

연구와 방재 목적의 현장세굴 측정기술

이 종 국 (명지대학교 박사후과정 연구원)

여 운 광 (명지대학교 토목·환경공학과 교수)

1. 머리말

최근들어 중소하천의 소규모 교량뿐만 아니라 한강 하류부 등 대하천의 교량, 또는 바다를 가로지르는 대규모 교량의 건설로 인하여 발생하는 세굴에 관한 관심이 고조되고 있다. 그러나 국내의 세굴문제 접근방법은 수치모형, 수리모형과 경험공식에 주로 의존하고 있기 때문에 현장의 세굴 진행상황을 수시로 파악하여 적절한 조치를 취하기에는 많은 어려움이 있다. 현장교량세굴의 연속적 측정의 필요성은 다음과 같은 말로 잘 요약된다. "When it comes to bridge scour, detection is the best protection" (Foxworth and Reynolds, 1996). 따라서 본고에서는 이러한 연속적 현장세굴측정의 필요성과 원리 그리고 측정방법에 대하여 설명한 후 효과적인 교량세굴대책으로서의 가능성을 살펴본다.

2. 연속적 현장세굴측정의 필요성

2.1 연구목적으로서의 필요성

교각에 의한 하상세굴현상의 일반적인 연구방법으로는 수치해석방법, 수리모형실험방법, 현장세굴 조사자료에 의한 경험적인 세굴관계식의 도출 등의 방법이 있다. 이중 수치해석방법은 주어진 지배방정식과 경계조건을 컴퓨터를 이용하여 해석하는 기법이다. 그러나 바다경계층에서의 복잡한 난류현상은 현실적으로 경계조건의 설정에 한계성을 드러내고 있다. 따라서 수치해석은 전체적인 유향을 파악하는 데에는 효과적이나 국부세굴문제의 해결에는 어려움이

따른다. 수리모형실험을 이용한 방법은 수치모형에 비하여 국부적인 모습을 재현하는 데에는 효과적이나 모형의 상사법칙에 의거한 한계를 극복해야하는 어려움이 있다. 현장조사에 의한 경험세굴관계식의 도출은 실제 세굴현상의 경향을 파악하는데에는 큰 도움을 줄 수 있으나 주로 갈수기에 측정된 자료에 의존하기 때문에 홍수시의 영향을 집중적으로 받는 교량의 연구에는 적용가능성이 검증되지 않은 실정이다. 따라서 교량세굴의 본격적인 연구를 위해서는 현재의 세굴상태와 진행상황을 현장에서 연속적으로 측정하면서 수치모형과 수리모형 그리고 경험식을 이용한 상호보완적이고 종합적인 연구가 진행되는 것이 바람직하다.

2.2 방재목적으로서의 필요성

미국의 USGS(United States Geological Survey) 기동세굴점검반은 음파를 이용한 세굴측정기, 음파유속계 그리고 GPS(Global Positioning System)를 이용하여 과도한 세굴로 인하여 안전이 우려되는 교량에 대해서는 교통량을 통제하여 인명사고의 발생을 미연에 방지하는 효과적인 방재대책을 수립하고 있다(USGS, 1997). 이러한 현장세굴점검반의 활동과 더불어 USGS는 접근이 용이치 않고 세굴의 피해정도가 심각히 우려되는 곳에서는 교각에 직접 음파세굴측정기와 콘트롤러, 통신장비 등을 설치한 후 지속적인 모니터링을 수행하고 있다. 이러한 현장세굴의 지속적인 모니터링은 과도한 세굴로 인하여 발생할 수 있는 교량의 구조적인 문제를 사전에 파악하여 방재의 효과를 달성할 수 있으며 또한 현장세

굴의 추이를 시시각각으로 측정함으로써 그 상황에 적절한 세굴방호대책을 수립하여 시행할 수 있는 장점이 있다.

3. 음파세굴측정기의 이론

3.1 수중에서의 음파의 전파이론

해양과 해안 그리고 하천, 호수 등에서 수중실험을 수행할 때 음파를 이용하는 장비가 많이 쓰이고 있다. 예를들어 단면의 유속을 재는 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler), 바닥지형을 자세히 그려내는 side scan sonar, 모선과 수중자선과의 통신을 가능케 해주는 acoustic modem, 수중깊숙한 곳의 물체를 탐지하는 sonar, 해양부존자원을 조사하는 acoustic sub-bottom profiler 등이 있다. 이렇듯 음파가 수중에서 널리 쓰이는 이유는 여러 가지가 있지만 첫째, 음파는 수중에서의 손실이 다른 측정방법에 비하여 상대적으로 적어서 깊은 곳, 먼 곳까지도 손쉽게 도달할 수 있기 때문이다. 특히 혼탁한 수중이나 해수에서는 음파를 이용하는 장비외에는 대안이 없는 실정이다(Kinsler and Frey, 1962).

세굴측정에 쓰이는 음파거리측정센서는 전기적인 신호를 음파의 진동신호로 변환하여 수중으로 전파한 후 바닥에 부딪혀 되돌아 오는 시간을 감지하여 거리로 환산하는 센서이다. 따라서 기본적인 수중에서의 음파이론은 음파거리측정센서의 특성과 기능 그리고 제한조건을 이해하는데 필수적인 요소이다. 음파는 수중에서는 공기중의 속도와는 다른 1450~1530 m/s 속도로 전파된다. 이러한 음파의 속도는 여러 가지 인자에 의해서 결정되지만 온도에 의한 속도변화가 지배적이다. 따라서 일반적으로 음파를 이용한 기기를 사용할 경우에는 수온의 측정을 병행하는 것이 바람직하다. 식(1)은 음파의 속도를 계산하는 식이다(Loeser, 1992).

$$c = 1449 + 4.59T - 0.053T^2 + 0.0163D \quad (1)$$

여기서 c = 수중음속(m/s)

T = 수온(°C)

D = 수심(m)

3.2 세굴심측정의 원리

온도의 변화가 크지 않은 수중에서는 음파의 전파속도가 일정하다고 볼 수 있다. 따라서 음파의 전달시간을 측정할 경우에는 음파가 도달한 최단거리로 환산할 수 있다. 음파의 속도를 c , 음파가 음원을 출발하여 되돌아오기까지의 시간을 Δt 라고 할 때 음파가 도달한 거리 L , 즉 센서에서 바닥까지의 거리는 식(2)로 계산할 수 있다.

$$L = c \times \Delta t / 2 \quad (2)$$

한 지점에서 일정한 시각에 측정을 시작하여 계속적으로 거리의 변화를 측정하였을 경우에는 시간에 따른 거리의 변화, 즉 세굴심의 변화를 측정할 수 있다. 그리고 세굴측정에 쓰이는 음파거리측정센서의 원리는 보편적이고 확립된 기술이기 때문에 수중에서의 세굴심을 측정하는 일은 어렵지 않다. 그림 1은 이러한 음파거리측정센서를 이용하여 현장에서 연속적으로 세굴심을 측정하는 모식도이다.

음파거리측정기의 음원으로서의 전기적인 펄스신호를 판막의 진동으로 변환하는 피에조 물질이 많이 쓰이고 있다. 따라서 주어진 전기적인 신호에 대응하는 피에조 판막의 진동수는 그 제조방법에 따라서 일정한 주파수를 지니게 된다. 수심측정용 음파의 주파

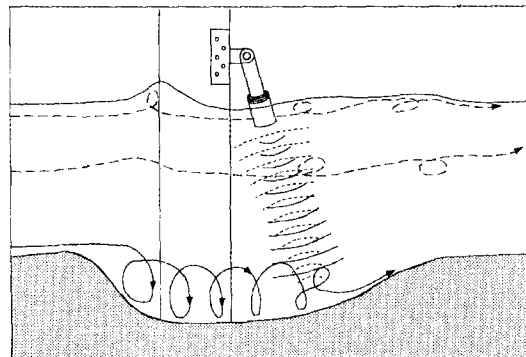


그림 1. 음파 교량세굴측정의 개념도

수 대역은 보통 수 kHz에서 수백 kHz 범위에 분포한다. 주파수에 따라 음파전파의 특성이 결정되는데 예를 들어 수 kHz의 음파는 바닥의 경계면을 통과하여 어느 정도 전파되고 따라서 지층 속의 모습을 살펴볼 수도 있다. 이에 반하여 수백 kHz의 주파수를 갖는 음파는 바닥의 경계에 민감하여 지층 속의 모습은 거의 살펴볼 수 없으나 상대적으로 바닥표면의 변화모습을 더욱 자세하게 보여준다. 그 이유는 주파수에 따른 파장의 변화에 기인한다. 예를 들어 10 kHz의 주파수를 갖는 음파의 파장은 $c/f = 1500 \text{ m/s} / 10000 \text{ 1/s} = 0.15 \text{ m} = 15 \text{ cm}$ 이고 200 kHz의 주파수를 갖는 음파는 $c/f = 1500 \text{ m/s} / 200000 \text{ 1/s} = 0.0075 \text{ m} = 0.75 \text{ cm}$ 이다. 이런 이유에서 저주파를 이용하는 수심측량은 멀리 깊은 곳, 즉 바닥 지층속까지 투과가 가능하지만 고주파를 이용하면 지층까지는 투과할 수 없다. 음파에 의해 얻어지는 바닥 변화의 해상력은 Niquist 주파수에 의해 결정되는데 10 kHz 일 경우에는 $2 \times 15 \text{ cm} = 30 \text{ cm}$ 의 해상력을 갖는데 비추어 고주파인 200 kHz 음파는 이론적으로 $2 \times 0.75 \text{ cm} = 1.5 \text{ cm}$ 의 해상력을 지니므로 자세한 세굴심 변화를 관측할 수 있다. 시판중인 세굴측정용 음파거리측정기의 주파수가 보통 200 kHz의 대역을 갖는 것은 위와 같은 해상력과 전파거리의 최적화에 기인한 것이다(Landers et al., 1993).

4. 세굴측정시스템의 구축

4.1 센서를 이용한 자료수집방법

물리량을 전기적인 신호로 변환하려 할 때 센서가 그 기능을 담당한다(Fraden, 1993). 일반적으로 센서를 통하여 변환된 신호는 전기적으로는 저항, 전류, 전압의 형태를 갖고 신호자체는 아주 미약하거나 잡음이 섞여 있어서 최종 디지털 신호로 변환되기 앞서 전자회로를 통하여 증폭과 여과과정을 거치게 된다. 이러한 과정을 신호처리(signal conditioning)과정이라고 한다(Tomkins and Webster, 1992).

일단 전기신호로 바뀐 물리량의 변화는 아날로그-디지털 변환과정을 거쳐야만 처리와 저장이 가능하게

된다. 이러한 변환과정을 담당하는 반도체를 아날로그-디지털 변환기(analog-digital converter)라 부른다. 그림 2는 아날로그-디지털 변환기가 주가 되는 자료수집과정의 기본적인 흐름을 보여주고 있다.

4.2 세굴측정시스템

현장세굴측정시스템은 최근 명지대학교 토목환경공학분야 현장자료수집시스템 PPDL12(Parallel Port Data Logger, 12bit version)등을 이용할 수 있다. PPDL12는 개인용컴퓨터(PC) 또는 노트북 PC와 센서를 이용하여 현장자료수집을 간단하고 편리하게 수행하는 일종의 자료수집기(data acquisition device)이다. 12 bit의 분해능과 최대 33 kHz의 변환속도를 갖추고 있으며 손쉽게 PC의 병렬포트(parallel port, printer port)에 연결하여 사용가능하다. 이 기기는 GPS, 무선모뎀 등과 같은 다른 여러 가지 보조장비들과 연동운영이 가능하며 PC에서 이용할 수 있는 유용한 자원들, 즉 프로그래밍, 네트워크, 계산, 그래픽 등을 효과적으로 활용할 수 있다. 이 장비의 성능은 이미 수차례에 걸쳐서 실용성이 입증되었으므로 세굴측정시스템의 구축에 그대로 이용될 수 있다(여 등, 1996, 이 와 여, 1997).

5. 현장세굴측정시스템의 설치와 운영

5.1 현장설치시의 고려사항

현장세굴측정시스템을 설치할때는 다음과 같은 점에 주의해야 한다. 우선 음파세굴측정센서의 부착위

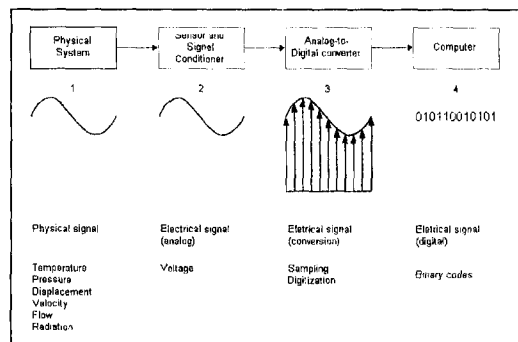


그림 2. 자료수집과정의 흐름도

치는 반드시 수중에 잠기도록 설치해야 한다. 그 이유는 200 kHz 의 주파수를 갖는 음파는 공기중에서 전파가 거의 불가능하므로 공기중에 노출될 시에는 작동이 곤란하다. 하천교량에서 시스템을 설치할 때는 센서가 수중에 위치할 때 측정을 수행해야하며 센서 자체의 최소작동수심(1.5m)을 확보해야한다.

센서는 그림 1에서와같이 스테인레스 스틸이나 갈바나이즈 스틸을 사용하여 부착대에 고정한 후 적절한 각도를 하상과 유지시켜 대표적인 세굴의 측정점을 향하도록 조정한다. 그러나 최종설치위치나 각도는 센서의 탐지거리와 세굴심의 변화를 시험적으로 측정하여 면밀히 검토한 후에 결정하는 것이 바람직하다. 센서가 연결된 케이블은 움직임이 없도록 단단히 고정한 후에 수면 위의 터미널 블록에 차례대로 연결한다. 다음에는 노트북과 자료수집시스템을 가동하여 작동여부를 확인한 후에는 방수가 완비된 기기함에 수집기를 위치시킨다.

5.2 운영시의 주의사항

현장자동측정의 성패는 전원의 안정적인 공급이라 해도 과언이 아니다. 여러가지 자연적인 기상조건에 의해서도 자료의 수집이 방해받는 일이 비일비재하므로 약천후시나 자료의 신빙성이 의심되는 기간에는 시스템의 점검이 필요하다. 현장기기상태의 점검은 1주일 단위가 바람직하나 만약 온라인화가 될 경우에는 수시로 시스템의 작동상태를 살펴볼 수 있다. 한가지 염두에 두어야 할 사항은 음파장비는 수중식물이 잘 기생하지는 않지만 수중에 설치된 센서를 적절한 시간간격을 설정하여 정기적으로 청소할 필요가 있다. 그 이유는 수중식물이 센서에 부착하여 센서의 성능을 저하시킬 수 있기 때문이다.

5.3. 측정빈도의 결정

연속적인 현장세굴측정시 측정빈도는 다음과 같은 측면을 고려하여 합리적이고 적절하게 결정되어야 한다. 우선 측정빈도는 측정이론에 의하면 얻고자하는 물리적 변화량의 최단 시간간격보다 1/2배 적게 설정해야 원하는 물리량의 변동을 이론적으로 살펴볼 수

있다. 그러나 세굴심의 변화를 위상의 변화까지도 충분히 감지하기 위해서는 보통 공학적으로 최소시간간격의 8 배 이상이 추천되고 있다(Oppenheim and Schafer, 1975). 그러나 측정간격을 지나치게 작게 하였을 경우에는 잇점보다 단점이 많다. 우선 장기간에 걸쳐서 자료를 획득할 경우에는 기억장치를 대규모로 설계해야하므로 비경제적이고 고장의 확률도 높다. 또한 필요 이상의 전력소비를 인하여 장기간 관측을 수행할 수 없고 부착하는 여러 센서의 수도 제한을 받을 수 있다. 또한 측정간격이 빨라지면 전류의 소비가 증가하여 전원의 장기적인 공급을 저해할 수도 있기 때문에 최대한 절약하는 방법을 모색해야 한다. 따라서 현장세굴측정에서 얻어야 할 최적측정간격을 선정하여 이에 따른 장기적인 측정을 수행해야 할 것이다.

6. 방재목적의 연속적 현장세굴측정시스템의 구축

6.1 현장세굴측정의 방재적 측면의 효용성

교량세굴은 하상재료, 교각의 형상, 수심, 교각의 편향각, 교각의 정열 등 구조적인 요인과 조석, 파동, 난류형상 등 유황의 영향을 복합적으로 받는다. 따라서 지금까지 수행된 이론적, 실험적인 세굴연구도 주어진 가정과 상황조건에서 얻은 것이 대부분이기 때문에 현장조건을 충분히 고려한 세굴문제의 파악이나 해결책의 도출에는 역부족이었다. 더우기 현장의 세굴진행은 유황에 따라서 급격하게 진전됨으로 부정기적인 세굴심의 측정에 의해서는 교량세굴에 의해서 발생할 수 있는 여러 가지 위험요소를 사전에 포착하는데 많은 어려움이 따른다. 기존의 경험적인 세굴공식은 갈수기나 평수기 등에서 주로 작성되었고 방재 측면에서 중요한 홍수기나 급격한 유속의 발생시에는 그 적용가능성이 크게 떨어진다. 또한 현장세굴의 조사방법으로 행해지는 잠수부에 의한 직접적인 측정방법도 홍수시나 과대한 유속에서는 불가능하므로 이러한 연속적 현장연속세굴측정기의 역할은 방재대책의 측면에서 보면 필수불가결한 요소라고 할 수 있다. 따라서 연속적으로 운영되는 세굴측정시스템을 통하여 현재의 세굴상황이 파악될 경우에는 그 위험도에 따

라서 적절한 방호대책이나 교통통제대책을 수립할 수 있어 혹시라도 발생할 수 있는 과다한 세굴에 의한 교량붕괴의 참화를 사전에 방지할 수 있으리라 생각된다.

6.2 실시간 원거리 자료획득방법의 모색

간단한 원거리 자료획득의 방법으로는 전화선을 이용하는 방법을 고려할 수 있다. 그러나 많은 경우에 전화선의 설치가 용이치 않을 수도 있을 것이다. 따라서 전화선을 이용하지 않는 방법도 고려되어야 한다. 이에 는 다음과 같은 두 가지 방법으로 설치 가능하다. 첫째, 무선모뎀을 이용하는 방법이다. 원리는 무선전화를 이용하는 것과 같은 이치이나 자료를 송수신하는 통신용 프로토콜이 다르기 때문에 이러한 무선자료를 담당하는 사업자가 따로 있다. 국내에서도 최근에 무선모뎀을 이용하는 자료의 송수신이 가능하게 되었으나 아직은 수도권과 대도시에 국한될뿐 다른 지역은 설치중에 있다. 따라서 설치지역에서 운용의 가능여부는 현지조건을 검토한 후 결정해야 할 것이다. 둘째, 독자적인 텔미터식 무선모뎀을 이용하는 방법으로 미국의 Freewave사는 해상 20 마일 이상의

송수신이 가능한 스펙트럼 무선모뎀을 시판중에 있다. 따라서 현장에서 멀지않은 곳에 수신기와 본부와 의 전화선을 설치한 후 자료송수신 시스템을 운영할 경우 자료의 실시간 원거리 자동획득은 충분히 가능할 것이다.

7. 결 론

위에서 살펴 보았듯이 연속적 현장세굴측정의 필요성은 순수한 연구분야뿐 아니라 실제 방재적인 측면에서 날로 증가하고 있다. 현장의 세굴측정시스템은 이미 수중장비에 널리 쓰이는 음파기술을 이용하는 것이므로 상대적으로 적절한 현장자료수집시스템과 연동운영된다면 어렵지 않게 구축할 수 있다. 이러한 현장세굴측정시스템은 실시간으로 확인이 불가능한 수중의 교각세굴을 감지하여 적절한 방재대책을 수립할 수 있는 자료를 제공할 수 있기 때문에 그 효용성은 날로 증가하고 있다. 이러한 시스템개발은 향후 효과적인 교량세굴연구와 방재대책으로서 일익을 담당할 것이다. ●

〈참 고 문 헌〉

여운광, 윤병만, 이종국, 이은섭, GPS를 이용한 현장측정시스템의 개발, 1996년도 토목학회 학술발표회 논문집(II), 대한토목학회, 1996.
 이종국, 여운광, PC병렬포트를 이용한 12 bit Data Logger(PPDL12), 1997년도 한국해안·해양공학회 정기학술강연회 논문초록집, 1997.
 Foxworth and Reynolds, Civil Engineering, ASCE, December, pp 44-46, 1995.
 Fraden, J., AIP Handbook of Modern Sensors, AIP Press, New York, 1993.
 Kinsler, L., and Frey, A., Fundamental of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1962.

Landers, M. Mueller, D., and Trent R., Instrumentation For Detailed Bridge-Scour Measurements, Hydraulic Engineering 193, pp. 2063-2068, 1993.
 Loeser, H., Sonar Engineering Handbook, Peninsula Publishing, Los Altos, 1995.
 Oppenheim, A. and Schafer, R., Digital Signal Processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1975.
 Tompkins W. and Webster, J., Interfacing sensors to the IBM PC, 박귀태 임영철 역, 대영사, 1992.
 USGS, Civil Engineering, ASCE, August, p14, 1997