

성층류에서의 선택배제에 대한 실험연구

Experimental Study on Selective Withdrawal in Stratified Flows

조길제*·류시완**·이남주***

Gilje Cho, Siwan Lyu, Nam Joo Lee

요 지

우리나라는 1960년대를 기점으로 수자원의 효율적 이용을 위하여 각종 수리시설물이 건설되었으며 이 중 하나의 방안으로 대형 인공 저수지와 같은 시설물이 건설되었다. 저수지에는 강우시 탁수가 유입되는데 특히, 여름철에 집중되는 우리나라의 강우 특성상 이 시기에는 고탁도의 탁수가 유입된다. 탁수는 쉽게 정화되지 않고 저수지 내에서 성층화 현상을 일으키는데 성층화된 탁수는 물의 연직방향운동을 방해하여 심층부의 산소를 고갈시키고 이는 수질오염과 같은 결과로 이어진다. 그리고 방류시 하류하천까지 흘러가서 피해를 발생시킨다. 이러한 현상은 수질관리에 많은 어려움을 주고 있어 적절한 해결책이 요구되는 바이다.

본 연구에서는 성층구조와 방류유량에 의한 방류특성의 변화를 알아보려고 하였다. 염수를 이용하여 실험수로 내 밀도성층을 구현하였으며, 선택배제 시 성층구조의 변화 및 흐름특성 파악을 위해 전도율계를 통한 염도측정을 이용하였다. 다양한 밀도성층 조건과 방류유량에 의한 선택배제 특성을 파악하기 위하여 밀도프루드수를 기준으로 실험조건을 설정하여, 다양한 조건에서의 밀도성층수체의 거동양상을 관찰하였다. 이상의 과정들을 통해 효율적인 선택배제 조건을 찾을 수 있었다.

핵심용어 : 선택배제, 성층구조, 전도율계, 밀도프루드수

1. 서론

저수지나 댐으로 유입되는 탁수는 수자원관리에 있어서 매우 중요한 고려사항이다. 일반적으로 탁수층은 저수지내의 밀도성층으로 인해 주로 중층에 분포하게 되는데, 특히, 가을철에 발생하는 수평 확산과 전도현상으로 인해 저수지 전역에 걸쳐 분포하게 되어 탁수현상의 장기화를 유발하기도 한다. 탁수의 지속기간이 장기화됨에 따라 하류하천의 수질저하와 정수장의 정수처리비용 증가 등의 사회적 문제가 야기된다. 2002년 태풍 ‘루사’와 2003년 태풍 ‘매미’로 인해 탁수가 저수지 내 전수층으로 확산되어 댐 방류수의 고탁도현상이 장기화된바 있다. 이로 인해 댐 하류에 위치한 정수장의 장애로 댐 방류가 중단되는 민원이 발생하는 등, 크고 작은 피해가 매년 발생하여 이에 대한 대책이 시급히 요구되고 있다(손병주, 2007). 본 연구에서는 취수탑 주변의 성층흐름에 관한 실험을 수행하여 성층구조나 취수량 변화에 따른 방류특성을 알아보고, 이를 통해 실제 하류하천에서 발생하는 피해를 줄이고 치수적 측면에서의 효율적인 수질관리방안을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

밀도류가 난류가 되면 밀도류의 경계면에서의 난류변동 성분에 의해 탁수층이 확산되므로 밀도류는 위로 흩어지게 되지만 유속이 매우 작은 층류 밀도류는 경계면이 확연히 구분되고 안정되어 있다. 하지만 두 층간의 유속차가 커지면 경계면은 파가 형성되며, 유속 차가 더욱 커지면 파는 점차 분쇄되어 층간의 혼합이

*.정회원·창원대학교 토목공학과 석사과정 ·E-mail : j3729@hanmail.net

**정회원·창원대학교 토목공학과 조교수 ·E-mail : siwan@changwon.ac.kr

***정회원·경성대학교 건설환경공학부 부교수 ·E-mail : njlee@ks.ac.kr

발생하게 된다(우효섭, 2001).

일반적으로 밀도차에 의한 영향을 받는 흐름의 특성을 설명하기 위해서 밀도변화에 대한 관성의 비를 의미하는 밀도프루드수를 사용한다. 이는 유입수와 저수지 수체 사이의 밀도차로 인해 발생하는 부력에 대한 관성력의 비로 표현 할 수 있는데, 유입수의 밀도프루드수가 1보다 작으면 중력이나 부력이, 1보다 크면 유속에 의한 관성력이 밀도류의 흐름특성을 지배하게 된다(윤성완 등, 2008).

$$Fr_d = \frac{U_0}{\sqrt{g\sigma h_d}}$$

$$\sigma = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1}$$

여기서, U_0 는 수평방향 유속 (cm/sec), g 는 중력가속도(cm/sec²), ρ_1 과 ρ_2 는 각각 경계단면에서의 밀도 (g/cm³), h_d 는 경계층의 두께 (cm)이다.

저수지 내 탁수저감을 위한 단기대책으로 집중강우로 인한 탁수유입 후 고탁수를 단기간에 선택적으로 방류하고 청수를 담수함으로써 저수지 내 탁수발생기간을 단축시키는 선택배제 개념이 제안된 바 있다(한국수자원공사, 2004). 그림 1에서 보는 바와 같이 밀도성층화 된 저수지 내에서 특정 수심에 위치하는 탁수를 선택적으로 배제하는데 있어서 방류시설로의 밀도류의 접근흐름과 주변 수체에서의 밀도성층구조는 방류유속 및 유량에 밀접한 영향을 받는다(김영도, 2005).

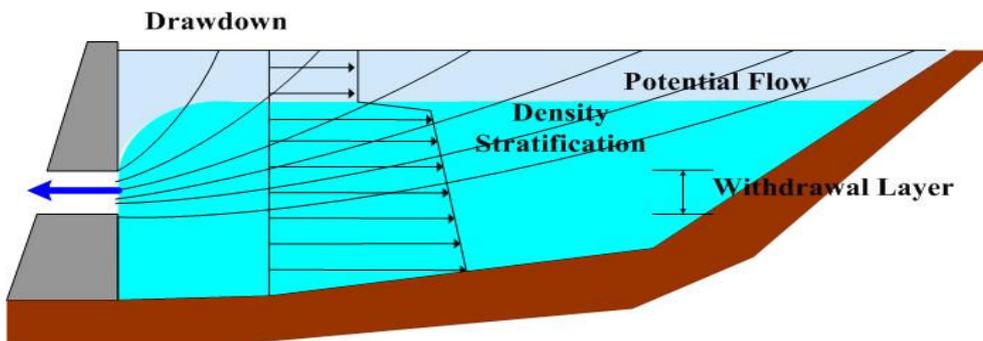


그림 1 성층화된 저수지에서의 선택방류와 수체거동

3. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 수조는 160 cm × 40 cm × 50 cm(가로×세로×높이)의 크기로 일정한 농도의 염수를 공급한 뒤 담수를 공급하여 수조 내에 밀도성층을 구현하고, 바닥에서 15 cm 높이에 위치한 직경 8 mm의 방류구를 통해 혼합층을 선택배제하여 실험을 진행하였다. 실험수조 내에 형성된 밀도성층의 수심별 농도 측정을 위해 전도율계(Kenek, MK-406)와 데이터로거(Keithly, DMM2700/DAS)를 사용하였으며, 방류구에 연결된 튜브의 출구에 유량계를 설치하여 방류량을 조절하였다. 전도율계는 염화나트륨 기준으로 0.03 % ~ 3 % 까지 측정이 가능하다. 전도율에 대한 정확도는 ±0.5 %의 범위이며, 밀도분포에 관한 정확도는 ±1.5 %의 범위에서 측정이 이루어진다. 100 Ω의 범위에서 4.5 V까지 측정이 가능하며 측정을 하고자하는 채널에서 검정을 수행해야 한다. 측정범위 내의 각각 염도가 틀린 4가지 용액으로 검정을 실시하였고 그 결과는 그림 2와 같다.

실험수조 내에 일정한 농도의 염수를 공급한 뒤에 그 위로 담수를 공급하여 혼합층을 만들고 점점 농도가 떨어지면서 밀도성층이 구현되게 하였다. 혼합층의 선택배제는 바닥에서 15 cm 위쪽에 위치한 방류구를 통해 이루어졌고 실험조건 별로 배제유량을 달리하여 선택배제와 동시에 연직방향의 농도분포 변동량을 측정하였다. 실험조건은 밀도성층구조와 방류유량에 따른 밀도프루드수로 결정하였고 표 1에 정리하였다. 표 1

에서 보는 바와 같이 5가지 조건에서 밀도프루드수는 모두 1을 넘는다. 이는 중력이나 부력보다는 유속에 의한 관성력에 밀도류의 흐름특성이 지배되는 것을 알 수 있다.

측정된 농도분포 변동량은 밀도의 변동 값으로 환산하여 RMSE(Root Mean Square Error) 방법으로 변동 평균치인 표준편차를 구해 경계층을 결정하였다. 성층화된 유체 내에서 경계층의 두께를 파악하는 것은 경계층의 거동을 이해하기 위해 필수적인 요소이다. 본 연구에서는 밀도 변동의 평균치인 표준편차 분포도를 이용하여 최대 표준편차 값의 10 % 값을 가지는 지점을 찾아 경계면으로 결정하였다.

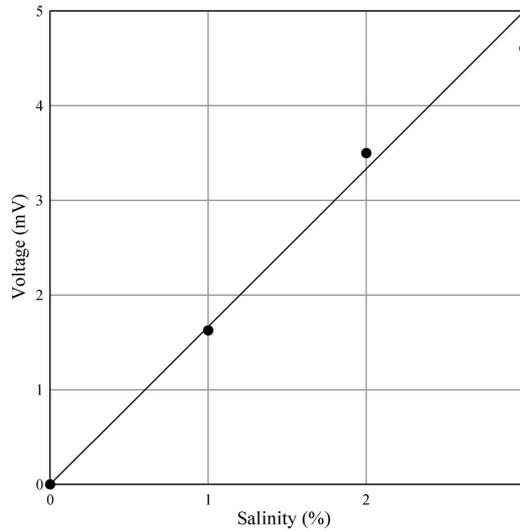


그림 2 전도율계 검증결과

표 1 실험조건

	방류유량 (L/min)	방류유속 (cm/s)	σ	Fr_d
SW01	1.09	36.14	0.0016	34.85
SW02	1.11	36.81	0.0024	21.34
SW03	1.13	37.47	0.0021	20.59
SW04	1.18	39.13	0.0025	16.35
SW05	0.41	13.45	0.0021	8.59
SW06	0.52	17.24	0.0022	7.38
SW07	0.24	7.91	0.0015	5.11
SW08	0.28	9.44	0.0020	4.73
SW09	0.08	2.54	0.0016	1.38
SW10	0.10	3.20	0.0028	1.03

4. 실험결과분석

성층화된 유체 내에는 세 가지의 층이 존재한다. 평균밀도가 수심에 따라 변하지 않는 상부, 하부층, 그리고 밀도기울기가 선형적으로 변화하는 경계면 층이 있다. 그림 3은 수심을 방류공의 직경으로 나누어 무차원화하여 나타낸 조건별 밀도분포이다. 그림 3을 통해 실험수조내의 밀도분포가 이상적인 밀도성층 분포와 거의 유사하게 구현되었음을 볼 수 있다.

방류가 진행되는 동안 수심별 농도값의 변동성분을 측정하고 RMSE방법을 이용하여 변동의 표준편차를 구하였다. 표준편차가 최대가 되는 지점을 혼합층의 중심으로 하고, 최대값의 10%가 되는 두 지점을 찾아 혼합층의 경계면으로 결정하였다. 각 조건별 밀도변동의 표준편차와 경계면의 위치는 밀도분포와 동일하게 각 수심을 방류구의 직경으로 나누어 무차원화 시켜 표 2와 그림 4에 나타내었다.

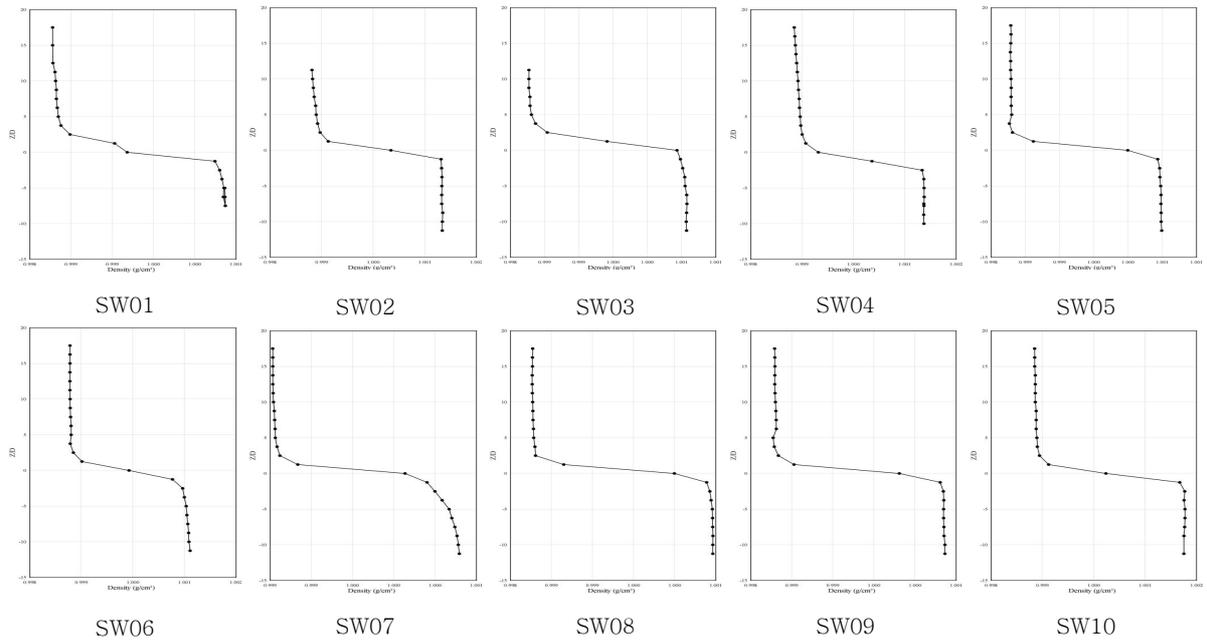


그림 3 실험조건별 밀도성층구조

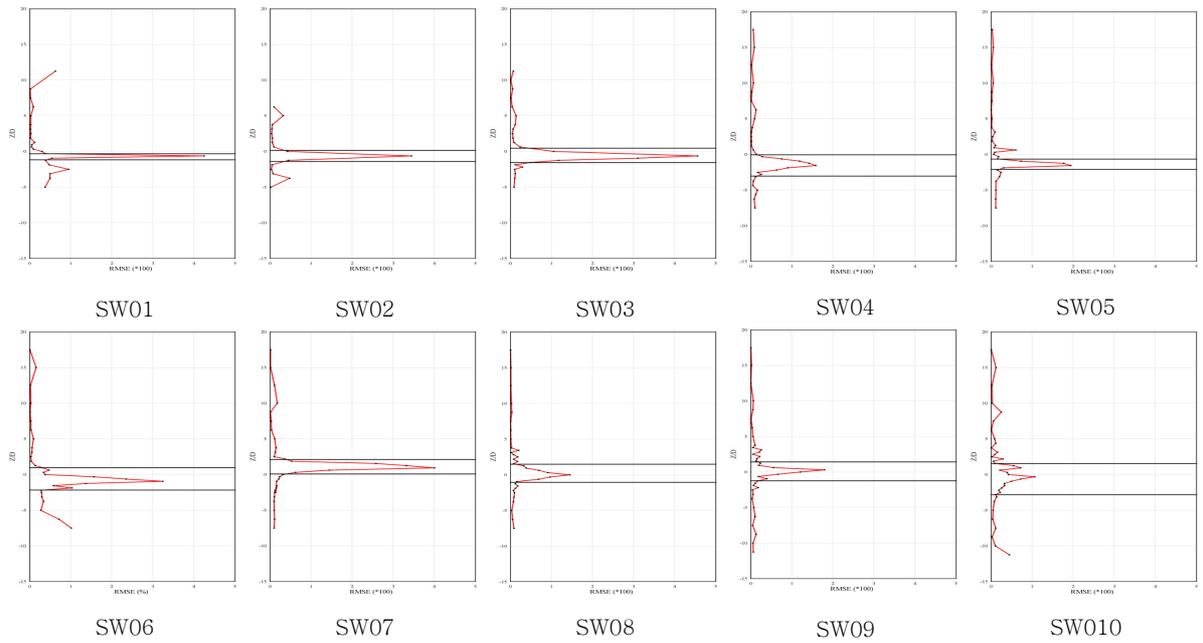


그림 4 실험조건별 밀도변동분포

표 2 경계층 두께

	SW01	SW02	SW03	SW04	SW05	SW06	SW07	SW08	SW09	SW10
경계층 두께 h_d/D	0.85	1.57	2.03	2.97	1.46	3.12	2.03	2.53	2.65	4.38

밀도프루드수가 증가할수록($Fr_d > 1$) 유속에 의한 관성력이 밀도류의 흐름특성을 지배하게 되는데, 이는 밀도성층의 불안정을 야기시켜 선택취수 영역의 두께가 증가하게 된다. 하지만 본 연구의 결과를 보면 밀도프루드수가 증가할수록 경계층의 두께가 오히려 줄어들었음을 볼 수 있다. 이는 관성력이 수체내 흐름특성을 지

배하고 있지만 밀도의 분포와 경계면 밀도차가 영향을 미친 것으로 사료된다.

아래 그림 5에서 성층구조와 방류유량에 의한 방류특성의 변화에 대해 밀도프루드수와 무차원화된 경계층 두께의 관계로 도시하였다. 그림을 보면 약간의 산포를 보이지만 밀도프루드수의 증가에 따라 경계층의 두께가 감소하는 경향을 볼 수 있다.

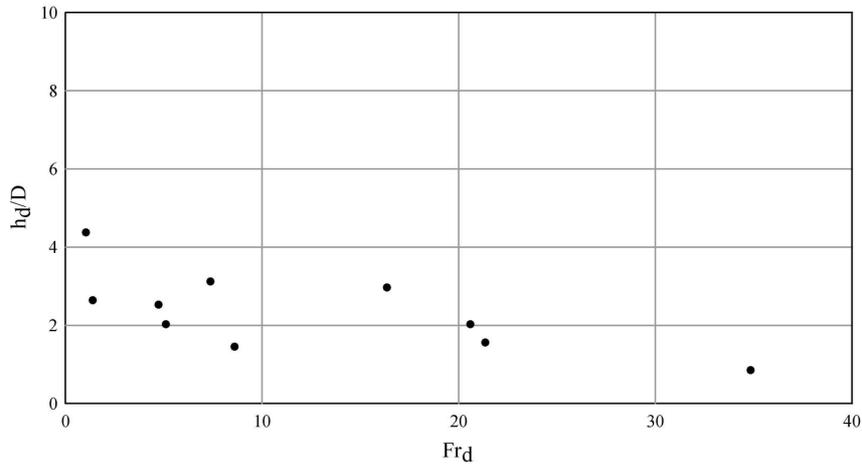


그림 5 밀도프루드수와 경계층 두께와의 관계

5. 결론

본 연구에서 선택배제 시 밀도성층화된 수체내에서 일어나는 흐름특성을 실험을 통해 구명하고자 하였다. 그 결과 밀도프루드수의 증가함에 따라 선택취수 영역의 폭이 줄어드는 경향을 확인할 수 있었다. 하지만 이는 밀도프루드수가 1보다 큰 흐름에서 유속에 의한 관성력에 의해 선택취수 영역의 폭이 증가하는 흐름특성과 다를 수 있다. 향후 방류시 연직방향의 유속의 분포와 유속 변동성분을 측정하여 혼합층의 경계를 알아보고, 밀도의 변동성분으로 구한 혼합층 경계면과의 비교를 통해 밀도성층에서의 보다 정확한 방류특성을 파악할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설기술혁신사업의 연구비지원(O6건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 윤성완, 정세웅, 최정규(2008). 홍수 규모별 대청호에 유입하는 하천 밀도류의 특성변화, 한국수자원학회 논문집, 제 41집 제 12호, pp. 1219~1230.
2. 손병주(2007). PIV를 활용한 저수지내 선택취수방안에 대한 실험적 연구, 석사학위논문, 인제대학교.
3. 김영도(2006), 저수지내 선택취수탑 운영방안 개선을 위한 성층흐름 연구, 한국수자원학회 2005년 분과위원회 연구과업보고회, pp. 47~75,
4. 한국수자원공사(2004). 임하댐 탁수저감 방안 수립 보고서.
5. 우효섭(2001). 하천수리학, 청문각.