

정체수역에 수평으로 방류되는 부력제트의 궤적식

○여홍구, 서일원, 이동섭, 류시완

1. 서 론

하수방류시스템에 사용되는 다공확산관의 경우 대부분 양방향 확산관으로 분류되며, 이는 4~8개의 방류포트가 연직유도관에 다방향으로 부착되어 있기 때문에 방류수가 확산관 축에 대하여 일정한 각을 갖고 수평으로 방류된다. 이러한 확산관의 해석은 연직유도관 간의 거리가 충분히 확보되거나 수심이 얇아 서로 병합이 이루어지지 않을 경우 단일 부력 제트로 해석하며, 병합이 발생할 경우 선플룸으로 흔히 해석한다. 따라서 대부분 얇은 수심에 설치되고 4공형태의 연직유도관을 갖는 국내 하수확산관의 해석시 올바른 해석을 위해서는 병합거동의 예측이 필요하다. 본 연구에서는 성층화가 발생하지 않은 정체수역에 대한 확산관 실험을 통하여 플룸의 궤적식을 구하고 이를 이용하여 병합위치를 제시 하였다.

2. 연구동향

수평방류되는 부력제트에 대한 연구로는 Abraham(1965), Fan(1967), Anwer(1969), Fan and Brooks(1969) 등이 실험 및 수치해석을 이용하여 수행하였다. Chan과 Kennedy(1975)는 충분히 큰 방류 운동량을 갖는 경우에 대하여 궤적의 거리 증가분이 수평방향의 거리증가분과 같다고 가정하고, 유입계수를 이용하여 적분을 수행하여 회석률 및 궤적식을 구하였다. Sobey 등(1988)은 얇은 수심의 효과에 관심을 갖고 바닥 및 자유수면의 위치에 따른 영향을 연구하였으며, Davidson(1989)은 병합과정에 관심을 갖고 일렬배치된 다공확산관의 수평방류에 대하여 수치해석 및 실험을 수행하였다. Pun 등(1999)은 부력제트의 영역을 운동량이 지배적인 제트영역과 부력이 지배적인 플룸영역으로 구분하고, 각각의 영역에서 주 운동방향의 운동량과 궤적을 편향시키는 방향의 운동량을 고려하여 궤적식을 구하였다.

* 서울대학교 대학원 토목공학과 박사수료

* 서울대학교 토목공학과 부교수

* 서울대학교 대학원 토목공학과 석사과정

* 서울대학교 대학원 토목공학과 박사수료

3. 이론적 연구

3.1 궤적식

수평으로 방류되는 부력제트는 초기의 방류운동량과 부력의 상대적인 효과에 따라 제트의 궤적이 휘게 된다. 따라서 단일 수평부력제트의 경우 궤적을 지배하는 주요 물리량은 방류운동량과 부력을 들 수 있으며, 이들 주요 물리량을 이용하여 차원해석을 하고 운동량과 부력의 상대적인 영향을 나타내는 길이척도를 사용하면 다음과 같은 함수의 형태로 표현된다.

$$\frac{z}{L_M} = f\left(\frac{x}{L_M}\right) \quad (1)$$

여기서 $L_M = M_0^{3/4} / J_0^{1/2}$, x 는 궤적의 진행방향 수평거리, z 는 수심방향의 연직거리이다. 수평으로 방류되는 단일 부력제트 궤적의 형태는 다음과 같이 지수함수로 표현할 수 있고,

$$\frac{z}{L_M} = \alpha \left(\frac{x}{L_M}\right)^\beta \quad (2)$$

이는 다시 방류밀도프루드수로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{z}{d} = \alpha \left(\frac{\pi}{4}\right)^{\frac{1}{4}(\beta-1)} F_j^{1-\beta} \left(\frac{x}{d}\right)^\beta \quad (3)$$

여기서 d 는 방류포트의 직경, F_j 는 방류밀도프루드수로서 다음과 같이 정의된다.

$$F_j = \frac{U_0}{\sqrt{g_0' d}} \quad (4)$$

3.2 병합위치

1) 연직유도관 간의 병합

Fig. 1과 같이 확산관 축으로부터 일정한 각 θ 를 갖고 수평으로 방류되는 다공확산관의 경우 궤적이 진행하는 수평방향 거리를 x , 축방향 이동거리를 ζ , 연직유도관의 직경을 D 라 하면 궤적의 확산관 축방향 이동거리는 $(x + D/2) \cos \theta$ 이다. 각 방류포트로부터 방류되는 제트의 운동량이 부력에 비해 큰 경우에는 인접한 연직유도관의 서로 마주보는 포트에서 방류된 제트들이 병합하게 된다. 따라서 부력제트의 인근 유도관 간의 병합위치를 개별제트의 중심선이 교차하는 위치로 선정하면 $x_m = l / (2 \cos \theta) - D/2$ 인 지점에서 서로 만나게 된다. 따라서 식 (3)으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{z_m}{d} = \alpha \left(\frac{\pi}{4}\right)^{\frac{1}{4}(\beta-1)} F_j^{1-\beta} \left(\frac{l}{2 \cos \theta \cdot d} - \frac{D}{2d}\right)^\beta \quad (5)$$

2) 연직유도관 내의 병합

방류포트에서 방류되는 제트의 운동량이 작은 경우에는 하나의 연직유도관 내의 서로 다른 방류포트에서 방류되는 제트 간의 병합이 발생하게 된다. 그러나 이 경우 하나의 연직유도관 내의 개별제트들은 서로 중심선은 교차하지 않고, 반폭이 서로 병합되게 된다. 따라서 연직유도관내의 병합은 Fig. 2와 같이 주변수 유입에 의해 개별 제트들의 단면폭이 확장되어 서로 병합을 이루게 된다.

케적의 진행방향 x 축상의 임의의 위치에서 케적의 반폭을 b 라하면 이때의 확산관축으로부터의 이탈거리는 $x \sin \theta$ 이다. 케적의 반폭은 케적의 이동거리에 비례하는 것으로 알려져 왔고 많은 연구자들은 각각 비례상수를 0.101~0.156의 값을 제시하였고 Fischer 등(1979)은 이들을 종합하여 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{db}{ds} = 0.127 \quad (6)$$

케적의 이동거리 s 는 중심선의 케적식으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$s = \int \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} dx = \int \sqrt{1 + C_1 x^{2(\beta-1)}} dx \quad (7)$$

여기서 $C_1 = \left[\alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right)^{\frac{1}{4}(\beta-1)} (dF_c)^{(1-\beta)} \right]^2$ 이다.

따라서

$$b = 0.127s \quad (8)$$

이고, 축에 대한 제트케적의 이탈거리가 반폭 b 와 같아지는 점에서 병합이 시작된다. 이경우의 병합조건은 다음과 같다.

$$x_m \sin \theta = b \quad (9)$$

따라서 병합의 시작높이는 식 (9)를 만족하는 x_m 을 식 (3)에 대입하여 구할 수 있다.

4. 확산관 실험

실험은 Fig. 3에 도시한 바와 같은 길이 15.5m, 폭 4.9m, 높이 0.6m의 수로부를 갖는 실험 수조에서 단일 방류공 및 다공확산관의 수리실험을 수행하였으며 방류수로서 온수를 이용하여 밀도차이를 재현하였다.

Fig. 4에 본 연구에서 얻은 실험자료와 회귀식, 그리고 Davidson(1989)의 실험자료를 함께 도시하였다. 실험으로부터 얻은 식(2)의 계수 값은 $\alpha = 0.051$, $\beta = 3$ 으로써 수평으로 방류되는 단일 부력제트의 케적식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{z}{L_M} = 0.051 \left(\frac{x}{L_M} \right)^3 \quad (10)$$

식 (10)의 관계를 이용하여 방류밀도 Froude 수로 표현하면 식(3)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{z}{d} = 0.058 F_j^{-2} \left(\frac{x}{d} \right)^3 \quad (11)$$

구해진 궤적식을 이용하여 인근 연직유도관의 방류포트간 병합위치를 구하면 식 (5)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{z_m}{d} = 0.007 F_j^{-2} \left(\frac{l}{d \cdot \cos \theta} - \frac{D}{d} \right)^3 \quad (12)$$

하나의 연직유도관내의 병합은 식(9)의 조건으로부터 구할 수 있다. 이때 궤적의 이동거리 s 를 나타내는 식 (7)의 계수는 실험으로부터 구한 식 (11)을 이용하면 다음과 같다.

$$C_1 = 0.0303(dF_j)^{-4} \quad (13)$$

Fig. 5는 하나의 연직유도관에서의 수심별 초과등온도선도를 반쪽까지만 도시한 것으로 수심이 증가 함에 따라 점차 병합되는 과정을 보여주고 있다. 그리고 Fig. 6에 식 (12)로 표현되는 인근 연직유도관 간의 병합높이와 식(13)을 이용하여 계산한 하나의 연직유도관내의 병합높이를 실험자료와 함께 도시하였다. 이에 따르면 예측식이 전반적으로 실험결과보다 병합지점을 과대평가하는 경향을 보인다. 그리고 문헌에서 제시한 값보다 궤적의 이동거리에 따른 반폭증가율이 크게 나타난다.

참고문헌

- Abraham, G. (1965). "Entrainment Principle and Its Restrictions to Solve Problems of Jets." *Journal of Hydraulic Research*, 3(2), 1-23.
- Anwar, H. O. (1969). "Behavior of Buoyant Jet in Calm Fluid." *Journal of the Hydraulics Division*, 95(HY4), 1289-1303.
- Chan, D. L. and Kennedy, J. F. (1975). "Submerged Buoyant Jets in Quiescent Fluids." *Journal of the Hydraulics Division*, 101(HY6), 733-747.
- Davidson, M. J. (1989). "The Behaviour of Single and Multiple, Horizontally Discharged, Buoyant Flows in a Non-turbulent Coflowing Ambient Fluid," Doctor of Philosophy in Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch New Zealand.
- Pun, K. L., Davidson, M. J. and Wood, I. R. (1999). "Momentum-based Solutions for Buoyant Jet Trajectories in Still and Flowing Ambient Fluids." *Proceedings of the Second International Symposium on Environmental Hydraulics*. 135-140.
- Sobey, R. J., Johnston, A. J., and Keane, R. D. (1988). "Horizontal Round Buoyant Jet in Shallow Water." *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8), 910-929.

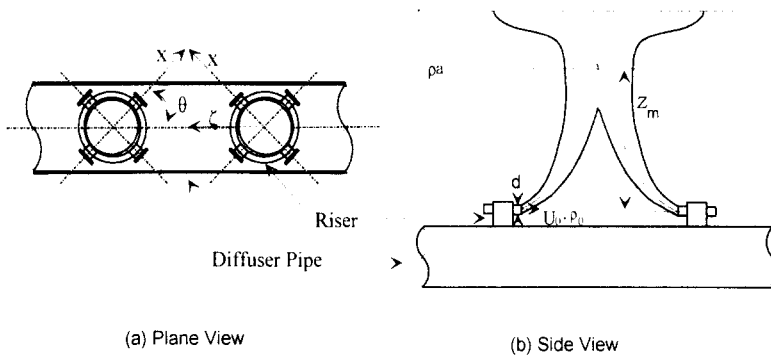


Fig. 1 Schematics of the Merging between the Risers

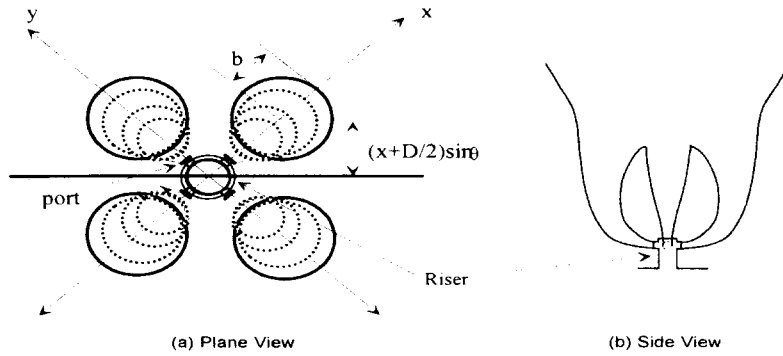


Fig. 2 Schematics of the Merging in a Riser

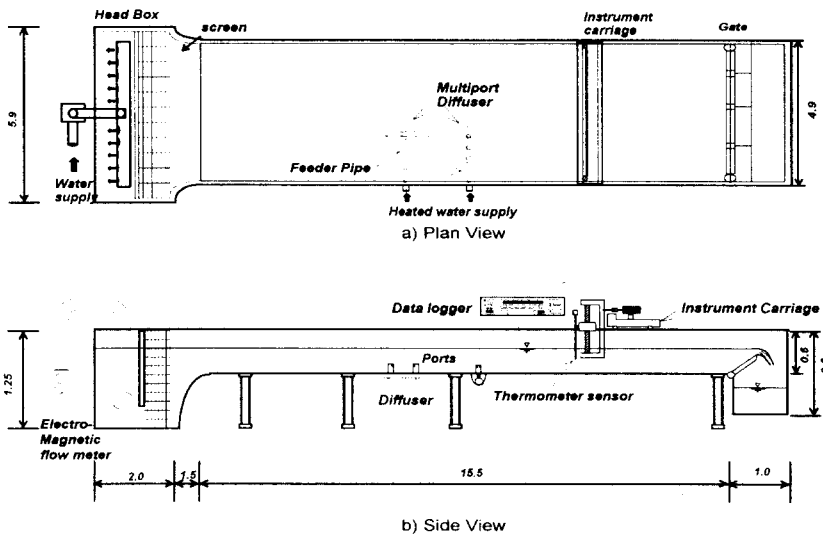


Fig. 3 Experimental Setup(unit : m)

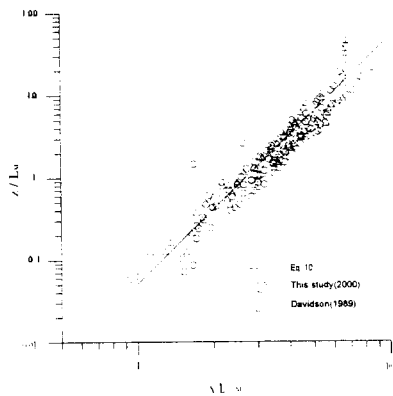


Fig. 4 Trajectory of a Horizontal Buoyant Jet in Stagnant Water

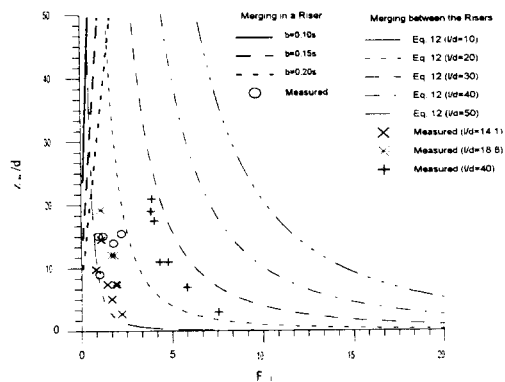
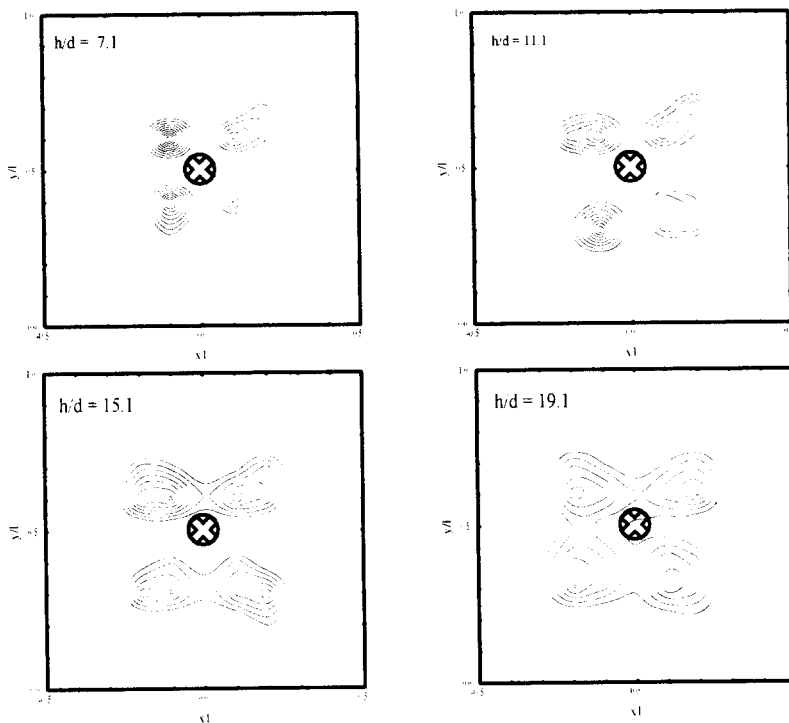


Fig. 6 Variation of Merging Height with respect to Densimetric Froude Number



PM4 ($F_j = 1.19$)

Fig 5 Excessive Isothermal Line in a Riser