

소규모 저수지에서 밀도류의 거동 및 순환

The Behavior and Circulation of Density Current in a Small Reservoir

윤 태 훈* · 한 운 우**
Yoon, Tae Hoon · Han, Woon Woo

Abstract

The behavior of a negative buoyant flow flowing into a small reservoir is analysed by experiments and dimensional analysis. The nondimensional plunge point, head velocity, head travel distance and the dilution of density current are dependent on the inflow densimetric Froude number, Fr_e . The thickness of density current, flow pattern and density difference are different from two cases as follows; before the front of head arrive at the downstream end and after. Before the arrival, the thickness of density current is dependent on Fr_e and after the arrival, time and Fr_e . It was found that they can be expressed as power laws.

要 旨

음부력을 갖는 유체가 소규모 저수지로 유입되어 일어나는 밀도류의 거동 및 순환이 차원해석과 수리 실험을 이용하여 해석된다. 무차원침강점 및 밀도류전면속도, 밀도류전면이동거리, 머리 뒤의 밀도층내 회석 등은 유입밀도후르드수, Fr_e 의 영향을 받으며 밀도층의 두께, 흐름양상 및 저수지내 밀도의 변화는 밀도류전면이 하류단에 도달하여 반사되기 전과 후의 양상이 현저하게 다르다. 밀도층의 두께는 전자의 경우에는 Fr_e , 후자의 경우는 시간과 Fr_e 의 영향을 받으며 이들은 지수식으로 표현할 수 있다.

1. 序 論

상이한 밀도(또는 온도)를 갖는 유체가 저수지에 유입하면 유입흐름에 의하여 밀도류가 형성되며 저수지내에는 국부적으로 또는 저수지 규모가 작으면 전수역에 걸쳐 혼합과 순환이 일어나게 된다.

유입유체와 수용수의 밀도차이에 따라 밀도류는

바닥밀도류, 중간밀도류, 표면밀도류로 구분된다. 유입흐름의 온도가 수용수보다 낮거나 용해물 또는 고형부유물을 함유해서 밀도가 수용수보다 크게 되면 바닥에 침강하여 바닥밀도류(underflow, bottom flow)를 형성하며 수용수역이 밀도성층인 경우에는 유입흐름은 침강하여 밀도가 같은 층인 중립부력층(neutral buoyant level)에 정지하여 수평

* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 교수

** 정회원 · 한양대학원 토목공학과 박사과정

으로 퍼지는 내부(중력)흐름(중간밀도류, internal gravity current, interflow)을, 유입유체의 밀도가 수용수보다 작으면 표층류(표면밀도류, overflow)를 형성한다^[7, 11, 12, 18].

대댐의 방류구조는 일반적으로 선택인출(selective withdrawal)을 취하여 적정수온의 수심에서 방류가 가능하다. 그러나 선택인출 구조를 채택하지 않은 대댐에서는 하류에서 요구되는 적정수온의 방류가 불가능하다. 이러한 경우에는 댐 직하류에 온수지를 건설하여 하류에 방류되는 낮은 수온의 물의 온도 상승을 도모한다. 온수지 또는 역조정지와 같은 소규모 저수지의 수역은 밀도(또는 온도)가 균일하므로 유입흐름은 바닥까지 침강하여 바닥밀도류를 형성한다. 수공분야에서는 탁류나 저온수의 유입으로 저수지나 호수의 바닥밀도류, 내부흐름, 발전소나 오수방류와 같은 부력방류수, 하구에서 염수의 유입(염수쇄기), 눈이나 차가운 지면위를 흘러 냉각된 공기의 하강류, 더운 기단 아래의 한냉전선의 이동, 눈사태, 토석류(mud flow)등을 들 수 있다.

밀도류의 이론해는 아주 복잡해서 실제해석에서는 난류의 영향, 유입, 마찰을 나타내는 반경험적, 실험적 방법 등이 사용되어왔다. Ellison 과 Turner^[8]는 밀도류거동의 이해와 성층류에서 난류유입에 관하여 많은 기여를 하였으며 본 연구와 관련되는 밀도가 큰 유체의 유입에 의한 밀도류에 관한 연구가 현장^[9]과 실험실^[1, 2, 5, 7, 13, 14, 15, 16] 및 수치적^[10, 12, 15]으로 수행되었다.

바닥밀도류는 두가지 형태로 일어난다. 저수지나 호수에 하천이 유입되는 경우와 같이 완만한 경사수로 따라 밀도가 큰 유체가 유입되거나 염수쇄기와 같은 경우^[1, 2, 5, 16]와 관이나 인공수로를 통하여 저수지로 유입된 후 침강하여 바닥밀도류를 형성하는 경우이다^[12, 15]. 본 연구에 해당하는 후자의 경우 초기운동량으로 수평운동이 진행되는 과정에서 추력(driving force)과 저항력이 같게되는 힘의 평형이 이루어진다. 이 힘의 평형이 깨지는 점인 침강점(plunging point)에서 유입흐름은 음부력에 의하여 부력류로써 바닥까지 침강하여 바닥층으로서 바닥구조에 따라 방사형 또는 2차원 바닥밀도류를 형성한다.

바닥밀도류에 관한 대부분의 연구는 경사수로의

유입에 의한 경우이고^[1, 2, 5, 16] 바닥흐름은 그 메카니즘이 하구의 염수쇄기와 많은 점에서 유사하다. 염수쇄기에 관한 연구가 최근 Jirka^[3, 14]에 의하여 수행되었다. 쉘형태로 수평으로 유입되어 부력류로 침강한 후 바닥밀도류를 발생하는 경우에 관한 연구는 그 수가 극소수에 불과하다^[2, 16]. 침강현상의 해석은 유입흐름이 부유물과 용해물을 저수지로 유입시키므로 저수지 수질관리와 모형화에 중요하다. 소규모 저수지에서의 혼합과정은 저수지내의 순환, 수온변화, 사대 등을 예측하는데 필요하다.

본 연구에서는 수리실험과 차원해석을 통해 음부력력의 유입으로 인한 바닥밀도류의 거동과 저수지내의 순환을 해석하는 도구를 제공하고자 한다.

2. 이론해석

2.1 차원해석

밀도류흐름에 영향을 미치는 인자중 침강점거리 X_p , 밀도류 진행거리 R , 밀도층의 두께 h , 밀도류 전면속도 U_f 를 종속변수로 하여 밀도류 흐름에 대한 물리변수간의 관계식을 나타내면 다음과 같다.

$$X_p, R, h, U_f = f_1(H, Q_e, Me, t, g', \rho, Be, \nu, x, y, z) \quad (1)$$

여기서 H 는 수용수역의 수심, Q_e 는 유입유량, Me 는 유입운동량흐름을, t 는 시간, g' 은 $g(\rho - \rho_0)/\rho_0$ 는 수용수역의 밀도, ρ_0 는 유입유체의 밀도, ρ 는 국부밀도, g 는 중력가속도, Be 는 유입유체의 부력흐름율(buoyancy flux), ν 는 동점성 계수, x, y, z 는 각종 중, 횡, 연직방향좌표이다.

본 연구에서는 밀도류 유입구의 폭이 수용수역의 폭보다 작으므로 침강단계에서의 흐름은 3차원이나 바닥밀도류가 형성된 후의 밀도류흐름은 횡방향에 대해 일정하므로 2차원흐름으로 고려할 수 있다. 따라서 유입구 근처에서 바닥밀도류가 형성되기 전의 침강점의 해석에는 3차원, 바닥밀도류가 형성된 후의 바닥밀도류와 내부흐름 해석에는 2차원흐름을 적용 해석한다.

2차원해석

2차원해석이 적용되는 밀도류진행거리 R , 밀도류 전면속도 U_f , 밀도층의 두께 h 에 대한 식 (1)의 차원해석 결과는 다음과 같다. 여기서 Q_e 는 $[L^3T^{-1}]$ 의 차원, Me 는 $[LT^{-2}]$ 의 차원을 갖는다.

$$R/he, h/he, U_i/U_e = f_2(H/he, U_e/(g'he)^{1/2}, U_{et}/he, x/he, z/he, \nu/U_ehe) \quad (2)$$

여기서 U_e, he 는 각각 유입속도, 유입수심이며 $U_e/(g'he)^{1/2}$ 는 g' 항과 Be 로 부터 유도된 항으로서 유입밀도후르드수, Fre (inflow densimetric Froude number)라 정의된다^{[11], [12]}.

$$Fre = U_e/(g'he)^{1/2} \quad (3)$$

주변수역 수심 H 가 일정하면 식(2)에서 H/he 항은 무시할 수 있다. ν/U_ehe 항은 레이놀즈(Reynolds)수 Re 의 역수로서 본 연구에서는 Re 의 범위가 500-2500이므로 Re 가 밀도류흐름에 미치는 영향은 무시한다^[16]. 따라서 식(2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R/he, h/he, U_i/U_e = f_3(Fre, U_{et}/he, x/he, z/he) \quad (4)$$

3차원해석

3차원해석이 적용되는 침강점 거리 X_p 에 대한 식(1)의 차원해석 결과는 다음과 같으며 Q_e 및 Me 는 각각 $[L^3T^{-1}]$, $[LT^{-2}]$ 의 차원을 가진다.

$$X_p/be = f_4(Fre, U_{et}/be, x/be, y/be, z/be) \quad (5)$$

2.2 침강점 위치

정지상태인 수용수역보다 밀도가 큰 유체가 유입하면 유입유체는 정지수역의 유체를 하류방향으로 계속 밀면서 힘의 평형이 이루어질 때까지 이동한다. 여기서 힘의 평형은 추력과 저항력이 평형이 이루어질 때를 말하며 추력은 유입유체의 운동량의 변화에 의한 동력(dynamic force)과 침강점 아래로 형성된 밀도가 큰 유입유체의 정수압으로 구성되고 저항력은 침강점에서 하류방향으로 형성되는 유입유체와 정지수역의 유체사이의 경계에서 발생하는 전단력으로 구성된다.

이러한 힘의 평형은 계속 유입되는 유체에 의해 깨지면서 자유수면으로 부터 유입유체의 분리를 야기한다. 이러한 분리가 시작되는 점을 침강점이라 정의하며 하천류의 끝점이자 밀도류의 시작점이라 할 수 있다^[12, 16, 18]. 본 연구에서 관측된 침강점은 시

간의 경과에 관계없이 일정한 안정침강점(steady plunge point)이므로 식(5)에서 시간항은 무시된다^[16, 18]. 또한 X_p 는 흐름방향에 대해 방류구로부터 침강점까지의 거리이므로 y, z 방향거리는 무시된다. 따라서 식(5)는 다음과 같이 Fre 만의 함수로 나타낼 수 있다.

$$X_p/be = f_5(Fre) \quad (6)$$

2.3 밀도류전면속도

2차원 바닥밀도류의 전면속도 U 는 식(4)로 유도된 무차원식과 Bernoulli식을 이용하여 해석된다. 본 연구에서 측정된 바닥밀도류의 전면속도 U_i 는 밀도류전면이 일정시간 동안 이동한 거리를 측정하여 얻은 것이므로 시간 및 거리에 대해 일정하다. 따라서 식(4)에서 무차원밀도류전면속도 U_i/U_e 에 영향을 주는 무차원변수는 Fre 뿐이며 다음과 같이 표현된다.

$$U_i/U_e = f_6(Fre) \quad (7)$$

그림 1과 같이 주변수역의 밀도가 ρ_a 로 일정하고 밀도층의 두께가 h , 국부밀도가 ρ 인 밀도류전면속도 U_i 를 Bernoulli식과 정수압분포를 이용하여 해석하면 다음과 같이 밀도류전면속도를 표현할 수 있다^[4, 11, 17].

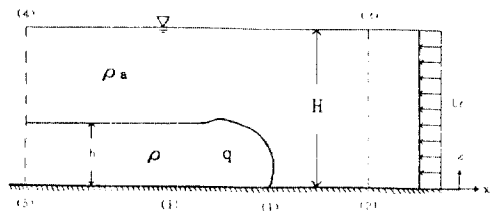


그림 1. 2차원 바닥밀도류 흐름도

$$U_i = [2 \frac{\Delta\rho}{\rho_a} gh]^{1/2} \quad (8)$$

여기서 $\Delta\rho = \rho - \rho_a$ 이다.

유입단면과 임의단면 사이에 부력 보전식(density deficiency flux)은 $\Delta\rho_e q_e = \Delta\rho q$ 이며 $q = U_i h$ 이므로 (여기서 $\Delta\rho_e = \rho_e - \rho_a$, q 는 단위폭당 국부유량)이를 식(8)에 대입하면 밀도류 전면속도 U_i 는 다음과 같이 유입유체와 수용수역의 밀도차이, 유량의 함수로 표현할 수 있다.

$$U_1 = \left[2 \frac{\Delta \rho}{\rho_a} g q_e \right]^{1/3} \quad (9)$$

식(3)으로 정의된 유입밀도후르드수 Fre 를 식(9)에 대입하면 무차원 밀도류전면속도 U_1/U_e 는 다음과 같이 Fre 만의 함수로 표현된다.

$$U_1/U_e = 2^{1/3} Fre^{-2/3} \quad (10)$$

Britter 등^[5]과 Altinakar 등^[2]은 경사수로에서 밀도류전면속도 U_e 에 대해 차원해석을 통해 다음과 같이 표현하였다.

$$U_1 = (g_o' q_e)^{1/3} f(\theta, Re) \quad (11)$$

여기서 $g_o' = 2(\rho_e - \rho_a)g / (\rho_e + \rho_a)$ 이다.

본 연구에 식(11)을 적용하면 경사각 θ 와 Re 는 무시할 수 있으므로 식(11)은 다음과 같이 표현된다.

$$U_1 = C_1 (g_o' q_e)^{1/3} \quad (12)$$

2.4 밀도류전면진행거리 및 밀도층두께

침강된 유체의 추력을 그림 2와 같이 나타낼 때 밀도류진행거리 R 와 밀도층의 두께 h 는 비력해석(force scale analysis)으로 해석할 수 있다^[6]. 밀도류의 모든 유체는 전면속도로 운동하고 밀도층의 두께는 일정하다고 가정한다. $R \gg h$ 이면 연직가속은 수평가속성분에 비해 무시할 만큼 작으므로 압력분포는 정수압이다. 연속방류인 경우 체적보전식은 다음과 같다.

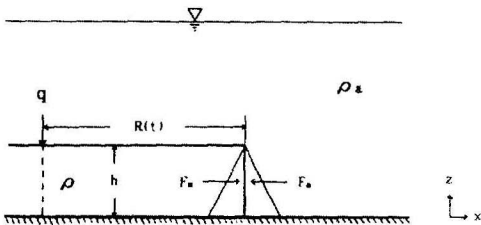


그림 2 간단화된 바닥밀도류 흐름도

$$qt = Rh \quad (13)$$

밀도류전면추력 F_p 는 외부로 작용하는 수압 F_s 와 내부로 작용하는 수압 F_a 의 차이로서 다음과 같

다.

$$\begin{aligned} F_a &= 1/2 \rho_a g h^2 \\ F_s &= 1/2 \rho g h^2 \\ F_p &= F_s - F_a = 1/2 g h^2 (\rho - \rho_a) \end{aligned} \quad (14)$$

밀도류에 저항하는 힘은 관성력과 점성력이 있으며 관성력은 질량과 가속도의 곱에 비례하고 점성력은 뉴턴(Newton)의 점성법칙을 따르며 다음과 같다.

$$F_t = \rho h R^2 / t^2 \quad (15)$$

$$F_v = R^2 \rho \nu / t h \quad (16)$$

식(13)–(16)의 적용은 밀도류를 억제하는 힘중에서 관성력이 점성력에 비해 더 우세한 경우와 점성력이 관성력보다 더 우세한 경우의 두가지 접근적 경우로 나누어 적용한다. 전자의 경우는 식(15)를 적용하고 후자의 경우는 식(16)을 적용한다^[6].

2.4.1 밀도류전면의 진행거리

식(4)로 유도된 무차원밀도류의 전면진행거리 R/he 에 영향을 주는 인자중에서 x 방향거리는 밀도류전면의 진행거리 R 을 의미하며 z 방향거리는 R 에 무관하므로 고려되는 인자는 Fre 와 시간항이다. 또한 밀도류진행거리 R 은 속도와 시간의 함수 즉 $R = U_1 t$ 로 정의되고 식(7)과 같이 U_1 는 Fre 의 함수이므로 밀도류진행거리 R 은 Fre 와 시간의 함수로 표시될 수 있음을 알 수 있다.

따라서 식(4)는 다음과 같이 표현된다.

$$R/he = f_r(Fre, Uet/he) \quad (17)$$

식(7)과 $R = U_1 t$ 로부터 밀도류전면의 진행거리 R 은 다음과 같이 표현되며 이는 식(17)의 변형된 식으로 고려할 수 있다.

$$R/Uet = f_s(Fre) \quad (18)$$

또한 비력해석에 의하여 관성력이 우세한 경우의 밀도류전면진행거리 R 은 다음과 같이 표현된다.

$$R = C_2 (g \Delta \rho / \rho q)^{1/3} t \quad (19)$$

유입단면과 임의단면 사이의 부력 보전식을 적용하면 식(19)는 다음과 같이 표현된다.

$$R = C_2 (g \Delta \rho_e / \rho q_e)^{1/3} t \quad (20)$$

2. 4. 2. 밀도층의 두께

식(4)에서 무차원밀도층의 두께 h/he 에 영향을 미치는 인자중 z 방향거리는 밀도층의 두께이며 (2. 4.1)절에서와 같이 흐름방향에 대해 밀도층의 두께가 일정한 것으로 고려하면 식(4)에서 고려되는 무차원변수는 Fre 와 시간항이며 다음과 같이 표현된다.

$$h/he = f_9(Fre, Uet/he) \quad (21)$$

본 연구에서 밀도층의 두께에 대한 해석은 그 특성이 상이한 다음과 같은 두 경우에 대한 해석이 시도된다. 1) 밀도류전면이 저수지의 하류단에 도달하여 하류단의 영향을 받기 전(반사되기 전)에는 밀도류흐름은 일정한 두께를 유지하면서 진행한다. 2) 밀도류전면이 하류단에 도달하여 반사된 후에는 시간의 경과에 따라 밀도층의 두께가 증가한다.

(1) 반사되기전

본 연구에서 밀도류흐름은 흐름방향에 대해 일정한 두께를 유지하면서 진행되는 것으로 고려하였으므로 밀도류전면이 하류단에 도달되기 전에는 시간이 경과함에 따라 밀도류전면 이동에 의한 밀도류전면거리가 증가하여도 밀도층의 두께는 일정하다. 밀도류전면진행거리는 흐름방향에 대한 거리를 의미하므로 밀도층의 두께는 시간에 대해서 일정한 것으로 판단된다. 따라서 식(21)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h/he = f_{10}(Fre) \quad (22)$$

또한 비력해석에 의하여 관성력이 우세한 경우의 밀도층두께 h 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = C_3 [q^2 / (g \Delta \rho / \rho)]^{1/3} \quad (23)$$

(2) 반사된 후

밀도류전면이 저수지의 하류단에 도달하여 반사된 후의 밀도층의 두께는 반사되기 전과는 달리 시간이 경과함에 따라 밀도층의 두께가 현저히 증가한다. 이 경우에는 Fre 와 시간의 함수인 식(21)을 적용한다.

2.5 회석

저수지로 유입되는 유체는 대부분 저수지의 물과 온도가 다르거나 부유물과 용해물 등을 포함하므로서 주변수역과 밀도가 다르다. 이러한 밀도차이는

밀도류를 발생시키므로서 저수지내에는 혼합과 순환이 일어난다.

이러한 혼합과 순환은 저수지내의 흐름구조 및 밀도(또는 온도)변화를 야기한다. 본 연구에서는 밀도가 큰 유체의 유입으로 인한 저수지내 밀도의 변화에 대한 해석이 시도된다.

밀도층두께의 변화는 곧 밀도의 변화를 의미하므로 무차원밀도변화, 즉 회석 S 는 밀도층두께의 해석과 같이 밀도류전면이 하류단에 도달하여 반사되기 전과 후로 구분하여 해석되며 회석 S 는 다음과 같이 정의된다.

$$S = \Delta \rho_e / \Delta \rho \quad (24)$$

(1) 반사되기 전

바닥밀도류가 형성된후 밀도류전면이 하류단에 도달하기 전까지 밀도층 내의 회석 S 는 부력보전식을 대입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \Delta \rho_e / \Delta \rho = q/q_e \quad (25)$$

즉, 회석 S 는 유입유량과 국부유량의 비이고 q/q_e 는 U_i/U_e 와 h/he 의 함수로서 이들은 모두 Fre 만의 함수로 표현되므로 회석 S 도 Fre 의 함수로 표현될 수 있다.

$$S = f_{11}(Fre) \quad (26)$$

식(26)은 바닥밀도류가 형성된 후 밀도류전면이 하류단에 도달하기 전까지 머리(head)뒤의 밀도층내의 회석을 나타낸다.

(2) 반사된 후

밀도류전면이 하류단에 도달하여 반사된 후 밀도층내의 회석 S 와 하류단에서 월류되는 유체의 회석 S_0 는 다음과 같이 해석된다.

국부밀도에 대한 부력(buoyancy deficiency)항, $(\rho - \rho_a) g$ 에 영향을 주는 인자를 고려하여 함수식으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$(\rho - \rho_a) g = f_{12}(q_b, \rho_e, Be, t, Me, x, z, L) \quad (27)$$

여기서 L 는 저수지의 길이이다. 식(27)에 대한 차원해석 결과는 다음과 같다.

$$S = (\rho_e - \rho_a) / (\rho - \rho_a) = f_{13}(Be^{1/3} t / 1_b, x / 1_b, z / 1_b, L / 1_b) \quad (28)$$

여기서, l_b 는 특성길이로서 $l_b = q_0 / Be^{1/3}$ 이며 유량과 부력흐름율의 비이다.

하류단에서 유통되는 유체의 회석에 식(28)을 적용하면 x방향거리는 수조의 길이 L을 의미하고 z방향거리는 웨어의 높이로서 일정하므로 식(28)에서 x, z방향거리는 무시한다. 따라서 하류단에서 유통되는 유체의 회석 So 를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$So = f_{14}(Be^{1/3}t/l_t.l_b, L/l_b) \quad (29)$$

3. 실험장치 및 방법

실험은 길이 4m, 폭 30cm, 깊이 40cm의 수조에서 수행되었으며 실험장치는 그림 3과 같다. 본 연구에서는 수용수역보다 밀도가 큰 유체를 수조에 방류하므로 바닥밀도류를 형성케하였다. 밀도류 유입유체로는 소금물을 사용하였으며 사진촬영과 육안관찰을 위하여 색소를 주입하였다.

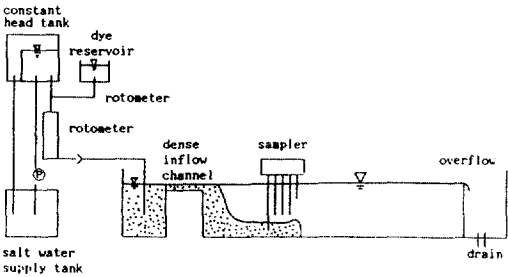


그림 3 실험장치

유입유체의 유량과 유입속도는 로토미터와 초소형유속계 SV-3(프로펠러형)로 측정하였다. 밀도(또는 염도)의 변화는 표본채취기를 이용하여 획득된 각 표본의 염도를 측정하므로써 얻어지며 염도의 측정은 빛의 굴절 원리를 이용한 Atago, S/Mill(염도범위 0-100‰) 굴절기(refraction meter)를 이용하였다. 표본채취에 이용된 표본채취기는 1cc주사기와 15-30cm길이의 주사바늘을 연직방향으로 2.5cm 간격으로 한 단면에 15개씩 설치하여 흐름방향으로 여러 단면에 걸쳐 동시에 90개의 표본을 채취하도록 하였다.

실험은 유입조건, 즉 유입밀도후르드수를 변화시키면서 임의의 시간간격으로 표본을 채취하여 시간

변화에 따른 염도분포와 밀도류의 속도, 침강점, 밀도류의 두께 등을 획득하였다.

4. 실험결과

본 연구에서 수행된 수리실험의 제 범위는 표 1과 같다.

표 1.

제 원	범 위
방류량Q	16.67-66.67cm ³ /s
유입속도	4.63-18.5cm/s
유입밀도	1.0058-1.0255 g/cm ³
유입염도	7.5-32.5‰
Fre	0.84-6.7

순환양상

밀도가 큰 유입유체가 침강하여 바닥밀도류가 형성된 후 밀도류흐름은 밀도층의 두께 h를 유지하면서 전면속도 U_f 로 하류방향으로 이동한다(그림 4).

밀도류전면이 하류단에 도달하게 되면 밀도류 전면이 하류단 벽에 부딪히면서 반사하며 밀도류 전면은 계속 유입되는 밀도류의 운동량에 의하여 연직방향으로 상승한다. 밀도류의 상승은 밀도류 전면이 상승하면서 발생한 연직방향운동량이 밀도류와 상부물의 무게와 같게되는 평형상태에 이르게

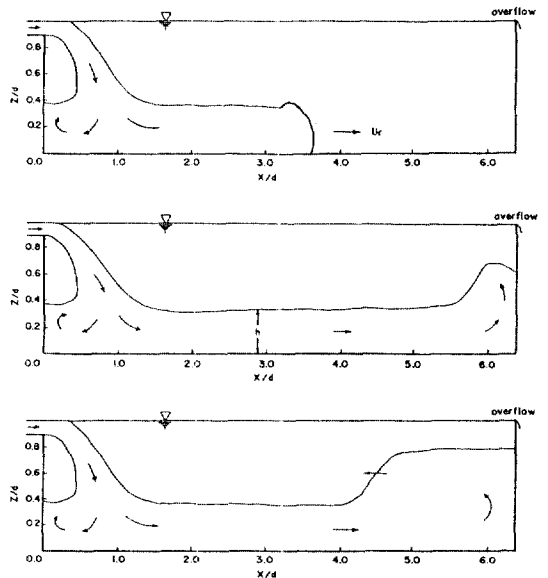


그림 4. 저수지내 밀도류 형성 및 순환양상

될 때까지 상승한다. 그러나 바닥밀도류가 계속 상승함에 따라 상승된 부분은 계속 상승하지 못하고 횡방향인 상류로 이동한다. 이러한 현상은 밀도류 상승부의 상류주변 정수압이 밀도류 상승영역보다 밀도차이와 유속차이 만큼 작게되어 상류로 이동하는 것으로 해석된다.

이러한 흐름은 상류측으로 이동하면서 내부파(internal surge)를 형성한다. 따라서 이러한 현상은 2층의 밀도류흐름으로 간주할 수 있다. 상부층의 밀도류 즉, 내부파는 상류측으로 계속 진행되어 밀도가 큰 유체가 유입되는 상류단에 도달하여 강한 혼합을 일으키면서 정상파(standing wave)와 유사한 형태가 관찰된다.

내부파의 밀도류가 상류단에 도달하여 반사된 내부파는 다시 하류방향으로 전파된다. 이 때의 파의 형태는 반사전에 비해 진폭이 매우 작은 파고를 가지며 장파(long wave)형태를 이룬다. 하류방향으로 다시 전파된 파는 하류단 벽에 도달하여 반사되면서 더욱 진폭이 작은 장파를 형성하며 상류측으로 다시 전파된다.

이러한 과정이 반복되면서 파는 점점 평평해지고 파의 형태는 사라지고 시간의 경과에 따라 밀도층은 점차 증가하여 수면에 도달한다.

실험결과

그림 5는 실험자료를 무차원침강점 X_p/be 와 Fre 의 관계에 대해 나타낸 것으로서 식(6)은 다음과 같은 지수식으로 나타낼 수 있다.

$$X_p/be = 0.34Fre^2 \quad (30)$$

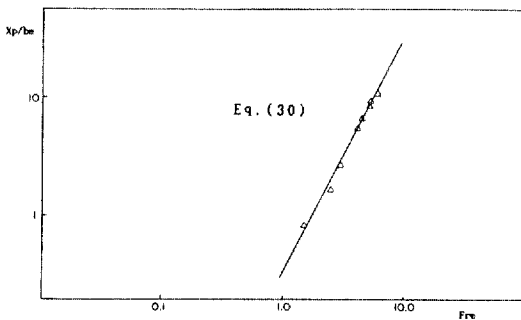


그림 5. Fre 수에 따른 침강점까지의 거리

정지상태인 주변수역보다 밀도가 큰 유체가 유입하면 유입유체는 정지수역의 유체를 하류방향으로

계속 밀면서 힘의 평형이 이루어질 때까지 이동한다. 유입유체는 수평방향의 운동량에 의해서는 자유수면과 평행한 방향으로 이동하려하며 음부력에 의해서는 바닥으로 가라앉으려 한다. 따라서 수평방향의 운동량과 음부력의 상대적인 크기에 따라 침강점의 위치가 달라지게 된다.

Fre 가 크면 음부력보다 운동량의 영향이 상대적으로 더 크기 때문에 유입유체는 자유수면과 평행한 방향으로 이동한다. 이동하면서 유입유체의 일부는 가라 앉으며 하류방향으로 갈수록 수평방향 운동량은 점차 감소하므로 침강점에 도달해서는 음부력에 의하여 모두 가라앉는다. Fre 가 작아지면 수평방향운동량에 비해 음부력의 영향이 증대되므로 유체가 유입된 후 바로 바닥으로 가라앉게 되어 Fre 가 클 때보다 침강점의 거리 X_p 가 감소하게 된다.

무차원전면속도 U_i/U_e 와 Fre 의 관계를 나타낸 것이 그림 6이며 식(7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_i/U_e = 0.35Fre^{-0.68} \quad (31)$$

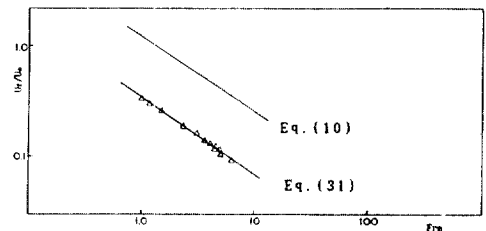


그림 6. Fre 수에 따른 밀도류전면속도

본 연구결과와 식(10)은 비교적 잘 일치된 결과를 보여주나 계수가 다르게 나타난 것은 본 연구에서의 밀도류 유입부 경계조건은 그림 2와는 상이하므로 바닥에서의 초기조건이 서로 다르기 때문인 것으로 판단된다. 밀도류전면속도 U_i 와 $g_0'q$ 의 관계를 나타낸 것이 그림 7이며 식(12)는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이는 Britter등의 결과와 비교적 잘 일치한다.

$$U_i = 0.33(g_0'q_e)^{1/3} \quad (32)$$

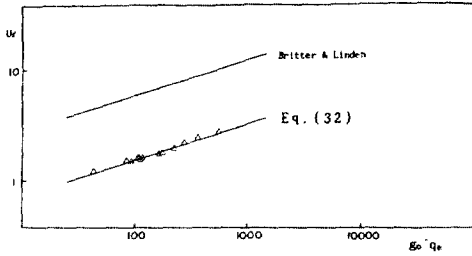


그림 7. 밀도류전면속도와 $g_0 Q_e$ 의 관계

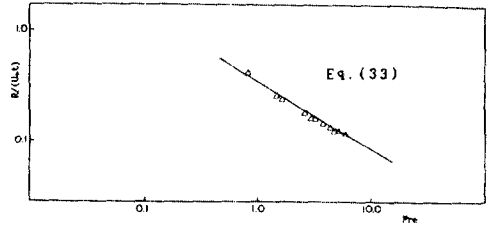


그림 8. Fre수에 따른 밀도류전면진행거리

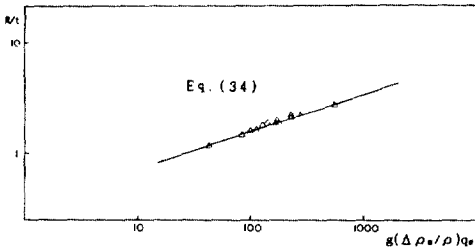


그림 9. 밀도류전면진행거리와 $g(\Delta\rho/\rho)Q_e$ 의 관계

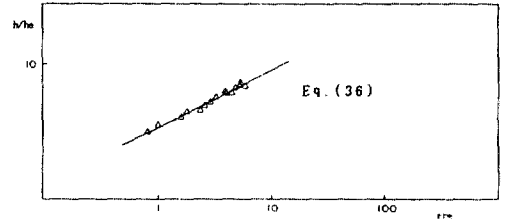


그림 10. Fre수에 따른 밀도층의 두께

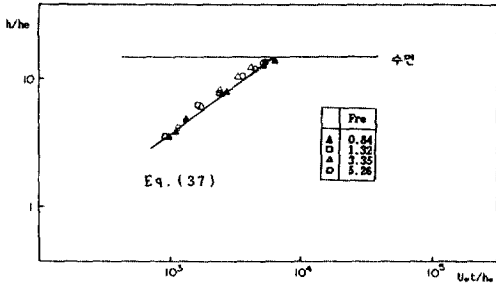


그림 11. 밀도층두께와 $U_e t/he$ 의 관계
(밀도류전면이 하류단에 도달한 후)

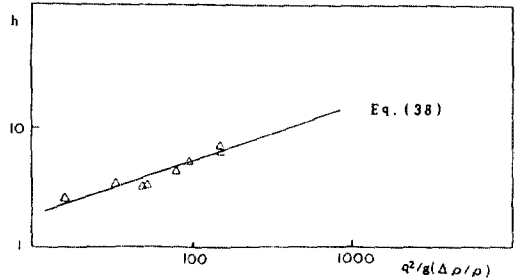


그림 12. 밀도층두께와 $Q_e^2/g(\Delta\rho/\rho)$ 의 관계
(밀도류전면이 하류단에 도달하기 전)

밀도류의 진행거리 $R/U_e t$ 와 Fre 의 관계에 대해서도 시도한 것이 그림 8이며 식(18)은 다음과 같은 지수식으로 표현할 수 있다.

$$R/U_e t = 0.33 Fre^{-0.6} \quad (33)$$

R/t 와 $g\Delta\rho/\rho Q_e$ 의 관계를 나타낸 것이 그림 9이다. 식(20)은 관성력이 우세한 경우에 대한 것으로서 본 연구결과는 식(20)과 비교적 잘 일치하나 점성력이 우세한 경우에 대해서는 일치하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 관성력이 밀도류흐름을 지배하는 것으로 판단된다.

$$R = 0.34 (\Delta\rho_e / \rho g Q_e)^{1/3} t \quad (34)$$

식(34)의 R 을 시간 t 로 나눈 R/t 는 곧 밀도류전면속도 U_i 이므로 밀도류전면속도 U_i 는 다음식으로도 표현된다. 이는 식(32)와 유사한 결과를 나타낸다.

$$U_i = 0.34 (\Delta\rho_e / \rho g Q_e)^{1/3} \quad (35)$$

밀도층두께에 대한 실험 결과를 나타낸 것은 그림 10-그림 12이다.

그림 10은 식(22)에 따라 반사되기 전의 무차원 밀도층의 두께와 Fre 의 관계를 나타낸 것으로 그림 10에 의하여 식(22)는 다음과 같은 지수식으로 나타낼 수 있다.

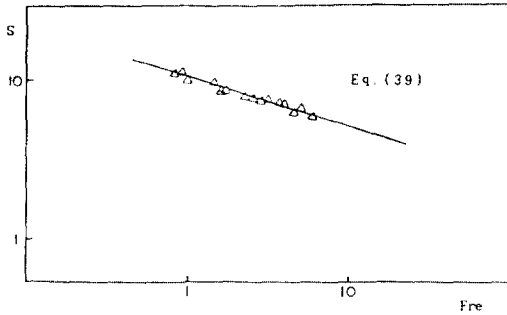


그림 13. Fre수에 따른 밀도층내의 회석

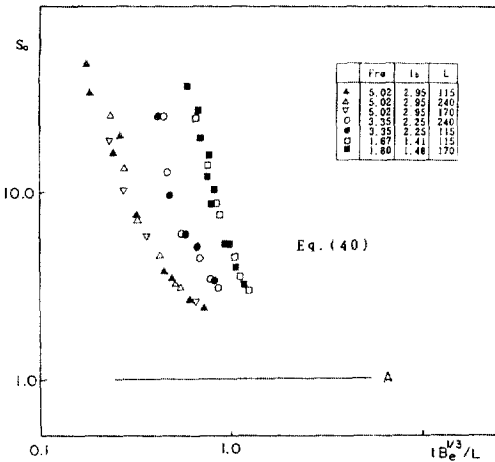


그림 14. 하류단에서 월류되는 유체의 회석

$$h/he = 2.7Fre^{1/2} \quad (36)$$

그림 11은 밀도류전면이 하류단에 도달하여 반사된 후 시간의 경과에 따라 밀도층이 증가하는 경우에 대한 것을 나타낸 것이다. 그림 11에 나타난 실험결과에 의하면 밀도류전면이 반사된 후의 밀도층의 두께는 Uet/he 항으로 표현할 수 있음을 보여주며 식(37)로 나타낼 수 있다. 이는 시간항 Uet/he 에는 Fre 에 관련된 인자(Ue, he)가 내포되어 있고 Fre 는 소거된 것으로 보아 본 연구에서 수행된 실험은 유입유체와 주변수역의 밀도차이 보다는 유입유체속도(또는 운동량)가 반사된 후의 밀도층의 두께에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

$$h/he = 0.0214(Uet/he)^{3/4} \quad (37)$$

그림 12는 식(23)에 따라 밀도층의 두께와 q^2/g ($\Delta\rho/\rho$)의 관계를 도식한 것으로서 관성력이 우세한 경우에 대한 결과는 본 연구결과와 잘 일치하나 점성력이 우세한 경우에 대해서는 일치하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 밀도류를 지배하는 인자는 관성력인 것으로 판단된다.

$$h = 1.3[q^2/g (\Delta\rho/\rho)]^{1/3} \quad (38)$$

식(26)에 따라 회석 S 와 Fre 와의 관계를 도식한 것이 그림 13이다. 그림 13에서 알 수 있듯이 식(26)이 타당함을 알 수 있으며 계수 C 값은 10.5로 나타났다.

$$S = 10.5Fre^{-1/3} \quad (39)$$

여기서 식(39)의 적용 범위는 바닥밀도류가 형성된 후 밀도류전면이 하류단에 도달하기 전까지이며 밀도류머리(head) 뒤의 밀도층내의 회석을 나타낸다.

하류단에서 월류되는 유체의 회석 S_o 를 나타낸 것은 그림 14로서 회석 S_o 는 부력, 저수지길이, 시간의 함수임을 나타내며 식(29)는 다음과 같은 함수식으로 나타낼 수 있다.

$$S_o = Cofo(Be^{1/3}t/L) \quad (40)$$

여기서 계수 Co 는 특성길이 l_0 에 따라 다른 것으로 나타났다. 그림 14의 A선은 월류유체의 밀도가 유입유체의 밀도와 같은 선으로서 시간이 흐름에 따라 A선에 점근적으로 수렴되는 것으로 판단된다.

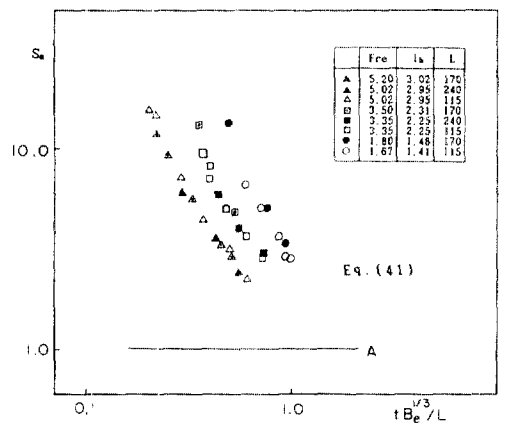


그림 15. $tBe^{1/3}/L$ 에 따른 밀도층내 회석 ($x=L-3d, z=0.81d$)

그림 15는 저수지내부의 밀도층내 회석을 나타낸 것으로서 고정된 점($Z=15.6\text{cm}$, $x=\text{하류단으로 부터 } 50\text{cm}$ 상류지점)에서 측정된 실험자료를 식(28)에 대해 나타낸 것이다. 그림 15에서 보이는 바와 같이 고정된 한 점에서의 회석 S_a 도 식(40)과 같이 부력, 저수지길이, 시간의 함수로 나타낼 수 있다.

$$S_a = C_a f_a (B_e)^{1/3} t / L \quad (41)$$

여기서 계수 C_a 는 특성길이 l_b 에 따른 상수이다.

5. 결 론

저지수역인 저수지로 밀도가 큰 유체가 유입으로 인한 밀도류의 거동과 순환이 차원해석 및 실험을 통해 해석되었으며 전반적인 밀도류흐름을 지배하는 인자는 유입조건(유입밀도후르드수등)인 것으로 나타났다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 침강점의 위치, 밀도류전면속도, 밀도류전면의 진행거리, 머리(head)뒤의 밀도층내 회석은 유입밀도후르드수에 크게 영향을 받으며 Fre 만의 함수로서 지수식으로 나타낼 수 있으며 본 연구에서는 관성력이 밀도류흐름을 지배하는 것으로 사료된다.
- 2) 밀도층의 두께는 밀도류의 전면이 저수지의 하류단에 도달하기 전과 후의 양상은 크게 다르다. 밀도류전면이 하류단에 도달하기전에는 밀도층의 두께는 Fre 에 크게 영향을 받으며 반사된 후에는 Fre 보다는 시간과 유체의 유입속도에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 3) 저수지 하류단에서 유희되는 유체의 회석 및 시간의 경과에 따른 저수지내부 밀도층의 회석은 저수지의 길이 L , 시간 t , 부력 Be 의 영향을 받고 $B_e t / L$ 의 함수이며 계수는 특성길이 l_b 에 의해 결정되는 것으로 나타났다.

감사의 말

본 연구는 한국과학재단 지원으로 수행된 소규모 저수지에서 밀도류에 의한 순환(1989. 3~1991. 3)의 1차년도 연구결과로서 동재단에 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. Akiyama, J. A., Stefan, H. G., Plunging Flow into a Reservoir, *J. of Hyd. Div.*, ASCE, Vol.

- 110, No. 4, 1984, pp 484 - 497.
2. Altinakar, S., Graf, W. H., Hopfinger, E. J., Weakly Depositing Turbidity Current on a Small Slope, *J. of Hyd. Res.* Vol. 28, No. 1, 1990, pp 55 - 80.
3. Arita, M., Jirka, G. H., Two-Layer Model of Saline Wedge. I: Entrainment and Interfacial Friction, *J. of Hyd. Engrg.*, ASCE, Vol. 113, No. 10, 1987, pp 1229 - 248.
4. Benjamin, T. B., Gravity Currents and Related Phenomena, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 31, Part 2, 1968, pp 209 - 1248.
5. Britter, R. E., Linden P. E., The Motion of the Front of a Gravity Current Travelling Down an Incline, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 88, Part 2, 1980, pp 531 - 543.
6. Chen, J. C., *Studies on Gravitational Spreading Currents*, Keck Lab. of Hydraulics and Water Resources, Cal. Inst. Tech. Report No. KH-R-40, 1980.
7. Denton, R. A., Density Current Inflows to Run of the River Reservoir, *IAHR 21th Congress*, 8, 1985, Melbourne, Australia.
8. Ellison, T. H., Turner, J. S., Turbulent Entrainment in Stratified Flows, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 6, June, 1959, pp. 423 - 448.
9. Elder, R. A., Wunderlich, W.O., Inflow Density Currents in TVA Reservoirs, *Proc. of the ASCE International Symposium in Stratified Flows*, Novosibirsk, USSR, 1972, pp221 - 236.
10. Fietz, T. R., Wood, I. R., Three Dimensional Density Currents, *J. of Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 93, No. Hy6, 1969, pp 1 - 23.
11. Kao, T. W., Density Current and Their Applications, *J. of Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 103, No. HY5, 1977, pp 543 - 555.
12. Kao, T. W., Park, C., Pao, H. P., Inflows, Density Currents and Fronts, *Phys. Fluids*, Vol. 21, No.11, 1978, pp 1913 - 1922.
13. Keulegan, G. H., *The Motion of Saline Fronts in Still Water*, 13th Progress Report on Medel Laws for Density Currents, NBS Project, April, 1958.

14. Sargent, F. E., Jirka, G. H., Experiments of Saline Wedge, *J. of Hyd. Engrg.*, ASCE, Vol. 113, No. 10, 1987, pp 1229-1248.
15. Simpson, J. E., Britter, R. E., The Dynamics of the Head of a Gravity Current Advancing over a Horizontal Surface, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 94, part 3, 1979, pp 477-495.
16. Singh, B., Shah, C. R., Plunging Phenomenon of Density Currents in Reservoirs, *La Houille Blanche*, No. 1, 1971, pp 59-64.
17. Von Kármán, T., The Engineering Grapples with Nonlinear Problems, *Bul. of American Math. Soc.* 46, 1940, pp 615-683.
18. 전 시영, 정지수역으로 유입되는 밀도류의 거동, 한양대학원 박사학위논문, 1987. 8.

(接受 : 1991. 3. 8)