

## 2차원 수치모형을 이용한 저수지 내 퇴사분포 예측

### Prediction of Sediment distribution in Reservoir Using 2-D Numerical Model

김기철\* / 김종해\*\* / 정구열\*\*\* / 김현식\*\*\*\*

Kim, Ki Chul / Kim, Jong Hae / Chong, Koo-Yol / Kim, Hyeon Sik

#### Abstract

This study predicted long-term sediment distribution for 76 years by using RMA-2 which is two-dimensional numerical model and SED2D which is the sediment transport model to quantitatively analyze sediment distribution in the reservoir based on sediment intrusion and efficiently manage the reservoir. For water level-discharge-sediment data required in boundary conditions of the model, real-time data measured by the Korea Water Resources Corporation were used. The sediment input data was calculated using K-DRUM model. Sedimentation depth was compared with results of model by collecting cross-section core in the reservoir during the dry season. As the result of validation, the sediment depth in the reservoir was similar to actually measured value. For prediction of long-term sediment distribution, terrain data measured in 2012 was used as starting cross-section and simulations for 76 years until 2088 were made. As the results of simulations, sediment distributions of 1.63~1.26 m and 1.45~0.007 m were shown in upstream and downstream of Hapcheon Dam, respectively.

**keywords** : RMA-2 model, SED2D model, K-DRUM model, reservoir, sedimentation

#### 요 지

본 연구에서는 유입유사에 따른 저수지 내 퇴사 분포를 정량적으로 분석하고 효율적인 저수지 관리를 위하여 2차원 수치 유동 모형인 RMA-2와 유사이송 모형 SED2D를 사용하여 76년 장기 퇴사분포를 예측 하였다. 모형의 입력 자료인 수위-유량자료는 한국수자원공사에서 관측한 실시간 자료를 활용하였으며, 유사량 자료는 한국수자원공사에서 개발한 K-DRUM 모형을 사용하여 대상영역의 유사량 값을 산정하여 적용하였다. 또한 갈수기시 저수지내 단면 코어채취를 수행하여 퇴적깊이를 모형 결과와 비교하였다. 검증결과 저수지내 퇴적 깊이는 비교적 실측값과 유사하게 나타났다. 장기 퇴사분포 예측은 2012년 실측한 지형자료를 시작단면으로 하여 2088년까지 76년간 모의를 수행하였다. 모의결과 합천댐 상류구간에서 1.63~1.26 m, 하류구간에서 1.45~0.007 m의 퇴적층이 형성되었으며, 전체적으로 침식보다 퇴적이 우세한 결과를 보였다.

**핵심용어** : RMA-2 모형, SED-2D 모형, K-DRUM 모형, 저수지, 퇴사

\* 교신저자, 한국수자원공사 물관리센터 연구원 (e-mail: kkc@kwater.or.kr, Tel: 82-42-629-3075)

Corresponding Author, Researcher, Water Resources Operations Center, K-Water, 200beon-gil, Sintanjin-ro, Daedeok-gu, Daejeon 306-711, Korea

\*\* 워터웨이플러스 사장 (e-mail: hae4970@hanmail.net)

CEO, Waterway+, 270-74beon-gil, Arayuk-ro, Gochon-eup, Gimpo-si, Gyeonggi-do 415-816, Korea

\*\*\* 한국수자원공사 물관리센터 실장 (e-mail: kyuchong@kwater.or.kr)

Director General, Water Resources Operations Center, K-Water, 200beon-gil, Sintanjin-ro, Daedeok-gu, Daejeon 306-711, Korea

\*\*\*\* 한국수자원공사 미래조사처 팀장 (e-mail: hyeonsik@kwater.or.kr)

General Manager, Future Technology & Division, K-Water, 200beon-gil, Sintanjin-ro, Daedeok-gu, Daejeon 306-711, Korea

## 1. 서 론

저수지 내 퇴사 문제는 저수지의 건설과 운영 및 유지 관리에 영향을 미치는 요소로 자연 하천에 댐을 건설할 경우 퇴적물 조건과 하상 경계의 상대적인 평형을 변화시켜 물과 유사의 조건 및 하상 형태를 교란시키게 된다. 이러한 현상은 저수지의 수위 상승에 따른 유속의 변화로 인하여 상당량의 유사가 저수지내로 유입하여 퇴적된다. 또한 퇴적된 유사는 저수지의 활용 저수용량을 연차적으로 감소시켜 용수공급 및 홍수조절 능력 저하와 배수위 변화 등의 다양한 문제를 발생시킨다(Morris, 1996). 이와 같이 저수지 내에 발생하는 퇴사량의 정확한 예측은 저수지 운영에 필수적이라 하겠다. 국내의 저수지 퇴사량 예측은 퇴사량 자료를 보유한 저수지를 대상으로 연평균 비퇴사량 산정을 위한 경험공식을 유도하는 방법(Ministry of Construction, 1978; Ministry of Construction and Transportation, 2002; Kim et al., 1993a, 1993b;)이 주로 이용되고 있다. 그러나 경험공식의 대부분은 유역면적이 100 km<sup>2</sup> 이하의 농업용 저수지를 대상으로 하고 있고 대규모 저수지에 대한 퇴사량 산정에 대한 연구(Ministry of Construction and Transportation, 2002; Yoon, 1981)는 미미한 실정이다. 이 밖에 저수지 퇴사량 산정에 대한 연구로는 USLE, RUSLE와 같은 토사 발생량 산정공식을 이용 하거나, 유량-유사량 관계곡선식을 이용하는 방법 및 수치모의를 이용한 퇴사분포 연구(Choi et al., 2008; Yang, 1986; Chang and Hill, 1976; Holly, 1990), 강우량과 퇴사량의 상관관계를 분석하여 경험식을 개발한 연구(Ruy and Min, 1975, Ruy and Kim, 1976)도 수행되고 있다. USLE 모형은 지표면 및 실개천에서 발생하는 연평균 토사침식량을 산정하기 위해 1970년대 개발된 식이며, 사면이나 평지와 같은 소유역에 대한 토사 침식량 산정에 있어 적합하지 못하다는 단점이 있어 Renard et al. (1991)이 USLE 모형에 수정인자를 사용하여 RUSLE 모형을 개발하였다. 그러나 이 같이 경험식에 의한 방법 및 토사발생량 산정공식을 이용한 퇴사량 산정은 불확실성이 높기 때문에 실측자료를 바탕으로 한 방법이 신뢰도가 가장 높을 수밖에 없다(Ahn et al., 2006). 이에 본 연구에서는 유입된 유사로 인한 저수지 내 퇴사분포를 조사·분석하고, 2차원 수치모형을 통해 장래 퇴사분포를 예측·검토함으로써, 향후 퇴사저감 방안 수립 및 저수지 운영의 기초자료를 제공하기 위한 것이다.

## 2. 적용모형의 개요

하상의 상승과 저하에 따른 하상변동에 대한 해석적인 연구방법이란 하천흐름 및 유사 이송을 지배하는 연속방정식, 운동방정식, 흐름저항 방정식, 유사연속방정식, 유사량 공식을 이용하여 수학적 방법에 의해 해법을 구하는 것이다. 주로 컴퓨터 발전에 힘입어 지배방정식과 수치해석 기법을 이용한 수학적 모형들이 많이 이용되고 있다(Korea Water Resources Corporation, 2008). 이러한 수치모형들의 기본적인 원리는 하천흐름 및 유사 이송을 지배하는 방정식을 유한차분법, 유한요소법등의 수치기법을 이용하여 해를 구하는 것으로 본 연구에서는 국내·외적으로 하천 수리특성 및 유사 이송 해석에 많이 이용되고 있는 SMS (Surface-water Modeling System) 모형을 사용하였다. SMS 모형은 2차원 동수역학적 모형(Hydrodynamic modeling)으로서 미국 육군공병단의 WES (Waterways Experiment Station)와 미 연방도로국(U.S. Federal Highway Administration)이 연계하여 Brigham Young University의 Environmental Modeling Research Laboratory (EMRL)에서 개발하였으며, GFGEN 모형, RMA-2 모형, RMA-4 모형, SED2D 모형 등으로 구성되어 있다(Enviromental Modeling Research Laboratory, 2000a, 2000b, 2000c, 2000d). RMA-2 모형은 2차원 수심 평균한 유한요소 수치모형으로서 정류 및 부정류 모의가 가능하고 전·후처리가 편리한 모델로 2차원 흐름영역에서 자유표면, 상류흐름의 수평방향 유속성분과 수위를 계산하며, Navier-Stokes 방정식에 난류의 흐름을 고려한 Reynolds 방정식으로 유한 요소법에 의해 그 해를 계산하는 모형이다. 이 모형에서 마찰력은 Manning의 조도계수나 Chezy의 평균 유속계수로 계산되며, 와점성계수(Eddy viscosity coefficient)는 난류의 특성을 정의하는데 사용되며, 정상류뿐만 아니라 부정류에서도 모의가 가능한 모형이다. RMA-2는 연속방정식과 Navier-stoke 방정식을 2개의 수평방향에 대하여 수심 적분한 식을 지배방정식으로 하며, 이는 다음 Eqs. (1)~(3)과 같다(King, 1990).

$$\begin{aligned}
 & h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left( \epsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\
 & + gh \left( \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{n^2 g u}{h^{1/3}} \sqrt{(u^2 + v^2)} - \\
 & \sigma v_c^2 \cos \psi - 2huv \sin \psi = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left( \varepsilon_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \varepsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left( \frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{n^2 gv}{h^{1/3}} \sqrt{(u^2 + v^2)} - \quad (2)$$

$$\zeta V_a^2 \sin \psi + 2h \omega u \sin \varnothing = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

여기서,  $u, v$ 는 직교좌표계에서의 수심 적분한 수평흐름속도,  $x, y, t$ 는 직교좌표계 및 시간,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\varepsilon$ 는 와점성계수,  $a$ 는 하상고,  $h$ 는 수심,  $g$ 는 중력가속도,  $n$ 는 Manning 조도계수,  $\zeta$ 는 바람에 의한 전단계수,  $V_a$ 는 풍속,  $\psi$ 는 풍향,  $\varnothing$ 는 국지위도,  $\omega$ 는 지구의 회전 각속도를 나타낸다.

유사이송 모형인 SED2D는 2차원 정상 및 동수역학적인 유사이송과 하상변동을 모의할 수 있는 모형으로서 하상제원을 고려한 Eq. (4)의 이송-확산 방정식을 이용하여 하상변동을 모의한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \alpha_1 C + \alpha_2 \quad (4)$$

여기서,  $x$ 와  $y$ 는 좌표축,  $t$ 는 시간,  $C$ 는 농도,  $u$ 와  $v$ 는  $x$ 와  $y$  방향의 수심 평균유속,  $D_x$ 는  $x$ 축 방향의 유효확산계수,  $D_y$ 는  $y$ 축방향의 유효확산계수,  $\alpha_1$ 은 하상근원(*bed source*)에 대한 계수,  $\alpha_2$ 는 하상근원(*bed source*)의 평형 농도계수이다.

### 3. 대상지역 선정 및 입력자료 구성

#### 3.1 대상지역의 선정

본 연구의 대상지역은 1983년 착공하여 1989년에 준공

된 이후 경상남도 지역의 용수공급, 하류 홍수조절, 수력 발전·생산등을 담당하는 합천댐으로 선정하였다. 합천댐 유역은 북위 35°29′~35°35′과 동경 127°41′~128°06′ 사이의 한반도 남중부에 위치하고 있으며, 행정구역상 북쪽으로는 전라북도 무주군 및 경상북도 금릉군과 서쪽으로는 경상남도 거창군 전 유역과 합천군 봉산면에 접하는 지역으로 경상남도 거창군과 합천군의 봉산면, 대방면 일부가 포함되는 지역으로 대상지역의 위치도는 Fig. 1과 같다. 합천댐이 위치한 황강은 유로연장이 107.6 km, 유역면적은 1,329 km<sup>2</sup>이며, 합천댐의 계획홍수위는 EL.179 m, 상시만수위 EL.176 m, 총 저수용량은 790 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, 평균 유입량은 23.5 m<sup>3</sup>/sec이다. 합천댐의 주요 제원은 Table 1과 같다. 합천댐을 대상지역으로 선정할 이유는 한국수자원공사에서 저수지 퇴사영향 분석을 위해 1회/10년 주기로 실측한 수심자료와 지형자료가 구축되어 있고, 2차원 수치모의시 필요한 수위, 유량, 유사량 관측 자료의 확보가 가능하여 대상지역으로 선정하였다.

### 3.2 수치모의 입력자료

#### 3.2.1 지형자료

합천댐 유역의 지형자료는 한국수자원공사에서 2001, 2012년 수행한 합천댐 퇴사량 측량용역시 실측한 정사영상, 수치지도, LiDAR 측량 자료, 수심자료를 확보하여 이용하였다. 2001년 퇴사량 측량용역 자료의 형태는 합천댐 상류유역부터 합천댐 까지 24 km 구간을 실측한 자료로 육상측량과 항공측량, 수심측량으로 세분화 하여 실측한 자료이다. 육상측량은 1급 기준점 1개, 3급 기준점 18개, 4급 기준점 40개로 총 59개의 지상기준점을 설치하여 측량을 수행하였으며, 수심측량은 단빔을 사용하여 유역의

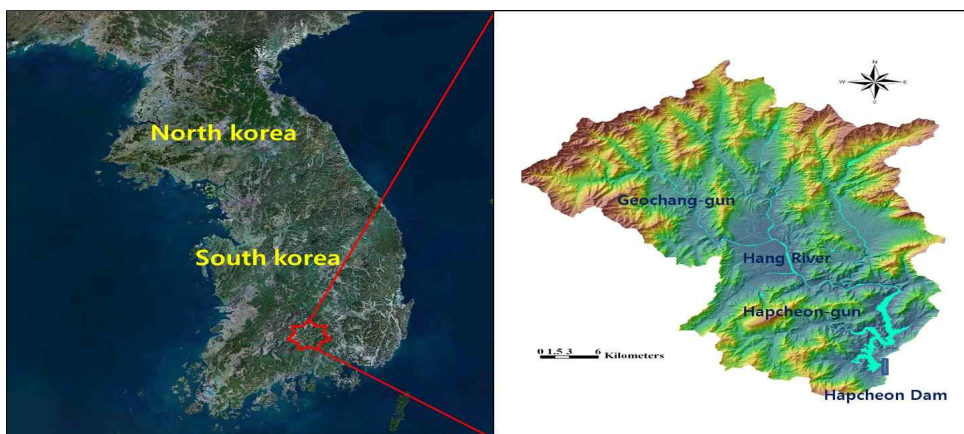


Fig. 1. Layout Near a Hapcheon Dam

지형적 특성에 따라 400~500m 간격으로 총 48개 단면으로 나누어 수심값을 취득하였다. 2012년 퇴사량 측량자료는 정밀한 수치표고 자료 및 수심측량 자료를 확보하기 위하여 LIDAR 항공측량 및 음파생성 기법 장비인 멀티빔 시스템(Seabat 8125) 장비를 도입하여 1×1m 격자의 정밀한 지형자료를 확보하고 있다(Fig. 2). 이에 본 연구에서는 한국수자원공사에서 수행한 2001년, 2012년 자료를 확보하고 수치화하여 적용하였다.

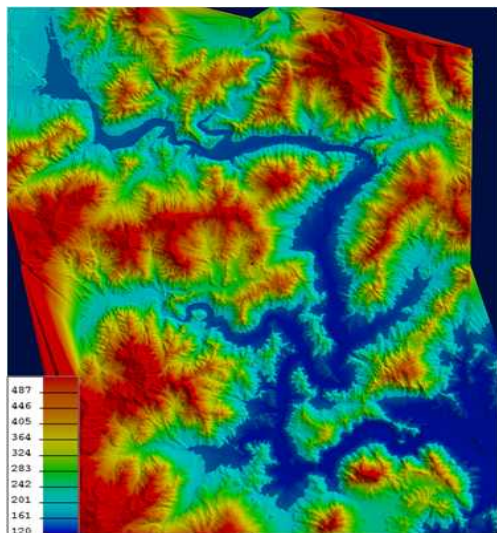
### 3.2.2 경계조건 입력자료 및 유사량 자료

수치모형 경계조건 자료인 수위, 유량자료는 검증기간(2001~2012년)과 예측기간(2012~2084년)으로 구분하여 입력 하였다. 검증기간(2001~2012년)의 수치모의시 필요한 상류지역 및 하류지역의 유량, 수위 자료는 한국수자

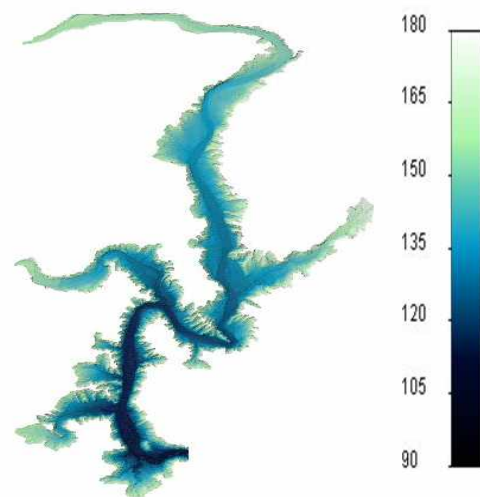
원공사에서 관측한 실시간 유량, 수위 자료를 사용하였으며, 예측기간(2012~2084년)의 수위, 유량자료는 합천댐 담수 이후부터 관측한 20년 수위, 유량자료를 연 평균하여 2012~2084년까지 반복적으로 입력하였다. 적용대상 지역의 퇴사분포 해석을 위한 유사량 입력 자료는 대상지역의 상류 경계지점 부근에서 실측한 유량-유사량 관측 자료를 활용하는 것이 신뢰성 높은 산정결과를 모의할 수 있으나 대상지점의 유량-유사량 관측 자료가 미비하여, 한국수자원공사에서 자체 개발된 분포형 강우유출 모형인 K-DRUM 모형을 이용하여 상류 경계단 지점의 유사량을 산정하였다. K-DRUM 모형의 유사모듈은 유역의 토양침식 과정을 보다 정확하게 물리적인 방법으로 해석할 수 있고, 토사 발생지역, 규모 및 기간에 따른 정량적 해석이 가능한 모형으로 EUROSEM에서 적용된 기법을 적용하여 물리적

Table 1. Characteristics of Hapcheon Dam

Characteristics	Unit	Value
Drainage area	km <sup>2</sup>	1,329
Channel length	km	63
Maximum water level	EL.m	179
Normal high water level	EL.m	176
Dam crest elevation	EL.m	181
Effective storage	m <sup>3</sup>	560 × 10 <sup>6</sup>
Flood control storage	m <sup>3</sup>	80 × 10 <sup>6</sup>
Mean depth	m	40



(a) LiDAR Data



(b) Multibeam Data

Fig. 2. LiDAR Data and Multibeam Data

특성의 유사거동을 반영하기 위해 단순화된 수리학적 접근 방법을 사용하였다. K-DRUM의 유사모듈에 적용된 EUROSEM 기법은 European Soil Erosion Model의 약자로 강우기간 동안 지표면의 토사이송, 침식 및 퇴적을 산정할 수 있도록 개발된 모형이다(Lee et al., 2013). K-DRUM 모형의 적용성 검토를 위하여, 한국수자원공사에서 2010년, 2011년에 개발된 합천댐 상류 지역의 거창 1·2

지점의 유량-유사량 관계곡선식과 SWAT 모형을 통해 산정된 계산값을 비교하여 검증하였다. 검증방법은 Table 2와 같이 Case 1(거창1), Case 2(거창2)로 구분하여 검증을 수행하였다. 검증결과 Figs. 3 and 5와 같이 유량이 급격하게 증가되는 홍수기 시기에는 K-DRUM으로 산정된 유출량 결과값이 곡선식 및 SWAT 모형의 계산값보다 다소 과소 산정되는 경향이 있으나, Figs. 4 and 6의 유사

Table 2. Verification Period of K-DRUM Model

Classification	Hapcheon Dam	
	Case 1	Case 2
Simulation Time	Jul. 2010~Aug. 2010	Mar. 2011~Dec. 2011
Observation Section	Geochang 1	Geochang 2
Sediment Rating Curve Eq. (Sediment-discharge)	$Q_s = 15.138 \times Q^{1.2505}$	$Q_s = 9.3736 \times Q^{1.1533}$

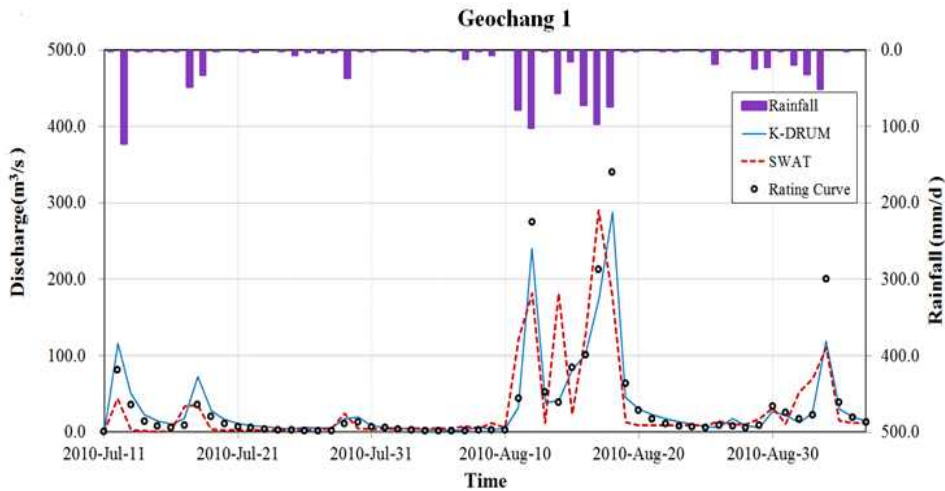


Fig. 3. Comparison of the Computed Solution and Observed Flow Rate Data (Case 1)

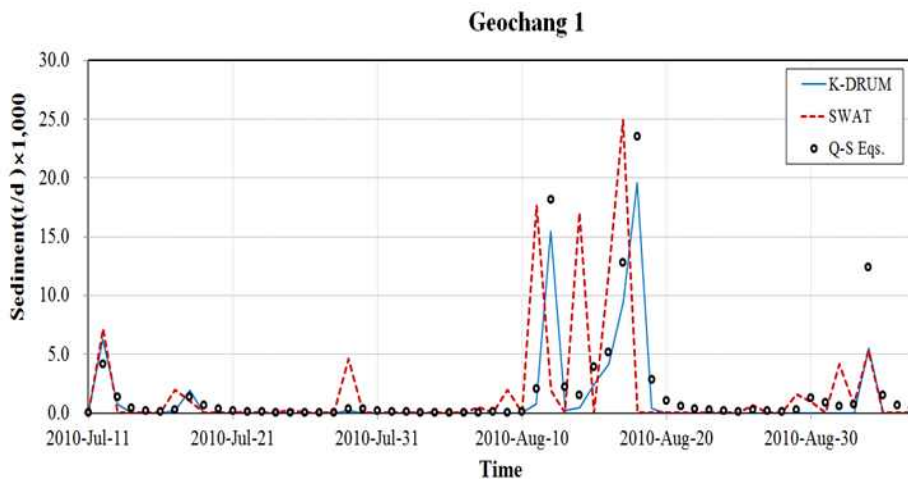


Fig. 4. Comparison of the Computed Solution and Observed Sediment Rate Data (Case 1)

량 산정 결과에서는 K-DRUM으로 산정된 유수량 값의 유출시간이 SWAT 모형보다 좋은 결과 값을 보였다. 두 모형의 결과 값에 대한 통계분석 결과 유출량 산정 결과는 Tables 3 and 5와 같이 K-DRUM이 관측 값과 유사한 결과를 보였으며, 총유수량 산정 결과에서는 Tables 4 and 6과 같이 SWAT 모형이 K-DRUM 모형보다 다소 높은 결과 값을 보였다. 그러나 이는 SWAT 모형의 유수량 계산결과가 홍수기 기간에 과대 산정되어 총 유수량이 관측 값과 유사하게 나타난 것으로 판단되며, K-DRUM 모형이 SWAT 모형보다 비교적 좋은 재현성을 보이는 것으로 나타났다.

#### 4. 모형의 검증 및 장기 저수지 퇴사분포 예측

##### 4.1 모형의 검증

퇴사분포 해석을 위한 SED2D 모형 적용에 필요한 매개 변수는 한국수자원공사에서 실시한 퇴사량 조사용역 보고서 (Korea Water Resource Corporation, 2001, 2012)의 값을 사용하였으며 난류교환계수는  $100 \text{ m}^2/\text{sec}$ , 대표입경( $D_{50}$ ) 0.44 mm, 비중은 2.65, 침강속도는 보편적으로 사용되는 Rubey 식으로 계산된  $0.044 \text{ m}/\text{sec}$ 를 적용하였다. 또한 SED2D 모형의 좋은 재현성을 보이기 위해서는 모의시간의 간격이

Table. 3 Statistical Results of Calculated Flow Rate (Case 1)

Flow rate		K-DRUM	SWAT	Optimal value
Total volume (million ton)	Observation	172.19		-
	Model	167.79	155.00	-
Percentage		97.45%	90.02%	-
Coefficient of determination	$R^2$	0.96	0.64	1
Adj. Coefficient of determination	$R^{*2}$	0.95	0.56	1 (var.=10)
Nash-Sutcliffe Nash-Sutcliffe Efficiency	NSE	0.94	0.63	1
Percent BIAS	PBIAS	2.55	9.98	0%
Root Mean Square Error	RMSE	16.76	40.02	0
Relative Root-Mean-Square Error	RRMSE	0.49	1.16	0
Mean Absolute Error	MAE	8.79	21.23	0
RMSE-observations standard deviation ratio	RSR	0.25	0.61	0
Mean Absolute Percentage Error	MAPE	0.56	0.93	0
Theil Inequality Coefficient	TIC	0.12	0.29	0

Table. 4 Statistical Results of Calculated Sediment Rate (Case 1)

Flow rate		K-DRUM	SWAT	Optimal value
Total volume (million ton)	Observation	104,163.9		-
	Model	67,761.0	104,270.9	-
Percentage		65.05%	100.1%	-
Coefficient of determination	$R^2$	0.95	0.11	1
Adj. Coefficient of determination	$R^{*2}$	0.93	-0.08	1 (var.=10)
Nash-Sutcliffe Nash-Sutcliffe Efficiency	NSE	0.9	-0.48	1
Percent BIAS	PBIAS	34.95	-0.1	0%
Root Mean Square Error	RMSE	1,380.34	5,302.06	0
Relative Root-Mean-Square Error	RRMSE	0.77	2.95	0
Mean Absolute Error	MAE	719.41	2,304.48	0
RMSE-observations standard deviation ratio	RSR	0.32	1.22	0
Mean Absolute Percentage Error	MAPE	0.86	2.67	0
Theil Inequality Coefficient	TIC	0.16	0.54	0

중요하며, 모의시간의 간격이 과도하게 크지 않도록 주의가 필요하다(Kim, 2012). 이에 본 연구에서는 장기 모의기간을 고려하여 24시간 간격으로 모의를 수행하였다.

모형의 검증은 한국수자원공사에서 2001년, 2012년 수행한 합천댐 퇴사량 조사보고서(Korea Water Resource Corporation, 2001, 2012) 자료를 사용하였으며, 검증 방법은 2001년 지형자료를 모의 시작단면으로 하여 2012년 실측 지형 단면 자료와 비교하였다. 2001년 한국수자원공사에서 조사한 합천댐 퇴사량 조사 자료에서는 Fig. 7과 같이 황강 상류부에서 합천댐 지점까지의 16 km 구간을 총 46개 단면

으로 나누어 조사를 수행한 기초 자료가 있으나, 본 연구에서는 적용대상 구간을 상류시작 지점 No.48 지점부터 하류 방향으로 2km 떨어진 No.42번 지점부터 하류 방향으로 No.1 지점인 합천댐까지 모의를 수행하였다. 상류지점 No. 42 지점부터 모의를 수행한 이유는 No.46~No.43 지점의 하폭 및 수심이 갈수기에 급격히 좁아지고 수심이 낮아져 수치모의시 wet/dry 현상으로 인한 오류가 발생하기 때문에 이를 최소화하기 위해서 수심이 급격히 낮아지고 하폭이 좁아지는 상류 유역을 제외 하였다. 모형에 적용한 저수지의 총 길이는 약 16km, 최대하폭 1.2km 최소하폭 50m, 최

**Table. 5 Statistical Results of Calculated Flow Rate (Case 2)**

Flow rate		K-DRUM	SWAT	Optimal value
Total volume (million ton)	Observation	145.73		-
	Model	149.33	232.43	-
Percentage		102.47%	159.49%	-
Coefficient of determination	R <sup>2</sup>	0.87	0.59	1
Adj. Coefficient of determination	R <sup>*2</sup>	0.87	0.58	1 (var.=10)
Nash-Sutcliffe Nash-Sutcliffe Efficiency	NSE	0.86	0.17	1
Percent BIAS	PBIAS	-2.47	-59.49	0%
Root Mean Square Error	RMSE	6.08	14.87	0
Relative Root-Mean-Square Error	RRMSE	1.10	2.70	0
Mean Absolute Error	MAE	2.38	6.18	0
RMSE-observations standard deviation ratio	RSR	0.37	0.91	0
Mean Absolute Percentage Error	MAPE	0.69	2.45	0
Theil Inequality Coefficient	TIC	0.19	0.36	0

**Table. 6 Statistical Results of Calculated Sediment Rate (Case 2)**

Flow rate		K-DRUM	SWAT	Optimal value
Total volume (million ton)	Observation	26,317.2		-
	Model	14,704.0	14,973.8	-
Percentage		55.87%	56.90%	-
Coefficient of determination	R <sup>2</sup>	0.91	56.90	1
Adj. Coefficient of determination	R <sup>*2</sup>	0.91	0.53	1 (var.=10)
Nash-Sutcliffe Nash-Sutcliffe Efficiency	NSE	0.81	0.51	1
Percent BIAS	PBIAS	44.13	0.45	0%
Root Mean Square Error	RMSE	142.05	43.10	0
Relative Root-Mean-Square Error	RRMSE	1.65	242.42	0
Mean Absolute Error	MAE	42.60	2.82	0
RMSE-observations standard deviation ratio	RSR	0.43	74.24	0
Mean Absolute Percentage Error	MAPE	0.80	0.74	0
Theil Inequality Coefficient	TIC	0.25	1.06	0

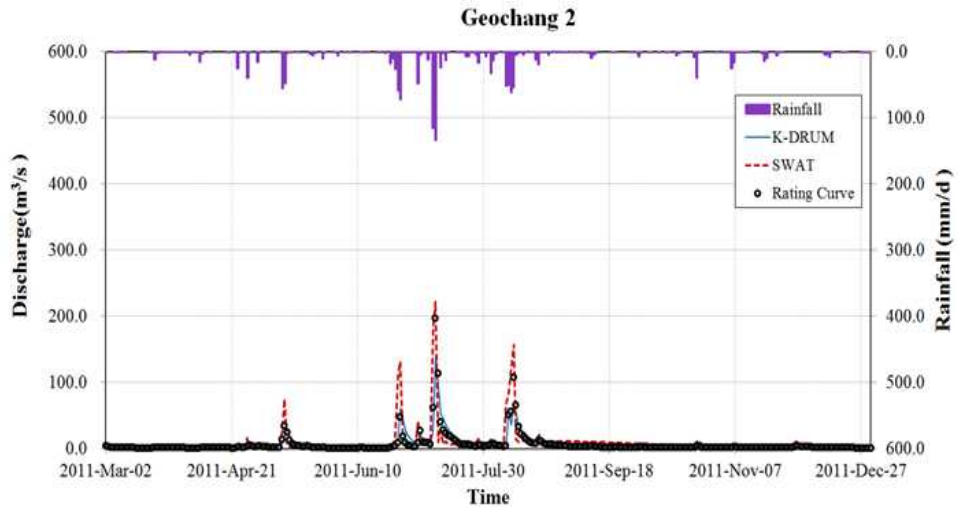


Fig. 5. Comparison of the Computed Solution and Observed Flow Data (Case 2)

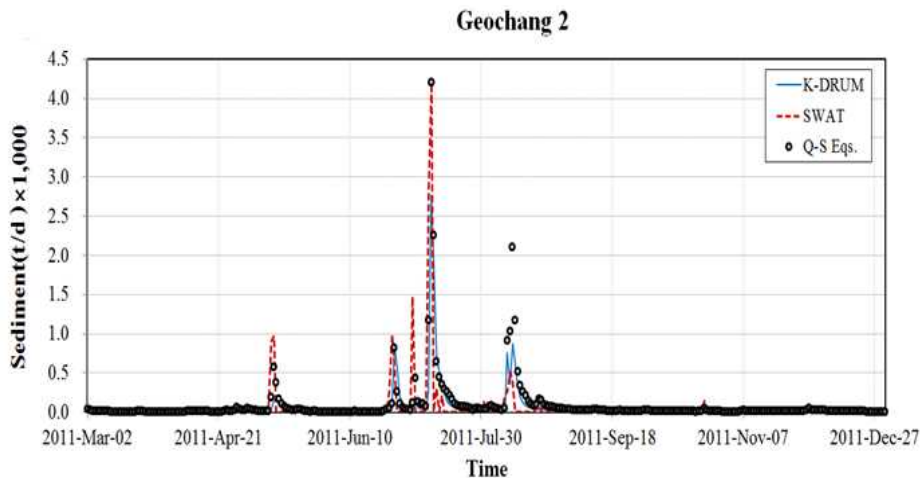


Fig. 6. Comparison of the Computed Solution and Observed Sediment Rate Data (Case 2)

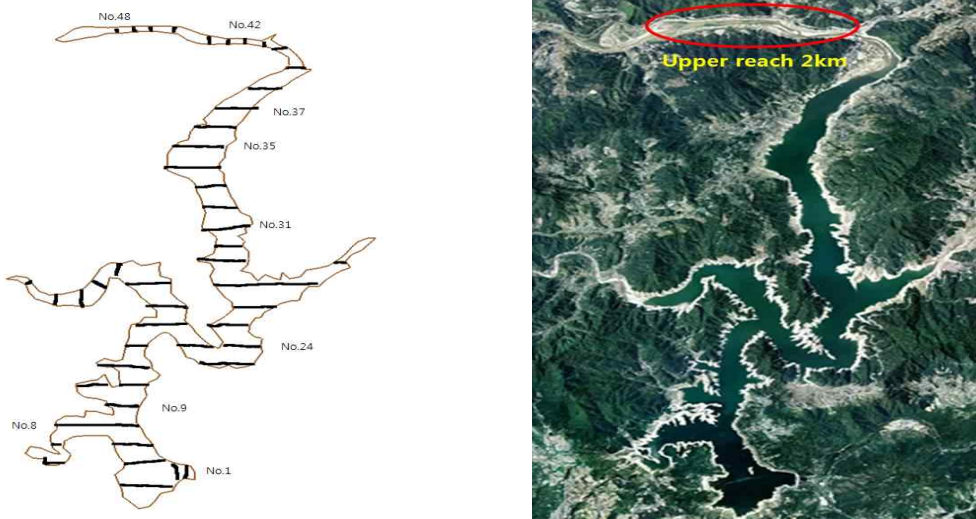


Fig. 7. Study Area in Hapcheon Dam



대수심 70m이며, 격자의 구성은 Element 6,451개 Node 16,917개의 삼각형 격자로 황강 본류와 지류 하천 2개 구획으로 구분하여 구축하였다. 구성된 격자망과 수심도를 Fig. 8에 나타내었다. 모형의 경계조건 자료인 수문자료는 2001년 11월부터 2012년 11월까지 실측 자료를 이용하였으며, 유사량 자료는 K- DRUM 모형을 통해 산정된 유사량 계산값을 적용하였다(Fig. 9). 또한, SED2D 모형 적용에 필요한 매개변수는 난류교환계수는  $100\text{ m}^2/\text{sec}$ , 대표입경( $D_{50}$ ) 0.44 mm, 비중은 2.65, 침강속도는 보편적으로 사용되는 Rubey 식으로 계산된  $0.044\text{ m}/\text{sec}$ 를 적용하였

다. 계산결과 지점별 하상변동 변위는 최대 0.267 m, 최소 0.003 m로 지점 No. 42에서 가장 큰 하상변동 값이 나타났으며 No.1 지점에서 가장 작은 하상변동 변위 값이 나타났다. 지점별 관측값과 계산값의 오차 분석 결과 Table 7과 같이 측정점 No.42 지점에서 0.063 m의 오차가 발생하였으며, No.37~No.24 지점에서 0.018~0.04 m, No.9~No.1 지점에서는 0.068~0.076 m의 오차가 발생하였다. 또한 적용모형의 검증은 위하여 Fig. 10과 같이 대상영역에서 퇴적층 코어채취를 수행하였다. 코어 채취 지점의 선정은 과거 2001년 퇴사량 조사시 수행한 지층조사 지점 및 탄성과

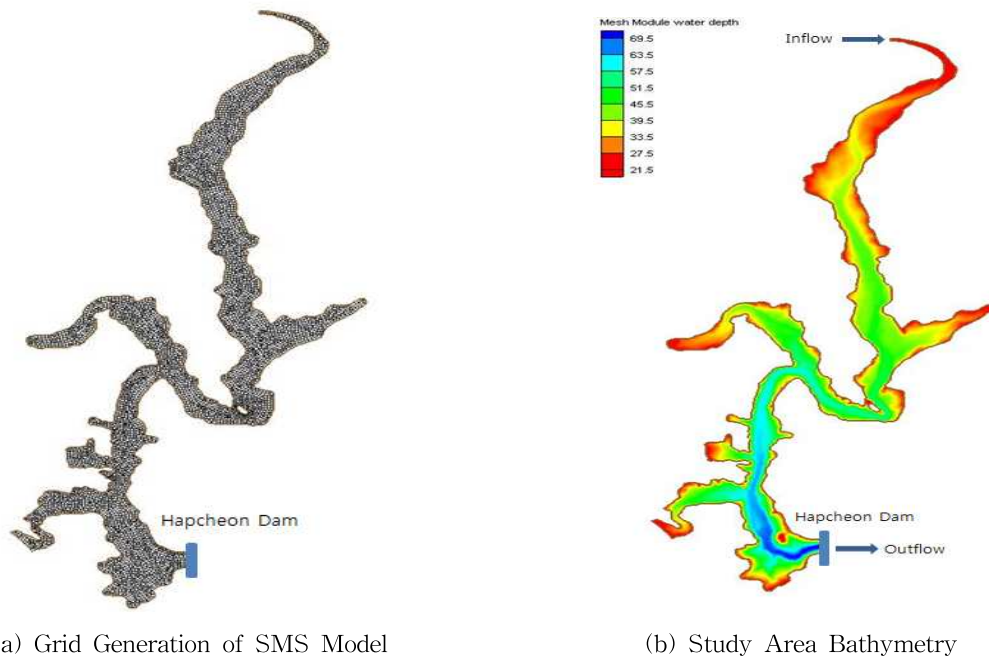


Fig. 8. Model Grid and Bathymetry

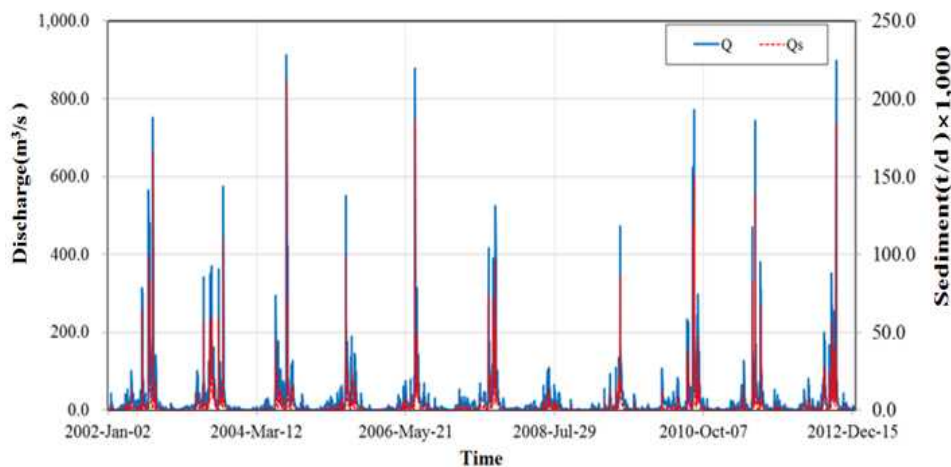
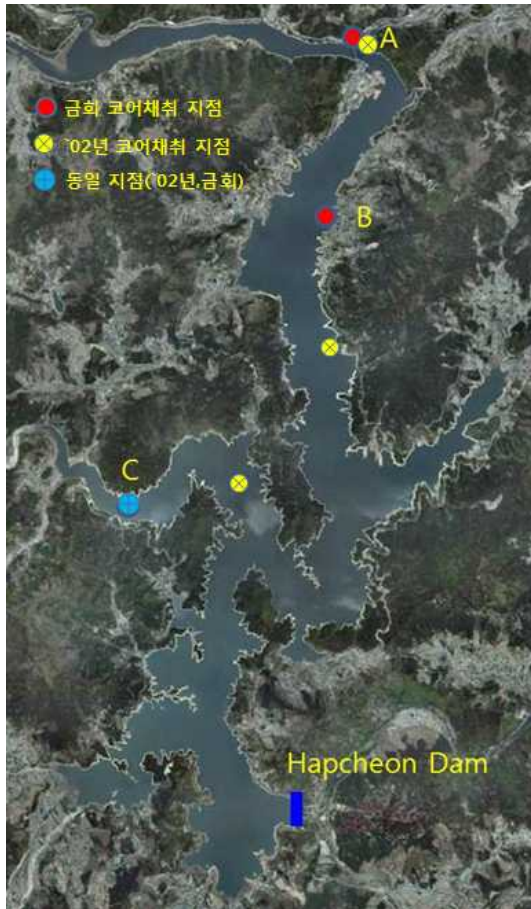
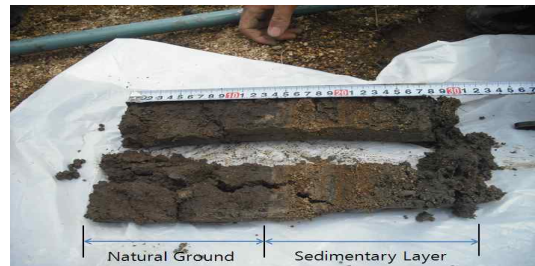


Fig. 9. Input Sediment Rate Data (Upstream Boundary Condition)



(a) Sedimentation Point A



(b) Sedimentation Point B



(c) Sedimentation Point C

Fig. 10. Sedimentation Survey

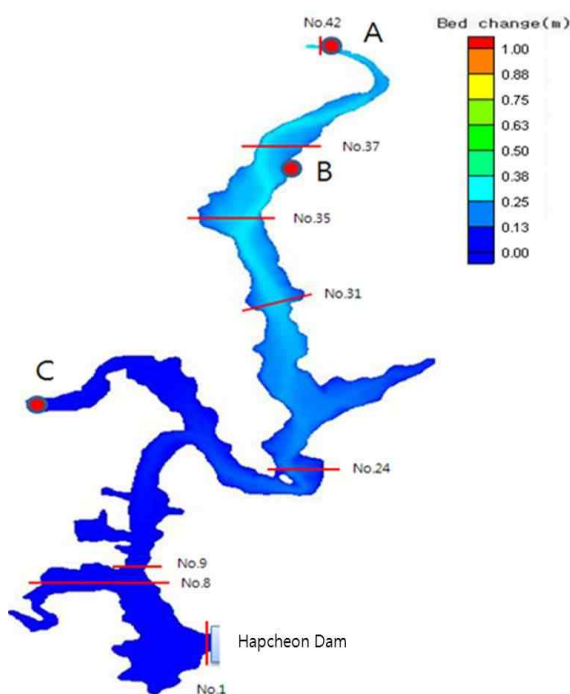


Fig. 11. Bed Change Simulation Result 2012

조사 지점에서 접근이 용이한 지점을 선정하여 수행하였으며, 시료교란에 대한 오차를 최소화하기 위하여 동일지점에서 2회 이상 코어채취를 수행하였다. 채취한 코어는 2001년 수행한 지층조사 및 탄성과 조사 자료인 지층별 분포 상태, 주상도, 토질분류, 흙의 색조등을 비교 분석하여 원지반과 퇴적 지반을 구분하였다. 코어채취 분석을 통하여 나타난 퇴적층 심도와 모형의 계산결과를 비교 분석한 결과 퇴적심도는 Table 8과 같이 상류지역의 Section A 지점에서 실측값 0.26 m, 계산값 0.21 m, Section B에서는 실측값 0.19 m, 계산값 0.17 m, Section C에서는 계산값 0.21 m, 실측값 0.13 m로 실측값보다 계산값이 다소 과소 산정되었으나 오차범위가 0.02~0.08m로 비교적 잘 재현된 것으로 판단된다. 대상 구간의 전체적인 하상변동 형태는 느린 유속 분포를 갖는 저수지 특성상 침식보다 퇴사가 우세하게 나타났다.

#### 4.2 장기 퇴사분포 예측

장기 퇴사분포 예측은 댐의 물리적 수명 100년을 고려하여, 2012년 측량자료를 기준으로 하여 2088년까지 총

76년간 모의를 수행하였다. 모형의 계산간격은 RMA-2, SED2D 24시간 간격으로 수행하였으며, 경계조건 입력자료인 수문자료는 1989년 1월~2013년 01월까지 실측자료를 연평균하여 적용하였다. 또한 유사량 입력 자료는 K-DRUM 모형을 이용하여 1989년 1월~2013년 01월까지 연평균 강우자료를 통해 연평균 유사량 값을 산정하였으며, 유사량 자료의 입력은 산정된 연평균 유사량 값을 반복하여 적용하였다. 퇴사분포 예측은 2022년, 2038년, 2088년의 하상변동 값을 예측하여 비교분석 하였다. RMA-2

모형을 이용한 수리유동 모의결과 저수지의 평균유속은 갈수기 0.02 m/sec, 홍수기 0.05 m/sec로 느린 유속 분포를 보였다. 그러나 하폭이 좁고 수심이 낮은 상류지역에서 홍수기시 최대 유속은 0.3 m/s로 비교적 빠른 유속 분포를 보였다. SED2D 모형을 이용한 장기 퇴사분포 예측 결과 2022년 (10년 후) 퇴사분포는 Fig. 12(a)와 같이 상류 유역 No.42~No.31 구간에서 0.23~0.23m의 퇴적이 발생하였으며, 하류 유역 No.24~No. 1 구간에서 0.001~0.2m 퇴적이 발생하였다. 2038년 모의결과에서는 Fig. 12(b)와 같이 상류

Table 7. Measured and Predicted Bed Change from 2001 to 2012

Section (No.)	Variation of Measured Bed Changes (m)	Variation of Simulated Results Bed Changes (m)	Error(m)
No.42	0.33	0.267	0.063
No.37	0.26	0.234	0.026
No.35	0.25	0.232	0.018
No.31	0.23	0.21	0.02
No.24	0.06	0.1	-0.04
No.9	0.1	0.032	0.068
No.8	0.1	0.024	0.076
No.1	0.1	0.003	0.07

Table 8. Comparison of the Bed Changes Simulated in the Model and Measured in the Field

Section A			Section B			Section C		
Obs.	Cal.	Variation	Obs.	Cal.	Variation	Obs.	Cal.	Variation
0.26 m	0.21 m	-0.05 m	0.19 m	0.17 m	-0.02 m	0.21 m	0.13 m	-0.08 m

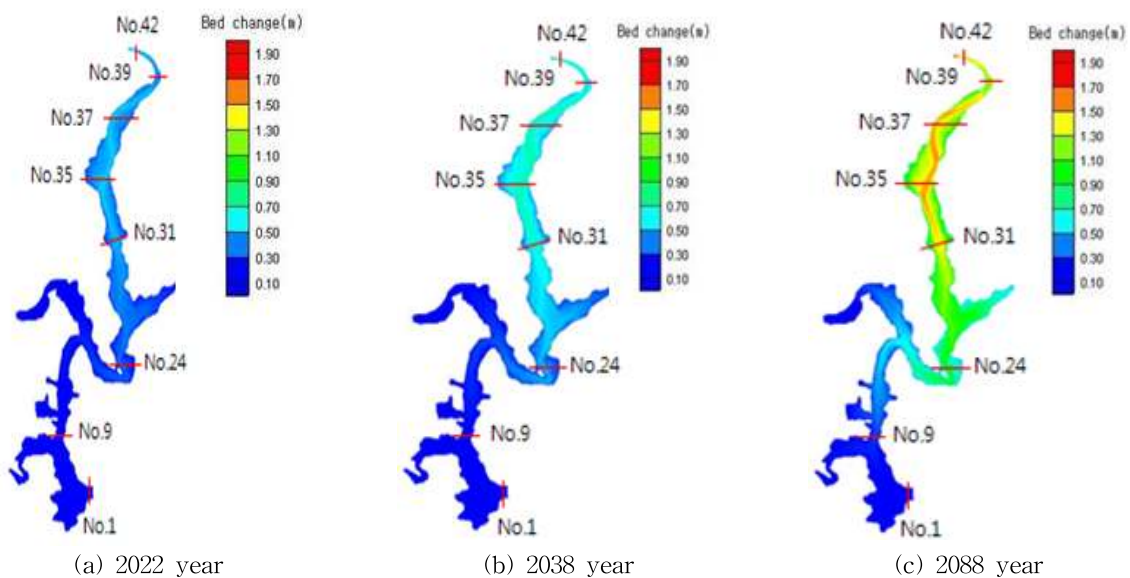


Fig. 12. Bed Changes 2022, 2038, 2088

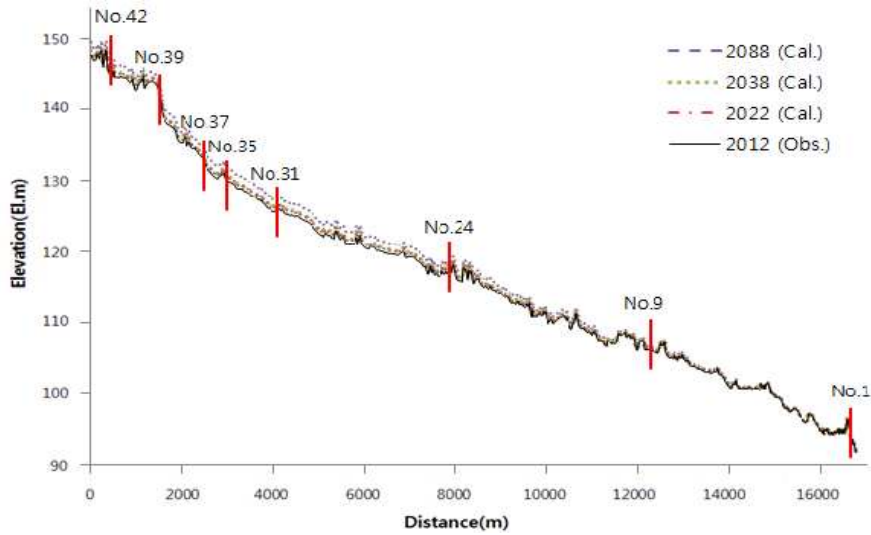


Fig. 13. Variation of Longitudinal Profiles of the Study Reach in 2012, 2038 and 2088

Table 9. Simulation Results of Bed Changes 2022 to 2088

Section (No.)	Bed Changes 2022 (m)	Bed Changes 2038 (m)	Bed Changes 2088 (m)
No.42	0.2	0.6	1.42
No.39	0.18	0.54	1.26
No.37	0.22	0.66	1.54
No.35	0.23	0.7	1.63
No.31	0.23	0.69	1.61
No.24	0.2	0.23	1.45
No.9	0.14	0.42	0.97
No.1	0.001	0.003	0.007

유역 No.42~No.31 구간에서 0.7~0.54m, 하류유역 No. 24~No.1 구간에서는 0.23~0.003m의 퇴사분포가 예측되었다. 2088년 모의결과는 Fig. 12(c)와 같이 상류 유역 No. 42~No.31 구간에서 1.63~1.26m의 퇴사분포가 산정 되었으며 하류유역 No.24~No.1 구간에서는 1.45~0.007m의 변동이 계산되었다(Table 9). 또한 하상 변동 모의결과 하 폭이 가장 넓고 유속이 느린 No.35 지점에서 1.63m의 가장 많은 하상변동이 발생하였으며, 그 다음으로 No.31, No. 37, No.24, No.42, No.39 순서로 하상변동이 발생되었다. 이 같은 현상은 No.35 지점과 같이 수심이 깊고 하폭이 증가하는 지점에서 유속이 감소함에 따라 퇴적현상이 활발해져 나타나는 현상으로 판단된다. 합천댐 저수구역을 대상으로 76년간 장래 퇴사분포를 예측한 결과 대부분 상류 유역에서 퇴적 현상이 나타났으며, 퇴사에 따른 하상 바닥 상승은 설계시 퇴사량을 고려한 사수위 EL. 114.2 m보다 낮게 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 합천댐 저수지의 장기 퇴사분포를 2차원 수치모의를 통해 예측하였다. 예측방법은 모형의 검증 을 위한 검증기간과 예측기간의 2 case로 구분하여 수행 하였다. 모형의 경계조건 자료인 유수량 입력 자료는 K-DRUM 모형과 SWAT 모형을 통해 산정 후 비교·분석하여 비교적 재현성이 좋은 K-DRUM 모형 결과를 적용하였다. 또한 모형의 검증을 위한 단면 코어 채취를 수행하여, 모형을 검증하였다. 이러한 수치모의결과를 통해 다음과 같은 주요 결론을 얻었다.

- 1) 정량적인 유수량 산정을 위한 K-DRUM 모형 및 SWAT 모형을 유량-유수량 곡선식 자료와 비교 검증 결과 SWAT 모형은 홍수기시 유수량이 과산정 되는 결과를 보였으며, 재현성 또한 K-DRUM 모형이 비교적 좋은 결과를 보였다.

- 2) 2001년 실측자료와 실제 수문사상을 적용한 모의결과에서는 하류구간 보다 상류 구간에서 퇴적이 활발하게 나타났다. 하상변동 변위값은 최소 0.003m에서 최대 0.267m로 계산되었으며, 동일 구간의 실측 변위값은 0.33~0.1m로 오차범위는 7.6% 미만으로 실측값과 계산값이 비교적 잘 일치하였으며, 전체적인 퇴적 분포 형태는 침식보다 퇴적이 우세하게 나타났다.
- 3) 장기하상변동(2012~2088) 예측결과 하폭이 넓고 수심이 깊어지는 No.35 지점에서 0.23m, 0.7m, 1.63m로 가장 많은 하상변동이 발생했다. 이후 하상변동이 큰 지점은 No.31 지점에서 0.23m, 0.69m, 1.61m, No.37 지점에서 0.22m, 0.66m, 1.54m로 나타났다. 하상변동의 변위가 큰 지점의 주요 특징은 하폭이 급격히 증가하여 유속이 감소하는 지점에서 발생하였다.
- 이러한 결과를 통해 합천댐의 장래 퇴사분포는 상류 유역에 주로 생성될 것으로 예측되며, 퇴사로 인한 댐 주변에 대한 영향은 없을 것으로 판단된다. 또한 본 연구결과를 통하여 저수지 퇴적 토사의 효율적 관리 및 저감방안을 수립하는데 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- Ahn, J.H., Jang, S.H., Choi, W.S., and Yoon, Y.N. (2006). "An efficient management of sediment deposit for reservoir long-term operation (1)." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 22, No. 6, pp. 1088-1093.
- Chang, H.H., and Hill, J.C. (1976). "Computer modeling of erodible flood channels and deltas." *J. of Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 102, No. 10, pp. 1461-1477.
- Choi, M.H., Lee, S.O., Ahn, J.H., and Yoon, Y.N. (2008). "An analysis of long-term river bed changes using surface-water modeling system (SMS) Model: A case study of the Pochon stream basin SMS." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 8, No. 2, pp. 139-147.
- Environmental Modeling Research Laboratory (2000a). *SMS (Surface Water Modeling System) GFGEN version 4.27 user's manual*. Brigham Young University.
- Environmental Modeling Research Laboratory (2000b). *SMS (Surface Water Modeling System) RMA-2 version 4.3 user's manual*. Brigham Young University.
- Environmental Modeling Research Laboratory (2000c). *SMS (Surface Water Modeling System) SED2D-WES version 4.3 user's manual*. Brigham Young University.
- Environmental Modeling Research Laboratory (2000d). *SMS (Surface Water Modeling System) tutorials version 7.0 user's manual*. Brigham Young University.
- Holly, F.M., and Rahuel, J.L. (1990). "New numerical/physical framework for mobile-bed modeling: part 1, numerical and physical principles." *J. of Hydraulic Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 401-416.
- Kim, D.G. (2012). "simulation of sediment deposition behavior in a reservoir using a SED2D model: Focusing on sensitivity of simulation time step." *J. of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 26, No. 1, pp. 87-95.
- Kim, J.T., Park, S.U. (1993a) "Estimating sediment deposits and trap efficiencies for irrigation reservoirs." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 26, No. 3, pp. 63-74.
- Kim, J.T., Park, S.U., and Suh, S.D. (1993b). "Predictive equations for deposits and sediment yields at irrigation reservoirs." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 35, No. 2, pp. 104.
- King, I.P. (1990). *Program documentation RMA-2V, two dimensional finite element model for flow in estuaries and streams*. Ver.4.3 Resources Management Associates, Lafayette.
- Korea Water Resources Corporation (2001). Sedimentation survey report : Hapcheon Dam.
- Korea Water Resources Corporation (2008). Nakdong River barrage maintenance control report.
- Korea Water Resources Corporation (2012). Sedimentation survey report : Hapcheon Dam.
- Lee, C.L., Kim, H.S., Shin, C.K., Hur, Y.T., and Jang, S.W. (2013). *Application of K-DRUM model for multi-purpose dam basin*. Korean Society of Civil Engineers Conference, p. 638.
- Ministry of Construction (1978). Hydrologic investigation observation final report.
- Ministry of Construction and Transportation (2002). Hantan River dam design criteria.
- Morris, G.L. (1996). "Reservoirs and integrated manage-

- ment." *Technical Documents in Hydrology*, No. 2, pp. 135-148.
- Renard, K.D., Foster, G.A., and Weesies, P.J. (1991) "Revised universal soil loss equation." *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 46, No. 1, pp. 30-33.
- Ryu, H.J., and Kim, S.W. (1976). "Study on sedimentation in reservoir." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 9, No. 2, pp. 67-75.
- Ryu, S.C., and Min, B.H. (1975). "A study on sedimentation in reservoir-on district of Chin Young." *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 17, No. 3, pp. 3840-3847.
- Ryu, S.C., and Min, B.H. (1975). "A study for sedimentation in reservoir : On district of Chin Young." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 17, No. 3, pp. 46-53.
- Yang, J.C. (1986). *Numerical simulation of bed evolution in multi channel river systems*. Ph.D. Thesis Dissertation, The University of Iowa, Iowa City, Iowa.
- Yoon, Y.N. (1981). "Estimation of silting load and capacity loss rate of irrigation reservoirs." *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 19, No. 1, pp. 69-76.

논문번호: 14-052	접수: 2014.06.25
수정일자: 2014.07.22/07.25	심사완료: 2014.07.25