

가로흐름에 放流되는 平面浮力젯

Buoyant Slot Jets in Flowing Environment

| | | |
|-------|------|------|
| 尹 | 泰 | 勳* |
| Yoon, | Tae | Hoon |
| 韓 | 云 | 愚** |
| Han, | Woon | Woo |

Abstract

The behavior of plane buoyant jet issuing vertically upwards into cross flow is analysed by experiments and integral scheme. The integral scheme is based on the self similarity and characteristic length scales to governing equations of continuity, momentum and constituent transport equation, in the horizontal and vertical flow region, respectively. Jet trajectories and the temperature distributions of jet centerlines obtained from experiments are analysed for various velocity ratios and densimetric Froude numbers. It was found that the analytical results about the trajectories and temperatures of jet centerlines agree with the experiments and can be expressed as power laws.

要 旨

가로흐름으로 放流되는 鉛直上向平面浮力젯의 舉動이 실험과 基本方程式의 積分技法에 의하여 해석된다. 積分技法은 相似法則과 特性길이를 도입한 연직상향 및 수평방향흐름영역에 대한 漸近解이며, 실험은 상이한 속도비와 방류밀도 Froude 수를 변화시키면서 수행되었다. 實驗結果와 解析의解는 잘 일치하며, 젯中心線의 經路和 溫度는 冪法則으로 표현될 수 있는 것으로 나타났다.

1. 序 論

周邊流體에 비하여 온도(또는 밀도)가 다른 발전소의 冷却水나 공장의 폐수 및 가정의 하수 등이 자연수역으로 유입됨으로 인하여 주변에 주는 나쁜 영향을 최소로 하기 위해서는 각종 방류의 수리학적 흐름특성을 파악해야 한다. 이와 같은 放流는 放流初期에 運動量과 浮力을 갖

는 浮力젯을 형성하며 실제 放流過程은 단일 또는 여러개의 방류구를 갖는 diffuser 를 이용하여 해저에 방류하는 것이다. 이러한 放流는 각각의 방류구를 벗어나면 線流源 (line source) 형태의 浮力젯을 형성한다. 따라서 이러한 현상이 긴 방류구(slot)를 통해 가로흐름(cross flow)으로 방류되는 鉛直上向浮力젯에 관한 연구를 필요로 한다.

가로흐름의 속도가 U_0 , 젯방류속도가 W_0 인 연직상향 2차원부력젯의 흐름을 가로흐름의 영향

* 正會員 · 漢陽大學校 工科學科 教授, 土木工學科

** 正會員 · 漢陽大學校 大學院, 土木工學科

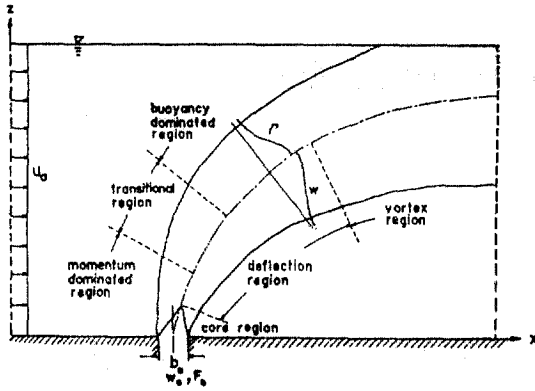


그림 1. 가로흐름에서의 켈흐름구분

과 켈흐름의 발달정도에 따라 구분하면 그림 1 과 같이 핵領域(core region), 彎曲領域(deflection region), 渦領域(vortex region)으로, 켈흐름特性에 따라 運動量支配領域(momentum dominated region), 遷移領域(transitional region), 浮力支配領域(buoyancy dominated region)으로 구분할 수 있다^(2, 5, 6). 浮力젤에 영향을 주는 요인은 1) 켈방류속도 W_0 와 가로흐름속도 U_0 의 비, 즉 $R=W_0/U_0$ 로 정의되는 速度比, 2) 켈경사각도 3) 켈방류구 형상, 4) 켈과 주변유체의 密度差異 등이 있다^(1, 4, 6, 7).

흐름수역에서의 수리실험에 의한 연구를 살펴 보면 Chu와 Goldberg⁽⁸⁾는 연직원형젤의 켈중심선경로와 회석에 대한 적분식이 실험자료와 일치하며 천이영역의 흐름방향거리(x -방향거리)에 대한 실험식을 제안하였다. Subramanya와 Porey⁽⁶⁾는 연직원형젤 실험을 통하여 켈중심선경로를 켈폭의 변화에 따른 함수식으로 표현하였으며 Wright⁽⁷⁾는 원형젤에서 켈중심선경로와 회석에 特性길이를 도입하여 해석하였다. Cederwall⁽¹⁾은 연직상향 2차원부력젤 실험을 통하여 source Froude number와 momentum flux ratio의 비에 따른 켈흐름특성을 구분하였다.

본 연구에서는 運動量特性 길이(momentum length scale)와 浮力特性길이(buoyancy length scale)를 도입하여 실험을 통하여 浮力젤을 해석한다.

2. 이론해석

주변수역의 온도(또는 밀도)가 일정한 흐름水域에 鉛直上向으로 방류되는 平面浮力젤을 해석함에는 몇가지 가정이 필요하다. 흐름은 非壓縮性, 定流이고 완전난류이다. 주변수역은 일정한 수평방향 유속을 가지며 分子擴散은 무시되고 작은 密度差異에 Boussinesq의 가정이 적용된다. 이같은 가정하에서 2차원흐름의 基本方程式은 다음과 같다.

連續方程式

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

運動量方程式

수평방향(x 방향)

$$\frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}^2 + \overline{u'^2} + \frac{P}{\rho_0}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{u}\bar{w} + \overline{u'w'}) = 0 \quad (2)$$

연직방향(z 방향)

$$\frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}\bar{w} + \overline{u'w'}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{w}^2 + \overline{w'^2} + \bar{P}) = \left(\frac{\rho_a - \bar{\rho}}{\rho_0} \right) g \quad (3)$$

追跡物保存式

$$\frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}(\bar{\rho} - \rho_a) + \overline{u'\rho'}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{w}(\bar{\rho} - \rho_a) + \overline{w'\rho'}) = 0 \quad (4)$$

여기서 u 와 w 는 각각 수평, 연직방향의 속도 성분이며 '-'는 시간평균값이고 ','는 시간평균값에서 偏倚되는 값이다. g 는 중력가속도이며 ρ 는 켈의 密度이고 ρ_a 와 ρ_0 는 각각 주변수역의 밀도와 방류구에서의 켈의 密度를 나타낸다.

흐름수역에 연직상향으로 放流되는 浮力젤은 연직부분, 단곡부분, 수평부분으로 구성되는데 이러한 켈흐름의 전 영역을 적분형기법으로 해석함에는 적분의 어려움이 따르므로 그림 2와 같이 켈흐름을 연직상향과 수평방향흐름 수역으로 구분하여 漸近解를 구하여 해석하는 것이 효율적이다⁽⁴⁾.

먼저 연직상향흐름영역에 대한 적분형 기본식은 식 (3)과 (4)를 단위폭($dy=1$)을 갖는 켈단면 $A(z)$ 에 대해 적분하여 정리하면 다음과 같다.

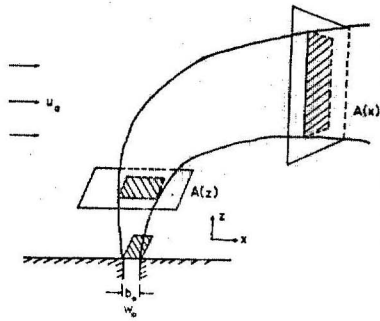


그림 2. 가로흐름에서 질흐름의 기하학적 형상

$$\int_{A(x)} \frac{\partial}{\partial x} \bar{w}^2 dx = \int_{A(x)} \frac{\rho_a - \bar{\rho}}{\rho_0} g dx \quad (5)$$

$$\int_{A(x)} \frac{\partial}{\partial x} \bar{w}(\rho_a - \bar{\rho}) dx = 0 \quad (6)$$

같은 방법으로 수평방향흐름영역에 대한 적분 형기본식은 식 (3)과 (4)를 단면적 $A(x)$ 에 대해 적분하면 다음과 같다.

$$\int_{A(x)} \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}\bar{w}) dx = \int_{A(x)} \frac{\rho_a - \bar{\rho}}{\rho_0} g dx \quad (7)$$

$$\int_{A(x)} \frac{\partial}{\partial x} \bar{u}(\rho_a - \bar{\rho}) dx = 0 \quad (8)$$

흐름이 충분히 발달되었다면 속도분포와 추적물농도에 相似法則(self similarity)을 적용할 수 있으며 연직상향과 수평방향흐름 영역에서의 상사법칙은 다음과 같다.

연직상향

$$\bar{w}(x, z) = w_c(\bar{z})\phi(x/\bar{z}) \quad (9)$$

$$\frac{\rho_a - \bar{\rho}}{\rho_0} = \theta(\bar{z})\psi(x/\bar{z}) \quad (10)$$

수평방향

$$\bar{w}(x, z) = w_c(\bar{z})\phi\left(\frac{x - \bar{z}}{\bar{z}}\right) \quad (11)$$

$$\frac{\rho_a - \bar{\rho}}{\rho_0} = \theta(\bar{z})\psi\left(\frac{x - \bar{z}}{\bar{z}}\right) \quad (12)$$

$$\bar{u} \approx U_a \quad (13)$$

여기서 \bar{z} 는 질중심선의 z 좌표로서 x 의 함수이고 $w_c(\bar{z})$ 는 질중심선속도이다. ϕ 와 ψ 는 속도와 추적물농도의 종축에 대한 횡방향분포를 나타내는 함수로서 질흐름 조건에 따라 결정된다.

2.1 運動量支配型

浮力이 무시될 만큼 작은 경우 浮力질은 운동

량질으로 해석될 수 있다. 따라서 식 (5)의 우항인 부력항은 무시된다. 이 사실을 고려하여 식 (5), (6)에 식 (9), (10)을 대입하면 다음을 얻는다.

$$d/dx \int_{A(x)} \bar{z} w_c^2(\bar{z}) \phi^2 d(x/\bar{z}) = 0 \quad (14)$$

$$d/dx \int_{A(x)} \bar{z} w_c(\bar{z}) \theta(\bar{z}) \phi \psi d(x/\bar{z}) = 0 \quad (15)$$

식 (14), (15)는 다음과 같은 내용으로 표현될 수 있다.

$$\bar{z} w_c^2(\bar{z}) \sim M \quad (16)$$

$$\bar{z} w_c(\bar{z}) \theta(\bar{z}) \sim B/g \quad (17)$$

여기서 M 는 放流運動量, B 는 浮力으로 각각 $M = b_0 W_0^2$, $B = g(\Delta\rho/\rho) b_0 W_0$ 로 정의되고 $[M] = L^3/T^2$, $[B] = L^3/T^3$ 의 차원을 가지며 $\Delta\rho$ 는 주변수역과 질의 밀도차이다.

식 (16), (17)을 변형하면 질중심선 속도와 온도분포에 대한 식을 얻는다.

$$w_c(\bar{z})/U_a \sim (M/U_a^2 \bar{z})^{1/2} \quad (18)$$

$$gM\theta(\bar{z})/U_a B \sim (M/U_a^2 \bar{z})^{1/2} \quad (19)$$

$Z_M = M/U_a^2$ 로 정의되는 運動量特性길이 를 도입하면 식 (18), (19)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_c(\bar{z})/U_a \sim (Z_M/\bar{z})^{1/2}, \bar{z} \ll Z_M \quad (20)$$

$$gM\theta(\bar{z})/U_a B \sim (\bar{z}/Z_M)^{-1/2}, \bar{z} \ll Z_M \quad (21)$$

가로흐름에 放流되는 질중심선경사는

$$w_c(\bar{z})/U_a = d\bar{z}/dx \quad (22)$$

으로 나타낼 수 있으므로 식(20), (22)로부터 질중심선경로를 수평거리 x 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\bar{z}/Z_M \sim (x/Z_M)^{2/3}, \bar{z} \ll Z_M \quad (23)$$

運動量特性길이 Z_M 은 질의 연직방향속도가 가로흐름속도의 크기로 감소되는 곳까지의 연직거리이다⁽⁴⁾.

식 (20), (21) 및 (23)은 $w_c(\bar{z}) \gg U_a$ 또는 $\bar{z} \ll Z_M$ 인 영역에 적용되며 이러한 영역을 運動量支配近域(momentum dominated near field)이라 한다.

수평방향흐름영역에서도 연직상향흐름영역에서와 같은 방법으로 해석할 수 있다. 즉 식(11), (12)와 (13)을 이용하여 식 (7), (8)으로부터 다음과 같은 결과를 얻는다⁽⁹⁾.

$$\bar{z} U_a w_c(\bar{z}) \sim M \quad (24)$$

$$\bar{z} U_a \theta(\bar{z}) \sim B/g \quad (25)$$

여기에 운동량특성길이 Z_M 을 이용하여 변형하면 다음과 같다.

$$w_c(\bar{z})/U_a \sim Z_M/\bar{z}, \quad \bar{z} \gg Z_M \quad (26)$$

$$Mg\theta(\bar{z})/U_a B \sim (\bar{z}/Z_M)^{-1}, \quad \bar{z} \gg Z_M \quad (27)$$

또한 식 (26)과 (22)로부터 수평방향흐름영역의 질중심선경로는 다음과 같이 얻어진다.

$$\bar{z}/Z_M \sim (x/Z_M)^{1/2}, \quad \bar{z} \gg Z_M \quad (28)$$

식 (26), (27) 및 (28)은 $w_c(\bar{z}) \ll U_a$ 또는 $\bar{z} \gg Z_M$ 인 영역에 적용되며 이러한 영역을 運動量支配遠域(momentum dominated far field)이라 한다.

2.2 浮力支配

운동량의 영향이 무시될 정도로 작고 浮力이 지배적인 영향을 미치는 경우 부력젤은 plume 으로 해석될 수 있으며 이 경우에는 식 (5), (7)의 우항은 무시할 수 없다. 이와같은 단순 plume 의 해석에 운동량젤에 적용된 방법을 이용한 결과 중심선속도와 온도분포 및 중심선경로는 다음과 같이 표현된다⁽⁹⁾.

연직상향흐름영역

$$w_c(\bar{z})/U_a \sim (Z_B/\bar{z})^{1/5}, \quad \bar{z} \ll Z_B \quad (29)$$

$$Mg\theta(\bar{z})/U_a B \sim (\bar{z}/Z_B)^{-1/5}, \quad \bar{z} \ll Z_B \quad (30)$$

$$\bar{z}/Z_B \sim (x/Z_B)^{5/6}, \quad \bar{z} \ll Z_B \quad (31)$$

수평방향흐름영역

$$w_c(\bar{z})/U_a \sim (Z_B/\bar{z})^{1/3}, \quad \bar{z} \gg Z_B \quad (32)$$

$$Mg\theta(\bar{z})/U_a B \sim (\bar{z}/Z_M)^{-1}, \quad \bar{z} \gg Z_B \quad (33)$$

$$\bar{z}/Z_B \sim (x/Z_B)^{3/4}, \quad \bar{z} \gg Z_B \quad (34)$$

여기서, Z_B 는 浮力特性 길이로 $Z_B = BM/U_a^5$ 으로 정의되며 이는 plume 의 연직방향속도가 가로흐름속도의 크기로 감소되는 곳까지의 연직거리를 나타낸다.⁽⁴⁾

식 (29), (30) 및 (31)은 浮力支配近域(buoyancy dominated near field, $\bar{z} \ll Z_B$)에 적용되며 식 (32), (33) 및 (34)는 浮力支配遠域(buoyancy dominated far field, $\bar{z} \gg Z_B$)에 적용된다.

이상과 같은 해석은 부력젤의 경우에 젤흐름의 상이한 부분에 적용이 가능하다.

3. 實驗裝置 및 過程

실험이 수행된 수로는 폭 30 cm, 길이 40 cm,

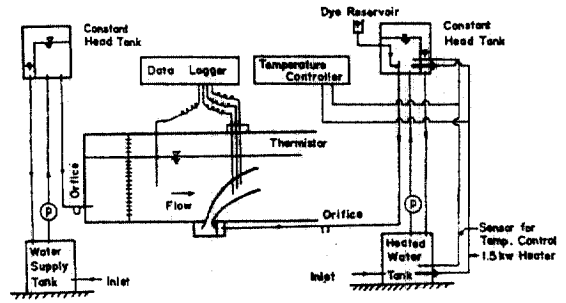


그림 3. 실험장치

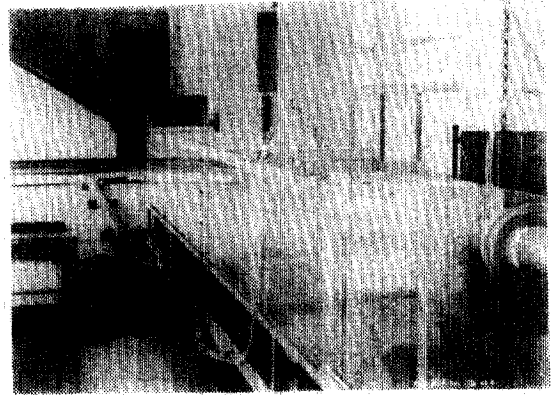


사진 1. 실험장치

길이 4 m 의 수로이고, 이 수로의 중앙에 위치한 길이 15 cm, 폭이 1~10 mm 변화 가능한 방류구를 통해서 바닥에서부터 연직상향으로 가열된 물을 방류함으로써 부력젤을 발생시켰으며 2 차원부력젤을 유지하기 위하여 수로내에 15 cm 간격의 벽면을 설치하였다. 실험장치는 그림 3 및 사진 1 과 같다.

일정 온도의 젤흐름을 발생시키기 위하여 상하 두 수조에 1.5 kW 히터와 온도계를 설치하여 자동온도조절장치에 연결시켜 물의 온도를 자동으로 조절할 수 있도록 하였다. 수로에 공급되는 유량은 2 inch 오리피스미터와 하루단의 웨어에 의해 측정하였으며, 가로흐름의 유속은 수로의 유량 및 표면유속 측정에 의하여었다. 온도 측정에는 13 개의 Platinum Rtd type thermistor 를 연직방향으로 1~1.5 cm 간격으로 설치하여 젤흐름방향으로 이동시키면서 젤을 포함한

흐름수역의 전체적인 온도분포를 획득하였다. 실험은 속도비 R 과 방류밀도 Froude 수 F_0 를 변화시키면서 수행하였으며 사진촬영 및 육안관찰을 위하여 젤에 색소주입을 가능하게 하였다. 속도비 R 과 방류밀도 후르드수 F_0 는 다음과 같

이 정의된다.

$$R = w_0 / U_a$$

$$F_0 = \frac{w_0}{\sqrt{\frac{\rho_a - \rho}{\rho_0} g b_0}}$$

표 1. 실험 자료

| Exp. No. | slot width b_0 : cm | cross-velo. U_a : cm/S | jet velo. W_0 : cm/S | velo. ratio $R = W_0 / U_a$ | Temperature cross-jet flow °C | momentum flux M [$L^2 T^{-2}$] | buoyancy flux B [$L^3 T^{-3}$] | densimetric Froude number F_0 | jet discharge cm ³ /S/cm | |
|----------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--|--|------------------------------------|--|------|
| E0701 | 0.3 | 1.9 | 15.11 | 8.0 | 2.7 | 18.5 | 68.4 | 6.92 | 22.3 | 4.53 |
| E0702 | " | " | " | " | " | 13.3 | " | 2.61 | 36.4 | " |
| E0801 | 0.3 | 1.9 | 15.56 | 8.2 | 2.9 | 19.3 | 72.63 | 7.13 | 23.0 | 4.67 |
| E0802 | " | " | " | " | 3.3 | 15.2 | " | 3.95 | 30.9 | " |
| E0803 | " | " | " | " | 2.9 | 11.8 | " | 2.13 | 42.0 | " |
| E0804 | " | " | " | " | 3.3 | 23.8 | " | 12.20 | 17.6 | " |
| E0901 | 0.3 | 1.9 | 17.78 | 9.4 | 2.4 | 12.1 | 94.84 | 2.31 | 49.3 | 5.33 |
| E0902 | " | " | " | " | " | 8.8 | " | 0.83 | 82.2 | " |
| E1201 | 0.2 | 1.4 | 17.33 | 12.4 | 2.8 | 19.8 | 60.07 | 5.98 | 29.5 | 3.47 |
| E1202 | " | " | " | " | 2.9 | 24.4 | " | 9.06 | 24.0 | " |
| E1203 | " | " | 19.00 | 13.6 | 3.0 | 15.7 | 72.20 | 3.80 | 42.5 | 3.80 |
| E1211 | " | " | 17.33 | 12.4 | 3.7 | 31.8 | 60.07 | 16.80 | 17.6 | 3.47 |
| E1212 | " | " | " | " | 3.6 | 23.7 | " | 9.08 | 23.9 | " |
| E1501 | 0.2 | 1.4 | 21.67 | 15.5 | 2.8 | 12.6 | 93.92 | 2.49 | 63.9 | 4.33 |
| E1502 | " | " | " | " | 3.3 | 24.6 | " | 12.40 | 28.6 | " |
| E1503 | " | " | " | " | 3.2 | 22.1 | " | 9.32 | 33.1 | " |
| E1504 | " | " | " | " | 3.1 | 17.4 | " | 5.05 | 44.9 | " |
| E1505 | " | " | " | " | 2.9 | 16.3 | " | 4.34 | 48.4 | " |
| EP01 | 0.2 | 1.49 | 10.0 | 6.7 | 15.2 | 27.9 | 20.0 | 5.63 | 13.3 | 2.00 |
| EP02 | " | " | " | " | 15.3 | 22.7 | " | 3.06 | 18.1 | " |
| EP03 | " | " | " | " | 15.4 | 22.2 | " | 2.61 | 19.6 | " |
| EP04 | " | " | " | " | 15.8 | 20.4 | " | 1.45 | 26.3 | " |
| EP05 | " | " | " | " | 15.5 | 34.5 | " | 9.75 | 4.2 | " |
| EE01 | 0.2 | 1.49 | 6.67 | 4.5 | 16.5 | 19.8 | 8.90 | 0.75 | 19.9 | 1.33 |
| EE02 | " | " | " | " | 16.7 | 19.5 | " | 0.48 | 24.8 | " |
| EE03 | " | " | " | " | " | 25.6 | " | 2.61 | 10.7 | " |
| EE04 | " | " | " | " | " | 34.6 | " | 6.21 | 6.9 | " |
| EE05 | " | " | " | " | 17.2 | 32.4 | " | 4.91 | 7.8 | " |
| EE06 | " | " | " | " | 16.5 | 35.7 | " | 7.30 | 6.2 | " |
| P7 | " | " | " | " | 9.1 | 21.1 | " | 2.34 | 11.3 | " |
| P5 | " | " | 9.0 | 6.0 | 8.6 | 26.6 | 16.2 | 5.77 | 11.2 | 1.80 |
| P2 | " | " | 10.67 | 7.2 | 7.2 | 27.4 | 22.8 | 7.09 | 13.1 | 2.13 |
| P1 | 0.2 | 1.49 | 11.67 | 7.8 | 7.0 | 20.6 | 27.2 | 4.37 | 19.1 | 2.33 |
| P3 | " | " | " | " | 7.2 | 24.1 | " | 5.96 | 16.3 | " |
| P6 | " | " | " | " | 8.1 | 29.3 | " | 8.93 | 13.3 | " |
| P8 | " | " | 15.33 | 10.3 | 9.3 | 25.4 | 47.0 | 8.23 | 20.9 | 3.07 |
| P4 | " | " | " | " | 7.9 | 16.7 | " | 3.23 | 33.4 | " |
| P11 | " | " | " | " | 11.4 | 28.7 | " | 11.01 | 18.1 | " |

4. 實驗結果 및 分析

젤흐름을 따라 젤중심선경로와 온도분포의 자료를 상이한 속도비와 방류밀도 Froude 수에 대하여 획득하였으며 실험자료는 표 1 과 같다.

4.1 젤中心線經路

그림 4는 속도비 $R=8$, $F_0=23$ 인 부력젤의 중심선경로에 관한 실험결과와 수치해⁸⁾의 결과를 비교한 것으로 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 5는 運動量特性길이 Z_M 을 이용하여 실험에 의한 젤중심선경로 x, z 를 無次元化하여 플랏트한 것으로 $\bar{z}/Z_M < 1.0$ 의 부분은 $\bar{z} < Z_M$ 에 해당하는 영역으로서 식 (23)의 2/3 멱법칙(power law)을 만족한다. 이 영역은 운동량이 젤흐름의 지배적인 인자가 되며 연직상향흐름영역으로 運動量支配近域에 해당되는 것으로 고려된다. 가로흐름이 젤흐름의 주요인자가 되는 $\bar{z} \gg$

Z_M 인 영역은 그림 5의 $\bar{z}/Z_M > 1.0$ 의 부분으로서 식 (28)의 1/2 멱법칙과 일치함을 알 수 있으며 수평방향흐름영역의 運動量支配遠域으로 해석된다. 그림 5의 실험자료는 부력이 운동량에 비하여 무시할만큼 작은 경우에 대한 것이므로 운동량젤이라 가정하여 유도된 식 (23), (28)의 멱법칙이 성립된다. 그러나 속도비 R 이 크면 浮力이 존재해도 그림 5와 같은 2/3, 1/2 멱법칙이 성립된다. 이는 속도비 R 이 크게 되면 운동량이 증가하여 自由水面까지 전수역이 운동량의 영향을 크게 받게 되고 浮力이 지배적인 인자가 되는 浮力支配領域의 존재가 미미한 것으로 해석된다. 따라서 有限水深의 경우에 속도비가 큰 浮力젤은 運動量젤과 같은 양상을 보인다.

그림 6은 속도비가 작은 경우에 대한 실험결과

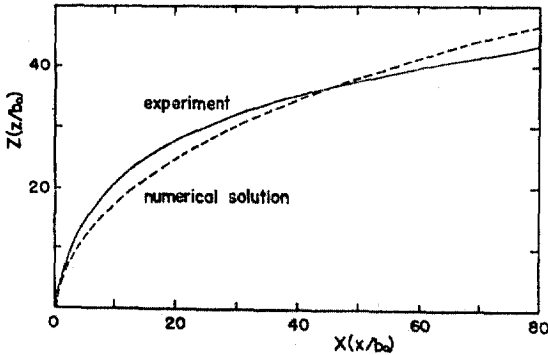


그림 4. 실험과 수치해에 의한 젤중심선경로의 비교

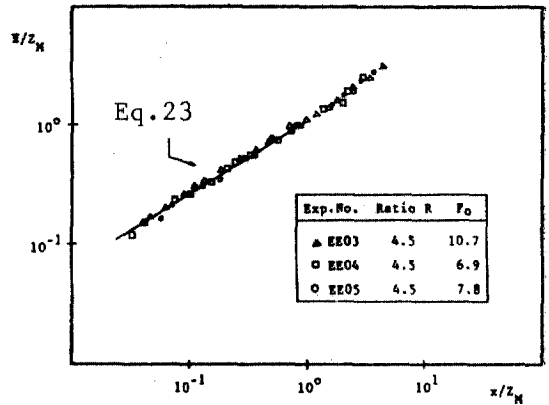


그림 6. 浮力支配젤의 젤中心線經路

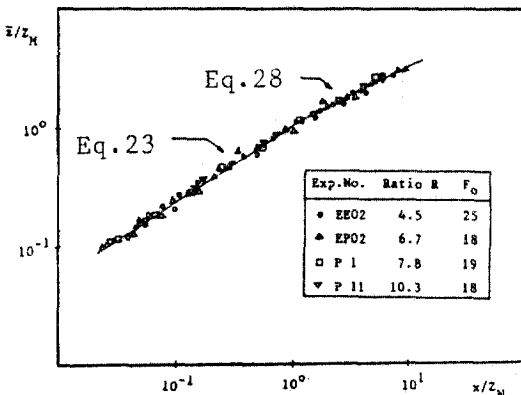


그림 5. 運動量支配젤의 젤中心線經路

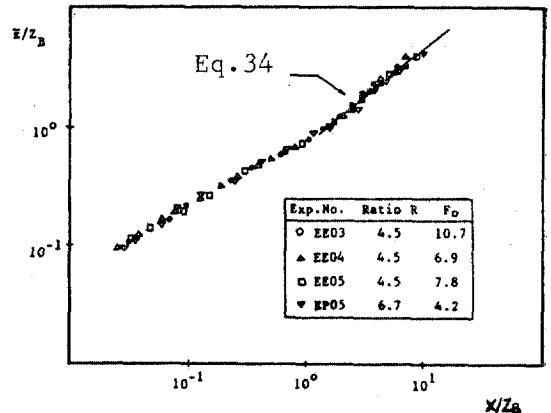


그림 7. 浮力支配젤의 젤中心線經路

로 $\bar{z}/Z_M < 1.0$ 인 영역은 식 (23)의 2/3 멱법칙을 만족하나 $\bar{z}/Z_M > 1.0$ 인 영역에서는 1/2 멱법칙과 일치하지 않는다. 이는 $\bar{z}/Z_M < 1.0$ 인 영역에서는 점흐름이 운동량의 영향을 주로 받게 되어 2/3 멱법칙을 만족하나 $\bar{z}/Z_M > 1.0$ 인 영역에서는 상대적으로 점력과 가로흐름의 영향이 크게 되어 운동량支配領域이 존재하지 않는 것으로 판단된다. 따라서 1/2 멱법칙이 적용되지 않는다.

속도비가 비교적 작은 점력점의 점중심선의 실험자료를 점력특성길이 Z_B 로 무차원화하여 플랫폼한 그림 7에서 점력支配領域($\bar{z} \gg Z_B$)으로 해석되는 $\bar{z}/Z_B > 1.0$ 의 영역은 plume이라는 가정에서 유도된 식 (34)의 3/4 멱법칙을 만족하나 $\bar{z}/Z_B < 1.0$ 인 영역에서는 5/6 멱법칙이 성립하지 않는다. 본 연구에서 수행된 모든 부력점은 초기부력과 운동량을 갖는다. 또한 상당한 크기의 방류유속을 가지므로 본 연구의 모든 점력점은 상당한 크기의 운동량을 갖는다. 따라서 낮은 F_0 의 경우에도 초기 운동량을 가지므로 이러한 영역에는 단순 plume의 가정에서 유도된 식 (31)의 5/6 멱법칙이 성립되지 않는 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서 수행된 점력점은 $\bar{z} \ll Z_B$ 인 영역이 존재하지 않거나 미미하여 운동량支配領域만이 나타나는 것으로 해석된다. 속도비가 큰 점력점은 有限水深下에서는 전술한 바와 같이 운동량점과 같은 양상을 보이므로 점력특성길이를 이용한 해석은 성립되지 않는다. 따라서 이러한 점중심선의 기울기의 변화를 운동량특성길이와 부력특성길이의 비로 구분하면 $Z_M/Z_B \gg 1$ 일 때는 2/3~1/2 관계, $Z_M/Z_B \ll 1$ 일 때는 2/3~3/4 관계, $Z_M/Z_B \approx 1$ 일 때는 2/3~1/2~3/4 관계로 진행된다고 판단된다.

4.2 흐름水域 및 점중심선의 온도분포

속도비 $R=8$, $F_0=23$ 인 경우 부력점 주변 흐름 구역의 온도분포를 나타낸 것이 그림 8이다. 이는 放流口에서의 온도를 100%로 하여 무차원화한 온도분포로 수치해(8)에 의한 결과와 거의 일치한다.

점중심선의 온도를 운동량특성길이 Z_M 으로 무차원화한 중심선경로에 대하여 나타낸 것이 그림 9이다. 그림 9에서 알 수 있는 바와 같이 식 (21)과 (27)의 -1/2과 -1의 멱법칙에 따라

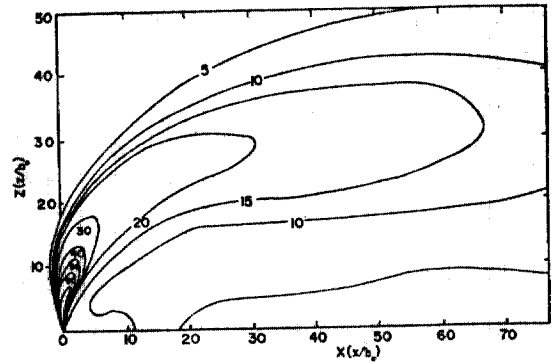


그림 8. 주변 흐름水域의 無次元溫度分布

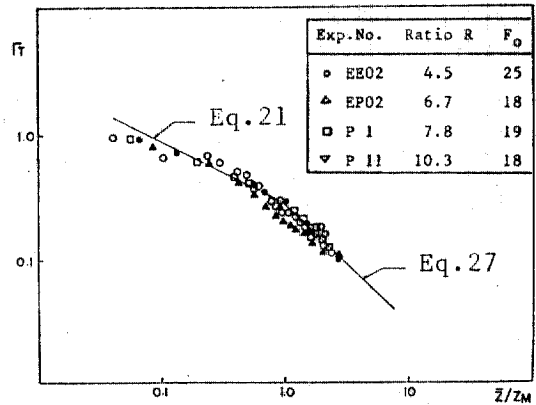


그림 9. 점중심線經路에 따른 無次元溫度分布

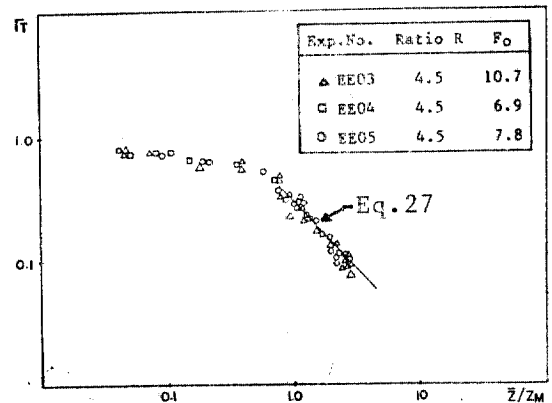


그림 10. 점중심線經路에 따른 無次元溫度分布

온도가 감소함을 알 수 있으며, 운동량 지배구역과 원역이 존재하는 것으로 판단된다. 한편 낮은 F_0 에 대한 결과는 그림 10에서와 같이 \bar{z}/Z_M

<1.0 인 영역에서는 높은 방류온도로 인한 부력 때문에 단순젤으로 해석한 식 (21)을 만족하지 않으나 젤이 상승함에 따라 주위유체와 혼합으로 방류초기의 높은 온도(또는 부력)가 어느정도 감소하면 젤중심선의 溫度變化는 운동량 지배 영역에서와 같이 -1의 멱법칙에 따라 감소함을 알 수 있다.

5. 結 論

浮力젤은 運動量과 浮力을 다 가지므로 젤의 초기단계에는 그 크기는 달라도 2/3 멱법칙이 성립되는 運動量支配領域이 존재하며 浮力이 작은 경우, 즉 放流密度 Froude 數 F_0 가 클 때는 1/2 멱법칙이 성립하는 運動量支配遠域이 존재함을 알 수 있다. 浮力이 큰 경우 速度化 R 이 작으면 3/4 멱법칙이 성립하는 浮力支配遠域이 존재하며 속도비 R 이 크면 작은 수심하에서는 浮力支配遠域이 존재하지 않는다. 이는 속도비가 커질수록 운동량이 증가하여 自由水面까지 운동량이 젤의 전 흐름을 지배하게 되어 浮力이 지배적인 인자가 되는 浮力支配領域의 존재가 미미하기 때문으로 판단된다.

二次元浮力젤의 실험자료와 特性 길이를 도입한 적분식은 대체로 일치된 결과를 나타내었으며 앞으로 이에 대한 연구가 더 진행되어야 한다고 생각된다.

謝 辭

본 연구는 韓國科學財團 支援으로 수행된 “潮汐의 영

향을 받는 水域에서 鉛直上向浮力젤”(1985.5~1988.5)의 二次年度 연구결과로서 同財團에 謝意를 表합니다.

參 考 文 獻

1. Cederwall, K., "Buoyant slot jets into stagnant or flowing environment", KH-R-25, California Institute of Technology, 1971.
2. Chan, D.T.L. et al., "Entrainment and drag force of deflected jets", *J. of Hyd. Div., ASCE*, Vol. 120, No. HY5, May 1976.
3. Chu, V.H. and Goldberg, M.B., "Buoyant forced plumes in cross flow", *J. of Hyd. Div., ASCE*, Vol. 100, No. HY9, 1974.
4. Fischer, H.B., Imberger, J., List, E.J., Koh, R.C.Y. and Brooks, N.H., "Mixing in inland and coastal waters", Academic Press, 1979.
5. Rajaratnam, N., "Turbulent jets", *Developments in water science*, 5., Elsevier scientific pub. Co., Amsterdam, 1976.
6. Subramanya, K. and Porey, P.D., "Trajectory of a turbulent cross jets", *J. of Hydraulic Research*, Vol. 22, No. 5, 1984.
7. Wright, S.J., "Mean behavior of buoyant jets in a cross flow", *J. of Hyd. Div., ASCE*, Vol. 103, No. HY5, 1977.
8. 윤태훈, 차영기, 김창완, "흐름수역에서 연직상향 부력젤", 대한토목학회논문집, 제 7 권 제 1 호, 1987.
9. 한운우, "가로흐름에 방류되는 평면부력젤", 한양 대학원 석사학위논문, 1987. 8.

(接受: 1988. 3. 7)