



Comparative analysis of methods for sediment level estimation in dam reservoir

Joo, Hong Jun^a · Kim, Hung Soo^{a*} · Cho, Woon ki^b · Kwak Jae won^c

^aDepartment of Civil Engineering, Inha University

^bDepartment of Civil Engineering, Hongik University

^cForecast & Control Division, Nakdong River Flood Control Office

Paper number: 17-092

Received: 26 October 2017; Revised: 16 November 2017; Accepted: 16 November 2017

Abstract

This study examined how to determine the optimal sediment level in dam reservoir for efficient plan and operation of dam. Currently, Korea is applying a horizontally accumulated method for sediment level estimation for the safety design of dam and so the method estimated relatively higher level than others. However, the sediment level of dam reservoir should be accurately estimated because it is an important factor in assessing life cycle of a dam. The sediment level in dam reservoir can be determined by SED-2D model linked with RMA-2, horizontally accumulated method, area increment method, and empirical area reduction method. The estimated sediment level from each method was compared with the observed sediment level measured in 2007 in Imha dam reservoir, Korea and then the optimal method was determined. Also, the future sediment level was predicted by each method for the future trend analysis of sediment level. As the results, the most accurate sediment level was estimated by the empirical area reduction method and the future trend of sediment level variation followed the past trend. Therefore, we have found that the empirical area reduction method is a proper one for more accurate estimation of sediment level and it can be validated by the results from a numerical model of SED-2D linked with RMA-2 model.

Keywords: Dam reservoir, Sediment level, RMA-2 & SED-2D model, Horizontally accumulated method, Area reduction method, Empirical area reduction method

댐 저수지의 퇴사위 결정 방법에 관한 연구

주홍준^a · 김형수^{a*} · 조운기^b · 곽재원^c

^a인하대학교 사회인프라공학과, ^b홍익대학교 토목공학과, ^c낙동강홍수통제소 예보통제과

요 지

본 연구에서는 댐의 효율적인 계획 및 운영을 위해 댐 저수지의 최적 퇴사위 결정 방법에 대해 고찰하였다. 현재 우리나라는 안전한 설계에 의거하여 댐 저수지 사수위 내의 퇴사위 결정 방법은 비교적 높게 산정되는 수평퇴사법을 주로 적용하고 있지만, 댐 저수지의 퇴사위는 정확하게 계획되어야 하며, 이는 댐 생애주기 평가 차원에서 중요한 요소이다. 댐 저수지의 퇴사위 결정을 위해 대표적인 방법으로는 RMA-2와 연계된 SED-2D의 모형에 의한 방법, 수평퇴사법, 면적증분법(area increment method), 경험적면적감소법(empirical area reduction method)이 있다. 본 연구에서는 최적 퇴사위 결정을 위해 이를 산정하여 2007년 기준 실측 퇴사위와 비교하였다. 또한, 현재 및 미래 퇴사위를 예측하여 각 방법별로 경향과 추이를 분석하였다. 실측 퇴사위와 산정된 퇴사위를 비교한 결과, 경험적면적감소법이 실측값과 가장 근사하게 산정된 것을 확인할 수 있었으며, 현재 및 미래의 퇴사위는 전반적으로 과거 퇴사위의 경향과 추이를 따라가는 것으로 확인되었다. 따라서, 본 연구의 결과를 토대로 보면 경험적면적감소법의 이용이 적절할 것으로 판단되고, 모형에 의해 분석 결과의 타당성을 검증하는 것이 합리적이라 생각된다.

핵심용어: 댐 저수지, 퇴사위 결정 방법, RMA-2 & SED-2D 모형, 수평퇴사법, 면적증분법, 경험적면적감소법

*Corresponding Author. Tel: +82-32-860-7572

E-mail: sookim@inha.ac.kr (H. S. Kim)

1. 서론

전 세계적으로 댐 저수지의 퇴사위 예측에 대한 문제는 오래 전부터의 기술적 과제이며, 댐의 계획 및 생애주기 산정을 위해 정확한 측정이 요구되고 있다. 또한, 유지관리 차원에서 이러한 퇴적토사의 저감을 위해 배사나 재활용 등의 종합적인 퇴사대책을 필요로 하고 있다. 하지만, 우리나라에서는 댐 설계시 퇴사위의 결정에 대한 구체적인 산정방법을 제시하지 않고 다소 주관적인 판단에 맡기고 있다. 현재 실무에서는 댐 저수지 퇴사위는 50년 퇴사의 수평퇴사법을 참고하는 방법을 많이 적용하고 있는 추세이나 이는 저수지 내에서의 퇴사량과 공간적 분포양상을 정확히 예측할 수 없으므로 계획단계에서 댐 취수구조물의 퇴사로부터 안정성을 보장하기 위한 것으로 판단된다. 하지만, 퇴사위 산정에 대한 기존 방안을 검토한 후, 비교적 정확한 방법을 채택하여 계획 및 운영해야 한다.

댐 저수지를 비롯한 소규모 저수지의 퇴사 현상에 대한 전반적인 연구 동향을 살펴보면 국내의 경우 Kwan (1973)은 USBR에서 제시한 경험적 면적감소법을 적용하여 소양호의 100여 년간 유입 유사량과 그에 따른 비퇴사량을 제시하였으며, Ryu *et al.* (1976)은 소규모 저수지에 대하여 연간 비유사량과 단위면적당 내용적, 연평균 강우량, 유역평균 경사에 대한 상관식을 제시하였다. Ahn *et al.* (1984)은 소규모의 관개용 저수지에 대한 퇴사량과 이용면적, 유사 포착률, 유역 경사, 유역 형상계수 및 저수지 퇴사기간의 상관관계를 단순 및 다변수 회귀모형으로 제안하였다. Seong *et al.* (2006)은 HEC-6 모형과 SMS-SED2D 모형을 이용하여 소양호의 장래 퇴사 분포를 모의하였으며, Lee *et al.* (2012)는 경험적 면적 감소법을 이용하여 댐 저수지의 퇴사분포를 장기 예측하였다. 또한, Kim *et al.* (2014)은 2차원 수치모형을 이용한 저수지 내 퇴사 분포를 예측한 바 있다.

국외에서는 Renard *et al.* (1991)은 USLE 모형에 수정인자를 사용하여 RUSLE 모형을 개발했다. RUSLE 모형은 제안된 범용 토양손실 경험식으로 실측 토사유출량과 토사유출인자(강우, 토양, 경사, 식생, 유역관리조건 등)와의 상관성분석에 의해 토사유출량을 산정하는 것으로 토사침식과 관련된 경사진 소유역의 특성을 고려하였다는 점에서 비교적 객관성이 높은 합리적인 토사유출 예측방법으로 판단되고 있다. 하지만, 대규모 댐의 저수지에 대해서는 적합하지 않는다는 것이 기정 사실화 되어 있다. Arnold (1999)가 미국 텍사스의 6개 유역에 각 유역별 연평균 유사량과 관측자료를 비교 및 유사량의 적정성을 검토하였으며, Versraeten *et al.* (2003)은 스페인의 60개의 저수지에 대하여 퇴적 과정의 발생 기작 및 변동

성에 관한 연구를 시행한 바 있다. Pereira *et al.* (2009)은 미국 Mississippi River 하류에 HEC-RAS의 하상변동모형을 적용하였으며 최적의 유사량공식으로 Engelund & Hansen 공식을 제안하였다. Amini *et al.* (2010)은 댐 퇴사위의 여러 결정방법을 조사하던 중, 경험적면적감소법과 면적증분법이 가장 많이 쓰이고 있다는 걸 밝혀냈다. 또한, Shinde tukaram *et al.* (2016)은 인도의 Ujjani 댐 저수지에 대해 면적증분법과 경험적면적감소법으로 산정한 퇴사위를 비교한 적이 있다.

그 동안 저수지의 퇴사 현상에 대한 연구는 많이 존재한 것으로 보이나, 대안이나 방안 제시가 아닌 분석 위주의 연구가 대부분인 실정이다. 그마저도, 퇴사량 및 퇴사 거동에 치우쳐 연구가 진행되었으며, 퇴사위는 2순위적인 문제로 처우하였다. 퇴사량의 증가가 퇴사위의 증가로 이어지지만, 댐 저수지의 공간적인 면을 고려한다면 퇴사량 보다는 퇴사위가 실질적으로 댐의 생애주기 및 장기운명을 결정한다고 볼 수 있다.

이에 본 연구에서는 임하댐 수몰지 내의 저수지를 대상으로 대표적인 퇴사위 결정 방법인 RMA-2 & SED-2D 모형에 의한 방법, 수평퇴사법, 경험적면적감소법, 면적증분법에 대하여 산정한 뒤, 이를 비교하고 2007년 기준 실측 퇴사위에 가장 근사한 방법을 도출하였다. 또한, 각 방법들에 대한 현재 및 미래 퇴사위 예측을 통해, 퇴사량의 경향 및 추이에 대하여 고찰하였다.

2. 댐 저수지의 퇴사위 결정 방법

2.1 RMA-2 & SED-2D 모형

2.1.1 RMA-2 모형

RMA-2 모형은 2차원 동수역학적 모형으로 계산시 수심평균 보간기법을 적용한 유한요소 수치모형으로서 2차원 흐름 영역에서 자유표면, 상류흐름의 수평방향 유속성분과 수위를 계산하며, Navire-Stokes 방정식에 난류의 흐름을 고려한 Reynolds 방정식으로 유한요소의 해를 계산한다. 마찰력은 Manning 방정식의 조도계수나 Chezy 방정식의 평균유속계수로 계산되고, 와점성계수는 난류의 특성을 정하는데 사용되며, 정상류 뿐 아니라 부정류에서도 모의가 가능하다. RMA-2 모형의 지배방정식은 수심 적분한 유체의 연속방정식과 2차원 운동량 방정식을 이용하며, 지배방정식은 다음과 같다(US. Army Corps of Engineers, 2005).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{gun^2}{(1.486h^{1/6})^2} (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \cos\Psi - 2hvw \sin\phi = 0 \quad (2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{gvn^2}{(1.486h^{1/6})^2} (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \sin\Psi + 2hwu \sin\phi = 0 \quad (3)$$

여기서, h 는 수심, u, v 는 직교좌표계에서의 유속, x, y, t 는 직교좌표와 시간, ρ 는 밀도, E_x 는 x 방향의 와점성계수, E_y 는 y 방향의 와점성계수, g 는 중력가속도, a 는 바닥면의 높이, n 는 Manning의 조도계수, ζ 는 바람에 의한 전단응력계수, V_a 는 풍속, Ψ 는 풍향. w 는 지구의 자전각속도, ϕ 는 위도에 해당된다.

2.1.2 SED-2D 모형

저수지 내에서의 퇴사위 산정은 상용적으로 사용되고 있는 SED-2D 모형이 있다. SED-2D 모형은 2차원 정상류 및 동수역학적인 유사이송과 하상변동을 모의할 수 있는 모형으로서 이송-확산방정식을 이용하여 하상변동을 모의한다. SED-2D는 GFGEN과 RMA-2를 실행한 후에 그 결과를 이용하여 하상변동을 모의한다. GFGEN 입력자료는 지형자료이며, RMA-2 입력자료는 상류경계유량조건 및 하류경계 수위 조건, 난류확산계수와 조도계수값 등이다. SED-2D 입력자료는 기본적으로 부유사농도, 하상재료에 대한 자료들로 구성되어 있다. SED-2D 모형의 기본방정식인 이송 확산 방정식은 Eq. (4)와 같다.

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

여기서, t 는 시간, C 는 농도, u, ν 는 각각 x, y 방향의 수심 평균유속, x 는 주 흐름방향, y 는 x 방향과 직각인 방향, D_x 는 x 방향의 유효확산계수, D_y 는 y 방향의 유효확산계수, α_1 은 하상제원(bed source)에 대한 상수 그리고 α_2 는 하상제원의 평형농도이다.

하상제원의 형태는 $S = a_1 C + a_2$ 으로 모래 이송의 경우 하상으로부터의 유사의 공급은 흐름의 잠재 이송능력과 하상에서의 유사물질의 존재여부에 의해 제어되며, 하상 제원에 관한 식은 다음 Eq. (5)와 같다.

$$S = \frac{C_{eq} - C}{t_c} \quad (5)$$

여기서, S 는 하상제원, C_{eq} 는 평형농도(잠재이송), C 는 유사 농도, t_c 는 이송에 영향을 미치는 특성시간이다. SED-2D에서 하상변동 모의시 사용하는 유사량 공식은 Ackers-White (1973) 공식으로 다음 Eq. (6)와 같다.

$$q_s = C \frac{gd_s}{d} \left(\frac{V}{u_*} \right)^n \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^n \quad (6)$$

여기서, q_s 는 총유사량이며, C 는 D_* 의 크기에 따른 상수 (≈ 0.25), V 는 평균유속, d 는 평균수심, F_{gr} 는 입자 이동성수(전단응력과 입자의 수중무게의 함수), d_s 는 유사입경, A 는 F_{gr} 의 한계치 크기, u_* 는 하상 전단속도이고 n 은 D_* 의 크기에 따른 상수이다(Cho *et al.*, 2013).

2.2 수평퇴사법

수평퇴사법은 우리나라에만 존재하는 방법으로 퇴사가 댐 축 하상으로부터 차곡차곡 쌓인다고 보는 방법이며 현실적으로는 불가능한 가정에 해당된다. 하지만 소규모댐의 안전성 확보차원에서 이 방법을 채택하기도 한다(Jeong *et al.*, 2007). 또한, 퇴사위를 포함하는 사수위 같은 경우 우리나라의 보수적인 설계 기준에 의거하여 안전성을 확보하기 위해 수평퇴사법을 결정하는 편이다.

2.3 경험적면적감소법

경험적 면적감소법의 기본식은 Moody의 유사분포 방정식이며 그 식은 다음과 같다.

$$S = \int_o^{y_0} A dy + \int_{y_0}^H K a dy \quad (7)$$

여기서, S 는 저수지내의 일정기간후의 총퇴사량, o 는 댐 지점의 원지반고(하상고), y_0 는 일정기간 후 댐지점의 퇴사위, A 는 저수지 수면적(높이 y 의 함수), d_y 는 높이의 증분, H 는 저수지의 총수심(원하상 - N.H.W.L), K 는 퇴사의 비면적과 실면적의 비례상수, a 는 실사퇴사면적을 비례상수 K 로 나눈 비면적에 해당된다.

위의 기본방정식은 Eq. (8)와 Eq. (9)로 일반화할 수 있다. Eq. (8)으로 표시되는 저수지 곡선 중에서 특정 저수지의 중

Table 1. Reservoir characteristic factors

Type	Non-dimension constant of sediment distribution			Remarks
	C	M	N	
I	5.047	1.85	0.36	Lake Type
II	2.487	0.57	0.41	Foot-Hill Type
III	16.967	1.15	2.30	Hill Type
IV	1.486	-0.25	1.34	Gorge Type

Table 2. Reservoir classification by characteristics of reservoir topography

Type	s	Remarks
I	3.5 - 4.5	$s = \frac{\log(Capacity)}{\log(Depth)}$
II	2.5 - 3.5	
III	1.5 - 2.5	
IV	1.0 - 1.5	

류와 같은 설계곡선을 선택하여 이 위에 Eq. (9)를 투사하면 그 교차점이 임계심비 P_0 가 되며 이로부터 임계심(Critical Depth) y_0 를 계산한다. 앞에서 정의한 바와 같이 임계심이라는 함은 일정기간후 댐지점에서의 퇴사깊이를 의미하며 이에 따라 New Zero Elevation이 구해진다.

$$h(p) = \frac{1 - V(p)}{a(p)} \tag{8}$$

$$h(p) = \frac{S - V(y)}{HA(y)} = \frac{S - V(PH)}{HA(PH)} \tag{9}$$

저수지의 종단방향에 따른 퇴사의 체적과 이것을 면적으로 변화시킨 설계곡선은 Eq. (10)로 정의된다.

$$a(P) = CP^M(1 - P)^N \tag{10}$$

여기서, C, M, N은 무차원으로 저수지의 종류에 따라 일정하다. 4개의 저수지군에 대하여 USBR에서 제시한 저수지 특성 계수값(Table 1)과 VAN'T HULL의 지형특성에 의한 저수지 분류(Table 2)로 나눌 수 있다(Korea Water Resources Corporation, 2006).

2.4 면적증분법

면적증분법은 저수지내의 퇴사는 저수지의 각 표고에서 저수면적을 일정량만큼 감소시킴으로써 계산될 수 있다는 가

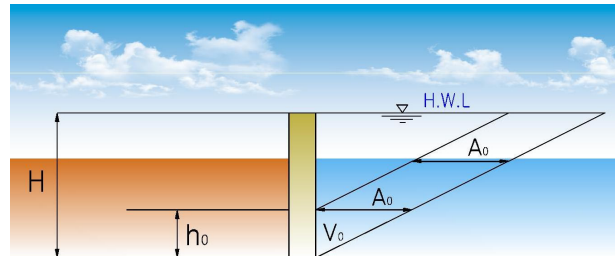


Fig. 1. Determination of sediment level by area increment method

정에 근거를 두고 있는 방법이다(Fig. 1). 댐 지점의 퇴사심(h_0)을 가정하여 총퇴사량과 일치되는 퇴사심을 다음과 같은 식을 이용하여 시행착오법으로 결정한다.

$$V_s = A_0(H - h_0) + V_0 \tag{11}$$

여기서 V_s 는 총퇴사량(m^3), h_0 는 댐 지점의 퇴사심(m), A_0 는 h_0 표고에 대한 퇴사의 수평단면적(m^2), H 는 만수위의 수심, V_0 는 h_0 이하의 퇴사량이다.

3. 퇴사위 결정 방법별 분석 및 비교

3.1 대상댐의 선정

본 연구는 임하댐 유역의 수몰지내의 저수지를 대상으로 하였다. 임하댐은 국내에서 9번째로 준공된 대표적인 다목적 댐으로 경북 안동시 사의동 협곡으로 낙동강 하구로부터 약 347 km에서 합류하는 낙동강 제1지류인 반변천 상류 약 18 km 지점에 위치한다. 유역면적은 1,361 km^2 으로 낙동강 유역의 약 5.8%에 해당되며 총 저수용량 595.0백만 m^3 , 유효저수용량 424.0백만 m^3 , 계획홍수위 164.7 m, 상시만수위 163.0 m, 저수위 137.0m, 비활용용량 84.0백만 m^3 , 사수용량 40.0 m^3 으로 구성되어 있다. 임하댐의 2007년 기준 실측 퇴사위는 110.00 EL.m이며(Korea Water Resources Corporation, 2008), 현재(2017년)는 실측된 자료가 존재하지 않는다. Table 3과 Fig. 2는 각각 임하댐의 주요제원과 위치도를 나타낸다.

3.2 퇴사위 결정 방법별 분석

퇴사위 결정 방법별 분석을 위해 RMA-2 & SED-2D 모형, 수평퇴사법, 경험적면적감소법, 면적증분법을 이용하여 퇴사위를 산정하였다. 저수지의 퇴사위는 2007년 기준 110.00 EL.m에 해당되기 때문에 실측값이 존재하는 2007년을 기준으로 하였으며, 자료의 수집기간은 1995~2007년으로 설정하였다.

Table 3. Data of Imha dam

Classification		Facility status
Basin & Reservoir	River & River system	Nakdong river tributary Banbyeoncheon
	Dam location	Left: Imha-myeon, Andong-si, Gyeongsangbuk-do Right: Imdong-myeon, Andong-si, Gyeongsangbuk-do
	Basin area (km ²)	1,361.0
	Total storage capacity (million m ³)	595.0
	Effective storage capacity (million m ³)	424.0
	FWL (EL.m)	164.7
	NHWL (EL.m)	163.0
	LWL (EL.m)	137.0
	Inactive storage (million m ³)	84.0
Dead storage (million m ³)	40.0	
Dam	Dam type	Multipurpose dam
	Structure type	E.C.R.D
	Scale (m)	Height 73.0, Width 515.0
	Crest level (EL.m)	168.0
	Volume (thousand m ³)	3,423.0
Spillway	Type	Radial B12 m × H13.8 m × 4 gate
	Overflow level (EL.m)	151.4
	Design flood (m ³ /s)	4,600
	Design outflow (m ³ /s)	2,500
Generator information	Generator type	Vertical Francis
	Generator facility capacity (kw)	50,000
	Rating head (m)	48.4
	Rating plant discharge (m ³ /s)	61.0
	Design outflow (m ³ /s)	2,500.0
	Maximum outflow (m ³ /s)	5,300.0

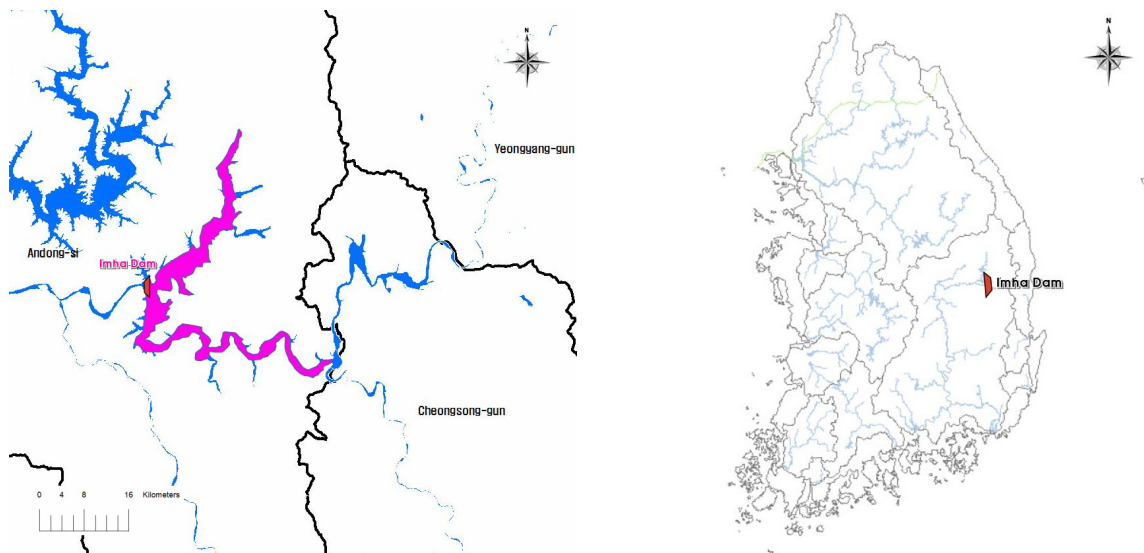


Fig. 2. Location map of Imha dam

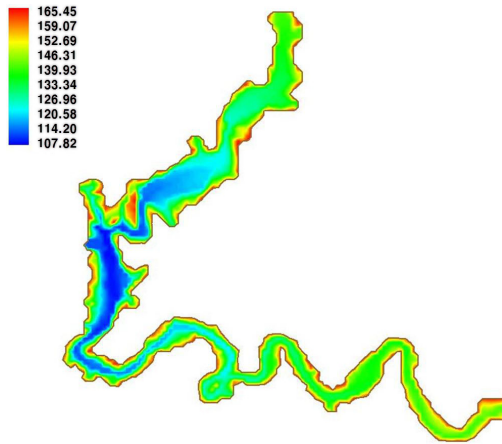


Fig. 3. Simulated sediment level in Imha dam reservoir by RMA-2 & SED-2D model (2007)

1995년과 2007년은 임하댐 퇴사량 조사에 대한 과업이 각각 1, 2차가 수립된 시점이다. 이는 퇴사량 2차 조사에서 제시한 분석 기간과 동일하며 과거의 자료를 토대로 퇴사위 결정 방법 별과 실측 퇴사위를 비교·검토할 것이다. RMA-2 & SED-2D 모형의 구축을 위해 기존의 측량자료를 바탕으로 자료를 구성 하였으며, 저수지 유입량은 1995~2007년까지 관측된 저수지 일 유출량 자료를 이용하였다. 유사농도는 동일한 기간동안 관측된 저수지 일 유출량 자료를 바탕으로 임하댐 인근 월 포지점의 유량-유사량 관계식을 이용하였다(Fig. 3).

또한, 모형이 아닌 댐 퇴사위 결정 방법으로 수평퇴사법, 경험적면적감소법, 면적증분법을 이용하여 퇴사위를 산정하였으며, RMA-2 & SED-2D 모형에서 사용한 동일한 자료를 이용하였다. 각 산정 방법은 앞서 제시한 공식 및 절차에 의거하여 산정하였으며, 수평퇴사법은 댐의 공간적인 면을 고려하지 않고 하상으로부터 쌓인다고 가정하기 때문에, 비교적 쉽게 산정할 수 있다. 경험적면적감소법 같은 경우 앞서 제시한 저수지 지형 특성에 의한 저수지 분류 s값은 3.39로 임하댐의 저수지는 II 군에 속한다. s값은 Fig. 4와 같이 산정될 수 있으며, 저수지 형태지수 및 퇴사분포 무차원 상수는 Table 4와 같이 나타낼 수 있다.

3.3 퇴사위 산정 방법별 결과 및 실측값과의 비교

본 연구에서는 모형 및 퇴사위 결정 방법에 의한 퇴사위 산정 결과를 실측값과 비교하였다. 다만, 댐 저수지 누가거리별 퇴사위 산정과의 비교시 퇴사위 결정 방법간의 비교가 다소 어려울 수가 있어서 모든 산정 결과는 댐 직상류 중심부의 퇴사위만을 고려하였다. 비교 결과, RMA-2 & SED-2D 모형이 110.58 El.m, 수평퇴사법이 113.70 El.m, 경험적면적감소법이 110.25 El.m, 면적증분법이 111.95 El.m으로 경험적면적감소법이 실측값과 가장 근사하게 산정되었다. 그 다음 RMA-2 및 SED-2D 모형, 면적증분법, 수평퇴사법 순으로 이어졌다 (Table 5, Fig. 5). 특히, 수평퇴사법은 실측값과 3.7 m의 차이

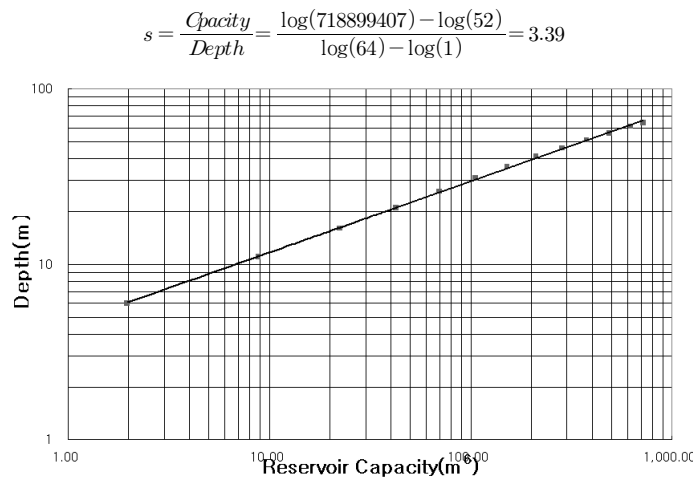


Fig. 4. Reservoir group classification of Imha dam (empirical area reduction method)

Table 4. Reservoir topography & characteristics factor - Imha dam (empirical area reduction method)

Type	Reservoir topography	Non-dimensional constant of sediment distribution			Remark
	s	C	M	N	
II	3.39	2.487	0.57	0.41	Foot-Hill Type

Table 5. Comparison of the estimated and observed sediment levels

Methods for sediment level	Sediment level (El.m) - 2007	Remarks
Observed	110.00	Upstream of dam
RMA-2 & SED-2D model	110.58	
Horizontally accumulated method	113.70	
Empirical area reduction method	110.25	
Area increment method	111.95	

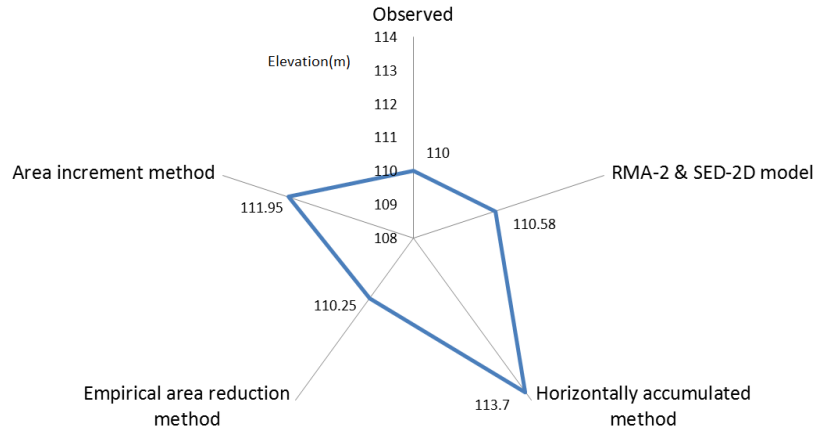


Fig. 5. Comparison of the estimated and observed sediment levels

를 보임으로써 과도하게 산정되었으며, 이는 댐의 공간을 고려하지 않고 선형적인 면만을 고려하는 수평퇴사법의 한계인 것으로 판단된다. 과도한 퇴사위의 산정은 안전성을 넘어서 댐의 계획시에 불필요한 재정 낭비를 초래할 수 있다. 우리나라를 제외한 국외에서는 수평퇴사법이라는 방법이 존재하지 않으며, 미국과 일본 등 여러 선진 국가에서는 경험적면적감소법을 주로 채택하여 사용한 것을 감안하면 본 연구에서 제시한 경험적면적감소법은 결과로서 그 효용성을 증명한다고 판단된다. 또한, 면적증분법에서의 유사는 일반적으로 모든 표고에서 동일량만큼의 저수면적을 감소시키지 않으므로 가정에 문제점을 지니고 있으며, 100년 퇴사량이 저수용량의 15%가 넘는 경우에는 적용 곤란한 방법이다. 이에, 임하댐의 산정 방법별 결과에 따른 최적의 퇴사위 결정 방법은 경험적 면적감소법을 위주로 퇴사위를 결정하되, RMA-2 & SED-2D 모형을 차선책으로 비교하며 결정해야 할 것으로 사료된다.

4. 산정 방법에 따른 현재 및 미래 퇴사위 예측

앞서 분석한 방법과 동일하게 산정 방법별로 퇴사위를 예측하였으며, 퇴사 예측 분석은 현재(2017년) 및 현재 기준으로

50년 후(2067년), 100년 후(2117년)의 기간으로 설정하였다. 임하댐의 현재 실측 퇴사위는 존재하지 않기 때문에 사실상 산정 방법에 따른 결과와 비교할 수는 없지만, RAM-2의 SED-2D 모형을 비롯한 퇴사위 산정 방법들은 과거 자료를 바탕으로 현재 및 미래의 퇴사위를 예측할 수 있다.

현재 퇴사위(2017년) 분석을 위해 2008~2017년 저수지 유입량 및 유사 농도 자료를 이용하였으며, 추가적으로 50년을 포함한 100년까지 확장하여 미래 퇴사위를 예측하였다. 분석 결과, 2017년 현재 기준으로 RMA-2 & SED-2D 모형, 수평퇴사법, 경험적면적감소법, 면적증분법의 퇴사위는 각각 111.21 m, 114.78 m, 110.79 m, 112.36 m로 산정되었다. 또한, 50년, 100년 후의 퇴사위는 대체적으로 과거의 증가량에 대비하여 증가하였고, 미래년수가 증가할수록 대체적으로 과거 실측 값과의 비교 결과의 경향대로 이어졌으며 우선순위의 역전 현상은 이루어지지 않았다(Table 6, Figs. 6 and 7).

수평퇴사법의 50년 및 100년 후 퇴사위는 각각 118.53 m, 126.48 m로 여전히 과도하게 산정되었으며, 미래년수가 증가할수록 다른 산정방법에 비해 퇴사위의 증가폭이 커지는걸 알 수 있었다. 다만, 수평퇴사법은 과거 실측값과 다소 차이가 있는 결과를 보여주었기 때문에 미래 퇴사위 결과에 대해서도 신빙성을 확보하지 못하였을 것으로 예상된다.

Table 6. Comparison of present and future sediment levels estimated by each method

Method for sediment level estimation	Sediment level (El.m)			Remarks
	Present(2017)	After 50 years (2067)	After 100 years (2117)	
RMA-2 & SED-2D model	111.21	112.43	114.22	Upstream of dam
Horizontally accumulated method	114.78	118.53	126.48	
Empirical area reduction method	110.79	111.93	113.50	
Area increment method	112.38	114.35	117.58	

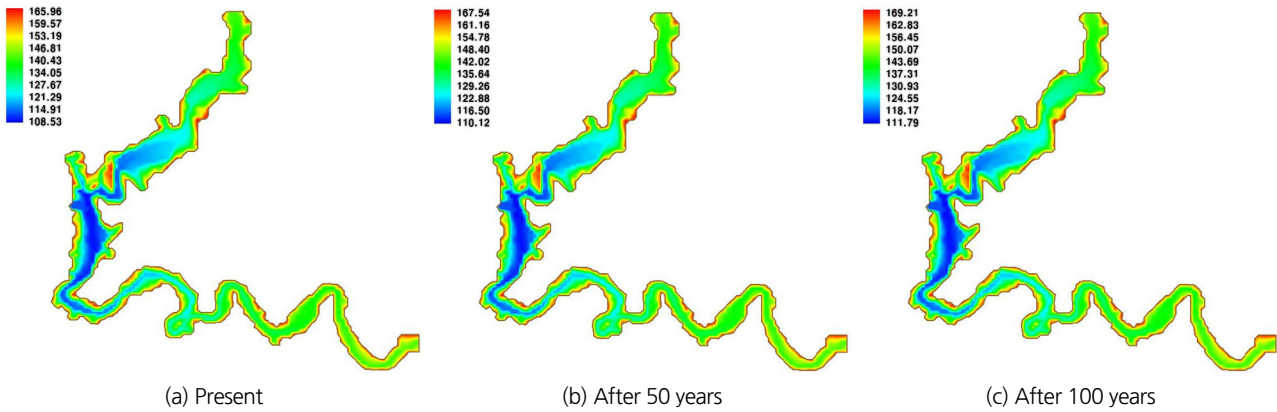


Fig. 6. Simulated sediment levels in Imha dam reservoir by RMS-2 & SED-2D model

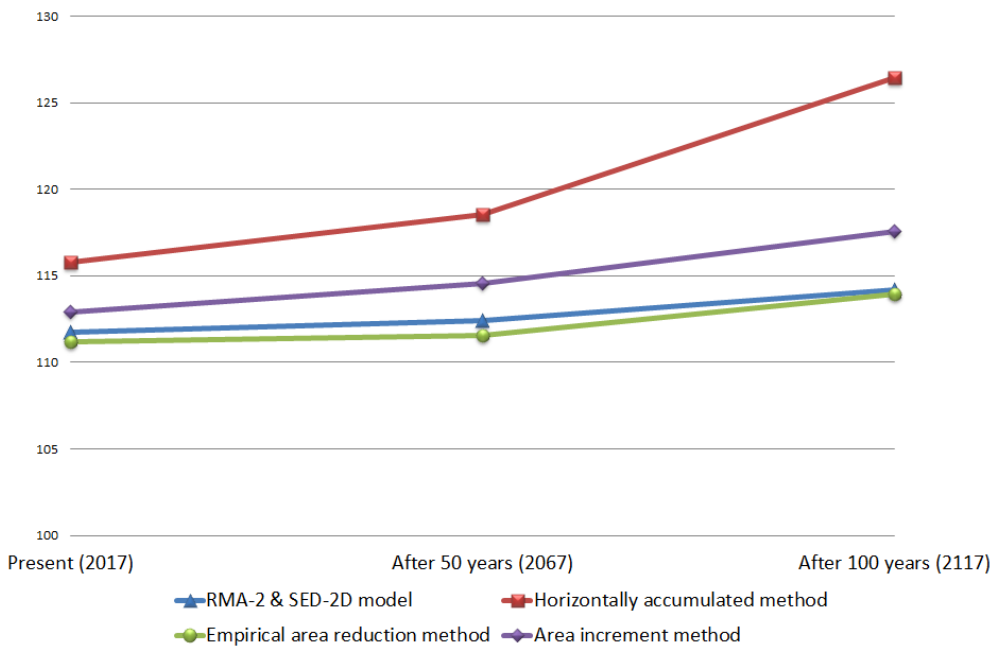


Fig. 7. Trend for the estimated sediment levels by each method

임하댐 저수위(사수위)의 표고가 137.0 EL.m 임을 감안하면 본 연구에서 제시한 결과는 모든 방법이 미래 100년 후에도 안전하다고 볼 수는 있다. 하지만 실측값과 예측값이 심각하

게 상이할 수 있는 문제점이 도래할 수 있기 때문에 댐 저수지의 퇴사위는 정확하게 산정 및 예측되어 댐의 생애주기를 재평가해야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 임하댐 저수지를 대상으로 RMA-2 & SED-2D 모형과 대표적인 퇴사위 분포 추정 방법인 수평퇴사법, 경험적면적감소법, 면적증분법에 대하여 퇴사위를 산정한 뒤, 이를 실측 퇴사위와 비교하였다. 또한, 각 방법들에 대한 현재 및 미래 퇴사위 예측을 통해, 퇴사량의 경향 및 추이를 제시하였으며, 모든 분석은 정확한 비교를 위해 댐 직상류부의 퇴사위만을 고려하였다. 그 결과를 요약 및 고찰하면 다음과 같다.

- 1) 2007년 퇴사위 산정 결과를 실측값(110.0 El.m, 2007년 기준)과 비교한 결과, 경험적면적감소법이 110.25 El.m로 가장 근사하게 산정되었으며, 그다음 RMA-2 & SED-2D 모형, 면적증분법, 수평퇴사법 순으로 이어졌다. 특히, 수평퇴사법은 실측값과 3.7m의 차이를 보임으로써 과도하게 산정되었으며, 이는 안전성을 넘어 댐 계획시에 불필요한 재정적 낭비를 초래할 수 있을 것으로 판단된다. 실측값을 비교하여 내린 최적 퇴사위 결정 방법은 경험적면적감소법을 위주로 퇴사위를 결정하되, RMA-2의 SED-2D 모형을 차선책으로 비교하여 결정해야 할 것으로 사료된다.
- 2) 현재(2017년) 및 미래(50년 후, 100년 후)의 퇴사위 예측 결과, 전반적으로 과거의 증가량에 대비하여 증가하였으며 과거 퇴사위 실측값과의 결과와 비교시 우선순위의 역전 현상은 이루어지지 않았다. 다만, 수평퇴사법은 여전히 과도하게 산정되었으며, 미래 년수가 증가할수록 다른 산정방법에 비해 퇴사위의 증가폭이 커지는 걸 알 수 있었다. 임하댐의 고려된 산정방법별 100년 후의 퇴사위의 예측을 통한 결과는 모두 안전하다고 볼 수 있지만, 예측값이 심각하게 상이할 수 있는 문제점이 도래될 수 있다고 판단된다.

그 동안, 우리나라의 댐 저수지의 퇴사위 산정 방법은 안전한 설계를 위한다는 이유로 대부분 수평퇴사법을 고려하여 적용하고 있다. 퇴사위가 필요 이상으로 과도하게 산정된다는 것은 재정적으로 큰 부담이 될 수 있으며, 또한 그만큼의 사수위가 증대되는 결과를 초래한다. 이는 장기적으로 저수용량을 비롯한 댐의 비활용용량이 축소된다는 것을 의미하며, 댐의 생애주기가 잘못 산정되는 결과로 이어질 것이다. 댐 저수지의 퇴사위 산정시 무조건적인 수평퇴사법의 채택은 지양해야 할 것으로 사료되며, 본 연구에서 제시한 퇴사위 산정 결과를 댐 계획 및 운영시 참고해야 할 것으로 판단된다. 또한, 댐 설계 기준 개정시 이러한 사항을 수정 및 보완해야 할 것이다. 하지만, 본 연구는 임하댐 1개소 및 기존의 퇴사위 산정 방

법들에 국한하여 제시한 결과이며, 향후에는 댐 저수지의 퇴사위를 비롯한 퇴사 현상을 보다 더 정확하게 산정할 수 있는 추가적인 방안 및 개선안이 계속해서 모색되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2017 R1A2B3005695)

References

- Ahn, S. J., and Lee, J. H. (1984). "A correlation of reservoir sedimentation and watershed factors." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 17, No. 2, pp. 107-112.
- Amini, M. M., Banihashemi, M. E., Behrangi, F., and Pourjarian, M. E. (2010). "Correcting the real data and making them ready to use in numerical models and experimental methods of sediments' settlement in dams' reservoirs, case study: Kardeh dam." *The 2th International Conference of Dam Building*, Tehran, Iran.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Ramanarayanan, T. S., and Di Luzio, M. (1999). "Water resources of the Texas gulf basin", *Water Science and Technology*, Vol. 39, No. 3, pp. 121-133.
- Cho, H. J., and Kang, H. S. (2013). "Effects of control of dam sedimentation by a hydraulic structure in a reservoir." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 12, pp. 1157-1167.
- Jeong, J. H., and Yoon, Y. N. (2007). *Water resource design practice*. Goomibook.
- Kim, K. C., Kim, J. H., Chong, K. Y., and Kim, H. S. (1984). "Prediction of sediment distribution in reservoir using 2-D numerical model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 8, pp. 729-742.
- Korea Water Resources Corporation (2006). *Servey of Soyang multipurpose dam sedimentation (Third edition)*.
- Korea Water Resources Corporation (2008). *Servey of Imha multipurpose dam sedimentation (Second edition)*.
- Kwan, O. H. (1976). "Forecasting distribution of sediment deposits in Soyang lake." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 6, No. 1, pp. 76-86.
- Lee, D. K., and Ahn, J. H. (2012). "Long-term prediction of the sediment distribution of Chungju dam using empirical area reduction method." *Korea Water Resources Association Conference*, pp. 536.
- Pereira, J. F., McCorquodale, J. A., Meselhe, E. A., Georgiou, I. Y., and Allison, M. A. (2009). "Numerical simulation of bed

- material transport in the Lower Mississippi River.” *Journal of Coastal Research*, Special Issue 56, pp. 1449-1453.
- 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.
- Seong, C. H., Lee, B. H., Seo, Y. K., Oh, K. C., and Kim, J. R. (1984). “Prediction of sediment distribution in Soyang lake using two-dimensional model.” *Korea Water Resources Association Conference*, pp. 1551-1555.
- Shinde, T., Nimbalkar, P. T., and Gidde, M. R. (2016). “Comparison of area reduction method and area increment method for reservoir sediment distribution - Case study Ujjani dam.” *Journal of Research in Advanced Engineering and Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 108-111.
- U.S. Army Corps of Engineers (2005). *Users Guide to RMA2 WES Version 4.5*. Wextech System.
- Versraeten, G., Poesen, J., Vente, J., and Koninckx, X. (2003). “Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semi-qualitative analysis using reservoir sedimentation rates.” *Geomorphology*, Vol. 50, pp. 327-348.