

# 교량에서의 홍수로 인한 세굴과 퇴채움의 실측치와 계산치의 실시간 비교분석

윤용남\*, ○호정석\*\*, 이재수\*\*\*

## 1. 서론

기존의 세굴에 대한 연구는 크게 최대세굴심 공식의 도출과 최대세굴심 예측의 두가지 방향으로 진행되어왔다. 실험식의 도출은 수리실험을 통해 실제 현상과 유사한 상황을 만들어 세굴심도에 대한 경험식을 도출하는 것으로 가능한 한 현장과 동일한 조건을 유지시키는 것이 연구의 관건이 된다. 하지만 실험결과 현장과의 오차는 필연적이며 이에 따른 경험식의 보정은 사실상 가장 큰 문제점이 되어왔다. 따라서 모의실험식에 대해 높은 안전율을 고려한 기존의 방법보다 실제하도에서의 실측에 의한 적절한 경험식의 도출이 좀 더 근접한 결과를 줄 것이다. 특히 하도상의 구조물의 붕괴에 가장 문제시 되는 최대세굴심도와 퇴채움(infilling)의 영향으로 인한 하상변동은 기존의 측정에서는 구하지 못했던 것으로 본 연구에서는 홍수과의 처음부터 끝까지 전 기간에 걸쳐 30분 단위로 실시간 실측 및 계산을 함으로써 더욱 정확한 하상변동에 대한 모의를 수행하고자 하였다.

이에 따라 우선 대상구간을 설정하고, 적절한 홍수사상이 발생시 대상교량의 하상변화를 음향측심기인 Fathometer를 이용하여 측정후, 2차원 수리모형으로 수리량을 산정하여 세굴심도를 계산하였으며 이를 실측치와 비교분석하였다. 본 연구에서는 2차원 수리모형으로 미국 WES (Waterway Experiment Station)에서 개발한 유한요소모형인 TABS-MD모형을 이용하였으며, 세굴량 계산에 있어서는 미국 교통부 산하 연방고속도로국 (Federal Highway Association, FHWA)에서 지금까지의 세굴심 추정기법을 집대성하여 발간한 HEC-18에 소개된 방법론을 참고하였다.

## 2. 하상변화의 실측 및 계산방법

### 2.1 계측장비의 제원 및 실측과정

일반적으로 수심이나 하상고를 측정하는 장비로는 Weighted tape, Echo sounder, Fathometer 등을 사용하는데 최근에는 교량단면을 통한 연속적인 측정을 위해 Fathometer를 주로 사용하고 있다. Fathometer는 비교적 수심이 깊고 (10ft 이상) 유속이 느린(5ft/sec 이하) 흐름 조건에 대해서

정확한 측정결과를 주며, 측정 원리는 다음과 같다.

$$D_{\text{ft}} = \frac{V_s(T)}{2} + D_{\text{ft}} \quad (1)$$

여기서,  $D_{\text{ft}}$  = 수심

$V_s$  = 수중음향속도

$T$  = 음향반사도달시간

$D_{\text{ft}}$  = 측심봉(송수파기)의 홀수심

Fathometer는 기록기, 송수신기, 송수파기 및 동진발전기로 구성되어있으며 송수파기를 제외하고는 대개 같은 본체 내에 있어 휴대에 편리하게 되어 있다. 그림 1은 중랑천의 성동교 직상류에 위치한 살곶이교에서 실측한 수심측정 예를 나타내며 측정된 데이터들은 노트북 P.C를 연결해 텍스트(txt)파일로 저장된다.

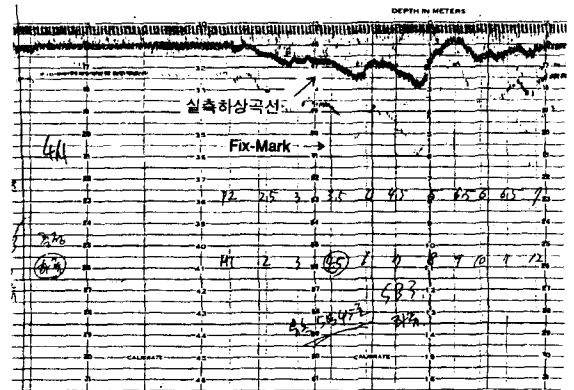


그림 1. Fathometer를 사용한 수심측정 기록지.

Fathometer를 사용한 하상표고 실측에서 가장 중요한 점은 측정하려는 하상을 따라 측정비를 등속도로 이동해야 한다는 점이다. Fathometer는 음파를 이용한 장비이므로 측정하고자 하는 교각이나 교량주위를 일정한 속도로 이동하지 않으면 읽어들이는 데이터의 거리차가 균일하지 않아 정확한 위치에 따른 측정이 어렵기 때문이다. 따라서 교량 상판이나 보우트를 이용한 실측시, 이동속도에 항상 주의하며 그림 1의 수심측정 기록지와 같이 교각과 같은 목표지점에 Fix-mark를 사용하여 원하는 지점의 데이터를 지정해

\* 정희원 · 고려대학교 토목환경공학과 교수

\*\* 호정석 · 고려대학교 대학원 토목환경공학과 석사

\*\*\* 정희원 · 전주대학교 토목공학과 교수

야 한다. 또한 측정바의 수면 근입깊이를 고려해 실측전에 반드시 Draft기능으로 Fathometer를 영점조정 해야하며 측정시 항상 근입깊이가 일정하도록 주의하여야 한다. 일차적으로 Fathometer로 측정하는 것은 각 지점의 수심이므로 하천에서의 하상표고를 구하기 위해선 도면이나 현장에서 기지의 표고점에서 레벨을 이용하여 현재의 수위를 측정하고 시각을 기록하여야 하며, 장시간 측정시에는 일정시간마다 수위와 시각을 측정하여야 한다. 보우트를 이용하여 측정시에는 교량의 횡단면 뿐만 아니라 각 교각의 주위도 측정할 수 있으므로 교각 주위를 1m, 2m, 4m 같이 일정한 간격을 두고 돌아가며 측정한다. 이때 정확한 측정을 위하여 가능한 교각에 붙여 실측을 해야 하지만 교각의 기초부가 있는 경우는 음파의 간섭을 피하기 위해 교각과 최소 1m 이상 두고 측정하여야 한다.

## 2.2 수리모형에 의한 세굴심 계산

본 연구에서는 2차원 수리모형인 TABS-MD를 사용하여 수리량을 산정하였다. TABS모형은 자료의 입출력 처리에서 탁월한 기능을 가진 전후처리기(Pre & post processor) FastTABS와 2차원 수리계산 프로그램인 TABS-MD로 구성되며 교각과 하도의 유입각에 따른 모의도 가능하기 때문에 본 연구의 수리모형으로 선정하였다. TABS모형의 구성 및 일반 이론 등은 기발표된 논문<sup>3)</sup>이 있으므로 생략하였다.

세굴심은 크게 장기하상변동, 단면축소세굴, 교각 및 교대에서의 국부세굴로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 주로 교각주위의 세굴을 모의하였고 단면축소세굴 산정은 Laursen의 혼탁수 세굴공식을 사용하였으며 교각 국부세굴심은 미 연방 고속도로국의 기존 세굴공식의 비교평가에서 실측치를 가장 잘 대표하는 것으로 확인된 C.S.U.공식을 사용하였다. 또한 식 (2)와 같이 C.S.U.공식은 교각폭과 교각 길이의 비, (L/a)와 교각으로 유입되는 하도 흐름의 유

입각에 따라 계산된 최대세굴심이 유입각도를 고려치 않은 값에 비해 최고 5배 이상의 값을 나타낼 수도 있다.

$$\frac{y_s}{a} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{y_1}{a}\right)^{0.35} Fr_1^{0.43} \quad (2)$$

여기서,  $y_s$  = 세굴 깊이, ft  
 $y_1$  = 교각 직상류의 수심, ft  
 $K_1$  = 교각 전면부 형상에 대한 보정계수  
 $K_2$  = 흐름의 접근각에 대한 보정계수  
 $K_3$  = 하상조건에 대한 보정계수  
 $a$  = 교각의 폭, ft  
 $Fr_1$  = Froude 수

## 3. 실측치와 계산치의 산정 및 비교분석

### 3.1 대상교량의 선정

분석대상교량으로는 그림 2에 표시한 바와 같이 중랑천 하구부에 위치한 살곶이교를 선정하였다. 가장 중요한 선정 이유는 교량상판의 표고가 낮아 홍수시 다른 높은 교량과 달리 교량 상판 위에서 음향측심기를 이용해 세굴심의 실측이 가능하다는 것이다. 기존의 세굴실측은 교량이 높아 보트를 타고 선상에서 측정하므로 홍수시에는 사실상 실측이 불가능하였다. 따라서 제일 문제시 되는 침투홍수시의 최대세굴심도는 이후 발생하는 퇴채움으로 인해 측정할 수 없었다. 살곶이교에서는 홍수시에도 교량의 상판에 장비를 설치, 측정이 가능하므로 홍수과의 시작부터 종료시까지 거의 대부분을 실시간으로 실측할 수 있을 뿐 아니라, 하도의 흐름 방향에 대해 교량의 위치가 상당한 각도를 이루므로 교량에 대한 물의 유입각이 세굴에 미치는 영향과 2차원 수리모형의 적용성 등 본 논문의 목적에 적합하다고 판단하여 이 교량을 대상교량으로 선정하였다. 모의 구간은 구교를 제외한 중앙교대 ① 1~좌안교대 ② 2 까지의 신교구간이다.

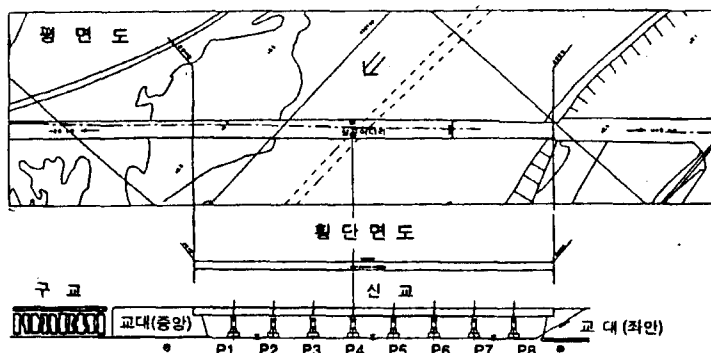


그림 2. 살곶이교의 평면도 및 횡단면도.

### 3.2 홍수파의 진행에 따른 하상변화 실측

#### 3.2.1 홍수발생전 하상실측

홍수발생전 강우시 대상교량 단면에서 이미 4차례의 측이 있었으며 실측당시의 살곶이교 수위는 5.8 7.13(EL.m)정도로 살곶이교 신고부분만 실측하였다. 실측 결과 그림 3과 4에 나타난 바와 같이 하상은 전형적인 굴형상을 보였으며 하상 상태는 돌과 오염물질 등으로 덮여져 있고 유속도 비교적 빠르지 않아 어느 정도 안정한 상태에 있는 것으로 추정되었다. 그림 3, 4에는 제 3차 및 제 4차 실측치를 표시하였으며 Pier 4에서 세굴이 가장 심하게 발생하고 있음을 알 수 있다. 굵은 실선은 교량 전면부를, 가는 점선은 교량 후면부를 나타내며 교량전면부의 세굴과 교량후면부의 퇴적에 의한 하상변화가 확실히 나타나 있음을 알 수 있다.

살곶이교 교각은 물의 유입방향과 약 45° 정도의 각을 이루나 근접한 교각의 형상이 두 개의 원통형(group of cylinders)으로 되어있어 유입각이 세굴심의 정도에 그리 큰 영향은 미치지 않을 것으로 예상되었으나 실제로 세굴심을 측정된 결과, 그림 3과 4에서와 같이 Pier 4에서는 교각 좌측으로, 그리고 Pier 5에서는 교각중심부에서 세굴이 발생하였으며, Pier 6과 Pier 7에서는 교각의 우측으로 치우쳐 세굴이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 유속이 가장 빠

는 하도의 중심부분이 Pier 4와 Pier 5사이로 흐르기 때문에 사료되며 하도의 흐름방향과 교각간의 각도에 따라 각각의 교각에 발생하는 최대세굴심의 발생지점이 상당한 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

#### 3.2.2 홍수발생시 하상실측

1996년 7월 26~27일 동안 상당히 큰 호우사상이 발생하였다. 단기간에 내린 집중호우로 연천지방의 댐파괴를 불러온 높은 강도의 호우가 서울지방에도 발생하였으며 실시간 실측이 적절하다고 판단하여 살곶이교에서 Fathometer를 이용하여 제 5차 하상 실측을 실시하였다. 26일 0시부터 27일 12시까지 36시간에 걸쳐 실측하였으며 살곶이교가 월류하는 위험시기를 제외하고 30분 간격으로 세굴이 제일 많이 발생한 Pier 4에 고정시키고 시간에 따른 세굴발생의 정도와 침투유량 이후의 퇴적현상을 측정하였다.

홍수 계속기간 동안의 수면표고는 상류에 위치한 동부 간선도로의 표고점을 이용하여 매 30분 간격으로 측정하였다. 살곶이교 우안의 고수부지에서 레벨을 사용하여 기계고를 삼고 살곶이교 상판위에서 스테프를 수면에 맞춰 놓아 측정하였다. 시간이 경과함에 따라 야간에는 Pier 3 위의 상판 표고를 측정하여 이를 기계고로 삼아 스테프를 이용하여 수면표고를 실시간 실측하였다.

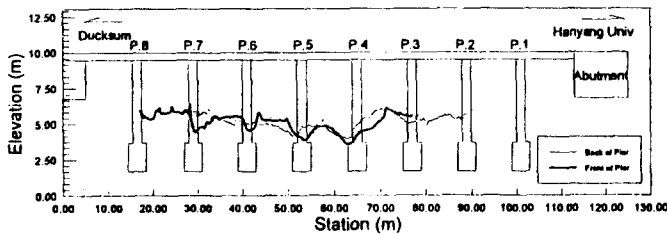


그림 3. 살곶이교의 실측하상고 - 3차 실측 (1996年 6月 29日).

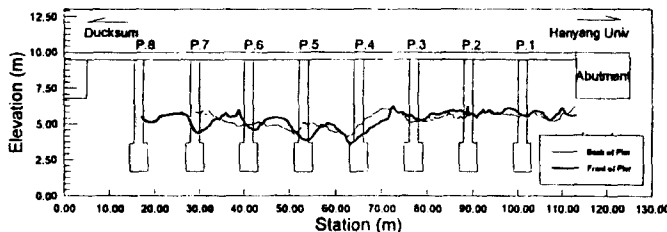


그림 4. 살곶이교의 실측하상고 - 4차 실측 (1996年 7月 22日).

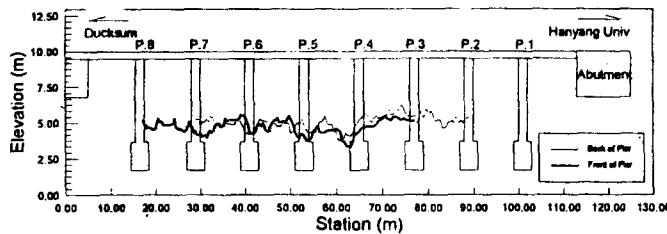


그림 6. 살곶이교의 실측하상고 - 6차 실측 (1996年 7月 30日).

유속 측정은 홍수시 유량측정에 주로 사용되는 부표를 사용하여 동부간선도로와 살곶이교 까지의 약 250m를 구간으로 살곶이교 신교부분의 두 곳에서 측정하였다. 부표는 2 L 피트병에 2/3정도의 물을 채워 사용했으며 아간에는 홍수파의 진행이 서서히 감소하는 시기이고 30분 간격으로 실측이 상당히 곤란하므로 2시간 단위로 측정해 선형보간하였다. 측정된 유속은 대체로 표면유속으로 볼 수 있으므로 0.85의 가중치를 사용하여 평균유속으로 결정하였다.<sup>11)</sup>

홍수량의 산정은 이와같이 측정된 수위를 횡단면에 표시하여 유수단면적을 결정하고 이에 평균유속을 곱하여 산정하였다. 유수단면적 산정에 필요한 하상표고 자료는 한국 종합기술개발공사로부터 입수한 측량자료와 실측하상고를 사용하였으며 Manning 공식으로도 홍수량을 산정하여 참고하였다. 표 1은 홍수시 측정시간별 하상표고와 수면표고, 유속 및 유량 등을 나타내며 그림 5에 수리변화량과 하상변동을 도시하였다.

표 1. 하도의 실시간 수리변화량 (일부)

측정시간 Time, h	하상표고 EL.m	수면표고 EL.m	유 속 m/s	유 량 cms
7.26 0 : 00	3.50	5.85	0.39	101.42
0 : 30	3.50	5.85	0.39	101.42
1 : 00	3.50	5.85	0.39	101.42
1 : 30	3.50	5.85	0.39	101.42
2 : 00	3.50	5.85	0.39	101.42
2 : 30	3.50	5.85	0.39	101.42
3 : 00	3.48	5.95	0.42	103.52
...	...	...	...	...
8 : 30	2.36	9.70	2.86	950.07
9 : 00	2.29	10.00	2.97	1144.40
9 : 30	2.26	10.20	3.07	1165.99
10 : 00	2.24	10.33	3.13	1185.24
10 : 30	2.26	10.30	3.02	1174.63
11 : 00	2.31	10.27	2.96	1165.99
11 : 30	2.37	10.23	2.85	1155.20
...	...	...	...	...
7.27 9 : 00	3.25	7.34	1.25	155.47
9 : 30	3.26	7.34	1.22	151.15
10 : 00	3.26	7.33	1.19	148.99
10 : 30	3.27	7.33	1.16	146.83
11 : 00	3.27	7.33	1.14	144.67
11 : 30	3.27	7.32	1.13	142.51
12 : 00	3.27	7.32	1.12	140.35

### 3.2.3 홍수발생후 하상실측

'96년 7월 30일에 제 6차 하상고 실측이 있었다. 제 6차 실측에서는 홍수후 변화된 전반적인 교량주위의 하상변화와 세굴이 가장 심하게 발생한 Pier 4에서 세굴심도의 변화를 측정하였다. 측정결과 그림 6과 같이 상당한 하상의 변화가

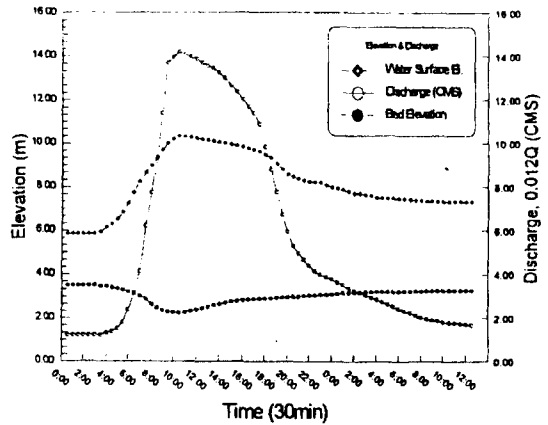


그림 5. 실시간 하상변화도 (pier 4, 96. 7. 26~27).

있었으며 전반적인 하상의 형상도 많은 변화가 있었다. 특히 하상 표면의 요철이 심해지고 교각 주위에서만 세굴이 발생하지 않고 교각과 교각 사이에서도 세굴이 발생해 홍수발생 전과는 조금 다른 양상을 보여주고 있다. 그 이유는 홍수시 하도를 통과하는 물의 흐름이 불규칙적이고 유속도 급증했을 뿐 아니라 다소 큰 부유물질이나 오염물질로 인한 하상의 침식 및 퇴적 등으로 사료된다. 제 6차 실측에서 Pier 4의 하상표고는 EL 3.32m로 홍수발생전에 비해 대략 0.22m의 하상저하가 있었음을 알 수 있다.

### 3.2.4 홍수로 인한 하상변화량 분석

총 6차에 걸친 실측을 통해 각 교각의 최심하상표고 변화를 비교한 결과는 표 2와 같다. 표 2의 하상변화량은 홍수발생전 제 4차 실측 결과와 제 6차 실측의 차이값으로 홍수로 인한 하상고의 변화를 나타내고 있다. 전반적으로 교각 주위의 하상에서 많은 부분이 세굴되었고 중심하도 부분인 Pier 4 뿐 아니라 좌안의 Pier 6~Pier 8 부분에서도 상당 부분 세굴이 진행되었음을 알 수 있는데, Pier 4 주위 보다 Pier 6~Pier 8 부분에서 높은 하상고의 변화량을 나타내는 이유는 홍수가 발생하지 않은 평시보다 상대적으로 통수 유량과 유속의 증대로 인해 세굴이 증가한 것으로 판단된다. Pier 5에서의 +0.71m는 반대로 하상고가 높아졌는데 하상에 퇴적된 비교적 큰 물체로 인한 오측일 것으로 사료된다. 여기서 + 는 하상의 상승을 뜻하며 - 는 하상의 저하를 의미한다. 홍수 발생시는 Pier 4 주위의 하상고를 30분씩 실시간 실측하였으므로 표 3과 같이 최심하상고를 얻



표 4. 교각별 최대세굴심도 계산치

(단위 : m)

교각 사항	살곶이교								
	Pier 1	Pier 2	Pier 3	Pier 4	Pier 5	Pier 6	Pier 7	Pier 8	
유속 (m/s)	2.13	2.34	2.34	2.77	2.34	2.13	1.92	1.7	
수심 (m)	6.56	6.99	7.41	7.84	7.41	7.41	6.99	4.85	
단면 축색	0.756	0.756	0.756	0.756	0.756	0.756	0.756	0.756	
국부 세굴	유입각 고려	6.727	7.065	7.121	7.196	7.121	6.838	6.487	5.861
총 세굴	유입각 불고려	2.403	2.523	2.543	2.570	2.543	2.442	2.317	2.093
총 세굴 심	유입각	7.483	7.821	7.877	7.951	7.877	7.594	7.243	6.617
	고려	3.159	3.279	3.299	3.326	3.299	3.198	3.073	2.849

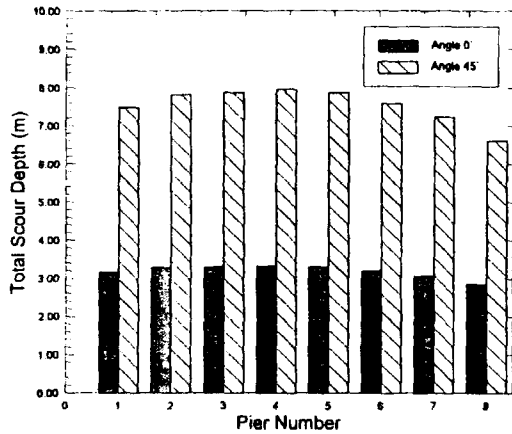


그림 10. 교각별 최대세굴심 (TABS모형, C.S.U.공식).

표 4에서 유입각 고려의 유무에 따라 국부세굴 및 총세굴 심은 대단히 큰 차이를 나타내고 있으며 Pier 4의 경우 최대 4.625m의 편차를 보이고 있음을 알 수 있다. 이와같이 C.S.U.공식에 의한 세굴심 산정에 있어서 유입각의 고려는 상당히 중요한 영향을 미치므로 세심한 주의가 따라야 한다. 그림 10은 유입각을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 교각별 최대세굴심을 비교, 도시하였다.

### 3.4 하상변화의 실측치와 계산치의 비교분석

표 5는 시간별 하상표고 실측치와 계산치를 비교한 것으로, '96년 7월 26일~27일 홍수사상에 대해 실측한 세굴심 변화와 TABS모형 및 C.S.U.세굴심 공식으로 30분 단위로 실시간 계산한 세굴심 변화를 비교하였다. 시간별 유량 및 이에따른 세굴심은 흐름이 정상류로 계속되었다고 가정하였고 시간별 계산 세굴심에서  $\theta=0^\circ$  는 유입

각을 고려치 않은 경우,  $\theta=45^\circ$  는 유입각을 고려한 경우를 나타내며 최대세굴심 발생 및 퇴채움의 진행과정에서 상당히 큰 차이를 나타내고 있다. 그림 11은 표 5의 세굴심을 각각 비교, 도시한 것으로 침두유량이 발생하는 순간 (26日 10:00)에 최대세굴심이 발생하며 이어서 바로 퇴채움이 시작되고 있다. 세굴과 퇴채움의 정도는 그 당시의 유량과 상당히 밀접한 관계를 가지고 있으며 유량의 증감에 따라 변화하고 있다. 오전 10시에 시작한 퇴채움 현상은 홍수파가 지나갈 때까지 서서히 증가하는 반면, 계산 하상고는 유량의 변화에 더욱 민감하게 반응해 16시경 유량이 갑자기 감소함에 따라 급격히 증가함을 보여주고 있다. 그 이유는 계산치가 경험식에 의한 값이니만큼 가장 큰 지배변수인 유량에 따른 유속, 수심의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

표 5. 홍수파에 따른 하상표고 실측치와 계산치 (일부)

측정시간 (hr)	유량 (CMS)	하상표고 실측치 (EL.m)	시간별 계산 세굴심 (m)		하상표고 계산치 (EL.m)	
			$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$
7. 26 0 : 00	101.42	3.50	0.000	0.000	3.500	3.500
0 : 30	101.42	3.50	0.000	0.000	3.500	3.500
1 : 00	101.42	3.50	0.000	0.000	3.500	3.500
1 : 30	101.42	3.50	0.000	0.000	3.500	3.500
2 : 00	101.42	3.50	0.000	0.000	3.500	3.500
2 : 30	101.42	3.50	0.000	0.000	3.500	3.500
3 : 00	103.52	3.48	1.231	0.926	2.269	2.574
...	...	...	...	...	...	...
8 : 30	950.07	2.36	7.071	3.011	-3.571	0.489
9 : 00	1144.40	2.29	7.677	3.228	-4.177	0.272
9 : 30	1165.99	2.26	7.820	3.279	-4.320	0.221
10 : 00	1185.24	2.24	7.951	3.326	-4.451	0.174
10 : 30	1174.63	2.26	7.892	3.305	-4.392	0.195
11 : 00	1165.99	2.31	7.826	3.281	-4.326	0.219
11 : 30	1155.20	2.37	7.781	3.265	-4.281	0.235
...	...	...	...	...	...	...
7.27 5 : 00	151.15	3.30	3.476	1.727	0.024	1.773
5 : 30	199.58	3.22	4.063	1.937	-0.563	1.563
6 : 00	259.11	3.14	4.517	2.099	-1.017	1.401
6 : 30	345.48	3.01	5.225	2.352	-1.725	1.148
7 : 00	518.22	2.87	5.647	2.503	-2.147	0.997
7 : 30	647.78	2.64	6.144	2.680	-2.644	0.820
8 : 00	777.33	2.48	6.365	2.759	-2.865	0.741

홍수파의 진행에 따른 최대세굴심의 발생 이후 시작되는 퇴채움 현상의 복원정도는 국내외로 아직 주목할 만한 이론이 정립되지는 않았으나, 본 연구에서 표 6과 같은 연구 결과를 얻을 수 있었다. 표 6은 홍수가 계속되는 동안 Pier 4에서의 세굴 및 퇴채움의 실측치와 계산치를 비교하여 그 편차를 산정한 것으로 단일 홍수로 인한 세굴심도 실측치는 비교적 소규모 교량임에도 불구하고 최대 1.26m에 가까운 상당한 하상침식을 유발하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 교각 주위의 하상이 이전의 홍수에 의한 세굴과 퇴

채움으로 인해, 다짐이 덜된 상태에 있기 때문인 것으로 추정되며 본 실측결과에서도 퇴채움 정도가 1.03m로 세굴된 하상의 상당부분이 복원되었음을 알 수 있다. 시간별 홍수량에 대한 최대세굴심도의 계산치도 유입각 고려의 유무에 따라 각각 계산하여 그 차이를 비교하였다. 표 6 및 그림 11과 같이 유입각을 고려하지 않은 경우에 비해 유입각을 고려한 경우는 현저한 하상의 저하가 있으며 이에 따른 실측치와 계산치와의 차이도 최심점에서 4.625m, 끝점에서 1.839m가 발생하여 상당한 차이가 있음을 알 수 있으므로 세굴심의 산정이나 교량에서의 세굴방지공 설계시 세심한 주의가 요구된다. 또한 하상변화에 있어서 실측치에 비해 계산치는 유입각 고려시 최대세굴심은 6.691m, 퇴채움 현상은 2.066m의 상당한 편차를 보이고 있다. 이와 같이 계산치가 실측치에 비해 대단히 큰 이유로는 기존의 경험식들이 가지고 있는 안전률 등 여러 가지가 있겠으나 근본적으로 C.S.U.공식은 실험실에서 일정유량으로 정상류가 계속되어 하상이 평형상태에 도달했을 때의 세굴심과 수리특성치간의 관계를 도출한 경험식이므로 본 연구에서와 같이, 부정류인 홍수파가 진행되고 실시간별로 유량이 증감함에 따라 세굴과 퇴채움이 반복되는 상황과는 상당한 차이가 있기 때문인 것으로 사료된다.

표 6. 세굴 및 퇴채움의 실측치와 계산치의 비교

구 분	실측치 (EL.m)	계산치 (EL.m)		편 차 (m)	
		$\theta = 45^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 0^\circ$
시 작 점	3.50	3.500	3.500	0.000	0.000
끝 점	3.27	-0.117	1.722	3.387	1.548
최 심 점	2.24	-4.451	0.174	6.691	2.066
최대세굴심도(m)	1.26	7.951	3.326	6.691	2.066
퇴채움정도(m)	1.03	4.334	1.548	3.304	0.518

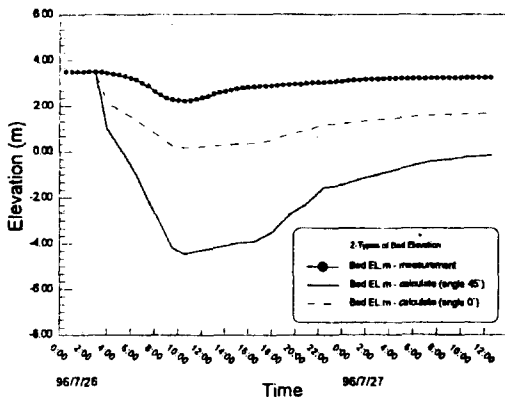


그림 11. 실시간 실측치와 계산치의 비교 (pier 4).

## 결론

본 연구에서는 기존의 연구에서 알 수 없었던 홍수파가 계속되는 동안의 하상세굴과 퇴채움 현상을 실시간 실측하였고 이를 2차원 수리모형과 C.S.U.공식에 의한 계산결과와 비교함으로써 현재 사용되고 있는 최대세굴심 계산 방법의 문제점을 검토 하였다.

- (1). 세굴심 산정에 있어서 교각에 대한 흐름의 유입각의 영향은 상당히 중요한 변수로 작용하고 있다. 교각별 국부 세굴의 산정에서 흐름의 방향과 교각간의 유입 각도는 최고 5배까지의 상당한 진폭으로 변화한다.
- (2). 최대세굴심의 산정에서 계산치는 실측치보다 상당히 큰 결과를 나타내었다. 이는 교각의 국부세굴산정 경험식으로 널리 사용되는 C.S.U.공식이 홍수파가 진행되고 실시간 별로 유량이 증감되는 실제 상황과는 큰 차이가 있을 수밖에 없는 것으로 사료된다.
- (3). 홍수파의 이동에 따른 최대세굴심과 퇴채움의 발생은 첨두유량이 지나는 순간 동시에 발생한다. 퇴채움현상의 복원정도는 본 연구에서 최대세굴심 발생후 대략 26시간이 흐른 뒤까지 서서히 지속되었다. 그리고 그 퇴채움의 크기는 유량의 증감에 따른 유속 및 수심의 크기에 비례함이 밝혀졌으나, 유량이 작아 질수록 흐름의 소류력이 저하하여 퇴채움은 활발해 지는 것으로 사료된다.

## 5. 참고문헌

1. 서울특별시, 1992, "서울시 관내 하천제방안전도검토 및 치수종합계획수립 기본계획보고서".
2. 서울특별시 성동구청, 1995, "도로시설물 도면 정비".
3. 윤용남, 윤재영, 이재수 (1995). "2차원 수리모형을 이용한 홍수시 교량에서의 최대세굴심도 예측". 대한토목학회 논문집, 제 15권 제 6호, pp. 1689~1696.
4. Engineering Computer Graphics Laboratory, 1994, "FASTTABS - Reference Manual", Brigham Young University, Provo, Utah
5. Odom, 1994, "ECHOTRAC 3100 MAnnual".
6. Richardson, E.V., Harrison, L.J., and Davis, S.R., 1991, "Evaluating Scour at Bridge", Hydraulic Engineering Circular No.18, Federal Highway Administration, FHWA-IP-90-017.
7. Richardson, E.V., Harrison, L.J., and Davis, S.R., 1993, "Evaluating Scour at Bridge (2nd Edition)", Hydraulic Engineering Circular No.18, Federal Highway Administration, FHWA-IP-90-017.
8. U.S. Army Corps of Engineers, 1990, "Generalized Computer Program System for Open-channel Flow and Sedimentation", TABS System, WES, Vicksburg, Mississippi.
9. Varoni, V.A., 1976, "Sedimentation Engineering", ASCE Task Committee Paper.