월정교 사적지 복원을 위한 수리특성 및 세굴보호공 안정성 검토에 관한 수리모형실험 연구

An Experimental Study to Evaluate Hydraulic Characteristics and Stability of Scour Protection for Historic Site Restoration of Woljeong-gyo

강 준 구* / 여 홍 구** / 손 병 주*** / 지 윤****

Kang, Joon Gu / Yeo, Hong Koo / Son, Byung Ju / Ji, Un

Abstract

The old bridge of Woljeong-gyo, which has the fluvial history and culture, represents the ancient construction and civil engineering techniques. It is the oldest stone bridge in Korea and currently restored with its vicinities. In this study, the experimental model was used to analyze the hydraulic characteristics, the local pier-scour depth without scour protection, and the stability of riprap protection using the old grid type panels and stones for Woljeong-gyo of the study area. The water levels were increased around 30cm due to the restored bridge piers and foundations and the effects went up to 200m upstream. The maximum scour depth of 5.4m was measured and the scour protection tests were performed with the riprap size calculated using empirical equations and the existing scour protection range. The riprap of the existing scour protection in the upstream side was broken away, while the riprap of extended scour protection was very stable for the design flood condition of Woljeong-gyo area.

keywords : pier-scour, scour protection, riprap protection, old bridge restoration, Woljeong-gyo

요 지

하천과 관련된 역사와 문화를 지닌 신라의 옛 교량 월정교는 우리나라의 고대 교량의 축조방법과 토목기술을 보여주고 있으며 국내에서 가장 오래된 석교로써 복원사업이 현재 수행되고 있고 교량뿐만 아니라 주변 지형까지 복원하는 방식으로 수행되고 있다. 본 연구에서는 수리모형실험을 통해 월정교 영역의 수위와 유속 등의 수리특성 및 교각세굴과 옛 방식의 격자판과 사석을 조합한 세굴보호공의 안정성을 분석하였다. 실험 결과 빈도별 홍수 발생시 교각 복원으로 인한 수위 상승은 30cm 내외였으며 최대 상류 200m까지 영향을 미쳤다. 최대세굴심은 4번 교각에서 5.4m로 나타났으며 세굴보호공 실험은 경험공식을 이용하여 계산된 사석크기와 기존에 설치되었던 보호공 영역을 그대로 적용한 조건에 대해서 실험을 실시하였고 기존에 설치된 조건에서의 실험 결과 세굴보호공의 전면부에서 사석이 이탈하였으나 세굴보호공 영역을 국부세굴이 발생하는 세굴영역까지 확장한 조건에서 추가 실험을 실시한 결

* 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원

Senior Researcher, Dept. of Water Resources Research, Korea Institute of Construction Technology

** 한국건설기술연구원 수자원연구부 책임연구원

Fellow Researcher, Dept. of Water Resources Research, Korea Institute of Construction Technology

*** 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원

Researcher, Dept. of Water Resources Research, Korea Institute of Construction Technology

**** 명지대학교 토목환경공학과 박사후 연구원, 교신저자

Post-doctoral Researcher, Dept. of Civil and Environmental. Engrg., Myongji Univ., Yongin, Korea
(e-mail: jiuncivil@gmail.com)

과 안정적인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 교각세굴, 세굴보호공, 사석보호공, 교량복원, 월정교

1. 서 론

사회수준의 향상과 더불어 하천을 바라보는 시각은 단순한 치수목적으로 하천을 직강화하고 콘크리트로 포장하여 배수로로 사용하며 주변 토지를 도시개발이나 산업용지로 이용하려던 과거 개발시대의 인식에서 벗어나 이제는 우리가 지켜야 할 자연환경의 하나라는 인식으로 전환되고 있으며 즉, 하천복원은 단순히 물길의 복원만을 지칭하는 것이 아니다.

옛 부터 하천은 사람들이 살아가는 터전이었기에 항상 하천에는 역사와 문화가 함께 존재해 왔다. 하천과 관련된 역사와 문화를 지닌 신라의 옛 교량 월정교는 신라시대에 축조된 것으로 기록된 자료에 의하면 건립 이후 최소 520년간 기능이 유지되었음을 알 수 있다(남시진, 2007). 월정교는 우리나라의 고대 교량의 축조방법과 토목기술을 보여주고 있을 뿐만 아니라 신라왕경의 규모와 성격을 파악하는 중요한 자료로 평가되고 있다. 월정교는 1975년 처음으로 지표조사 및 실측조사가 실시되었으며 1984년 복원을 위한 발굴조사가 수행되었다. 월정교는 국내에서 가장 크고 오래된 석교로써 복원 사업이 수행되고 있으며 문화재 자체만의 복원이 아닌 주변 지형까지 복원하는 방식으로 진행되고 있다. 월정교는 발굴정보에 따라 4개의 교각을 옛 모습 그대로 복원하고, 격자판 형식의 세굴보호공 역시 그대로 재현하도록 계획되었다.

복원교량의 설치는 기존 하도의 통수능 감소와 상류부 수위상승을 가져올 수 있고 교각주변에 발생되는 와

류는 국부세굴의 원인이 될 수 있다. 따라서 수리영향에 의한 설계의 적정성 및 수리 안정성 검토와 세굴영향 분석이 반드시 필요하다. 또한 교각 주변의 하상 보호를 위해 설치된 옛 방식의 격자형 틀을 이용한 사석보호공은 옛 모습 그대로의 복원에 앞서 반드시 사석의 전단붕괴, 유사이탈붕괴 등의 수리학적 안정성에 대해 검토가 이루어져야 할 것이다.

본 실험의 목적은 수리모형실험을 통해 남천에 대해 기 수립된 하천계획 하에서 월정교 복원시 치수안전성을 검토하고 복원될 월정교 교각의 세굴에 대한 안전성을 평가하는 것이며 특히, 교각 주변에 설치될 옛 방식의 격자판 세굴보호공의 수리학적 안정성을 평가하기 위한 것이다. 본 실험에서는 기 수립된 하천계획 상에서 허용되는 홍수들을 모형에서 재현하여 해당 홍수발생시 관심지역의 수위, 유속, 유황 등을 측정, 평가함으로써 치수안전성을 검토하였다. 세굴에 대한 안전성 평가를 위해 교각 주변을 이동상으로 제작하여 모형사를 포설한 후 세굴영향을 측정하고, 계획된 보호공의 세굴방지 효과를 검토하였다.

2. 대상교량 및 대상지역

월정교는 서기 760년 경덕왕 19년에 건립되어 당시 왕궁인 월성의 통로로 쓰인 당대 가장 화려한 교량으로 꼽힌다. 월정교는 신라 문화유적을 대표할 만한 역사적, 상징적 가치가 큰 유적이며 현재 그 흔적이 남아있는 가장 오래된 옛 교량 중 하나이다. 월정교 터는 신라의 고도인 경주 남천에 위치하고 있다(Fig. 1과 2).

Fig. 1. Historic Site of Woljeong-gyo in Gyeongju

Fig. 2. Bridge Foundation and Abutment of Woljeong-gyo

Fig. 3. Plan View of Old Scour Protection of Woljeong-gyo (Nam, 2007)

월정교는 4개의 교각이 남북으로 놓여 있었으며 남쪽에 위치한 교각과 북쪽에 위치한 교각은 기초 지반석 위에 한 단까지 남아있으며 하상 중앙에 위치한 두 교각은 유실이 심하여 교각 기초지반석만 침하 또는 이완된 상태로 남아 있다. 또한 세굴방지를 위한 하상보호 시설은 Fig. 3과 같이 목재로 격자 모양의 틀을 짜고 그 사이에 크고 작은 사석 등으로 채워서 상면을 바르게 맞춘 형식이다(남시진, 2007).

하천에 시설물이 설치될 경우 환경영향 및 치수안전성에 대한 검토가 사전에 요구된다. 특히 교량복원의 경우 반드시 그 안전성에 대한 기술적 검토가 필요하다. 이는 하천이 유역내의 도시개발 등 토지이용변화에 따른 하천유입수 변화, 준설 등 개수사업으로 인한 물길의 변화 등 다양한 시대적 변화에 적응해가며 그 규모와 형상이 변화하기 때문이다. 즉 과거에 문제가 없었던 교량을 그대로 복원한다 할지라도, 수 백 년의 세월이 지난 현재 하천주변지역의 상황은 많이 다르기 때문에 현재에도 안전할 것이라는 보장은 없다. 교량복원으로 인해 제방이 넘칠 경우 인명과 재산에 큰 피해를 주고, 홍수시 복원된 문화재가 파괴될 경우 예산낭비는 물론 파괴된 잔재로 인해 하류에 2차 피해를 발생시키게 된다.

3. 수리모형실험 개요

본 연구의 수리모형실험은 고정상실험과 이동상실험으로 구분하여 실시하였으며 고정상실험은 월정교가 복원되어 있지 않은 현재 하도에 대한 실험과 교각이 설치되었을 때의 실험으로 구성된다. 고정상실험에서는 교각 설치에 따른 상류수위 변화와 교각 접근유속과 유황을 분석하여 홍수위 상승 및 교각세굴 평가의 인자를 얻는데 주목적이 있다. 이동상실험은 교각주변 국부세

굴실험과 교각주변 세굴보호공 재료 및 규모를 결정하기 위한 것이며 옛 방식의 격자형 틀을 이용한 사석보호공의 안정성 평가를 위한 목적으로도 수행하였다. 교각세굴 평가는 live-bed scour 조건에서 시간변화에 대한 세굴심과 최대세굴심을 관측하였고 보호공 타당성실험을 위해서 기존에 제안된 경험식을 이용하여 사석 크기와 보호공 포설 규모 등을 결정하였다. 대상구간의 하천 일반 현황, 구조물 현황, 하상재료, 홍수흔적 등을 파악하여 수리모형제작 및 실험결과분석에 반영하였다.

원칙적으로 상사 이론을 모형상에 적용하는데 있어서 공간적, 경제적 제약에 의한 한계가 있지만 모형과 원형간에 흐름의 상사성에 대해서는 Froude 상사법칙을 만족시켜야하며 유사이송 및 하상변동을 예측하기 위한 이동상 모형실험의 경우 흐름의 마찰저항이나 유사에 관한 상사법칙을 고려하여 비교 검토 되어야 한다.

본 실험에서 고정상 실험을 위한 모형 크기는 수평 축척과 연직축척을 각각 1/20로 하여 제작하였으며, 고정상 실험의 모형 축척은 Froude의 법칙에 의해 결정하였고, 왜곡이 없는 정상모형으로 제작하였다.

이동상 모형에서는 Froude 상사, 저항계수 상사, 무차원 유사입경 상사, 무차원 한계소류력 상사 등의 네 가지 상사법칙이 적용된다. 하천에서의 급변류를 재현하는 실험이나 유사이송을 재현하는 경우에는 이들 네 가지 상사를 모두 만족시키는 것은 불가능하다(Julien, 2002). 4가지 상사를 모두 만족시킬 수 있는 경우에 이동상 상사가 완벽하다고 말할 수 있으며 4가지 상사를 모두 만족시킬 수 없는 경우에는 네 가지 상사 중 한 가지를 포기해야 한다. 본 연구에서는 Froude 상사, 저항계수 상사, 무차원 한계소류력 상사를 만족시켰으며 무차원 유사입경 상사를 포기한 이동상 실험을 실시하였다. 무차원 유사입경 상사를 포기한 경우는 모형의 기하학적 상사와 모형사 상사를 자유롭게 선정할 수 있다. 따라서 이동상 실험의 수평길이 축척(x_r) 및 연직길이 축척(z_r)은 고정상 실험 축척과 동일한 1/20로 하였으며 하상토 비중과 하상 경사의 축척은 흐름 저항 공식의 지수인 m 값과 무관하게 1로 산정될 수 있도록 하기위해 모형사의 축척(d_{sr})을 수평길이와 연직길이 축척과 동일한 1/20 비율로 하였다. 이에 따른 유량, 하상토 비중, 동수반경 및 에너지 경사에 대한 원형 및 모형에서의 값들은 Table 2와 같다. 사석의 안정성을 평가하기 위한 이동상 실험에서 사용된 사석크기 또한 모형사 축척 1/20이 적용되었으며 사석의 비중 또한 적용된 상사법칙에 의해 모형과 원형이 동일하다.

Table 1. Experimental Model Scale

구 분	원 형	축 척	모 형
유량(CMS)	410~560 (550)	$Q_r = x_r z_r^{1.5} = z_r^{2.5} = 20^{2.5}$	0.229~0.313 (0.28)
하상토 (d_{50} ,mm)	1.5	$d_r = 20$	0.075
하상토 비중	2.65	$(G-1)_r = d_{sr}^{2m-1} z_r^{1-2m} = 1.0$	2.65
동수반경(m)	8.96	$z_r = 20$	0.45
에너지경사	0.00303	$S_r = d_{sr}^{2m} z_r^{-2m} = 1.0$	0.00303

Fig. 4. Physical Model Construction

Fig. 5. Physical Model with and without Bridge Piers

각종 결과 값에 대한 측정이 용이하게 수행될 수 있도록 하였으며 모형은 해당 지역의 특성이 잘 반영될 수 있도록 사실적으로 제작하였다. 모형제작 대상 구간은 교량복원지점을 포함하는 직선하도구간 500m를 대상으로 하였으며 제반장치를 제외한 실제 하도 모형 면적은 실험실에서 폭 5.5m, 길이 34m로 제작하였다. 대상구간의 지형은 기존의 조사 보고서에 제시된 도면자료에 현장측량자료를 추가하여 재현하였다.

기본측선의 CAD 도면에 실제 측량한 보조측선 자료를 추가하여 단면자료를 보완한 후, 모형실규모(원형의 1/20)로 횡단면도를 출력하여 지형판을 제작하였다. 제작된 지형판은 토탈스테이션으로 측량하여 정치하였으며 설치된 지형판 사이는 모래 채움 및 물다짐을 한 후 물타르로 하도지형을 재현하였다(Fig. 4).

재현된 하도모형의 조도검정은 수위일치법을 적용하였고 하도의 조도는 조도블럭 콘(Fig. 5)을 사용하였다.

고수부지에 대해서는 식생이 번무한 현장을 고려하여 별도로 인조잔디를 이용하여 조도를 재현하였다. Fig. 5는 월정교 복원 전과 월정교 교각을 설치한 후 하도를 재현한 모형의 모습이다.

4. 수리특성 분석을 위한 고정상실험

고정상실험은 월정교 복원 전과 월정교 복원 후의 조건에서의 수위 유속변화를 파악하기 위해 수행되었다. 실험조건은 Table 2와 같으며 수리모형실험은 해당지역의 계획홍수량인 80년 빈도 홍수량을 포함하여 30년 빈도부터 150년 빈도 홍수량에 대해 수행하였으나 주로 50년, 80년, 100년 빈도 홍수량에 대해 분석하였다.

월정교 복원시 설치되는 교각폭 규모에 따라 하천의 통수단면이 축소되며 이는 하천흐름에 직접적인 영향을

Table 2. Experimental Conditions

산정지점	기준빈도별 홍수량(CMS)					비 고
	30년	50년	80년	100년	150년	
홍수량(CMS)	410	455	500	520	560	남천, 원동천 하천정비기본계획 (경상북도, 2001)
홍수위(EL.m)	36.91	37.09	37.26	37.33	37.47	

주며 교각의 흐름방해로 인해 교량설치구간 상류부의 수위는 상승한다. 하천 구조물에 의한 수위상승효과를 분석하기 위해 고정상 수리모형실험을 수행하고 교각설치 전·후의 홍수위를 비교 검토하였다. 실험결과 빈도별 홍수위 모두 교량설치로 인해 교각 상류부 수위가 상승하는 것을 관측할 수 있었고 교량하류부에서는 교각을 통과하면서 유속이 증가하여 수위가 하강하는 현상이 관측되었다. 50년 빈도시 홍수위 변화는 월정교 교량으로부터 약 30m 상류에 위치하는 8번 측선의 평균수위는 EL. 37.40m로 측정되었고, 교량 설치 후의 평균수위는 EL. 37.65m로 측정되어 0.25m의 수위상승이 발생하였으며 약 100m 상류부에서는 수위의 차이가 미미한 것으로 측정되었다(Fig. 6). 80년 빈도시 홍수위 변화는 8번 측선의 평균수위는 EL. 37.48m로 측정되었으며, 설치 후의 평균수위는 EL. 37.80m로 측정되어 0.32m의 수위상승이 발생하였다(Fig. 7). 100년 빈도시 8번 측선의 평균수위는 EL. 37.62m로 측정되었으며, 설치후의 평균수위는 EL. 37.89m로 측정되어 0.27m의 수위상승이 발생하는 것을 알 수 있었다(Fig. 8). 50년, 80년 빈도의 홍수 발생시의 교각 설치로 인한 수위상승이 100년 빈도의 홍수 발생시 보다 더 큰 이유는 50년, 80년 빈도에서의 수위가 교각 보다 상대적으로 폭이 넓은

교각 기초만의 영향을 받는 반면 100년 빈도의 경우는 수위가 교각 기초 높이 이상이 되기 때문에 상대적으로 기초 위에 놓여 있는 교각 폭은 기초 폭에 비해 좁기 때문에 교각 설치 전 후의 수위상승 정도가 작게 나타난 것을 알 수 있다. 50년 빈도시 교량설치에 따른 수위상승효과는 상류 100m 지점까지 영향을 미치고 있었으며, 80년 빈도와 100년 빈도시에는 상류 200m 이상 수위상승이 발생하고 있는 것을 알 수 있었으며 계획홍수시(80년 빈도 홍수) 약 1.1m 정도의 여유고를 유지하는 것으로 관측되었다.

월정교 유역의 계획(80년 빈도)홍수에 해당되는 고정상 실험 자료를 이용하여 유속분포를 분석한 결과 월정교가 복원되지 않은 조건에서 대상구간의 유속분포는 최소유속이 No. 6번(Fig. 9(a)) 좌안 지점에서 흐름정체로 인하여 0.22m/s로 측정되었으며, No. 8번 지점에서 최대 4.79m/s 유속이 관측되었다. 월정교 교각이 위치하게 되는 No. 8과 No. 10번 측선 사이의 단면 평균유속은 3.01m/s로 측정되었으며, 좌안에 위치한 측점에서 최소 1.12m/s로 관측되었고 주수로에 위치한 측점에서 최대 4.70m/s의 유속으로 관측되었다. No. 1, No. 6번 측선의 좌안부에서는 역유속이 관측되었는데 유속의 크기는 -0.22m/s ~ -0.53m/s의 범위로 관측되었다. 이는

Fig. 6. Water Level Comparison for the 50-year Recurrence Flood

Fig. 7. Water Level Comparison for the 80-year Recurrence Flood

Fig. 8. Water Level Comparison for the 100-year Recurrence Flood

하천방향으로 돌출되어 있는 지형의 영향으로 와가 형성되어 나타나는 현상이다. LSPIV 기법을 통해 살펴본 교각설치지점 부근의 유황은 흐름의 교란이 발생하지 않고 상류에서 하류로 직선형의 흐름분포를 보였다.

월정교 교각을 설치한 후 교각 주변의 최대유속은 No. 8과 10번 사이의 측선에서 발생하고 있으며 우안 쪽 두 교각인 3번 교각과 4번 교각사이에서 5.57m/s의 유속이 발생하였다(Fig. 9(b)). 전반적으로 3, 4번 교각 사이에서 고유속이 발생하고 있었으며 각각의 교각 후

면부에서는 구조물로 인해 발생하는 와의 영향으로 인해 $-0.02\text{m/s} \sim -0.74\text{ m/s}$ 의 역유속이 발생하였다.

교각설치 전과 비교하였을 때 교각 설치로 인한 단면축소 영향으로 교각 상류부의 수위가 상승하였으며 최대유속이 발생하는 교각사이에서는 교각 설치 전보다 0.87m/s 이상 유속이 증가하였다.

5. 국부세굴 및 세굴영역 평가를 위한 이동상 실험

월정교 이동상 수리모형실험의 홍수량 및 홍수위 조건은 Table 2에서의 80년 빈도 조건이며 이는 곧 월정교에서의 계획홍수위와 계획홍수량 조건이다. 이동상실험은 교각주변 국부세굴 평가를 중심으로 수행하였으며 계획홍수량에 대해 시간에 따른 세굴심 변화와 최대세굴심을 관측하였다. 세굴심의 관측은 영상기법을 이용해 시간변화에 대해 관측을 수행하였으며 세굴심이 평형상태에 도달했을 때를 최대세굴심으로 산정하였다. 본 실험에서의 교각국부세굴의 경향은 Live bed scour 조건으로 초기 급격한 세굴이 발생한 후 되메움과 세굴이 반복되어 발생하였다. 초기 최대세굴심은 교각에 따라 차이가 있으나 약 20분~30분 경과 후 발생하는 것으로 관측되었고 그 후로 되메움과 세굴이 반복하여 진행되었다. Table 3의 국부세굴심 값은 약 5시간 경과한 후 최대 세굴심과 세굴반경 및 영역을 관측한 자료이다. 각 교각을 비교해 볼 때 최대세굴심은 4번 교각에

(a) Before the restoration of Woljeong-gyo

(b) After the restoration of Woljeong-gyo

Fig. 9. Flow Velocity Comparison for the 80-year Recurrence Flood

Table 3. Experimental Results of Pier-scour Depth and Scour Hole

교각	최대 세굴심 (m)	세굴 반경 (m)	교각 폭 포함한 전체 세굴영역 (m)	
			중방향	횡방향
교각 1	3.02	5	20.4	10.7
교각 2	4	5.4	15.8	13.6
교각 3	3.3	5.6	18.2	11.3
교각 4	5.4	6.8	31.8	15.3

Fig. 10. Pier-scour Depth and Scour Hole of Woljeong-gyo in the Physical Model

Table 4. Scour Depths Calculated by Equations and Measured by Experiments

교각	교각길이 (m)	교각폭 (m)	수위 (m)	유속 (m/s)	d50 (m)	경험식에 의한 세굴심(m)			실험측정 세굴심 (m)
						Melville and Coleman (2000)	Richardson et al. (2001)	Froehlich (1989)	
1 교각	12.76	2.64	7.58	1.71	0.0015	5.7	3.77	4.77	3.02
2 교각	12.76	2.64	7.6	2.02	0.0015	5.7	4.05	4.84	4
3 교각	12.76	2.64	7.64	3.52	0.0015	5.7	5.15	5.11	3.3
4 교각	12.76	2.64	7.58	2.92	0.0015	5.7	4.74	5.01	5.4

서 5.4m로 측정되었고 교각 1번에서 3.02m로 최소값이 관측되었다. 세굴반경은 교각 4번에서 6.8m로 최대값이 측정되었고 교각 4번에서 5m로 최소값이 관측되었다. 일반적으로 세굴반경은 최대세굴심에 약 1.5~2배가 측정되는데 본 실험결과에서도 이에 부합되는 값이 측정되었다.

Table 4는 이동상 실험을 통해 관측된 세굴심과 Melville and Coleman(2000), Richardson et al.(2001), Froehlich(1989)의 경험공식으로 계산된 세굴심을 비교한 것이다. 경험식에 의해 계산된 세굴심이 전반적으로 실험에 의해 측정된 최대세굴심보다 큰 값으로 산정되었으며 특히 Melville and Coleman(2000) 공식에 의한 세굴심이 교각 3번을 제외한 나머지 교각에서 모두 크게 나타났다.

6. 세굴보호공의 안정성 평가를 위한 이동상 실험

본 연구에서는 월정교에 복원되는 옛 형식의 세굴보호공 안정성을 평가하기 위해 이동상 수리모형실험을 실시하였다. 복원에 사용된 보호공의 형태는 교량복원을 위한 현장조사 과정에서 신라시대 것으로 추정되는 목재 틀 형태였다. 보호공 실험의 주요 내용은 기존 식에 의해 산정된 사석크기 및 포설범위에 대한 안정성 실험 평가이다. 모형실험을 통해 사석이 80년 빈도의 계획홍수량에 대해 제안된 사석(원형에서 80cm~160cm, 모형에서 4cm~8cm)이 안정한가를 관찰하였다.

세굴보호공에 사용되는 사석 크기 결정은 역사적인 교량 복원이라는 점을 고려하여 과거의 공식들과 비교하여 최근에 발표된 Richardson and Davis(1995),

Parola(1993, 1995), Lauchlan(1999)의 공식들을 이용하였다. 80년 빈도 홍수량에 대한 수리인자(수위: 7.64m, 유속: 3.52m/s)를 바탕으로 계산된 사석 크기 값은 각각 Richardson and Davis(1995) 공식은 1.52m, Parola (1993, 1995) 공식은 1.07m, Lauchlan(1999) 공식은 0.85m 로 산정하였으며 모형실험에서는 모형사의 축척인 1/20을 적용하여 직경 4~8cm 규모의 사석을 이용하였다.

사석보호공 실험은 기존 보호공이 포설되어 있는 범위와 동일하게 교각 전면부로 1.8m까지 포설되어 있는 기존 보호공 조건이 먼저 수행되었으며 국부세굴 실험, 기존 보호공 조건(교각 전면부 1.8m) 실험, 그리고 경험식을 이용한 세굴보호공 영역 계산 결과(Table 5)들을 바탕으로 세굴보호공의 안정성을 보다 보강할 수 있는

교각 전면부로 7m 확장된 포설 범위를 갖는 수정 보호공 조건에 대해 후속 실험이 수행되었다. 즉, 현장조사 결과를 기초로 기존 형태의 세굴보호공의 세굴방지 효과를 평가한 후 사석포설 범위를 넓혀 세굴보호공의 능력을 향상시킬 수 있도록 보강된 조건에 대해 실험을 수행한 것이다. 실험 결과 기존 보호공 실험 조건인 포설 범위가 교각전후면부로 1.8m인 경우 보호공 상류부에서 세굴이 발생하여 사석이 이탈되는 현상이 나타났으며 이는 상류방향으로의 보호공의 규모가 세굴영향영역(세굴반경)보다 작게 발생하는 것이다. 보호공 주변의 세굴 현상은 향후 사석의 대규모 이탈이 발생할 수 있는 가능성을 내포하고 있으므로 포설범위가 더 확장되어야 한다(Fig. 12).

Fig. 11. Riprap Protection Ranges for Original and Modified Conditions

Fig. 12. Original Condition Result of the Riprap Protection Range

Fig. 13. Modified Condition Result of the Riprap Protection Range

Table 5. Calculated and Proposed Riprap Protection Ranges

교각	경험공식에 의한 보호공 포설영역 계산값(m)								국부세굴 및 세굴 영역에 관한 이동 상 실험값(m)			보호공 포설 규모에 대한 수정안(m)			
	Lauchlan(1999)		Croad(1997)		Richardson (1995, 2002)										
	포설범위		포설 깊이	포설범위		포설 깊이	포설범위		포설 깊이	교각 전/후면 세굴범위	세굴 심	포설범위		포설 깊이	
1 교 각	교각 전/ 후면	2.64 ~ 3.96	2.2 ~ 3.3	교각 전/ 후면	3.96	2.2	교각 전면	5.28 ~6.6	3.3	교각 전면	5	3.02	교각 전/ 후면	7	2.5
		교각 후면					4.52	교각 후면		3.6					
		포설폭 (교각 포함)					7.92 ~ 10.56	포설폭 (교각 포함)		14.5	포설폭 (교각 포함)				
2 교 각	교각 전/ 후면	2.64 ~ 3.96	2.2 ~ 3.3	교각 전/ 후면	3.96	2.2	교각 전면	5.28 ~6.6	3.3	교각 전면	5.4	4	교각 전/ 후면	7	2.5
		교각 후면					4.86	교각 후면		5.2					
		포설폭 (교각 포함)					7.92 ~ 10.56	포설폭 (교각 포함)		14.5	포설폭 (교각 포함)				
3 교 각	교각 전/ 후면	2.64 ~ 3.96	2.2 ~ 3.3	교각 전/ 후면	3.96	2.2	교각 전면	5.28 ~6.6	3.3	교각 전면	5.6	3.3	교각 전/ 후면	7	2.5
		교각 후면					6.18	교각 후면		4.3					
		포설폭 (교각 포함)					7.92 ~ 10.56	포설폭 (교각 포함)		14.5	포설폭 (교각 포함)				
4 교 각	교각 전/ 후면	2.64 ~ 3.96	2.2 ~ 3.3	교각 전/ 후면	3.96	2.2	교각 전면	5.28 ~6.6	3.3	교각 전면	6.8	5.4	교각 전/ 후면	7	2.5
		교각 후면					5.7	교각 후면		5.8					
		포설폭 (교각 포함)					7.92 ~ 10.56	포설폭 (교각 포함)		14.5	포설폭 (교각 포함)				

추가로 수행된 수정 보호공 조건은 기존 보호공의 포설범위를 교각전 후면부로 1.8m에서 7m까지 확장한 것이다(Fig. 11). 포설범위는 국부세굴실험 결과인 최대 세굴반경 6.8m를 고려하여 교각전후면부로 7m를 확장하는 것으로 하였다(Table 5). 실험결과 보호공 상류부에서 세굴은 발생하지 않고 사석이 이탈되는 현상도 발생하지 않았다(Fig. 13). 반면, 상류로부터 유입되는 유사가 보호공 부근에 퇴적되는 현상도 관측되었으며 전체적으로 보호공이 안정적인 것을 알 수 있었다.

7. 결 론

본 연구는 수리모형실험을 통해 월정교 복원사업에 필요한 교각 주변의 수리특성 분석, 교각 세굴심 및 세굴영역 분석, 격자 틀을 활용한 사석보호공의 안정성 평가 등을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 월정교 복원으로 설치되는 교각의 흐름 방해로 인해 교량설치구간 상류부의 수위는 50년, 80년, 100년 빈도 홍수량 조건에서 모두 상승하였으며 교대 높이보다 100년 빈도 홍수위의 높이가 더 크기 때문에 100년 빈도 홍수에서의 수위상승이 80년 빈도 조건에서 더 작게 나타났다. 이러한 수위 상승효과는 50년 빈도 홍수 조건에서는 상류 100m까지 그리고 80년 및 100년 빈도 홍수 조건에서는 상류 200m까지 영향이 미치는 것으로 나타났으며 계획홍수위가 발생하는 80년 빈도 조건에서 약 1.1m의 여유고를 유지하는 것으로 관측되었다.
- 2) 월정교 유역의 유속 분포는 교량이 복원되기 전 후 조건에서 모두 접근 수로의 지형 형상으로 인해 흐름 정체가 발생되는 지점에서 최소유속이 발생하였으며 최대유속은 월정교가 복원되기 전 조건에서는 교각이 복원될 위치에서의 직상류 단

면에서 4.79m/s가 발생하였고 교각이 위치하게 될 지점의 유속은 3.01m/s로 측정되었다. 교각이 설치된 후의 유속 분포는 교각 사이의 단면이 축소되는 지점에서 발생하였으며 특히 우안 쪽의 3번과 4번 교각 사이에서 5.57m/s가 관측되었다.

- 3) 80년 빈도의 계획홍수가 발생했을 때의 교각 최대 세굴심은 교각 4번에서 5.4m가 발생하였으며 세굴반경은 최대세굴심의 1.5배 정도였다. 이동상 실험에 의한 세굴심 결과 값은 3가지 경험공식과 비교한 결과 전반적으로 공식에 의해 계산된 최대세굴심이 실험에 의한 결과값 보다 작게는 5%에서 많게는 78% 정도 증가하였음을 알 수 있었다.
- 4) 복원될 세굴보호공에 사용되는 사석 크기 결정은 과거의 경험 공식들을 이용하였으며 세굴보호공의 설치 영역은 월정교의 기존 보호공의 영역과 같은 조건으로 실험을 수행한 결과 세굴보호공 전면에서 세굴 현상이 발생하여 사석이 이탈하는 현상을 보였다. 세굴보호공의 안정성을 보강하기 위해 세굴영역이 국부세굴 실험에서 얻어진 세굴영역을 충분히 포괄할 수 있을 만큼 교각 전면부로 7m까지 확장하였으며 80년 빈도 홍수 조건에 대해 전반적으로 세굴보호공이 안정적임을 알 수 있었다.

본 실험 결과는 월정교 복원 사업에 절대적으로 필요한 수리특성 분석 및 세굴심, 세굴반경, 세굴보호공 등과 같은 교량 안정성 평가에서 반드시 검토되어야 하는 수리학적 인자들을 수리모형실험을 통해 분석한 것이며 특히 본 연구 결과들은 월정교 복원을 위한 설계 과정에서 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구는 월정교 뿐만 아니라 수리 구조물 형태의 문화재 또는 사적지를 복원하는 과정에서 수리학적 검토가 매우 중요하며 필수적인 것임을 보여주는 대표적인 사례라고 볼 수 있다. 향후 본 연구는 격자 틀과 사석을 조합하여 시공된 옛 형식의 세굴보호공이 세굴방지 효과 및 유사이탈로 인한 사석의 침하 안정성 측면에서 갖는 우수성을 추가적으로 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

경상북도 (2001). 지방2급하천 남·원동천 하천정비기본

계획

남시진 (2007). 월정교의 복원적 고찰, 건축역사연구, 제 16권 4호 통권53호, pp. 77-93.

Croad, R.N. (1997). *Protection from scour of bridge piers using riprap*. Transit New Zealand Research report No.PR3-0071, Transit NZ, Wellington, New Zealand, pp. 77.

Froehlich, D.C. (1989). "Local scour at bridge abutments." *Proc. ASCE National Hydraulics Conference*, Colorado Springs, U.S.A., pp. 13-18.

Julien, P.Y. (2002). *River Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Lauchlan, C.S. (1999). *Countermeasures for pier scour*. PhD thesis, The University of Auckland, Auckland, Iowa, U.S.A.

Melville, B.W., and Coleman, S.E. (2000). *Bridge Scour*. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, U.S.A.

Parola, A.C. (1993). "Stability of riprap at bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 10, pp. 1080-1093.

Parola, A.C. (1995). *Boundary Stress and stability of riprap at bridge piers in Rivers. Coastal and Shoreline Protection: Erosion Control Using Riprap and Armourstone*. John Wiley & Sons Inc., New York, U.S.A.

Richardson, E.V., and Davis, S.R. (1995). *Evaluating scour at bridges*. Report No. FHWA-IP-901-017, Hydraulic Engineering Circular No. 18(HEC-18), Third Edition, Office of Technology Applications, HTA-22, Federal Highway Administration, U.S. Dept. of Transportation, Washington, D.C., U.S.A., pp. 204

Richardson, E.V., Simons, D.B., and Lagasse, P.F. (2001). *River Engineering for highway Encroachments, Highways in the River Environment*. U.S. Department of Transportation, Federal highway Administration, Washington D.C.

(논문번호:08-63/접수:2008.05.06/심사완료:2008.06.23)