

홍수 규모별 대청호 유입 하천 밀도류 침강점 변화

Variation of the Plunging Points of Inflow Density Currents in Daecheong Reservoir with Different Flood Magnitude

윤성완*, 정세웅**, 예령***, 최정규****, 오동근*****

Sung Wan Yoon, Se Woong Chung, Lyeong Ye, Jung Kyu Choi, Dong Geun Oh

요지

강우-유출에 의해 성층화된 저수지로 유입하는 하천수는 저수지 표층에 비해 낮은 수온과 높은 부유물질(SS) 농도를 가지므로 저수지 표층수보다 상대적으로 높은 밀도를 유지한다. 하천으로부터 유입한 밀도류는 유속에 의한 관성력이 두 수체의 밀도차에 의한 음의 부력보다 큰 구간까지는 저수지 표층을 따라 진행하지만, 두 힘이 같아지는 지점에서 밀도류는 더 이상 진행하지 못하고 저수지 수면 아래로 침강하며 이 과정에서 수체간의 많은 혼합이 일어난다. 따라서 홍수시 유입한 탁수의 침강점에 대한 정확한 예측은 수질관리를 위한 현장조사, 그리고 탁수거동 해석 및 최적관리대책 마련에 중요한 요소이다. 본 연구의 목적은 홍수시 대청호로 유입하는 하천 밀도류의 침강위치를 홍수규모별로 경험식과 수치모델을 통해 산정함으로써 두 방법 간의 장·단점을 비교하고, 탁수 현장조사와 최적관리를 위한 기초정보를 제공하는데 있다. 유입수의 모의조건은 그 동안 대청호에서 발생한 홍수 크기를 기준으로 9개의 등급으로 나누었으며, 저수지 성층조건은 여름철 탁수가 유입되기 전의 발달된 성층구조를 적용하였다. 유입수와 저수지 성층구조의 특성치는 밀도 Froude 수(Fr_f)로 나타냈으며, Fr_f 조건별로 침강점 위치를 저수지 단면을 삼각형태로 가정한 Hebbert et al. (1979) 경험식과 2차원 수치모델로 산정하여 그 결과를 비교하였다. 대청호로 유입한 탁수는 홍수규모에 따라 대정리 수역에서 회남수역 사이 구간에서 침강하였으며, Fr_f 값이 클수록 침강점 수심이 깊어지는 경향을 보였다. 경험식으로 산정한 침강점 수심은 정상상태 조건을 가정하므로 홍수에 의한 수위변화를 고려하지 못하며, 실제의 불규칙한 하상표고를 일정한 하상경사로 가정하기 때문에 2차원 모델의 결과보다 과대산정하는 경향을 보였다. 따라서 홍수가 연속해서 발생하며 수위변화가 심한 국내 저수지 여건에서 하천 유입 밀도류의 거동을 보다 정확히 예측하기 위해서는 2차원 또는 3차원 수치모델을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 대청호, 저수지, 밀도류, 침강점, 탁수

1. 서론

강우시 저수지로 유입하는 하천수는 저수지 주변수에 비해 낮은 수온과 높은 부유 및 용존 고형물의 농도를 가지므로 저수지 표층수에 비해 높은 밀도를 가지게 된다. 이러한 밀도차로 인해 형성된 밀도류는 동일한 밀도를 가진 수층을 따라 이동하게 되며 이 과정에서 상층류(overflow), 중층류(interflow), 심층류(underflow)의 세 가지 형태로 구분되어 진다. 상층류의 형태로 흐르던 유입수는 유속에 의한 관성력과 음의

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

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

*** 정회원 · 충북대학교 환경공학과 석사과정 · E-mail : withye@chungbuk.ac.kr

**** 정회원 · 충북대학교 환경공학과 석사과정 · E-mail : chongjudae@nate.com

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

부력이 같아지는 지점에서 저수지 수면 아래로 침강하게 되며, 이러한 현상이 일어나는 지점을 침강점(plunge point)이라고 한다(Alavian et al., 1992; Fischer et al., 1979; Ford and Johnson, 1981). 이 지점은 물의 침강성으로 인하여 표면에 거품이나 부패성 유기물 등이 떠를 이루게 되며, 수체간의 혼합으로 인하여 오염물질의 확산 및 이송이 활발히 일어나는 지점이기도 하다. 따라서 유입하는 고탁수에 대한 침강점의 정확한 예측은 저수지의 수질관리를 위한 현장조사 및 탁수거동의 해석, 그리고 댐 저수지 수질관리를 위한 대책 마련에 있어서 중요한 요소이다(정세웅, 2002, 2004; Chung et al., 1998).

따라서 본 연구의 목적은 홍수시 대청호로 유입하는 하천 밀도류의 침강위치를 홍수규모별로 경험식(Hebbert et al., 1979)과 수치모델을 통해 산정함으로써 두 방법 간의 장·단점을 비교하고, 저수지 수질관리를 위한 기초정보를 제공하는데 있다.

2. 연구방법

2.1 연구대상지역

연구대상지역인 대청호는 대전과 청주를 비롯한 충청지역에 매일 약 백만 m³의 생활 및 공업용수를 공급하는 금강유역의 최대 상수원이며, 금강 중하류 지역의 홍수조절 및 수력발전 등의 다목적으로 사용되고 있다. 대청호는 최대 폭이 약 1km 정도인 비교적 길고 폭이 좁은 수지상의 저수지로 유입부의 단면형상은 삼각형에 가까운 형태를 지니고 있다(한국수자원공사, 1991).

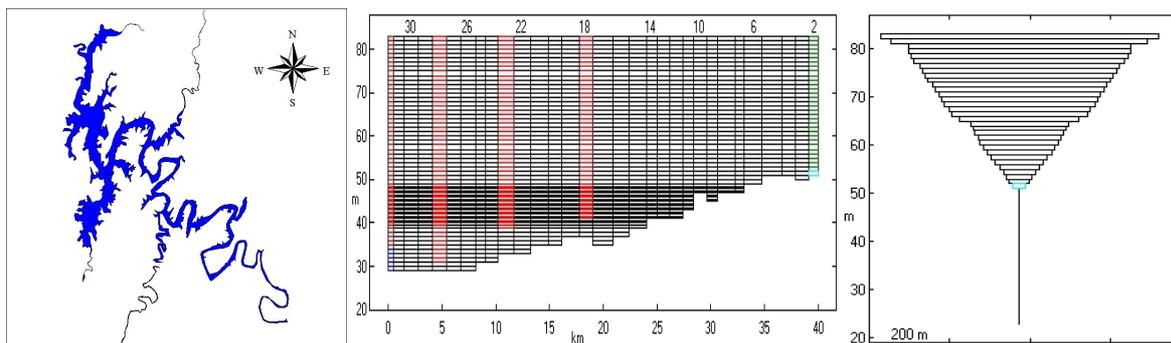


Fig 1. Study site and longitudinal/vertical section of Daecheong reservoir used in CE-QUAL-W2

2.2 적용방법

유입수와 저수지 성층구조의 특성치는 유입수와 저수지 수체 사이의 밀도차로 인해 발생하는 부력에 대한 유입수의 관성력의 비로 표현되는 Froude 수(Fr_i)로 나타낼 수 있으며, 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Fr_i = \frac{u}{\sqrt{g \frac{|\Delta\rho|}{\rho} h_o}} \quad (1)$$

여기서, Fr_i = Froude number, g = 중력가속도(m/s²), $\Delta\rho$ = 유입수와 표면수의 밀도차(kg/m³), ρ = 유입수의 밀도(kg/m³), h_o = 유입수의 깊이(m), u = 유속(m/s)이다.

유입수의 Fr_i 가 1보다 작으면 중력이나 부력이 지배적이며, 1보다 크면 관성력이 지배적으로 유속에 의한 관성력이 음의 부력과 같아지는 지점에서 유입수의 침강이 일어나게 된다. Hebbert et al.(1979)는 저수지의 단면을 삼각형으로 가정하였을 때의 침강점에서의 수심 및 Froude number를 식 (2)와 식 (3)으로 정의하였

다.

$$d_p = \left[\frac{2Q^2}{\left(Fri_p^2 \frac{g |\Delta\rho|}{\rho} \tan^2(\Phi) \right)} \right]^{1/5} \quad (2)$$

$$Fri_p \approx \frac{\sin(\Phi)\tan(S_0)}{C_D} [1 - 0.85 C_D^{1/2} \sin(\Phi)] \quad (3)$$

여기서, Q= 유입유량(m³/s), ϕ = 삼각단면의 angle/2(rad), C_D =무차원 저수지 바닥 Drag 상수로 저수지 바닥 마찰계수와 유입수와 저수지 물의 경계면 마찰계수의 합을 4로 나눈 값이다.

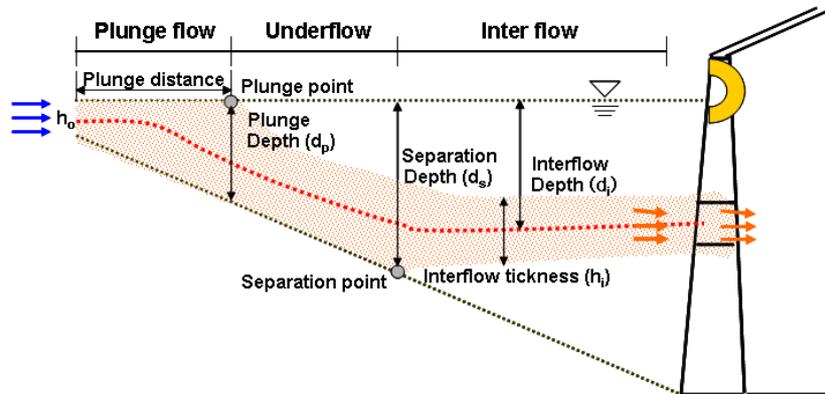


Fig 2. Schematic of Reservoir Flow processes

대청호로 유입하는 밀도류의 침강위치를 예측하기 위하여 Hebbert et al.(1979)에서 제시한 경험식과 이차원 횡방향 평균 수치모델인 CE-QUAL-W2를 이용하였다. 유입수의 모의조건은 그 동안 대청호에서 발생한 홍수 크기를 기준으로 1,000 m³/s ~ 5,000 m³/s 까지 9개의 등급으로 나누었으며, 저수지의 성층조건은 2004년 중 여름철 탁수가 유입되기 전의 발달된 성층구조를 적용하였다. 또한 CE-QUAL-W2 모델은 2004년 입력자료로 사용한 유량자료를 이용하여 홍수 크기에 대한 각각의 비율을 계산하여 유입 및 유출 입력자료로 사용하였으며, 유입수의 수온은 22.1 °C, 저수지의 표층수 수온을 26 °C로 가정하여 홍수 규모(1,000 m³/s ~ 5,000 m³/s) 및 초기 수위(EL. 65m, EL. 70m, EL. 75m)의 변화에 따른 침강점의 변화를 알아보았다. Table 1에 Hebbert et al.(1979)에서 제시한 경험식에 사용된 매개변수를 나타내었다.

Table 1. Parameter values used in empirical formula

Q (m ³ /s)	B* (m)	ρ_o^{**} (kg/m ³)	T_o^{***} (°C)	ρ_a^{****} (kg/m ³)	T_a^{*****} (°C)	$\Delta\rho$	g (m/s ²)	h_0 (m)	ϕ (rad)
500 ~ 5000	235.2	997.75	22.1	996.79	26.0	0.96	9.81	10	85.4 (1.52)

*B는 유입부의 폭 ** ρ_o 는 유입수의 밀도 *** T_o 는 유입수의 수온 **** ρ_a 는 저수지 표층수의 밀도 ***** T_a 는 저수지 표층수의 수온

3. 결과 및 고찰

경험식과 수치모델로 각각의 유량등급에 대해 산정한 침강점의 위치변동을 Table 2에 정리하여 나타내었으며, 모델에서 침강점의 위치결정은 표층의 SS 농도가 30 mg/L 이하가 되는 지점을 기준으로 하였다.

유량의 증가에 따라 경험식과 수치모델에서 산정한 침강점의 수심변화를 Fig 3에 나타내었다. 유량이 증가할수록 유입수가 음의 부력으로 인해 침강하기 전에 유입수의 운동량이 흐름을 더 멀리 밀어내기 때문에 침강점의 수심이 깊어지고 있음을 알 수 있다. 경험식과 달리 유입유량이 3500 CMS 이상일 때 수치모델에서 산정된 침강점의 수심은 3000 CMS에서의 수심보다 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 하상단면이 일정한 하상경사를 가진다고 가정하는 경험식과 달리 수치모델은 Fig 1에서 보는 바와 같이 저수지 길이방향으로의 저수지 하상 표고 변화를 반영하고 있기 때문이다.

Table 2. Estimated plunge depth of the turbidity flumes.

Q (m ³ /s)	u (m/s)	Fri	d _p (m)	EL. 65m*		EL. 70m*		EL. 75m*	
				d _p (m)	X _p ** (km)	d _p (m)	X _p ** (km)	d _p (m)	X _p ** (km)
1000	0.425	1.381	37.02	19.57	8.26	23.91	6.12	26.71	5.88
1500	0.638	2.071	40.15	25.15	14.96	32.38	15.42	35.21	12.27
2000	0.850	2.762	44.47	30.67	17.29	32.91	16.55	37.61	15.44
2500	1.063	3.452	46.12	33.30	18.66	35.53	17.76	39.99	17.05
3000	1.276	4.143	47.56	33.85	19.63	37.98	18.68	40.35	17.75
3500	1.488	4.833	44.02	32.37	20.41	38.41	19.60	42.75	18.66
4000	1.701	5.523	48.85	32.92	20.67	38.92	20.07	43.35	19.11
4500	1.913	6.214	50.02	33.43	21.73	37.24	20.42	43.71	20.07
5000	2.126	6.904	51.08	33.93	22.55	37.72	20.72	44.07	20.07

*CE-QUAL-W2 Prediction **X_p는 유입부로부터의 거리(km)

Fig 4의 (a)와 (b)는 각각 초기수위의 변화에 따라 수치모델에서 산정된 침강점의 수심(d_p)과 유입부로부터의 거리(X_p)를 나타낸 것이다. 저수지의 초기 수위가 높을수록 침강점의 깊이가 깊어지는 반면, X_p는 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 초기수위의 상승으로 유입부의 단면적이 증가하면서 유속이 감소하여 유입수의 F_r가 작아지기 때문인 것으로 판단된다.

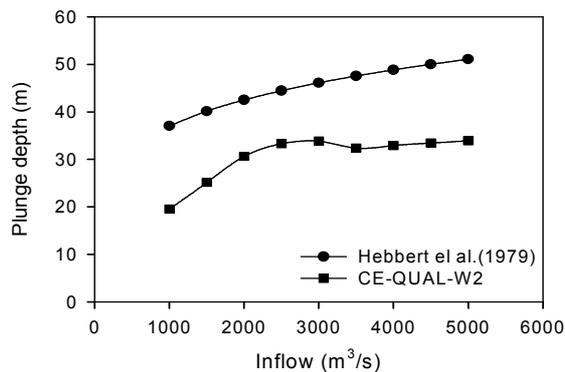


Fig 3. Variation of plunge depth(d_p) with inflow flow rate

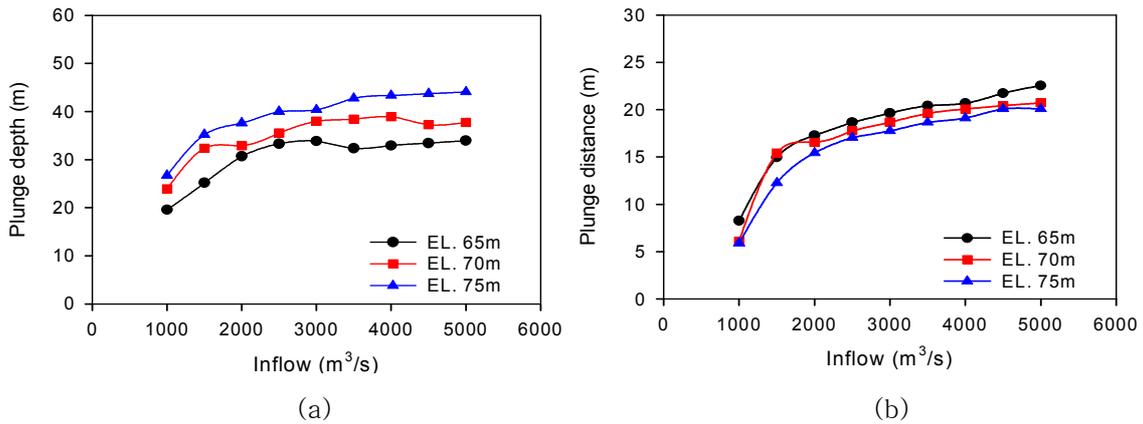


Fig 4. Effect of initial elevation on plunge depth (a) and distance (b) at plunge point

4. 결론

홍수시 대청호로 유입하는 하천 밀도류의 침강위치를 홍수규모별로 Hebbert et al.(1979)가 제안한 경험식과 CE-QUAL-W2 모델을 이용하여 산정해 보았다. 대청호로 유입한 탁수는 홍수규모에 따라 대정리 수역에서 회남수역 사이 구간에서 침강하였으며, F_{Ti} 값이 클수록 침강점 수심이 깊어지는 경향을 보였다. 하지만 경험식과 달리 수치모델을 이용한 침강점의 예측에서 유입유량이 크에도 불구하고 침강점의 수심이 작은 경우가 나타났는데, 이는 수치모델이 실제의 하상표고를 반영하기 때문인 것으로 사료된다.

경험식을 통한 침강점의 예측은 대상 저수지를 정상상태 조건을 가정하므로 홍수에 의한 수위변화를 고려하지 못하며 실제의 불규칙한 하상표고를 일정한 하상경사로 가정하기 때문에, 홍수 규모에 따른 수위 변화를 고려할 수 있으며 실제의 하상표고를 반영할 수 있는 2차원 또는 3차원 수치모델을 적용하는 것이 하천 유입 밀도류의 거동을 보다 정확히 예측할 수 있음으로 판단된다.

참고문헌

1. 정세용 (2002). 성층 저수지로 유입하는 탁류의 유동특성과 영향에 관한 연구, 한국농공학회 학술발표논문집, pp. 269-272.
2. 정세용 (2004). 성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링, 대한환경공학회지, 제26권 제9호, pp. 970-978.
3. 한국수자원공사 (1991). 대청다목적댐 저수지 퇴사량조사보고서.
4. Alavian, V., Jirka, G. H., Denton, R. A., Johnson, M. C., and Stefan, H. (1992). Density currents entering lakes and reservoirs, 118(11), pp. 1464-1489
5. Chung, S.W., and R. Gu. (1998). Two-dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir. J. of Hydraulics, ASCE, 124(7), pp. 704-711
6. Fisher, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., and Brooks, N. H., (1979). Mixing in inland and coastal waters, Academic Press, New York, NY.
7. Ford, D. E., and Johnson, L. S., (1981). Field observations of density currents in impoundments, In Proceedings of Symposium on Surface Water Impoundments, Stefan, H. G.(Eds.), Am. Soc. of Civil Eng., NY.
8. Hebbert, R., J. Imberger, I. Loh, and J. Patterson. (1979). Collie River flow into Wellington Reservoir, J. Hydraul. Eng. Div., 105(5), pp. 533-545.