사연댐 운영수위 하강에 따른 반구대 암각화지점의 수리학적 특성 분석

Analysis on Hydraulic Characteristics at Bangudae Petroglyph by Water Level Declination of Sa-yeon Dam

김하룡* · 김용태** · 박무종*** · 정상만****

Kim, Hayong · Kim, Yongtae · Park, Moojong · Jeong, Sangman

Abstract

Assesment of hydraulic Characteristics has been carried out of Daegokcheon because Sa-yeon dam water level decline operation for proper due to world cultural heritage edged Bangudae petroglyphs. Analyses on the Dae-gok stream were conducted by changing the water level of the Sa-yeon Dam by using the 1D HEC-RAS numerical model for the inundation of height variations and 2D RMA-2 model for the flow characteristics. As a result of the modeling, if the water elevation on the Sa-yeon Dam is higher than EL.52.5 m, the Bangudae Petroglyphs starts to be flooded. The Bangudae Petroglyphs starts submerging from EL.60.0 m to EL.56.5 m on Sa-yeon Dam. The Bangudae Petroglyphs water level increased by 2.7 m for 20year and 3.47 m for 200year flood frequencies, 73% and 93.8% of the inundation occurs, respectively. As a result of the change on the water level of the Sa-yeon Dam, from EL.52.5 m to EL.60.0 m, the flood flow characterization on the Bangudae Petroglyphs showed that the velocity multiplied by 2.5 times the normal flow. The maximum velocity directly approaches the Bangudae Petroglyphs thus, causing damaged.

Key words : Bangudae Petroglyphs, HEC-RAS, RMA-2

요 지

본 연구는 세계적 문화유산인 반구대암각화의 침수방지를 위해 사연댐의 운영수위를 하강시키는 것이 반구대암각화 보존에 적정한지를 대곡천의 수리학적 특성을 분석하여 평가하였다. 이를 위해 1차원 하천해석 모형인 HEC-RAS를 이용하여 사연댐 수위 변화에 따른 반구대암각화의 침수높이를 분석 하였고, 반구대암각화 지점의 유속 및 흐름을 2차원 하천해석 모형인 RMA-2를 이용하여 대곡천의 영향을 분석하였다. 수치모의 결과 평수기 유량조건에서 사연댐의 수위변화에 따른 반구대암각화의 침수 높이는 사연댐의 수위가 EL.60.0 m에서 EL.56.5 m까지는 반구대암각화 전체가 침수되었으며, EL.52.5 m일 때는 반구대암각화는 침수되지 않는 것으로 분석되었다. 사연댐의 수위가 EL.52.5 m일 때 20년 빈도에서 반구대암각화는 2.7 m(73%)의 침수가 발생하였고, 200년 빈도시에는 3.47 m(93.8%)의 침수가 발생하는 것으로 분석되었다. 홍수기 유량조건일 때 반구대암각화 지점의 흐름특성 분석결과 사연댐의 수위를 EL.60.0 m에서 EL.52.5 m로 낮출 경우 유속이 약 2.5배 증가하였으며, 최대유속선이 반구대암각화를 지남으로써 유속에 의한 훼손을 증가시키는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 반구대암각화, HEC-RAS, RMA-2

1. 서 론

최근 물 부족에 따른 댐건설과 지구온난화에 의한 수위상승으로 인한 문화재의 침수가 빈번해짐에 따라 세계 여러 나

라에서는 자국의 문화재를 침수로부터 보호하기 위한 노력을 기울이고 있다. 그 예로 이집트 경우 불가피한 댐건설로 침수위기에 처한 누비아 유적을 보호하기 위하여 유네스코에 지원을 요청하여 미국, 이탈리아, 스페인 등 세계 각국의 도

*정회원. 공주대학교 건설환경공학과 박사과정 (E-mail: civilkhy@kongju.ac.kr)
Member. Ph.D Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

** (주)삼육건설엔지니어링
Sam Yook Engineering CO., Ltd.

***정회원. 한서대학교 토목공학과 교수
Member. Professor, Department of Civil Engineering, Hanseo University

****교신저자. 정회원. 공주대학교 건설환경공학부 교수(Tel: +82-41-521-9300, Fax: +82-41-568-0287, E-mail: smjeong@kongju.ac.kr)
Corresponding Author: Member. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

움을 받아 누비아 유적을 수몰되지 않는 안전한 지역으로 옮긴바 있으며, 이탈리아는 아름다운 유적 도시인 베니스가 지구온난화로 인한 해수면 상승으로 만조시 침수피해가 발생하자 이를 보호하기 위한 방벽 건설공사인 ‘모세 프로젝트’ 진행중에 있다. 또한, 포르투갈의 포스코아 암각화의 경우 코아댐 건설로 인하여 포스코아 암각화가 침수 위기에 처하자 NGO 및 시민들의 반대운동과 언론의 끈질긴 노력에 의하여 댐 건설을 중단시킨바있다.

국보 제285호인 반구대암각화는 선사시대(신석기 내지 청동기)의 생활상 및 한국 고대사의 정체성을 세우는 중요한 문화적 지표 및 고고학, 인류학, 지리학, 해양학, 미술학 등 다양한 분야의 학문적 연구 자료로 활용될 수 있는 학술적 가치가 높은 문화유산이다. 그러나 울산광역시와 생활 및 농업용수 공급을 위해 반구대암각화가 위치한 대곡천에 사연댐(1965)이 건설되면서 년 중 약 8개월간은 암각화가 침수되고 있는 실정이며 장기간(40년 이상) 반복되는 침수와 노출에 의해 암각화의 훼손이 증가되고 있다.

반구대암각화에 대한 연구는 Jang(2002)이 사연댐의 홍수위를 반구대암각화의 표고보다 낮은 EL. 50.0 m로 유지하기 위한 빈도별 상시만수위 및 용수공급 가능량을 산정하였으며, Kim(2002)은 암각화 보호를 위한 토목공학적 공법으로 사연댐 상시만수위를 낮추는 방안, 기존의 대곡천 유로를 변경하는 방안, 그리고 자연형 토석제방을 이용하는 방안을 제시하였다. Cho(2009)는 대곡댐 건설 후 대곡댐과 사연댐의 실제 유입량 및 용수공급량을 이용하여 가자야법으로 기존의 유입량 자료를 검정하고, 사연댐의 상시만수위를 EL. 52.0 m로 조절시 대곡댐과 사연댐의 용수공급 능력을 검토하였으며, Hwang *et al.* (2010)은 반구대암각화가 침수되면서 수분에 의한 풍화작용으로 암각화의 파괴가 가중되고 있음을 제시하였다.

만곡부 흐름에 관한 연구로는 나선형 흐름이 주로 수로벽면의 마찰, 원심력 및 연직 속도분포에 의하여 일어난다고 밝힌 Chow(1959)의 연구 이래로 Rozovski(1975)는 부드러운 하천 만곡부 단면에서 이차류 유속은 흐름방향의 유속과 수심에 비례하고, 만곡부의 곡률반경에 반비례한다는 이차류의 유속 분포식을 제안하였으며, 그의 식은 점진적인 만곡에 대하여 비교적 잘 맞는 것으로 나타났다. 그 후 Flokstra(1977), Zimmermann and Kennedy (1978) 등에 의하여 만곡부에서의 이차원류 예측에 관한 연구가 진행되었다. DeVriend and Geldof (1983)는 연속방정식과 운동량 방정식을 적용하여 수심이 얇은 만곡수로에서 수심평균된 주유속의 이동경로를 실측자료와 더불어 연구하였으며 Johannesson and Parker (1989, a, b)는 만곡하천에서의 유속 재분포를 예측하기 위하여 3차원 운동방정식으로부터 이차류에 관한 차분방정식을 유도하였다. 만곡부 흐름에 관한 국내의 연구로는 Yoon(1986)이 만곡수로내의 유속분포, 수위변화, 최대유속선의 이동경로를 연구하였으며, Jeong(2000)은 만곡수로의 흐름특성해석을 위하여 모형수로에 RMA-2 모형을 적용하는 등 최근 RMA-2를 실제하도의 만곡부에 적용한 연구가 활발히 진행 중이다.

Hwang *et al.* (2010)의 연구 결과처럼 수분에 의한 풍화작용이 암각화를 파괴하는 가장 큰 원인이므로 반구대암각화 보존을 위해서는 암각화가 침수되지 않아야한다. 그러나 반구대암각화에 대한 기존 연구는 암각화의 침수 방식을 위해 사연댐의 상시만수위를 저하시키고 이에 따른 용수공급능력을 검토하는 것으로 한정되어 있으며, 특히 수위 저하에 따라 저수지가 하천으로 바뀐 대곡천의 흐름특성이 반구대암각화에 미치는 영향에 대한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구는 평수기 유량조건에서 사연댐의 수위변화에 따른 반구대암각화의 수위를 분석하여 반구대암각화가 평수기 유량조건에서 침수되지 않는 사연댐의 수위를 결정하였으며 저수지 홍수추적을 통해 빈도별 홍수량에 따른 반구대암각화의 침수 높이를 산정하였다. 또한 수위 하강에 따른 반구대암각화 지점의 흐름특성을 분석하여 결정한 수위가 반구대암각화 보존을 위하여 적절한지를 평가하였다.

2. 연구 대상지역의 특징 및 수리학적 검토 범위

2.1 반구대암각화의 위치와 특징

반구대암각화는 울산광역시 울주군 언양읍 대곡리 반구동에 위치하고 있는 반구대암각화는 Fig. 1과 같이 상부의 기반암이 전방으로 2~4.5 m 돌출된 지형 조건으로 인해 강우시 빗물로부터 보호되지만 1965년 울산지역의 식수 및 농업용수 공급을 위해 준공된 사연댐의 담수로 인한 수위상승으로 년 중 약 8개월이 침수되고 있다. 석조문화재는 온도, 강수, 바람, 습도 등의 기후적 요인에 의한 풍화작용으로 점진적으로 훼손된다. 특히 수분은 암석에 형성된 절리를 따라 침투하여 겨울철에는 동결로 인한 부피 팽창으로 절리를 확장시켜 암석을 파괴시키며 여름철에는 높은 온도에서 암석의 구성광물과 반응하여 형성된 다양한 풍화산물들이 물리적, 화학적 풍화작용을 일으켜 암석을 훼손시킨다.(choi *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2003) 반구대암각화는 해발고도 EL.200 m 내외인 구릉지의 북서면 하부에 조성되어 있어 겨울철 동결, 용해의 반복 빈도가 적어 기계적 풍화작용을 지연시키는 역할을 하며 암각화의 상부는 돌출되어 있어 빗방울이 암각화에 직접 도달하지 않으며, 사람이 접근하기 힘든 위치에 있어 인위적인 훼손도 미약하나 사연댐의 수위로 인해 침수된 부분은 활

Fig. 1. Detail of Banguedae Petroglyphs

발한 풍화 작용으로 인해 훼손이 증가하고 있다. 이상과 같이 반구대암각화는 풍화작용에 유리한 위치적 특징에도 불구하고 침수에 의한 수분의 침투와 유속에 의한 침식 작용으로 훼손이 촉진되고 있다.

2.2 수리학적 검토 범위

본 연구의 범위는 반구대가 위치하고 있는 유역면적 129.63 km², 유로연장 26.04 km의 대곡천 유역으로 Fig. 2과 같이 반구대암각화 지점 상류 0.6 km(시점)부터 사연댐(종점)까지 총 5.2 km 구간은 1차원 수치모의(HEC-RAS), 반구대 상류 0.6 km부터 반구대암각화 하류 0.4 km지점까지 총 1.0 km 구간은 2차원 수치모의(RMA-2) 구간이다. 반구대암각화는 대곡댐 하류 4.1 km, 사연댐 상류 4.6 km 사이의 만곡부 우안 암석절벽에 높이 3.7 m, 폭 10 m, EL.53.0 m~EL.56.7 m에 위치하고 있다.

반구대암각화에 직접적으로 영향을 미치는 사연댐은 유효저수용량이 약 20.0×10⁶ m³으로 울산공업단지의 공업용수 공급을 목적으로 설치되었으며 설계당시의 저수지 현황 및 여수로 제원은 Table 1과 같다.

Fig. 2. Study Area.

Table 1. Sa-yeon Dam Characteristics

Classification		Sa-yeon Dam
Catchment Area		124.5km ²
Dam	Type	Center-Core Type Fill Dam
	Height/Length	46.0 m / 300.0 m
	Top Elevation	EL.66.4 m
Reservoir	Design Flood Level	EL.63.2 m
	Normal Pool Level	EL.60.0 m
	Inflow Discharge Level	EL.45.0 m
	Total Inflow Discharge	25.0×10 ⁶ m ³
	Effective Inflow Discharge	20.0×10 ⁶ m ³
Spillway	Design Flood Discharge (200year Frequency)	1,332 m ³ /s
	Design Outflow Discharge (200year Frequency)	720 m ³ /s
	Overflow Level	EL.60.0 m

사연댐 운영수위 하강에 따른 반구대 암각화지점의 수리학적 특성 분석

3. 수리해석모형의 기본이론

3.1 HEC-RAS 모형

반구대암각화에서의 침수높이를 산정하기 위하여 유역전체를 비교적 간단히 모의할 수 있는 1차원 하천해석 모형인 HEC-RAS(Hydrologic Engineering Center River Analysis System)를 이용하여 연구대상 구간인 5.2 km에 대하여 부등류 해석을 실시하였다. HEC-RAS 모형의 기본방정식으로는 동역학적방정식으로서 연속방정식과 운동량방정식으로 구성된다. 연속방정식은 시스템 내에서의 질량보존 개념이며 Eq. (1)과 같이 기술된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (1)$$

여기서, x 는 수로에 따른 거리, t 는 시간, Q 는 유량, A 는 단면적, q_l 는 저류량, 그리고 q_l 은 단위거리당 측방유입량을 나타낸다.

운동량방정식은 운동량의 변화가 시스템에 작용하는 외력과 같다는 것에 기초로 하며, 단일수로에 대해서 Eq. (2)와 같이 기술할 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (VQ)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (2)$$

여기서, g 는 중력가속도, S_f 는 마찰경사, 그리고 V 는 유속을 나타낸다.

3.2 RMA-2 모형

반구대암각화는 대곡천 만곡부 외측 우안 암석절벽에 위치하여 홍수시 빠른 유속으로 인한 세굴 및 유사 또는 유송잡물의 이동에 의한 훼손이 발생할 수 있다. 홍수시 하천의 만곡부나 협착부에서의 흐름은 기본적으로 2차원 흐름의 형태를 보여 1차원 하천해석 모형으로 하천 흐름 특성을 모의하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 2차원 흐름영역에서 자유표면, 상류흐름의 수평방향 유속성분과 수위를 계산하며, 하천의 특정 구간별 하천의 형상에 따른 정교한 흐름 분포를 비교적 간단한 방법으로 비교 가능한 2차원 RMA-2 모형을 이용하여 만곡부에 위치한 반구대암각화 지점의 흐름 특성을 분석하였다. RMA-2 모형은 Eq. (3) 연속방정식과 Eq. (4), (5) 운동량방정식을 지배방정식으로 하는 2차원 천수방정식을 Galerkin의 가중잔차법(weighted residual method)에 의하여 해석하며, 개략해와 정확해와의 차이인 잔차는 보간함수와 동일한 가중함수에 의해 가중되며 최소화된다.

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\epsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \tau_x = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\epsilon_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \tau_y = 0 \quad (5)$$

여기서, u , v 는 x , y 방향의 유속성분이며, h 는 수심, t 는 시간, g 는 중력가속도, a 는 하상표고, ε 은 확산계수, 그리고 τ_x , τ_y 는 x , y 방향으로 작용하는 마찰응력항을 나타낸다.

4. 반구대암각화 지점의 수위 분석

모형 구축은 ‘대곡천 하천정비기본계획 재정비 보고서(국토해양부, 2006)’ 자료를 이용하여 상류단 경계조건은 하천정비 기본계획의 빈도별 계획홍수량을 하류단 경계조건은 하천정비 기본계획에서 산정한 사연댐 여수로의 마루표고 EL.60.0 m 일 때 산정한 빈도별 침투수위를 적용하였다. 자료의 한계로 인하여 조도계수는 현장조사, 하천설계기준·해설의 자연하천의 조도계수 선정 기준(한국수자원학회, 2009) 그리고 하상 물질의 구성재료와 하상 상태, 과거의 홍수흔적 등을 종합적으로 고려한 ‘용수댐 퇴사량 조사 및 지형도 제작 보고서(사연댐)(한국수자원공사, 2005)’ 참고하여 반구대암각화 상류 0.6 km지점에서부터 반구대암각화 상류 0.2 km까지는 0.030 을, 반구대암각화 상류 0.2 km부터 사연댐까지는 0.028을 적

용하였다. 지형자료는 Fig. 3과 같이 반구대암각화 상류 0.6 km지점부터 사연댐까지 총 5.2 km 구간에 대하여 ‘용수댐 퇴사량조사보고서(사연댐)(한국수자원공사, 2005)’ 제작한 1:15,000 수치지도의 횡단측정 자료를 이용하였다. 먼저 평수기 유량조건에서 암각화가 침수되지 않는 사연댐 수위를 산정한 후, 이러한 조건에서 빈도별 홍수량 유하시 반구대암각화의 침수높이 산정을 위하여 저수지 홍수추적법을 이용하여 빈도별 홍수량에 따른 사연댐의 시간별 수위를 산정하였다. 그리고 산정된 사연댐의 시간별 수위와 대곡댐에서의 시간별 홍수량을 입력값으로 사용하여 HEC-RAS를 이용한 1차원 부정류 수치모의를 실시하여 빈도별 홍수량에 따른 반구대암각화 지점에서의 침수높이를 산정하였다.

4.1 평수기 반구대암각화 침수높이 산정

본 연구에서는 평수기 유량조건에서 사연댐의 수위변화에 따른 반구대암각화의 침수높이를 분석하여 반구대암각화가 평수기 유량조건에서 침수되지 않는 사연댐의 수위를 산정하였다. 상류단 경계조건으로는 ‘용수댐 퇴사량 조사 및 지형도 제작 보고서(한국수자원공사, 2005)’에서 산정한 대곡천의 평수량인 $31 \text{ m}^3/\text{s}$ 를, 하류단 경계조건은 사연댐의 수위를 EL.52.5 m부터 0.5 m씩 증가시켜 적용하였으며 조도계수는 앞에서 설명한 것과 같이 0.030~0.028을 적용하였다. 반구대암각화 침수높이 산정기준은 반구대암각화 최하단면의 높이인 EL.53.0 m를 기준으로 산정하였으며 모의 결과 사연댐의 수위가 EL.60.0 m부터 EL.56.5 m까지는 반구대암각화 전체가 침수되었으며, EL.54.5 m일 때 약 50.0%침수되었고 사연댐의 수위가 EL.52.5 m일 때 반구대암각화는 침수되지 않는 것으로 분석되었다. Table 2는 평수기시 반구대암각화의 침수높이 산정 결과이다.

Fig. 3. Topography of 1D Numerical Modeling.

Table 2. Result of Inundation Height on Bangudae Petroglyphs(Normal Flow)

Upstream Boundary Condition (Ordinary Water Discharge) (m^3/s)	Downstream Boundary Condition (Water Level at Sa-yeon Dam) (EL.m)	Water Level at Bangudae Petroglyphs (EL.m)	Inundation Height at Bangudae Petroglyphs (m)	Inundation Ratios (%)
31	60.00	60.37	7.37	100.0
	59.50	59.87	6.87	
	59.00	59.37	6.37	
	58.50	58.87	5.87	
	58.00	58.37	5.37	
	57.50	57.87	4.87	
	57.00	57.37	4.37	
	56.50	56.87	3.87	
	56.00	56.37	3.37	90.0
	55.50	55.87	2.87	78.0
	55.00	55.37	2.37	64.0
	54.50	54.87	1.87	50.0
	54.00	54.37	1.37	37.0
	53.50	53.87	0.87	24.0
	53.00	53.37	0.37	10.0
	52.50	52.87	-	None

4.2 저수지 홍수추적

반구대암각화는 대곡천 하류에 위치한 사연댐의 수위에 따라 침수에 영향을 미치므로 대곡천을 하나의 저수지로 가정하고 사연댐 수위에 따른 대곡댐의 방류량을 포함하여, 사연댐과 같이 여수로 수문이 없는 단순저수지 홍수추적시 사용되는 Eq. (6) Puls 방법을 사용하여 20년, 30년, 50년, 80년, 100년, 200년 빈도에 대하여 저수지 홍수추적을 실시하였다.

$$\frac{1}{2}(I_1 + I_2)\Delta t + \left(S_1 - \frac{1}{2}O_1\Delta t\right) = \left(S_2 + \frac{1}{2}O_2\Delta t\right) \quad (6)$$

여기서, Δt =미소시간구간 (sec),

I_1, I_2 =시점 및 종점시간에서의 유입량 (m^3/s),

O_1, O_2 =시점 및 종점시간에서의 유출량 (m^3/s),

S_1, S_2 =시점 및 종점시간에서의 저류량 (m^3)

사연댐의 빈도별 침두 유출량은 ‘대곡댐 하천정비기본계획 재정비보고서(국토해양부, 2006)’에서 산정한 사연댐 지점의 빈도별 홍수량과 수위는 본 연구에서 작성한 Fig. 4의 저류량-유출량 관계곡선을 이용한 Puls의 저수지 홍수추적법에 의하여 산정하였다.

사연댐의 수위 EL.52.5 m일 때의 빈도별 홍수추적곡선으로 저수지 추적 결과(Fig. 5) 임계지속시간인 9시간 지속강우에서 사연댐의 설계빈도인 200년 빈도에 대하여 침두 유입량 $970 m^3/s$ 는 7시간 30분 후에 발생하였으며, 수위를 EL.52.5 m로 변경후 침두 유출량은 1시간 20분이 지체된 8시 50분 후에 $809 m^3/s$ 가 발생하였다.

4.3 빈도별 홍수량에 따른 반구대암각화 지점의 침수높이

평수기 유량조건에서 반구대암각화가 침수되지 않는 사연댐 수위 EL.52.5 m일 때 빈도별(20년, 30년, 50년, 80년, 100년, 200년) 홍수량에 따른 반구대암각화 지점의 침수높이를 산정하였다. 홍수기시 수면곡선 해석을 위해 1차원 HEC-

RAS 모형을 이용하여 대상구간 5.2 km에 대하여 부정류 해석을 실시하였다. HEC-RAS 수치모의를 실행하기 위하여 조도계수는 앞절의 평수기 유량조건에서와 마찬가지로 0.028~0.030을 사용하였으며 상류단 경계조건으로는 ‘대곡천 하천정비기본계획 재정비 보고서(국토해양부, 2006)’에서 산정한 대곡천의 시간별 유입량을, 하류단 경계조건으로는 앞서 산정한 저수지 추적 결과 값인 사연댐의 시간별 수위를 적용하였다. 부정류 해석을 위한 상·하류단 경계조건 값은 Table 3에 나타났다.

Fig. 4. Inflow and Outflow Curve.

Fig. 5. Results of Reservoir Flood Routing(Sa-yeon Dam).

Table 3. Upstream and Downstream Boundary Conditions

Flood Frequency	20year		30year		50year		80year		100year		200year	
Boundary Condition	Up stream	Down stream	Up stream	Down stream	Up stream	Down stream	Up stream	Down stream	Up stream	Down stream	Up stream	Down stream
Time(hr)	(m³/s)	(EL.m)	(m³/s)	(EL.m)	(m³/s)	(EL.m)	(m³/s)	(EL.m)	(m³/s)	(EL.m)	(m³/s)	(EL.m)
0	0	52.5	0	52.5	0	52.5	0	52.5	0	52.5	0	52.5
1	0	52.5	0	52.5	0	52.5	0	52.5	0	52.5	0	52.5
2	2	52.6	4	52.6	6	52.6	8	52.6	10	52.6	12	52.6
3	30	52.6	35	52.6	45	52.6	55	52.6	60	52.6	70	52.7
4	130	52.8	150	52.8	180	52.9	210	52.9	230	52.5	270	53.1
5	430	53.3	480	53.5	550	53.6	610	53.8	640	53.4	730	54.0
6	705	54.3	755	54.5	800	54.4	850	54.8	870	54.7	940	55.2
7	720	55.1	765	55.3	810	55.4	860	55.6	880	55.6	950	55.9
8	600	55.4	630	55.5	670	55.7	700	55.8	720	55.9	780	56.1
9	420	55.3	460	55.4	500	55.5	535	55.7	550	55.9	590	55.9
10	250	54.9	270	55.0	300	55.1	315	55.2	330	55.4	360	55.4
11	135	55.4	150	54.6	160	54.6	170	54.7	180	54.9	200	54.9
12	80	54.0	85	54.1	90	54.2	95	54.2	100	54.3	110	54.4

Table 3. Continued

Flood Frequency	20year		30year		50year		80year		100year		200year	
Boundary Condition	Up stream (m ³ /s)	Down stream (EL.m)	Up stream (m ³ /s)	Down stream (EL.m)	Up stream (m ³ /s)	Down stream (EL.m)	Up stream (m ³ /s)	Down stream (EL.m)	Up stream (m ³ /s)	Down stream (EL.m)	Up stream (m ³ /s)	Down stream (EL.m)
Time(hr)												
13	45	53.7	48	53.8	50	53.8	53	53.9	56	53.8	60	53.9
14	25	53.5	27	53.5	29	53.5	31	53.6	33	53.5	35	53.6
15	10	53.3	11	53.3	12	53.3	13	53.3	14	53.2	15	53.4
16	7.5	53.1	8	53.2	8.5	53.2	9	53.2	9.5	53	10	53.2
17	3.5	53.0	4	53.0	4.5	53.0	5	53.1	5.5	52.8	6	53.1
18	0	52.9	0	52.9	0	52.9	0	53.0	0	52.7	0	53.0

Table 4. Result of Inundation Height(Bangudae Petroglyphs)

Water Level (Sa-yeon Dam) (EL.m)	Flood Frequency (year)	Water Level (Bangudae etroglyphs) (EL.m)	Time to Peak Level	Inundation Heights (Bangudae etroglyphs) (m)	Inundation Ratios (%)
52.5 m	20	55.70	8 hours	2.70	73.0
	30	55.84		2.84	76.8
	50	55.97		2.97	80.3
	80	56.14		3.14	84.9
	100	56.18		3.18	86.0
	200	56.47		3.47	93.8

1차원 부정류 해석결과 반구대암각화지점의 침수수위는 8 시간 후에 발생하였으며, 반구대암각화는 20년 빈도일 때 2.7m가 침수되어 암각화 전체 중 약 73%의 침수가 발생하였으며 200년 빈도일 때 3.47m가 침수되어 93.8%의 침수가 발생되는 것으로 분석되었다. Table 4는 빈도별 홍수량에 따른 반구대암각화 지점의 침수높이 산정결과를 나타낸다.

5. 반구대암각화 지점의 흐름특성 분석

본 연구에서는 대곡천 중류 만곡부에 위치한 반구대암각화 지점의 흐름특성을 분석하기 위해 2차원 RMA-2 모형을 이용하여 현재 사연댐의 상시만수위인 EL.60.0 m와 평수기 유량조건에서 반구대암각화가 침수되지 않는 수위조건인 EL.52.5 m에 대하여 흐름특성 분석을 실시하였다. 흐름특성 분석은 Fig. 6에서와 같이 반구대암각화의 상하류 직선부를

Fig. 6. Topography of 2D Numerical Modeling.

고려한 반구대암각화 상류 0.6 km지점부터 하류 0.4 km 까지 총 1.0 km 구간을 선정하여 홍수기시 빈도별(20년, 30년, 50년, 80년, 100년, 200년) 흐름특성을 분석하였다.

5.1 입력자료 및 유한요소망 구축

RMA-2 수치모의를 실시하기 위한 대상구간의 지형자료는 앞서 1차원 HEC-RAS에서 사용하였던 ‘용수댐 퇴사량 조사 및 지형도 제작 보고서(사연댐)(한국수자원공사, 2005)’에서 제작한 1:15,000 수치지도를 이용하였다. 상류단 경계조건은 ‘대곡천 하천정비기본계획 재정비 보고서(국토해양부, 2006)’에서 산정한 대곡천의 빈도별 홍수량을 적용하였고, 하류단 경계조건으로는 사연댐의 상시만수위가 EL.60.0 m일 때는 ‘대곡천 하천정비기본계획 재정비 보고서(국토해양부, 2006)’의 반구대암각화 하류 0.4 km 지점에 대한 부정류 해석 결과 값을 사용하였고, 평수기 유량조건에서 반구대암각화가 침수되지 않는 사연댐의 상시만수위가 EL.52.5 m일 때는 앞서 1차원 HEC-RAS 모형을 이용한 부정류 모의 결과 값을 사용하였다. 2차원 수치모의를 위한 각 빈도별 상·하류 경계조건을 Table 5에 나타냈다.

조도계수는 HEC-RAS 모형에서 적용한 조도계수의 값을 참고하여 반구대암각화 상류 0.6 km지점부터 상류 0.2 km지점까지는 0.030을, 반구대암각화 상류 0.2 km지점부터 하류 0.4 km지점까지는 0.028을 사용하였다. 난류확산계수(turbulent exchange coefficient)는 RMA-2 모형의 Manual(Brigham Young University, 2000)을 참고하여 일반적인 하천에 적용하는 값인 1,500 N·s/m²을 사용하였다. 유한요소망 대상구간의 실제 하도형상과의 비교·분석을 통하여 최대한 실제하천

Table 5. Upstream and Downstream Boundary Conditions

Water Level (Sa-yeon Dam) (EL.m)		Flood Frequency (year)	Upstream Boundary (m ³ /s)		Downstream Boundary (EL.m)	
			EL.60.0 m	EL.52.50 m	EL.60.0 m	EL.52.50 m
EL.60.0m	EL.52.50m	20	730		63.34	55.68
		30	780		63.49	55.83
		50	830		63.65	55.95
		80	880		63.79	56.13
		100	900		63.85	56.17
		200	970		64.04	56.46

Fig. 7. Finite Element Mesh.

Fig. 8. Topographical Map.

Fig. 9 Velocity Distribution of 200year Flood Frequency on Bangudae(EL.60.0m)

의 흐름에 근접하도록 구축하였다. 대상구간의 유한요소망은 총 16,229개의 절점과 5,322개의 요소망으로 구성하였으며, 대상구간이 만곡부 구간이므로 보다 세밀한 흐름분석을 위하여 조밀한 요소망을 구축하였다. Fig. 7과 8에 유한요소망도 및 2차원 지형도를 나타냈다.

5.2 반구대암각화 지점 흐름특성 분석

2차원 RMA-2 수치모형에 의한 반구대암각화 지점의 유속 분석결과 모든 빈도에서 만곡부 내측인 좌안에서 우안으로

갈수록 유속이 증가하여 우안에 위치한 반구대암각화 지점에서 수위 변경 전·후 각각 200년 빈도 기준으로 1.40 m/s, 3.48 m/s가 발생하여 사연댐의 수위변화로 인한 우안의 유속이 약 2.5배 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 기존 저수지였던 반구대암각화 지점이 수위 저하로 인해 하천으로 바뀌에 따른 것으로 판단된다. Fig. 9과 10에는 각각 사연댐의 수위 EL.60.0 m(변경전)일 때와 EL.52.5 m(변경후)일 때의 200년 빈도 유속 분포도이며, 각 빈도별 유속 산정결과는 Table 6에 나타냈다.

Fig. 10. Velocity Distribution of 200year Flood Frequency on Bangudae(EL.52.5 m).

Fig. 11. Maximum Velocity of 200year Flood Frequency(EL.60.0m).

Fig. 12. Maximum Velocity of 200year Flood Frequency(EL.52.5m).

Table 6. Results of Velocity on Bangudae Petroglyphs

Flood Frequency (year)	High Water Level of Important Points at Sa-yeon Dam					
	EL.60.0 m, Velocity(m/s)			EL.52.5 m, Velocity(m/s)		
	Left Bank	Channel	Right Bank	Left Bank	Channel	Right Bank
20	0.07	0.66	1.15	0.29	1.67	2.94
30	0.07	0.72	1.21	0.27	1.84	3.08
50	0.07	0.73	1.25	0.25	1.95	3.21
80	0.08	0.82	1.31	0.25	2.01	3.27
100	0.08	0.87	1.33	0.24	2.05	3.32
200	0.08	0.89	1.40	0.21	2.05	3.48

반구대암각화 지점의 만곡부 흐름양상은 사연댐의 수위 변경 전·후 모두 최대유속선이 만곡부 안쪽을 통과하여 만곡부 바깥쪽으로 흘러 일반적인 만곡부에서의 흐름양상과 비슷하게 나타나는 것으로 분석되었다. Fig. 11과 12은 200년

빈도시 사연댐의 수위 변경 전(EL.60.0 m)·후(EL.52.5 m) 흐름분포도로 만곡부 안쪽으로 흐르는 최대유속선이 바깥쪽으로 흐를 때 반구대암각화 위치로 최대유속선이 지나가 반구대암각화의 훼손을 가속시킬 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 현재 사연댐 건설로 인한 장기간 침수로 훼손이 발생되고 있는 반구대암각화의 수리학적 특성을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 평수기 유량조건에서 사연댐의 수위변화에 따른 반구대암각화의 침수높이 산정결과 사연댐의 수위 EL.60.0 m 부터 EL.56.5 m까지는 반구대암각화의 전체가 침수되었으며, 사연댐의 수위가 EL.52.5 m이하 일 때 반구대암각화는 침수되지 않는 것으로 분석되었다.
- 2) 사연댐의 상시만수위가 EL.52.5 m일 때 저수지 홍수추적결과 사연댐의 수위는 20년 빈도일 때 EL.55.4 m에서 점차 증가하여 200년 빈도에는 EL.56.1 m로 산정되었다.
- 3) 빈도별 홍수량에 따른 반구대암각화의 침수높이를 산정하기 위하여 1차원 HEC-RAS 모형을 이용하여 부정류 해석을 실시하였으며, 20년 빈도일 때 반구대암각화는 2.7 m가 침수되어 73%의 침수가 발생하였으며, 빈도가 증가할수록 침수높이가 증가하여 200년 빈도일 때는 3.47 m가 침수되어 93.8%의 침수가 발생하는 것으로 분석되었다.
- 4) 홍수기 유량조건일 때 반구대암각화 지점의 흐름특성 분석결과 사연댐의 수위를 EL.60.0 m에서 EL.52.5 m로 낮출 경우 유속이 약 2.5배 증가하는 것으로 산정되었으며, 최대유속선이 반구대암각화를 지남으로써 반구대암각화의 훼손을 증가시킬 것으로 분석되었다.
- 5) 사연댐의 상시만수위를 EL.52.5 m로 낮추더라도 홍수시 반구대암각화는 침수되며, 수위 저하시 유속의 증가로 인해 암각화의 훼손이 증가되는 것으로 분석되어 단순히 사연댐의 운영수위를 낮추는 것은 반구대암각화 보존을 위해 적절하지 않으므로 반구대암각화 보존을 위해서는 다양한 시나리오에 대한 종합적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Reference

- Cho, H.J. (2009) Water Supply Capacity due to Water Level Control in Sa-yeon dam, *An Examination Report*, University of Ulsan.
- Choi, S.E., Lee, C.H. and Suh, M. (2001) Occurrences, deterioration and conservation scheme of Dojeonri standing sculptured Buddha statues in the Sancheong, Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 37, No. 3, pp. 393-406.
- Chow, V.T. (1959) *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill College.
- DeVriend, H.J. and Geldof, H.J. (1983) Main Flow Velocity in Short River Bends, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 109, No. 7, pp. 991-1011.
- Brigham Young University (2000) *SMS(Surface water Modeling System) User's Manual*, pp. 1-85.
- Flokstra, C. (1977) The Closure Problem for Depth-Averaged Two-Dimensional Flows, *Proceedings of 18th Congress of the International Association for hydraulic Research*, pp. 247-256.
- Hwang, S.I., Park, K.G. and Yoon, S.O. (2010) Periodic Immersion of the Bangudae Petroglyphs and Rock weathering characteristics, *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 45, No. 3, pp. 342-359.
- Jeong, H.S. (2000) An Analysis of the Flow Characteristics in Curved Channels Using RMA-2 Model, *Master's thesis*, Kyonggi University.
- Jang, S.H. (2002) Hydraulic and Hydrological Examination for Flooding Prevention of Bangudae Petroglyphs, *Research Report*, pp. 241-256.
- Johannesson, H. and Parker, G. (1989a) Secondary Flow in Mildly Sinuous Channel, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 115, No. 3, pp. 289-308.
- Johannesson, H. and Parker, G. (1989b) Velocity Redistribution in Meandering Rivers, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 115, No. 8, pp. 1019-1039.
- Kim, J.H. (2002) Civil of Methodology for Conservation of Bangudae Petroglyphs, *Research Report of measures to preserve Bangudae Petroglyphs*, pp. 257-270.
- Korea Water Resources Association (2009) *River Design Criteria·Explanation*.
- Korea Water Resources Corporation (2005) *A Report of Investigation Dam Sediment and Design of Topographic Map. (Sa-yeon dam)*
- Lee, C.H., Lee, M.S., Suh, M. and Choi, S.W. (2003) Conservation scientific diagnosis and petrological characteristics diagnosis and petrological characteristics of the Dabotap Pagoda in the Bulguksa Temple, Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 39, No. 3, pp. 319-335.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2006) *A Refurbishing Report of Basic Plan for Daegok River Maintenance*.
- Rozovski, I.L. (1975) Flow of Water in Beds of Open Channels, *The Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*, pp. 137-157.
- Yoon, S.E. (1986) An Analysis of Flow Characteristics in Shallow Channel Bends with Fixed Bed, *Ph D. dissertation*, Yonsei University.
- Zimmermann, C. and Kennedy, J. (1978) Transverse Bed Slopes in Curved Alluvial Streams, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 104, No. HY1, pp. 33-48.

© Received April 10, 2013

© Revised April 25, 2013

© Accepted July 25, 2013