

# 홍수 규모별 대청호에 유입하는 하천 밀도류의 특성 변화

## Variation of Inflow Density Currents with Different Flood Magnitude in Daecheong Reservoir

윤성완\* / 정세웅\*\* / 최정규\*\*\*

Yoon, Sung Wan / Chung, Se Woong / Choi, Jung Kyu

### Abstract

Stream inflows induced by flood runoffs have a higher density than the ambient reservoir water because of a lower water temperature and elevated suspended sediment(SS) concentration. As the propagation of density currents that formed by density difference between inflow and ambient water affects reservoir water quality and ecosystem, an understanding of reservoir density current is essential for an optimization of filed monitoring, analysis and forecast of SS and nutrient transport, and their proper management and control. This study was aimed to quantify the characteristics of inflow density current including plunge depth( $d_p$ ) and distance( $X_p$ ), separation depth( $d_s$ ), interflow thickness( $h_i$ ), arrival time to dam( $t_a$ ), reduction ratio( $\beta$ ) of SS contained stream inflow for different flood magnitude in Daecheong Reservoir with a validated two-dimensional(2D) numerical model. 10 different flood scenarios corresponding to inflow densimetric Froude number( $Fr_i$ ) range from 0.920 to 9.205 were set up based on the hydrograph obtained from June 13 to July 3, 2004. A fully developed stratification condition was assumed as an initial water temperature profile. Higher  $Fr_i$  (inertia-to-buoyancy ratio) resulted in a greater  $d_p$ ,  $X_p$ ,  $d_s$ ,  $h_i$ , and faster propagation of interflow, while the effect of reservoir geometry on these characteristics was significant. The Hebbert equation that estimates  $d_p$  assuming steady-state flow condition with triangular cross section substantially over-estimated the  $d_p$  because it does not consider the spatial variation of reservoir geometry and water surface changes during flood events. The  $\beta$  values between inflow and dam sites were decreased as  $Fr_i$  increased, but reversed after  $Fr_i > 9.0$  because of turbulent mixing effect. The results provides a practical and effective prediction measures for reservoir operators to first capture the behavior of turbidity inflow.

**keywords** : Daecheong reservoir, Stratified reservoir, Density current, Densimetric Froude number, Turbidity flow

### 요 지

여름철 홍수시 성층화된 저수지로 유입하는 하천수는 저수지 표층수에 비해 낮은 수온과 높은 부유고형물질(SS)

\* 충북대학교 공과대학 환경공학과 박사과정  
Doctoral student, Dept. of Env. Engrg. Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea  
\*\* 교신저자, 충북대학교 환경공학과 부교수  
Associate Prof., Dept. of Envir. Engrg. Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea  
(e-mail: [schung@chungbuk.ac.kr](mailto:schung@chungbuk.ac.kr))  
\*\*\* 충북대학교 공과대학 환경공학과 석사과정  
Graduate student, Dept. of Env. Engrg. Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

농도를 가지므로 주변수에 비해 상대적으로 높은 밀도를 가지게 된다. 이러한 밀도차로 인해 형성된 밀도류의 저수지 내 진행과정은 수질과 수생태계에 큰 영향을 주게 된다. 따라서 하천수 밀도류의 거동분석은 저수지 수질관리를 위한 현장조사의 최적화, SS와 영양염류 등 오염물질의 이송·확산 해석에 중요한 요소이다. 본 연구의 목적은 기존 연구를 통해 검증된 2차원 수치모델을 이용하여 다양한 홍수규모에서 대청호로 유입하는 하천 밀도류의 거동 특성인 침강점 수심( $d_p$ )과 거리( $X_p$ ), 분리점 수심( $d_s$ ), 중층류 판입두께( $h_i$ ), 댐축 도달시간( $t_d$ ), 감소율( $\beta$ )을 분석함으로써 저수지 수질관리를 위한 기초정보를 제공하는데 있다. 모의조건은 평수년이었던 2004년 6월 13일부터 7월 3일 동안 발생한 홍수사상의 수문곡선을 기준으로 유입 유량의 규모를 10개의 등급으로 나누었으며, 초기 성층조건은 탁수가 유입되기 전의 발달된 성층구조를 적용하였다. 유입수와 저수지 성층구조의 특성치는 밀도 Froude 수( $Fr_i$ )로 나타내었으며, 10개의  $Fr_i$  조건별로  $d_p$ ,  $X_p$ ,  $d_s$ ,  $h_i$ ,  $t_d$ , SS의  $\beta$ 값 등을 산정하였다. 연구결과  $d_p$ ,  $X_p$ ,  $d_s$ ,  $h_i$ 는 대체로  $Fr_i$  값과 비례하여 증가하였으며 중층류의 진행속도도 빨라지는 경향을 나타내었으나, 저수지 지형변화에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 정상상태를 가정하는 Hebbert 식은 저수지 수위변화와 지형변화를 고려하지 못하기 때문에 수치모델보다  $d_p$ 값을 과대 산정하였다. 유입 SS 농도의 감소율( $\beta$ )은  $Fr_i$ 가 클수록 작아지는 경향을 보였으나,  $Fr_i > 9.0$ 에서는 난류혼합효과 때문에 다시 증가하였다. 연구결과는 저수지운영 실무자들이 홍수규모별로 탁수의 초기 거동특성을 간단히 예측하는 목적으로 사용할 수 있다.

**핵심용어** : 대청호, 성층 저수지, 밀도류, 밀도 Froude 수, 탁수

## 1. 서 론

여름철 홍수시 저수지로 유입하는 하천수는 저수지 표층수에 비해 수온은 낮은 반면 높은 부유고형물질(SS) 농도를 가지므로 주변 수체에 비해 상대적으로 높은 밀도를 가지게 된다(정세웅과 오정국, 2006). 이러한 밀도차로 인해 형성된 밀도류의 저수지 내 진행과정은 저수지내에서 지역적인 수질과 생태환경(local ecological niche)을 형성하는 원인이 되며(Botelho and Imberger, 2007), 탁수의 장기화와 영양염류 공급의 공간적 차이로 인한 국부적인 녹조현상(Algal bloom)을 야기하기도 한다. 그러므로 밀도류에 대한 정확한 이해와 분석은 저수지 운영, 수질관리, 수생태계 보호를 위한 관리대책 수립에 있어서 매우 중요한 요소이다(Gu and Chung, 1998; Chung and Gu, 1998).

밀도류는 동일한 밀도를 가진 수층을 따라 이동하게 되며, 이는 유입수의 밀도와 유입 홍수량 그리고 저수지의 성층구조에 따라 표층류(overflow), 중층류(interflow), 바닥류(underflow)의 형태(Fig. 1)로 나타난다(Fischer *et al.*, 1979; Chung and Gu, 1998). 상층류의 형태로 흐르던 유입수는 흐름에 의한 운동량과 음부력이 같아지는 지점에서 저수지 수면 아래로 침강하게 되며, 이러한 현상이 일어나는 지점을 침강점이라고 한다(Fischer *et al.*, 1979; Ford and Johnson, 1981; Alavian *et al.*, 1992). 이 지점에서는 물의 침강으로 인하여 표면에 거품이나 부패성 유기물 등이 떠돌이하게 된다. 밀도류가 침강점을 지나 바닥류의 형태를 이루게 되면

주변수와 바닥류의 밀도 경계면에서 수체간의 혼합으로 인해 오염물질의 회석이 활발하게 일어나게 된다. 특히 우리나라 대부분의 대형 저수지는 여름철에 탁수가 유입하여 탁도가 높은 중층밀도류를 형성하므로(정세웅 등, 2005a), 밀도류의 거동에 대한 정확한 예측은 저수지 탁수관리를 위한 현장 조사 및 탁수거동의 해석, 그리고 대책마련에 있어서 선행되어야 할 일이다(김윤희 등, 2001; 정세웅, 2004; 정세웅 등, 2005b; Chung and Gu, 1998).

저수지 내 밀도류의 거동해석에 대한 연구는 국내보다 주로 해외에서 다양하게 이루어졌다. Mead 호수(Baker and Paulson, 1981), DeGray 호수(Ford and Johnson, 1981) 그리고 Wellington 저수지(Hebbert *et al.*, 1979) 등에서 현장실험이 이루어 졌으며, Alavian (1986), Johnson *et al.* (1987, 1989) 등은 경사진 하상에서의 밀도류 거동을 실내에서 실험을 통해 분석하였다. 또한 밀도류의 해석에 수치모델이 효율적인 도구로 사용되기도 하였는데 Alavian and Ostrowski(1992)는 성층류의 난류 혼합에, Singh and Shah(1971), Savage and Brimberg(1975) 및 Akiyama and Stefan(1984)은 침강류 영역 해석을 위해 수치모델을 개발한 바 있다. Gu and Chung(1998)은 수치모델을 사용하여 성층화된 저수지의 밀도류 거동에 영향을 미치는 특성인자들의 민감도를 분석하였으며, Ahlfeld *et al.* (2003)은 저수지 성층화가 중층류의 도달시간에 미치는 영향을 수치모델을 사용하여 분석하였다.

본 연구의 목적은 선행연구(정세웅 등, 2005b)를 통

해 검증된 2차원 횡방향 평균 수치모델을 이용하여 다양한 홍수규모에서 대청호로 유입하는 하천 밀도류의 거동 특성(유입경계지점 수심( $h_0$ ), 침강점 수심( $d_p$ )과 거리( $X_p$ ), 분리점 수심( $d_s$ ), 중층류 관입두께( $h_i$ ), 댐측 도달시간( $t_d$ ), 희석률( $\beta$ ))을 분석함으로써 저수지 수질관리를 위한 기초정보를 제공하는데 있다.

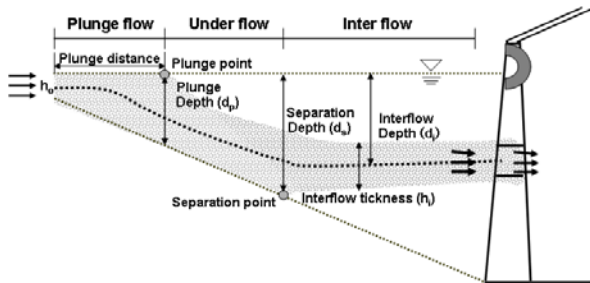


Fig. 1. Schematic Description of Reservoir Density Flow Processes

## 2. 연구방법 및 자료

### 2.1 연구대상지역

연구대상지역인 대청호는 우리나라에서 3번째로 큰 저수지로 금강 분류에 위치하고 있다. 대청호는 금강유역의 최대 상수원으로써 대전과 청주를 비롯한 충청지역에 매일 약 100만  $m^3$ 의 생·공용수를 공급해주고 있으며 금강 중·하류 지역의 홍수조절 및 수력발전 등의 다목적으로 사용되고 있다. 특히 대청호는 청주권과 대전권으로 용수를 공급하기 위한 취수탑이 본 댐 저수지 내에 위치하고 있으며, 수자원공사의 대청2단계 용수공급을 위한 취수장도 본 댐 직하류인 조정지댐 내에 위치하고 있어 안정적인 용수공급을 위한 수질관리가 중요한 사안으로 대두되고 있다. 그러나 여름철 홍수기시 유입된 탁수가 중층 밀도류를 형성하며 저수지내에 수개월씩 체류하면서 수질관리에 많은 문제를 초래하고 있어 밀도류의 거동에 대한 정보와 적절한 조절대책이 필요한 실정이다.

### 2.2 모형의 특성

CE-QUAL-W2(이후 W2) 모형은 저수지 수체를 흐름방향과 연직방향으로 해석하는 횡방향 평균 2차원 모형이다(Cole and Wells, 2003). W2 모형은 미국 호소뿐만 아니라 국내에서도 소양호, 대청호, 팔당호, 임하호 등에서 호소 수운의 성층해석과 홍수시 오염수체의 밀도류 유동해석을 위해 광범위하게 적용된 사례가 있다(김윤희 등, 2001; 나은혜 등, 2002; 이상욱 등, 2003; 정세웅, 2004; 정세웅 등, 2005b).

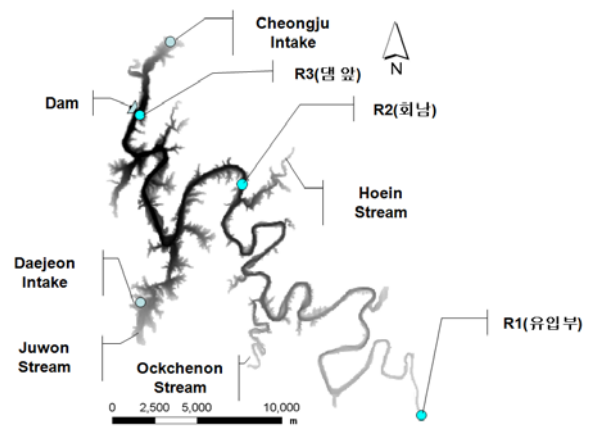


Fig. 2. Layout of Daecheong Reservoir and Monitoring Stations.

W2 모형은 연속방정식(Eq. 1)과 흐름방향 및 수심방향 운동량방정식(Eqs. 2, 3), 자유수면방정식(Eq. 4), 밀도 상태방정식(Eq. 5), 물질수지방정식(Eq. 6)의 6개 지배방정식으로 구성되며, 다양한 유한차분 수치해석기법을 사용하여 폰다(Chung and Gu, 1998). 흐름방향과 수심방향 유속을 시간과 횡방향에 대하여 평균화하기 때문에 운동량방정식은 확산항을 가지며, 확산항의 크기는 난류강도와 횡방향 유속분포의 불균등성 정도에 좌우된다. 흐름의 난류성분 때문에 발생하는 응력항들은 난류폐합식을 이용하여 해석하는데, W2 모형에서는 Prantal의 혼합길이 이론(Mixing length theory)에 의한 와점성계수(Zero-equation model)를 사용한다.

$$\frac{\partial Bu}{\partial x} + \frac{\partial Bw}{\partial z} = qB \quad (1)$$

$$\frac{\partial Bu}{\partial t} = -\frac{\partial(Buu)}{\partial x} - \frac{\partial(Bwu)}{\partial z} + Bg \frac{\rho_\xi}{\rho} \frac{\partial \xi}{\partial x} - B \frac{g}{\rho} \int_\xi^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{\tau_{wx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( BA_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( BA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (3)$$

$$\frac{\partial B\xi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_\xi^H u B dz - \int_\xi^H q B dz \quad (4)$$

$$\rho = f(C_{TS} T) \quad (5)$$

$$\frac{\partial BC}{\partial t} = -\frac{\partial(BuC)}{\partial x} - \frac{\partial(BwC)}{\partial z} + Bq_s + \frac{\partial}{\partial x} \left( BE_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( BE_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (6)$$

여기서,  $B$  = 저수지 폭(m),  $u$  = 흐름방향 유속(m/s),  $w$  = 수심방향 유속(m/s),  $q$  = 측방 유입량( $m^3/s$ ),  $P$  = 압력( $N/m^2$ ),  $\rho$  = 밀도( $kg/m^3$ ),  $\tau$  = 전단응력( $m^3/s^2$ ),  $A$  = 와점성계수( $m^2/s$ ),  $H$  = 저수지 수심(m),  $\xi$  = 자유수면 위치(m),  $C$  = 물질의 농도(mg/L),  $C_{TDS}$  = 총용존 및 부유고형물 농도(mg/L),  $T$  = 수온( $^{\circ}C$ ),  $E$  = 와확산계수( $m^2/s$ )이다.

### 2.3 모형의 구성

저수지 지형자료(Bathymetry)는 대청댐 퇴사랑측정보고서(한국수자원공사, 1991)의 종단 및 횡단측량 자료로부터 추출하였으며, 금강분류와 주요 지류하천을 6개의 구획(Branch)으로 구분하고, x-방향으로는 98개의 구획, 수심방향으로는 69개의 층으로 구성하였다(Fig. 3). x-방향으로는 저수지 지형변화(하폭, 경사)와 지류 유입 등을 고려하여  $\Delta x = 500 \sim 1700$  m 간격으로 나누었으며, 수심방향으로는 성층해석의 정확도를 위해  $\Delta z = 0.5 \sim 1.0$  m 간격으로 유한차분격자를 구성하였다. 선행연구(정세웅 등, 2005b)와 금회연구에서 사용한 지형자료의 차이점은 상류 유입 경계를 장계교에서 합곡리까지 확장한 것과 소옥천을 별도의 구획으로 추가한 것이다.

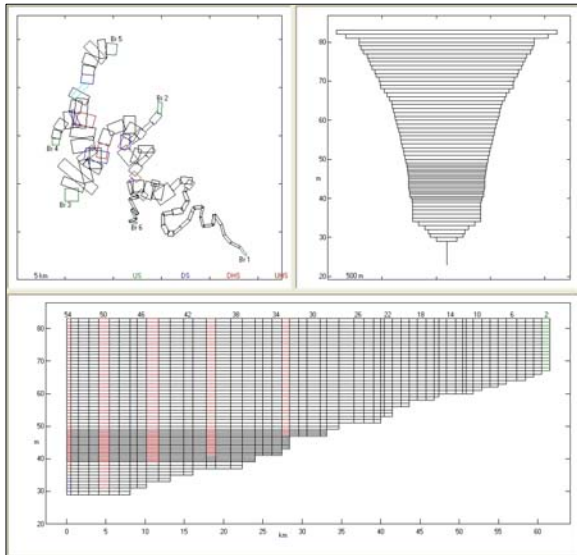


Fig. 3. Finite Difference Grid System used for the Simulation of Daecheong Reservoir

모델 수행에 필요한 경계조건은 본류로 유입하는 하천수의 시간별 유량, 수온, SS 농도 그리고 하류단의 방류량과 기상자료이다. 모형의 적용기간인 2004년 6월 13일 ~ 7월 3일 동안의 대청댐 수문자료 및 유입수 SS 농도는 Fig. 4와 같으며, 6월 21일 일평균 유입량이

최대 2431.1  $m^3/s$ 가 유입되었으며, 평균 273.6  $m^3/s$ 의 최대 방류량을 기록하였다. 모형에 사용된 유입유량 및 방류량은 모의기간 동안의 시간별 수문자료를 바탕으로 대청댐에서 자주 발생하는 10개 등급의 첨두홍수량 크기에 대한 각각의 비율을 계산하여 산정하였으며, 홍수기간 동안 유입수의 수온은 20  $^{\circ}C$ 로 일정한 값을 유지한다고 가정하였다. 유입수의 SS 및 기상자료는 기존연구(정세웅 등, 2005b)에서 사용된 2004년 입력자료를 사용하였으며, 저수지 초기 수온성층조건은 6월 14일에 측정된 수심별 실측자료를 사용하였다. 수리 및 성층해석에 관한 매개변수는 기존연구(정세웅 등, 2005b; 정용락 등, 2007)에서 검·보정된 매개변수를 사용하였다. 예시로써 홍수규모가 500, 2,500, 5,000  $m^3/s$ 일 경우의 유입유량과 방류량을 Fig. 5에, 그리고 회남수역(R2)과 댐앞(R3) 지점에서 2004년 6월 14일에 실측한 수심별 수온자료를 Fig. 6에 각각 나타내었다. Fig. 6에 나타난 바와 같이, 거리에 따른 수온성층구조의 변화는 크지 않은 것으로 나타나 R3 지점에서 실측한 수심별 수온자료를 저수지 초기 수온성층조건으로 사용하였다. 6월초 대청호의 성층강도(Eq. 7)는 0.24  $kg/m^3/m$ 에 해당한다.

$$S_t = \frac{\rho_b - \rho_t}{z} \quad (7)$$

여기서,  $\rho_b$ 는 수온약층의 하부 밀도( $kg/m^3$ ),  $\rho_t$ 는 수온약층의 상부 밀도( $kg/m^3$ ),  $z$ 는 수온약층의 두께(m)이다.

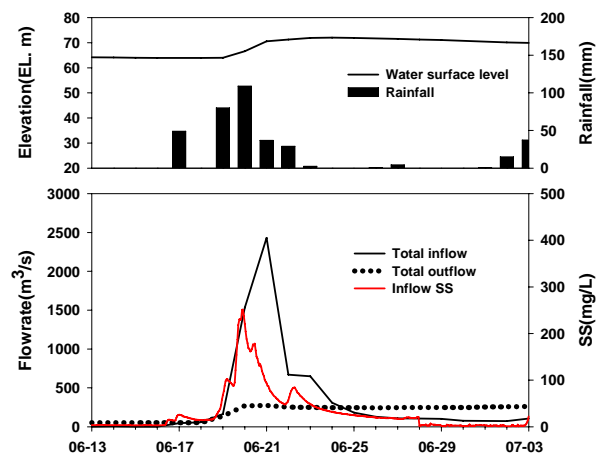


Fig. 4. Hydrologic Conditions and Inflow SS Concentrations of Daecheong Reservoir during the Study Period of 2004

### 2.4 밀도류 특성매개변수

유입수와 저수지 성층구조의 특성치는 유입수와 저수지 수체 사이의 밀도차로 인해 발생하는 부력에 대

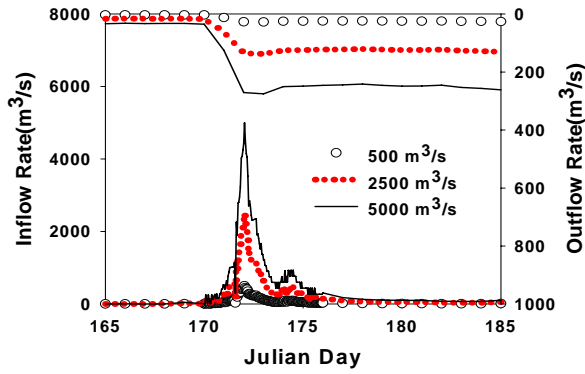


Fig. 5. Inflow and Outflow Boundary Conditions used for Numerical Experiments

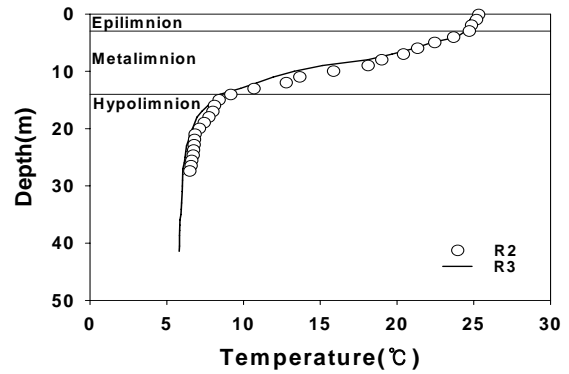


Fig. 6. Initial Thermal Stratification Conditions ( $St = 0.24 \text{ kg/m}^3/\text{m}$ ) used for Numerical Experiments

Table 1. The Range of Characterizing Parameters used in Previous Studies

Author	$Fr_i$	$Re^*$	Description
Johnson <i>et al.</i> (1989)	1.8 - 21	> 10,000	Laboratory study
Stefan and Johnson(1989)	3.0 - 4.0	530,000	Field study, wastewater effluent
Gu <i>et al.</i> (1996)	0.7 - 1.0	107,000	Field study, Shasta Reservoir
Ford and Johnson(1981)	0.13 - 3.3	$10^5 \sim 10^6$	Field study, DeGray Lake
Gu and Chung(1998)	0.48 - 8.23	32,000~560,000	Numerical experiment

\*Inflow Reynolds number,  $\frac{u_0 h_0}{\nu}$  where  $h_0$  = inflow depth(m),  $u_0$  = inflow velocity(m/s),  $\nu$  = dynamic viscosity ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

한 유입수의 관성력의 비로 표현되는 밀도 Froude 수 ( $Fr_i$ )로 나타낼 수 있으며, Eq. (8)과 같이 정의된다. 유입수의  $Fr_i$ 가 1보다 작으면 중력이나 부력이 흐름을 지배하며, 1보다 크면 유속에 의한 관성력이 밀도류를 지배하여 저수지 주변수체를 밀어내며 진행하게 된다. 반면, 관성력이 음의 부력과 같아지는 지점에서 유입수는 침강하게 된다. 본 연구에서 수치모의 실험을 위한 시나리오 구성을 위해 선행연구에서 사용된 밀도류 특성매개변수를 분석하여 Table 1에 정리하였다.

$$Fr_i = \frac{U_0}{\sqrt{g \frac{|\Delta\rho|}{\rho} h_0}} \quad (8)$$

여기서,  $Fr_i$  = 밀도 Froude 수,  $g$  = 중력가속도( $\text{m/s}^2$ ),  $\Delta\rho$  = 유입수와 주변수의 밀도차( $\text{kg/m}^3$ ),  $\rho$  = 유입수의 밀도( $\text{kg/m}^3$ ),  $h_0$  = 유입수의 깊이(m),  $U_0$  = 유입수의 유속(m/s)이다.

대칭호는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 저수지의 단면 형상이 삼각형에 가깝기 때문에 밀도류의 침강위치를 Hebbert *et al.*(1979)에서 제시된 경험식을 통해 산정한 후 W2 모델과 비교하였다. Hebbert *et al.*(1979)은 밀도

류 이론에 근거하여 저수지의 단면을 삼각형으로 가정하였을 때의 침강점에서의 수심 및 밀도 Froude 수를 Eq. (9)와 Eq. (10)으로 정의하였다.

$$d_p = \left[ \frac{2Q^2}{\left( Fr_i^2 \frac{2g|\Delta\rho|}{\rho} \tan^2(\Phi) \right)} \right]^{1/5} \quad (9)$$

$$Fr_{ip} \approx \frac{\sin(\Phi)\tan(S_0)}{C_D} [1 - 0.85C_D^{1/2}\sin(\Phi)] \quad (10)$$

여기서,  $Q$  = 유입유량( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $\Phi$  = 삼각단면의 반각(rad),  $C_D$ =무차원 저수지 바닥 항력계수로써 저수지 바닥 마찰계수와 유입수와 저수지 물의 경계면 마찰계수의 합을 4로 나눈 값을 사용한다(Martin and McCutcheon, 1999).

Hebbert *et al.*(1979)에서 제시한 경험식의 모의조건은 대칭호에서 발생한 홍수 크기를 기준으로 유입량을 500 ~ 5,000  $\text{m}^3/\text{s}$  까지 500  $\text{m}^3/\text{s}$ 씩 증가시켜 10개의 등급으로 나누었으며, Table 2에 사용된 매개변수를 나타내었다.



Table 2. Input data used for estimation of plunge depth using Hebbert et al.(1979)

$Q$ ( $m^3/s$ )	$B^*$ (m)	$\rho^{**}$ ( $kg/m^3$ )	$T_o^{***}$ ( $^{\circ}C$ )	$\rho_a^{****}$ ( $kg/m^3$ )	$T_a^{*****}$ ( $^{\circ}C$ )	$\Delta\rho$	$g$ ( $m/s^2$ )	$h_o$ (m)	$\phi$ (rad)
500 ~ 5000	122.4	998.21	20.0	997.10	25.0	1.11	9.81	12	85.4 (1.52)

\* $B$  = inflow width, \*\* $\rho$  = inflow density, \*\*\* $T_o$  = inflow temperature, \*\*\*\* $\rho_a$  = ambient water density, \*\*\*\*\* $T_a$  = ambient water temperature

### 3. 연구결과

#### 3.1 모의결과

수치모의에 사용된 하천 유입 유량(또는 밀도 Froude 수) 크기별 탁수의 밀도류 거동 특성의 순간포착(snapshot) 영상을 Fig. 7에 비교하여 나타내었다. 유입수의 밀도류 거동 해석은 저수지 탁수문제의 중요성을 감안하여 보존성 물질인 추적자(Tracer)를 사용하지 않고 2004년 실측한 SS 농도(실측 탁도 자료와 SS-탁도 관계로부터 환산함)를 직접 사용하였다. SS의 침강속도는 중층에 잔류하면서 장기 탁도를 유발하는 작은 입자만을 고려하기 위해 0.1 m/d를 사용하였다. 부유입자의 침강속도는 2005년과 2006년 홍수기 동안 대청호로 유입한 탁수를 채수하여 침강실험을 통해 산정한 값이다(정세웅 등, 2007).

모의결과를 통해 유량 규모에 따라 하천수의 침강점 위치, 저수지 바닥으로부터의 분리점, 그리고 중층 밀도

류의 두께와 중심축 깊이가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하천수가 유입하면서 저수지 수위가 상승하였으며, 중층밀도류(탁수층)는 수온약층보다 약간 위로 진행하고 있음을 알 수 있다. 수온약층은 하천수가 유입하기 전(Fig. 6)과 같이 저수지 바닥으로부터 20~30m 구간에 위치하고 있다.

#### 3.2 침강점

각각의 유량등급에 대해 Hebbert식과 수치모형으로 산정한 침강점의 위치를 Table 3에 나타내었다. 수치모델의 모의결과로부터 침강점의 위치결정은 표층에서의 SS 농도가 25 mg/L 이하가 되는 지점을 기준으로 하였다. 유량의 규모별로 산정한 침강점의 수심 및 위치를 각각 유입부의 수심( $h_o$ )과 저수지의 총 길이(L)로 나누어 무차원화하여 Fig. 8에 나타내었다.  $Fr_i$ 가 커질수록 유입수의 운동량이 흐름을 더 멀리 밀어내기 때문에 침강점의 수심이 깊어지고 침강위치가 유입부로부터 멀어지고 있음을 확인할 수 있다.

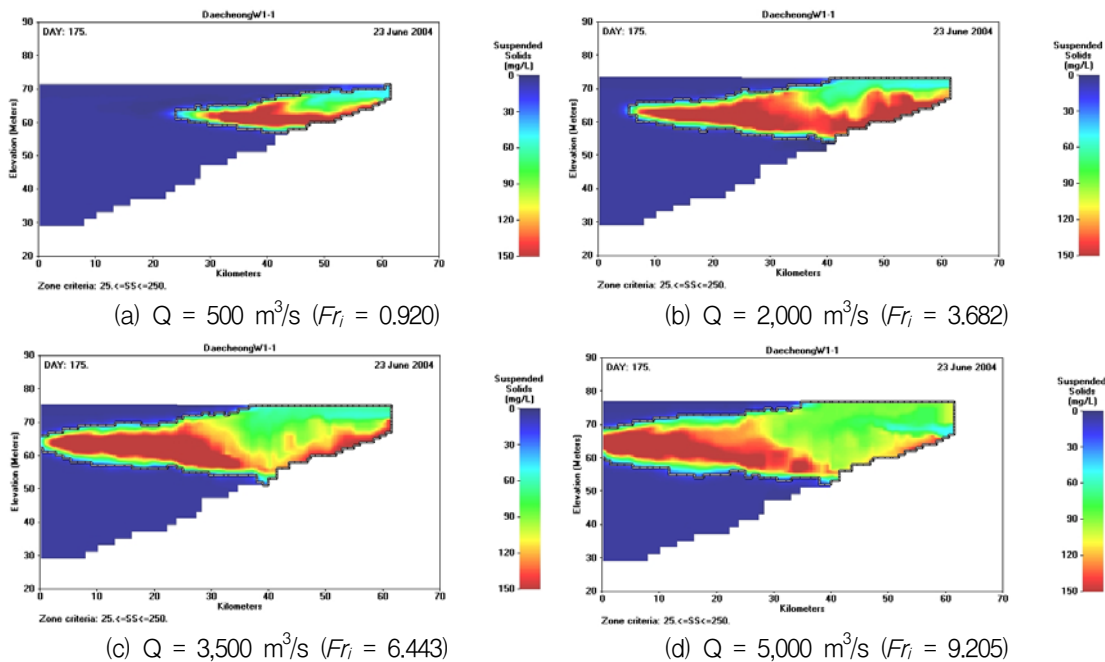


Fig. 7. Snapshots of Simulated Density Flow Regime on Selected Date at Variable Flow Rate( $T_o = 20^{\circ}C$ ,  $S_t = 0.24 kg/m^3/m$ ): Mark Zones Designate SS Concentration Greater than 25 mg/L

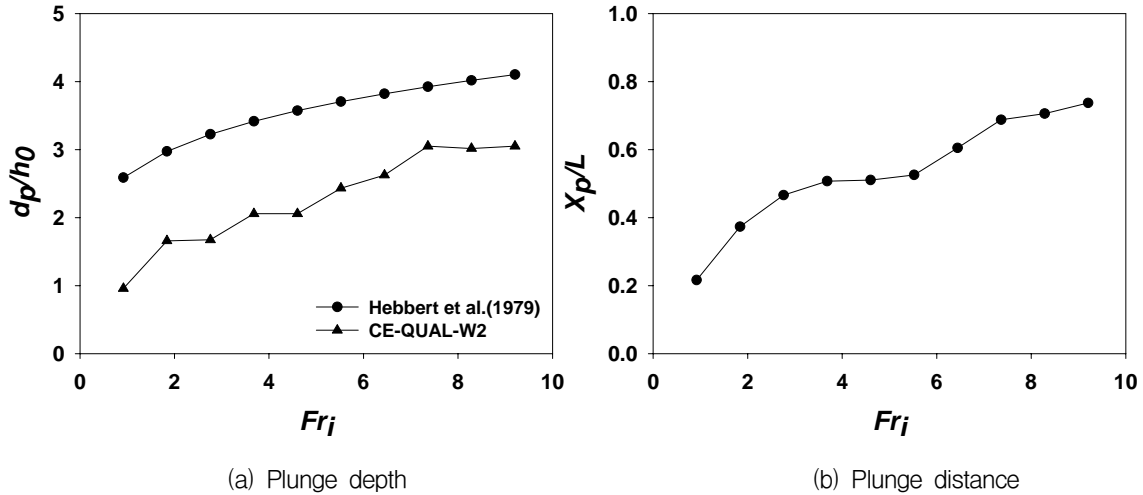


Fig. 8. Variation of Dimensionless Plunge Depth and Distance with Different Inflow Densimetric Froude Number ( $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $S_t = 0.24 \text{ kg/m}^3/\text{m}$ )

Table 3. Estimated Plunge Depths of the Density Flows at Different  $Fr_i$  Conditions

$Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$u$ (m/s)	$Fr_i$	Hebbert <i>et al.</i> (1979)	CE-QUAL-W2	
			$d_p$ (m)	$d_p$ (m)	$X_p^*$ (km)
500	0.340	0.920	31.07	11.5	13.7
1,000	0.681	1.841	35.69	19.9	22.6
1,500	1.021	2.761	38.70	20.1	24.8
2,000	1.362	3.682	40.99	24.7	28.6
2,500	1.702	4.602	42.86	24.7	30.9
3,000	2.042	5.523	44.46	29.2	33.1
3,500	2.383	6.443	45.85	31.5	35.5
4,000	2.723	7.364	47.09	36.6	41.6
4,500	3.064	8.284	48.21	36.2	41.6
5,000	3.404	9.205	49.24	36.6	42.7

\* $X_p$  = distance from inflow boundary to plunge point

그러나 Hebbert식과 달리 W2 모형에서 산정된 침강점의 수심은 유량이 1,000 ~ 1,500  $\text{m}^3/\text{s}$ , 2,000 ~ 2,500  $\text{m}^3/\text{s}$  및 4,000 ~ 5,000  $\text{m}^3/\text{s}$ 에서 거의 유사하게 나타났다. 이는 일정한 하상경사를 가진다고 가정(저수지 실제 지형을 반영하지 못함)하며 유입량에 따른 수위변화를 고려하지 못하는 Hebbert 식과 달리, W2 모형은 저수지 길이방향으로의 하상표고와 하폭변화, 그리고 시간에 따른 저수지 수위변화를 반영하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 즉,  $Fr_i$  값이 큰 경우 유입경계지점으로부터 더 멀리 진행한 후 침강이 일어나더라도 저수지 바닥 표고가 일정한 구간에서는 침강수심은 변화가 없게 된다. Table 4는 각각의  $Fr_i$  값에 대한 침강점에서의 저수지 하상표고, 하폭과 저수위를 정리한

것이다. 이 표에서 보는바와 같이  $Fr_i$ 가 1.841에서 2.761, 3.682에서 4.602, 그리고 7.364에서 8.284로 각각 증가할 때 침강점에서 저수지 하상표고는 일정하며, 이로 인해 침강점 수심의 변화는 매우 작게 나타났다. 따라서 대청호와 같이 지형이 복잡하여 하상경사와 하폭의 변동이 있는 저수지에서는 다차원 동적 수치모델을 사용하여야 밀도류의 거동해석을 정확히 할 수 있는 것으로 판단된다.

### 3.3 바닥밀도류

일반적으로 침강점을 지난 밀도류는 음부력과 관성력에 의해 저수지의 경사진 하상을 따라 이동하면서 바닥밀도류를 형성하게 된다. 바닥밀도류는 저수지 주

Table 4. Geometric Properties of the Reservoir at Plunge Point for Different  $Fr_i$  Values

$Fr_i$	$X_p$ (km)	Reservoir width (m)	Bottom Elevation (EL.m)	Water Elevation (EL.m)
0.920	13.7	466.2	59.3	70.8
1.841	22.6	415.6	51.2	71.1
2.761	24.8	903.1	51.2	71.3
3.682	28.6	703.6	47.4	72.1
4.602	30.9	484.0	47.3	72.0
5.523	33.1	426.7	43.2	72.4
6.443	35.5	356.9	41.3	72.8
7.364	41.6	613.5	37.2	73.8
8.284	41.6	613.5	37.2	73.4
9.205	42.7	613.5	37.2	73.8

변수체와 혼합하면서 약간의 밀도 감소를 겪고 저수지 주변수체와 동일한 밀도를 갖게 되는 수심에 도달하게 되고, 이 때 저수지 바닥으로부터 분리되게 된다. 바닥 밀도류의 분리점 수심( $d_s$ )을 유입부의 수심으로 나누어 무차원화 하여 Fig. 9에 나타내었다.  $Fr_i$ 가 커질수록  $d_s$ 도 깊어지는 경향을 보이고 있는데, 이는  $Fr_i$ 가 증가함에 따라 유입수의 운동량이 커져 침강거리  $X_p$ 가 증가하고 바닥밀도류의 추진력(driving force)도 증가한 것이 원인으로 판단된다. 그러나 동일한 밀도 Froude 수에 대하여 분리점 수심(Fig. 9)이 침강점의 수심(Fig. 8a)보다 작거나 유사한 경향을 보이고 있는데, 이는 저수지 성층화 때문에 수온약층(15°C 내외)에서의 수온이 유입수 수온(20°C)보다 낮기 때문이다. 즉, 바닥밀도류가 수온약층의 밀도 장벽을 통과하지 못하고 저수지 바닥에서 분리되어 중층 밀도류를 형성하게 되어  $d_s/h_0$  값이  $d_p/h_0$ 보다 작거나 유사한 값을 보이고 있다.

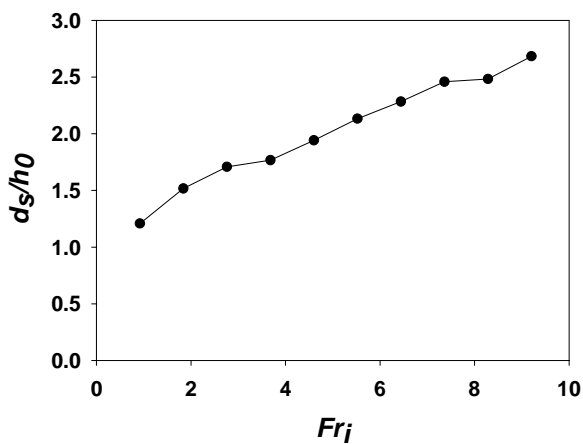


Fig. 9. Variation of Dimensionless Separation Depth with Different  $Fr_i$  Values( $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $S_1 = 0.24 \text{ kg/m}^3/\text{m}$ )

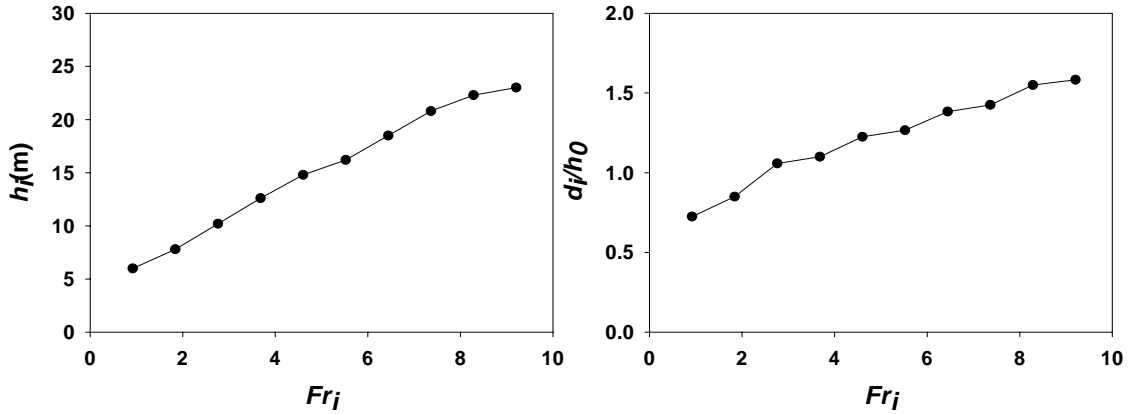
### 3.4 중층류

저수지 바닥에서 분리된 바닥밀도류는 동일한 밀도층을 따라 저수지 내로 관입되어 수평으로 진행되며 중층류를 형성하게 된다. 중층류의 특성은 관입두께( $h_c$ ) 및 관입수심( $d_i$ )으로 묘사할 수 있으며, 유입수의 밀도 Froude 수의 증가에 따른 중층 밀도류의 관입두께와 관입수심 변화를 Fig. 10에 각각 나타내었다. 중층류의 특성을 분석하기 위해 모의 종료시점에서 댐 축으로부터 10 km 거리에서의 중층류 내에서 가장 높은 SS 농도를 보인 수심을  $d_s$ 로 산정하였으며, 가장 높은 SS 농도의 10 % 범위를 기준으로 관입두께를 산정하였다. 수치모의결과, 탁수층의 관입두께와 관입수심은  $Fr_i$  값이 증가함에 따라 완만하게 증가하는 경향을 보였다. 이는 유입 탁수량의 증가와 이로 인한 저수지 수위가 상승한 것이 원인으로 판단된다.

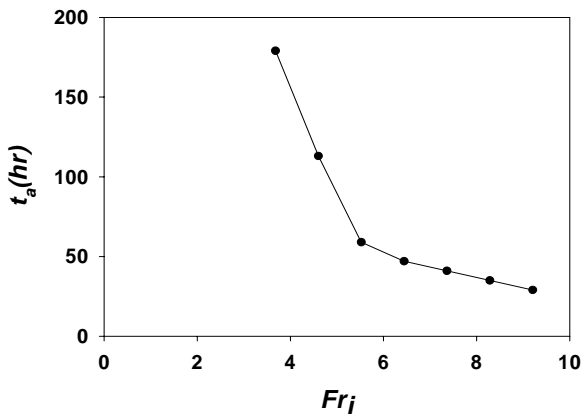
중층류의 댐 앞 도달시간( $t_0$ )은 탁도와 인 농도가 높은 탁수의 선택배제 등 저수지와 하류하천의 수질관리에 매우 중요한 정보를 제공해 준다. 댐축에 SS 농도 25 mg/L가 도달하는 시점을 기준으로 하여  $Fr_i$  값 변화에 따른 중층류의 댐 앞 도달시간을 Fig. 11에 나타내었다. 모의결과  $Fr_i$ 가 2.761(유량규모 1,500  $\text{m}^3/\text{s}$ ) 이하일 경우 중층류는 댐 앞까지 도달하지 못하는 것으로 나타났으며,  $Fr_i$  3~5 범위에서 도달시간은 급격히 짧아지지만, 그 이후에는 흐름에 의한 운동량의 증가에 비해 난류발생에 의한 저항이 증가하여 도달시간의 감소추세가 둔화되는 것을 볼 수 있다.

밀도류는 침강 후 댐 앞으로 진행하면서 저수지 주변 수체와 혼합하는 과정을 거치면서 입자상 인과 질소, SS를 포함한 다양한 오염물질의 침강과 회석이 일어난다(Romero and Imberger, 2003). Fig. 12는 회남





(a) Interflow thickness (b) Interflow depth  
**Fig. 10. Effect of  $Fr_i$  on Interflow Thickness and Interflow Depth**  
 $(T_0 = 20^\circ\text{C}, S_i = 0.24 \text{ kg/m}^3/\text{m})$



**Fig. 11. Effect of  $Fr_i$  on Interflow Travel Time**  
 $(T_0 = 20^\circ\text{C}, S_i = 0.24 \text{ kg/m}^3/\text{m})$

수역(R2)과 댐앞(R3) 지점을 통과하는 밀도류의 SS 최고 농도를 저수지 유입 최고농도로 나누어 무차원화시킨 후 시간(일)에 대해 도시하였다. SS 농도의 감소는 침강과 희석에 의해 이루어지지만, 본 연구에서 고려한 침강속도가 0.1 m/d인 점을 감안한다면 대부분 희석에 의한 농도감소로 해석할 수 있다. 각 지점에서 모의된 SS 농도의 수심별 분포도(Profile)를 분석한 결과, 주어진 조건에서 중층밀도류의 최고 SS 농도는 대체로 EL. 61 ~ 62 m 내외에서 나타났으며, 유입 유량 규모가 작을수록 댐 앞에 도달하는 SS 농도가 급격히 감소함을 볼 수 있다.

서로 다른  $Fr_i$ 값에 대하여 저수지 유입부를 통과한 탁수가 회남지점과 댐 앞까지 도달하면서 감소하는 정도( $\beta$ )를 Eq. (11)과 같이 정의하고, 댐 앞까지의 도달 시간과 회남대교 및 댐축에서의  $\beta$ 값을 산정하여 Table 5에 제시하였다.  $Fr_i$ 값이 증가함에 따라 밀도류

최고농도가 댐축에 도달하는 시간은 지속적으로 감소하지만,  $Fr_i$ 가 8.0을 초과하면서 162시간(약 1주일)에 수렴하는 것을 볼 수 있다.

$$\beta = \frac{C_{\max,0} - C_{\max,x}}{C_{\max,0}} \times 100 \quad (11)$$

여기서,  $C_{\max,0}$ 은 댐 유입부(R1)를 통과하는 SS의 최고농도,  $C_{\max,x}$ 는 x지점을 통과하는 SS의 최고농도를 나타낸다.

$\beta$ 값은 회남수역과 댐축에서 모두  $Fr_i$ 값이 증가함에 따라 지속적으로 감소했으나, 두 지점간의  $\beta$ 값 차이는 감소하는 경향을 보인다. 이것은 홍수규모가 커짐에 따라 탁수의 도달시간이 점점 빨라지면서(Fig. 12) 최고탁도를 포함하는 중층밀도류가 주변수체와 충분히 혼합되지 못하고 댐축에 도달하는 것이 원인으로 사료된다. 그러나  $Fr_i$ 가 8.284를 초과하면서 다시 약간 상승하는 경향을 보이는데, 이는 난류에 의한 혼합효과로 사료된다. 유입수의  $Fr_i$ 값에 따른 탁수의 도달시간, 그리고 댐 앞 지점에서의 최고 SS 농도 감소율을 최소화방법으로 회귀분석하여 다항식으로 나타내면 각각 Eq. (12)와 (13)과 같다. 다항식은 독립변수인 밀도 Froude 수와 종속변수인 도달시간 및 농도 감소율의 결정계수( $R^2$ )가 가장 큰 함수로 결정하였다.

$$t_a = 5.1262Fr_i^3 - 90.406Fr_i^2 + 436.8Fr_i - 187.55 \quad (R^2 = 0.9819) \quad (12)$$

$$\beta_{dam} = 1.7524Fr_i^2 - 33.319Fr_i + 177.3 \quad (R^2 = 0.9975) \quad (13)$$

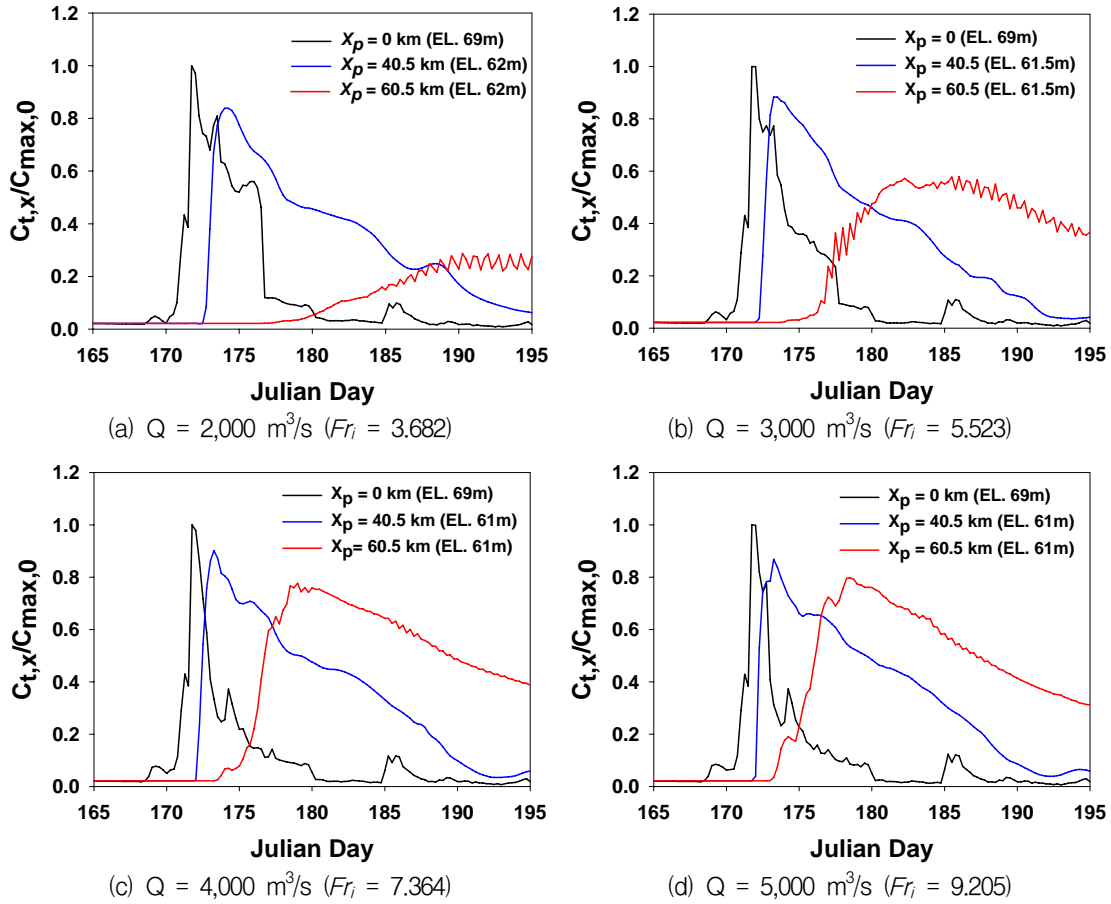


Fig. 12. Reduction of Inflow SS Concentration While Traveling to Dam Site for Different Flow Rates ( $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $S_i = 0.24 \text{ kg/m}^3/\text{m}$ )

Table 5. Travel Time of Density Flow and Reduction Rate of Inflow Maximum SS Concentration at Heanam and Dam Sites

$F_{fi}$	$t_a(\text{hr})$	Heanam	Dam
		$\beta$ (%)	$\beta$ (%)
0.920	N/A*	34.3	N/A
1.841	N/A	25.4	N/A
2.761	N/A	18.7	N/A
3.682	444	16.2	71.3
4.602	420	14.1	54.9
5.523	342	11.7	42.1
6.443	216	10.9	29.4
7.364	174	9.9	22.3
8.284	162	11.1	18.3
9.205	162	13.1	20.3

\*N/A : Density flow that contains SS > 25 mg/L did not arrive at Dam

#### 4. 결론

본 연구에서는 선행연구를 통해 검증된 2차원 수치 모델을 이용하여 다양한 홍수규모에서 대청호로 유입

하는 하천 밀도류의 거동 특성인 침강점 수심( $d_p$ )과 거리( $X_p$ ), 분리점 수심( $d_s$ ), 중층류 관입두께( $h_i$ ), 댐축 도달시간( $t_a$ ), 농도 감소율( $\beta$ )을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 대청호로 유입한 하천수의 침강점 수심 (또는 거리), 분리점 수심, 중층 밀도류 두께는  $F_{r_i}$  값과 비례하여 증가하였으며, 중층류를 형성하는 진행속도도 빨라지는 경향을 나타내었으나, 저수지 구간별 지형변화에 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 2) 정상상태 수리조건을 가정하는 Hebbert식은 저수지 수위변화와 지형변화를 고려하지 못하기 때문에 본 연구의 수치모델보다  $d_b$  값을 과대 산정하였다. 따라서 대청호와 같이 지형이 복잡하고 홍수시 수위 변동이 큰 우리나라 저수지에서는 다차원 동적 수치모델을 사용하여야 밀도류의 거동을 정확히 해석 할 수 있는 것으로 판단된다.
- 3)  $F_{r_i}$  값이 증가함에 따라 밀도류의 SS 최고농도가 댐축에 도달하는 시간은 지수적으로 감소하였지만,  $F_{r_i}$ 가 8.0을 초과하면서 162시간(약 1주일)에 수렴하였다.
- 4) 유입 SS 최고농도가 댐앞까지 도달하는 동안 주변수체와 희석에 의한 유입 SS 농도의 감소율 ( $\beta$ )은  $F_{r_i}$ 가 클수록 주변수체와의 혼합시간이 짧아져 작아지는 경향을 보였다. 그러나  $F_{r_i} > 9.0$ 에서는 다시 다소 상승하였는데, 이는 빠른 유속 때문에 밀도류와 주변수체 경계면에서의 난류혼합 효과 때문으로 추측된다.
- 5) 본 연구에서 제시된 방법으로 다양한 초기수위조건, 성층조건에서 유량 규모별 밀도류의 거동 특성치를 표와 그래프로 개발한다면 저수지운영 실무자들이 탁수의 초기 거동특성을 간단히 예측하는 목적으로 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 : 1-6-2)에 의해 수행되었습니다. 연구를 지원해 주신 분들께 감사드립니다.

### 참고 문헌

김윤희, 김범철, 최광순, 서동일 (2001). "2차원 수리수질모델을 이용한 소양호 수온성층현상과 홍수기 밀도류 이동현상의 모델링." **대한상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제15권, 제1호, pp. 40-49.

나은혜, 안규홍, 박석순 (2002). "팔당호의 계절적 전도현상과 연직 수온 분포에 관한 모델연구." **대한환경**

**공학회지**, 대한환경공학회, 제24권, 제5호, pp. 901-910.

이상욱, 서동일, 정세웅 (2003). "2차원 수리-수질모델 (CE-QUAL-W2)를 이용한 대청호 수온 성층현상의 모델링." **대한환경공학회 춘계학술발표 논문요약집**, 대한환경공학회, p. 111.

정세웅 (2004). "성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링." **대한환경공학회지**, 대한환경공학회, 제26권, 제9호, pp. 970-978.

정세웅, 박재호, 윤성완, 배정옥 (2005a). "대청호 유입 탁수의 수리 및 수질특성." **한국물환경학회·대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집**, 한국물환경학회, pp.375-378.

정세웅, 오정국(2006). "대청호 상류 하천에서 강우시 하천 수온 변동 특성 및 예측 모델 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제1호, pp. 79-88.

정세웅, 오정국, 고익환 (2005b). "CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지 탁수의 시공간분포 모의." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제8호, pp. 655-664.

정세웅, 이홍수, 윤성완, 예령, 이준호, 추창오 (2007). "홍수시 대청호 유역에서 발생하는 탁수의 물리적 특성." **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제23권, 제6호, pp. 934-944.

정용락, 류환, 김유경, 예령, 정세웅 (2007). "선택취수에 따른 대청호 탁수 조절효과 및 수질영향 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제 8호, pp. 601-615.

한국수자원공사 (1991). **대청다목적댐 저수지 퇴사량 조사보고서**.

Ahlfeld, D., Joaguin, A., Tobiasson, J., and Mas, D. (2003). "Case Study: Impact of Reservoir Stratification on Interflow Travel Time." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 12, pp. 966-975.

Akiyama, J., and Stefan, H.G. (1984). "Plunging flow into a reservoir: theory." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 4, pp. 484-499.

Alavian, V. (1986). "Behavior of density currents on an incline." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 1, pp. 27-42.

Alavian, V., Jirka, G.H., Denton, R.A., Johnson, M.C., and Stefan, H.G. (1992). "Density currents entering

- lakes and reservoirs." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 11, pp. 1464-1489.
- Alavian, V., and Ostrowski, P., Jr. (1992). "Use of density current to modify thermal structure of TVA reservoirs." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 5, pp. 688-706.
- Baker, J.R., and Paulson, L.J. (1981). "Influence of Las Vegas wash density current on nutrient availability and phytoplankton growth in Lake Mead." *Symposium on Surface Water Impoundments*, ASCE June 2-5, 1980. Minneapolis, Minnesota. pp. 1638-1647.
- Botelho, D.A., and Imberger, J. (2007). "Dissolved-oxygen response to wind-inflow interactions in a stratified reservoir." *Limnol. Oceanogr.* Vol. 52, pp. 2027-2052
- Cole, T.M., and Wells, S.A. (2003). *CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, Version 3.2 user's manual*, Instruction Report EL-03-1, US Army Engineering and Research Development Center, Vicksburg, MS.
- Chung, S.W., and Gu, R. (1998). "Two-dimensional simulations of contaminant currents in stratified reservoir." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 7, pp. 704-711.
- 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, Inc., New York, N.Y.
- Ford, D.E., and Johnson, M.C. (1981). "Field observations of density currents in impoundments." *Symposium on Surface Water Impoundments*, ASCE June 2-5, 1980. Minneapolis, Minnesota. pp. 1239-1248.
- Gu, R., McCutcheon, S.C., and Wang, P. (1996). "Modeling reservoir density underflow and interflow from a chemical spill." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 3, pp. 695-705.
- Gu, R., and Chung, S.W. (1998). "Reservoir flow sensitivity to inflow and ambient parameters." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 124, No. 3, pp. 119-128.
- Hebbert, B., Imberger, J., and Patterson, J. (1979). "Collie river underflow into the Wellington reservoir." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 105, No. 5, pp. 533-545.
- Johnson, T.R., Ellis, C.R., and Stefan, H.G. (1987). "Negatively buoyant flow in a diverging channel. I: flow regimes." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 6, pp. 716-730.
- Johnson, T.R., Ellis, C.R., and Stefan, H.G. (1989). "Negatively buoyant flow in a diverging channel. IV: entrainment and dilution." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 4, pp. 437-456.
- Martin, J.L., and McCutcheon, S.C. (1999). *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*, CRC Press, Inc.
- Romero, J.R., and Imberger, J. (2003). "Effect of a flood underflow on reservoir water quality: Data and three-dimensional modeling." *Arch. Hydrobiol.* Vol. 157, No. 1, pp. 1-25.
- Savage, S.B., and Brimberg, J. (1975). "Analysis of plunging phenomena in water reservoirs." *Journal of Hydraulic Research*, International Association of Hydraulic Research, Vol. 13, No. 2, pp. 187-205.
- Singh, B., and Shah, C.R. (1971). "Plunging phenomenon of density currents in reservoirs." *LaHouille Blanche*, Vol. 26, No. 1, pp. 59-64.
- Stefan, H.G., and Johnson, R.T. (1989). "Negative buoyant flow in diverging channel. III: onset of underflow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 4, pp. 423-435.

(논문번호:08-94/접수:2008.08.28/심사완료:2008.11.21)