

홍수조절댐에서의 배사관 설치에 따른 상류 하천의 하상변동에 관한 수치모의 연구

Numerical Analysis for Bed Changes in the Upstream Channel due to the Installation of Sediment Release Openings in the Flood Control Dam

지 운* / 손 광 익** / 김 문 모***

Ji, Un / Son, Kwang Ik / Kim, Munmo

Abstract

Sediment release openings or pipes are installed in the flood control dam constructed to reduce flood damages, which are to allow water and sediments pass through the dam and to prevent flow blockage and sedimentation in the upstream area of the dam. The Hantan River Flood Control Dam (HRFCD) has been projected for flood damage reduction and sediment release openings and ecological passages are considered for the dam design. In this study, sediment deposition due to the construction of HRFCD was analyzed using the HEC-6 model and compared with the state before the dam construction with respect to the conditions of the annual mean daily discharge and annual discharge hydrograph. According to the numerical results, although downstream water levels were changed by the dam structure, the effects of bed changes were not propagated from the dam over 2 km upstream. Also, 2D numerical models of RMA2 and SED2D were used to predict bed changes in the upstream area with and without sediment release openings. Consequently, it is presented that sediment release openings decreased maximum deposition height in the upstream channel of the dam.

keywords : numerical modeling, sedimentation, sediment release openings, channel bed changes, flood control dam

요 지

홍수피해를 경감시키고 홍수조절을 목적으로 계획되는 홍수조절용댐의 경우 홍수 발생 기간 외에는 상류와 하류 하천간의 흐름 차단을 억제하고 상류로부터 유입되는 유사가 댐 상류 부분에 퇴적되는 현상을 방지하기 위해 댐에 상시 개방되어 있는 배사관을 설치하기도 한다. 국내에서는 임진강 유역의 홍수피해 저감을 위해 건설되는 한탄강홍수조절댐에 배사관과 생태통로를 설치하도록 계획되었다. 본 연구에서는 1차원 HEC-6 모형을 이용하여 한탄강홍수조절댐 건설로 인한 댐 상류의 퇴사현상을 댐 건설 전의 현상과 비교 분석하였으며 연평균유량 조건뿐만 아니라 연간 유량변동을 고려한 대표유량수문곡선을 적용하여 퇴사현상을 모의하였다. 수치모의 결과, 댐 건설로 인한 하류단 수위 변화가 발생하더라도 하상변동의 영향은 댐에서 상류 2 km 구간을 넘지 않는 것으로 나타났다. 또한 댐 건설

* 교신저자, 명지대학교 토목환경공학과 연구교수

Corresponding Author, Research Professor, Dept. of Civil and Environmental. Engrg., Myongji Univ., Yongin-si, Korea (e-mail: jiuncivil@gmail.com)

** 영남대학교 건설시스템공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Engrg., Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ., Gyeongsan-si, Korea

*** 신구대학 건설정보과 교수

Professor, Dept. of Construction Information, Shingu College, Seoungnam-si, Korea

후 배사관의 설치 유무에 따른 배사관 주변과 댐 상류 하상 변화를 예측하기 위해 2차원 RMA2 및 SED2D 모형을 이용하였으며 한탄강홍수조절용댐의 댐 저부에 설치된 배사관의 배사효과는 저수지 내의 퇴적고를 저감시키는 효과가 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 수치모의, 유사 퇴적, 배사구, 하상변동, 홍수조절댐

1. 서론

댐 상류로부터 유입되는 유사는 댐 근처에서의 유속 감소로 인해 저수지 내의 유사 퇴적 문제를 야기한다. 이러한 유사 퇴적 문제를 해결하기 위해 댐이나 저수지에서 많이 사용되는 방법으로는 저수지내에 쌓인 유사를 물리적으로 제거하는 방법과 수문조작을 통해 수류력을 이용한 유사 플러싱 방법 등이 있다. 특히 저수지에서의 유사 플러싱 기법에 의한 배사현상에 대한 연구는 16세기 스페인에서 D'Rohan(1911)에 의해 처음 시도된 후 지속적으로 연구가 진행되었으며 Brandt (1999), Lai and Shen(1996), Jassen and Shen(1997), Talebbeydokhti and Naghshieh(2004), Guo *et al.* (2004) 등에 의해 실험실에서의 수리실험 및 물리모형 실험을 통해 연구가 진행되어 왔다. 이러한 수리실험 또는 모형실험을 통한 연구는 실험실 수로에서 단순화하여 연구가 진행되기 때문에 실제 댐에서의 배사효과를 분석하기에는 한계성이 있다. 따라서 수치적 기법을 이용한 연구가 1980년 이후 활발히 수행되었으며 대표적으로 연구사례로 Fan and Jiang(1980)이 배사 작업 중 발생하는 후퇴침식을 수치모형을 이용하여 모의하였다. Liu *et al.*(2004)의 1차원 수치모형은 배사된 유사와 저수지에서 퇴적된 양, 하상 변화, 그리고 하천에서의 유사배사에 의한 부유사농도의 변화를 예측하기 위해 개발되었으며 모형을 보정하기 위해 일본의 Kurobe 하천 Dashidaira 와 Unazuki 저수지의 현장 자료를 이용하였고 현장 관측자료와 비교적 일치하는 것으로 나타났다. 국내에서는 손민영(2002)이 준정류 1차원 하상변동 모형을 개발하여 저수지 퇴사 및 배사현상을 모의하여 수위 하강률에 따른 저수용량의 변화를 분석하였다. 안재현 등(2006)은 SMS-SED2D모형을 이용하여 장기간의 저수지내의 퇴사분포를 예측하고 경년별 퇴사특성을 파악하여 저수 용량의 감소량을 예측하였다. 또한 퇴사저감 시설에 따른 퇴사저감 방안에 대한 효과를 검토하였다.

이와 같이 기존의 수리실험 및 수치모의 기법 등을 이용하여 퇴사 및 배사 현상이 연구되었던 일반적인 댐의 형식과는 달리 홍수피해를 경감시키고 홍수조절을

목적으로 계획되는 홍수조절용댐의 경우 홍수 발생 기간 외에는 상류와 하류 하천간의 흐름 차단을 억제하고 상류로부터 유입되는 유사가 댐 상류 부분에 퇴적되는 현상을 방지하기 위해 댐에 상시 개방되어 있는 배사관을 설치하기도 한다. 국내에서는 90년대 후반 대홍수로 인해 막대한 인명 및 재산피해가 발생한 임진강 유역의 수해 방지를 위해 한탄강홍수조절댐이 건설될 예정이다. 한탄강홍수조절댐은 기존의 다목적 댐과는 달리 홍수조절을 주목적으로 계획되었기 때문에 평수시 상류와 하류의 흐름 및 유사 소통의 문제점이 없도록 배사관과 생태통로를 설치하도록 하였다.

본 연구에서는 한탄강홍수조절댐 건설로 인한 댐 상류의 퇴사현상을 1차원 HEC-6 모형을 이용하여 댐 건설 전의 현상과 비교 분석하였으며 특히 댐 건설 후 배사관의 설치 유무에 따른 배사관 주변과 댐 상류 하상 변화를 2차원 수치모형을 이용하여 분석하였다. 분석된 자료는 홍수조절댐에서의 배사관 설치에 따른 하천 상류의 배사효과를 평가하는데 활용하고자 한다.

2. 한탄강댐 유역 및 수치모의를 위한 기초자료

한탄강홍수조절댐이 위치하고 있는 임진강 제1지류인 한탄강은 유역 면적이 2,436.4 km²이며 유로연장은 141 km이고 한탄강홍수조절댐이 건설되는 위치는 Fig. 1과 같다. 댐 유역의 하도는 급류하천으로 험준한 협곡을 형성하고 있는 구간이 많으며 만곡부가 많고 특히 하류로 갈수록 사행 정도가 심하다. U자 계곡의 형태를 띠고 있어 하폭이 좁고 유속이 빠르다.

1, 2차원 수치모의를 위한 필수자료인 하상도 입도분포는 1998년의 한탄강수계 하천정비기본계획보고서(건설교통부, 1998)와 2002년의 임진강유역 홍수피해 원인조사 및 항구대책 수립 보고서(건설교통부, 2002) 자료를 활용하였으며 한탄강홍수조절댐이 건설되는 위치(248번과 249번 단면 사이)와 근접한 단면인 240번 단면에서 채취한 하상도 입도분석 결과를 보면 Fig. 2와 같다. 한탄강홍수조절댐이 건설되는 지점에서의 하상도 입도는 시간이 지남에 따라 입도가 커졌음을 알 수 있으며 본 연구에서는 2002년 자료를 이용하였고 중앙입경은 3.5 mm 그리고 하상도 단위중량은 26000 N/m³을

사용하였다.

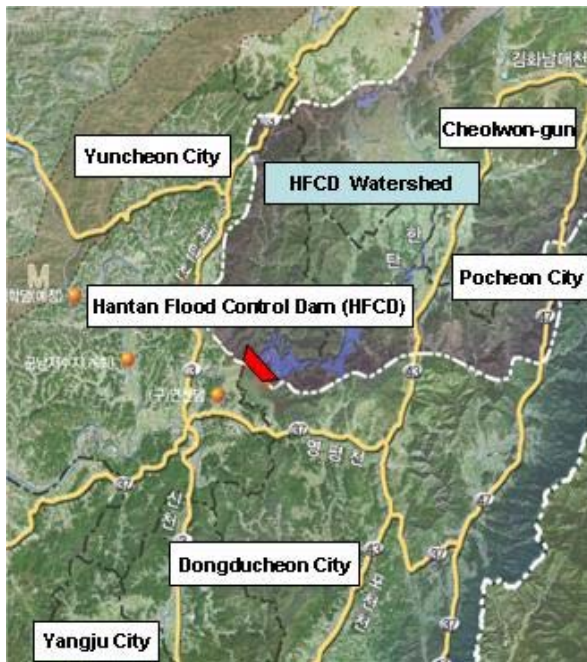


Fig. 1. Location for the Construction of the Hantan Flood Control Dam

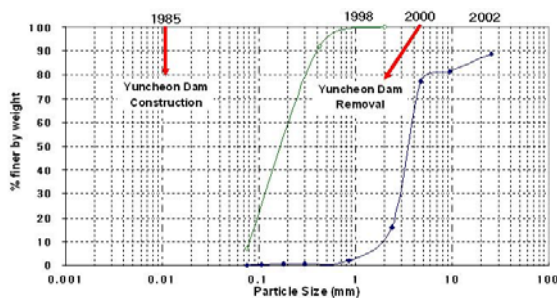


Fig. 2. Bed Material Distribution Changes by Time

한탄강 유역의 유사량 측정은 한탄강의 하류에 위치하고 있는 전곡 지점에서만 1998년부터 실시되어왔으며 Fig. 3은 전곡지점의 유량-유사량 관계 그래프를 나타내고 있다. 이 유량-유사량 관계 곡선식은 HEC-6을 이용한 1차원 하상변동 모의에서 유입유사량 입력 자료로 활용하였다. 또한 전곡지점의 유량-유사량 관계 그래프에서의 유사량은 총유사량(총유사량)이므로 HEC-6 모형에서 선택할 수 있는 공식들 중 총유사량(total load) 산정 공식이 아닌 소류사량(bed load) 산정 공식들인 Duboys 공식(Vanoni, 1975)과 Meyer-Peter and Muller(1948) 공식은 유사량 공식 검정 과정에서 제외하였다. 또한 Madden(1963)과 Copeland(1990)에 의해 수정된 Laursen(1958) 공식은 실험실 수로나 수심이 얇은 모래 또는 실트로 이루어진 하천에 주로 사용하는 공식이므

로(Yang, 2003) 유사량 공식 검정 과정에 포함하지 않았다. 따라서 이들을 제외한 HEC-6 모형에서 선택할 수 있는 나머지 공식들과 모형 자체에 포함되진 않았지만 한국건설기술연구원(1989)에서 비교적 우리나라에 적합하다고 제시된 공식들을 포함하는 Engelund & Hansen 공식(1967), Ackers and White 공식(1973), Yang 공식(1979), Toffaleti 공식(1969), van Rijn 공식(1984) 및 Shen & Hung 공식(1972)을 이용하여 총유사량을 계산한 값과 전곡지점의 실측한 총유사량 값을 비교·검토하였다(Fig. 4). 유량이 작은 경우($200 \text{ m}^3/\text{s}$ 미만)는 공식별 편차가 심하거나 추정이 안 되는 경우가 많았고, 유량이 큰 경우($200 \text{ m}^3/\text{s}$ 이상)에는 Ackers and White 공식 및 van Rijn 공식이 실측치와 유사한 값을 나타내는 것으로 분석되었다(건설교통부, 2002). 본 과업에서의 모의 조건들인 연평균 유량($28.3 \text{ m}^3/\text{s}$)은 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 미만인 조건이며 200년 빈도 홍수 및 계획방류량($5,943 \text{ m}^3/\text{s}$)은 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 넘는 조건에 해당된다. $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 미만의 유량에 대해서는 확실한 공식별 특성을 찾아보기 힘들 뿐만 아니라 유량에 따라 유사량 공식을 다르게 사용하면 유사량 산정 및 퇴사량 산정에 일관성이 결여되기 때문에 Ackers and White 공식을 기본 공식으로 채택하였다. 따라서 HEC-6 모형에서 유사량 공식으로 Ackers and White 공식을 선택하여 모의하였으며 2차원 하상변동 모형 또한 Ackers and White 공식을 총유사량 공식으로 채택하고 있는 SED2D 모형으로 선정하였다.

한탄강홍수조절댐 설치로 인한 댐 상류 하천의 하상변동 모의를 위해서 1차원 수치모형을 이용하였으며 댐에 설치될 예정인 배사설비의 배사능력을 모의를 위해 2차원 수치모형을 이용하여 검토하였다. 연평균 유량 발생시 그리고 200년 빈도 홍수 유량 발생시 배사설비 및 생태통로 설치로 인한 댐 상류의 수리현상과 퇴사분포 및 하상변동 현상을 모의하였고 수치모형은 1차원 장기하상변동 프로그램으로 미 공병단에서 개발한 HEC-6 모형을 사용하였으며 미 공병단, 미국 WES (Waterway Experiment Station)와 미 연방도로국의 협력 하에 Brigham Young University의 EMRL (Environmental Modeling Research Laboratory)에서 개발된 SMS 8.0 Package의 2차원 유한요소모형인 RMA2 모형과 2차원 유사이송과 하상변동을 분석하는 SED2D 모형을 사용하였다.

1차원하상변동 대상구간은 배수효과를 고려하여 한탄강홍수조절댐 건설 예정지역에서부터 영복소수력 발전소까지 총 13.5 km으로 설정하였다. 2차원 수치모형인 RMA2를 이용한 흐름분석과 SED2D를 이용한 하상

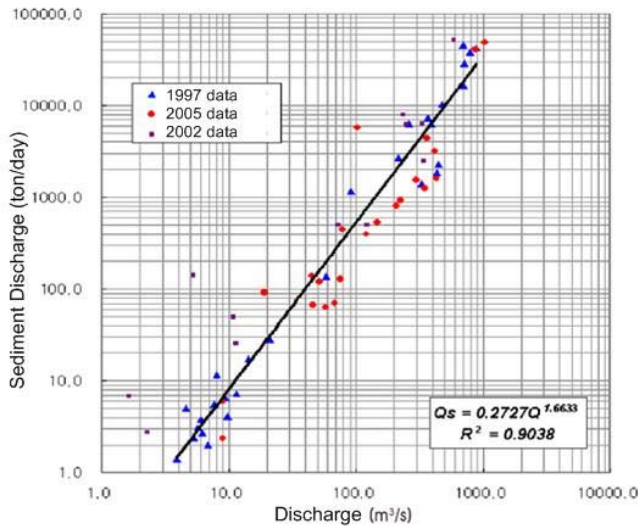


Fig. 3. Relation between Flow and Sediment Discharges at Jeongok Station

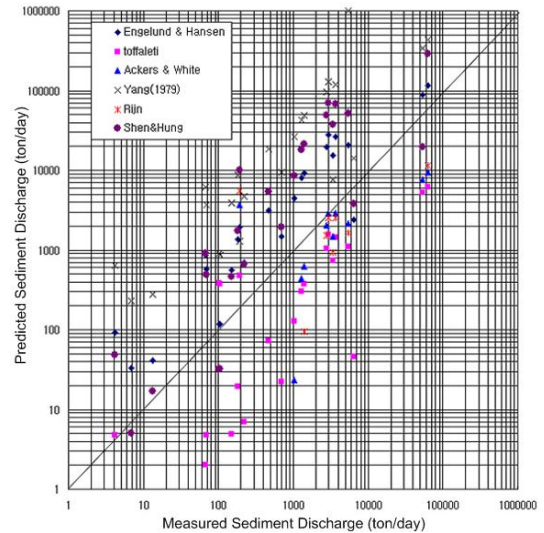


Fig. 4. Comparison of Measured Sediment Data and Sediment Transport Equations at Jeongok Station

Table 1. Boundary Conditions for Numerical Simulations

Cases		Boundary Conditions		Gate Opening			Simulation Time Duration
		Discharge	Downstream Water Stage	Sed. Rel. Pipe	Eco Passage	Spillway	
1D	Before Dam Construction	Annual Mean Daily Discharge: 28.3m³/s	Dam Water Stage: 42.03 EL.m	Closed	Closed	Closed	10, 20, 30, 50, and 100 years
	After Dam Construction		Dam Water Stage: 47.31 EL.m				
		Annual Hydrograph	Variable Water Stages	Variable	Variable	Variable	1 year and 100 years
2D	Before the Installation of Sediment Release Pipe	Annual Mean Daily Discharge: 28.3m³/s	Dam Water Stage: 55.0 EL.m	Closed	Closed	Closed	10, 20, 30, 50, and 100 years
	After the Installation of Sediment Release Pipe	Annual Mean Daily Discharge: 28.3m³/s	Dam Water Stage: 47.31 EL.m	Open	Open	Closed	10, 20, 30, 50, and 100 years
		200-yr Recurrence Flood: 5,943m³/s	Dam Water Stage: 114.4 EL.m	Open	Closed	Open	3 days

변동 모의구간은 연평균 유량 조건에 대해 1차원 HEC-6 결과를 반영하여 댐 건설 전 후의 하상변동 차이가 나타나는 2.1 km 구간으로 선정하였으며 200년 빈도 홍수의 경우 상류 13.5 km 구간 내에서의 흐름 및 하상변동을 모의하였다. 수치모의를 위한 유량, 하류수 위조건, 문비개폐조건, 모의기간, 분석내용 등은 Table 1과 같다.

수치모의를 위한 지형자료는 한탄강수계 하천정비기본계획(건설교통부, 1998)의 도면을 이용하여 구축하였으며 HEC-6의 1차원 수치모의를 위한 자료는 횡단면 자료와 단면간의 거리를 이용하였고 2차원 수치모의에서 만곡부 등의 복잡한 지형을 구현하기 위해 CAD 도면상의 등고선, 측량점 위치, 표고 및 설계도상의 구조물 위치 등을 고려하여 요소망의 각 절점에서 선형 보

간 하였다. 2차원 흐름 및 하상변동 모의를 위해 9,640개의 요소와 28,830개의 절점으로 구성된 유한 요소망을 Fig. 5와 Fig. 6과 같이 구성하였다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 한탄강홍수조절댐의 경우 공사 중에 설치될 가물막이댐을 공사가 끝난 후에도 철거하지 않고 상류로부터 유입될 수 있는 큰 입자의 사석 또는 유송잡물들로 인해 배사구 유입부가 차단될 수 있는 문제점 등을 해결하는데 활용하도록 설계되었다.

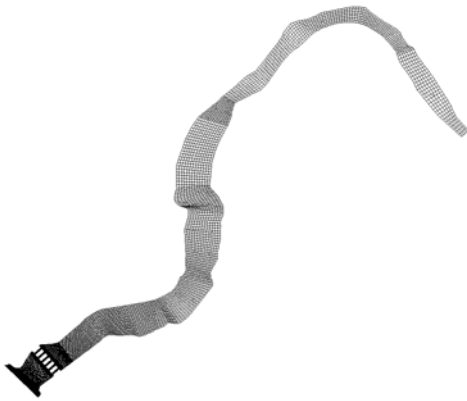


Fig. 5. Finite Element Meshes for 2D Modeling (whole section)

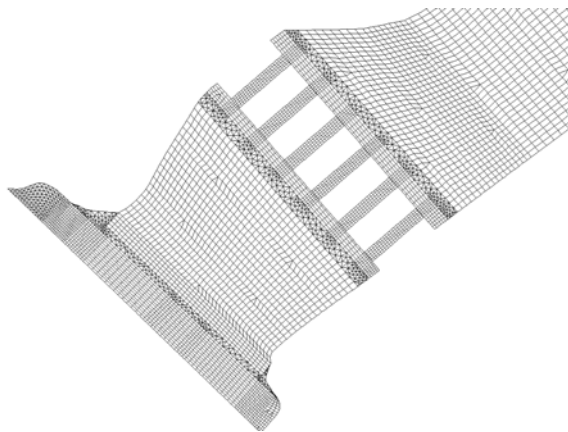


Fig. 6. Finite Elements Meshes near the Cofferd Dam

한탄강에서의 조도계수는 한탄강수계 하천정비기본계획(건설교통부, 1998)에 있는 0.033을 적용하였다. 난류교환계수(turbulent exchange coefficient)값은 등방성으로 가정하여 xy 방향 접선 및 법선항 모두 얇은 하천에 해당하는 $2,500 \text{ N} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$ 을 택하였다. 수온은 홍수시 평균수온인 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 설정하였으며 흐름모의를 위한 대상구간의 초기수위는 전 단면에 걸쳐 하류부 경계조건과 동일한 수위를 설정하였다. 한편 반복횟수는 100회, 수렴조건으로는 0.001m로 하였다. 2차원 SED2D 모형을 이용한 수치모의에 필요한 기타 입력 자료로 모델 조절항목(Model Control)에서 수리학적 하상 전단응력

(Hydraulic bed shear stress)은 log velocity 방정식을, Crank-Nicholson θ 값은 default 값인 0.67을 각각 사용하였다.

3. HEC-6 모형을 이용한 1차원 하상변동 모의

3.1 연평균유량 발생시 댐 건설 전 후의 하상변동 모의

HEC-6 모형은 하천이나 얇은 저수지의 세굴 및 퇴적 현상을 분석하기 위한 것으로 1차원 정류 모형 또는 수문곡선을 잘게 분류하여 실행하는 준정류 모형이다. 수리계산과 유사계산을 별도로 수행하는 비조합(uncoupled) 모형이며 저수지내의 유사 퇴적량, 퇴적위치, 댐 하류 하천의 사상 상승 및 저하 등을 분석할 수 있다.

본 연구에서는 HEC-6 모형(Version 4.1)을 이용하여 연평균 유량 발생시 댐 건설 전의 하상변동을 모의한 결과 댐에서 상류 7.8 km 까지는 모의기간이 길어져도 눈에 띄는 변화가 없지만 댐에서 상류 7.8 km 이후로는 퇴적과 침식의 작용이 활발히 진행되는 것을 알 수 있다. 최대 침식위치는 댐에서 상류 8 km 지점으로 1.99 m의 침식이 발생하였으며 최대 퇴적위치는 댐에서 상류 7.4 km 지점에서 2.02 m의 퇴적이 발생하였다(Fig. 7). 이러한 최대 퇴적고와 그 위치는 댐 건설 후 모의 결과와 동일한 것으로 나타났으며 그 결과는 Fig. 8과 같다.

1차원 하상변동 모형인 HEC-6을 이용하여 한탄강홍수조절댐 지점에서의 10년, 20년, 30년, 50년, 100년 동안의 하상변동을 모의한 결과 한탄강홍수조절 댐 설치 전과 설치 후의 수위는 댐 설치와 상관없이 변화가 크지 않은 것으로 나타났으며 댐 상류 7.8 km 까지는 댐 건설 전에 비해 하상고 변화가 적게 발생하였다. 특히 댐 건설로 인한 하류단 수위 변화가 있어도 하상변동의 영향은 댐에서 상류 2 km 구간을 넘지 않는 것으로 나타났으며 모의기간이 길어지더라도 이러한 현상은 크게 변하지 않는 것으로 나타났다.

3.2 댐 건설 후 유량변동을 고려한 하상변동 모의

한탄강홍수조절댐 구역에서의 유량변동에 대한 하상변동을 모의하기 위해 한탄강댐 지점에서의 대표 유량 수문곡선과 이러한 유량 조건들이 상류로부터 유입되었을 때의 댐 지점 수위자료가 반드시 필요하다. 대표 수문곡선 산정을 위해 1968년부터 1999년까지의 연도별 일평균 유량분석 자료가 활용되었으며 한탄강댐 지점에서의 연평균 유량변동은 Table 2와 같다.

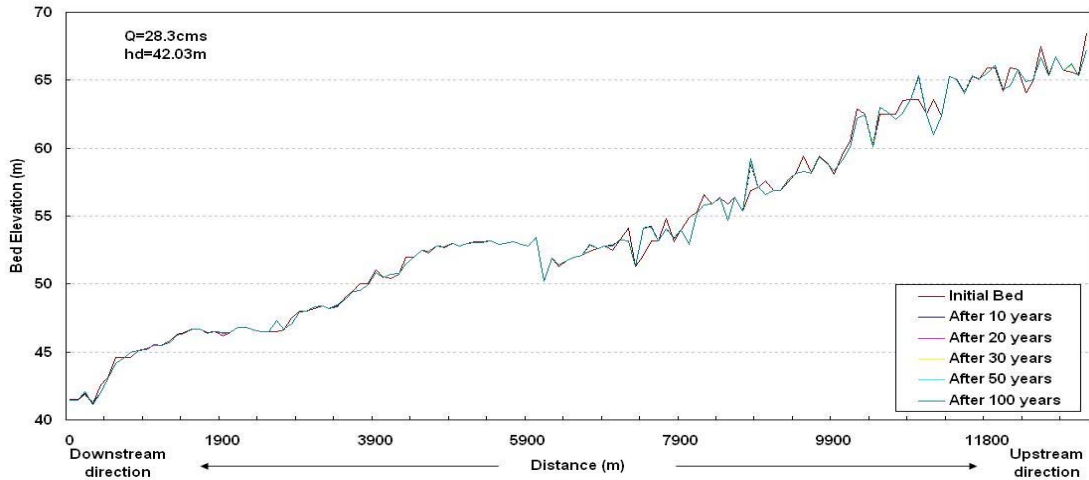


Fig. 7. Bed Elevation Changes before the Construction of the Dam ($Q = 28.3 \text{ m}^3/\text{s}$)

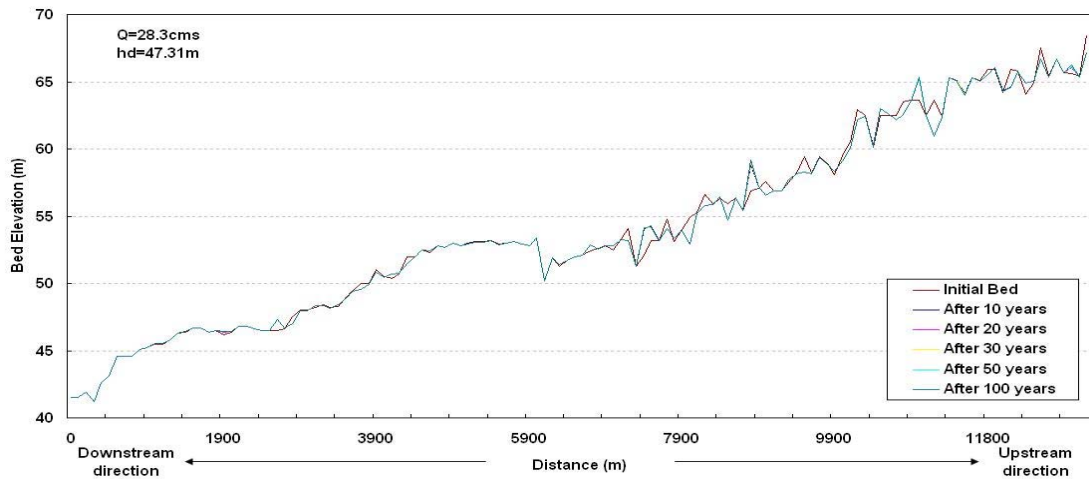


Fig. 8. Bed Elevation Changes after the Construction of the Dam ($Q = 28.3 \text{ m}^3/\text{s}$)

Table 2. Classified Annual Discharge Hydrograph

No.	Discharge (cms)	Water Stage at the Dam (EL.m)	Occurrence Days
1	23.2	47.2	316
2	67.6	47.5	24
3	111.8	47.9	9
4	156.1	48.3	5
5	200.3	48.8	3
6	244.6	49.5	1
7	288.8	50.2	2
8	377.3	52.0	2
9	465.8	54.1	1
10	642.8	59.6	1
11	864.0	68.8	1

HEC-6 모형을 이용하여 추가적으로 수행된 하상변동 모의는 유량변동을 고려한 1년(365일)과 100년 모의 조건으로 구분되며 Fig. 7과 Fig. 8은 유량변동을 고려하였을 경우 1년 후 그리고 100년 후 하상변화고를 초

기하상고와 같이 비교한 그래프이다.

유량변동을 고려한 1년 모의 조건에서는 상류 2 km 지점에서부터 7.8 km 까지 전체적으로 침식과 퇴적이 발생하였으나 그 정도는 7.8 km 이 후 상류 구간에서

발생한 하상 변동량에 비해 매우 작은 것을 확인할 수 있었으며 7.8 km 지점을 기준으로 상류로 갈수록 하상 변동이 점차 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 유량변동을 고려한 100년 후의 하상변동 모의 결과는 댐에서부터 상류 6 km 구간까지 전반적으로 하상고가 상승하였으며 6 km 이후 상류 구간에서는 하상고가 저하되어 유사가 침식되는 현상이 발생하였다. 모의 기간이 1년인 경우와 100년인 경우의 하상고 변화를 비교해 본 결과 특히 댐 상류 8.8 km 지점에 최대 퇴적이 발생한 것으로 나타났다(Fig. 9).

한탄강댐 지점에서의 유량변동을 고려한 하상변동 모의 결과와 연평균유량이 지속적으로 발생했을 경우의 HEC-6 모형을 이용한 하상변동 모의 결과를 Fig. 10과

같이 비교하였다. 유량변동을 고려한 조건의 경우는 홍수에 발생할 수 있는 유량 조건들이 복합적으로 고려가 되어 있기 때문에 지속적인 연평균 유량이 발생할 경우의 하상고 변화보다 하상고의 변화가 더 크게 발생하였다. 특히 유량변동 100년 후 조건일 경우 6 km 지점을 전후로 하상이 상류부분은 침식되고 하류부분은 퇴적된 성향이 확실히 나타남을 알 수 있다. 또한 100년 모의의 경우 유량변동을 고려한 조건과 연평균 유량(28.3 m³/s) 조건 모두 댐 상류 8.8 km 지점에서 하상고가 상승하였다. 이는 댐 상류 8.8 km 지점의 단면 하폭이 급격히 증가함에 따라 유속이 감소하여 상류로부터 유입되는 유사가 이 지점에서 퇴적되기 때문인 것으로 판단된다.

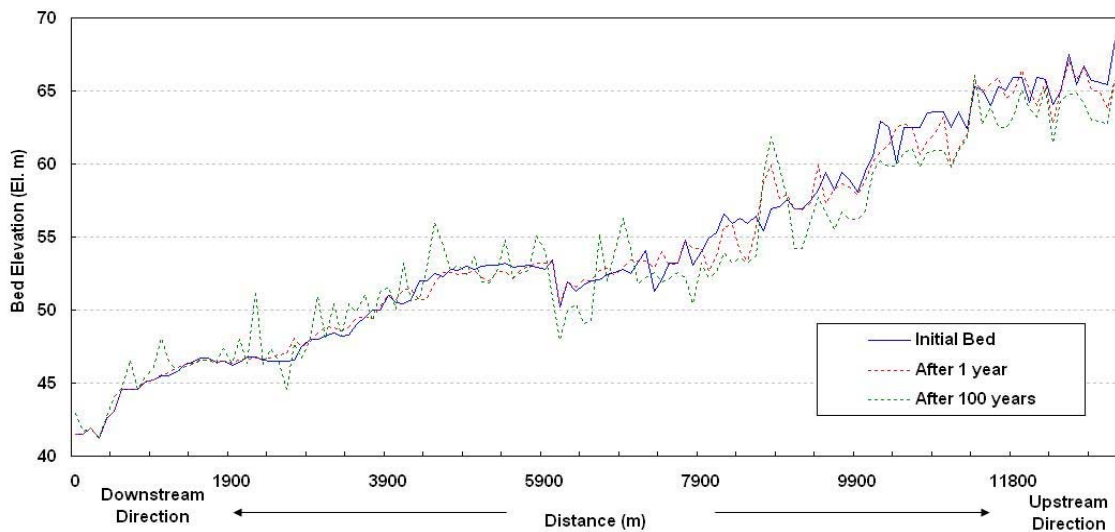


Fig. 9. Comparison of Bed Elevation Changes after 1 Year and 100 Years for the Annual Discharge Hydrograph

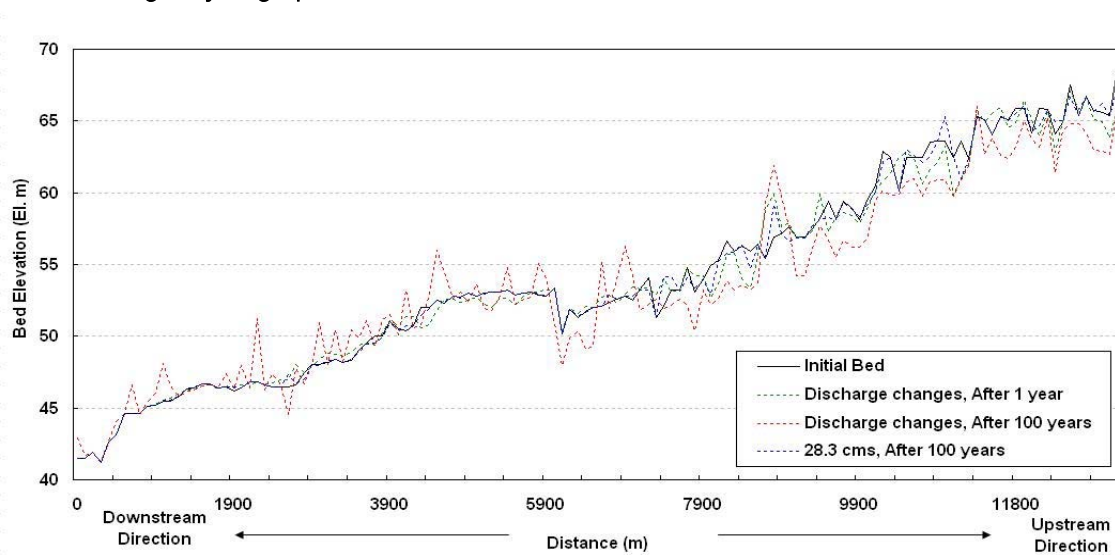


Fig. 10. Comparison of Bed Elevation Changes after 1 Year and 100 Years for the Annual Discharge Hydrograph and Annual Mean Daily Discharge (28.3 m³/s)

4. 배사설비 설치 유무에 따른 2차원 수치모의 결과 및 분석

4.1 연평균 유량 발생시 하상변동

배사설비 설치 전 후의 배사구 주변 및 가물막이댐 주변의 하상변동 모의를 위해 2차원 정상 및 동수역학적 유사이송과 하상변동을 모의할 수 있는 SED2D 모형을 이용하였다. SED2D는 점토질 하상, 모래 하상에 대한 유사이송을 분석하고 입경별이 아닌 대표입경에 대해서만 모의가 가능하며 총 유사량 공식은 Ackers and White(1973) 공식만 적용 가능하다. 배사관(생태통로) 유무에 따른 하상변동 검토를 위해 모의구간은 1차원 HEC-6 결과를 반영하여 댐 건설 전·후의 하상변동 차이가 나타나는 약 2km 까지로 결정하였으며 유량조건과 모의기간은 연평균유량 28.3 m³/s 일 때 10년, 20년, 30년, 50년 및 100년에 대해 모의하였다. 이와

같은 기본가정을 바탕으로 본 댐의 제체 내에 배사관의 설치 전·후에 따른 댐 상류구간에서의 유사이송 및 하상변동을 모의한 결과는 다음과 같다.

모의구간 내에서 배사관의 유무와 상관없이 댐 제체의 영향으로 침식보다 퇴적이 활발하게 진행되었으며 Fig. 11과 Fig. 12에서 확인할 수 있듯이 댐 상류 10 m 지점과 가물막이댐 상류 120 m 지점에서 가장 큰 퇴적이 발생하였다. 최대 퇴적고는 Table 3에 제시된 바와 같이 배사관 설치 전에는 2.12 m 이나 배사관 설치 후에는 1.08 m이고 설치 전·후의 퇴적고는 약 1 m 정도 차이가 발생하였다. 또한 댐 건설 전·후와 상관없이 모의기간이 10년이 지나면 퇴적되는 유사량의 변화가 크지 않은 것으로 나타나 하상이 평형상태에 도달한 것으로 판단된다. 따라서 한탄강홍수조절용댐의 댐 저부에 설치된 배사관의 배사효과는 저수지 내의 퇴적고를 약 1 m 정도 저감시키는 것으로 나타났다.

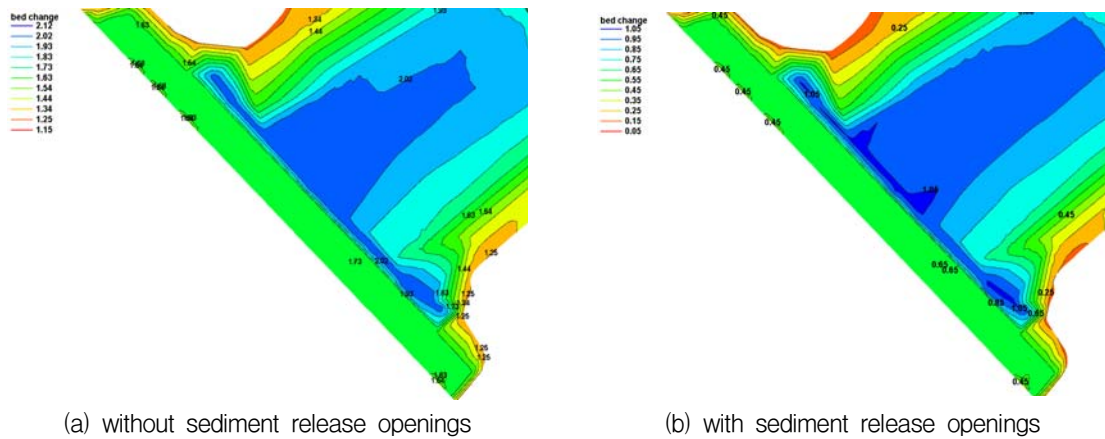


Fig. 11. Bed Elevation Changes near the Dam after 100 Years for the Annual Mean Daily Discharge (28.3 m³/s)

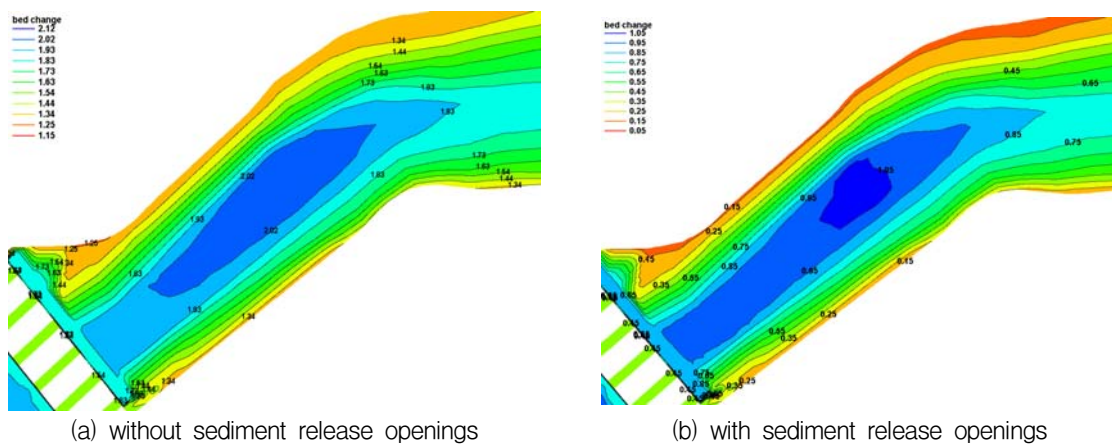


Fig. 12. Bed Elevation Changes near the Cofferdam after 100 Years for the Annual Mean Daily Discharge (28.3 m³/s)

Table 3. Maximum Bed Changes for the Annual Mean Daily Discharge (28.3 m³/s)

Maximum Bed Changes	After 10 yrs	After 20 yrs	After 30 yrs	After 50 yrs	After 100 yrs
With the Sediment Release Pipe	2.055 m	2.092 m	2.102 m	2.111 m	2.120 m
Without the Sediment Release Pipe	1.072 m	1.079 m	1.081 m	1.083 m	1.084 m

4.2 배사설비 설치 후 200년 빈도 홍수 발생시 댐 상류 하상변동

배사설비 설치 후 200년 빈도 홍수량(5,943 m³/s)일 때의 댐 상류 흐름모의 결과는 Fig. 13과 같다. Fig. 13(a)는 유속분포를 나타낸 그림으로써 상류에서는 주수로 쪽으로 약 0.8 m/s에서 1m/s의 유속이 분포하고 있지만 Fig. 13(b)를 보면 홍수터로 올라갈수록 유속이 0에 가까워지는 것을 확인 할 수 있다. 한편 흐름이 댐에 가까워질수록 유속이 느려지지만 댐에서 상류 약 2.6 km 지점에서는 지형의 상승으로 인해 유속이 증가하면서 흐름이 양방향으로 갈라지는 형태를 확인할 수 있으며 하류로 갈수록 유속이 0.02 m/s에서 0.5 m/s로 다시 감소하였다.

배사설비 설치 후 댐 상류구간에 대한 200년 빈도 홍수량일 때 유사이송 및 하상변동 모의결과는 Fig. 14와 같다. 모의 결과 전반적으로 침식보다는 퇴적이 활발하게 작용하였으며 특히 2차원 하상변동 모의 조건으로 매 계산단계(time step)마다 상류 유입부에서 유사 가 일정하게 유입되는 조건으로 모의를 수행하였기 때문에 유입되는 대부분의 유사 가 댐 근처까지 이송되지 않고 13.5 km 상류 부분에 퇴적되는 현상을 보였다. 댐에 가까워질수록 퇴적되는 유사량이 점점 줄어들어 홍수터에서는 약 0.01 m 하상이 퇴적되었고 주수로 부근에서는 약 0.03 m의 하상퇴적이 발생하였다(Fig. 14(a)). 하지

만 상용여수로(Fig. 14(b)에서 양 끝에 위치한 유입구)와 배사관 유입부(Fig. 14(b)에서 가운데 위치한 두 개의 유입구) 쪽에서는 각각 0.886 m와 0.785 m의 하상이 침식되는 현상이 국지적으로 나타났다(Fig. 14(b)).

5. 결론

본 연구에서는 임진강 유역의 홍수재해 방지를 위한 한탄강홍수조절댐의 건설로 인한 댐 건설 전 후의 퇴사 현상을 1차원 수치모형을 이용하여 모의하였고 댐 건설 후 평상시 흐름 및 유사 소통의 차단을 방지하기 위한 목적으로 댐에 설치되는 배사관 시설로 인한 댐 상류의 하상변동 특성을 모의하기 위해 2차원 수치모의를 실시하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

HEC-6 모형을 이용하여 연평균 유량 발생시 댐 건설 전 후의 하상변동을 모의한 결과 댐에서 상류 7.8 km 까지는 모의기간이 길어져도 눈에 띄는 변화가 없지만 댐에서 상류 7.8 km 이후로는 퇴적과 침식의 작용이 활발히 진행되는 것을 알 수 있었으며 최대 침식 및 퇴적 위치와 정도는 댐 건설 전 후 동일한 것으로 나타났다. 즉, 댐 건설로 인한 하류단 수위 변화가 발생하더라도 하상변동의 영향은 댐에서 상류 2 km 구간을 넘지 않는 것으로 나타났으며 모의기간이 길어지더라도 이러한 현상은 크게 변하지 않는 것으로 나타났다.

또한 일정한 유량 조건 외에 연간 유량변동을 고려

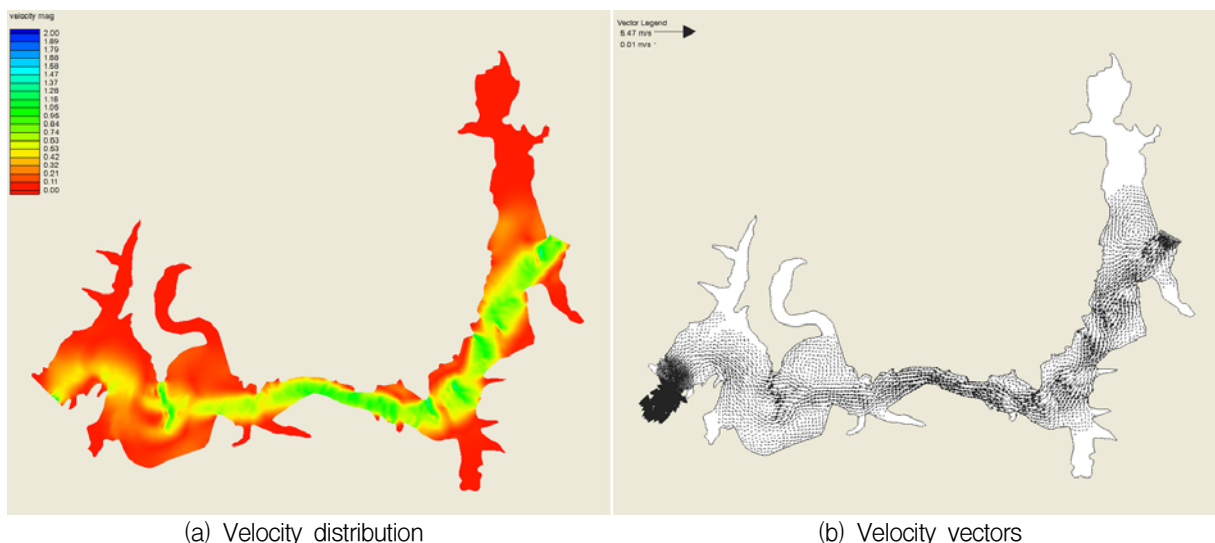
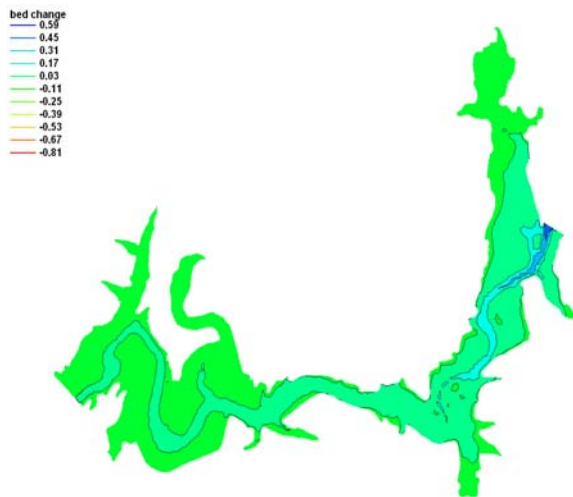
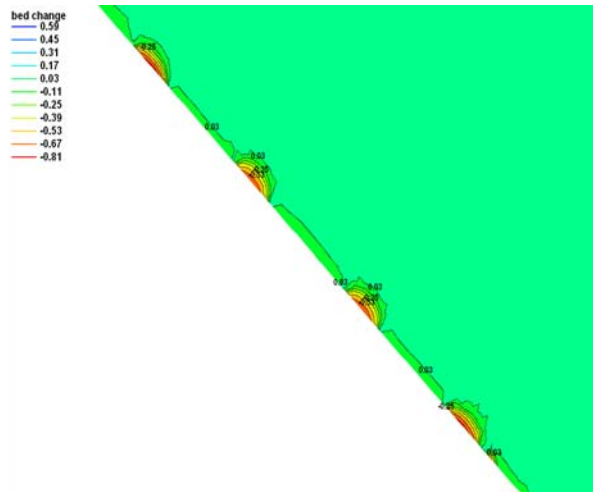


Fig. 13. Flow Velocity Distribution for the 200-year Recurrence Flow (Flow direction: ←)



(a) 13.5 km



(b) Sediment release openings

Fig. 14. Bed Changes for 13.5 km Upstream of the Dam after 3 Days for the 200-year Recurrence Flow

한 1차원 수치모의 결과, 홍수에 발생할 수 있는 유량 조건들이 복합적으로 고려가 되어 있기 때문에 하상고의 변화가 지속적인 연평균 유량이 발생할 경우의 하상고 변화보다 더 크게 발생하였으며 상류 쪽으로 갈수록 하상이 침하되는 현상이 나타났다. 특히 단면 하폭이 급격히 증가하는 지점에서는 유속 감소로 인해 상류로부터 유입되는 유사가 이 지점에서 장기적으로 퇴적되는 현상이 발생할 것으로 예측되었다.

2차원 수치모의 결과, 모의구간 내에서 배사관의 유무와 상관없이 댐 제체의 영향으로 일부 퇴적이 진행되는 일반적인 현상과 일치되는 결과를 얻었다. 본 연구의 경우 댐 상류 10 m 지점과 상류 가물막이댐 상류 120 m 지점에서 가장 큰 퇴적이 발생하였다. 댐 건설 전·후와 상관없이 모의기간이 10년이 지나면 퇴적되는 유사량의 변화가 크지 않은 것으로 나타나 하상이 평형 상태에 도달한 것으로 판단된다. 또한 배사관 설치 전·후의 최대 퇴적고 예측결과로부터 홍수조절용댐의 댐 저부에 설치된 배사관은 저수지 내의 퇴적을 저감시키는 배사효과가 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

건설교통부 (1998). **한탄강수계 하천정비기본계획**
 건설교통부 (2002). **임진강유역 홍수피해 원인조사 및
 항구대책 수립 보고서 (I 권: 홍수피해 원인조사 및
 대책)**
 손민영 (2002). 준정류 모형을 이용한 저수지 퇴사 및
 배사현상의 수치모의. 연세대학교 대학원 석사학위
 논문

안재현, 장수형, 최원석, 운용남 (2006). 저수지 장기운
 영을 위한 퇴적도사의 효율적 관리(1) - 저수지 퇴사
 량 산정, 한국물환경학회지, 제22권, 제6호, pp.
 1088-1093

안재현, 장수형, 최원석, 운용남 (2006). 저수지 장기운
 영을 위한 퇴적도사의 효율적 관리(2) - 저수지 퇴사
 분포 및 저감방안, 한국물환경학회지, 제22권, 제6호,
 pp. 1094-1100

한국건설기술연구원 (1989). **하천유사량 산정방법의
 선정기준개발**

Ackers, P. and White, W.R. (1973). "Sediment
 transport: New approach and analysis." *J. Hyd.
 Div. ASCE*, 99, no. HY11: pp. 2041-2060.

Brandt, S.A. (1999). *Reservoir Desiltation by Means
 of hydraulic Flushing: Sedimentological and
 Geomorphological Effects in Reservoir and
 Downstream Reaches As Illustrated by the Cachi
 Reservoir and the Reventazon River, Costa Rica.*
 Ph.D. Thesis submitted to the institute of Geography,
 University of Copenhagen.

D'Rohan, W. (1911). "The silting up of reservoirs and
 canals and some methods for preventing same."
Engin. and Contract, Vol. 35, pp. 56-58.

Engelund, F. and Hansen, E. (1967). A Monograph on
 Sediment Transport to Alluvial Streams.
 Copenhagen, Teknik Forlag

Fan, J. and Jiang. (1980). On method for the
 desiltation of reservoirs. International Seminar of
 Experts on Reservoir Desiltation, Tunis, Tunisia.

- Guo, Q., Fan, C.Y., Raghaven, R. and Field, R. (2004). "Gate and Vacuum Flushing of Sewer Sediment: Laboratory Testing." *Journal of hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 5 pp. 463-466
- Jassen, R.H.A. and Shen, H.W. (1997). "The development of equilibrium profile for slushing channels." *Energy and water : Sustainable Development. Proceeding of Theme D, Water for Changing Global Community, 27th Congress of the IAHR*, San Francisco, California Aug. 10-15, pp. 108-113
- Lai, J.S. and Shen, H.W. (1996). "Flushing Sediment Through Reservoirs." *Journal of hydraulic Research*, Vol. 34, No. 2, pp. 237-255
- Liu, J., Minami, S., Otsuki, H., Liu, B., and Ashida, K. (2004). "Prediction of Concerted Sediment Flushing." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 130, No 11, pp. 1089-1096.
- Shen, H.W. and Hung, C.S. (1972). An engineering approach to total bed-material load by regression analysis. Proc. sedimentation Symposium, ed. H.W. Shen. Berkeley, Calif.: Water Resources Pub.
- Talebbeydokhti, N. and Naghshineh, A. (2004). "Flushing sediment through reservoir." *Iranian Journal of Science & Technology. Transaction B*. Vol. 28, No. B1, pp. 119-136
- Toffaleti, F.B. (1969). "Definitive Computations of Sand Discharge in Rivers." *J. Hyd. Div. ASCE*, Vol. 95, No HY1, pp. 225-246
- van Rijn, L.C. (1984). "Sediment transport, Part I: Bed load transport." *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol 110, No 10, pp. 1431-1456
- Yang, C.T. (1979). "Unit Stream Power Equation for Total Load". *J. Hyd. Div. ASCE*, Vol. 40: pp. 123-138.
- Yang, C.T. (2003). *Sediment Transport: theory and practice*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.

(논문번호:09-18/접수:2009.02.09/심사완료:2009.03.19)