

부유사 및 하상토 입도분포를 고려한 저수지 퇴사의 장기모의 Long-Term Simulation of Reservoir Sedimentation Considering Particle- Size Distributions of Suspended Sediment and Bed Materials

김 대 근* / 신 광 균**

Kim, Dae Geun / Shin, Kwang Gyun

Abstract

The bed change model of HEC-RAS was used to predict the formation of a delta upon an influx of high-density sediment while taking the particle-size distributions of the suspended sediment and bed materials into account. The model was able to reasonably predict both the spatial-temporal distribution of the delta and the amount of deposited sediment according to the grain size. In addition, it was able to estimate the main type of grains that sediment at particular locations at particular times moderately well. It is expected that the simulation and the analysis considering these particle-size distributions of sediment will provide important information on planning and maintenance of the water resource related facilities.

Keywords : HEC-RAS, bed change model, sediment, delta, particle-size distribution, amount of deposited sediment

요 지

본 연구에서는 HEC-RAS의 하상변동모형을 이용하여 고농도의 유사가 중소규모의 저수지에 유입하여 삼각주를 형성하는 과정을 유사의 입도분포를 고려하여 해석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 먼저, 삼각주의 시공간적인 분포와 연간 저수지에 퇴적되는 입도별 퇴사량을 합리적으로 예측할 수 있었다. 또한 저수지의 특정위치에서 특정시기에 어떤 입도의 유사가 주로 퇴적되는지를 합리적으로 예측할 수 있었다. 이러한 유사의 입도분포를 고려한 모의와 분석은 수자원관련 시설물의 계획 및 유지관리에 필요한 유용한 정보를 제공해 줄 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : HEC-RAS, 하상변동모형, 유사, 삼각주, 입도분포, 퇴사량

1. 서 론

댐을 설치하여 저수지가 조성되면 통수단면적 증가에 따른 유속의 감소와 난류의 약화로 인해 상류에서 이동한 유사는 저수지에 퇴적된다. 이러한 저수지에서의 퇴사는 이수, 치수, 환경의 측면에서 다양한 영향을 미치게 되나,

특히 댐의 유효저수용량을 감소시킴에 따라 댐의 유입량 조절효과가 감소되어 용수공급, 수력발전 등에 지장을 초래할 수 있다. 저수지에 유입된 유사는 통수단면적 증가에 따른 유속감소로 인해 Fig. 1과 같이 퇴적되어 삼각주를 형성한다. 저수지의 초입부에는 조립유사(coarse sediment)가 주로 퇴적되며, 하류로 갈수록 세립유사(fine sediment)가

* 교신저자, 목포대학교 공과대학 토목공학과 부교수(e-mail: kdg05@mokpo.ac.kr, Tel: 061-450-2476)

Corresponding Author, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Mokpo Univ., Jeonnam 534-729, Korea

** ㈜삼안 수력사업본부 과장(e-mail: kevinshin23@daum.net)

Section Chief, Hydropower Business Division, SAMAN Corp., Seoul 143-200, Korea

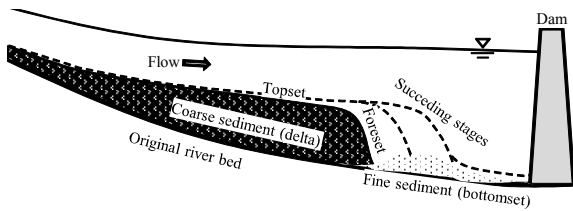


Fig. 1. Profile of Typical Reservoir Delta (adapted from Hotchkiss and Parker, 1991)

퇴적된다. 삼각주의 전면(foreset) 경사는 급하여 토사의 수중안식각(submerged angle of repose)과 비슷한 경사를 이루며, 퇴사에 의해 새로이 형성되는 삼각주 등면(topset)의 경사는 원지반의 경사에 비해 완만한 것으로 알려져 있다(Hotchkiss and Parker, 1991). 삼각주 전면부의 하류에는 세립유사로 구성된 퇴사층(bottomset)이 형성된다. 이러한 삼각주는 시간이 흐르며 퇴사가 진행됨에 따라 점차 하류방향으로 확장된다.

저수지 퇴사 현상이 심각한 지역에서의 수자원계획은 장래 예상되는 퇴사량을 미리 검토하여 배사(flushing)와 관련된 적절한 대책을 수립하는 것이 필요하다. 저수지에서의 퇴사문제는 중소규모의 저수지에 고농도의 유사를 함유하는 유량이 유입하는 경우 즉 저수지의 용량에 비해 저수지의 상류에서 공급되는 연간 유사량이 상대적으로 과도한 경우에 특히 문제가 된다. 국내의 경우 중대형 댐의 연평균퇴사율은 0.03~0.2% 소형 농업용댐의 연평균퇴사율은 1~3%로 알려져 있어 저수지 퇴사는 비교적 큰 문제로 대두되지 않고 있다(Bae, 2011). 하지만 건설분야의 해외진출이 일반화된 현 시점에서 해외 특정지역에서는 저수지 퇴사가 수자원관련 시설물의 계획 및 설계에서 가장 중요한 문제로 대두되기도 한다. 예를 들어 Lee et al. (1997), Lee and Lee (1998)에 의하면 중국 북서쪽의 황하유역은 평균 유사함유량이 37.6 kg/m^3 에 이르며, STAR Hydropower (2007)에 의하면 파키스탄의 Kunhar River에 설치예정인 파트린드댐 유역은 유사함유량이 최대 12 kg/m^3 에 이르며 평균적으로 약 3 kg/m^3 에 이르는 것으로 보고되어 있다. 파트린드댐의 경우 댐의 설치로 형성되는 저수지의 저류용량은 $6.42 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이나, 댐에 유입하는 부유사의 연간 부하량은 평균 약 $4.72 \times 10^6 \text{ ton}$ 에 이르는 것으로 알려져 있다. 이들 지역에서는 심한 경우 댐이 완성되기도 전에 집중호우로 발생한 유사에 의해 저수지의 유효저수용량이 완전히 매몰되는 경우도 있으며(Lee et al., 1997), 배사대책이 없으면 수년 안에 저수지 유효저수용량이 매몰되기도 한다. 이러한 지역에서 적절한 수자원 계획 및 관리방안을 수립하기 위해서는 저수지 퇴사로 인해 형성되는 삼각주

(delta)의 시공간적인 형태 및 삼각주를 구성하는 토사의 입도분포를 합리적으로 예측하는 것이 필요하다. 또한 수력 발전 등을 위해 설치하는 취수구 인근에서는 침사지에 유입되는 유사의 입경 파악 및 침사지 운영에 중요한 정보로 구조물 인근의 장단기적인 퇴적양상 뿐 아니라, 어떤 입자가 어느 시기에 주로 퇴적되는지를 파악하는 것이 중요하다.

하천 및 저수지에서의 장기하상변동 예측을 위해 HEC-6모형이 광범위하게 이용되고 있다. Woo and Yu (1991)가 HEC-6모형을 이용하여 국내하천의 장기하상변동을 모의하여 그 적용성을 검토한 이래, HEC-6모형은 장기하상변동을 모의하기 위해 최근까지 여러 국내의 연구자들에 의해 성공적으로 적용되고 있다(Lee, 1997; Rim et al., 1999; Ahn et al., 2002; Ahn et al., 2010; Havis et al., 1996; Tingsanchali and Supharatid, 1996; Bhowmik et al., 2004; Pereira et al., 2009). Ahn et al. (2010)은 HEC-6모형을 이용한 장기하상변동 모의에 적합한 총유사량 공식을 평가하여, Laursen (modified by Copeland and Thomas, 1989) 공식이 가장 적합함을 보였으며, Ahn et al. (2012)은 GSTARS 모형을 이용하여 형산강의 장기하상변동을 모의하는데, 총유사량 산정공식으로 Laursen (1958) 공식이 가장 적합함을 제시하기도 하였다. Havis et al. (1996)은 급경사의 자갈하상 하천에서 하상장갑화를 포함한 유사거동을 해석하기 위하여 HEC-6모형을 이용하였다. 이들은 실험실수로, 인공수로(운하), 자연하천에서 각기 HEC-6모형을 적용하였으며 측정결과와 비교하여 만족할 만한 모의결과를 얻을 수 있었으며, 결론적으로 모래하상 뿐 아니라 자갈하상에 대해서도 HEC-6모형을 적용할 수 있음을 보였다. Tingsanchali and Supharatid (1996)는 등류 및 부등류 조건에서 이동상실험을 실시하고 여기서 얻은 자료를 이용하여 HEC-6모형의 적용성을 확인하였다. 그리고 유사량 공식, 조도계수, 유사의 입경, 계산격자 등이 모의결과에 미치는 민감도를 평가하였다. Bhowmik et al. (2004)은 미국 일리노이주의 Kankakee River를 대상으로 HEC-6모형을 적용한 바 있으며, Pereira et al. (2009)은 미국 Mississippi River 하류에 HEC-RAS (버전 4.0)의 하상변동모형을 적용하였으며 최적의 유사량공식으로 Engelund & Hansen 공식을 제안하였다. 이상의 연구는 HEC-6 또는 HEC-RAS 하상변동모형을 하천에 적용하여 하천 중단고의 장기변동 양상에 주안점을 둔 연구이다. 저수지에서의 퇴사 및 삼각주 형성과 관련된 연구로 Ji et al. (2009)은 HEC-6모형을 이용하여 한탄강홍수조절댐 건설로 인한 댐 상류의 퇴사현상을 모의한 바 있다. 이들은 총유사량 산정공식으로 Ackers & White (1973)공식을 이용하였으며, 댐 건설로 인한 하

상변동의 영향은 크지 않은 것으로 평가하였다. Ji et al. (2011)은 낙동강하구둑을 대상으로 자체 개발한 준정류(quasi-steady flow) 모형을 적용하여 낙동강 하류부의 배사효과를 모의하였으며, 적절한 배사는 기계적인 준설의 대안이 될 수 있음을 보였다. Choi and Choi (2011, 2012)는 저수지에서 퇴사 및 배사현상을 모의하기 위하여 흐름은 정상류, 하상은 시간에 따라 변하는 것으로 모의하는 준정류모형을 도입하여 선행 수리실험에 적용하여 그 적용성을 검증한 바 있다. Morris and Fan (2010)은 코스타리카의 Loiza Reservoir를 대상으로 HEC-6모형을 이용하여 1963년 하상을 초기조건으로 1990년의 하상을 예측하여 저수지 삼각주의 퇴적양상 및 입경별 퇴사량(전체 저수지 퇴사량 중 점토 실트 모래의 비율)을 실측치와 비교하여 모형의 적용성을 검증한 바 있다. 단 Loiza Reservoir의 경우 퇴사로 인해 연간 약 1.2%의 저수지 유효공간의 손실이 발생하는 경우(1953년부터 1994년까지 약 47%의 저수지 공간이 퇴사로 인해 손실됨)로 본 연구의 대상저수지에 비하면 연간 저수지 퇴사량이 그리 크다 할 수 없는 조건이다. 이상과 같이 HEC-6, GSTARS 또는 자체 개발한 준정류모형을 실내실험이나 현장의 하상변동 예측에 적용한 각종 연구사례가 있으나, 많은 연구가 하천이나 저수지 하상의 중단변화에 주안점을 둔 연구이며, 저수지의 저수용량에 비해 상류에서 공급되는 부유사의 양이 과도한 경우에 대해 저수지에 형성된 삼각주의 특정위치별 특정시기에 어떤 입경을 가진 유사가 주로 퇴적되는가에 대한 분석과 관련된 연구는 많지 않은 실정이다.

본 연구에서는 준정류모형인 HEC-RAS(버전 4.1)의 하상변동모형을 이용하여, 부유사 및 하상도 입도분포를 고려한 저수지 퇴사의 장기모의를 수행하였다. 본 연구에서는 특히 저수지의 저수용량에 비해 상류에서 공급되는 부유사의 양이 많은 경우에 대해 저수지에 삼각주가 형성되는 과정을 유사의 입도분포를 고려하여 해석하였으며, 저수지에 형성된 삼각주의 시공간적인 분포 및 삼각주의 각 위치별 퇴적된 유사의 입도를 분석하였다. 이를 위해 먼저 기존 수리실험(Soni et al., 1980)과 본 연구의 모의 결과를 비교함으로써 본 모형의 적용성을 검증하였다. 그리고 현재 설계와 시공이 진행 중에 있는 중소규모의 수력발전 전용댐인 파키스탄의 파트린드댐을 대상으로 저수지 퇴사현상을 모의하였다.

2. 적용 모형

본 연구에서는 미공병단에서 개발한 HEC-RAS에 탑

재된 하상변동모형을 이용하였다. 본 모형에서는 흐름모형(flow model)으로 1차원 정상부등류 모형을 사용하나, 수문곡선을 잘게 나누어 실행할 수 있기 때문에 준정류모형으로 분류할 수 있다. 하상변동모형으로는 잘 알려진 Exner 방정식을 이용하며, 흐름모형과 하상변동모형의 계산은 별도로 수행되는 비조합(uncoupled) 모형이다. HEC-RAS에서는 유량수문곡선의 각 유량별 지속시간(flow duration)과 하상변동을 모의하는 모의시간간격(computation increment)을 각기 다르게 설정할 수 있다. 하나의 일정한 유량에 대해 흐름을 계산한 다음, 그 유량의 지속시간동안에는 흐름이 일정한 상태에서 모의시간간격에 따라 하상이 변동되고 변동된 하상에 따라 각 흐름변수도 변동된다. 그리고 모의시간간격은 보다 작은 시간간격인 하상혼합시간간격(bed mixing time step)으로 세분되는데, 이는 하상을 구성하는 각 층별 구성물질의 배열을 재구성하는 시간간격이다. HEC-RAS의 하상변동모형은 하상을 3개의 층으로 구분하여 각 층별로 하상물질을 재배열하고 장갑화(armoring)현상을 고려할 수 있는 Exner 5 방법을 채택하고 있는데, 이는 HEC-6에서 기본적으로 사용하고 있는 방법이다. HEC-RAS에서 제공하는 유사량 산정공식은 Ackers & White, Engelund & Hansen, Laursen(modified by Copeland and Thomas, 1989, 이하 Laursen 공식으로 칭함), Meyer-Peter Muller, Toffaleti, Yang, Wilcock과 같은 7가지 공식을 제공하고 있다(Brunner, 2010). 현재 HEC-RAS의 하상변동모형에서는 SI단위계를 이용한 자료입력을 지원하고 있으나, 본 연구과정에서의 검토결과 영국단위계의 단위환산에 문제가 있는 것으로 확인되었다. 이에 본 연구에서는 영국단위계를 이용하여 자료를 입력 및 해석을 수행하고 해석결과는 다시 SI단위계로 환산하여 제시하였다.

3. 모형의 적용성 검증

HEC-RAS의 적용성을 검토하기 위하여 Soni et al. (1980)의 퇴사와 관련된 수리실험에 적용하였다. Soni et al. (1980)은 평형상태의 하상에 공급 유사량을 증가시켜 퇴사를 유도하고 그에 따른 하상변동을 측정하였다. 실험 수로는 길이가 30m, 폭이 0.2m, 높이가 0.5m이며, 주어진 유량과 수로경사에 대해 등류 흐름을 유도하고, 유사를 공급하며 하상이 더 이상 변하지 않는 평형상태를 유도한 다음에 공급 유사량을 증가시키는 방법으로 퇴사를 유도하였다. 이들이 사용한 유사의 중앙입경은 0.32mm, 비중은 2.65이며, 하상의 공극률은 0.4이다. 이들이 실험을 통해 유

도한 평형하상을 유지하기 위한 유사량 G_e 는 다음과 같다.

$$G_e = aU^b \quad (1)$$

위에서 U 는 평균유속(m/s), G_e 는 평형유사량($m^3/s \cdot m$)이며, a 와 b 는 상수로 0.00145와 5이다. 본 연구에서는 Soni et al. (1980)의 실험 중 Table 1과 같은 조건에 대해 모의하였다. Table 1에서 ΔG 는 인위적인 퇴사를 위해 추가로 공급해주는 유사량이며, G 는 평형유사량과 추가로 공급해주는 유사량을 합친 유사량으로 실험에서 실제 공급된 유사량이다. 본 수리실험은 상류에서 공급되는 유사 농도가 약 $5,950 \text{ g/m}^3$ 으로, 4장의 모의대상 저수지에 유입하는 최대 부유사농도가 약 $5,130 \text{ g/m}^3$ 인 점을 감안하면, 고농도의 유사 수계에 유입하는 조건에서는 서로 유사한 경우라 할 수 있다. 단, 본 수리실험과 4장의 모의대상 저수지 간에는 수리학적 상사성이 없기 때문에, 4장의 연구결과는 모형의 검증에 수행한 정량적인 결과가 아니라는 한계가 있다.

본 연구에서는 위 실험을 재현하기 위하여 단면간의 거리를 0.5m로 일정하게 하여 61개의 단면으로 지형을 구성하였다. 실험수로의 조도계수는 매끄러운 실험수로에 입자가 작은 모래하상인 점을 감안하여 0.015를 적용하였다. 수온은 15°C 를 사용하였으며 모의시간간격은 테스트를 거쳐 모의결과에 영향을 미치지 않도록 1/1,000 시간을 사용하였다. 유사 침강속도는 Rubey 공식(Woo, 2002)을 이용하였으며, 유사량 산정공식으로는 기존 연구(Ahn et al., 2010, 2012)에서 그 적용성이 입증된 Laursen 공식과 하천에서의 장기하상변동에 널리 사용(Ahn et al., 2002; Ji et al., 2009)되고 있는 Ackers & White 공식 그리고 유사량 공식 평가(Yu and Woo, 1990)에서 그 결과가 우수한 것으로 평가된 Engelund & Hansen 공식을 이용하였다.

Fig. 2는 Table 1의 모의조건에 대한 모의결과이다. 비교를 위하여 Soni et al. (1980)의 수리실험 결과를 함께 도시하였다. 실험결과에는 하상에 형성된 사구가 나타난 것을 확인할 수 있다. 실험과 모든 모의결과는 상류에서의 과도한 유사공급으로 인한 퇴적 양상과 이로 인한 수위 상승 양상을 대체로 잘 재현하고 있다. 단, Ackers & White 공식과 Engelund & Hansen 공식을 이용한 경우는 Laursen 공식을 이용한 경우에 비해 유사 공급되는 상류에서 하

상 퇴적이 상대적으로 과도하게 발생하는 특징을 보이는 반면에, Laursen 공식의 경우에는 상류에서 하상 퇴적이 다소 과소평가되는 특징을 보이고 있다.

4. 모형의 적용

4.1 대상구간 및 모의조건

본 연구의 대상지역은 국내에서 설계 중이며, 현지에서 시공이 진행되고 있는 파키스탄 북동부에 위치한 유역변경식 수력발전용 댐과 이로 인해 조성되는 저수지이다. 댐 상류지역의 현황은 Fig. 3과 같다. 댐이 위치하는 곳의 유역면적은 $2,429 \text{ km}^2$ 이며, 상부 유역은 8,000m 이상의 히말라야 산맥으로 둘러싸여 있으며 하부 유역 또한 평균고도 800m

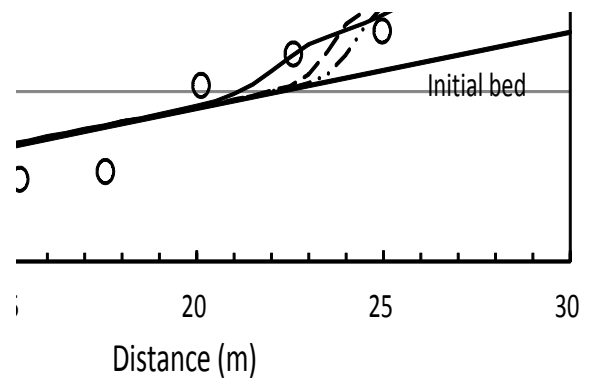


Fig. 2. Transient Bed and Water Surface Profiles (after 30 min)

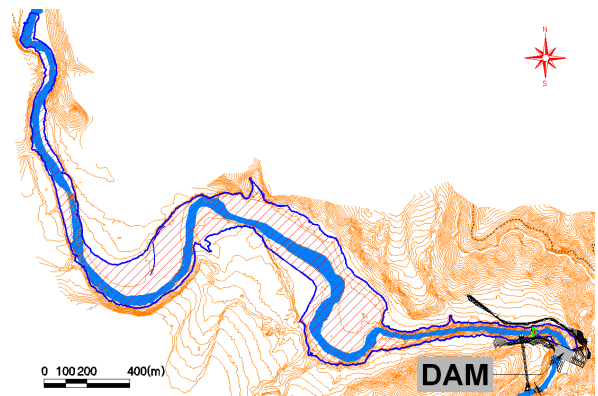


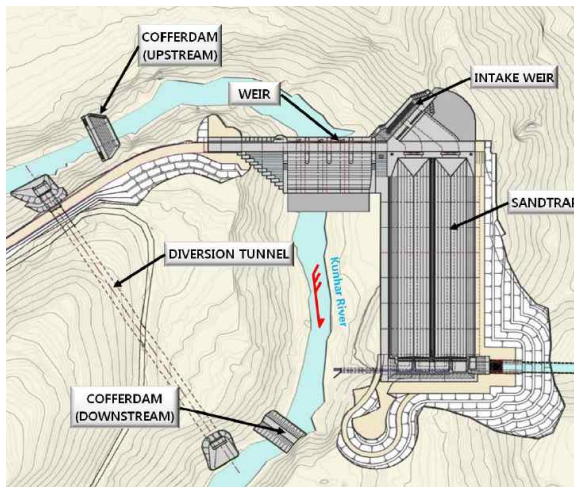
Fig. 3. Geometry Upstream of the Dam Site

Table 1. Experimental Conditions of Reservoir Sedimentation (adapted from Soni et al., 1980)

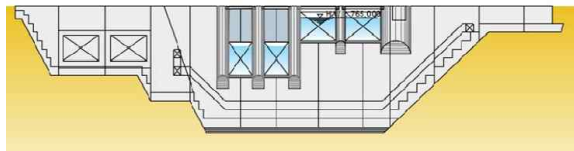
$Q \times 10^3$ (m^3/s)	U (m/s)	Downstream depth $\times 10^2$ (m)	Slope $\times 10^3$ (m/m)	$\Delta G / G_e$	G_e (ton/day)	G (ton/day)	Sediment Concentration (g/m^3)
7.0	0.413	8.6	2.25	3.5	0.80	3.60	5,950

이상의 가파른 산지로 구성되어 있다(STAR Hydropower, 2007). 이곳에 흐르는 하천유량에는 히말라야에서 발생하는 다량의 유사가 포함되어 있어 발전용 터빈의 마모를 방지하기 위하여 침사지를 설치하는 것으로 계획되었다. Fig. 4는 댐이 위치하는 곳의 평면도와 댐의 단면도이다. 댐에는 폭 12m 높이 10.33m인 2개의 방사형수문(radial gate)과 폭 7m, 높이 11.5m인 하사식수문(under sluice gate)이 설치되어 있으며 방사형수문의 위어마루(weir crest)는 El. 757 m, 하사식수문의 위어마루는 El. 745m이다. 댐의 설치로 형성된 저수지의 상시만수위는 El. 765m 저류용량은 $6.42 \times 10^6 \text{ m}^3$ 저수지의 면적은 59ha 저수지의 연장은 5,200 m 수력발전을 위한 운영수위는 El. 760~765m이다.

대상유역의 기온은 월별, 고도별도 다르다. Table 2는 댐의 인접지에서 측정한 월평균기온이다. 6월에서 8월까지가 가장 더운 시기이며, 12월에서 다음해 2월까지가 가장 추운 시기이다. Table 2의 월평균기온은 유사의 침강속도(fall velocity)를 계산하는데 사용하였다. 대상유역의 유량



(a) Plan View of the Weir Structure



(b) Cross-section of the Weir

Fig. 4. Layout of Major Dam Structures

자료는 1960~2003년까지의 44년간 일유량 자료가 이용 가능하다. Table 2에는 대상유역의 월평균유량을 함께 정리하였다. 4월에서 9월까지 상대적으로 풍부한 유량이 흐르며, 10월부터 다음 해 3월까지의 유량이 상대적으로 부족함을 알 수 있다. 대상유역의 유황곡선(flow duration curve)에 의하면 평균유량(average flow)은 $104 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며, 상위 10개의 평균유량은 $414 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다(STAR Hydropower, 2007). Fig. 5는 1990년의 일평균유량으로 평균유량은 $120 \text{ m}^3/\text{s}$, 상위 10개의 평균유량은 $410 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 대상유역의 연간 유량분포와 비슷하다. 이에 본 연구에서는 Fig. 5를 저수지에 유입하는 대표 유량수문곡선으로 채택하여 장기하상변동 모의에 사용하였다.

대상유역에서 1960~2002년 사이에 측정된 유량과 부유사의 농도를 이용하여 유도한 부유사의 부하량 Q_{ss} 는 다음과 같다(STAR Hydropower, 2007).

$$Q_{ss} = 0.0043Q^{2.86} \quad (2)$$

위에서 Q_{ss} 는 부유사의 부하량(ton/day)이며 Q 는 유량(m^3/s)이다. 앞의 Fig. 5에 제시된 유량과 Eq. (2)를 이용하여 산정한 부유사의 연간 부하량은 약 $5.3 \times 10^6 \text{ ton}$ 에 이른다. Table 3은 해당 유역 부유사의 입도와 하상물질의 입도를 정리한 것이다. 부유사는 실트와 모래의 함량이 높고 점토가 약 11% 혼합되어 있다. 하지만 하상물질은 모래의 함량이 14%에 미치지 못하고 대부분이 입경이

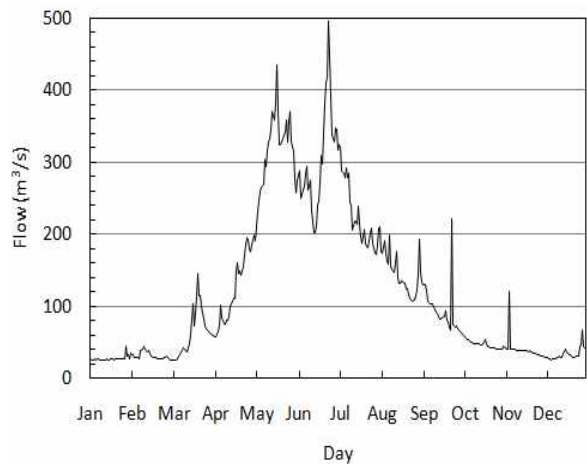


Fig. 5. Daily Flows Hydrograph (1990)

Table 2. Mean Monthly Temperature and Flow (adapted from STAR Hydropower, 2007)

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperature (°C)	9.5	11.5	16.0	21.1	25.7	29.9	28.8	28.1	26.3	21.7	15.9	10.9
Flow (m^3/s)	23.5	25.8	43.7	98.0	186.1	284.7	246.7	148.3	81.9	46.7	33.2	27.2

매우 큰 자갈과 호박돌로 구성되어 있다.

수력발전용 댐이 설치되어 저수지가 형성되면 상시만 수위를 기준으로 이의 영향을 받는 상류구간은 약 5km에 이른다. 이에 본 연구에서는 저수지의 배수위 영향 범위를 벗어나도록 댐에서 상류 7km 구간에 대해 모의하였으며, 200m 간격의 횡단측량 성과를 이용하여 모형을 구성하였다. Fig. 6은 모의구간의 초기하상고, 초기수위, 수면폭을 도시한 것이다. 초기수위와 수면폭은 초기유량인 27 m³/s에 대한 결과이다. 하상경사는 약 1/150이며, 댐이 설치된 지점에서 약 800m 상류까지는 수면폭이 약 40m이며 1,000~3,000m 구간에서 수면폭은 100~350m에 이르며 3,000m 이상인 구간에서는 점차 수면폭이 좁아지면서 5,000m 이상인 구간에서는 수면폭이 약 40m인 것으로 나타나고 있다.

저수지의 하상이 주로 자갈과 호박돌로 구성된 산지하천임을 감안하여 Manning의 조도계수는 0.045를 사용하였다. 상류에서 저수지에 유입되는 유량은 Fig. 5의 일유량을 이용하였으며 하류의 수위는 상시만수위인 El. 765m를 이용하였다. 상류에서 유입하는 부유사의 부하량은 Eq. (2)를 이용하였으며, 부유사와 하상재료의 입도분포

는 Table 3을 이용하였다. 수온은 Table 2의 월평균수온을 사용하였으며 유사의 침강속도는 Rubey공식(Woo, 2002)을 이용하였다. 저수지에 퇴사된 퇴적토의 단위중량은 퇴적토의 입경분포, 유사의 퇴사환경 및 시간의 영향을 받는다. 본 연구에서는 Woo (2002)의 저수지 퇴적토 단위중량을 참조하고 HEC-RAS에서 기본으로 제공하는 값을 검토하여, 모래 실트 점토의 퇴사 단위중량으로 각각 1,489 kg/m³, 1,041 kg/m³, 480 kg/m³을 이용하였으며 유사의 비중은 2.65를 이용하였다.

4.2 민감도 분석

유량지속시간(flow duration)과 모의시간간격이 모의결과에 미치는 영향을 검토하였다. 장기하상변동을 모의하는 경우에는 일유량을 주로 사용하므로 유량지속시간과 모의시간간격으로 24시간을 사용하는 경우가 많다. 하지만 본 연구대상 유역과 같이 중소규모의 저수지에 과도한 부유사(일최대유량 496 m³/s에 최대 부유사의 양 220,000 ton/day)가 유입하는 경우에는 일간 하상변동이 과도할 수도 있어 유량지속시간과 모의시간간격을 적절히 조정하는 것이 필요할 수 있다. 이에 본 연구에서는 일최대유

Table 3. Sediment Size Distributions (adapted from STAR Hydropower, 2007)

Label		Sediment Diameter (mm)			Suspended Sediment (%)	Bed Materials (%)
		Min	Max	Mean		
Clay	Clay	0.002	0.004	0.003	11	
Silt	VFM	0.004	0.008	0.006	18	
	FM	0.008	0.016	0.011	31	
	MM	0.016	0.032	0.023	39	
	CM	0.032	0.0625	0.045	55	0
Sand	VFS	0.0625	0.125	0.088	75	2.7
	FS	0.125	0.25	0.177	93	8.4
	MS	0.25	0.5	0.354	100	13.4
	CS	0.5	1	0.707		13.8
	VCS	1	2	1.41		13.8
Gravel	VFG	2	4	2.83		13.9
	FG	4	8	5.66		13.9
	MG	8	16	11.3		14.1
	CG	16	32	22.6		14.4
	VCG	32	64	45.3		16.0
	SC	64	128	90.5		19.2
	LC	128	256	181		24.9
	SB	256	512	362		53.9
	MB	512	1,024	724		100.0
	LB	1,024	2,048	1,448		

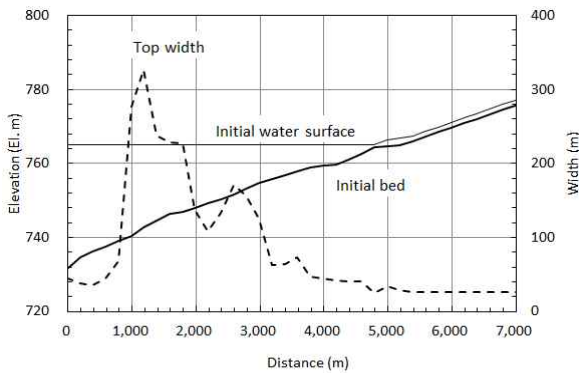
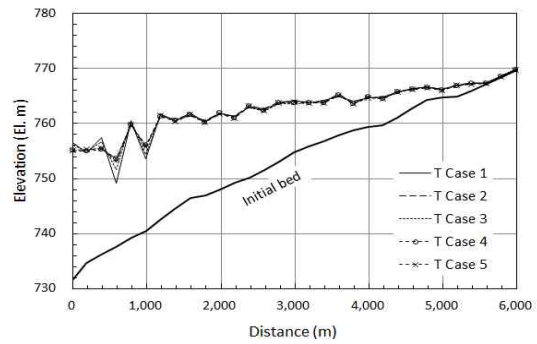


Fig. 6. Initial Bed and Top Width along the Reservoir for $Q=27 \text{ m}^3/\text{s}$

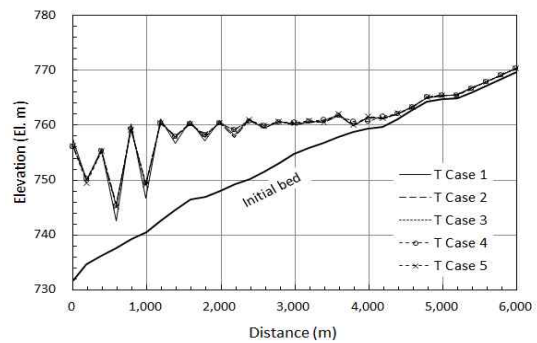
Table 4. Modeling Cases for Flow Duration and Computation Increment (unit: hours)

Cases	flow duration	computation increment
TCase 1	24	24
TCase 2	24	12
TCase 3	12	12
TCase 4	12	6
TCase 5	6	6

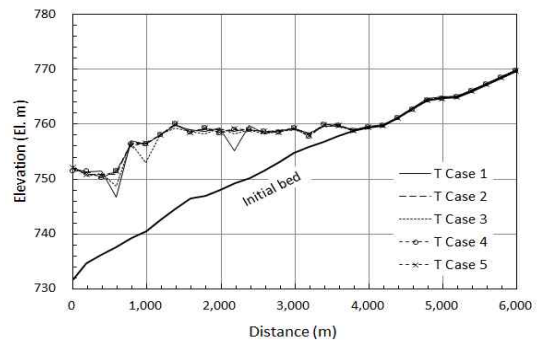
량이 150일 동안 지속적으로 유입하는 경우를 가정하고, Table 4와 같은 유량지속시간과 모의시간간격에 대해 각기 하상변동을 해석하였다. Fig. 7은 Table 4의 모의조건에 대한 유사량 공식별 150일 후의 저수지 퇴사 양상을 도시한 것이다. Figs. 7(a) and (b)의 Laursen 공식과 Ackers & White 공식을 사용한 경우에는 모의시간에 관계없이 댐 직상류 하폭이 좁은 구간에서 하상의 진동양상을 보이는데, 이는 시간이 진행하면서 계산결과의 불안정성을 야기한다. Fig. 7(c)의 Engelund & Hansen 공식을 사용한 경우는 TCase 1 and 3에서 일부 진동양상을 보이거나 나머지 조건에서는 안정한 결과를 보이고 있다. 이러한 결과를 바탕으로 이후 분석에서는 Engelund & Hansen 공식을 유사량공식으로 사용하고, 유량지속시간은 24시간, 모의시간간격은 유량 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 기준으로 그 이하에서는 24시간을 그 이상에서는 12시간을 사용하였다. 그 이유는 일최대유량 $496 \text{ m}^3/\text{s}$ 에 대해 TCase 2(유량지속시간은 24시간, 모의시간간격은 12시간)의 경우 수치적으로 안정한 결과를 보이므로, 유량지속시간은 모든 유량에 대해 24시간을 사용하였으며 모의시간간격은 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 에 대한 부유사의 양($52,000 \text{ ton/day}$)이 일최대유량에 대한 부유사의 양(약 $220,000 \text{ ton/day}$)에 비해 약 1/4정도에 불과하므로



(a) Laursen



(b) Ackers & White



(c) Engelund & Hansen

Fig. 7. Bed Profiles for Flow Duration and Computation Increment (after 150 day)

$300 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 기준으로 그 이상에서는 12시간 그 이하에서는 24시간을 사용하였다.

Fig. 8은 Manning의 조도계수를 0.035, 0.045, 0.055로 변화시키며 1년 동안의 하상변동을 Engelund & Hansen 공식을 적용하여 모의한 결과이다. Manning의 조도계수가 0.045인 경우를 기준으로 했을 때, 조도계수가 0.035인 경우에는 삼각주 등면의 해석결과에 다소 차이가 있으나 조도계수가 0.055인 경우에는 해석결과에 차이가 거의 없다. 그리고 연간 저수지에 유입하는 유사량 대비 연간 퇴사되는 유사량의 비인 연간 포착률(trapping efficiency)은 Manning의 조도계수가 0.035, 0.045, 0.055인 경우 각각에

대해 63.5%, 63.4%, 63.3%로 의미있는 변화를 보이지 않았다. 참고로 Lausen 공식과 Ackers & White 공식을 사용하는 경우에 연간 저수지 포착률은 각각 62.7%, 63.0%를 보였다.

4.3 연간 퇴사량

이상에서 검토한 결과를 바탕으로 유사량공식은 Engelund & Hansen 공식, 모의시간간격은 유량 300 m³/s를 기준으로 그 이하에서는 24시간 그 이상에서는 12시간, Manning의 조도계수는 0.045를 적용하여 저수지의 퇴사거동을 모의하였다. Fig. 9는 Fig. 5의 일유량 자료를 이용하여 5년간의 퇴사거동을 모의한 결과이다. 삼각주의 등면고는 약 El. 760 m에서 형성되며, 시간의 진행에 따라 삼각주는 하류방향으로 점차 확장하는 등 Fig. 1에서 설명한 전형적인 저수지에서의 퇴사 양상을 잘 재현하고 있다.

Table 5는 연간 저수지 퇴사량과 포착률을 정리한 것이다. 퇴사량은 해가 가며 감소하는 일반적인 경향을 보

이는데, 특히 4년과 5년차에는 퇴사량이 급격히 감소함을 알 수 있다. 점토의 경우는 저수지에 유입된 토사가 저수지에 퇴사되지 않고 거의 그대로 유출되며, 실트의 경우는 1년차에는 유입 토사의 약 42%가 저수지에 포착되나, 해가 갈수록 퇴사량이 줄다가 4년과 5년차에는 저수지에 퇴사되지 않고 거의 그대로 유출되고 있다. 모래의 경우는 1년차에는 100%, 2년과 3년차에는 90% 이상, 4년차에는 37%, 5년차에는 약 9%가 저수지에 포착되고 있다. 그리고 저수지에 포착되어 퇴적되는 대부분의 유사는 모래와 같은 조립질 유사임을 알 수 있다.

Fig. 10은 저수지의 각 위치에 연간 유입되는 유사량을 백분율로 표현한 것으로 저수지 최상류에서 유입하는 유사량으로 무차원화 하였다. 저수지 하류로 가며 유입 유사량은 점차 감소하는데, 감소하는 양만큼은 저수지의 해당 위치에 퇴사되는 것으로 해석할 수 있다. Fig. 10(a)는 실트의 경우로 1년차에는 댐을 기준으로 상류 약 1,000~3,000

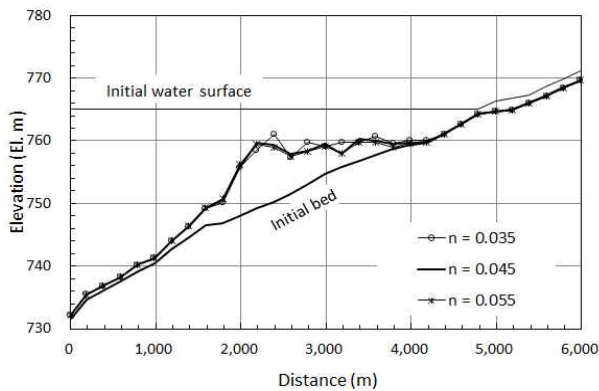


Fig. 8. Bed Profiles for Manning Roughness Coefficient

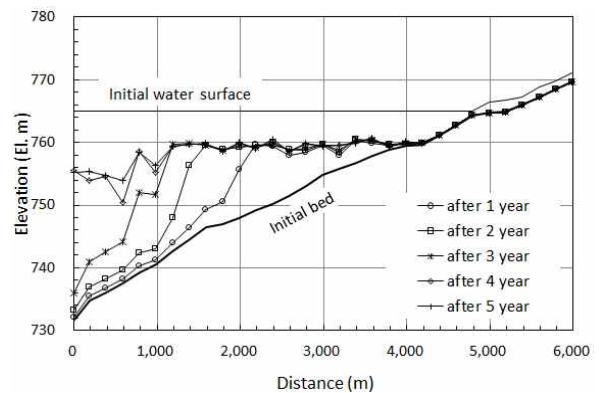


Fig. 9. Bed Elevation Changes for Five Years

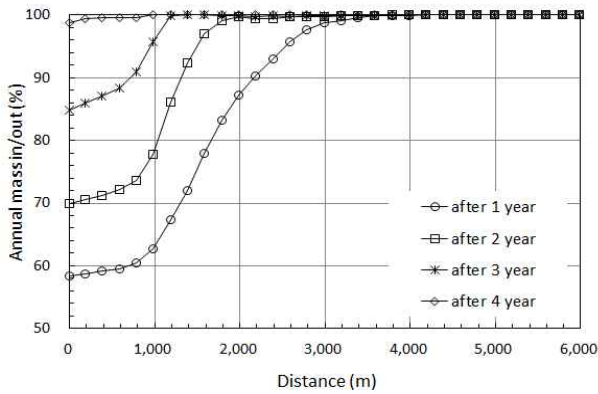
Table 5. Annual Trapping Efficiency during Deposition for Years 1~5

Classification		1 year	2 year	3 year	4 year	5 year
Clay	Inflow (ton/year)	578,253	578,253	578,253	578,253	578,253
	Deposited (ton/year)	5,026	3,588	1,757	692	751
	Trapping Efficiency (%)	0.9	0.6	0.3	0.1	0.1
Silt	Inflow (ton/year)	2,313,014	2,313,014	2,313,014	2,313,014	2,313,014
	Deposited (ton/year)	963,361	695,770	351,122	28,705	-40,333
	Trapping Efficiency (%)	41.7	30.1	15.2	1.2	-1.7
Sand	Inflow (ton/year)	2,365,582	2,365,582	2,365,582	2,365,582	2,365,582
	Deposited (ton/year)	2,364,920	2,352,075	2,151,015	882,028	210,167
	Trapping Efficiency (%)	100.0	99.4	90.9	37.3	8.9
All	Inflow (ton/year)	5,256,849	5,256,849	5,256,849	5,256,849	5,256,849
	Deposited (ton/year)	3,333,307	3,051,433	2,503,894	911,425	170,585
	Trapping Efficiency (%)	63.4	58.1	47.6	17.3	3.3

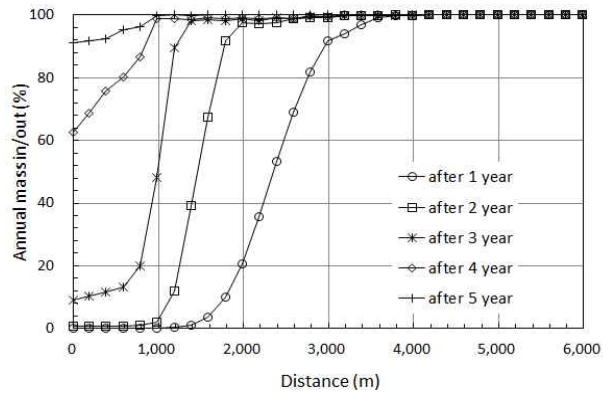
m 구간에서 대부분 퇴사되고 있음을 확인할 수 있다. 2년차에는 2,000 m 이내 구간에서, 3년차에는 1,000 m 이내 구간에서 대부분 퇴사되며 4년차부터는 저수지에 퇴사가 거의 발생하지 않고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 10(b)는 모래의 경우로 1년차에는 댐 상류 2,000~3,000 m 구간에서 대부분 퇴사되며, 2년차에는 댐 상류 1,000~2,000 m 구간에서 대부분 퇴사되는 등 해가 갈수록 퇴사구간은 하류로 이동하며 퇴

사량은 감소하는 현상을 시공간적으로 잘 설명해주고 있다. 예를 들어 댐 직상류 하폭이 좁은 구간에서는 처음 2년 동안에는 모래와 같은 조립 유사는 거의 퇴적되지 않으며, 실트 계열의 세립 유사만이 일부 퇴적됨을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 특정 단면에서 실트와 모래의 누가퇴적유사량을 백분율로 도시한 것으로, 기준값은 수치모의 마지막 날의 실트와 모래를 합산한 누가퇴적유사량이다. Fig. 11(a)는

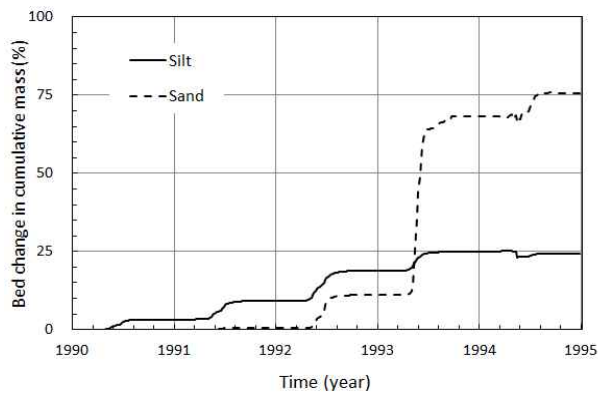


(a) Silt

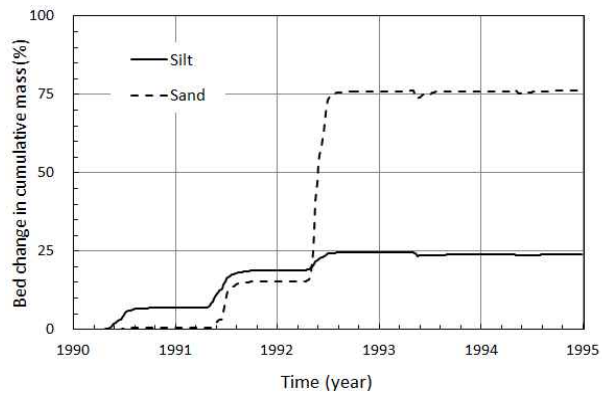


(b) Sand

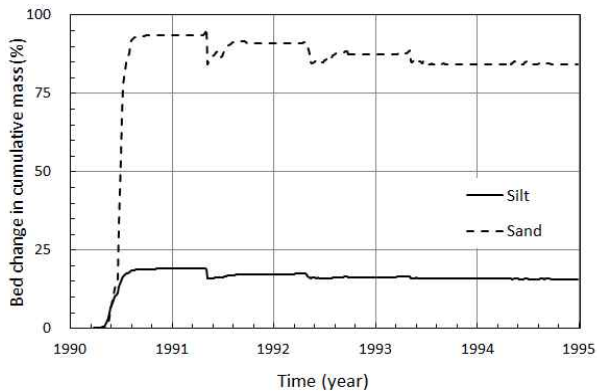
Fig. 10. Annual Mass in and out through the Reservoir



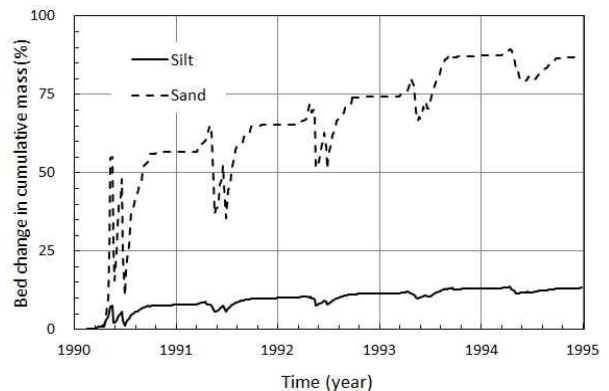
(a) at 185 m from Dam



(b) at 1,185 m from Dam



(c) at 2,185 m from Dam



(d) at 3,185 m from Dam

Fig. 11. Cross-section Bed Change in Cumulative Mass

댐이 위치한 직상류로 하폭이 약 40m인 지점이며, Figs. 11(b) and (c)는 하폭이 넓은 구간으로 퇴사가 집중적으로 발생하는 지점이며, Fig. 11(d)는 저수지 초입이다. 저수지에서의 퇴사는 부유사가 집중적으로 유입하는 우기에 대부분 발생함을 알 수 있다. Fig. 11(a)의 경우, 2년차까지는 모래의 퇴적은 거의 없이 실트만이 퇴적되며, 3년차에 모래와 실트가 동시에 퇴적되며, 4년차에는 모래의 퇴적량이 급증하는 패턴을 보인다. Fig. 11(b)의 경우, 1년차에는 주로 실트가 퇴적되며 2년차에는 모래와 실트가 함께 퇴적되며, 3년차에는 모래가 급격히 퇴적되며 그 이후에는 거의 평형상태의 하상을 보인다. Fig. 11(c)의 경우 1차년도부터 모래와 실트가 함께 퇴적되며 거의 평형 하상에 도달하게 된다. Fig. 11(d)의 경우는 저수지의 초입부로 수심과 하폭이 상대적으로 얇고 좁은 지점으로 Figs. 11(b) and (c)의 경우와는 다른 특이한 거동을 보이는데, 우기의 유량수문곡선 상승기에는 전년도에 퇴사되었던 삼각주의 일부가 세굴되었다가, 우기의 유량수문곡선 하강기에 다시 퇴사가 발생하는 반복적인 패턴을 보여주고 있다. 즉, Figs. 10 and 11은 저수지에 형성되는 삼각주의 기본적인 형태뿐만 아니라, 특정위치에서 특정시기에 어떤 입도의 유사가 주로 퇴적되는지를 파악하는데 효과적으로 활용될 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 HEC-RAS의 하상변동모형을 이용하여 고농도의 유사가 중소규모의 저수지에 유입하여 삼각주를 형성하는 과정을 유사의 입도분포를 고려하여 해석하였으며, 저수지에 형성된 삼각주의 시공간적인 분포 및 삼각주의 각 위치별 퇴적된 유사의 입도를 분석하였다. 본 연구결과는 3장의 수리실험과 4장의 모의대상 저수지간에 수리학적 상사성이 없기 때문에, 4장의 연구결과가 정량적인 결과가 아니라는 한계가 있지만 다음과 같은 의미 있는 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 민감도분석을 통해 본 연구에서는 유사량공식으로 Engelund & Hansen공식을 유량지속시간과 모의시간간격으로 각각 24시간과 12시간을 사용하였다. 그리고 본 연구의 모의조건에서 Manning의 조도계수가 유사의 연간 저수지 포착률에 미치는 영향은 미미한 것으로 분석되었다.
- 2) 중소규모의 수력발전 전용댐에 고농도의 유사가 유입하는 경우에 대하여 유사의 입도분포를 고려한 저수지 퇴사현상을 모의하였다. 모의결과, 시간의 진

행에 따라 삼각주는 하류방향으로 점차 확장하는 등 전형적인 저수지에서의 퇴사 양상을 잘 재현하였으며, 저수지에 유입되는 유사 중 점토는 저수지에 퇴사되지 않고 거의 그대로 유출되며 실트와 모래는 첫해에는 높은 저수지 포착률을 보이나 저수지의 용적이 점차 줄면서 해가 갈수록 포착률이 감소하는 결과를 보이는 등 유사의 입도별 연간 저수지 포착률을 합리적으로 예측할 수 있었다.

- 3) 저수지에 형성되는 삼각주의 기본적인 형태뿐만 아니라, 특정위치에서 특정시기에 어떤 입도의 유사가 주로 퇴적되는지를 합리적으로 예측할 수 있었다. 이러한 분석은 유사의 포착률과 퇴적양상의 분석과 함께 수자원관련 시설물의 계획 및 유지관리에 유용한 정보를 제공해 줄 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Ackers, P., and White, W.R. (1973). "Sediment transport: A new approach and analysis." *Journal of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 99, No. HY11, pp. 2041-2060.
- Ahn, J.M., Lyu, S.W., and Lee, N.J. (2010). "A study on the optimal sediment discharge formula for Hyeongsan River." *J. of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 11, pp. 977-984.
- Ahn, J.M., Lyu, S.W., and Lee, N.J. (2012). "Determination of the optimal sediment discharge formula for Hyeongsan River using GSTARS." *J. of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 32, No. 1B, pp. 1-7.
- Ahn, S.J., Yoon, S.H., and Beack, N.D. (2002). "Prediction of river bed variation using numerical model." *J. of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 35, No. 6, pp. 693-701.
- Bae, H.D. (2011). *Sedimentation and flushing simulation in reservoirs using 1-D quasi-steady model*. M.S. dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea.
- Bhowmik, N.G., Tsai, C., Parmar, P., and Demissie, M. (2004). *HEC-6 modeling of the main stem of the Kankakee River in Illinois from the Stateline bridge to the Kankakee dam*. Report 2004-4, Illinois State Water Survey, Champaign, Illinois.
- Brunner, G.W. (2010). *HEC-RAS river analysis system hydraulic reference manual*. Report CPD-69, USACE

- Hydraulic Engineering Center, Davis, CA.
- Choi, S.U., and Choi, S.W. (2011). "Thickness of deposited delta in reservoir sedimentation." *Proceedings 37th Congress of KSCE*, KSCE, pp. 347-350.
- Choi, S.U., and Choi, S.W. (2012). "A quasi-study model for sedimentation and flushing of reservoirs." *J. of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 2, pp. 217-227.
- Copeland, R.R., and Thomas, W.A. (1989). *Corte Madera Creek sediment study*. Technical report HL89-6, USACE Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Havis, R.N., Alonso, C.V., and King, J.G. (1996). "Modeling sediment in gravel-bedded streams using HEC-6." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 10, pp. 559-564.
- Hotchkiss, R.H., and Parker, G. (1991). "Shock fitting of aggradational profiles due to backwater." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 9, pp. 1129-1144.
- Ji, U., Julien, P.Y., and Park, S.K. (2011). "Sediment flushing at the Nakdong river estuary barrage." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 137, No. 11, pp. 1522-1535.
- Ji, U., Son, K.I., and Kim, M.M. (2009). "Numerical analysis for bed changes in the upstream channel due to the installation of sediment release opening in the flood control dam." *J. of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 4, pp. 319-329.
- Laursen, E.M. (1958). "The total sediment load of streams." *Journal of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 84, No. HY1, pp. 1530-1 to 36.
- Lee, G.M., Fontane, D.G., and Yoo, Y.S. (1997). "Information variable dynamic programming for reservoir sedimentation management." *J. of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 17, No. II-2, pp. 119-128.
- Lee, G.M., and Lee, W.S. (1998). "Long-term prediction of dam sedimentation using sluicing efficiency curve and dam operation technique." *J. of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 31, No. 1, pp. 95-103.
- Lee, J.S. (1997). "An analysis of long-term bed elevation changes to estimate total scour depth at bridge site." *J. of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 30, No. 6, pp. 721-729.
- Morris, G.L., and Fan, J. (2010). *Reservoir sedimentation handbook* (electronic ver. 1.04), McGraw-Hill, NY, pp. 20-1 to 25.
- 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.
- Rim, C.S., Son, K.I., Lee, J.J., and Yoon, S.E. (1999). "A study on the seiment movement using numerical models." *J. of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 32, No. 2, pp. 131-142.
- Soni, J.P., Garde, R.J., and Ranga Raju, K.G. (1980). "Aggradation in streams due to overloading." *Journal of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 106, No. HY1, pp. 117-132.
- STAR Hydropower (2007). *Feasibility study for Patrind hydropower project*.
- Tingsnachali, T., and Supharatid, S. (1996). "Experimental investigation and analysis of HEC-6 river morphological model." *Hydrological Processes*, Vol. 10, pp. 747-761.
- Woo, H.S. (2002). *River hydraulics*. CMG Publishers, Seoul, Korea, pp. 366-384.
- Woo, H.S., and Yu, K.K. (1991). *A comparative analysis of alluvial channel models for the prediction of river-bed changes*. Report KICT91-WR-112, KICT.
- Yu, K.K., and Woo, H.S. (1990). "Comparative evaluation of some selected sediment transport formulas." *J. of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 10, No. 4, pp. 67-75.

논문번호: 12-082	접수: 2012.07.27
수정일자: 2012.09.05/09.26/09.27	심사완료: 2012.09.27