

흐름수역에서 젤 흐름의 연안귀환

윤 태훈* 육 운수** 한 운우***

1. 서론

운동량과 부력을 갖는 부력젤(buoyant jet) 형태로 가로흐름에 방류되는 부력젤의 거동은 부력젤의 유입운동량과 주변수역의 흐름(가로흐름)의 영향에 의하여 방류구 하류에서 가로흐름방향으로 젤흐름경로의 변화가 발생하며, 젤흐름 특성에 따라 방류구의 하류 해안 또는 하안에 되돌아 오는 귀환(attachment)현상이 발생하여 해안(연안) 및 하안오염을 가중시킨다.

귀환을 방지하기 위해서는 다중방류관을 해안에서 멀리까지 연장하면 가능하나 본 연구에서는 최소의 길이로 귀환을 방지하고자 실험을 통하여 조사된다.

2. 차원해석

수용수역의 밀도가 ρ_s 로 일정한 가로흐름 수역으로 방류되는 부력젤의 거동에 영향을 주는 물리변수들 간의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H, L, \Delta \rho g = f_z(Q_o, M_o, B_o, U_o, \Delta \rho_o, B, x, y, z) \quad (2-1)$$

여기서 Q_o 는 유입유체흐름율 ($Q_o = h_o b_o U_o$), M_o 는 운동량흐름율 ($M_o = Q_o U_o$), U_o 는 유입유체속도, h_o 는 유입유체의 수심, b_o 는 유입구의 폭, U_o 는 가로흐름 속도, B_o 는 유입유체의 부력흐름율, B 는 수로의 폭, x, y, z 는 각각 흐름방향, 횡방향 및 수심방향의 좌표, $\Delta \rho_o$ 는 $\Delta \rho_o = \rho_s - \rho_o$, $\Delta \rho$ 는 $\Delta \rho = \rho_s - \rho$, ρ_o 는 유입유체의 밀도, ρ_s 는 수용수역의 밀도, ρ 는 국부밀도, g 는 중력가속도이다.

본 연구에서는 식(2-1)을 Buckingham π 정리를 이용한 차원해석을 수행함에 있어 각기 그 흐름특성이 상이한 운동량젤(momentum jet)의 경우와 부력젤(buoyant jet)의 경우에 대해 수행된다.

* 한양대학교 토목공학과 교수

** 관동대학교 토목공학과 부교수 *(발표자)

*** 대전대학교 환경공학과 조교수

운동량젤에 대한 차원해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

$$H/l_m, L/l_m = f_5(I_m/B) \quad (2-2)$$

여기서 l_m 은 $l_m = M_o/hU_o^2$ 라 정의되는 운동량특성길이(momentum length scale)이다.

부력젤의 경우 식(2-1)에 대한 차원해석 결과는 다음과 같다.

$$H/l_m, L/l_m = f_9(I_m/B, l_b/l_m) \quad (2-3)$$

$$\Delta \rho / \Delta \rho_o = f_{12}(F_o, F_o R^{1/2}, B/l_b, x/l_b, y/l_b, z/l_b) \quad (2-4)$$

여기서 l_b 는 $l_b = B_o/U_o^3$ 라 정의된 부력특성길이, F_o 는 $F_o = U_o / (g'h)^{1/2}$ 라 정의되는 유입밀도 후르드수(inflow densimetric Froude number), F 는 $F = U_o / (g'h)^{1/2}$ 라 정의되는 후르드수(Froude number)이고 속도비 R 는 유입유체의 속도와 가로흐름의 비($R = U_o/U_o$)이다.

무차원밀도차이 $\Delta \rho / \Delta \rho_o$ 는 회석 S 로 정의되어 지며 이는 무차원온도차이 $\Gamma = (T_o - T) / (T_o - T_s)$ 의 함수이므로 식(2-4)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Gamma &= (T_o - T) / (T_o - T_s) \\ &= f_{13}(F_o, F_o R^{1/2}, B/l_b, x/l_b, y/l_b, z/l_b) \end{aligned} \quad (2-5)$$

여기서 T_o 는 유입유체의 온도, T_s 는 주변수역의 온도, T 국부온도이며 식(2-11)이 부력젤에 있어서 무차원온도차이 Γ 에 대한 함수식이다.

젤흐름방향에 있어서 각 단면의 무차원평균온도차이 Γ_o 는 횡방향거리와 연직방향거리의 항은 무시되므로 식(2-11)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma_o = (T_o - T_o) / (T_o - T_s) = f_{13}(F_o, F_o R^{1/2}, x/l_b) \quad (2-6)$$

3. 실험장치 및 방법

실험은 길이 500cm, 깊이 20cm, 폭 60cm의 수로에서 수행되며 그림 1과 같다. 가로흐름의 유량은 0 - 30 m³/h의 범위인 rotometer, 젤유량은 0 - 10 LPM (liter/minute) 범위의 rotometer를 이용하여 측정하였고 가로흐름의 유속은 측정된 유량-단면비 및 표면유속을 통하여 획득하였고 젤방류속도는 측정된 유량과 단면비로 획득하였다.

본연구에서는 수용수역보다 높은 온도의 물을 방류하므로써 부력젤을 발생시켰으며 온도측정은 지름 3 mm의 PT형 온도계(thermistor)를 사용하였으며 channel 자동기록기에 연결시켜 측정된 온도

를 기록했다.

본연구에서 주변수역과 유입유체와의 온도차 ΔT 는 0 - 20℃이고, 방류구의 구조(방류구 높이, 폭, 돌출길이)와 유입특성(운동량, 부력)을 변화시키면서 여러 방류조건에 대해 실험을 수행하였다.

4. 결과 및 분석

4-1. 흐름양상

그림 2에서 운동량젤은 젤과 주변유체의 온도차가 거의 없어 부력이 무시되므로 젤흐름은 운동량에 의해서만 지배받으며 젤흐름은 벽면에沿해서 계속 이동하며 젤의 흐름단면은 거의 일정하다(그림 2-b). 부력젤은 젤흐름이 운동량과 부력의 영향을 모두 받는 경우로서 젤흐름은 벽면에沿해서 이동하다 일정지점에 이르러서는 벽면에서 이탈하는 현상이 발생하고 젤흐름은 부력에 의해 상승하므로 젤흐름단면의 형상이 달라지게 된다(그림 2-a). 그림 3은 x-y 방향의 온도분포를 나타낸 것으로 그림 (2-a)의 흐름을 나타낸다. 젤의 경계는 유입구에서의 무차원온도차이 Γ_0 의 10%로 정의하였다.

그림 4는 지점 흐름단면에서의 무차원온도차이 Γ 를 나타낸 것으로서 흐름방향에 따른 젤흐름단면의 변화를 나타낸다. 방류구 직하류인 $x = 0.2$ cm 지점(그림 4-a)에서는 유입운동량의 영향이 부력의 영향에 비해 비교적 커서 젤흐름단면이 비교적 일정하지만 하류로 갈 수록 ($x = 7, 15, 30$ cm 지점, 그림 4-b, c, d) 유입운동량은 점차 감소하고 부력의 영향이 증대하므로서 젤흐름은 상승하여 젤흐름단면이 횡방향으로 점차 퍼지는 현상을 보여준다. $x = 50$ cm(그림 4-e)지점에 이르러는 유입운동량은 완전히 소멸되어 젤흐름은 부력과 가로흐름의 영향만을 받게되어 수면으로 완전히 퍼진 현상을 보이며 수로의 내측으로부터 젤흐름의 이탈현상을 보여준다.

4-2. 귀환거리와 두께

그림 5와 6은 운동량젤에 있어서 식(2-2)에 대한 H_i, H_0, L_i, L_0 의 실험결과를 나타낸 것으로 각각 다음과 같은 멱법칙으로 나타낼 수 있다.

$$H_0/l_* = 0.52 (l_*/B)^{-0.66} \quad (4-1)$$

$$H_i/l_* = 0.37 (l_*/B)^{-0.41} \quad (4-2)$$

$$L_0/l_* = 2.09 (l_*/B)^{-0.55} \quad (4-3)$$

$$L_i/l_* = 1.42 (l_*/B)^{-0.55} \quad (4-4)$$

여기서 L_i 는 귀환의 내측거리, L_0 는 외측거리, H_i 는 귀환의 내측두께, H_0 는 외측두께이다.

그림 7은 부력젤의 경우에 있어서 귀환거리 $L = (L_0 + L_i)/2$ 에 대한 실험자료를 식(2-3)을 이

용하여 무차원 귀환거리 L/l_0 과 l_b/l_0 의 관계를 나타낸것으로 무차원 귀환거리와 두께 L/l_0 는 다음과 같은 l_b/l_0 의 멱법칙으로 나타낼 수 있으며 다음식으로 표현된다.

$$L/l_0 = 7.0 (l_b/l_0)^{-0.5} \quad (4-5)$$

4-3 회석 흐름단면에서 각 단면의 평균온도는 한 단면에서 30 X 6 (180개) 지점의 온도계 (thermistor)로부터 획득된 온도자료를 이용하여 Γ_0 의 10%를 부력젤의 경계로 취한 후 10%간격으로 무차원온도차이곡선(dimensionless temperature difference contour)을 그린 후 각 온도선간의 면적을 획득하여 각각의 면적에 대한 가중평균을 구하므로써 획득되었다.

$$\Gamma_n = (\sum \Gamma_i A_i) / \sum A_i \quad (4-6)$$

여기서 Γ_i , A_i 는 Γ_0 의 각 10%간격 간의 무차원온도차이와 면적이다.

그림 8는 식(2-12)와 식(4-6)을 이용하여 흐름단면에서 측정된 젤흐름단면 내 평균온도의 무차원온도차이 Γ_n 를 무차원흐름방향거리 x/l_0 에 대해 나타낸 것으로서 $x/l_0 > 1.0$ 의 경우와 $x/l_0 < 1.0$ 의 경우에 있어 각각 다음과 같은 멱법칙으로 표현할 수 있다.

$$\Gamma_n = 0.19 (x/l_0)^{-0.45} \quad , \quad x/l_0 < 1.0 \quad (4-7)$$

$$\Gamma_n = 0.19 (x/l_0)^{-0.15} \quad , \quad x/l_0 > 1.0 \quad (4-8)$$

본연구결과에 따르면 $x/l_0 = 1.0$ 을 전, 후로 Γ_n 의 기울기의 변화를 나타내는 것으로 미루어 보아 $x/l_0 < 1.0$ 은 부력지배근역(buoyancy dominated near field), $x/l_0 > 1.0$ 은 부력지배원역(buoyancy dominated far field)으로 판단된다.

그림 9는 평균수심폭(depth average width, 그림 2에 표시)과 흐름방향거리의 관계를 나타낸 것으로 무차원평균수심폭 r/H_0 는 무차원흐름방향거리 x/L_0 의 멱법칙을 따르며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$r/L_0 = 1.60 (x/L_0)^{0.23} \quad (4-9)$$

여기서 평균수심폭 r 는 $r = \sum A_i / h$ 로 정의되며 h 는 수로의 수심이다.

그림 10은 무차원흐름방향거리 x/L_0 에 따른 유입구의 무차원온도차이와 각 흐름단면에서의 무차원평균온도차이의 비, $(\Gamma_n U_0 h H_0) / (\Gamma_0 Q_0)$ 를 나타낸 것으로 다음식으로 표현된다.

$$(\Gamma_n U_0 h H_0) / (\Gamma_0 Q_0) = 0.7 (x/L_0)^{-0.23} \quad (4-10)$$

그림 11는 부력젤의 특성에 따른 귀환 발생여부를 나타낸 것으로 속도비 R 와 $F_0 F$ 의 관계를 도기한 것으로서 본연구의 범위내에서는 속도비 $R = 4.0$ 을 전, 후하여 귀환 발생 여부를 판별할 수 있

있으며 $R < 4.0$ 때 귀환이 발생하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 운동량결의 경우 무차원귀환거리와 두께 L/l_0 과 H/l_0 는 운동량특성길이와 수로폭의 비 l_0/B 의 멱법칙으로 부력결의 경우 무차원귀환거리 L/l_0 는 부력특성길이와 운동량특성길이 비 l_0/l_0 의 멱법칙을 따른다.
- 2) 부력결의 흐름은 부력지배근역과 부력지배원역으로 구분할 수 있으며 각흐름 단면에서 무차원평균온도차이 Γ_0 은 부력지배근역 $x/l_0 < 1.0$ 에서는 x/l_0 의 -0.45 제곱, 부력지배원역, $x/l_0 > 1.0$ 에서는 -0.15 제곱에 비례한다.
- 3) 부력결 각 흐름단면에서의 무차원평균수심폭 r/H_0 와 무차원온도차이의 비 $(\Gamma_0 U_0 h H_0) / (\Gamma_0 Q_0)$ 는 무차원흐름방향거리 x/L_0 의 멱법칙을 따르는 것으로 나타났다. 귀환의 발생여부는 부력결의 속도비 $R (= U_0/U_0)$ 에 좌우되며 본 연구에서는 $R > 4.0$ 일 때 귀환이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- Chu, V. H., Abdelwahed, M. S. T., Shore attachment of buoyant effluent in strong cross flow, J. Hyd. Eng. ASCE, Vol. 116, No. 2, 1990, pp. 157-175.
- Motz, L. H., Benedict, B. A., Surface Jet Model for Heated Discharges, J. HY. Div., ASCE, Vol. 98, No. HY1, 1972, pp. 181-199.
- Rajaratnam, N., Turbulent jets, Vol. 5, in developments in water science, Elsevier scientific pub. Co., Amsterdam, 1976.
- 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.
- Wright, S. J., Mean behavior of buoyant jets in a cross flow, J. Hyd. Div., ASCE, Vol. 103, No. HY5, 1977.

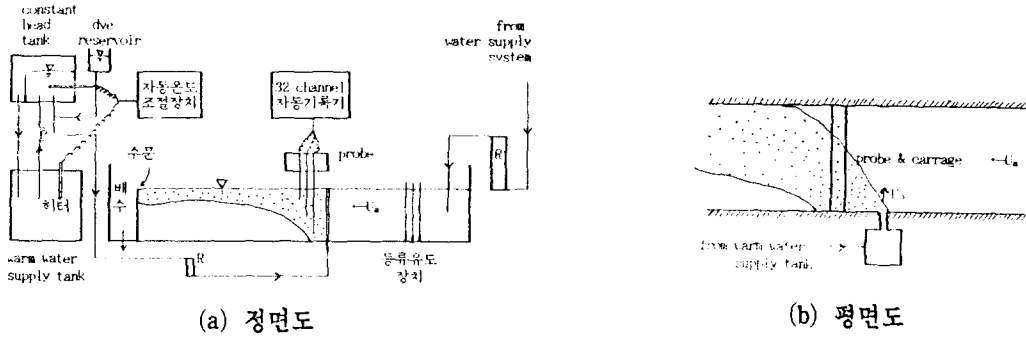


그림 1. 실험장치

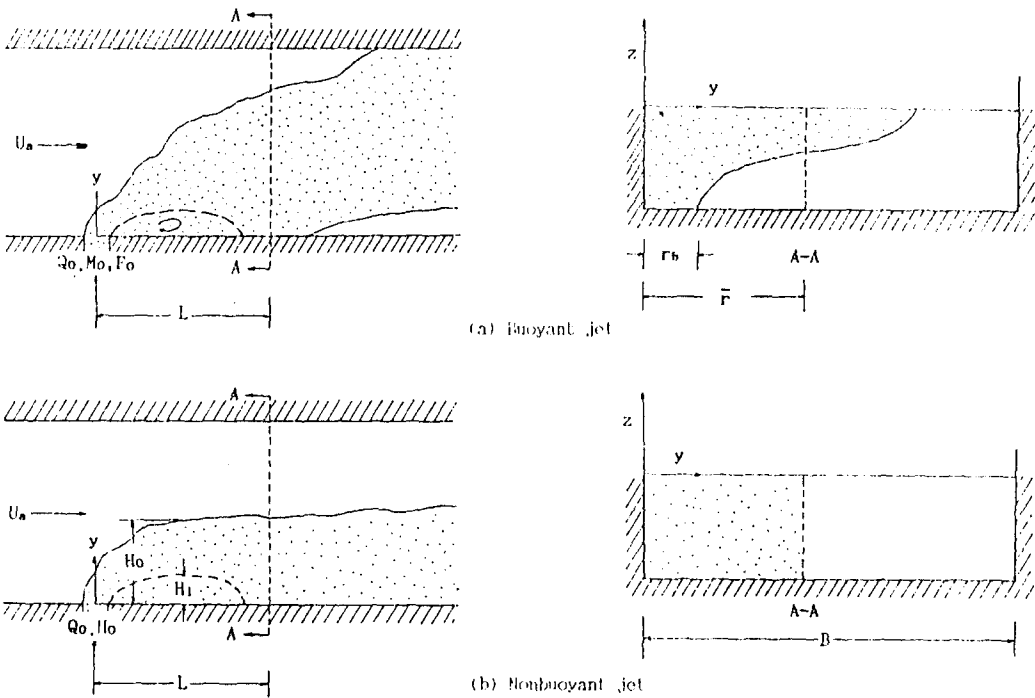


그림 2. 흐름양상

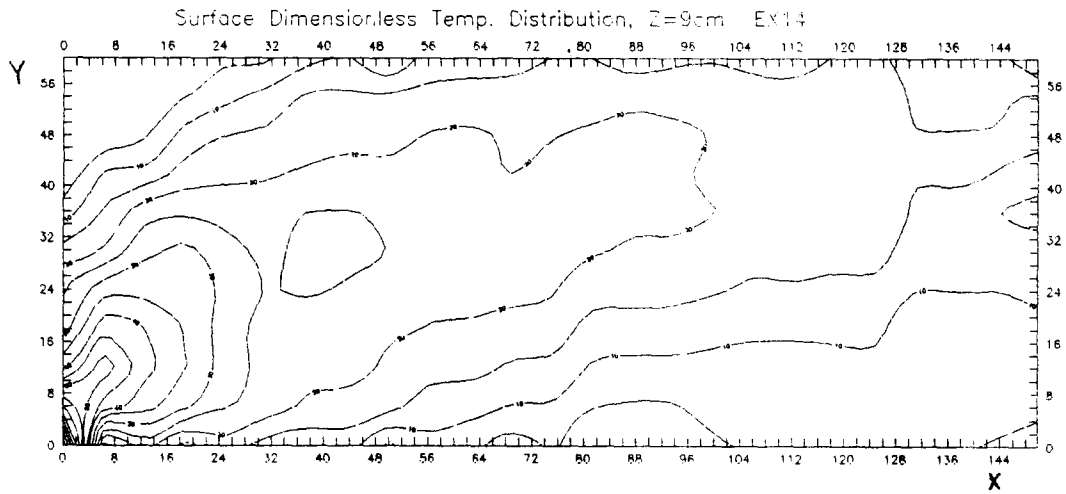


그림 3. $F_0=1.88$ 때 $z = 9$ cm에서 무차원온도차이 $\Gamma [= (T-T_s) / (T_0-T_s)]$

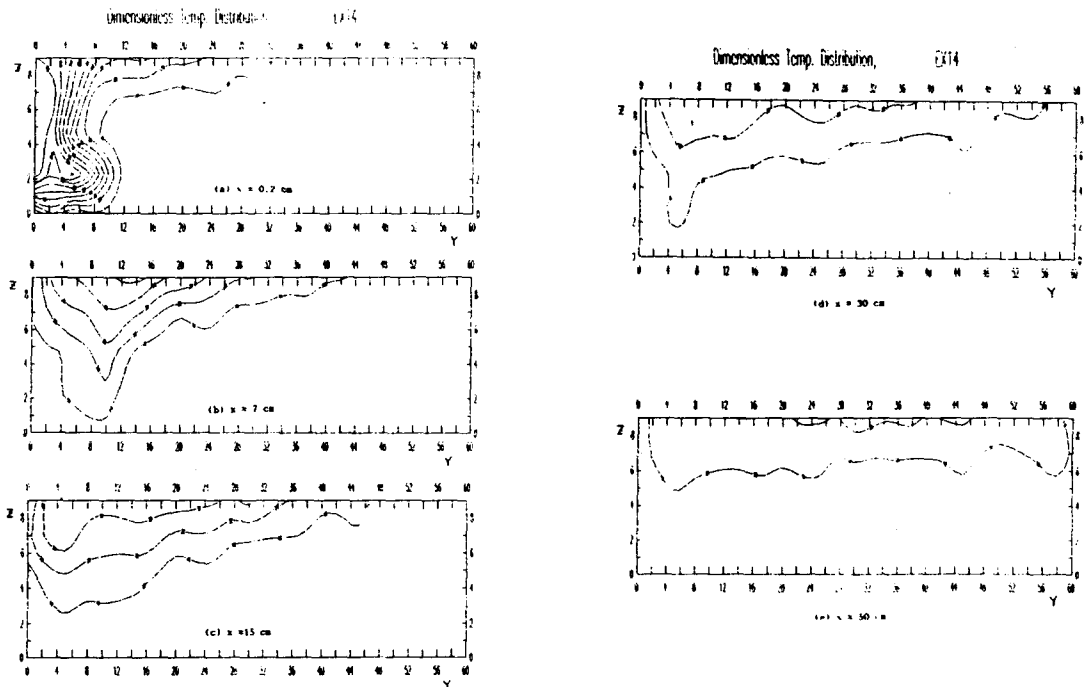


그림 4. $F_0=1.88$ 때 젤흐름의 각단면에서 무차원온도차이 $\Gamma [= (T-T_s) / (T_0-T_s)]$

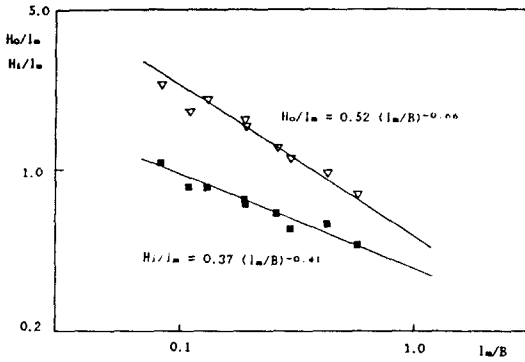


그림 5. H_0/l_m 및 H_i/l_m 과 l_m/B 의 관계 (운동량젤)

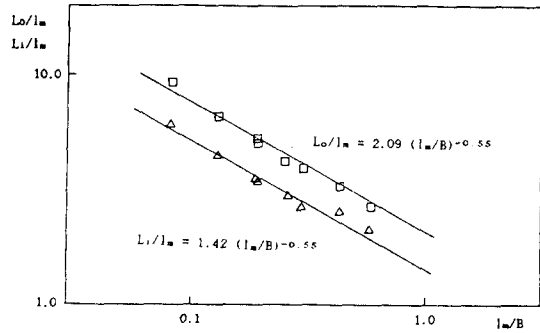


그림 6. L_0/l_m 및 L_i/l_m 과 l_m/B 의 관계 (운동량젤)

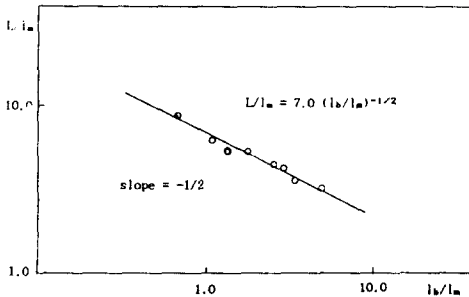


그림 7. L/l_m , l_b/l_m 의 관계 (부력젤)

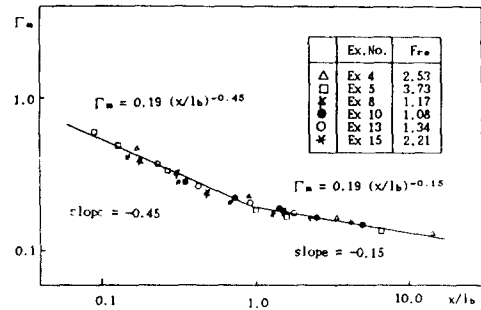


그림 8. 무차원흐름방향 x/l_b 에 대한 무차원평균온도차이 Γ_m

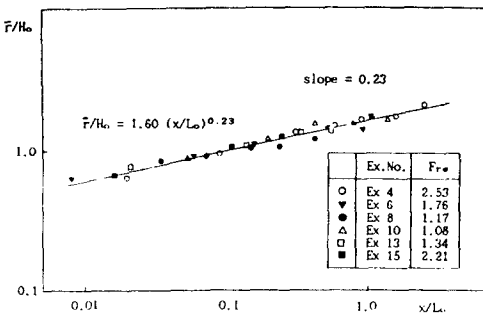


그림 9. 무차원흐름방향 x/L_0 에 대한 무차원평균수심폭 r/H_0

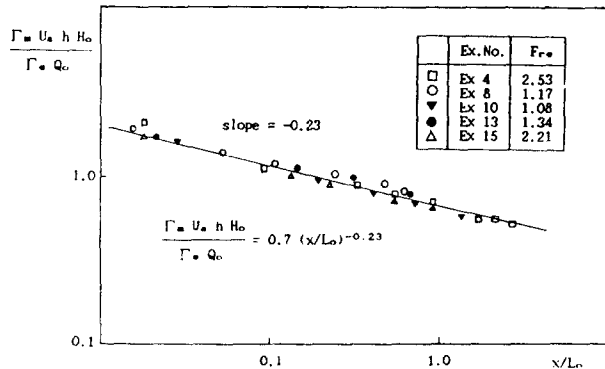


그림 10. 무차원흐름방향 x/L_0 에 대한 무차원온도 차이비 $(\Gamma_m U_m h H_0) / (\Gamma_0 Q_0)$

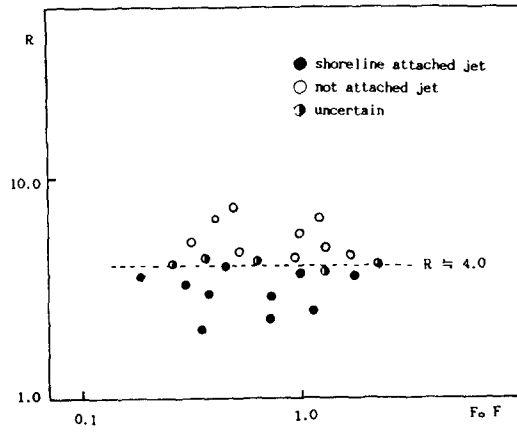


그림 11. 속도비 R와 $F_o F$ 의 관계