

조정지 방류의 농도예측

윤 태 훈*, 한 운 우**

1. 서론

흐르거나 정지상태에 있는 수역으로 수용수역과 밀도가 다른 유체가 유입하면 유입유체와 수용수역유체의 밀도차로 인하여 수역내에는 밀도류가 형성되고 유입유체의 부력과 두 유체사이의 전단에 의해 혼합 및 확산이 일어나며 수역의 규모에 따라 국부적으로 또는 전수역에 걸쳐 혼합과 순환이 발생하여 수역내의 흐름 및 밀도구조는 달라지게 된다.

대댐의 방류구조는 일반적으로 선택인출(selective withdrawal)구조를 취하여 적정온도의 물을 방류하는 것이 가능하나 선택인출구조를 채택하지 않은 댐에서는 하류에서 요구되는 적정온도의 물을 방류하는 것이 불가능하므로 이러한 경우에는 댐 직하류에 온수지(또는 조정지)를 건설하여 댐 하류에서 방류된 온도가 낮은 물의 온도 상승을 도모하여 온수지 하류에서 적정온도의 물을 방류한다. 따라서 온수지 등과 같은 저수지내로 밀도가 다른 유체의 유입에 의한 저수지내의 온도(또는 밀도)변화에 대한 예측이 필요하다.

본 연구는 온수지와 같이 단면이 비교적 일정한 수역에 수용수역보다 밀도가 큰 유체가 유입되므로써 발생하는 저수지내의 흐름 및 농도(밀도)변화에 대한 수리학적 특성을 수리실험을 통하여 해석한다.

2. 실험장치 및 방법

실험은 길이 4m, 폭 30cm, 깊이 40cm의 수조에서 수행되었으며 실험장치는 그림 1과 같다. 실제 조정지(온수지)는 차거운 물이 유입되므로써 수용수역과 밀도차를 이루어 밀도류가 형성되고 수용수역의 물과 혼합되어 하류경계에서 온도가 상승된 물이 방류되나 본 연구에서는 실험을 수행하는 데에 있어서 낮은 수온의 물을 일정하게 유지시키면서 수조로 물

* 한양대학교 토목공학과 교수** 한양대학교 대학원 토목공학과

을 공급하는 것이 매우 어려우므로 유입유체로는 낮은 수온의 물 대신 일정한 염도의 소금물을 사용하여 밀도차를 이루게 하였다. 따라서 수용수역보다 밀도가 큰 유체 즉, 소금물을 수조에 방류함으로써 부력●-부력류-바닥밀도류-내부밀도류를 형성하게 하였으며 사진촬영과 육안관찰을 위하여 색소를 주입하였다.

염수고수조로 부터 공급되는 일정한 염도의 소금물은 수조의 상류부에 설치된 웨어를 통해 폭이 3 cm인 수로로 유입되어 개수로흐름 형태로 폭이 30 cm인 수조로 유입되며 유입유체의 유량은 로토미터와 웨어를 이용하여 측정하였고 유입속도는 초소형유속계 SV-3(프로펠러형)으로 측정하였으며 측정된 유량을 이용하여 Manning 공식으로 보정하였다.

수조내 염도(또는 밀도)의 변화는 본 연구에서 특별히 제작된 표본채취기를 이용하여 표본을 채취한 후 Atago, S/Mill refraction meter를 이용하여 염도(또는 밀도)를 측정하여 획득되었다. 표본채취에 이용된 표본채취기는 1cc 주사기에 15-30 cm 길이의 주사바늘을 연결하고 연직방향으로 2.5cm 간격으로 설치하여 한 단면에 15개씩(횡방향으로 3점, 각지점에서 연직방향으로 5점), 흐름방향으로 6단면에 걸쳐 동시에 90개의 표본을 채취하도록 하였다.

실험은 상이한 유입조건, 즉 상이한 Fr_e 에 대하여 임의의 시간 간격으로 표본을 채취하여 시간변화에 따른 밀도분포를 획득하였으며 밀도층두께는 육안관찰 및 사진을 통해 보정하였다.

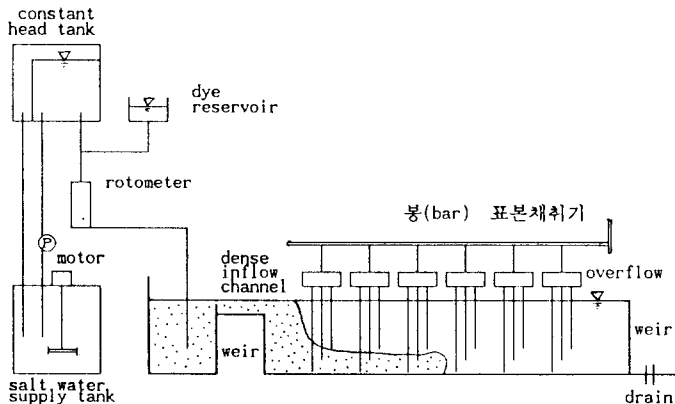


그림 1. 실험장치

3. 실험결과

3-1. 밀도류 형성 및 혼합과정

밀도가 큰 유입유체가 침강하여 바닥에 도달하면 침강된 유체는 충격 ●(impinging jet)과 유사한 형상을 이루며 내부도수현상(internal hydraulic jump)이 발생하면서 바닥밀도류를 형성한다.(그림 2.a) 바닥밀도류가 형성된 후, 밀도류흐름은 일정한 밀도층두께 h 를 유지하면서 하류방향으로 이동한다.(그림 2.b)

밀도류전면이 저수지의 하류단에 도달하게 되면 밀도류전면이 하류단의 벽에 부딪히면서 반사하며 밀도류전면은 계속 유입되는 밀도류의 운동량에 의한 추력으로 연직방향으로 상승한다. 밀도류전면의 상승은 밀도류전면이 상승하면서 발생한 연직방향운동량이 밀도류 상승부의 무게와 같아질 때까지 상승하는 것으로 해석된다.

상승한 밀도류 전면부는 다시 가라 앉으면서 상류방향으로 이동한다.(그림 2.c) 이러한 현상은 밀도류전면이 상승하면서 점차 연직운동량은 감소되어 밀도류 상승부의 무게가 연직방향운동량보다 커질 때 가라 앉으며 연직방향운동량은 가라앉은 밀도류의 상승부와 서로 상하로 밀면서 상류측에 형성된 주변수역의 정수압과 힘의 평형을 유지하다 밀도류가 계속 유입되면 밀도류의 추력이 주변수역의 정수압보다 크게되어 밀도류는 주변유체를 상류측으로 밀면서 이동하는 것으로 해석된다.

이러한 흐름은 상류측으로 이동하면서 일종의 내부파(internal surge)를 형성한다. 따라서 이러한 현상은 2층의 밀도류흐름으로 간주할 수 있다. 상부층의 밀도류는 즉, 내부파는 상류측으로 계속 진행되어 상류측 벽에 도달하게 되면 다시 반사된다.

상부층의 밀도류가 상류측에 도달하여 반사된 내부파는 다시 하류방향으로 전파되며 이 때의 파의 형태는 반사전의 파에 비해 매우 작은 파고를 가진 장파(long wave)형태를 이룬다. 하류방향으로 다시 전파된 장파는 하류단 벽에 도달하여 반사되면서 더욱 진폭이 작은 장파형태를 형성하며 상류측으로 다시 전파된다.

이러한 과정이 반복되면서 파의 진폭이 점차 작아지면서 파의 형태는 사라지고 시간의 경과에 따라 밀도층은 점차 증가하여 수면에 도달한다.

그림 3은 $Fre = 5.26$ 일때 시간의 경과에 따른 저수지내의 농도(염도)

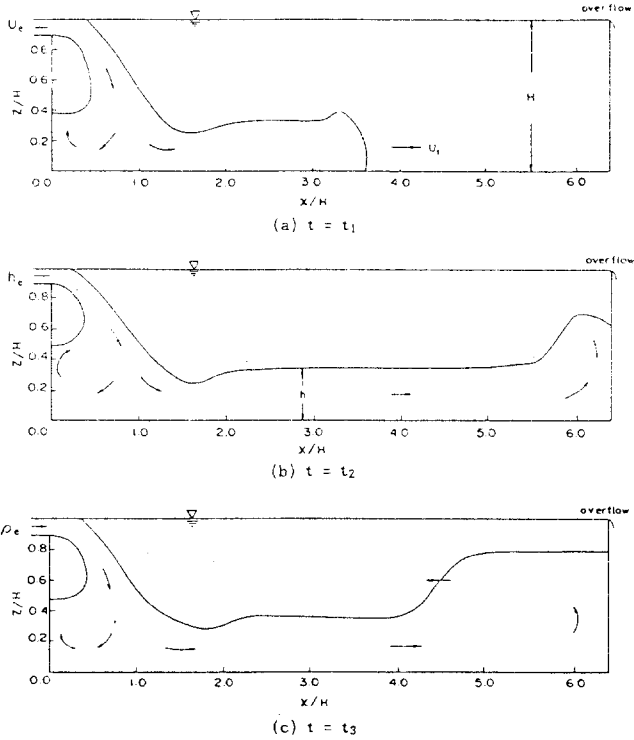


그림 2. 밀도류 형성 및 혼합과정

Concentration % .Fre=5.26,t=72sec.,contour interval=1 %

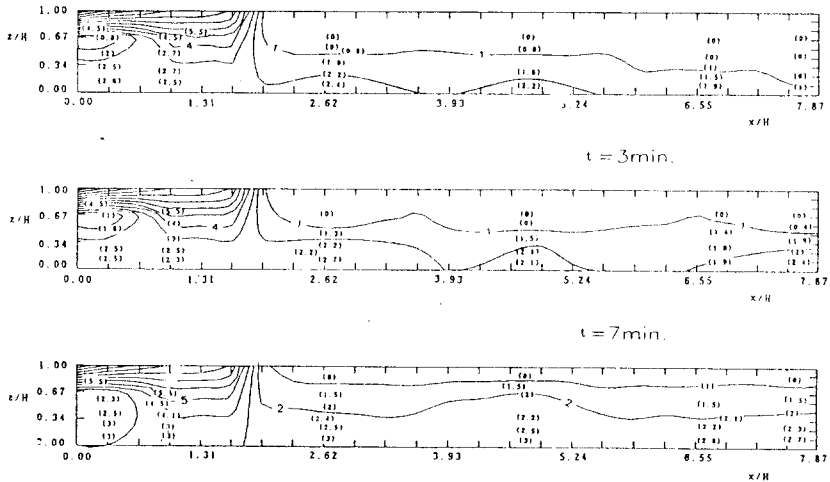


그림 3. 시간의 경과에 따른 저수지내 염도(농도)변화

변화로써 침강점의 위치, 밀도층두께의 상승, 농도변화 등을 보여준다.

3-2. 밀도층두께

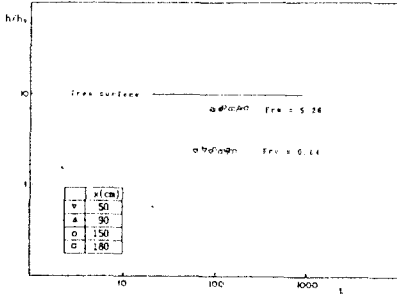


그림 4. 흐름방향에 대한 시간과 밀도층 두께의 관계(반사 전)

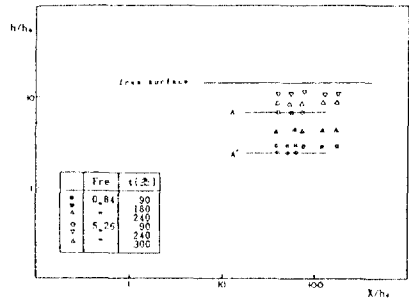


그림 5. 시간의 경과에 대한 흐름방향거리와 밀도층두께의 관계

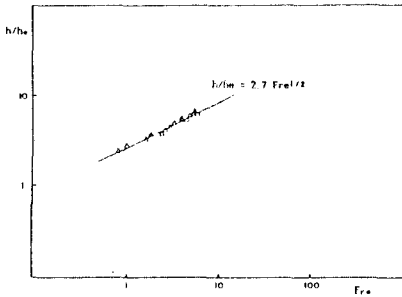


그림 6. Fr_0에 대한 밀도층두께(반사 전)

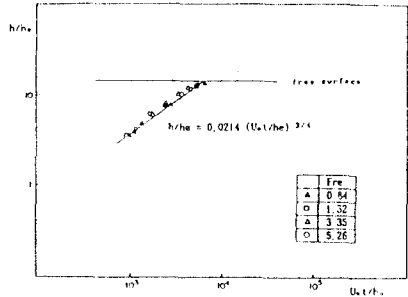


그림 7. U_0 t/h_0와 밀도층두께의 관계 (반사 후)

밀도층두께에 대한 실험 결과를 나타낸 것은 그림 4~그림 7이다. 그림 4은 밀도류전면이 하류단에 도달하여 반사되기전의 경우로 무차원밀도층두께와 시간과의 관계를 나타낸 것으로써 밀도류전면이 저수지 하류단에 도달하기 전에는 밀도층의 두께는 시간의 경과에 관계없이 일정함을 보이며 Fr_0의 영향을 받는 것으로 나타났다.

그림 5는 시간의 경과에 따른 흐름방향에 대한 밀도층의 두께를 나타낸 것이다. 그림 5에 나타난 바에 의하면 밀도층의 두께는 흐름방향(X방향)에 대해 일정함을 보이며 Fr_0와 시간의 영향을 받음을 보여준다. 또한

A,A' 선은 반사되기전의 밀도층의 두께를 나타낸 선으로써 그림 3에 나타난 결과와 일치된다.

그림 6은 반사되기 전의 무차원밀도층의 두께와 Fre의 관계를 나타낸 것으로 다음과 같은 지수식으로 나타낼 수 있다.

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

그림 7은 밀도류전면이 하류단에 도달하여 반사된 후 시간의 경과에 따라 밀도층이 증가하는 경우에 대한 것을 나타낸 것으로서 밀도류전면이 반사된 후의 밀도층의 두께는 $U_e t/he$ 항으로만으로 표현할 수 있음을 보여주며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h/he = 0.0214 (U_e t/he)^{3/4} \quad (2)$$

시간항 $U_e t/he$ 에는 Fre에 관련된 인자 U_e, h_e 가 내포되어 있고 Fre는 무시된 것으로 보아 본 연구에서 수행된 실험은 유입유체와 주변수역의 밀도차이 보다는 유입유체속도(또는 운동량)가 반사된 후의 밀도층의 두께에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3-3. 회석

밀도층내 회석 S와 Fre와의 관계를 나타낸 것이 그림 8이며 회석 S는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$S = \Delta \rho_e / \Delta \rho = 10.5 \text{ Fre}^{-1/3} \quad (3)$$

여기서 식(3)의 적용 범위는 바닥밀도류가 형성된 후 밀도류전면이 하류단에 도달하기 전 까지이며 머리 뒤 밀도층내의 회석을 나타낸다.

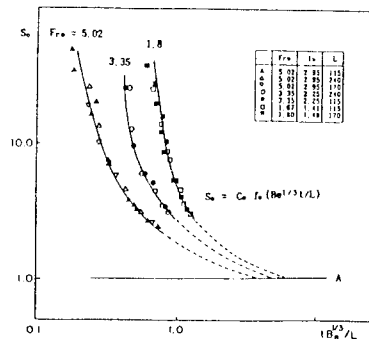
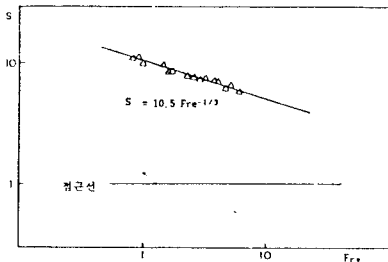


그림 8. Fre에 대한 밀도층내 회석(반사 전) 그림 9. 하류단에서 유훈되는 유체의 회석

하류단에서 월류되는 유체의 회석 S_0 에 대한 실험결과를 나타낸 것은 그림 9로써 회석 S_0 는 부력, 저수지길이, 시간의 함수이며 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$S_0 = C_0 f_0 (Be^{1/3} t/L) \quad (4)$$

본 연구결과에 의하면 하류단에서 월류되는 유체의 회석은 $Be^{1/3} t/L$ 함수로 나타낼 수 있고 계수 C_0 는 특성길이 l_b 에 따라 결정되는 상수임을 알 수 있다. 여기서 특성길이 l_b 는 $l_b = q_e / Be^{1/3}$ 으로 정의되는 매개변수으로써 부력과 유입량의 비를 나타낸다. l_b 값이 클수록 F_{r_0} 는 커지는 결과를 나타내는데 이는 계수 C_0 는 F_{r_0} 수에 의해 결정되는 상수라고도 고려할 수 있다. 동일 조건(저수지 길이 및 부력)에서 시간 t 에 따라 회석 S_0 가 작은 값을 나타내는 것은 시간의 경과에 따라 하류단에서 월류하는 유체의 밀도가 증가함을 말한다. 그림 9의 A선은 월류유체의 밀도가 유입유체의 밀도와 같은 선으로 시간이 흐름에 따라 A선에 점근적으로 수렴되는 것으로 판단된다.

그림 10은 고정된 점($X=L-3H, Z=0.81H$)에서 반사된 후 밀도층내의 회석을 나타낸 것으로써 회석 S_a 는 식(5)와 같은 형태로 나타난다.

$$S_a = C_a f_a (Be^{1/3} t/L) \quad (5)$$

여기서 계수 C_a 는 특성길이 l_b 또는 F_{r_0} 에 따른 상수이다. 따라서 유입초기조건(부력 및 유량)과 저수지의 크기가 주어지면 시간의 경과에 따른 저수지내 밀도층 및 월류유체의 회석에 대한 예측이 가능하다.

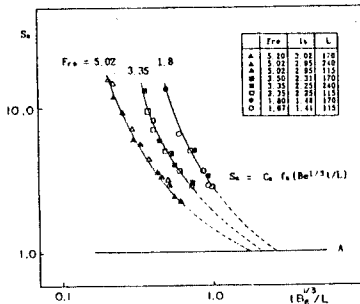


그림 10. 시간의 경과에 따른 밀도층내 회석(반사 후)

그림 11은 하류단에서 월류되는 유체의 농도(염도)에 대한 F_{r_0} 와 무차원시간(t/T , 여기서 T 는 밀도류전면이 하류단에 도달하는 시간)과의 관계를 나타낸 것이며 그림 12는 월류유체의 무차원농도 C_0/C_e 가 0.33에 이를

때까지 Fr_e 에 따른 저수지길이와 무차원시간과의 관계를 나타낸 것으로써 유입초기조건(농도 및 유량)과 저수지의 크기가 주어지면 시간의 경과에 따른 월류유체의 농도에 대한 예측이 가능하다.

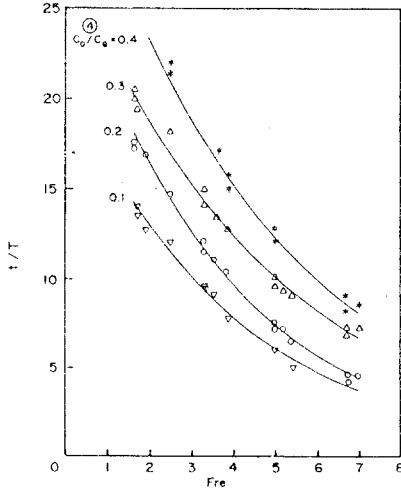


그림 11. Fr_e 와 무차원시간에 따른 월류유체의 농도

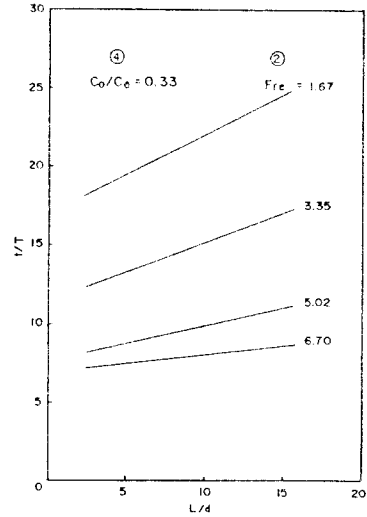


그림 12. C_o/C_e 이 0.33 일 때 Fr_e 에 따른 저수지길이와 무차원 시간 관계

4. 결론

저수지내흐름은 밀도류전면이 하류단에 도달하기 전과 후의 양상이 크게 다르다. 밀도류전면이 하류단에 도달하기 전에는 밀도층두께는 Fr_e 의 함수이며 밀도류전면이 하류단에 도달한 후에는 시간과 유입속도의 함수로 표현된다.

저수지내 밀도변화 및 하류단에서 월류되는 유체의 밀도는 저수지길, 시간, 부력흐름율의 함수이며 유입초기조건과 저수지의 크기가 주어지면 시간의 경과에 따른 농도예측이 가능할 것이다.