7	53.19	2.00	102.7	6.76	149.2	11.9	1.17	19.8
MJS216	30.6	34.3	51.92	1.95	97.87	6.49	146.9	11.6	1.22	15.2
MJS217	30.80	34.5	71.27	2.67	184.3	9.30	197.3	12.2	0.83	12.4
MJS218	31.6	35.3	61.74	2.32	138.3	8.47	166.7	12.8	1.06	19.3
MJS219	32.4	36.1	55.26	2.07	110.8	7.49	150.1	12.6	1.25	14.3
MJS220	33.3	37.0	45.72	1.72	75.90	6.12	125.0	12.4	1.63	16.3
MJS221	33.4	37.1	40.77	1.53	60.34	5.49	111.1	12.5	1.91	13.3
MJS222	34.1	37.8	35.35	1.33	45.37	4.70	96.97	12.4	2.34	16.7
MJS223	34.3	38.0	25.82	0.97	24.19	3.53	69.84	12.7	3.64	19.8
MJS224	35.6	39.3	19.39	0.73	13.64	2.59	53.10	12.4	5.43	18.7
MJS225	35.9	39.6	16.66	0.62	10.08	2.24	45.42	12.5	6.73	24.0
MJS226	36.1	39.8	14.25	0.53	7.37	1.88	39.20	12.3	8.24	24.6
MJS227	36.8	40.5	13.13	0.49	6.26	1.73	36.12	12.3	9.35	30.7
MJS228	37.1	40.8	11.11	0.42	4.48	1.48	30.42	12.4	11.84	32.6
MJS229	38.0	41.7	9.78	0.37	3.48	1.27	27.19	12.1	14.06	37.8
MJS230	39.3	43.0	6.72	0.25	1.64	0.90	18.31	12.6	24.57	48.4
MJS231	39.9	43.6	4.38	0.16	0.70	0.61	11.75	12.9	45.00	64.5

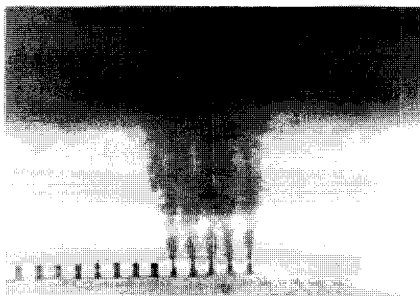


Fig. 3. Merging Behavior of Vertical Multijet (xz Plane)

협자료를 취득하고 이후 구간은 대칭이라고 가정하여 도시한 것이다. 앞에서 제시했던 Jirka(1982)의 안정 조건(식 (8))에 의하면 MJS101과 MJS102는 안정한 흐름을 형성하는 경우 ($H/l_M > 1.84$)이고 MJS103과 MJS104는 불안정한 흐름을 형성하는 경우 ($H/l_M < 1.84$)이다. 그림에서도 잘 나타나듯이 안정한 흐름을 형성하는 MJS101과 MJS102는 z/l 이 약 3인 지점부터 병합이 시작되어 그 이후에는 평면부력셀의 등온분포에 서서히 가까워짐을 알 수 있다. 대략 z/l 이 5 이상인 지점부터는 x 방향으로의 초과

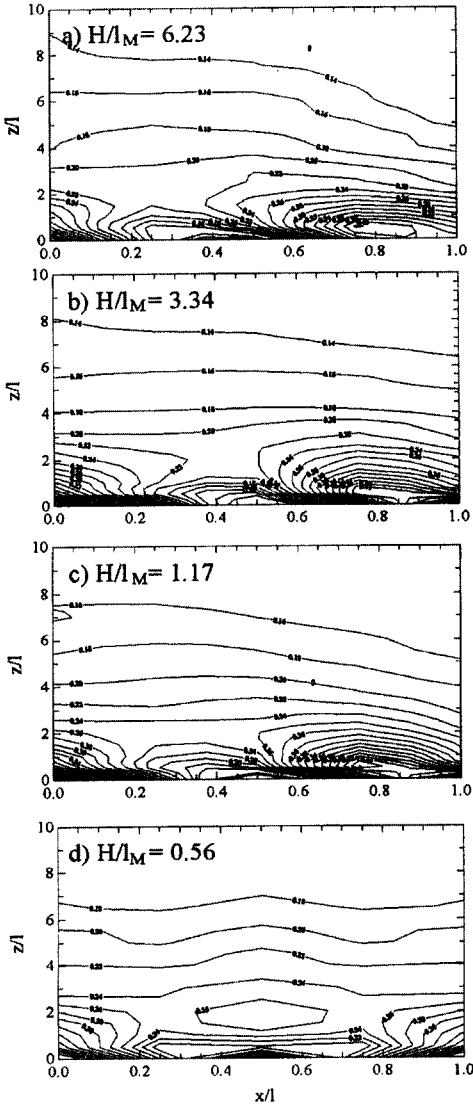


Fig. 4. Dimensionless Temperature Distribution in xz Plane (MJS100 Series)

수온의 변화가 일어나지 않고 거의 일정한 분포를 보여 병합이 완료되었음을 알 수 있다. 한편 불안정한 흐름을 형성하는 MJS103과 MJS104는 z/l 이 3보다 작은 지점부터 병합이 시작됨을 알 수 있는데 이는 불안정 흐름상태에서는 방류된 온배수와 혼합된 주변수가 다시 켈의 경계 내로 재유입되어 연직혼합이 증대되기 때문이라고 사료된다. 그 이후에는 안정흐름의 경

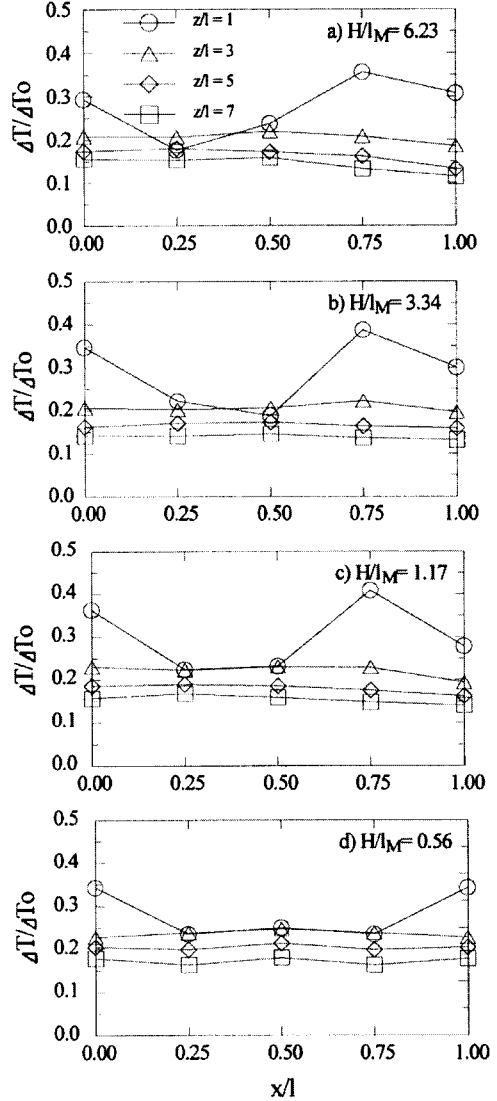


Fig. 5. Dimensionless Temperature Distribution in xz Plane (MJS100 Series)

우와 마찬가지로 평면부력켈의 등온분포에 서서히 가까워져 대략 z/l 이 5 이상인 지점부터는 x 방향으로의 초과수온의 변화가 일어나지 않고 거의 일정한 분포를 보여 병합이 완료되었음을 알 수 있다.

Fig. 5는 z/l 이 1, 3, 5, 7인 지점에서 x 방향으로의 등온분포를 도시한 것이다. z/l 이 1인 지점에서는 아직 병합이 일어나지 않아 x 방향으로의 초과수온변

화가 뚜렷하게 보임을 알 수 있다. z/l 이 3 이상인 지점부터 병합이 시작되어 z/l 이 5인 지점 이후부터는 거의 x 방향으로의 초과수온변화가 보이지 않아 병합이 완료되어 평면젤의 성질을 띠게 됨을 알 수 있다.

흐름의 안정성에 따른 수온구조를 규명하기 위하여 온수젤의 수온구조중 yz 평면 자료를 분석하였다. Fig. 6은 MJS100시리즈 경우의 3번째 방류구의 중심에서 횡방향(y)으로 측정된 수온구조(yz 평면)를 도시한 것이다. 이 그림에서 등온분포가 온수젤의 중심선을 기준으로 Gaussian분포를 나타냄을 알 수 있고 온수부력류가 수표면에 도달되어 어느 정도 진행한 뒤에는 온수가 일정 두께의 층을 이루는 성층화 현상이 일

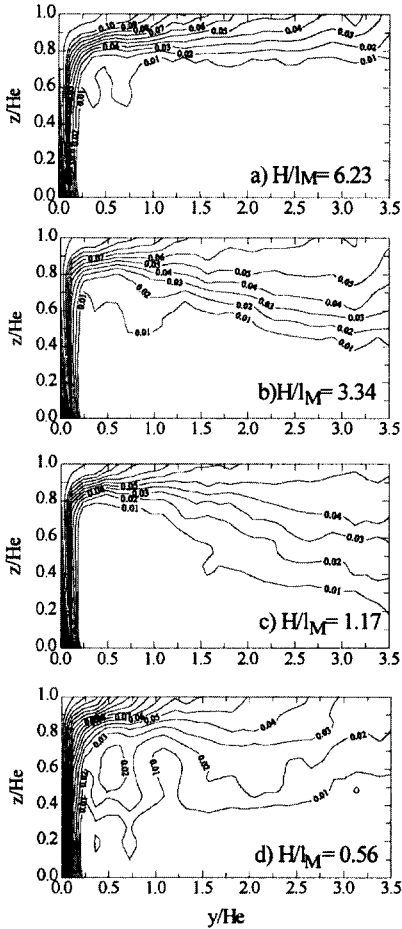


Fig. 6. Dimensionless Temperature Distribution for MJS100 Series in yz Plane

어남을 알 수 있다. 안정한 흐름을 형성하는 MJS101과 MJS102의 경우(Fig. 6a와 Fig. 6b) 수표면 접촉영역을 지나 온수 부력류의 단면이 급격히 증대되는 내부도수영역이 발달하지 않고 있으나 불안정한 흐름을 형성하는 MJS103과 MJS104의 경우(Fig. 6c와 Fig. 6d) 큰 방류운동량에 의해 내부도수영역이 나타나 온수부력류의 두께가 증가함을 알 수 있다. 특히 방류운동량이 가장 큰 경우인 MJS104의 경우(Fig. 4d) 방류된 온배수와 혼합된 주변수가 다시 의 계적 내로 재유입되는 불안정한 흐름 양상을 잘 보여주고 있다.

4.2 수표면 최소희석률

Fig. 7에 무차원화된 희석률과 무차원 수심과의 관계를 도시하였다. 이 그림에서 무차원 희석률이 젤영역, 천이영역, 그리고 부력류영역으로 나누어 서로 다른 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 전 절에서 유도한 이론식, 식 (12)~(14)를 실험자료와 비교하여 회귀 분석한 결과는 다음과 같다.

$$\frac{S_m q_0 j_0^{1/3}}{m_0} = 0.44 \left(\frac{H_e}{l_M} \right)^{1/2}, \quad H_e/l_M < 0.5 \quad (15)$$

$$\frac{S_m q_0 j_0^{1/3}}{m_0} = 0.46 \left(\frac{H_e}{l_M} \right)^{3/4}, \quad 0.5 < H_e/l_M < 5 \quad (16)$$

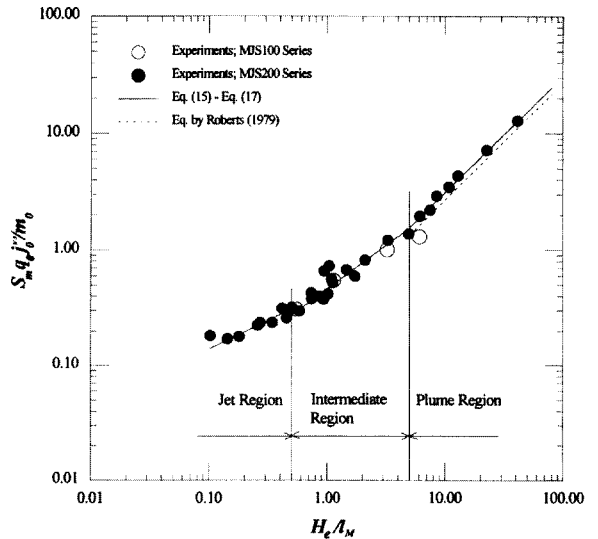


Fig. 7. Surface Minimum Dilution in Each Region

$$\frac{S_m q_0 J_0^{1/3}}{m_0} = 0.31 \left(\frac{H_e}{l_m} \right)^1, \quad H_e/l_m < 5 \quad (17)$$

Roberts(1979)는 평면부력류 실험에서 부력류영역에서 정지수체인 경우와 주변류가 미약한 경우에 c_3 는 본 연구의 결과인 0.31에 비해 작은 값인 0.27이라고 제시한 바 있다. 본 실험의 결과가 Roberts에 의한 평면 부력류실험의 경우보다 회석률이 크게 나타난 이유는 다공확산관에서 방류된 개별 젤들이 병합이 발생하기 전의 영역에서 3차원적인 혼합과정을 가지기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 앞서서도 살펴보았듯이 병합이 완료되는 지점은 z/l 이 약 5이상인 지점인데 그 이전 구간에서는 각 방류구에서 방류되는 개별 젤의 특성들에 의하여 주변수를 포획(entrain)하는 단일 부력젤의 성질을 갖게 된다. 또한 다공확산관의 경우 병합 이전에는 개별 젤의 유입접촉면적이 2차원 평면젤에 비해 더 크기 때문에 높은 회석효과가 나타난다고 사료된다. 통상적으로 다공확산관의 최소회석률을 예측할 때 이러한 3차원적인 특성을 갖는 구간에서의 회석 거동을 무시하고 평면확산관의 회석률 공식을 방류구에서부터 적용하여 왔다. 그러나 병합이 일어난 지점에서부터 가까운 영역의 최소회석률을 모의할 경우에는 병합이전의 3차원적인 혼합거동이 병합이후의 혼합과정에도 영향을 미치므로 방류구에서부터 평면젤의 거동으로 가정하는 등평면확산관의 개념은 오차를 유발시키게 된다. 따라서 다공확산관의 거동 특성의 해석시 등평면확산관의 개념을 도입하여 해석하더라도 평면확산관의 결과를 그대로 사용해서는 안되고 다공확산관 실험을 통해 별도의 상수값들을 도출하여야 한다고 사료된다. 다만 병합지점으로부터 거리가 멀어질수록 2차원적인 거동에 점점 가까워지므로 이러한 경우에는 기존의 가정을 그대로 적용할 수 있다고 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 다공확산관에 의해 정지수체로 방류된 연직젤의 회석 특성에 대해 살펴보았다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

우선 다공확산관에서는 흐름의 안정조건에 따라 다소 차이가 있기는 하지만 z/l 가 약 3인 지점부터 병합이 시작되어 그 이후에는 평면부력젤의 등운분포에서 서서히 가까워짐을 알 수 있다. z/l 이 5 이상인 지

점부터는 x 방향으로의 수운의 변화가 일어나지 않고 거의 일정한 분포를 보여 병합이 완료되어 평면젤의 성질을 띠게 됨을 알 수 있다.

다공확산관의 수표면 최소회석률은 평면확산관의 회석률보다 더 높은 것으로 밝혀졌다. 다공확산관의 경우 병합 이전에는 개별 젤의 경계 내로 주변수의 포획이 발생하기 때문에 평면확산관에 비해 더 높은 회석효과가 나타난다. 따라서 다공확산관의 거동 특성의 해석시 등평면확산관의 개념을 도입하여 해석하더라도 평면확산관의 결과를 그대로 사용해서는 안되고 다공확산관 실험을 통해 별도의 상수값들을 도출하여야 한다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사 및 (주)대우건설의 지원에 의해 수행되었으며 지원에 감사드립니다. 본 연구의 실험 자료 취득에 많은 도움을 준 서울대학교 대학원 토목공학과에 재학중인 이현석 군에게 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

- 서일원, 김홍식, 김대근 (1997). "수중다공확산관에 의해 방류된 운수의 혼합에 관한 실험적 연구." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제17권, 제II-4호, pp. 335-346.
- Andreopoulos, J., Praturi, A., and Rodi, W. (1986). "Experiments on vertical plane buoyant jets in shallow water." *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 168, pp. 305-336.
- Chen, C.J., and Rodi, W. (1980). *Vertical turbulent buoyant jets - A review of experimental data*. HMT series, vol. 4, Pergamon.
- Cheng, C.W., Wood, I.R., and Davidson, M.J. (1992). "Merging buoyant discharges in an ambient current." *J. of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 30, No. 3, pp 361-372.
- Jirka, G.H. and Harleman, D. R. F. (1979). "Stability and mixing of a vertical plane buoyant jet in confined depth." *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 94, No. 2, pp. 275-304.
- Jirka, G.H. (1982). "Multiport diffuser for heat disposal: A summary." *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 108, No. HY12, pp.

- 1423-1467.
- Lee, J.H.W., and Jirka, G.H. (1981). "Vertical round buoyant jet in shallow water." *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 107, No. HY12, pp. 1651-1675.
- Miller, D.S., and Brighthouse, B.A. (1984). *Thermal discharges: A guide to power plant cooling water discharges into rivers, lakes and seas*. British Hydromechanics Research Association.
- Mendez-Diaz, D.M., and Jirka, G.H. (1996). "Buoyant plumes from multiport diffuser discharge in deep coflowing diffuser." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 8. pp. 428-435.
- Roberts, P.J.W. (1979). "Line plume and ocean outfall dispersion." *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 105, No. HY4, pp. 313-331.
- (논문번호:98-072/접수:1998.11.17/심사완료:1999.02.26)