

OE4 집중호우에 따른 교량 세굴변동 특성에 관한 연구

송인렬*, 심창석¹, 최윤영², 고수현³

경일대학교 대학원 박사과정, ¹상주대학교 환경공학과,

²상주대학교 환경공학과, ³상주대학교 토목공학과

1. 서 론

우리나라는 산악지역이 국토의 대부분을 차지하고 있어 전체유역을 놓고 볼 때 하천이 차지하는 부분보다는 중소하천이 차지하는 부분이 상대적으로 크고 교량의 길이가 짧은 소교량이 수적으로 많은 부분을 차지하고 있다. 또한, 소교량을 가지고 있는 중소하천은 대부분 산악지대에 위치하여 하상경사가 크기 때문에 유속이 대체적으로 빠르고 평상시 흐름방향과 홍수시 흐름방향이 현격히 차이나는 경우가 많다.

이러한 지형적 특성과 더불어 우리나라의 연강우량의 2/3 이상이 여름철에 집중되고 있을 뿐만 아니라 1995년 충남 서해안지역, 1996년에 경기도 연천지역 및 1998년 전국을 강타한 게릴라성 집중호우, 1999년 경기북부 등과 같은 이상강우로 인하여 중소하천에 위치한 많은 하천교량이 붕괴되어 피해를 가중시켰다. 이들 교량붕괴 원인의 상당부분은 세굴 때문인 것으로 분석되고 있고 교량안전 문제는 구조적 문제보다는 세굴의 영향이 더 크다 할 수 있다. 그러나, 세굴이 발생하는 물리적 현상은 많은 인자들 즉, 하천의 지형적 특성, 하천을 가로지른 위치, 홍수의 특성, 하상과 제방의 구성재료의 특성 등이 서로 복잡하게 연계되어 발생되기 때문에 해석하기가 쉽지 않다.

본 연구에서는 교량의 세굴량 분석기능 등이 추가된 HEC-RAS모형을 이용하여 하천교량 지점에서의 홍수로 인한 최대세굴심, 설계홍수량 유하시의 하천 수리계산, 세굴량 산정을 위해 FHWA의 HEC No. 18에서 추천하고 있는 세굴량 추정방법을 이용하여 하천교량 지점에서 총세굴량을 추정코자 하였다.

2. 교량세굴의 기본이론

세굴현상은 하상 및 제방에서 흐름의 침식활동으로 인하여 하상재료가 제거되는 현상으로, 흐름특성 및 하상재료의 구성에 따라 서로 다른 세굴양상을 보여 준다. 느슨한 입상토양은 세굴이 빠른 반면, 점착성 토양은 비교적 세굴이 느리다. 그러나 궁극적으로 점착성 토양은 사질하상과 같은 정도의 세굴깊이를 가진다. 모래나 자갈과 같은 하상재료의 세굴은 수 시간에 최대깊이에 도달하며 점착성 하상재료는 수일, 사질암반 및 혈암은 수개월, 석회암은 수년, 그리고 화강암은 수세기에 걸쳐 최대 세굴깊이에 도달한다.

하천에서의 세굴은 시간에 따라 장기적인 변화와 단기적인 변화로 구분할 수 있는데, 장기적인 변화(long-term aggradation or degradation)는 하상상승이나 하상저하로 하천과 유역에 있어서의 수리특성과 하천단면변화와 관련이 있고, 여러 학자들에 의해 장기간

의 하상변화를 예측하는 공식들이 제안되고 있으나 아직 정확한 예측을 하지 못하는 실정이다.

단기변화로는 단면축소로 인한 세굴 및 국부세굴로 단면축소세굴(contraction scour)은 교량 등 인공구조물에 의해 하천내의 통수단면적이 축소되어 발생되고 국부세굴(local scour)은 다시 교각과 교대에서의 국부세굴로 나눌 수 있는데, 흐름속에 설치된 구조물에 의한 흐름의 와류(vortex) 때문에 발생하게 된다.

따라서, 총세굴깊이(total scour)는 하상의 상승 및 저하, 통수단면 축소에 의한 세굴, 그리고 국부세굴의 3가지 요소로 각각 나누어 평가한 다음 이를 대수적으로 합산함으로써 구하게 된다.

2.1 장기적인 하상변동

하상의 상승은 다른 지점에서 침식된 하상재료의 퇴적에 의해서 발생하며, 하상의 하강은 침식으로 인한 하상고의 감소가 발생한다. 장기적인 하상고 변화의 요인들은 하천유역의 특성, 댐 등과 같은 상하류의 구조물, 유역의 토지이용변화(도시화, 벌목 등), 하천의 개수, 하류부 하상고의 변화, 하천의 만곡, 하상재료, 홍수특성 등을 들 수 있다. 이러한 장기적인 하상고의 변화를 평가 및 이해하기 위해서는 교량단면에 있어서의 모든 영향, 즉 유역으로 부터의 유출, 하천으로의 유사의 이동, 하천의 유사 이송량 및 이와 같은 인자들에 대한 반응을 고려하여야 한다.

2.2 단면축소세굴

통수단면 축소에 의한 세굴은 홍수시 하천의 통수단면이 자연적인 축소나 교량에 의해 축소되었을 때 발생하게 되는데, 통수단면의 축소로 평균유속 및 하상의 소류력(tractive force)의 증가가 있게 된다.

따라서, 축소단면에 있어서 침식력이 증가하고 유입하는 토사량보다 많은 양의 하상재료가 제거되어 진다. 이러한 하상재료 이송량의 증가로 하상고가 낮아지고 통수단면은 증가하며 평형상태에 이를 때까지 유속 및 소류력이 감소하게 된다.

통수단면 축소에 의한 세굴은 동적세굴(Live-bed scour)과 정적세굴(Clear-water scour)에 대하여 고려를 한다. 낮은 유출량에서는 정적세굴이 발생하고 유출량이 증가함에 따라 동적세굴로 바뀌며, 유출량이 감소하는 단계에서는 다시 정적세굴이 발생한다.

가. 동적세굴과 정적세굴의 결정

교량 상류부의 접근단면에서의 흐름이 하상재료를 운반하는지에 대한 결정을 하기 위해 초기 움직임에 대한 한계유속(V_c)를 계산하고, 수축단면(교량 직상류의 단면)에서의 평균유속(V)과 비교하여 하상재료의 한계유속이 평균유속보다 크면($V_c > V$) 정적세굴이 발생하고, 이와 반대이면($V_c < V$) 동적세굴이 발생한다.

하상재료를 이동시키는 한계유속은 다음의 Laursen 공식으로 산정한다.

$$V_c = 10.95y_1^{1/6}D_{50}^{1/3}$$

나. 동적세굴량 추정

HEC No. 18에서는 다음과 같은 Laursen 공식으로 동적세굴량을 추정하도록 추천하고 있으며, 해당 단면을 좌안, 주수로, 우안으로 나누어 각각 계산한다.

$$y_2 = y_1 \left[\frac{Q_2}{Q_1} \right]^{6/7} \left[\frac{W_1}{W_2} \right]^{K_1}, \quad y_s = y_2 - y_0$$

Table 1. K_1 계수

V_s/ω	K_1	하상재료 이동양상
< 0.50	0.59	대부분 하상접촉 이동
0.50 ~ 2.0	0.64	부분적인 부유유사 이동
> 2.0	0.69	대부분 부유유사 이동

다. 정적세굴량 추정

HEC No. 18에서는 다음과 같은 Laursen 공식으로 정적세굴량을 추정하도록 추천하고 있으며, 해당 단면을 좌안, 주수로, 우안으로 나누어 각각 계산한다.

$$y_2 = \left[\frac{Q_2^2}{CD_m^2 W_2^2} \right]^{3/7}, \quad y_s = y_2 - y_0$$

2.3 국부세굴

국부세굴은 극히 일부분의 수로폭 부분에서만 일어나는 형태로서 주로 교각, 교대, 돌출부와 제방주위에서 발생하고 흐름의 가속과 흐름의 방해에 의해 야기된 와류(vortex)의 형성으로 인하여 발생한다.

와류는 교각의 상류측면에서 물이 돌고, 따라서 흐름이 가속됨으로 인해 발생하며 교각 주위에서 발생하는 와류중에서 교각전면에서 발생하여 하류로 진행하는 말발굽와류(horse shoe vortex)와 교각 직하류에서 발생하는 후류와류(wake vortex)가 있다. 이 때 그 부분으로부터 하상토사가 유출되는 비율이 들어 오는 비율보다 크게 되면 세굴에 의해 하상이 부분적으로 파이게 되어 세굴구멍(scour hole)이 생기게 되고 세굴구멍이 깊어짐에 따라 와류의 세기는 줄어 들어 유사의 유출율이 감소하여 평형을 이루게 된다. 국부세굴에 영향을 미치는 요인으로는 크게 유체자체의 특성인자, 하천내 흐름인자, 하상재료 인자 및 교각의 형태인자로 대별할 수 있다.

가. 교각에서의 국부세굴

HEC No. 18에서는 교각에서의 국부세굴량을 CSU(Colorado State University) 공식으

로 추정하도록 추천하고 있으며, HEC-RAS에서는 CSU 공식을 기본적으로 사용하도록 되어 있으며, 비교를 위해 Froehlich 공식도 가능하도록 되어 있다. CSU 공식은 동적세굴 및 정적세굴에 관계없이 교각에서의 최대세굴심을 구하는 공식으로 다음과 같다.

$$y_s = 2.0K_1K_2K_3K_4a^{0.65}y_1^{0.35}F\gamma_1^{0.43}$$

Table 2. 교각전면부 형상에 대한 보정계수(K_1)

교각전면부 형상	K_1
(a) 사각형 선단	1.1
(b) 둥근 선단	1.0
(c) 원형 선단	1.0
(d) 뾰족한 선단	1.0
(e) 원형그룹 교각	0.9

Table 3. 하상조건에 대한 보정계수(K_3)

하상상태	사퇴높이(ft)	K_3
(a) 정적세굴	없음	1.1
(b) 평탄하상과 반사퇴	없음	1.1
(c) 작은 사퇴	$2 \leq H < 10$	1.1
(d) 중간 사퇴	$10 \leq H < 30$	1.1~1.2
(e) 큰 사퇴	$30 \leq H$	1.3

흐름의 접근각에 대한 보정계수 K_2 는 다음 식으로 계산한다.

$$K_2 = \left(\cos\theta + \frac{L}{a} \sin\theta \right)^{0.65} \dots\dots\dots(\text{식2-1})$$

보정계수 K_4 는 하상재료의 입경(D_{50})이 0.20ft 이상인 경우에 장갑화현상(armouring)으로 세굴구멍의 깊이를 감소시키는 영향을 고려하기 위한 계수로서 다음 식으로 계산한다.

$$K_4 = [1 - 0.89(1 - V_R)^2]^{0.5}$$

나. 교대에서의 국부세굴

HEC No. 18에서는 교대에서의 동적세굴량을 추정하는데 있어 2가지 공식을 추천하고 있다. 즉, 흐름에 수직으로 돌출된 교대의 길이(L')를 접근단면의 수심(y_1)로 나눈 비가 25보다 크면, HIRE 공식을 사용하고, 25 이하이면 Froehlich 공식을 사용하도록 추천하고 있다.

○ HIRE 공식

$$y_s = 4y_1 \left(\frac{K_1}{0.55} \right) K_2 F \gamma_1^{0.33}$$

Table 4. 교대 형상계수 K_1

교대의 형태	K_1
수직벽 교대	1.00
측벽을 포함하는 수직벽 교대	0.82
여수벽 교대	0.55

○ Froehlich 공식

$$y_s = 2.27K_1K_2(L')^{0.43}y_a^{0.57}F\gamma^{0.61} + y_a$$

3. 적용 및 분석

3.1 분석대상 유역

본 길안천 유역은 우리나라의 중남부 지방에 위치고 있으며, 유역내 년평균 강우량은 1064.4mm, 년평균 기온은 11.6°C(안동측후소), 최고기온은 36.8°C, 최저기온은 -18.5°C이며, 년평균 습도는 64%이다. 또한, 비교적 소하천으로 구성되어 있어 하도의 연장이 중단거리이고 유역경사도 다소 급해 도달시간이 짧은 것으로 조사되었다. 최근 23년간(1980~2002년)의 우량자료에 대하여 길안, 청송, 현서관측소에서 관측된 시간단위별 자기우량 기록을 수집·정리하여 지속시간별로 최대강우량을 조사하였으며 I·D·F공식 등을 이용하여 호우분석에 이용할 수 있도록 하였다.

2003년 9월에 발생한 태풍 매미(MAEMI)의 직·간접적인 영향을 받아 강풍과 함께 집중호우가 발생하였으며 매미의 기상이변 현상은 기왕에 발생한 호우중에서 가장 영향이 큰 것으로 특히, 길안천 유역의 길안, 청송, 현서관측소에는 정전사태로 말미암아 강우기록이 결측되는 사태를 불러 일으켰다.

따라서, 본 분석을 위하여 강우기록을 조사 수집한 자료는 유일하게 관측자료를 확보하고 있는 보현산 천문대의 강우기록으로서 이를 본 분석에 이용하였으며 최대강우량은 622.9mm/day로 분석되었다.

Table 5. 보현산지점의 지속시간별 최대강우량(태풍 매미) (단위 : mm)

년 도	지 속 기 간 (hr)							
	1	2	4	6	8	10	12	24
2003	151.9	255.0	364.0	411.5	441.2	467.6	476.2	622.9



Fig. 1. 분석대상 유역 위치도.

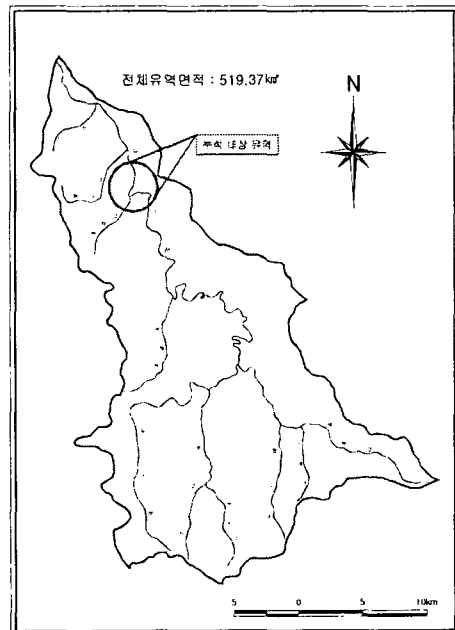


Fig. 2. 길안천 유역.

3.2 수리구조물 특성

길안천 유역은 경북 북부지역에 위치하고 있고 소백산맥을 분수령으로 하고 있으며, 지형과 지세에 있어서 길안천 상류의 북쪽으로 소백산맥이 인접하여 있어 지형적으로는 지표면 경사가 매우 급하고 심한 계곡을 형성하고 있다. 연구대상유역인 길안천 유역의 준용하천에 대한 홍수유출시 유수현상에 영향을 미치는 시설물은 저수지를 비롯한 이수시설과 각종 하천구조물로 특히, 길안천 유역의 각 지류유역에는 농경지가 적어서 저수시설이 비교적 적은 편이며, 제방, 교량(도로교 및 철도교), 보 및 양수장 등의 수리시설물이 대부분이므로 하류부는 세굴로 인하여 하상의 불안정은 물론이고 호안의 유실 등의 위험이 상존하게 되어 있고, 또한 제방의 경우는 제체의 구조, 제원, 재료 및 위치 등에 따라 홍수소통능력의 주요 변수가 될 수 있다.

Table 6. 분석유역 인근의 수리구조물 현황

목계교(0m)를 기준으로	교량명	총연장(m)	교폭(m)	교각수(개)	구조물상판 EL.(m)
하류 2613m	명덕교	333	10.0	10	139.870
하류 2979m	보	180	-	-	130.990
하류 3857m	신달보	150	-	-	128.640
하류 3981m	구천지교	170	-	31	130.574
하류 4096m	천지교	240	7.5	15	133.731
하류 6115m	보	182	-	-	121.880
하류 6936m	오대교	200	6.0	7	124.817

3.3 분석결과 및 고찰

본 분석유역은 본 하천의 중간지점에 위치한 교량의 세굴평가를 위해 하천구간별로 Sta. No. 0부터 St. No. 16까지 17개의 단면을 설정하였다.

교량은 Sta. No. 1, Sta. No. 7에 위치해 있으며, Sta. No. 1인 오대교의 교량경간은 25m, 교량폭은 3m이고, 교각은 폭이 1.5m인 7개로 구성되어 있으며, Sta. No. 7인 천지교의 교량경간은 15m, 교량폭은 6m이고, 교각은 폭이 1.5m인 15개로 구성되어 있다.

하천교량의 세굴분석을 위해서는 일반적인 하천에서의 수면곡선 계산을 위한 과정보다 더 세밀한 자료, 즉, 교량의 직상류 단면(Sta. No. 1, Sta. No. 7) 및 접근단면(Sta. No. 1.12, Sta. No. 7.13)의 세부지점별 수심, 유속 등의 각종 수리량을 필요로 한다. 이를 위해 이 2개의 단면의 횡단면의 특성, 교량경간 길이, 교각의 수 등을 고려하여 좌안, 주수로, 우안을 몇 개의 세부구간으로 분할할 것인가에 대한 자료를 입력해야 한다.

하천교량에 대한 총세굴량은 장기하상 변동량을 제외하고 단면수축 세굴과 교각 및 교대의 국부세굴량의 합이 된다. Fig. 3은 교량단면에서의 총세굴량을 도시한 것이다.

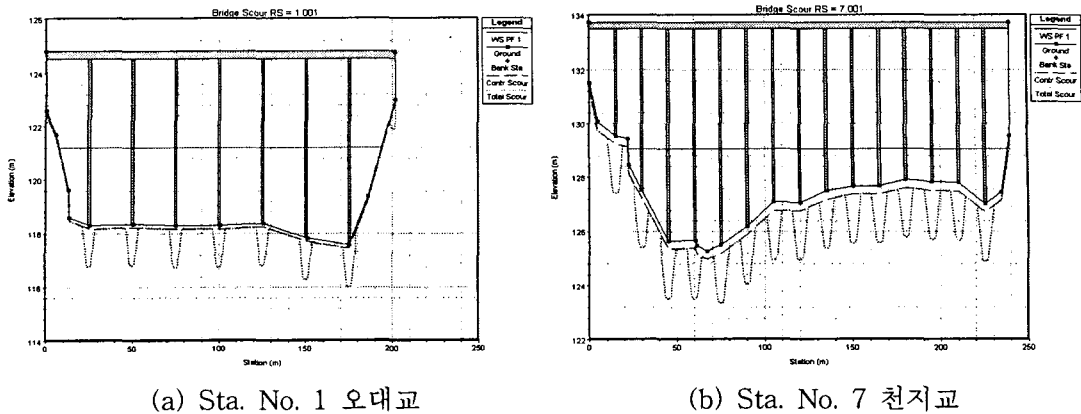


Fig. 3. 교량단면에서의 총세굴량.

4. 결 론

하천에 교량과 같이 유수작용에 지장을 주는 구조물이 세워지면 이로 인하여 흐름현상이 복잡해지며 세굴작용도 더욱 활발해진다. 교량의 하부구조물을 이루는 교각과 교대는 세굴의 영향을 직접 받는 부분일 뿐 아니라, 교량의 안전과 밀접한 관계가 있기 때문에 하부구조물을 설계할 때는 세굴과 관련된 사항에 대해 상세한 기술검토가 필요하다.

본 분석에서는 미공병단에서 윈도우용으로 개발하여 각종 수면곡선계산 및 하천교량의 세굴평가 기능 등이 보완된 HEC-RAS 모형을 이용하여 하천교량 지점에서의 홍수로 인한 최대세굴심을 예측함으로써 향후 교량 설계에 대한 기본 방향을 제시코자 하였다. 먼저, 실제유역에 대한 교량의 형태, 크기 및 위치를 선정하고, 다음으로 100년 빈도 및 태풍 매미(2003년 발생)의 설계홍수량을 선정하여 하천구간에서 수면곡선을 계산하고, 마지막으로 수리모형에서 계산된 수리량과 하상재료 특성을 이용하여 총세굴깊이를 산정하여 교량단면에 도시하여 총세굴깊이를 평가할 수 있도록 분석 하였다. 세굴량 산정을 위해 사용되는 방법은 FHWA의 HEC No. 18에서 추천하고 있는 세굴량 추정방법을 이용하였다.

따라서, 본 연구분석 결과에서 하천의 교각세굴에 의한 교량 붕괴사고를 방지하기 위해서는, 신설교량에 대해서는 설계홍수에 대한 세굴심을 예측하여 교각기초부를 세굴에 안전하도록 깊숙히 근입시켜야 하며, 기존교량에 대해서는 정기적인 점검을 통하여 기초상태를 감시하고 평가하여 세굴위험이 있는 교량에 대해서는 세굴방지공을 설치해야 할 것으로 판단된다.

또한, 본 분석결과 세굴의 깊이 정도는 각 교각마다 상이하며 이는 유로경사 및 유로의 만곡정도에 매우 관계가 깊은 것으로 나타났으며, 현재 빈번히 일어나고 있는 대규모 홍수량은 교량의 설계시에 세굴에 대한 중요성을 더욱 인식시키는 위험요소가 되고 있음을 간과해서는 안 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

FHWA, 1996, Evaluating Scour at Bridges, Federal Highway Administration, HEC No. 18, Publication No. FHWA-IP-90-017, 2nd Edition.

Hydrologic Engineering Center, 1997, HEC-RAS River Analysis System : Application Guide, U.S. Army Corps of Engineers.

Hydrologic Engineering Center, 1997, HEC-RAS River Analysis System : User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers.

한국도로공사, 도로연구소, 1995, 교량세굴 방지대책 연구(Ⅰ).

한국도로공사, 도로연구소, 1996, 교량세굴 방지대책 연구(Ⅱ).

길안천 하천정비 기본계획 보고서, 경상북도, 1995. 3

길안유역의 시간강우량 자료(2003), 보현산 천문대

기상년보(1980~2002), 기상청

기상월보(1980~2002), 기상청