

## 흐름특성과 하상특성을 동시에 고려한 교량세굴심 산정에 관한 연구

### Determination of Bridge Scour Depth Considering Flow Conditions and Bed Characteristics

최 종 석\* / 여 운 광\*\* / 김 문 모\*\*\*

Choi, Jong Suk / Yeo, Woon Kwang / Kim, Mun Mo

---

#### Abstract

In this study, a realtime bridge scour monitoring system was installed and operated to measure the real scour depths in relatively hard and rocky bottom. And riverbed change at before and after flood was investigated by GPR(Ground Penetrating Radar) to check the rationality of measured values.

As the result of this study, it was revealed the inaccuracy of equilibrium scour depth estimation through the bridge scour equations because most of the equations do not reflect the differences of geological characteristics, evaluated the real scour depths considering both bed and flow conditions.

**Keyword** : realtime monitoring, bridge scour, scour depth, scour equation

---

#### 요 지

본 연구에서는 하상이 단단한 지질구조로 이루어진 하상조건에서의 실제적인 세굴현상을 파악하기 위해 실시간 교량세굴 모니터링 시스템을 설치하여 홍수시의 세굴심을 측정하였다. 또한, 홍수 전·후의 지반구조를 측정할 수 있는 GPR(Ground Penetrating Radar)탐사를 통하여 홍수로 인한 세굴가능성을 면밀히 파악하였다. 이와 같은 연구과정을 통해 지질구조에 따른 세굴심 산정공식의 적용성 여부를 판단하였고 하상특성과 흐름특성이 동시에 고려된 실제적인 세굴의 영향을 평가하였다.

**핵심용어** : 실시간 계측, 교량세굴, 세굴심, 세굴심 공식

---

\*\*\* (주) 데이타피씨에스 연구원

Researcher, DATAPCS Co., C-217 SIGMA II, 18 Kumi-dong, Bundang-gu, Seongnam 463-741, Korea  
(E-mail:choijs8411@hanmail.net)

\*\*\* 명지대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

Prof., Dept. of Civil Eng., Myong Ji Univ., Yongin si, 449-728, Korea  
(E-mail:meo@mju.ac.kr)

\*\*\* 신구대학 토목과 교수, 공학박사

Ph.D., Dept. of Civil Eng., Shin Gu Univ., Seongnam si, 462-743, Korea  
(E-mail:munmo310@shingu.ac.kr)

## 1. 서론

최근 들어 도로망의 팽창과 다양한 교통수요로 인하여 큰 하천을 횡단하거나 하천을 따라 형성되는 장대교량의 건설이 활발하게 이루어지고 있다. 특히, 서울시를 관통하는 한강에 설치되는 교량이나 만을 횡단하는 해상교량 건설로 인하여 교량세굴에 대한 관심이 높아지고 있다. 교량세굴은 하상의 평형상태가 깨어져 교각주위에서 세굴이 발생하는 현상으로 궁극적으로는 교량의 안전도에 문제를 발생시킬 수 있으므로 이에 대한 대책이 설계 시부터 반드시 요구된다(여운광 등, 2000).

현재, 국내의 경우 외국과는 달리 세굴에 대한 연구나 향후 세굴진행상태 등을 평가할 만한 기준이 미비하여 외국에서 개발된 산정공식을 그대로 적용함으로써 단순히 세굴량을 예측하고 있다. 그러나 이와 같은 경우에도 세굴량 산정공식이 수 십 종에 이르고 있고 이들 공식이 개발된 조건들, 즉, 경계조건, 수리조건 및 하상조건에 따라 최대세굴심 예측결과가 큰 차이를 나타내고 있어 어려움을 가중시키고 있다.

예로서 본 연구에서 대상지역으로 선정된 강변북로 연결도로 공사구간은 강동대교와 천호대교 사이의 만곡부에 위치하고 있고 하천의 흐름이 바뀌는 구간이기 때문에 교량이 건설되고 있는 호안부의 유속이 증가할 것으로 예상되었으며 따라서 교량하상 및 교각과 인접한 호안에 세굴이 발생할 가능성이 제시되었던 곳이다. 실

제로 천호대교-토평리간 도로건설 실시계획 종합보고서(1996, 서울특별시 종합건설본부)에 따르면 설계홍수량 37,000CMS에서 이론적인 세굴심이 4.08~7.92m 발생할 것으로 계산되어 교량구조의 안정성에 영향을 미칠 것으로 예상되었다.

그러나 대상지역의 하상은 한강 상류부의 하상에 비하여 단단한 지반구조를 가지고 있어 실제 세굴로 인한 교량 및 호안의 세굴현상이 이론식과는 차이가 있을 것으로 예상되며 대상지역의 지질상태를 직접적으로 반영할 수 없는 경험공식을 적용한 결과와는 상당한 차이가 있을 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 현장의 세굴심을 실시간으로 측정할 수 있는 실시간 세굴 모니터링 시스템을 설치하여 홍수 전·후와 홍수시의 교량세굴심을 현장에서 직접 측정하였으며, 동시에 홍수 전·후의 지반구조를 측정할 수 있는 GPR (Ground Penetrating Radar) 탐사를 실시하여 홍수로 인한 세굴가능성을 면밀히 파악하였다. 이와 같은 연구 과정을 통해 지질구조에 따른 세굴심 산정공식의 적용성 여부를 판단하고 하상특성과 흐름상태가 동시에 고려된 실세적인 세굴을 영향을 평가하였다.

## 2. 대상지역 현황

본 연구의 대상지역은 그림 1과 같이 강동대교와 천

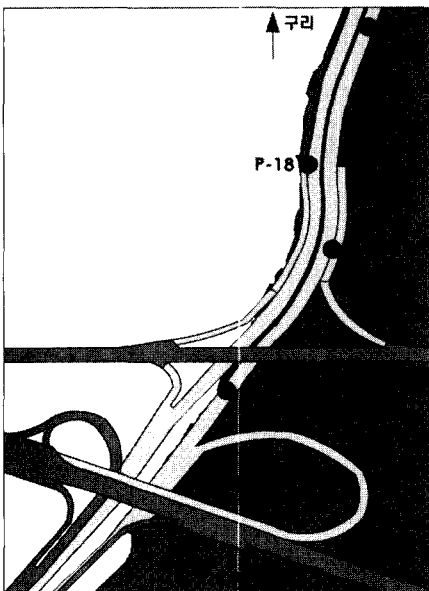


그림 1. 대상지역

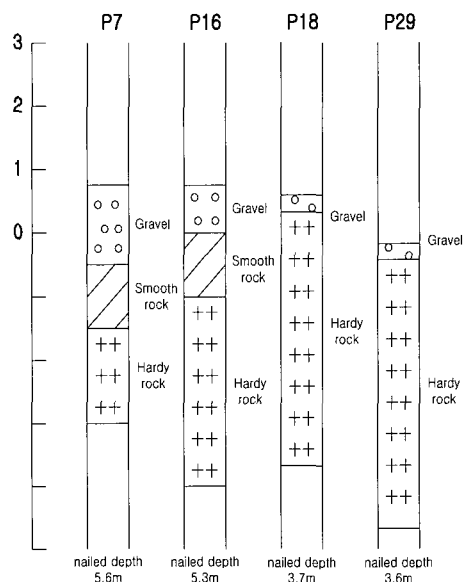


그림 2. 대상지역의 시추주상도

호대교 사이의 만곡부에 위치하여 흐름의 방향이 바뀌는 부분이며 이로 인해 우안의 유속이 증가하여 하상 및 교각과 인접한 호안에 세굴이 발생할 가능성이 높은 지역이다. 그림 1에 점선으로 표시되어 있는 부분은 세굴심 측정을 위한 시스템이 설치된 곳을 나타낸 것이다. 교량세굴을 측정하기 위한 교량세굴심 측정센서는 본선 구간 4개소(교각 P29, 교각 P18, 교각 P16, 교각 P7)에 설치하였다. P29는 상류로부터 유입되는 흐름이 만곡부의 영향에 의해 변화가 발생할 것으로 예측되는 구간으로서 변화된 흐름이 호안이나 교각에 직접적인 영향을 줄 것으로 판단되었다. P16과 P18은 교량형식이 변화하는 구간으로 호안부의 통수단면이 급격히 변화하는 지역이다. 갑작스런 통수단면의 감소는 단면축소세굴의 가능성이 있기 때문에 초음파 교량용 세굴센서와 유속계를 한 시스템으로 설치하여 유속변화와 세굴의 발생 여부를 관측하였다. P7은 호안으로 유입된 흐름이 유출되는 지역으로 다른 교각보다는 하상의 재질이 상대적으로 토사가 많이 분포하고 있기 때문에 증가되는 유속에 의해 세굴현상이 뚜렷할 것으로 예상되는 지점이다. 그림 2는 초음파 교량용 세굴센서가 설치되어진 지점의 시추주상도를 나타낸다. 시추주상도 분석결과, 대상지역은 하상의 표면이 세굴현상에 저항할 수 있는 자갈로 이루어졌으며 심도 1m 이상은 대부분이 암반으로 구성된 단단한 지반구조를 가지고 있는 것으로 나타났다.

### 3. 교량세굴 모니터링 시스템

#### 3.1 실시간 세굴 모니터링 시스템

실시간 세굴 모니터링 시스템은 그림 3과 같이 시스템

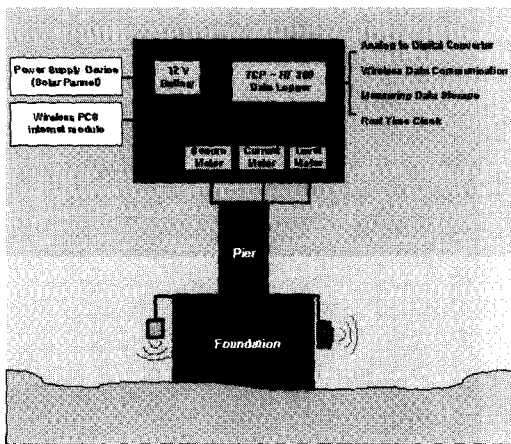


그림 3. 실시간 세굴 모니터링 시스템 개념도

템에 전원을 공급하는 전원공급장치, 실시간 자료를 획득하고 처리하는 자료처리장치, 측정지점에서의 세굴과 유속, 수위를 측정하는 물리량 측정센서로 구성되었다.

전원공급장치는 측정 시스템을 구성하고 있는 각종 장비들의 대부분이 DC 12V의 전압에서 작동되므로 DC 12V 산업용 배터리를 전원공급원으로 사용하였으며 일조량과 충전량을 고려하여 설계한 태양전지를 이용하여 주간에 충전을 수행하였다. 자료처리장치는 PCS 무선인터넷을 이용하여 실시간으로 원격계측을 수행하기 위해 개발된 교량세굴 계측전용 데이터로거인 TCP-RT300을 사용하였다. TCP-RT300에는 PIC BASIC2000이라는 소형컴퓨터가 내장되어있어 현장에서 필요한 자료저장, 처리, 송신 등이 가능하다. 물리량 측정센서는 초음파 교량용 세굴센서, 유속계, 압력식 수위계를 설치하여 계측을 수행하였다(2002, 서울특별시).

### 3.2 GPR 시스템

대상구간에서의 GPR탐사는 초음파 교량용 세굴센서가 교각에 설치되었기 때문에 우물통 기초에서 약 1.5m 떨어진 거리를 대상으로 원형 우물통 기초의 주위를 돌아가면서 계측하였다. 센서가 설치된 위치를 시작점으로 하였으며, 지름이 7m인 우물통 기초의 경우 계측길이는 31.4m로 산정되었다. 그림 4는 GPR탐사방법을 나타낸 것이다.

### 4. 현장측정자료 결과분석

#### 4.1 실시간 세굴 모니터링 시스템 결과분석

측정기간 중 홍수는 계절라성 집중호우의 영향으로

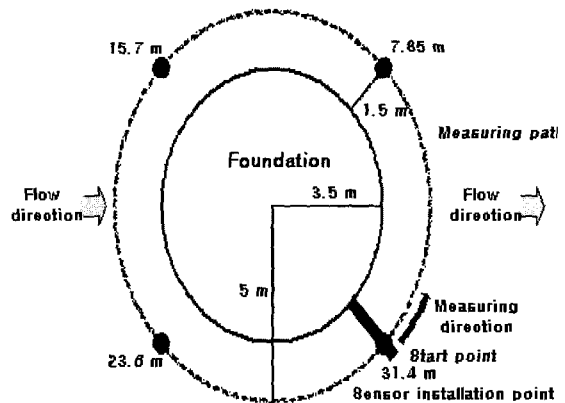


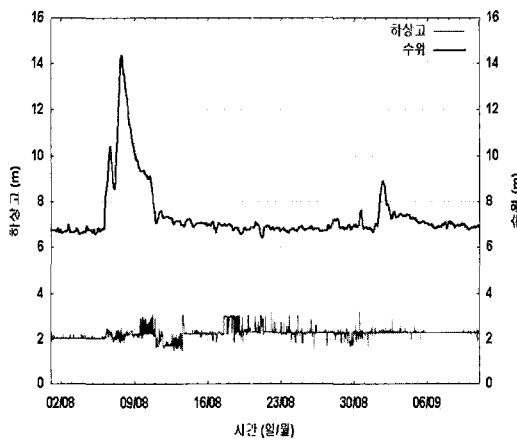
그림 4. GPR탐사방법

발생하였으며 한강의 수위도 2002년 8월 6일부터 점차 상승하여 8월 7일 오후 6시경 최고수위 E.L. 14.36m, 최대유량은 팔당댐 방류량을 기준으로 23,486CMS(팔당 수력발전소)를 기록하였다. 23,486CMS는 한강의 계획홍수량 37,000CMS에는 못 미치는 유량이나 대상구간의 지역은 수위가 E.L. 14.00m를 상회하는 동안 호안 위의 주변도로가 침수될 정도로 적지 않은 양을 기록하였다. 이러한 기록은 지난 84년, 92년도에 각각 한강을 대상으로 실시된 수리모형 실험에서 얻은 각 유량별 대상구간의 수위상승치와 경향이 대체적으로 일치하였다. 따라서 이번 홍수 시 팔당댐 방류량은 비록 37,000CMS의 유량에는 못 미치지만 실제 하천을 대상으로 실시 할 수 있는 실시간 교량세굴모니터링 측면에

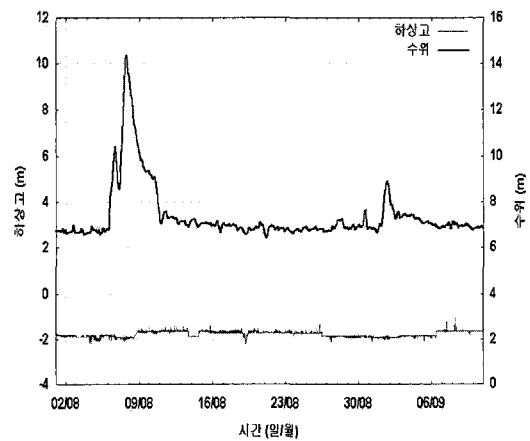
서 세굴의 거동양상을 충분히 파악할 수 있는 유량이라 판단된다.

### 1) 수위변동에 따른 세굴심변화

그림 5는 P7과 P29의 수위변화에 따른 세굴심변화를 나타낸 것이다. 수위가 최대 상승했던 8월 7일 오전·후로 유의할 만한 세굴심의 변화는 발생하지 않았다. 여기서 유의할 만한 세굴심의 변동치란 장기적인 상승 및 하강을 주도하는 경향이나 확정적인 1m이상의 세굴심을 유도할 수 있는 수준으로 정의한다. 그러나 그림 5는 반복적이고 일시적인 산란에 의한 변동 외에 특별한 경향은 보여주지 않고 있다. 다만 수위가 하강하여 소강상태로 접어드는 8월 11일 자료를 살펴보면 P7에

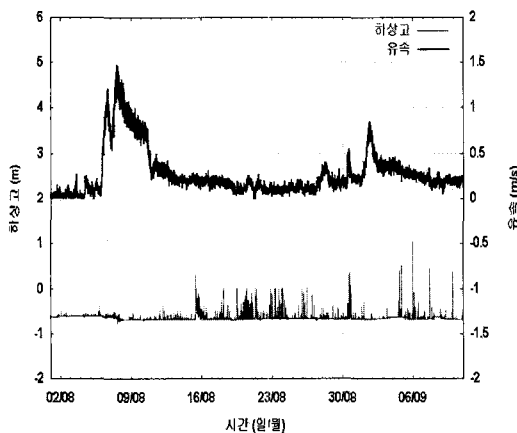


(a) P7 에서의 세굴심변화

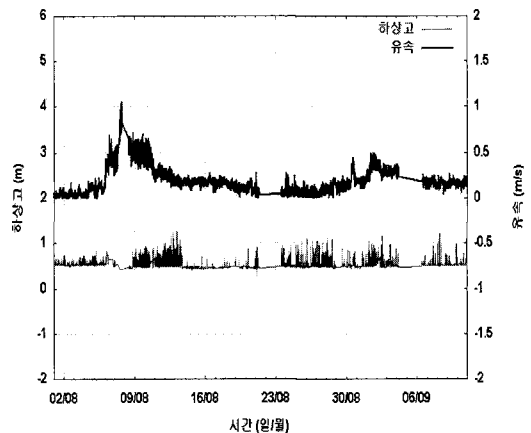


(b) P29 에서의 세굴심변화

그림 5. 수위변동에 따른 세굴심변화



(a) P16 에서의 세굴심변화



(b) P18 에서의 세굴심변화

그림 6. 유속변화에 따른 세굴심변화

서 약 50cm의 세굴심변화가 관측되는데 이것은 센서 하상안정에 관련되어 나타나는 현상으로 주변부 반사면의 일시적인 변화에 따라 나타난 것으로 판단된다.

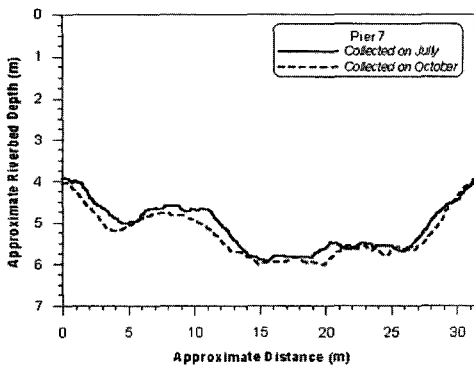
## 2) 유속변화에 따른 세굴심변화

그림 6은 P16과 P18에서의 유속변화에 따른 세굴심변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 유속의 변화는 수위의 변화와 같은 분포를 보이고 있다. 홍수기간 중 최대유속은 P16의 경우 약 1.4m/s, P18은 약 1.0m/s로 측정되었으며, 이 때의 세굴심은 변화 없이 일정한 경향을 나타내는 것으로 관측되었다.

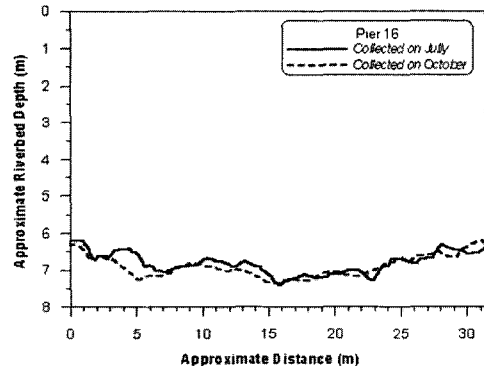
이것은 최대유속이 발생하는 시점에서 세굴이 발생하지 않았다는 것을 의미한다. P18은 P16보다 호안에 위치한 교량으로서 하상은 P16보다 실트질층이나 퇴적물이 하상표면을 덮고 있어 P7과 같은 하상퇴적물에 의한 산란효과가 상대적으로 강하게 나타나고 있다.

## 4.2 GPR 탐사결과

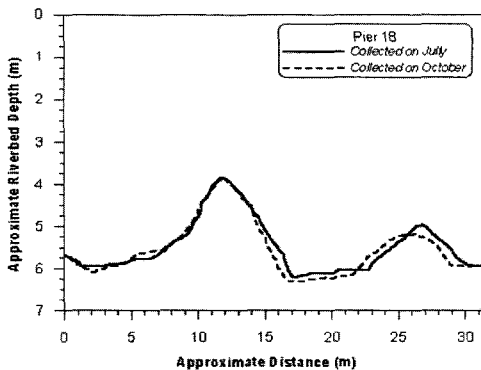
본 연구에서는 대상구간의 홍수 전·후 하상변화와 세굴현상을 파악하기 위하여 GPR탐사기법을 사용하였다. 그림 7은 계측지점에서의 하상변화를 나타낸 것이다. 그림 7에서와 같이 홍수를 전·후로 한 관측지점의 하상고는 변화하지 않았다. 다만, 홍수 전·후의 탐사위치가 약간씩 달라져서 발생하는 차이가 약 50cm가량 발생하였다. 그 이유로는 GPR측정시 사용하는 안테나의 주파수는 400MHz로써 수중투과깊이가 3~4m밖에 이르지 못하므로 보조장비를 사용하여 안테나를 수중으로 2~5m 삽입하여 수동으로 측정하였기 때문에 홍수 전·후의 측정위치나 안테나의 방향 및 각도가 정확하게 일치하지 않았기 때문이다. 이러한 어려운 조건에도 불구하고 얻어진 자료는 세굴에 의한 교량기초의 변화가 유의할 만한 수준, 즉 1m이상의 구조적인 변화는 보여주지 않고 있다.



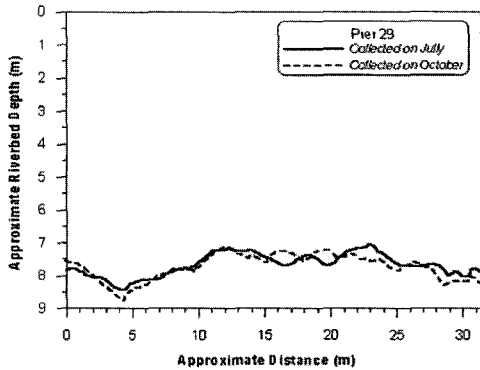
a) P7 에서의 GPR탐사결과



b) P16 에서의 GPR탐사결과



c) P18 에서의 GPR탐사결과



d) P29 에서의 GPR탐사결과

그림 7. 계측지점에서의 GPR탐사결과

## 5. 측정자료와 세굴심 산정공식 계산치의 비교

본 절에서는 천호대교-토평리간 도로건설 실시설계 종합보고서(1996, 서울특별시 종합건설본부)에 적용되었던 세굴심 산정공식(Inglis-Poona, Laursen1, Larras, CSU)을 이용하여 이번 홍수시 발생한 실측홍수량 23,486CMS에서의 세굴심을 예측하였으며, 실측치 간의 비교/검토를 수행하였다. 이번에 발생한 23,486CMS는 대상구역의 흐름현상과 세굴특성을 규명하기 위한 실제적으로 가능한 충분한 홍수량으로 본 홍수량에 대하여 예측치와 실측치를 비교/검토하는 것은 세굴심 산정공식에 의한 대상지역의 세굴심평가에 대한 판단의 근거를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 그림8은 계산된 결과를 측정치와 비교하여 도시한 것이다. 계산결과, 본 대상지역에서는 이번에 발생한 홍수량 23,486CMS에서 최대 3.5m, 최저 2.63m가 세굴될 것으로 예측되었으나 실제적으로는 0.1m미만의 아주 미미한 변화만이 관측되었다. 이러한 결과는 세굴심 산정공식이 대상구간의 지질특성 및 하상특성을 제대로 반영하지 못하여 나타나는 현상으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 실시간 세굴 모니터링 시스템을 설치하여 홍수시 교량세굴심을 직접 측정하였으며 측정된 결과를 세굴심 산정공식의 계산치와 비교하여 적용성

여부를 검토하였다. 또한 홍수 전·후의 지반구조를 측정할 수 있는 GPR탐사<sup>1)</sup>를 실시하여 실시간 세굴 모니터링의 결과를 검증하였다. 측정기간동안 관측된 결과를 종합하면 다음과 같다.

관측기간 중 최대 유량은 약 23,486CMS를 기록하였으며 이러한 조건에서의 세굴심 산정공식을 토대로 평가한 결과 2.63~3.5m의 세굴이 발생할 것으로 예측되었다. 그러나 실제로는 세굴심 산정공식에 의한 당초 예상과는 달리 홍수시에도 세굴현상에 의한 직접적인 하상의 변화는 관측되지 않았다. 이와 같이 세굴심 산정공식의 계산치와 실측치간의 차이는 다음과 같은 몇 가지 이유에 기인한 것으로 판단된다.

첫째로, 기존에 사용되는 세굴심 산정공식의 대부분이 흐름과 교각의 특성만을 고려하여 개발되었으며 하상의 지질상태를 고려한 몇몇의 세굴심 산정공식이라 할지라도 하상표면 입자들의 이탈착이 자유로운 하상조건에서 개발되었다. 따라서 하상의 지질구조가 공식을 유도할 때 적용된 지반에만 적용될 수 있을 뿐, 본 과업의 대상구간처럼 하상지질구조가 자갈층, 암반 등 비교적 단단한 지질구조로 이루어진 곳에 적용하기에는 무리가 따른다는 것을 현장관측을 통하여 보여주었다. 둘째로, 세굴심 산정공식에 적용하기 위한 흐름인자를 추출하는 과정에서 대상구간의 실제적인 흐름특성을 제대로 반영하지 못하였기 때문이다. 현장측정결과, 본 연구의 대상구간은 상류에서 유입되는 흐름이 유심부와

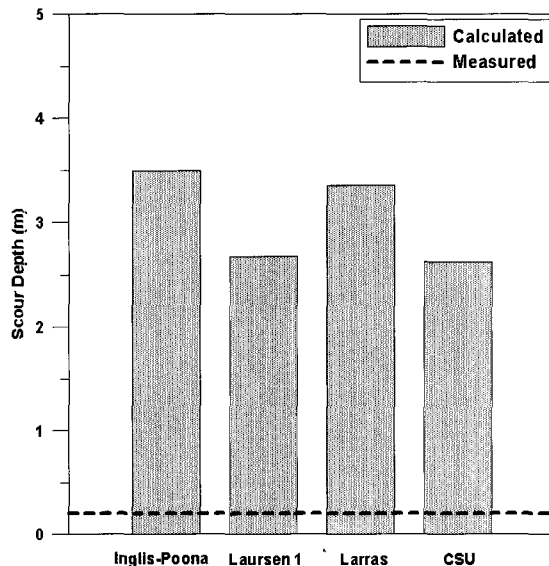


그림 8. 측정치와 계산치의 비교

호안부로 뚜렷이 분리되는 박리구간으로 교각이 설치된 호안부의 흐름은 상대적으로 느린상태를 유지하였다. 따라서 세굴을 일으킬만한 요인을 제공하지 못한 것으로 판단된다.

이와 같은 결과는 GPR 탐사결과를 통하여서도 확연하게 입증되고 있다. GPR 탐사를 실시하여 홍수 전·후의 하상을 측정해본 결과 하상고의 변화가 거의 관측되지 않았다. 이러한 결과는 실시간 현장관측에 의해 측정된 실측치의 타당성을 입증해주는 실질적인 자료로써 세굴심 산정공식을 통하여 예측된 최대세굴심이 잘못 적용되고 있다는 것을 나타낸다.

따라서 세굴심 산정공식을 사용할 경우에는 대상지역의 흐름특성을 정확히 파악하고 대상지역의 지질상태를 제대로 반영해야만 할 것이다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-1-1)에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

명지대학교 (1999). **한남대교 교각 기초주변의 세굴깊이 측정 및 현장 모니터링에 관한 보고서**, 서울특별시, pp. 1-2.

서울특별시 (2002). **강변북로 연결도로(천호대교-토평동) 실시간 교량세굴 모니터링 보고서**, pp. 24-37.

서울특별시 (1996). **천호대교-토평리간 도로건설 시설계 종합보고서**, pp. 369-372.

여운광 등, (2000). "실시간 교량세굴 관측을 통한 세굴현상 분석 및 수치해석을 이용한 최대 세굴심 비교." **2000년도 한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 579-585.

FHWA (1993). *Evaluating Scour at Bridge*. Hydraulic Engineering Circular, No. 18, Second Edition.

Laursen, E. M. (1952). "Observation on the Nature of Scour." *Proceedings 5th Hydraulics Conference*, State University of Iowa.

Melville, B.W. (1999). *Bridge Scour*. Water Resources Publication, LLC, pp.19.

Larras, J. (1963). "Profondeurs maximales d'érosion des fonds mobiles autour des piles enriviere." *Ann.Ponts et Chaussées*, 133(4), 411-424.

(논문번호:03-55/접수:2003.06.30/심사완료:2003.10.01)