

흐름수역에서 젤 흐름의 연안귀환

Shore Attachment of Jet in Flowing Environment

윤태훈* · 육운수** · 한운우***

Yoon, Tae Hoon · Yook, Woon Soo · Han, Woon Woo

Abstract

The shore attachment of jet in a cross flow is analysed by experiments and dimensional analysis. The jet flow is discharged with the same depth as that of the cross flow through a side channel perpendicular to the cross flow through a side channel perpendicular to the cross flow. For a momentum jet, nondimensional attachment length and height are dependent on nondimensional characteristic length l_m/W . For a buoyant jet, nondimensional attachment length is affected by $l_b/l_{m,d}$ and nondimensional temperature distribution is a function of x/l_b and they all can be predicted as power laws. The shore attachment condition can be specified by velocity ratio R .

요 지

가로흐름에 같은 수심으로 그리고 직각으로 방류되는 젤흐름의 귀환현상이 차원해석과 수리실험을 통하여 해석된다. 운동량젤의 경우 무차원귀환거리 L/l_m 와 두께 H/l_m 는 운동량특성길이와 방류구폭의 비 l_m/W , 부력젤의 경우 무차원귀환거리 L/l_b 는 부력특성길이와 운동량길특성의 비 $l_b/l_{m,d}$, 무차원온도분포 Γ_m 은 무차원흐름방향거리 x/l_b 의 영향을 받으며 이들은 모두 멱법칙으로 예측될 수 있다. 귀환의 발생여부는 속도비 R 에 좌우되며 본 연구에서는 $R > 4.0$ 때 귀환이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

1. 서 론

공장의 폐수, 가정하수 및 발전소의 냉각수와 같은 오염물은 간단한 처리를 거쳐 대부분 운동량과 부력을 갖는 부력젤(buoyant jet)형태로 자연수역으로 방류된다. 방류된 오염물은 방류구로부터 멀리 이송 그리고 혼합과 확산을 통하여 유입수역에서 자정된다. 가로흐름에 방류되는 부력젤의 거동은 부력젤의

유입운동량과 주변수역의 흐름(가로흐름)의 영향에 의하여 방류구 하류에서 가로흐름방향으로 젤흐름 경로의 변화가 발생하며, 젤흐름 특성에 따라 방류구의 하류 해안 또는 하안에 되돌아 오는 귀환(attachment)현상이 발생함으로써 이송확산이 효과적이지 못하게 되어 사수역(dead zone)이 형성되고 이 영역내에서는 해안 및 하안의 오염을 가중시킨다.

따라서 이와 같은 오수나 냉각수의 방류로 인한 해안 및 하안오염을 최소화하기 위해서는 가로흐름수역에서 젤의 거동에 따른 귀환의 동수역학적 특성을 파악하여야 한다. 가로흐름수역에서 부력젤의 거동

* 정희원 · 한양대학교 토목공학과 교수
 ** 정희원 · 광동대학교 토목공학과 부교수
 *** 정희원 · 대전대학교 환경공학과 조교수

에 관한 연구는 젤중심선경로와 회석, 방류구 근처에서의 유입 등 젤흐름특성에 관한 연구가 대부분이며^(1,7~12) 귀환에 관한 국내연구는 없는 실정이고 외국에서는 귀환 자체의 연구는 있으나 귀환의 제거에 관한 연구는 드문 실정이다.^{2,3,5)}

부력젤의 방류형태는 초기 혼합효과를 증대하기 위하여 여러 개의 방류구를 갖는 다중방류구(multi-diffuser)를 해저에 방류하는 방법을 많이 사용하나 해안 또는 하안으로 방류되는 부력젤은 수용수역과 수심이 같게 전수심으로 해안 또는 하안의 측면에서 측면수로(side channel)를 통해 방류된다.

본 연구에서는 유입유체의 수심과 주변수역의 수심은 같아서 전수심으로 유입되는 경우에 대한 것으로서 측면수로로부터 가로흐름(crossflow)수역에 직각으로 유입되는 부력젤의 거동에 따른 귀환현상 등 수리학적 특성을 차원해석과 수리실험을 통하여 해석한다.

2. 차원해석

그림 1과 같이 수용수역의 밀도가 ρ_a 로 일정한 가로흐름 수역에 방류되는 부력젤의 거동에 영향을 주는 물리변수들중 귀환거리 L , 귀환두께 H (그림 3)와 국부밀도에 대한 부력항($\rho_a - \rho$) g 를 종속변수로 하고 나머지 물리변수들을 독립변수로 고려하면 이들 물리변수들 간의 관계는 다음과 같은 함수식으로 나타낼 수 있다.

$$H, L, \Delta\rho g = f_1(Q_o, M_o, B_o, U_a, \Delta\rho_o, W, x, y, z, \quad (1)$$

여기서 Q_o 는 유입유체 흐름률($Q_o = h_o b_o U_o$), M_o 는

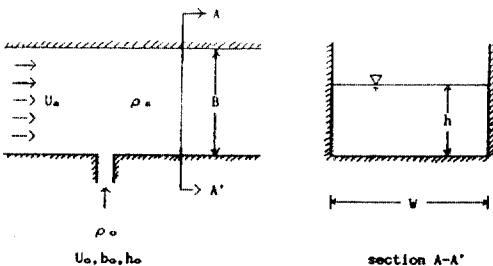


그림 1. 흐름영역

운동량흐름률($M_o = Q_o U_o$), U_o 는 유체의 유입속도, b_o 는 유입구의 폭, h_o 는 유입수심, U_a 는 가로흐름 속도, h 는 수용수역의 수심, B_o 는 유입유체의 부력 흐름률($B_o = g\Delta\rho_o Q_o = g'Q_o$), $\Delta\rho_o$ 는 $\Delta\rho_o = \rho_a - \rho_o$, $\Delta\rho$ 는 $\Delta\rho = \rho_a - \rho$ 이며 ρ_o 는 유입유체의 밀도, ρ_a 는 수용수역의 밀도, ρ 는 국부밀도, g 는 중력가속도, g' 는 변환중력가속도($g' = g\Delta\rho_o$), W 는 수로의 폭, x, y, z 는 각각 흐름방향, 횡방향 및 수심방향의 좌표이다.

식 (1)을 Buckingham π 정리를 이용한 차원해석을 수행하면 부력젤에 대한 무차원 물리변수식을 획득할 수 있다.

본 연구에서는 식 (1)에 대한 차원해석을 수행함에 있어 첫째, 젤흐름에 미치는 부력의 영향이 운동량에 비해 무시할 정도로 작은 운동량젤(momentum jet)의 경우와 둘째, 젤흐름이 부력과 운동량을 영향을 모두 받는 부력젤(buoyant jet)의 경우에 대하여 수행한다.

2.1 운동량젤(momentum jet)

운동량젤은 유입흐름의 밀도(또는 온도)와 수용수역의 밀도 차이가 작거나 없으므로 부력의 영향을 무시할 수 있고 귀환거리와 두께는 각각 흐름방향 및 횡방향 거리를 나타내며 해석의 편의를 위하여 유입흐름률 Q_o 를 수용수역의 수심 $h(=h_o)$ 로 대치하면서(본 연구에서는 유입수심과 수용수역의 수심이 동일함) 식 (1)에 대한 차원해석 결과는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H, L = f_2(M_o/hU_a^2, W) \quad (2)$$

여기서 $l_m = l_m = M_o/hU_a^2$ 로 정의되는 운동량특성 길이(momentum length scale)로서 운동량젤의 횡방향 유입속도가 가로흐름의 속도 정도로 감소되는 곳까지의 횡방향거리이다.^(2,4,12) 식 (2)를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H/l_m, L/l_m = f_3(l_m/W) \quad (3)$$

식 (3)은 운동량젤에 있어서 무차원귀환거리 L/l_m 과 무차원귀환두께 H/l_m 에 대한 함수식이다.

2.2 부력젤(buoyant jet)

부력젤의 경우는 운동량과 부력을 모두 가진 흐

를이므로 부력젤의 귀환거리와 두께에 대한 함수식 식 (1)에 대해 차원해석을 수행하면 다음과 같다.

$$H, L = f_4(M_0/hU_a^2, B_0/U_a^3, W) = f_5(l_m, l_b, W) \quad (4)$$

여기서 l_b 는 $l_b = B_0/U_a^3$ 로 정의되는 부력특성길이(buoyancy length scale)로서 부력젤의 횡방향 유입 속도가 가로흐름의 속도 정도로 감소되는 곳까지의 횡방향거리이다.^{24,12)} 식 (4)를 운동량특성길이 l_m 에 대해 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H/l_m, L/l_m = f_6(l_m/W, l_b/l_m) \quad (5)$$

식 (5)는 부력젤에 있어서 무차원귀환거리 L/l_m 과 무차원귀환두께 H/l_m 에 대한 함수식이다.

국부밀도에 대한 부력항 $\Delta\rho g$ 의 함수식, 식 (1)에 대해 차원해석을 수행하면 다음과 같다.

$$\Delta\rho/\Delta\rho_0 = f_7(U_0U_a^{3/2}/g'Q_0, WU_a^3/B_0, xU_a^3/B_0, yU_a^3/B_0, zU_a^3/B_0) = F_8(F_0, F R^{1/2}, W/l_b, x/l_b, y/l_b, z/l_b) \quad (6)$$

여기서 F_0 는 $F_0 = U_0/(g'h)^{1/2}$ 로 정의되는 유입밀도 후르드수(inflow densimetric Froude number), F 는 $F = U_a/(gh)^{1/2}$ 라 정의되는 후르드수(Froude number)이고^(1,2,6) 속도비 R 는 유입유체의 속도와 가로흐름의 속도의 비($R = U_0/U_a$)이다.

무차원밀도차이 $\Delta\rho/\Delta\rho_0$ 는 희석 S 로 정의되며⁽⁹⁾ 이는 무차원온도차이 $\Gamma = (T - T_a)/(T_0 - T_a)$ 의 함수로 나타낼 수 있으므로 식 (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma = (T - T_a)/(T_0 - T_a) = f_9(F_0, F R^{1/2}, W/l_b, x/l_b, y/l_b, z/l_b) \quad (7)$$

여기서 T_0 는 유입유체의 온도, T_a 는 주변수역의 온도, T 는 국부온도이며 식 (7)은 부력젤에 있어서 무차원온도차이 Γ 에 대한 함수식이다.

흐름방향의 각 흐름단면에서 무차원평균온도차이 Γ_m (4.3절 참조)는 횡방향거리와 연직방향거리의 항은 무시되므로 식 (7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

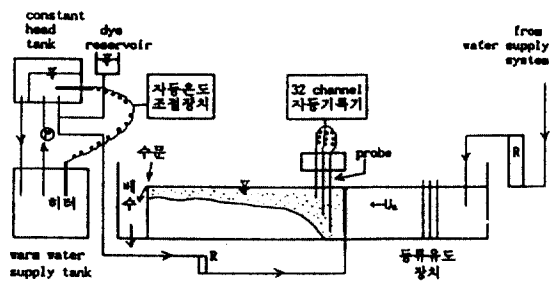
$$\Gamma_m = (T_m - T_a)/(T_0 - T_a) = f_{10}(F_0, F R^{1/2}, x/l_b) \quad (8)$$

3. 실험장치 및 방법

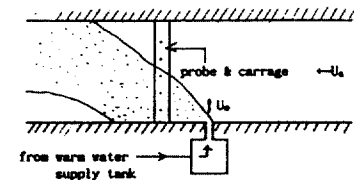
실험은 길이 500cm, 깊이 20cm, 폭 60cm의 수로에서 수행되었으며 그림 2와 같다. 수로의 하류에는 수문을 설치하여 수위조절을 용이하게 하였으며 가로흐름의 유량은 0-30m³/h(500LPM)의 범위인 로토미터를, 젤유량은 0-10LPM 범위의 로토미터를 이용하여 측정하였고 가로흐름의 유속은 측정된 유량-단면의 비 및 표면유속을 통하여 획득하였고 젤방류속도는 측정된 유량과 단면의 비로 획득하였다.

본 연구에서는 수용수역보다 높은 온도의 물을 방류함으로써 부력젤을 발생시켰으며 육안관찰과 사진촬영을 용이하게 하기 위하여 색소를 주입하였다. 일정한 온도의 부력젤을 방류시키기 위하여 상, 하부 두 개의 물탱크에 1.5kw 히터를 각각 설치하여 자동온도조절장치에 연결하였고 상, 하부의 탱크의 물은 순환펌프를 연결하여 순환시킴으로써 상, 하부 탱크내의 물의 온도를 일정하게 유지하도록 하였다.

온도측정은 횡방향(y방향)으로 2cm 간격으로 설치된 지름 3mm의 PT형 온도계(thermistor) 10개를 한 단면에서 연직방향으로 1-2cm 간격으로 측정하여 도계(thermistor) 10 개를 한 단면에서 연직방향으로 1-2cm 간격으로 측정하여 흐름방향 여러



(a) 정면도



(b) 평면도

그림 2. 실험장치

단면과 전 수로폭에 걸쳐 온도를 측정하였다. 각 온도계는 32 channel data Logger에 연결시켜 측정된 온도를 기록하게 하였으며 온도의 기록에 사용된 시간상수(time constant)는 30초를 기준으로 한지점에서 3-5회 기록함으로써 온도변이에 대한 정확도를 기하였다.

본 연구에서 주변수역과 유입유체와의 온도차이 ΔT 는 0-20°C 이고, 유입특성(운동량, 부력)을 변화

표 1. 실험 조건과 범위

유입유체 유량, Q_0	3~LPM	유입유체 온도	15~35°C
가로흐름 유량, Q_a	3~8m ³ /h	수용수역 온도	8~20°C
	50~133LPM	수로폭	60cm
수용수역 수심	9.5cm	돌출길이	0cm
유입유체 수심	9.5cm	유입수로 폭	1.0cm

표 2. 실험제원

EX.NO.	Q_0 [m ³ /h]	Q_a [LPM]	U_a [cm/sec]	U_o [cm/sec]	T_a [°C]	T_o [°C]	Fre
1	5	4	2.41	7.33	19.1	25.2	6.34
3	5	3	2.41	8.04	19.7	21.8	9.2
4	6	5	2.89	9.16	17.3	23.7	2.53
5	5	6	2.89	10.99	13.1	19.2	3.73
6	4	4	1.93	7.33	13.7	24	1.78
7	4	5	1.93	9.16	10.6	27.8	1.65
8	4	4	1.93	7.33	11	29	1.17
9	4	4	1.93	7.33	11	25.2	1.53
10	4	3	1.93	6.04	10.5	25.9	1.08
11	4	5	1.93	9.18	11	26	1.82
13	5	4	2.41	7.33	11	25	1.34
14	4	4	1.93	7.33	10.2	20.8	1.88
15	4	5	1.93	9.16	10	22	2.21
16	5	4	2.41	7.33	11	27.7	1.36

시키면서 여러 방류조건에 대해 실험을 수행하였다. 실험조건과 제원은 표 1,2와 같다.

실험자료의 보안을 위하여 육안관찰과 사진촬영을 수행하였으며 귀환거리 L, 두께 H 및 귀환의 발생 여부는 온도분포와 사진 및 육안관찰을 통하여 획득된다.

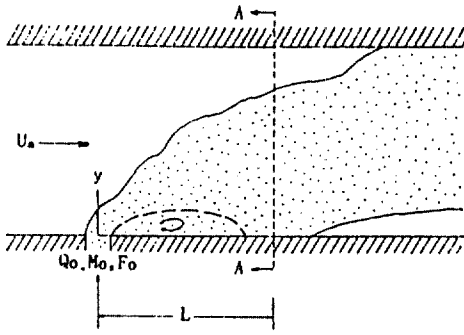
4. 결과 및 분석

4.1 흐름방향

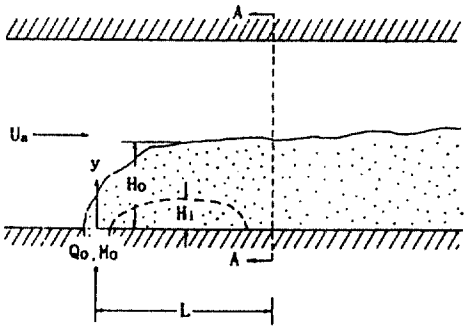
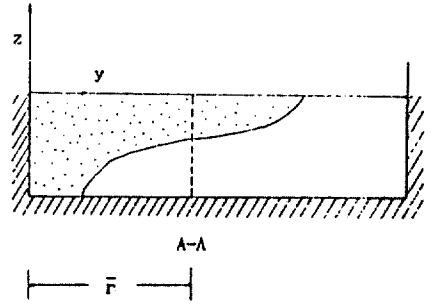
그림 3은 운동량젤과 부력젤의 흐름양상을 나타낸 것으로서 부력젤과 운동량젤은 각각 그 흐름양상이

다르다. 운동량젤은 젤과 주변유체의 온도차이가 거의 없어 부력이 무시되므로 젤 흐름은 운동량에 의해서만 지배받으며 젤 흐름은 벽면을 따라서 계속 이동하여 젤의 흐름단면은 거의 일정하다(그림 3-b). 부력젤은 젤 흐름이 운동량과 부력의 영향을 모두 받는 경우로서 젤 흐름은 벽면을 따라서 이동하다가 일정지점에 이르러서는 벽면에서 이탈하는 현상이 발생하고 젤 흐름은 부력에 의해 상승하므로 젤 흐름 단면의 형상이 달라지게 된다(그림 3-a).

그림 4는 $F_0=1.88$, 유입부력흐름률 $B_0=111.6\text{cm}^4/\text{sec}^3$, 속도비 $R=3.80$ 일 때 바닥으로부터 9cm 지점 ($z=9$, 즉 수면하 0.5cm 지점)에서 x-y 방향의 온도분포를 나타낸 실험결과로서 그림 (3-a)의 흐름



(a) Buoyant jet



(b) Nonbuoyant Jet

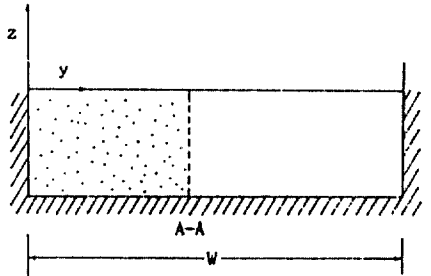


그림 3. 흐름양상

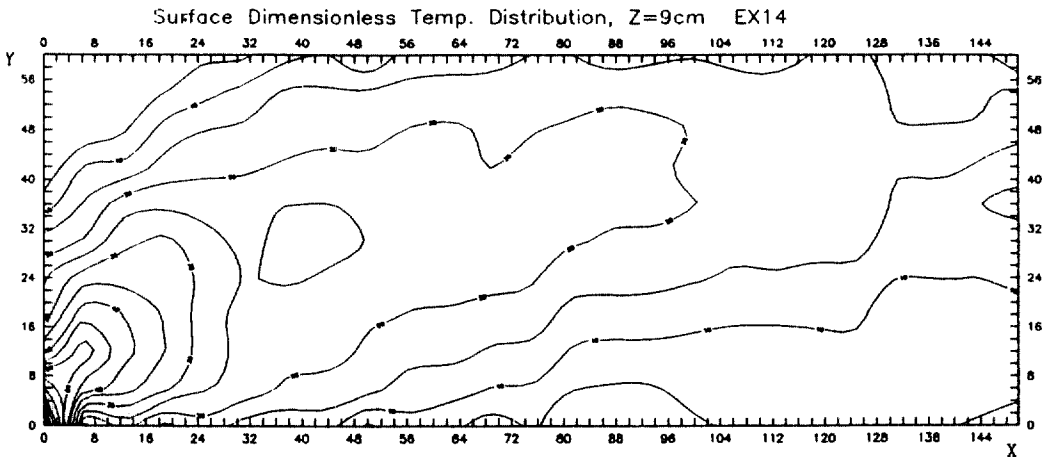


그림 4. $F_0=1.88$ 때 $z=9\text{cm}$ 에서 무차원온도차이 $\Gamma [= (T-T_s)/(T_0-T_s)]$

을 나타낸다. 그림 4에서 굵은 선으로 표시된 선이 쉘의 경계이다. 쉘의 경계는 유입구에서의 무차원 온도차이 Γ_0 의 10%로 정의하였다.⁽⁶⁾ 여기서 Γ_0 는 100%이다.

그림 5는 $F_0=1.88$, $B_0=111.6\text{cm}^4/\text{sec}^3$, $R=3.80$ 일 때 $x=0.2, 7, 15, 30, 50\text{cm}$ 지점에서 각 단면의 무차원온도차이 Γ 를 나타낸 실험결과로서 흐름방향에 따른 쉘흐름단면의 변화를 나타낸다. 여기서 Γ 는

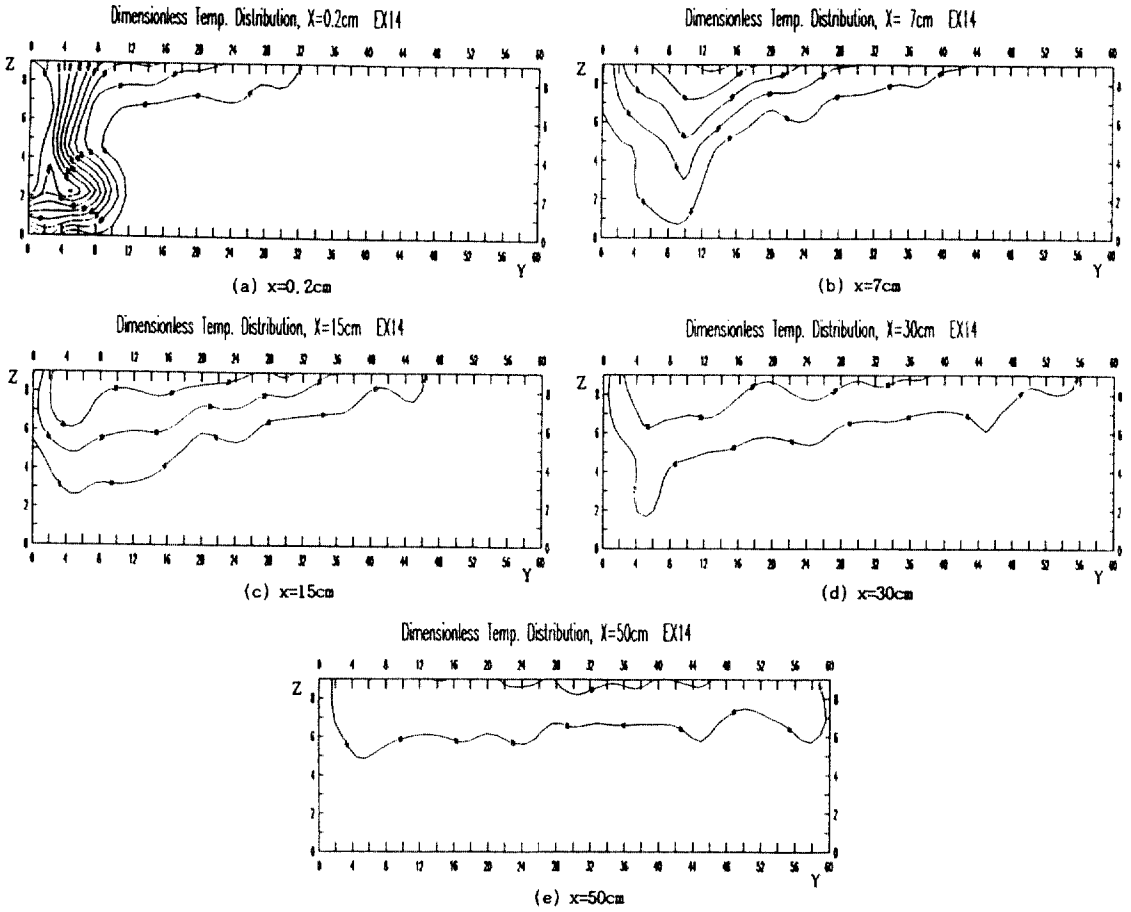


그림 5. $F_o = 1.88$ 때 흐름의 각 단면에서 무차원온도차이 $\Gamma = (T - T_a) / (T_o - T_a)$

$\Gamma = (T - T_a) / (T_o - T_a)$ 이다.

방류구 직하류인 $x=0.2\text{cm}$ (그림 5-a)에서는 방류 유체가 바닥에서 수면까지 전수심에 걸쳐 방류구측 하안에 집중적으로 분포되어 있다. 이는 유입운동량이 부력보다 상대적으로 커서 운동량에 의한 이송과 혼합이 주된 역할을 하는 것으로 해석된다.

하류로 감에 따라 켈흐름은 바닥에서 떠오르고 횡방향으로 퍼지는 현상을 나타낸다. 이는 유입운동량과 부력에 의하여 가로흐름의 횡방향으로 점차 퍼지는 현상이다. 하류로 진행함에 따라 유입유체의 운동량은 감소하고 부력의 영향은 상대적으로 크게 되어 방류유체의 켈흐름은 바닥으로 부터 떠오르게 된다(그림 5-b, c, d).

$x=50\text{cm}$ (그림 5-e)지점에 이르러서는 유입흐름이 수로의 전폭에 걸쳐 수면층에 거의 같은 두께로

분포되어 있는 현상을 보인다. 이 흐름영역은 유입 운동량이 거의 소멸되어 켈흐름의 영향이 완전히 사라진 부상흐름으로서 부력과 가로흐름의 영향만을 받는 단계이다. 부상흐름이 방류구측 하안으로 부터 이탈현상을 나타내는데 이는 켈의 후류영역으로 가로흐름의 영향이 작고 거의 사수영역으로 혼합이 거의 없는 영역으로 해석된다. 유입밀도후르드수가 작으면 부력이 운동량보다 큰 경우이므로 켈흐름이 바닥으로 부터 부상이 빨리 일어나고 가로흐름의 횡방향으로 퍼짐도 크게 빠르게 나타난다.

4.2 귀환거리와 두께

그림 6과 7은 운동량켈에 있어서 H_i, H_o, L_i, L_o 의 실험결과를 식 (5)에 대해 나타낸 것으로 무차원 귀환거리와 두께 $L/L_m, H/H_m$ 는 다음과 같은 멱법칙

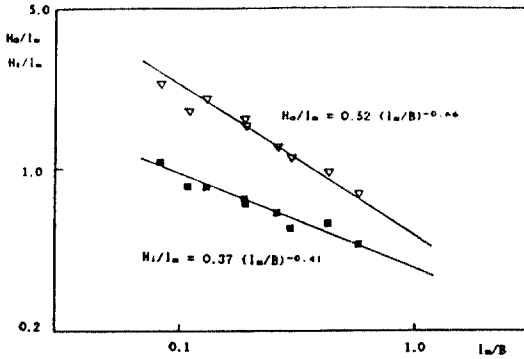


그림 6. H_i/l_m 및 H_o/l_m 과 l_m/W 의 관계(운동량)

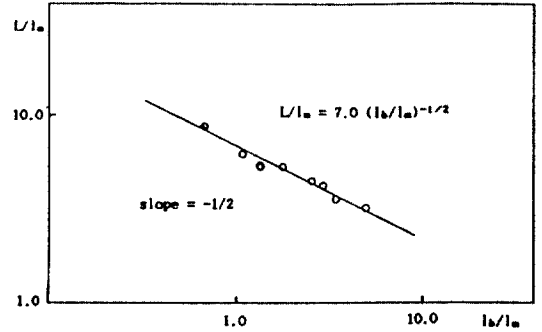


그림 8. L/l_m 과 l_b/l_m 의 관계(부력)

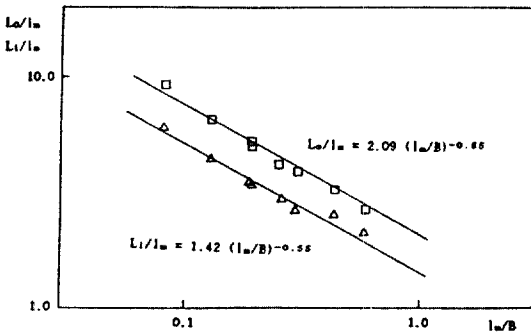


그림 7. L_o/l_m 및 L_i/l_m 과 l_m/W 의 관계(운동량)

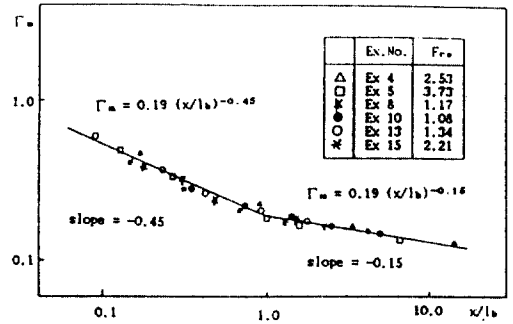


그림 9. 무차원 흐름방향거리 x/l_b 에 대한 무차원 평균 온도차이 Γ_m

으로 표현할 수 있으며 Chu의 결과⁽²⁾와 유사한 것으로 나타났다.

$$H_o/l_m = 0.52(l_m/W)^{-0.66} \quad (9)$$

$$H_i/l_m = 0.37(l_m/W)^{-0.41} \quad (10)$$

$$L_o/l_m = 2.09(l_m/W)^{-0.55} \quad (11)$$

$$L_i/l_m = 1.42(l_m/W)^{-0.55} \quad (12)$$

여기서 l_m 은 운동량특성길이이고 W 는 수로의 폭이며 L_i 는 귀환의 내측거리, L_o 는 외측거리, H_i 는 귀환의 내측두께, H_o 는 외측두께이다. 운동량젤의 경우 귀환특성인 길이와 폭은 l_m/W 의 향으로 예측될 수 있음을 나타낸다.

또한 그림 8은 귀환거리에 관한 기 발표된 실험 결과와 McGuirk & Rodi⁽⁷⁾의 $k-\epsilon$ 난류모형에 의한 예측을 본 실험결과와 도시한 것이다. 본 실험결과가 난류모형예측에 보다 부합됨을 알 수 있다.

그림 9는 부력젤의 경우에 있어서 귀환거리 L 에 대한 실험자료를 식 (8)을 이용하여 무차원 귀환거리 L/l_m 과 l_b/l_m 의 관계를 나타낸 것으로 다음과 같은 l_b/l_m 의 역법칙으로 나타낼 수 있으며 l_b 는 부력특성 길이이다.

$$L/l_m = 7.0(l_b/l_m)^{-0.5} \quad (13)$$

부력젤의 경우 무차원귀환거리는 부력특성길이와 운동량특성길이 비인, l_b/l_m 의 향으로 예측할 수 있음을 시사한다.

4.3 해석

흐름단면의 각 단면에 대한 평균온도는 한 단면에서 30×6 개(180개) 지점에 위치한 온도계로부터 획득한 온도자료를 Γ_o 의 10%를 부력젤의 경계로 취한 후 10% 간격으로 무차원등온차이곡선(dimen-

sionless temperature difference contour)을 그린 후 각 등온선간의 면적을 구하여 각각의 면적에 대한 가중평균⁽²⁾은 다음과 같이 계산하였다.

$$\Gamma_m = (\sum \Gamma_i A_i) / \sum A_i \quad (14)$$

여기서 Γ_i , A_i 는 Γ_0 의 각 10% 간격 간의 무차원 등온선간의 면적이다(예 10~20% 사이의 Γ_i 는 15%, 면적은 A_i 임).

그림 10은 식 (8)과 식 (14)를 이용하여 흐름단면에서 측정된 켈흐름단면 내평균온도에 대한 무차원 온도차이 Γ_m 를 무차원 흐름방향거리 x/l_b 에 대해 나타낸 것으로서 유입밀도후르드수 F_{re} 에 관계없이 $x/l_b > 1.0$ 의 경우와 $x/l_b < 1.0$ 의 경우에 있어 각각 다음과 같은 멱법칙으로 표현할 수 있다.

$$\Gamma_m = 0.19(x/l_b)^{-0.45}, \quad x/l_b < 1.0 \quad (15)$$

$$\Gamma_m = 0.19(x/l_b)^{-0.15}, \quad x/l_b > 1.0 \quad (16)$$

본 연구결과에 따르면 $x/l_b = 1.0$ 을 전, 후로 Γ_m 의 기울기의 변화를 나타내는 것으로 미루어 보아 $x/l_b = 1.0$ 은 방류구조에 의한 혼합과 전단에 의한 유입의 영향을 주로 받는 영역인 부력지배근역(buoyancy dominated near field), $x/l_b > 1.0$ 은 가로흐름에 의한 혼합과 확산의 영향을 주로 받는 영역인 부력지배원역(buoyancy dominated far field)으로 구분할 수 있으며^(4,12) Γ_m 은 부력지배근역($x/l_b < 1.0$)에서는 x/l_b 의 x/l_b 의 -0.45 제곱, 부력지배원역($x/l_b > 1.0$)에서는 x/l_b 의 -0.15 제곱에 비례하는 것으로 나타났다.

그림 11은 평균수심폭 r 과 흐름방향거리 x 의 관

계를 나타낸 것으로 r 과 x 를 무차원화하기 위하여 무차원평균수심폭 r/H_0 는 수로의 전 폭에 대한 평균수심폭의 비로, 무차원흐름방향거리 x/L_0 는 귀환 거리에 대한 흐름방향거리의 비로 나타내면 r/H_0 는 x/L_0 의 멱법칙을 따르며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$r/H_0 = 1.60(x/L_0)^{0.23} \quad (17)$$

그림 12는 식 (15)와 (16)의 무차원변수 즉, 무차원평균온도차이 Γ_m 와 무차원흐름방향거리 x/l_b 를 각각 유입구의 무차원온도차이와 각 흐름단면에서의 무차원평균온도차이의 비($\Gamma_m U_0 h H_0 / (\Gamma_0 Q_0)$)와 식 (17)과 같은 무차원흐름방향거리 x/L_0 로 대치하여 도시한 것으로서 다음과 같은 단일식으로 나타낼 수 있다.

$$(\Gamma_m U_0 h H_0) / (\Gamma_0 Q_0) = 0.7(x/L_0)^{0.23} \quad (18)$$

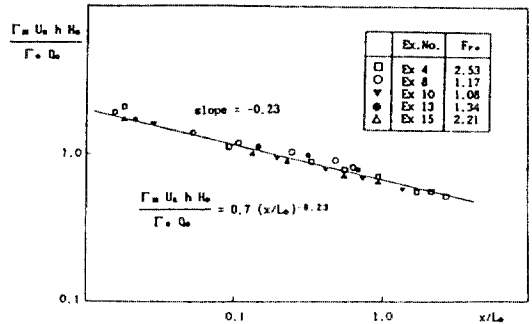


그림 11. 무차원흐름방향 x/L_0 에 대한 무차원온도차이비 $(\Gamma_m U_0 h H_0) / (\Gamma_0 Q_0)$

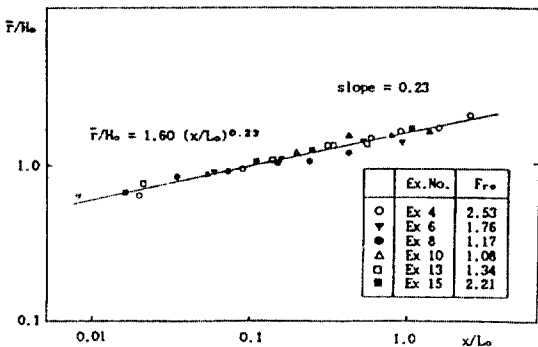


그림 10. 무차원흐름방향거리 x/L_0 에 대한 무차원평균수심폭 r/H_0 .

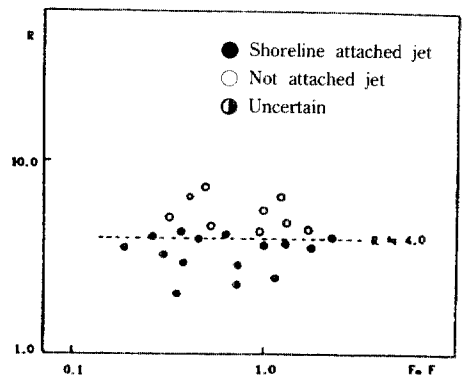


그림 12. 속도비 R 과 $F_0 F$ 의 관계

따라서 부력젤흐름의 각 단면에 있어서의 평균수심폭 r 와 무차원온도차이의 비, $(\Gamma_m U_a h U_0)/(\Gamma_p Q_0)$ 는 무차원거리 x/L_0 의 멱법칙으로 나타낼 수 있다.

그림 13은 속도비 R 와 $F_0 F$ 에 따른 귀환 발생여부를 나타낸 것으로서 귀환의 판별은 육안관찰과 온도분포를 이용하였다. 본 연구의 범위내에서는 속도비 $R=4.0$ 을 전, 후하여 귀환 발생 여부를 판별할 수 있었으며 $R<4.0$ 때 귀환이 발생하는 것으로 나타났다. 즉 $U_0 < 4U_a$ 로서 방류속도 U_0 가 수용수역인 가로흐름의 속도 U_a 의 4배보다 작을 경우에 귀환이 일어난다. 본 연구범위에서는 귀환의 발생여부가 속도비 R 에 좌우되는 것으로 나타났으며 앞으로 연구범위의 확대와 방류구조, 돌출길이의 다양화를 기하여 귀환의 발생 여부에 대한 연구가 계속된다.

5. 결 론

가로흐름의 수용수역에 동일한 수심으로 그리고 가로흐름에 직각방향으로 방류되는 부력젤의 특성에 따른 귀환현상에 대하여 차원해석과 수리실험을 통해 해석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 운동량젤의 경우 무차원귀환거리와 두께, L/l_m 는 운동량특성길이의 수로폭의 비 l_m/W 에 대한 멱법칙으로, 부력젤의 경우 무차원귀환거리 L/l_m 는 부력특성길이의 운동량특성길이 비 l_b/l_m 에 대한 멱법칙으로 예측할 수 있다.

2) 부력젤의 흐름은 부력지배근역과 부력지배원역으로 구분할 수 있으며 각 흐름단면에서 무차원 평균온도차이 Γ_m 은 부력지배근역 $x/l_b < 1.0$ 에서는 무차원흐름방향거리 x/l_b 의 -0.45 제곱, 부력지배원역, $x/l_b > 1.0$ 에서는 -0.15 제곱에 비례한다.

3) 부력젤 각 흐름단면에서의 무차원평균수심폭 r/H_0 는 무차원흐름방향거리 x/L_0 의 멱함수로 예측할 수 있다.

4) 귀환의 발생여부는 부력젤의 유입속도 U_0 와 가로흐름의 유속 U_a 의 비, 즉 속도비 $R(=U_0/U_a)$ 에 좌우되며 본 연구에서는 $R=4.0$ 을 전, 후로 귀환의 발생여부를 구분할 수 있으며 $R > a1/4.0$ 일 때 귀환의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

귀환의 발생여부는 연구의 범위를 더 확대하여 좀 더 명확한 관계의 규명이 필요하며 방류구의 폭과

방류구 돌출길이 및 방류구의 다양한 형상에 따른 귀환의 특성에 관한 연구가 진행중이다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 교내연구비 지원사업으로 이루어졌으며 지원당국에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

1. Cederwall, K., "Buoyant slot jets into stagnant or flowing environment", KH-R-25, California Institute of Technology, 1971.
2. Chu, V.H., Abdelwahed, M.S.T., "Shore attachment of buoyant effluent in strong cross flow", *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 2, 1990, pp.157-174.
3. Demuren, A.O., Rodi, W., "Side Discharges into Open Channels; Mathematical Model", *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 12, Dec., 1983, pp. 1702-1722.
4. Fisher, H.B., Imberger, J., List, E.J., Koh, E.C.Y., Brooks, N.H., *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, 1979.
5. Jirka, G.H., Adams, F.E., Steizenbach, K.D., "Buoyant Surface Jet", *J. of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 107, No. HY11, Nov., 1981, pp.1467-1485.
6. Kao, T.W., Park, C., Pao, H.P., "Inflows, Density Currents, and Fronts", *Phys. Fluids*, Vol. 21, No. 11, Nov., 1978, pp.1913-1922.
7. McGuiirk, J.J., W. Rodi, "A Depth-Averaged Mathematical Model for the Near Field of Side Discharge into Open Channel Flow", *J. of Fluid Mech.* Vol. 68, part 4, 1978, pp.761-781.
8. Motz, L.H., Benedict, B.A., "Surface Jet Model for Heated Discharges", *J. of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 98, No. HY1, 1972, pp.181-199.
9. Rajaratnam, N., *Turbulent jets*, Vol. 5, in developments in water science, Elsevier scientific pub. Co., Amsterdam, 1976.
10. Roberts, P.J.W., "Dispersion of buoyant waste water discharged from outfall diffusion of finite length", *Report No. KH-R-35, W. M. Keck Lab. of Hydr. and Water Resour.*, Cal. Inst. of Tech., Pasadena, Cal., 1977.
11. Subramanya, K., Porey, P. D., "Trajectory of turbulent cross jet", *J. of Hydraulic Research*, Vol.

22, No. 5, 1984.

103, No. HY5, 1977.

12. Wright, S., J., "Mean behavior of buoyant jets in a cross flow", *J. of Hydraulic Division, ASCE*, Vol.

(接受：1992. 7. 28)