

밀도류 거동의 특성연구

Experimental and Numerical Research of Density Current

윤태훈* · 권문혁**

Yoon, Tae Hoon · Kwon, Moon Hyuck

1. 서론

밀도의 차이를 갖는 유체가 정지수역으로 유입될 때 유입하는 유체와 정지수역의 유체사이의 밀도차에 의해 형성되는 흐름을 밀도류라한다. 이때 유입수의 운동에너지가 바닥전단력이나 두 유체간의 전단력에 의해 완전히 소멸될 때까지 정지수역의 유체를 밀면서 이동하게 되는데 이러한 밀도류의 거동에 있어서 밀도의 구조, plunge point 그리고 밀도류의 전개속도는 중요한 문제로 제기된다.

밀도가 큰 유체가 유입할 경우 유입유체는 음부력(negative buoyancy)에 의해 바닥으로 침강하면서 이동하게 되는데 이러한 밀도류를 특히 바닥밀도류(bottom current)라하며 이러한 높은 밀도는 차가운 유입수나 dissolved material 에 의해 발생하며 이러한 바닥밀도류는 강물이 저수지의 물보다 상대적으로 빨리 냉각하는 가을이나 탁류의 경우에 흔히 발생한다. 밀도류 거동에 관한 연구는 지금까지 많은 연구자들에 의해 실험적, 이론적인 방법으로 연구가 진행되어 왔으며 실험은 크게 밀도가 높은쪽의 수문을 Beghim(1981) 나 Hallworth(1993)처럼 순간적으로 개방하거나 Britter and Linden(1980) 과 Nagata(1968)처럼 연속적인 유량공급을 함으로써 행해졌으며, 본 연구에서는 수문을 순간적으로 개방하면서 실험을 진행하였다.

본 연구에서는 밀도류의 거동특성을 파악하기 위하여 수리모형실험과 수치모형실험을 병행하여 수행하였다. 수리모형실험을 위하여 밀도류의 거동을 시각적으로 관찰할 수 있게 투명한 수조를 제작하였으며, 수조의 상단부에는 유체를 저장할 수 있는 저수조를 두었다. 모든 실험은 디지털 카메라로 촬영하여 실험결과와 분석과 자료의 보존을 용이하게 하였다.

본 실험에서는 밀도가 큰 유체의 용량, 수위 그리고 정지수역과의 밀도 차이를 변화시켜 각각의 인자들이 밀도류의 거동에 어떠한 영향을 미치는가에 관해 관찰하였다

소금물(밀도가 큰 유체)의 용량을 일정하게 한 후 소금물의 밀도만을 변화시켰을때 밀도류 전면부의 속도는 밀도차의 증가함에 따라 증가함을 보였으며, 밀도차이를 일정하게 하고 수심을 변화시켰을 경우 전면부의 유속은 수심에 1/2승하여 증가함을 보였다. 또한 소금물의 용량 차이에 따른 밀도류 전면부의 속도의 변화에 대한 관찰이 수행되었으며, 각각의 경우에 밀도층 두께의 변화를 관찰하였다. 위의 실험을 통해 밀도류의 전면부 진행속도는 유입밀도 후르드수 (Fr_e)의 함수임을 알 수 있었다.

또한 본 연구에서는 밀도류의 거동을 설명하는 지배방정식(연속방정식, 운동량방정식, 추적물보전식)을 유한차분법을 이용하여 흐름은 2차원 비압축성, 자유수면은 연직변화가 없으며 수평 및 연직방향 추적물확산계수는 같으며 상수로 가정하고 상대밀도차이는 밀도의 변화가 중력항에만 고려되는 Boussinesq 가정하에 연직 2차원 수치모형실험을 수행하였다. 수치모형실험에서는 수리모형실험에 의해 얻어진 밀도류의 거동에 영향을 미치는 인자들이 바닥밀도류의 거동특성 즉, 밀도류 전면부의 진행속도, 밀도층 두께에 어떠한 영향을 미치는가를 예측할 수 있다.

* 한양대학교 토목공학과 교수

** 한양대학교 토목공학과 석사과정

2. 본 론

2.1 밀도류 유속식의 유도

밀도가 작은 유체의 길이가 유한한 경우에 밀도가 작은 유체와 큰 유체사이에는 상호 침투가 이루어 지는데 이는 그림1과 같은 형태로 진행하게 된다.

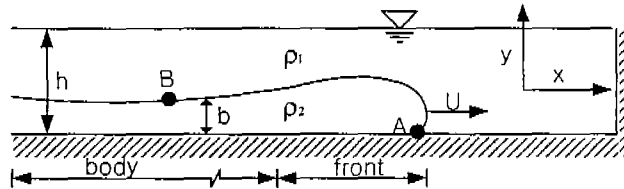


그림 1 밀도류의 진행과정

에너지 보존법칙에 적용하면 밀도가 낮은 밀도류 유속식을 얻을 수 있다.

$$V = k \sqrt{\frac{gh(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_2 + \rho_1}} \quad (1)$$

2.2 수리모형실험 방법 및 결과

본 실험에 사용된 수조는 밀도류의 거동을 시각적으로 확인할 수 있는 투명한 수조로 제작되었으며 수조의 상단부에는 소금물을 저장할 수 있는 저수조와 소금물의 용량 차이를 두기 위해 4개의 sliding lock gate를 제작하였다. 또한 소금물과 담수는 sliding lock gate로 분리되어 있으며 각각의 수심은 같고 lock gate의 개방은 순간적으로 이루어 졌다. 모든 실험은 디지털카메라로 촬영하여 실험결과 분석을 용이하게 하였다. 본 연구에서는 소금물의 용량차이를 두어 그림1과 그림2 조건을 모두 만족하도록 하였다. 실험은 크게 3가지의 경우로 구분하여 이루어졌으며, 소금물의 용량 (V_s), 수위(h) 그리고 담수와의 밀도차이 ($\Delta\rho$)를 변화시켜 실험하였다. 본 실험을 통하여 각 인자들이 유속에 어떠한 영향을 미치는가를 관찰하고 상호연관 관계를 도출 밀도류 유속식의 계수산정을 그 목적으로 한다.

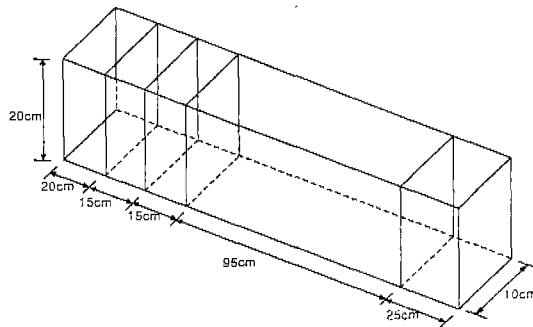


그림 2 수리모형실험 장치

1) 소금물의 용량을 일정하게 한 후, 소금물의 밀도를 변화시켰을 때 유출부로부터 밀도류의 수심(h)에 대한 전면부(x)까지의 무차원거리(x/h)에 따른 밀도류 전면부의 유속(V)과의 관계를 그림3에 나타냈으며 유입부

로부터의 거리가 증가함에 따라 속도가 감소함을 알 수 있다. 이는 밀도류 전단부의 흐름은 부등류임을 잘 보이고 있다. 밀도차 ($\Delta\rho$)가 증가함에 따라 유속 또한 증가함을 그림3에서 볼 수 있다.

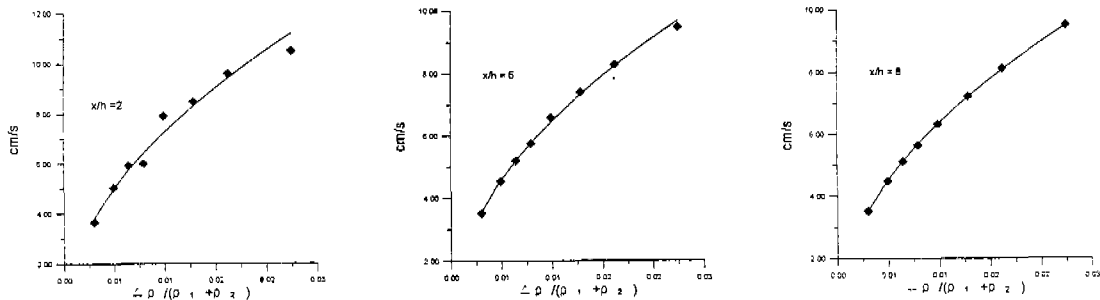


그림 3 상이한 거리에서 밀도차이에 대한 전면부 유속

그림4는 용량 ($V_s = 1350\text{cm}^3$)을 일정하게 한 후 소금물의 밀도변화를 주어 밀도차에 따른 유입부로 부터의 무차원거리(x/h)와 무차원시간($T = \sqrt{\frac{g\Delta\rho}{h(\rho_1 + \rho_2)}}t$)과의 관계를 도시한 것으로 밀도류의 평균 유속을 나타냈다. 또한 본 실험의 결과와 Yih(1947)의 실험 결과치를 비교한 것으로 Yih의 실험결과와 매우 유사한 결과를 나타낸다.

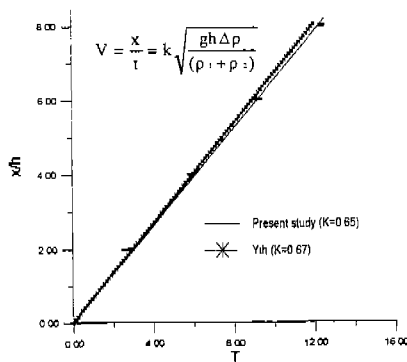


그림 4 전면부의 이동시간과 거리관계

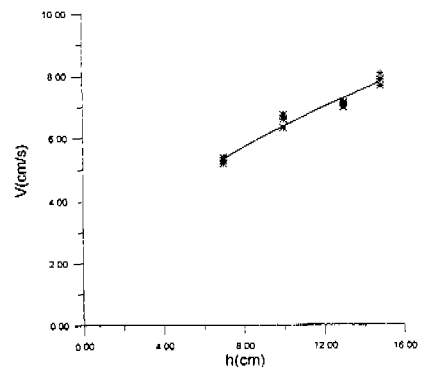


그림 5 수심(h)에 대한 전면부 유속(v)

2) 밀도차이 ($\Delta\rho = 20\text{ kg/m}^3$)를 일정하게 한 후 수심(h)을 변화시키면서 유속을 관찰하였으며 결과는 그림5에서 볼 수 있다. 또한 회귀곡선을 그려보았을 때 유속이 수심에 1/2승하여 증가함을 알 수 있으며, 그림은 밀도차가 증가할수록 K값이 증가함을 보인다.

3) 그림 6은 밀도차를 16kg/m^3 로 일정하게 유지하고 소금물의 용량(V_s)의 변화에 따른 밀도류의 유속과의

관계를 유입구에서 밀도류 전면부까지의 무차원거리(x/h)와 무차원시간(T)과의 관계를 통해 밀도류 유속식을 유도했으며 계수산정의 결과를 나타낸 것이다. 또한 그림7은 밀도차를 20 kg/m³로 유지하였을 때 소금물의 용량이 증가함에 따라 k값의 변화를 보인 것이다. 이는 그림6과는 상이하게 소금물의 용량증가에 따라 k값이 감소함을 알 수 있는데 이는 밀도차가 증가할수록 밀도류의 유속이 빨라지므로 상대적으로 K값이 감소함을 알 수 있다.

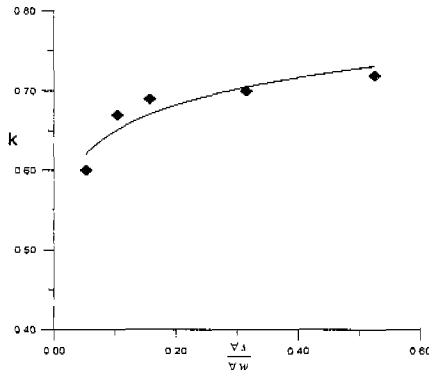


그림 6 소금물과 담수의 용량비 변화에 대한 k값($\Delta\rho=16\text{kg/m}^3$)

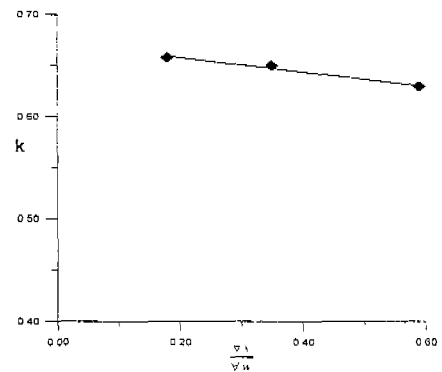


그림 7 소금물과 담수의 용량비 변화에 대한 k값($\Delta\rho=20\text{kg/m}^3$)

2.3 수치모형실험 및 결과

밀도류가 연속적으로 유입되는 현상을 고려하여 흐름해석은 2차원, 비압축성, 상대밀도 차이는 작아서 Boussinesq가정을 적용, 자유수면의 변화는 없으며 수평 및 연직방향 추적물확산 계수는 같다는 가정하에 다음과 같은 무차원 유함수-와도식을 이용 수치 계산하였다.

유함수-와도식

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = \Omega \quad (2)$$

와도보존식

$$\frac{\partial \Omega}{\partial T} + \left[-\frac{\partial}{\partial X}(U\Omega) + \frac{\partial}{\partial Z}(W\Omega) \right] = -\frac{1}{F^2} \frac{\partial \Gamma}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Z^2} \right] \quad (3)$$

추적물보존식

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial T} + \left[\frac{\partial}{\partial X}(U\Gamma) + \frac{\partial}{\partial Z}(W\Gamma) \right] = \frac{1}{\text{ScRe}} \left[\frac{\partial^2 \Gamma}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial Z^2} \right] \quad (4)$$

위 식은 유한차분법을 이용 차분하였으며, 차분에는 공간으로 중앙차분, 시간으로 전방차분, 비선형항에는 3점 비중앙차분기법을 사용하여 차분식으로 전개하여 유함수-와도-밀도차로부터 밀도류에 관한 수치해탈 얻었다. 유함수의 계산은 SOR방법, 그리고 추적물보존식은 음해법으로 차분한다.

여기서 Γ 는 무차원밀도차, Re는 Reynold수, F는 Froude수, Sc는 Schimdt수를 나타낸다. 이러한 무차원-와도식은 다음과 같은 경계조건을 적용하였다.

① 고체면 바닥

$$\Psi = \text{const.}, \quad \frac{\partial \Gamma}{\partial Z} = 0, \quad \Omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2}$$

② 자유수면

$$\Psi = \text{const.}, \quad \frac{\partial \Gamma}{\partial Z} = 0, \quad \Omega = 0$$

③ 유입구

$$\Psi = \Psi_e(Z), \quad \Gamma = \Gamma_e, \quad \Omega = 0$$

④ 정지수역 하류

$$\Psi = \Psi_\infty(Z), \quad \Gamma = 0, \quad \Omega = 0$$

그림8은 밀도차 ($\Delta\rho$)가 33kg/m^3 의 경우에 대한 수치해의 결과로서 무차원시간(T)에 따른 유함수의 분포를 나타낸 것으로 밀도류 유입으로 인한 바닥밀도류의 형성 및 순환을 보여준다. 이러한 순환현상은 밀도류가 진행하면서 정지수역의 유체와의 전단력으로 발생하는 것으로 시간이 증가함에 따라 와의 크기가 증가함을 볼 수 있다.



그림 8 시간변화에 대한 유함수

그림9는 밀도류 진행과정의 수치해 결과를 나타낸 것으로 head에서 밀도류의 두께가 크고 몸체로 갈수록 작아짐을 볼 수 있으며 이는 실험에 의한 것과 동일한 형태로 진행됨을 알 수 있다.

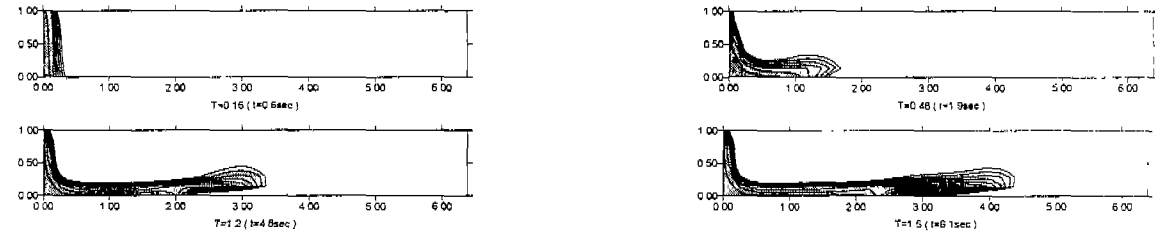


그림 9 시간변화에 대한 밀도류의 진행

3. 결론

본 연구에서는 밀도류의 유속에 영향을 미치는 인자들을 제시하고자 하였으며 인자들은 수위, 밀도차 그리고 소금물의 용량입을 밝힐 수 있었다. 또한 이들 인자가 유속에 어떠한 영향을 미치는가 대해서도 살펴볼 수 있었다. 유속은 수위와 밀도차에 1/2승 비례함을 알 수 있었고 또한 밀도가 큰 유체의 용량이 증가함에 따라 유속에 어떤 영향을 미쳤는가에 대해 알 수 있었다. 또한 이러한 인자를 이용하여 수치모형실험을 수행 밀도류의 진행과정을 예측할 수 있었다. 본 실험을 통해서 밀도류의 유속을 산정할 수 있으며 시간에 따른 밀도류의 유입 길이 산정을 가능하게 하였다. 밀도류의 거동연구를 통해 얻은 결과는 혼탁류에 대한 연구의 기초를 제공한다고 할 수 있겠다. 따라서 앞으로 본 연구를 바탕으로 혼탁류에서의 유사의 이송과 퇴적에 대해서도 연구가 이루어져야 할 것으로 사려된다.

참고문헌

1. Chia-Shun Yih, (1980), Stratified Flows. ACADEMIC PRESS
2. Water H. Graf, (1998), Fluvial Hydraulics. ACADEMIC PRESS
3. Gerhard H. Jirka(1990), Circulation in the Salt Wedge Estuary, Coastal and Estuarine Studies, Vol38
4. B.C.Kneller(1997), Velocity and turbulence structure of density currents and internal solitary waves
Sediment Geology Vol.112 pp.235-250