

홍수시 소하천 교량에서의 하상세굴 연구 - 구례 정장교를 중심으로 -

정재성·정만·김민환*
순천대학교 토목환경공학부 · 여수대학교 토목환경공학부 · 호남대학교 토목환경공학과
(2001년 10월 6일 접수; 2002년 10월 24일 채택)

A Study on The Bed Scour at Stream Bridge during Flood - In the case of Jeongjang Bridge in Gurye -

Jae-Sung Jung, Mahn Chung and Min-Hwan Kim**
Division of Civil & Environmental Engineering, Suncheon National University, Sunchon 540-742, Korea
*Dept. of Civil & Environmental Engineering, Yosu National University, Yosu 550-749, Korea
**Dept. of Civil & Environmental Engineering, Honam University, Gwangju 502-791, Korea
(Manuscript received 6 October, 2001; accepted 24 October, 2002)

The hydrological frequency of the flood in July 2000 at Seosi stream basin in Gurye and the bed scour of the stream channel were estimated to investigate the bed scour related with Jeongjang bridge collapse. The storm over the basin in July 2000, 303mm/day was 103year frequency rainfall and the equivalent flood was 2580cms. As the results of 100year and 30year flood application, flood level 30.78~31.38m and mean velocity 3.79~4.03m/s were appeared. And the purification project of Seosi stream increased the velocity of the section near to Jeongjang bridge by the improvement of conveyance at the downstream. The local scour at pier was the major factor of bed scour at Jeongjang bridge site and the total scour at pier No.6 was increased from 2.32m to 2.45m by the purification project.

Key words : Flood frequency, River analysis system, Bridge scour

1. 서론

홍수기에 하천시설물의 파괴는 사전에 예방하는 것이 최선이겠지만, 하천시설물의 설계단계부터 시공 및 관리에 이르기까지 소요되는 예산과 인력의 한계로 인하여 모든 시설물 파괴를 막을 수는 없는 것이 현실이다. 그러나 이러한 홍수피해에 대해서 그 원인을 분석하고 대책을 검토함으로써 보다 경제적이고 효과적인 시설물 관리가 가능할 것이다.

본 연구에서는 이러한 연구의 일환으로 2000년 7월 홍수시 전남 구례군 서시천 수미보 하류 60m 지점에 있는 정장교의 교각침하와 관련한 하상세굴 현상을 분석하기 위하여, 2000년 7월 홍수의 수문학적 빈도를 검토하고, 서시교부터 수미보까지 900m

구간에 대한 수리학적 특성변화와 하상세굴 현상을 분석하였다.

2. 대상지역 개황

정장교가 있는 서시천유역은 Fig. 1과 같이 동경 127° 22' 37" ~ 127° 32' 36", 북위 35° 12' 10" ~ 35° 22' 에 위치한 섬진강의 제1지류로서, 유역면적 153.0km², 유로연장 28.1km, 하상경사 1/40~510인 준용하천이다. 구례군 산동면(EL.1,430m)에서 발원하여 남쪽으로 유하하면서 무동천, 수락천, 무은천, 천은천, 백련천과 합류하여 구례읍 봉동리에서 섬진강 우안으로 유입된다¹⁾. 정장교는 섬진강 합류부 상류로 2,150m 지점에 있으며, 위치개황도는 Fig. 2와 같다.

정장교는 1970년에 총연장 100m로 준공된 콘크리트 슬라브형 농로교를 1992년에 하천 우안측으로 60m 연장하여 현재는 총연장 160m, 교량 폭 5.0~

Corresponding Author : Jae-Sung Jung, Division of Civil & Environmental Engineering, Suncheon National University, Sunchon 540-742, Korea
Phone : +82-61-750-3813
E-mail : chjs@suncheon.suncheon.ac.kr

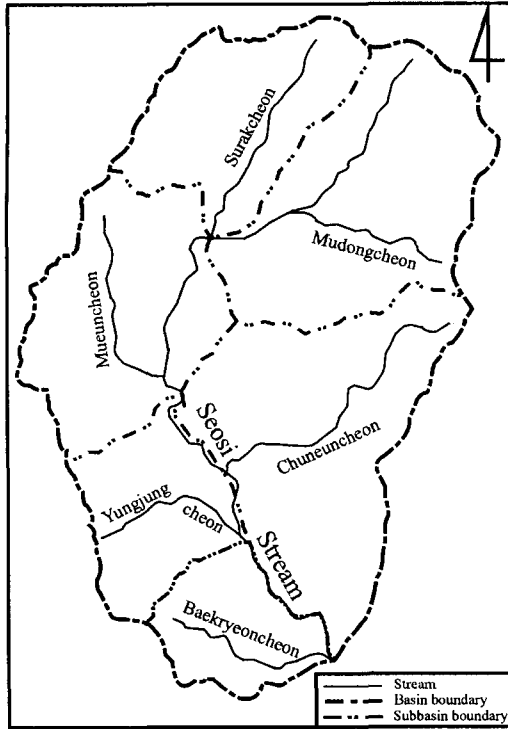


Fig. 1. Basin map of Seosi stream.

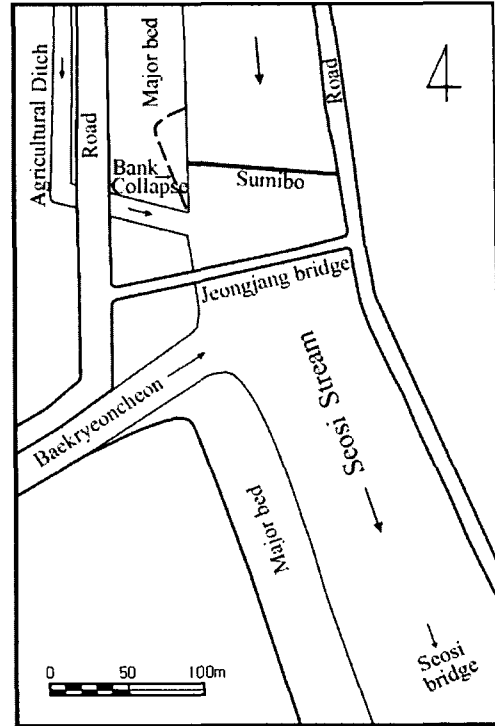


Fig. 2. Status map of Jeonggyang bridge.

5.6m, 교각 15개로 구성되어 있는데, 1970년 준공된 구교량 부분의 우물통 기초가 2000년 7월 호우시에 침하되어 교량이 붕괴되는 사태를 초래하였다. 세부적인 붕괴내역은 Fig. 3과 같이 좌안으로부터 5번째 교각이 19cm, 6번째 교각이 150cm, 7번째 교각이 8cm 침하되어, 교량 상판 2경간(20m)이 V자형으로 변형되면서 슬래브 균열 및 난간 파손이 야기된 상태로 현재는 통행이 불가능하다²⁾.

3. 홍수사상의 수문학적 분석

구례군청에서는 8개 읍면에 각 1개소의 우량관측소를 운영하고 있으나 일자료는 '98년부터 3개년만이 활용 가능하다. 이들중 서시천의 유역강우량에는 산동(SD), 광의(GE), 용방(YB), 구례(GR), 마산(MS)의 5개소 강우량이 기여하고 있다.

2000년 7월 홍수의 규모를 평가하려면 30년 이상의 장기관측자료를 확보해야 하므로 주변지역의 관측자료를 검토하여 선정하여야 한다. 따라서 장기간의 강우량자료가 비교적 잘 정리된 주변의 기상청 기상관측소 4개소(광주, 순천, 남원, 진주)와 서시천관련 구례군청 5개소 강우량의 선형상관성을 식(1)을 이용하여 분석하고, 그 결과를 Table 1에 정리하였다.

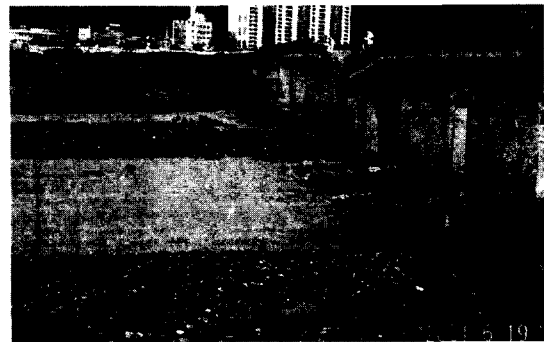


Fig. 3. A view of broken Jeonggyang bridge.

$$Y_i = b_0 + b_1 \cdot X_i \quad (1)$$

여기서, Y_i 는 구례군청의 지점별 관측 일우량이고, X_i 는 기상청 관측 일우량, R^2 은 결정계수, S 는 추정의 표준편차이다. Mean은 구례군청 8개 우량국의 산술평균이다.

Table 1에서 기상청 우량과의 상관성은 결정계수가 0.00~0.41의 범위로 상관이 거의 없고, 구례군청 평균에 대해서는 결정계수 0.57~0.86으로 비교적 높은 상관성을 보였다.

따라서, 서시천 유역의 확률강우량 계산에는 구례

Table 1. Correlation between the rainfalls observed by different organization

Y_i	X_j	b_0	b_1	R^2	S
SD	Mean	51.381	0.276	0.144	23.885
	GJ	76.624	-0.085	0.012	29.154
	SC	62.628	0.064	0.013	28.124
	NW	70.374	0.076	0.007	23.682
	JJ	74.955	-0.139	0.040	30.616
GE	Mean	7.436	0.889	0.723	19.186
	GJ	69.568	0.034	0.001	39.726
	SC	46.794	0.322	0.202	32.876
	NW	62.321	0.223	0.028	35.970
	JJ	62.055	0.109	0.015	38.328
YB	Mean	26.892	0.602	0.565	18.724
	GJ	71.529	-0.081	0.008	33.475
	SC	52.201	0.199	0.109	29.383
	NW	74.190	0.0035	1.3E-05	26.634
	JJ	70.270	-0.065	0.009	31.269
GR	Mean	-12.841	1.230	0.856	19.831
	GJ	63.157	0.150	0.012	51.261
	SC	22.604	0.646	0.413	38.623
	NW	64.007	0.191	0.011	49.651
	JJ	71.578	-0.042	0.001	51.265
MS	Mean	-2.700	0.987	0.800	17.394
	GJ	76.687	-0.179	0.025	40.705
	SC	22.604	0.646	0.413	38.623
	NW	75.017	-0.082	0.003	38.709
	JJ	68.825	-0.052	0.003	40.694

SD: San-Dong, GE: Gwang-ui, GR: Gurye
 SC: Suncheon, GJ: Gwangju, MS: Masan
 YB: Yongbang, NW: Namwon, JJ: Jinju

군 관내에서 관측된 강우량을 이용하여야 할 것으로 판단되었으므로, 장기간의 우량자료를 보유한 섬진강홍수통제소 구례2 관측소의 자료를 활용하였다. 서시천 유역에 인접한 토지천의 하천정비기본계획보고서³⁾ 제시된 구례2 지점의 IWAI분포 확률강우량은 Fig. 4와 같이 도시된다. Fig. 4에서 서시천의 설계빈도 80년에 대한 강우량 289.9mm/day를 구하고, 지점강우량의 유역적용에 따른 면적우량 환산을 95%⁴⁾ 적용하여 서시천 설계강우량을 275.4mm/day로 구하였다.

한편, 정장교 파괴시에 서시천유역에 내린 1일연속 유역강우량의 최대치를 계산하기 위하여 Table 2와 같이 5개 우량국의 티센계수를 구하여 적용하였다. Table에서 T-M은 구례군청 강우량의 티센평균, F-C는 섬진강홍수통제소 구례2 지점 강우량이다⁵⁾. Table 2에서 2000년 7월 14일에 구례군청의 관측치 178mm/day는 동일시간에 섬진강홍수통제

Table 2. Thiessen coefficients and maximum daily rainfall on Seosi stream basin

Class	SD	GE	YB	GR	MS	Total
Area(km ²)	98.2	18.8	22.1	8.5	5.4	153.0
Thiessen	0.642	0.123	0.145	0.055	0.035	1.000
2000.7.10 10~7.11 09	115.9 mm/day T-M					
2000.7.14 14~7.15 13	178.0 mm/day T-M					
2000.7.14 15~7.15 14	303.0 mm/day F-C					

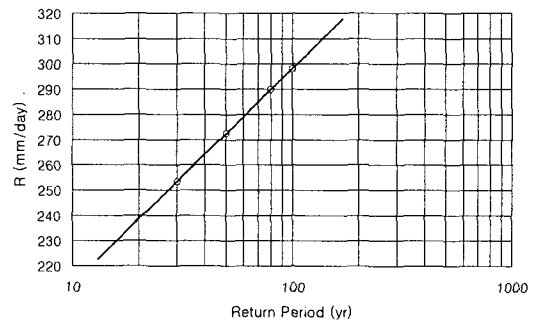


Fig. 4. Daily probability rainfall at Gurye2.

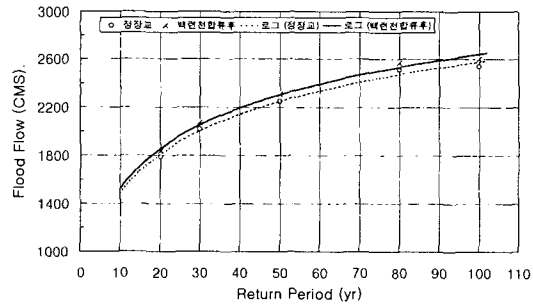


Fig. 5. Probability flood at the objected site.

소에서 관측한 강우량의 95%인 287.9mm/day의 61.8%에 상당하는데, 이러한 차이는 강우관측시설의 운영관리방법에 따른 결과로 판단된다.⁶⁾

일강우량 178mm/day는 Fig. 4에서 5년 빈도, 303mm/day는 103년 빈도에 해당되는데, 홍수통제소의 우량관측상태가 더 양호하므로 303mm/day를 채택하면, 2000년 7월의 호우는 설계빈도 80년을 초과한 것으로 판단된다.

확률홍수량을 구하기 위해서는 확률강우량의 손실우량과 유역규모, 형태 및 특성들을 고려한 유출계산이 필요한데, 본 연구에서는 서시천 하천정비기본계획⁷⁾에서 유역추적법으로 구한 Fig. 5와 같은 확률홍수량을 이용하였다.

Fig. 5에서 백련천 합류전 및 합류후 지점에서 5년빈도 홍수량은 1,750, 1,900m³/s이고, 103년 빈도

홍수량은 2,580, 2,650m³/s로 추정되었다. 이들 홍수량에 대한 수리특성 및 세굴 분석을 위해서는 수리모형(hydraulic model)을 이용한 해석이 필요하다.

4. 정장교 지점 수리특성 및 세굴분석

교량의 하상세굴을 분석하기 위해서는 해당 지점의 유속, 수심 등 수리특성을 먼저 분석하여야 한다. 그런데, 2000년 상반기에 정장교 하류부의 서시천 정화사업에는 하도정비가 포함되어 있었고, 그에 따른 하류의 통수능 개선은 정장교 구간의 수면경사와 유속을 증가시켰을 것으로 추정되었다. 따라서, Fig. 2에 제시한 정장교 주변의 수리특성 분석구간을 정장교 하류 840m지점의 서시교부터 정장교 상류 60m지점의 수미보까지 900m로 하였다.

서시천 하천정비기본계획에 제시된 확률강우량과 확률홍수량은 홍수통제소의 구레2 지점 우량에 근거한 것들이므로 2000년 7월 14일 호우는 3장에 제시한 약 100년 빈도의 호우로 판단된다. 이에 따른 100년 빈도 홍수량을 2000년 서시천 정화사업 전·후의 하천단면에 적용하여 분석구간내 각 단면의 홍수위와 유속분포를 계산하고, 정장교 하상세굴량을 추정하였다. 또한, 확률홍수량을 30년 빈도의 작은 값으로도 적용해 홍수로 인한 유량증가가 하상세굴에 미치는 영향도 평가하였다.

하천단면자료는 2000년 서시천 정화사업 전·후의 하천측량자료를 적용하였다. 홍수량은 30년 및 100년 빈도홍수량(용정천 합류후~백련천 합류전: 2019 및 2539m³/s, 백련천 합류후~서시천 하구: 2069 및 2602m³/s)을 각각 적용하였다.

수리특성 분석모형은 종합하천 해석모형인 HEC-RAS⁸⁾를 채택하였다. 대상구간내 12개 지점의 횡단면자료를 Fig. 6과 같이 입력하고, 교량에서 교각의 폭은 0.6m, 교각 기초부는 1.2m, 교각의 흐름방향 길이는 3.0m로 적용하였다. 2000년 7월 홍수시 서시천의 서시교~수미보 구간에 대한 수리학적 특성 분석결과는 Table 3 및 Fig. 7과 같다.

Table 3에서 서시천 정화사업에 따른 정장교 하류구간의 하도정비의 결과로 100년빈도 홍수에 대

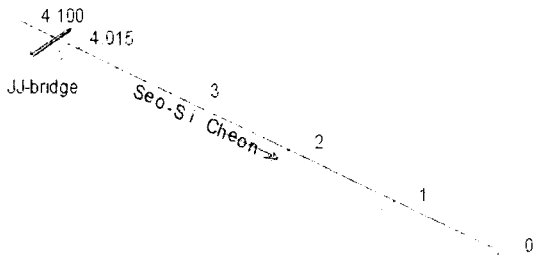


Fig. 6. Channel sections of analyzed area.

Table 3. Hydraulic variation of Seosi stream by the flood and section conditions

Site	Water El.(m)			Velocity (m/s)		
	100yr		30yr	100yr		30yr
	pre	post	post	pre	post	post
4.100	31.74	31.74	31.28	5.41	5.41	5.06
4.095	31.94	31.73	31.09	4.21	4.47	4.32
4.045	31.96	31.74	31.11	3.83	4.04	3.82
4.040	Jeonggiang bridge section					
4.035	31.76	30.66	30.13	4.02	5.51	5.27
4.015	31.83	30.41	29.26	3.67	5.46	6.17
4.000	31.96	30.46	30.04	3.03	4.30	3.85
3.000	31.82	30.49	30.07	2.98	3.28	2.84
2.000	30.55	30.41	30.00	5.10	3.00	2.59
1.000	30.27	30.05	29.74	4.13	3.55	3.02
0.000	29.33	29.33	29.33	5.14	4.56	3.63

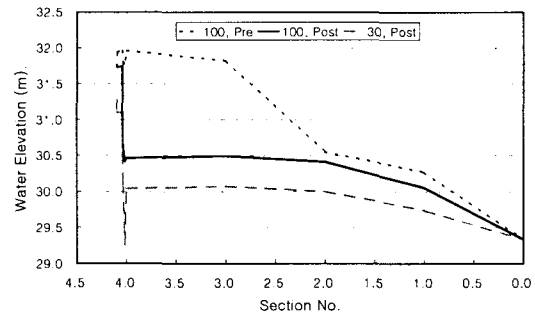


Fig. 7. Longitudinal profile of the stream.

해 정장교 상류측 홍수위 0.22m 감소, 평균유속 0.21m/s 증가, 하류측 홍수위 1.10m 감소, 평균유속 1.49m/s 증가를 보였다. 이는 하류측 하도정비로 인해 정장교 지점의 하상세굴이 증가될 수 있음을 의미한다. 한편, 30년 빈도 홍수량 적용에서는 520m³/s의 유량감소에 의해 정장교 상류측 홍수위 0.63m 감소, 평균유속 0.22m/s 감소, 하류측 홍수위 0.53m 감소, 평균유속 0.24m/s 감소로, 하도정비에 의한 영향보다는 작은 변화를 보였다.

위 결과로부터 각 단면의 횡단면 유속분포를 계산하는데, 정화사업후 100년 빈도 홍수시 정장교 지점에 대한 횡단면 유속분포의 계산 예를 Fig. 8에 제시하였다.

대상구간의 12개 단면에 대해 Table 3에 제시한 수리조건별로 Fig. 8과 같은 유속분포를 구하고 횡단면상 각 지점의 유속과 수리특성으로부터 정장교 지점의 세굴심도를 계산하였다.

교량부 하상세굴은 단면수축, 교각국부, 교대국부의 3부분으로 구분하여 계산된 값을 합산하는데 각

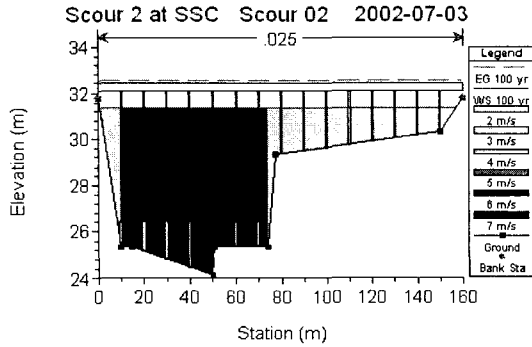


Fig. 8. A distribution of sectional velocity.

요인별 세굴심도 계산에는 다음과 같은 식들을 적용하였다. 단면수축 세굴은 청정수 조건에서 Lausen⁹⁾이 제안한 식 (2), 교각 국부세굴은 이동상과 청정수 조건을 고려하여 Richardson¹⁰⁾이 제시한 CSU식 (3), 교대 국부세굴은 실험수로의 이동상 세굴실험에 의한 경험식인 Froehlich¹¹⁾식 (4)를 채택하였다.

$$y_s = \left[\frac{Q_2^2}{CD_m^{2/3} W_2^2} \right]^{3/7} - y_0 \quad (2)$$

$$y_s = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 a^{0.65} y_1^{0.35} Fr_1^{0.43} \quad (3)$$

$$y_s = 2.27 K_5 K_6 (L')^{0.43} y_a^{0.57} Fr^{0.61} + y_a \quad (4)$$

여기서, y_s 는 요인별 세굴심도(m), Q_2 는 수축단면 유량(m^3/s), D_m 은 수축단면에서 고정가능 최소 입경 ($1.25 D_{50}$, m), W_2 는 수축단면의 주수로 바닥 폭(m), C 는 환산계수(40), y_0 는 수축단면의 주수로 평균수심(m), K_1, K_2, K_3, K_4 는 교각형상, 흐름방향, 하상조건, 하상재료 보호층에 대한 보정계수, a 는 교각폭(m), y_1 은 교각 직상류의 수심(m), Fr_1 은 교각 직상류의 Froude수, K_5, K_6 는 교대형상과 흐름방향에 따른 보정계수, L' 은 교대의 흐름에 직각방향 길이(m), y_a 는 접근단면의 평균수심(m), Fr 은 접근단면의 Froude수이다.

세굴심도 계산에서 하상토의 입도는 보성강 및 요천하류 지점의 하상토 입도분석 결과로부터 $D_{50} = 0.85mm$, $D_{90} = 1.80mm$ 를 적용하고, 교각과 흐름방향 경사각은 0° 를 채택하였다.

세굴심도 계산결과에서 정장교 횡단부의 하상세굴은 교각국부 세굴이 주도적인 것으로 나타났다. 수문조건별 세굴심도 추정결과중에서 100년 빈도 홍수에 대한 추정사례를 Fig. 9에 도시하였고, 세굴심도가 큰 좌안에서 4번, 5번째 교각에 대한 총세굴심도를 Table 4에 요약하였다. 실측세굴심도는 5번 교각부 1.58m, 6번 교각부 1.97m이었다.

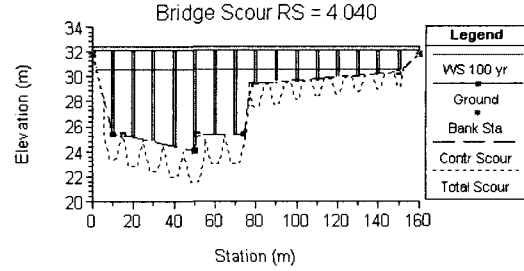


Fig. 9. A scour section at Jeongjang bridge.

Table 4. Scour depths at Jeongjang bridge

Condition(yr)	100yr,pre		100yr,post		30yr,post	
Pier No.	4	5	4	5	4	5
Up. Depth (m)	6.97	6.98	6.19	6.20	5.70	5.71
Velocity(m/s)	5.16	5.14	6.42	6.39	5.91	5.89
Froude No.	0.62	0.62	0.82	0.82	0.79	0.79
Scour Depth(m)	2.50	2.48	2.54	2.52	2.44	2.42

Table 4에서 5번 교각의 실제 침하량 1.50m에 비하여 매우 작은 침하량 0.19m를 보인 4번 교각의 세굴심도가 0.02m씩 크게 계산되었는데, 이는 교각 침하가 세굴보다 지반의 연약화 등 다른 요인에 의한 영향을 같이 받기 때문으로 판단된다.

Table 4의 세굴심도 추정치가 실제보다 크게 나타난 것은 과대하게 추정된 설계홍수량과 그에 따라 불가피하게 조정된 하상의 조도계수, 하상토 입도분석 자료의 부정확성, 상류부 하천단면 측량자료의 부정확성 등 여러가지 원인에 의한 것으로 판단되지만, 본 연구가 상대적인 크기만을 개략적으로 비교하기 위한 것이므로 이에 대한 세부조사는 실시하지 않았다.

이상의 결과로부터 교각기초가 가장 심하게 침하되어 정장교 붕괴에 결정적인 영향을 미친 5번 교각은 서시천 환경정비로 인하여 홍수량이 2,539 m^3/s 일 때 세굴심도가 2.48m에서 2.52m로 0.04m만큼 더 세굴될 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 홍수량의 크기에 따른 영향을 검토하기 위하여 홍수량이 2,019 m^3/s 일 때 세굴심도를 추정한 결과 2.33m로 나타나 홍수량감소에 의해 세굴심도가 0.10m의 감소되었다.

5. 결 론

교각침하와 관련한 하상세굴을 분석하기 위하여 수행된 본 연구의 결과는 다음과 같다.

섬진강홍수통제소에서 관측한 2000년 7월 서시천 유역의 최대호우는 303mm/day로 103년 빈도의 호

우였고, 이에 따른 정장교지점 확률홍수량은 2580 m³/s이었다.

서시교부터 수미보까지 900m 구간에서 100년 빈도 홍수시 서시천 정화사업의 영향으로 홍수위 0.2~1.10m 감소와 평균유속 0.21~1.49m/s 증가를 보여 정장교 지점의 통수능이 개선된 것으로 나타났다. 또한, 30년 빈도 홍수로의 유량 감소시 0.53~0.63m의 수위감소와 0.22~0.24m/s의 유속감소를 보였다.

정장교의 하상세굴은 단면수축에 의한 세굴은 거의 없고 교각의 국부세굴이 주요한 역할을 한 것으로 나타났다.

교각기초가 가장 심하게 침하되어 정장교 붕괴에 결정적인 영향을 미친 5번 교각은 서시천 환경정비로 인하여 홍수량 2,539m³/s일 때 세굴심도가 2.48m에서 2.52m로 0.04m만큼 더 세굴될 수 있음을 보였다.

또한, 홍수량의 규모에 따른 영향검토에서는 520 m³/s의 홍수량변화에 의해 세굴심도가 0.10m 변화하였다.

본 연구는 하천의 수문학적 특성분석과 하천수리모형을 이용하여 소하천 교량에서의 하상세굴을 연구한 것으로 보다 세밀한 교각부의 토질조사와 횡방향 유속을 계산할 수 있는 2차원 수리해석을 이용한 후속연구가 필요하다.

참고문헌

1) 구례군, 2000, 구례통계연보, 19-74.
 2) 구례군, 2000, 정장교 호우피해 조사보고.

3) 전라남도, 1993, 하천정비기본계획(토지천, 마산천, 송광천, 내북천).
 4) U.S. NWS, 1963, Rainfall frequency atlas of United States for durations from 30 minutes to 24 hours and return period from 1 to 100 years, U.S. Weather Bureau Technical Paper, 4.
 5) 섬진강홍수통제소, 2000, 섬진강홍수예경보, 건설교통부, 89-128.
 6) Debruin, H.A.R., 1976, The accuracy of measuring precipitation with a rain gauge network, Proceedings of Technical Meeting 33, Committee for Hydrological Research TNO, Netherlands.
 7) 전라남도, 1989, 하천정비기본계획(서시천, 무동천, 수락천, 무은천, 용정천, 천은천, 백연천).
 8) HEC, 1998, HEC-RAS River Analysis System, Ver.2.2 Hydraulic Reference Manual, US Army Corps of Engineers.
 9) Laursen, E.M., 1963, An Analysis of Relief Bridges, ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 92(HY3).
 10) Richardson, E.V., D.B. Simons, and P. Julien, 1990, Highways in the River Environment, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
 11) Froehlich, D.C., 1989, Local Scour at Bridge Abutments, Proceedings of the 1989 National Conference on Hydraulic Engineering, ASCE, 13-18.