

유량 규모별 소양호 유입 밀도류 특성 변화

Characteristics of Inflow Density Currents with Different Flow Rates in Soyang Reservoir

최환규*, 정세웅**, 윤성완***, 오동근****

Hwan Gyu Choi, Se Woong Chung, Sung Wan Yoon, Dong Geun Oh

요 지

여름철 강우시 저수지로 유입하는 고탁도의 하천수는 저수지 주변 수체에 비해 낮은 수온과 높은 부유물질 농도(SS)로 인해 상대적으로 높은 밀도를 가지며, 저수지 내에서 동일 밀도층을 따라 분포하며 밀도류를 형성하게 된다. 탁수는 대부분 장기간 저수지에 체류하며 수질과 수생태계에 큰 영향을 주게 된다. 따라서 저수지로 유입한 탁수의 밀도류 거동특성을 파악하는 것은 저수지 운영, 수질관리 및 수생태계 보호를 위한 관리대책 수립에 있어서 중요한 요소이다. 본 연구의 목적은 횡방향 평균 2차원 수치모델을 이용하여 초기수위별 다양한 유량규모에서 소양호로 유입하는 밀도류의 거동특성(유입경계지점 수심(h_0), 침강점 수심(d_p)과 거리(X_p), 분리점 수심(d_s), 중층류 관입두께(h_i), 댐 축 도달시간(t_d), 회석율(β))을 분석하여 저수지 수질관리를 위한 의사결정지원 기초정보를 제공하는데 있다. 밀도류의 거동분석을 위해 사용된 유량조건은 그동안 소양호에서 발생한 홍수크기를 바탕으로 7개의 등급으로 나누었으며, 각각의 유량조건별 수문곡선은 2007년 수문사상 중 7월 30일부터 8월 30일까지의 수문사상을 바탕으로 수정가우시안 공식을 사용하여 산정하였다. 탁수 거동 특성의 모의는 서로 다른 초기 수위 및 유량조건하에서의 탁수거동을 나타냈고, SS농도 25 mg/L 이상을 기준으로 하여 탁수층의 d_p , X_p , d_s , h_i , t_d , β 를 산정하였다. 일반적으로 유량규모가 커질수록 d_p 와 d_s 는 증가하였고, X_p 는 댐 축으로부터 가까워짐이 확인되었으나, 동일 유량규모에 대해 초기 수위가 증가함에 따라 X_p 는 대체로 댐으로부터 멀어졌다. h_i 는 유량규모가 증가함에 따라 완만하게 증가하는 경향을 보였고, t_d 는 초기수위가 EL. 165 m일 때 유량이 2,000 CMS 미만인 경우 댐 앞까지 도달하지 못하는 것으로 나타났으며, 나머지 수위조건에서는 유량이 3,000 CMS 미만인 경우 댐 앞까지 도달하지 못하는 것으로 나타났다. 유량 규모에 따라 X_p 가 0 km인 지점과 19 km인 지점에서의 β 값을 산정한 결과 일반적으로 유량규모가 커질수록 유입수의 회석효과는 작아지며 초기수위가 커질수록 증가하는 경향을 나타냈다. 연구 결과는 탁수 발생 초기 저수지 운영 실무자들이 유량규모 및 초기 수위조건에 따른 밀도류의 거동특성을 신속히 예측하는 목적으로 사용될 수 있다.

핵심용어 : 소양호, 밀도류, 탁수, 침강점, 탁수 점유율, CE-QUAL-W2

1. 서론

문순 기후대에 위치하고 있는 우리나라 대부분의 저수지에서는 여름철 홍수기에 종종 고탁도의 탁류가 발생하여 성층화된 저수지로 유입하게 된다. 저수지로 유입된 고탁도의 하천수는 낮은 수온과 고농도의 부유

* 비회원 · 충북대학교 환경공학과 석사과정 · E-mail : gyu0912@hanmail.net

** 정회원 · 충북대학교 환경공학과 부교수 · E-mail : schung@chungbuk.ac.kr

*** 정회원 · 충북대학교 환경공학과 박사과정 · E-mail : mshwdqud@hanmail.net

**** 비회원 · 충북대학교 환경공학과 석사과정 · E-mail : orifyo@hanmail.net

물질(SS)로 인해 저수지 주변 수체보다 상대적으로 높은 밀도를 가지며, 이러한 밀도차로 인해 형성된 밀도류의 저수지 내 진행과정은 저수지의 수질과 수생태계에 큰 영향을 줄 수 있다. 그러므로 저수지 내 밀도류의 거동에 대한 정확한 이해와 분석은 저수지 운영, 수질관리 및 수생태계 보호를 위한 대책수립에 있어서 중요한 요소이다(Gu and Chung, 1998; Chung and Gu, 1998).

밀도류는 동일한 밀도를 가진 수층을 따라 이동하게 되며, 유입수의 밀도와 유입 홍수량 그리고 저수지의 성층구조에 따라 표층류, 중층류, 바닥류의 형태(그림 1)로 나타난다(Chung and Gu, 1998). 여름철 홍수기에 우리나라 대부분의 대형 저수지에서는 유입된 고탁도의 탁수가 중층밀도류를 형성하며 장기간 체류하므로 이의 거동에 대한 정확한 예측은 저수지 탁수관리대책 수립을 위해 중요한 요소이다(정세웅, 2004; Chung and Gu, 1998).

본 연구의 목적은 선행연구(류인구, 2009)를 통해 검·보정된 횡방향 평균 2차원 수치모델(CE-QUAL-W2)을 사용하여 초기수위별 다양한 유량규모에서 소양호로 유입하는 밀도류의 거동특성(유입경계지점 수심(h_0), 침강점 수심(d_p)과 거리(X_p), 분리점 수심(d_s), 중층류 관입두께(h), 댐 축 도달시간(t_d), 희석율(β))을 분석하여 저수지 수질관리를 위한 의사결정지원 기초정보를 제공하는데 있다.

2. 연구방법

2.1 연구대상지역

연구대상지역인 소양호는 북한강 지류인 소양강에 위치하며, 춘천시·양구군·인제군에 걸쳐있는 국내 최대의 인공호로써 한강 하류의 홍수조절 및 발전, 매일 약 3 백만 m^3 인의 용수공급, 한강의 홍수조절, 발전 등 다목적으로 사용하고 있다. 소양호는 길이가 60 km, 만수시 최대 수심 118 m, 평균 폭이 약 0.45 km로 폭이 좁고 긴 형상의 저수지이다(김범철, 2004).

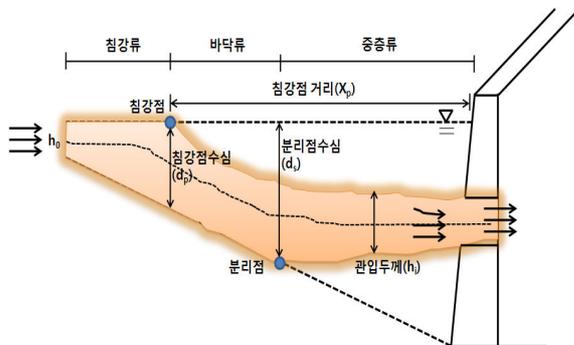


그림 1. 댐 내 밀도류 흐름 특성

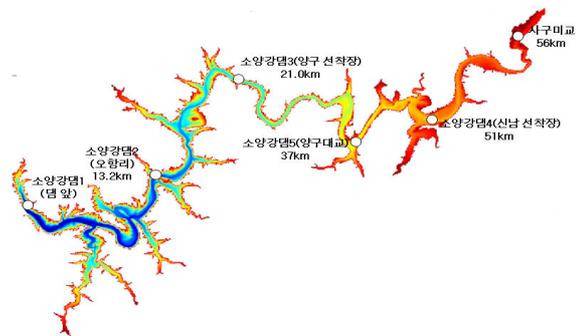


그림 2. 연구 대상 지역

2.2 적용방법

홍수규모 선정을 위해 1978년 ~ 2007년까지의 최근 30년간 일평균 최고유입량이 1,000 CMS 이상인 강우사상을 대상으로 강우, 수위, 유입량 및 탁수발생 월에 대한 빈도분석을 실시하였다. 빈도분석 결과를 바탕으로 초기 수위 조건은 6월 ~ 9월 사이의 초기수위를 사용하였으며, 홍수규모는 1,000 CMS에서 7,000 CMS 까지 1,000 CMS 간격으로 구성하였다.

모의기간 동안의 댐 유입량과 방류량 조건은 그림 3과 같이 2007년 수문사상 중 7월 30일부터 8월 30일 까지의 수문사상을 바탕으로 Curve fitting equation을 사용하여 각 홍수규모에 대해 산정하였다. 사용된 Curve fitting equation은 수정 가우시안 식(식 1)으로 5개의 매개변수를 사용하며, 변수 최적화를 통해 홍수 규모별 매개변수를 산정하였다. 그림 4에 홍수규모 2,000 CMS에 대한 수문곡선 생성 예를 나타내었다.

$$f = y_0 + a \times \exp(-0.5 \times \text{abs}((x - x_0)/b)^c) \quad (1)$$

여기서 y_0 = 기본 유입량, x_0 = Peak 시점, a = 시간별 최대 유입량, $b \cdot c$ = 홍수사상구간.

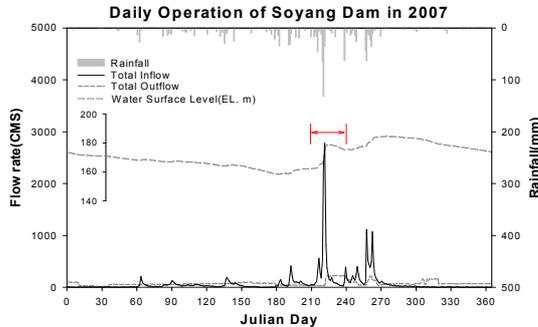


그림 3. 2007년 소양강댐 수문사상

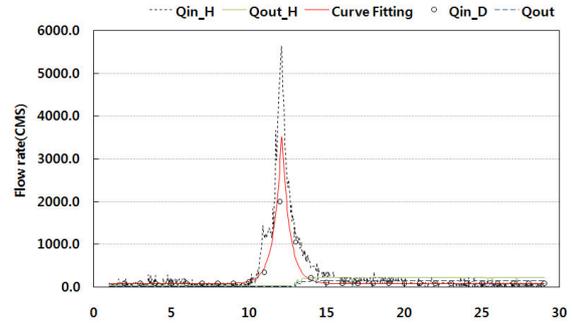


그림 4. 홍수규모 2,000 CMS에 대한 수문곡선 생성 예

3. 결과 및 고찰

초기 수위에 따른 각각의 유량규모에 대해 산정한 침강점 및 분리점의 위치를 표 1에 나타내었다. 수치모델의 모의결과로부터 침강점의 위치결정은 표층에서의 SS 농도가 25 mg/L 이하가 되는 지점을 기준으로 하였다. 유량규모별로 산정한 침강점의 수심을 유입부의 수심(h_0)으로 나누어 무차원화 한 결과를 그림 5에, 댐 축으로부터의 침강점 거리를 그림 6에 각각 나타내었다. 유량규모가 커질수록 유입수의 운동량이 흐름을 멀리 밀어내기 때문에 침강점의 수심은 깊어지고 침강위치가 댐 축으로부터 가까워짐을 확인할 수 있었다. 그러나 동일 유량규모에 대해 초기 수위가 증가함에 따라 침강점 거리는 대체로 댐 축으로부터 멀어지는 경향을 보이는데 이는 초기 수위의 상승으로 유입부의 단면적이 증가하면서 유속이 감소하여 유입수의 운동량이 작아지기 때문인 것으로 판단된다.

침강점을 지난 밀도류는 음부력과 관성력에 의해 저수지의 경사진 하상을 따라 이동하면서 바닥밀도류를 형성하게 된다. 바닥밀도류는 저수지 주변수체와 혼합하면서 약간의 밀도 감소가 발생하며, 저수지 주변수체와 동일한 밀도를 갖게 되는 수심에 도달했을 때 저수지 바닥으로부터 분리된다. 그림 7에 바닥밀도류의 분리점 수심을 유입부의 수심으로 나누어 무차원화 한 결과를 나타내었다. 유량규모가 커질수록 분리점 수심은 깊어지는 경향을 보이는데, 이는 유량규모가 증가함에 따라 유입수의 운동량이 커져 침강거리가 감소하고 바닥밀도류의 추진력이 증가하기 때문으로 사료된다. 그러나 유량규모가 7,000 CMS인 경우 밀도류는 저수지 바닥으로부터 분리되지 못하고 댐 축까지 도달하는 것으로 나타나는데, 이는 유입수의 밀도가 하천의 수온뿐만 아니라 SS 농도에도 영향을 받기 때문이다.

표 1. 초기 수위별 유량 규모에 따른 침강점 수심(d_p) 및 거리(X_p)와 분리점 수심(d_s)

Q (CMS)	EL. 165 m ($h_0=3$ m)			EL. 175 m ($h_0=3$ m)			EL. 180 m ($h_0=4$ m)			EL. 190 m ($h_0=4$ m)		
	d_p (m)	d_s (m)	X_p (km)	d_p (m)	d_s (m)	X_p (km)	d_p (m)	d_s (m)	X_p (km)	d_p (m)	d_s (m)	X_p (km)
1,000	26.0	30.5	37.5	23.1	38.2	45.5	17.4	33.3	49.5	20.9	44.6	53.5
2,000	45.7	36.5	31.5	27.4	52.0	41.5	30.5	43.6	43.5	27.9	52.8	49.5
3,000	53.5	40.8	29.5	36.0	58.1	39.5	33.4	50.1	41.5	39.8	58.4	43.5
4,000	55.4	48.7	27.5	42.2	63.3	37.5	43.4	58.6	39.5	53.1	62.2	39.5
5,000	62.8	57.6	25.5	50.4	69.5	35.5	44.4	65.8	39.5	53.7	70.1	39.5
6,000	65	73.0	25.5	57.4	72.4	33.5	57.2	71.2	35.5	55.1	75.5	39.5
7,000	67.8	●	23.5	56.9	●	33.5	64.2	●	33.5	67.5	●	33.5

● : 바닥밀도류 댐 축에 도달

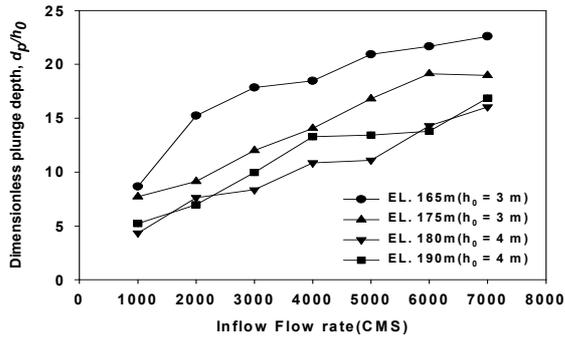


그림 5. 유량규모에 따른 침강점 위치변화

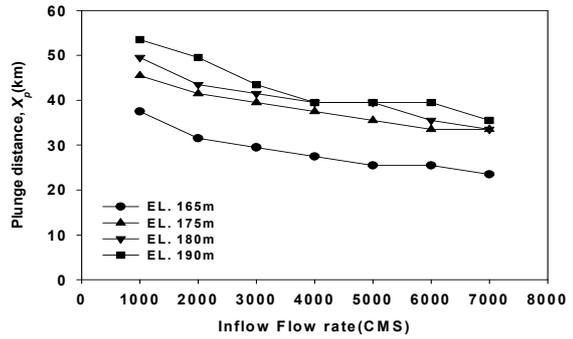


그림 6. 유량규모에 따른 침강점 거리

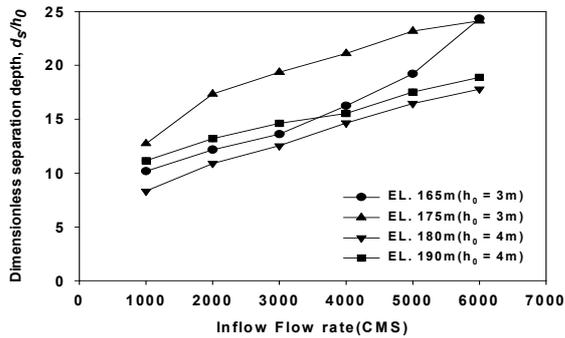


그림 7. 유량규모에 따른 침강점 위치변화

저수지 바닥에서 분리된 바닥밀도류는 동일한 밀도층을 따라 저수지 내로 관입되어 수평으로 진행되며 중층류를 형성하게 된다. 중층류의 특성은 관입두께(h_i) 및 댐 앞 도달시간으로 나타낼 수 있다. 관입두께는 모의시작 15일 후 댐축으로부터 19 km 지점에서 가장 높은 SS 농도의 10% 범위를 기준으로 산정하였으며, 도달시간은 최고 SS 농도가 유입하는 시점을 기준으로 하여 댐축에 SS 25 mg/L가 도달하는 시간으로 산정하였다. 초기 수위별 유량규모의 증가에 따른 관입두께를 그림 8에, 도달시간을 그림 9에 각각 나타내었다.

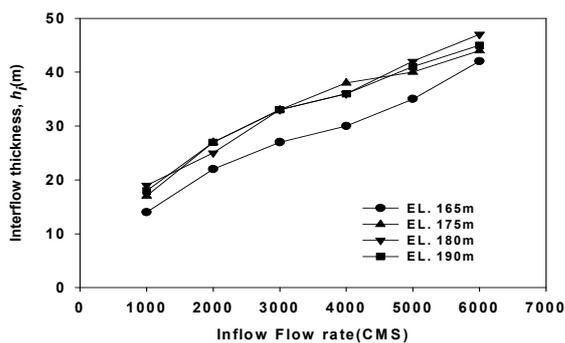


그림 8. 유량규모에 따른 관입두께의 변화

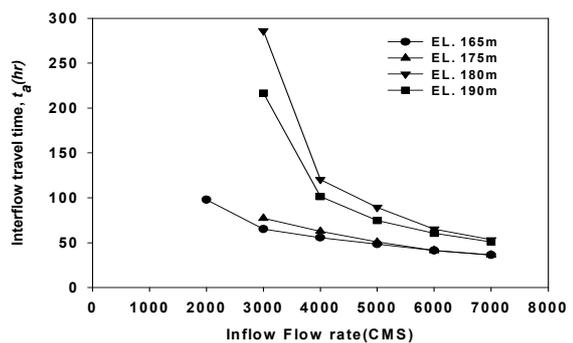


그림 9. 유량규모에 따른 도달시간의 변화

관입두께는 유량규모가 증가함에 따라 완만하게 증가하는 경향을 보였는데 이는 유입유량의 증가로 인해 저수지 수위가 상승한 것이 원인으로 판단된다. 초기수위가 EL. 165 m인 경우 다른 초기수위조건에 비해 얇은 것으로 나타났으나, 나머지의 경우 관입두께는 거의 유사하게 나타났다. 도달시간은 초기수위가 EL. 165 m일 때 유량이 2,000 CMS 미만인 경우 댐 앞까지 도달하지 못하는 것으로 나타났으며, 나머지 수위조건에서는 유량이 3,000 CMS 미만인 경우 댐 앞까지 도달하지 못하는 것으로 나타났다. 또한 초기수위가 EL. 165

m ~ EL. 175 m의 범위에서는 유량규모의 증가에 따른 도달시간의 감소추세가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 반면, EL. 180 m ~ EL. 190 m의 범위에서는 유량규모가 3,000 CMS에서 4,000 CMS로 증가할 때 도달시간은 급격히 짧아지는 것으로 나타났으나 유량규모가 4,000 CMS 이상인 경우 흐름에 의한 운동량의 증가에 비해 난류발생에 의한 저항이 증가하여 도달시간의 감소추세가 둔화되는 것을 볼 수 있다.

서로 다른 유량규모에 대하여 저수지 유입부를 통과한 탁수가 댐으로부터 19 km 지점과 댐 앞까지 도달하면서 감소하는 정도를 회석율(β)로 정의하고 X_p 가 0 km인 지점과 19 km인 지점에서의 β 값을 산정하여 표 2에 제시하였다. 그 결과, 유량규모가 커질수록 유입수의 회석효과는 작아지며 초기수위가 커질수록 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 홍수규모가 커짐에 따라 탁수의 도달시간이 점점 빨라지면서 최고 탁도를 포함하는 중층밀도류가 주변수체와 충분히 혼합되지 못하고 댐측에 도달하기 때문인 것으로 사료된다.

표 2. 모의시작 15일, 20일 후 초기수위별 유량규모에 따른 회석률(β) 단위 : %

Q (CMS)	EL. 165 m				EL. 175 m				EL. 180 m				EL. 190 m			
	Xp(0 km)		Xp(19 km)		Xp(0 km)		Xp(19 km)		Xp(0 km)		Xp(19 km)		Xp(0 km)		Xp(19 km)	
	15일	20일														
1,000	99.9	91.3	53.1	69.9	99.9	95.8	72.2	75.5	99.9	99.6	97.9	93.3	99.9	99.8	95.3	94.3
2,000	96.6	67.5	43.3	54.6	99.2	82.8	50.5	59.0	99.9	96.4	84.0	74.7	99.9	97.7	75.1	73.6
3,000	85.6	59.0	42.1	55.6	92.6	67.6	46.0	56.0	99.9	91.5	69.0	67.4	99.9	91.3	67.8	64.3
4,000	85.0	60.7	47.2	58.9	90.1	68.3	58.9	64.3	99.9	85.6	65.0	65.2	99.9	77.4	66.1	67.4
5,000	85.8	63.9	49.3	59.1	87.2	69.7	62.8	66.3	99.6	80.7	63.4	66.3	98.5	73.0	66.7	69.5
6,000	90.4	69.4	50.0	58.2	85.0	70.8	63.8	67.0	97.2	74.8	69.1	71.0	93.1	75.6	71.5	72.9
7,000	67.8	62.7	44.3	58.7	87.9	73.5	66.5	70.8	93.3	77.0	74.0	74.5	91.6	77.4	71.5	73.9

4. 결론

홍수시 소양호로 유입하는 하천 밀도류의 유량규모별 거동특성을 CE-QUAL-W2 모델을 이용하여 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 소양호로 유입한 탁수는 유량규모에 비례하여 d_p 와 d_s 는 증가하였고, X_p 는 댐측에 가까워지는 것으로 나타났다. 그러나 동일 유량규모에 대해 초기 수위가 증가함에 따라 유입수 운동량의 감소로 인해 X_p 는 댐으로부터 멀어졌다. t_b 는 유량규모가 증가함에 따라 완만하게 증가하는 경향을 보였고, t_s 는 초기수위가 EL. 165 m일 때와 나머지 조건일 때 각각의 유량이 2,000 CMS, 3,000 CMS 미만인 경우 댐 앞까지 도달하지 못하는 것으로 나타났다. 유량 규모에 따라 X_p 가 0 km인 지점과 19 km인 지점에서의 β 값을 산정한 결과 대체로 유량규모가 커질수록 유입수의 회석효과는 작아지며 초기수위가 커질수록 증가하는 경향을 나타냈다. 이번 연구 결과는 탁수 발생 초기 저수지 운영 실무자들이 유량규모 및 초기 수위조건에 따른 밀도류의 거동특성을 신속히 예측하는 목적으로 사용될 수 있다.

참고문헌

1. 김범철, 김윤희 (2004). 아시아 문순지역의 대형댐(소양호)에서의 인순환과 2차원모델의 적용, Korean J.Limnolm 37(2), pp. 205-212.
2. 류인규 (2009). 성층화된 저수지에서 선택 취수가 수리 및 탁수 거동에 미치는 영향, 석사학위논문, 충북대학교.
3. 정세웅 (2004). 성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링, 대한환경공학회지, 제26권 제9호, pp. 970-978.
4. Chung, S.W., and Gu, R. (1998). "Two-dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir." Journal of Hydraulc Engineering ASCE, Vol. 124, No. 7, pp. 704- 711.
5. Gu, R., and Chung, S.W. (1998). "Reservoir flow sensitivity to flow and ambient parameters." Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 124, No. 3, pp. 119-128