

# Case Study : 월정교 복원 설계를 위한 실험연구

## Case Study : Experimental Study for restoration of Woljeong Piers

여흥구\* / 강준구\*\* / 손병주\*\*\* / 김성중\*\*\*\*

Hong Koo Yeo, Joon Gu Kang, Byung Ju Son, Sung Jung Kim

### 요 지

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 발생하는 와류는 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 복원 시 치수안전성을 검토하고 복원될 월정교 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 세굴 방지 효과를 검토하였다.

**핵심용어 : 국부세굴, 동적세굴(live-bed scour), 단면축소세굴, 월정교 복원**

## 1. 서 론

최근 우리나라 하천사업의 이슈는 복원이라 할 수 있다. 이에 본 연구는 경주 남천의 역사와 문화를 지닌 신라 옛 교량 월정교를 복원하는 문화재복원사업의 하나로 수행 하였다. 교량복원의 경우 안전성에 대한 기술적 검토가 반드시 필요한데, 이는 교량복원시 하천 단면 축소로 인해 제방이 넘칠 경우 인명과 재산에 큰 피해를 주고, 홍수시 복원된 문화재가 파괴될 경우 예산낭비는 물론 파괴된 잔재로 인해 하류에 2차 피해를 발생시킬 수 있기 때문이다. 이에 경주 남천에 대해 기 수립된 하천계획 하에서 월정교 복원시 치수안전성을 검토하고 복원될 월정교 교각의 세굴에

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 책임연구원 · E-mail : yeo917@kict.re.kr  
\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 선임연구원 · E-mail : jgkang02@kict.re.kr  
\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 연구원 · E-mail : bjson@kict.re.kr  
\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 연구원 · E-mail : jin9482@kict.re.kr

대한 안정성을 평가하였다.

## 2. 수리모형실험

본 연구의 수리모형실험 대상구간은 그림2.1과 같은 구간을 하천 일반 현황, 구조물 현황, 하상 재료, 홍수흔적 등을 파악하여 수평·연직축척 1/20로 모형을 축척 제작하였다. 연구범위는 고정상실험과 이동상실험으로 구분하고 실험조건은 표2.1과 같이 수행하여 계획홍수량인 80년 빈도 홍수량에 대해 주로 분석하였다. 고정상실험은 현재 하도에 대한 실험과 교각이 설치되었을 때의 실험으로 구성된다. 이동상실험은 교각 주변 국부세굴실험을 수행하여, 각 교각의 세굴 평가하는 것이다. 실험 유량은 계획홍수량에 대한 것으로 live-bed scour 조건이며, 각 지점의 수위와 수심은 디지털 수위계와 1차원 프로펠러 유속계를 비롯해 LSPIV 기법을 사용하였다.

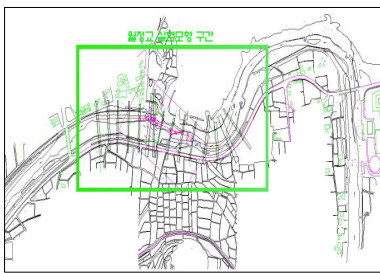


그림 2.1 모형제작 대상 구간

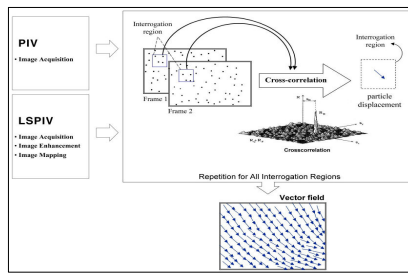


그림 2.2 LSPIV 기법의 영상처리 절차

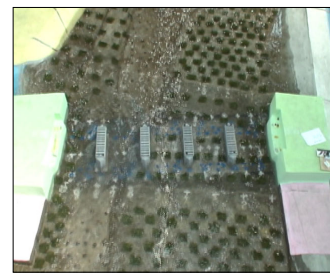


표 2.1 실험조건

산정지점	No. 13 기준빈도별 홍수량(CMS)					비고
	30년	50년	80년	100년	150년	
홍수량(CMS)	410	455	500	520	560	남천, 원동천 하천정비기본계획
홍수위(EL.m)	36.91	37.09	37.26	37.33	37.47	

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 월정교 부근 홍수위 검토(고정상실험)

고정상실험은 교각 설치에 따른 상류수위 변화와 교각 접근유속과 유황을 분석하여 홍수위 상승 및 교각세굴 평가의 인자를 얻는데 목적이 있다. 월정교 복원시 설치되는 교각폭 규모에 따라 하천의 통수단면이 축소될 것이며 하천흐름의 영향을 미칠 것이다. 이와 같은 영향은 교각의 흐름 방해로 인한 교량설치구간 상류부의 수위상승에 원인이 될 수 있다. 홍수위 검토는 교각설치 전·후의 홍수위를 비교 검토하여 교량복원에 따른 수위상승효과를 분석하였다. 그림 3.1은 80년 빈도의 홍수량으로 실험결과 홍수위는 교량설치로 인해 교량구간 상류부에서는 상승하고 하류부에서는 하강되는 현상이 관측되었고 최대유속은 교각 주변에서 0.87m/s이상의 고유속이 발생하고 있었다.

그림 3.2~3.4는 월정교 복원에 따른 교량 설치 전·후의 빈도별 홍수위를 나타내고 있다. 각각의 경우를 보면 홍수위빈도가 높을수록 교각설치에 따른 수위상승이 크게 발생하지만 상류로 갈수록 그 차이는 감소하는 것으로 측정되었다. 50년 빈도시 교량설치에 따른 수위상승효과는 상류 100 m 지점까지 영향을 미치고 있었으며, 80년 빈도와 100년 빈도시에는 상류 200 m 이상 수위상승이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 검토 결과 국부적인 홍수위 상승이 발생하는 구간은 상류 약

200m 까지이며 계획홍수시 약 1.1m 정도의 여유고를 유지하는 것으로 관측되었다.

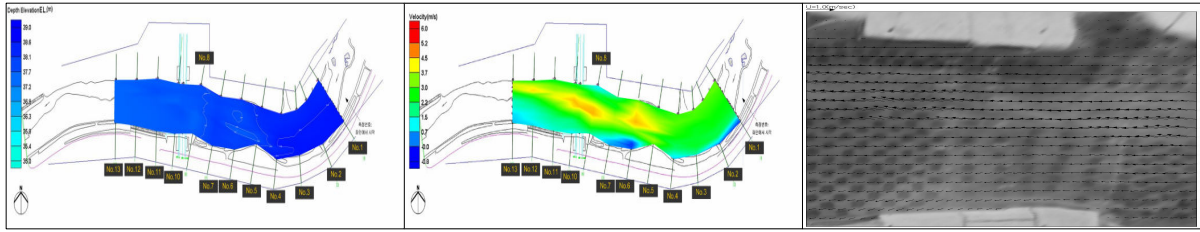


그림 3.1 계획홍수시 월정교부근 유속분포(LSPIV 측정)

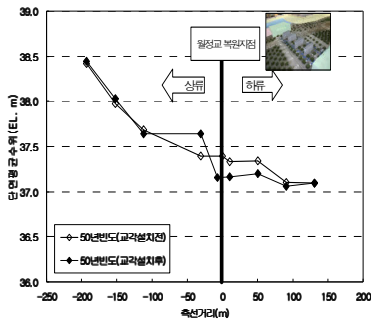


그림 3.2 홍수위 비교  
(50년 빈도)

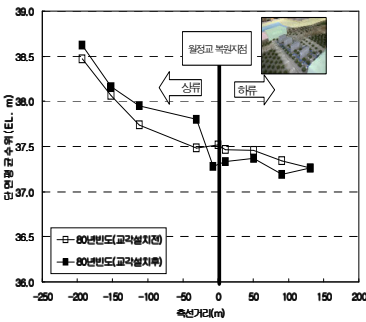


그림 3.3 홍수위 비교  
(80년 빈도)

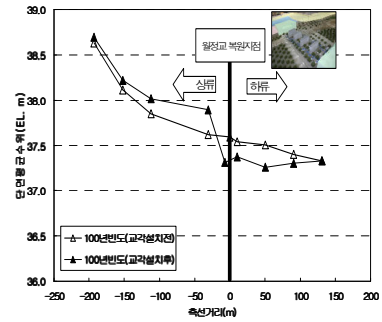


그림 3.4 홍수위 비교  
(100년빈도)

### 3.2 국부세굴 및 보호공 평가(이동상실험)

국부세굴 실험의 홍수량 및 홍수위 조건은 표 2.1에 정리된 바와 같이 계획홍수빈도인 80년 빈도 조건으로 실험하였고 실험을 통해 측정된 최대세굴심과 기존 공식을 비교하여 나타냈다. 각 식에 따라 약간의 차이는 있으나 전반적으로 일치되는 경향을 나타내고 있다. 교각국부세굴의 경향은 Live bed scour 조건으로 초기 급격한 세굴이 발생한 후 되메움과 세굴이 반복되어 발생하였다. 최대세굴심은 교각 4번에서 발생하였으며 측정치는 5.4 m 이며, 교각 1번에서 3.02 m로 최소값이 관측되었다. 세굴반경은 교각 4번에서 6.8 m로 최대값이 측정되었고 교각 1번에서 5 m로 최소값이 관측되었다. 일반적으로 세굴반경은 최대세굴심에 약 1.5 ~ 2 배가 측정되는데 본 실험 결과에서도 이에 부합되는 값이 측정되었다. 기존식의 수치는 Melville 식에서 5.7 m로 최대값이 계산되었다. 최대세굴심 비교는 표 3.1 에 나타냈다.



그림 3.5 모형사 포설



그림 3.6 교각 4의 세굴

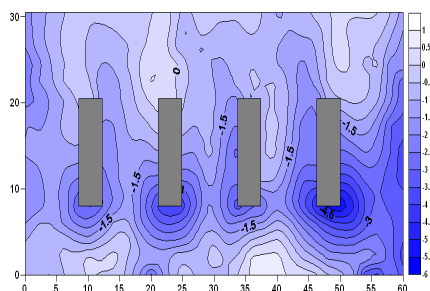


그림 3.7 교각세굴 실험결과 2D

표 3.1 경험식과 실험을 통한 세굴심 비교

교각	교각길이 (m)	교각폭 (m)	수위 (m)	유속 (m/s)	D50 (m)	경험식에 의한 세굴심(m)			실험측정 세굴심 (m)
						Melville	Richardson	Froehlich	
1교각	12.76	2.64	7.58	1.71	0.0015	5.7	3.77	4.77	3.02
2교각	12.76	2.64	7.6	2.02	0.0015	5.7	4.05	4.84	4
3교각	12.76	2.64	7.64	3.52	0.0015	5.7	5.15	5.11	3.3
4교각	12.76	2.64	7.58	2.92	0.0015	5.7	4.74	5.01	5.4

이에 따라 실험에서는 직경 4~8cm 규모의 사석을 이용하였다. 보호공 실험의 주요 내용은 기존 식에 의해 산정된 사석크기에 대한 실험평가와 포설범위 검토이다. 모형실험을 통해 산정된 규모의 사석이 홍수량에 대해 이탈하는가를 관찰하였으며 실험결과 제안된 사석이 홍수량에 대해 안정한 것으로 평가되었다. 포설범위 평가는 기존보호공 규모의 경우 보호공 전면부에서 세굴이 발생하여 사석이 이동하는 현상이 관측되었다. 이러한 결과는 보호공으로 설치된 사석이 향후 보호기능을 상실할 가능성이 있으므로 포설범위를 확장하여 제안하고 수정실험을 수행하였다. 수정 실험결과 보호공 전면부의 세굴현상은 발생하지 않았으며 상류부에서 유입된 유사가 일부 퇴적되는 현상이 보여 보호공의 안정성을 유지하는 것으로 관측되었다(그림 3.8~3.10 참조). 표 3.2는 실험검증을 통해 제안된 사석의 포설범위를 나타낸 것이다.

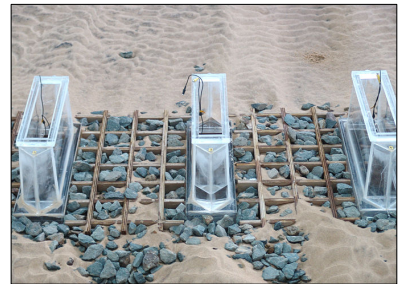
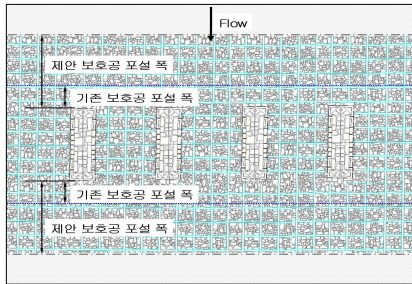


그림 3.8 보호공 평면의 개념도    그림 3.9 기존 보호공 실험    그림 3.10 수정보호공 실험

표 3.2 보호공 포설범위

교각	경험식에 의한 보호공 포설반경(m)						실험값(m)		제안된 보호공(m)			
	Lauchlan(1999)		Croad(1997)		Richardson(1995)							
	포설반경	포설깊이	포설반경	포설깊이	포설반경	포설깊이	포설반경	포설깊이	포설반경	포설깊이		
1교각	3.96~5.28	2.2~3.3	전면	5.28	2.2	13.2	3.3	전면	5	3.02	7	2.5
			측면·뒷면	14.52				측면·뒷면	3.6			
2교각	3.96~5.28	2.2~3.3	전면	5.28	2.2	13.2	3.3	전면	5.4	4	7	2.5
			측면·뒷면	14.52				측면·뒷면	5.2			
3교각	3.96~5.28	2.2~3.3	전면	5.28	2.2	13.2	3.3	전면	5.6	3.3	7	2.5
			측면·뒷면	14.52				측면·뒷면	4.3			
4교각	3.96~5.28	2.2~3.3	전면	5.28	2.2	13.2	3.3	전면	6.8	5.4	7	2.5
			측면·뒷면	14.52				측면·뒷면	5.8			

#### 4. 결론

본 수리모형실험을 통하여 월정교 복원시 하천에 미치는 영향을 평가하였다. 고정상 실험결과

교량 복원시 하천 단면이 축소되어 교량 설치 지점으로부터 최대 200m까지 상류수위의 상승을 가져왔고 교각 주위의 접근유속 역시 상승하였다. 이동상 실험에서는 Live bed scour 조건으로 실험을 수행하였으며, 실험결과 교각주위에서 초기에 급격한 세굴이 발생한 후 퇴메움과 세굴이 반복 발생하였다. 이때 최대 세굴심은 5.4m였고 최대 세굴반경은 6.8m로 발생하였다. 세굴보호공은 현장조사과정에서 출토된 신라시대 것으로 추정되는 보호공 형태의 목재틀을 기초로 실험을 수행하여 기존 이론식과 결과를 비교하며, 세굴방지 효과를 평가하였다. 교량의 역사적 의미를 고려하여 평가결과는 비교적 높은 안전율을 고려하였다. 보호공 사석의 깊이는 2.5m, 포설반경은 7m로 포설하는것이 안정성을 유지하는 것으로 관찰되었다. 이를 바탕으로 1000년 전 교량이 수리학적으로 안전성을 확보하여 축조되기를 기대한다.

## 참 고 문 헌

1. 경상북도, 2001, 지방2급하천 남·원동천 하천정비기본계획
2. 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, 77pp
3. Froehlich, D.C., 1989. Local scour at bridge abutments, Proc., ASCE National Hydraulics Conference, Colorado Springs, U.S.A., 13-18
4. Lauchlan, C.S., 1999. Countermeasures for pier scour. PhD thesis, The University of Auckland, Auckland, Iowa, U.S.A.
5. Melville, B.W. and Coleman, S.E, 2000. Bridge Scour. Water Resources Publications, LLC, highlands Ranch, Colorado, U.S.A.
6. Richardson, E.V., 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., November, 204p.
7. 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.
8. Parola, A.C, Stability of riprap at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 119(10), 1080-1093
9. 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. edited by C.R. Thorne, et al., John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A.