

조석환경에서의 교각세굴 방지공법 Methodology for Scour Protection of Bridge Pier at the Tidal Zone

고광오¹, 손상영², 안익장³, 김경환⁴
Ko Kwang Oh¹, Son Sang Young², Ahn Ik Jang³ and Kim Kyung Hwan⁴

1. 서 론

세굴은 흐르는 물의 하천 혹은 해저면에 대한 침식작용의 결과로서 발생하며, 장기하상변동(Long-term aggradation and degradation), 수축세굴(Contraction scour), 국부세굴(Local scour) 등으로 구분된다. 장기하상세굴은 교량과 같은 구조물과 무관한 흐름에 의해 발생하고, 수축세굴은 구조물 주변에서 수로단면의 축소에 의한 유속변화에 기인한다. 그리고 국부세굴은 구조물의 흐름에 대한 직접적인 영향으로 발생한다.

과거에는 세굴이 하천 혹은 해안지역에 건설되는 교량과 같은 수리구조물의 설계과정에서 중요하게 고려되지 않았다. 하지만, 하천이나 해안지역에 건설된 교량의 경우, 기초부가 세굴에 영향을 받기 쉬워 붕괴사고의 원인이 되고, 그 결과 붕괴사고가 발생하게 된다. 따라서 수리구조물의 기초를 안정하게 설계하기 위해 세굴심을 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다. 이에 대한 노력으로, 세굴의 물리적 특성을 파악하기 위해 수 많은 연구가 이루어졌다. 그 결과, 세굴심을 추정하기 위해 여러 가지 경험공식이 제안되었다. 그러나 여러 경험공식에 의한 세굴심은 각 공식마다 상이한 값을 예측할뿐더러, 그 적용범위 또한 매우 제한적이어서 사실상 많은 한계점을 지니고 있다. 가령, 교각의 형상이나 배치가 다양하게 고려되지 못하고, 파랑이나 조류가 포함될 경우, 적용이 가능한 식을 찾아보기 힘들다. 이처럼 경험 공식에 의한 세

굴심의 추정은 정확성이 떨어지므로, 수리모형실험이나 수치모형실험 등에 의해 세굴심을 예측하는 것이 적절한 대안으로 생각되고 있다.

최근에는 해안지역에 연육교와 같은 장대교량이 빈번히 건설되면서, 세굴에 대한 안정성 검토가 더욱 더 철저히 요구되고 있다. 하지만 지금까지 조석지역에서 교각세굴에 대한 연구는 하천지역에서의 세굴특성에 관한 연구에 비해 덜 이루어졌다. 이는 당연히 하천에서의 흐름과 같은 정상류에서의 세굴보다 해안지역에서의 세굴이 더욱 복잡하기 때문이다. 또한, 인천 제2연육교의 설계교각과 같은 복잡한 형상의 교각에서의 세굴을 해석할 수 있는 경험공식이나 그에 유사한 연구결과를 찾아볼 수 없다.

본 연구에서는 인천 제2연육교 설계시 검토하였던 주교각 주위에서의 세굴특성을 3차원 유체해석 프로그램인 Flow3D로 모의하여 그 결과를 살펴보고, 이를 중심으로 복잡한 형상의 교각에서의 세굴특성을 정성적으로 분석하였다. 이를 바탕으로 세굴방지공의 설계절차에 대해 살펴보고 적절한 설계방법을 제시하였다. 또한, 교량의 시공기간 동안 혹은 시공 후의 교각안정성을 확보하기 위한 세굴 모니터링 방법에 대해서도 소개하였다.

2. 연구동향

교각에서의 국부세굴에 대한 연구는, 최근까지 폭넓게 진행되어왔다. 하천에서의 흐름과 같은 일

1 현대건설 기술개발원(설계) 과장
2 현대건설 기술개발원(기술연구) 사인
3 해인 E&C 기술연구소
4 STI Korea

방향 흐름에서 세굴현상이나 파랑처럼 흐름방향이 변화하는 환경에서의 세굴(Hoffmans & Verheij, 1997; Whitehouse, 1998; Melville & Coleman, 2000; Sumer et al., 2001) 등이 실험적으로 연구되어왔다. 조석환경에서의 세굴에 관한 현장실측자료는 극히 희소하여, 조류환경에서 실험한 몇몇 실험결과와 자료(Escameia, 1998)밖에 존재하지 않으며 세굴에 대한 연구동향은 Richardson & Davis (2001)에 의해 논의된바 있다. 최근에는 SCARCOST (Scour ARound COastal STRuctures; 1997~2000)프로젝트에 의해 체계적으로 연구되기도 했다. 이 프로젝트는 EU 산하 프로그램인 MAST (Marine Science and Technology)의 일환으로 수행된 프로그램이며, 주 연구 과제는 해안구조물 주변에서 발생할 수 있는 세굴로 인한 위험성을 연구하고, 이에 대하여 적절한 설계지침을 수립하고자 하는 것이다. 그 성과는 각종 저널과 학술발표회를 통해 발표되었다.

한편, Sumer 등(1992)은 파랑이 존재하는 해역에서의 세굴심을 추정하는 경험식을 제안하였다. 우선, 세굴심은 KC수(Keulegan-Carpenter)와 관련이 있음을 보이고, 독립된 한 개의 교각에서 발생하는 세굴심을 추정할 수 있는 다음 공식을 제안하였다.

$$\frac{S}{D} = 1.3 \{1 - \exp(-m(KC-6))\}$$

여기서 S는 세굴심, D는 교각의 직경, 그리고 m은 경험상수 등을 의미한다.

또 이들은 군말뚝에서의 세굴심에 대해서도 실험적으로 관측하였고(Sumer & Fredsøe, 1998), 파랑과 조류가 공존하는 해역에서의 세굴특성에 대해서도 조사하였다.(Sumer & Fredsøe, 2001). 그림 1은 Sumer & Fredsøe(1998)의 연구결과를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 기본적으로 세굴심은 KC수에 비례하고, 군말뚝의 경우에 세굴심이 그 배치형상에 따라 다양하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 2는 Sumer & Fredsøe (2001)의 연구결과로서, 파랑과 조류가 공존할 경우의 세굴심에 대해 보여준다. 조류의 방향이 파랑과 수직할 경우와 파랑의 방향과 평행할 경우만큼 세굴이 발생함을 알 수 있다.

한편, 해안지역에서의 세굴에 대해 수치적으로 접근하려는 노력도 이루어졌다. Richardson & Panchang (1998)은 교각주변에서 세굴을 야기하는 흐름양상에 대해 수치적으로 시뮬레이션하였으며, Smith and Foster(2001)는 유사이동과 세굴을 모의하기 위해 CFD모델을 이용하였다. 또, Yen 등

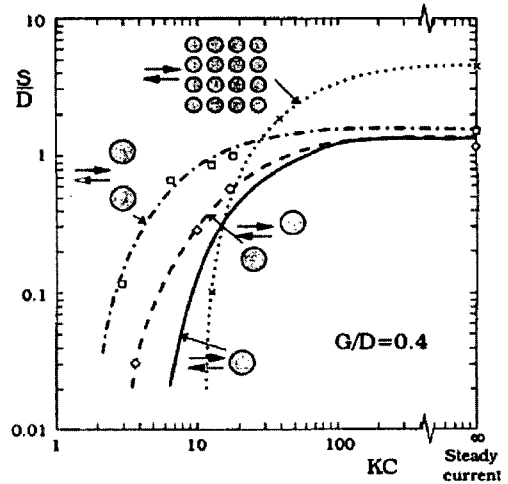


Fig. 1. Experimental data of equilibrium scour depth around group of piles (Sumer & Fredsøe, al., 1998)

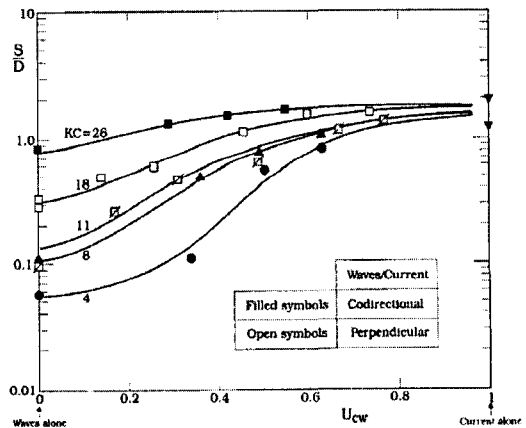


Fig. 2. Experimental data of equilibrium scour depth around pile in combined waves and current : $U_{cw} = U_c/(U_c+U_w)$ (Sumer & Fredsøe, 2001)

(2001)은 세굴모형과 3차원 흐름모형을 결합하였으며, Li 등은 파랑-조류에 의한 실린더 주변에서의 세굴을 수치적으로 모의하였다.

3. 세굴 방지공을 위한 초기설계

현대건설이 최근 설계한 인천 제2연육교의 교각을 예로, 교각세굴 방지공에 대한 설계절차를 설명할 수 있다. 이 프로젝트에서는 우선 설계된 교각의 조건에 맞는 경험공식을 적용하려 하였으나, 교각형상의 특수성으로 인해 알맞은 경험공식

을 찾을 수가 없었다. 그러므로 교각 기초부의 세굴검토는 실시설계시 퇴적특성 조사와 수리모형실험 및 퇴적수치모형실험을 통하여 면밀히 검토하는 것으로 하고 여기서는 일반적으로 사용되고 있는 하천에서의 세굴공식을 적용하여 개략적인 세굴방지공을 검토하였다.

우선, 국부세굴의 거동여부의 검토방법중 하나인 Van Rijn공식을 통해 전단한계유속, 즉 이동한계유속을 산정하여 평균유속과의 크고 작음으로 해저질의 거동을 파악하였다. 세굴이 발생할 경우, 세굴공의 깊이와 폭은 C.S.U. (Colorado State University)공식이나 Melvilles 공식 혹은 Jainv & Fisher의 공식 등의 여러 가지 경험식으로 계산할 수 있다. 이들 공식가운데 미연방 도로국 (AASHTO)가 추천하는 공식인 C.S.U 공식을 사용하여, 세굴방지공의 초기설계단계에 필요한 세굴심을 산정하였다. C.S.U. 공식은 다음과 같다.

$$\frac{d_s}{y} = 2.0k_1k_2k_3k_4 \left(\frac{a}{y}\right)^{0.65} F_r^{0.43}$$

여기에서 d_s, y, a, F_r 는 각각 세굴심, 수심, 교각의 폭과 Froude수를 의미한다. 그리고 k_1, k_2, k_3, k_4 는 교각의 물리적 특성과 관련된 계수들로 Table 1-4와 같다.

Table 1. Correction factor for pier nose shape, k_1

Shape of pier nose	k_1
(a) Square nose	1.1
(b) Round nose	1.0
(c) Circular cylinder	1.0
(d) Sharp nose	0.9
(e) Group of cylinder	1.0

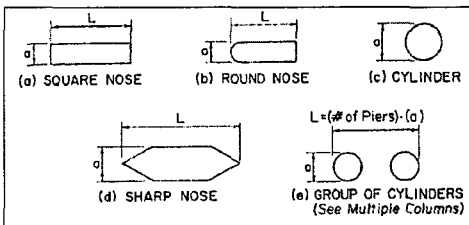


Fig. 3. Pier shapes

한편 세굴폭은 Whitehouse(1998) 혹은 Richardson & Davis (1995)의 연구결과에 의해 세굴심의 크기

와 같은 규모로 결정하거나, 지반환경에 따라 차이가 있지만 세굴방지공 설치후의 세굴을 고려하여 한국도로공사에서 제시한 세굴폭으로 적용하였다.

하지만, 위 공식들은 단순히 독립된 한 개의 교각을 대상으로 한 것이므로, Fig. 4에와 같이 주교각은 다양한 크기의 선박 충돌 방지공에 둘러싸여있어, 기존 경험공식을 적용하기가 어렵다. 따라서 이 공식들에 의한 세굴심은 개략적인 예측값일 뿐, 상세설계 단계에서 수리모형실험 혹은 퇴적수

Table 2. Correction factor for angle of attack of flow, k_2

Angle of Attack	k_2		
	L/a=4	L/a=8	L/a=12
0	1.0	1.0	1.0
15	1.5	2.0	2.5
30	2.0	2.5	3.5
45	2.3	3.3	4.3
90	2.5	3.9	5.0

Table 3. Correction factor for bed condition, k_3

Bed condition	Dune Height, H(m)	k_3
Clear-water scour	N/A	1.1
Plane bed and antidune flow	N/A	1.1
Small dunes	10 > H > 2	1.1
Medium dunes	30 > H > 10	1.1 ~ 1.2
Large dunes	H > 30	1.3

Table 4. Correction factor for armoring by bed material size D90, k_4

Index	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ /D ₅₀ ≥	Maximum V ₁	k_4
Sand	< 2.0	-	-	1.0
Gravel	2 - 32	-	-	1.0
Gravel	32 - 64	4 - 3	V ₁ ≤ 0.7 V _c	0.95
Pebble	64 - 250	3 - 2	V ₁ ≤ 0.8 V _c	0.90
	250 - 500	2 - 1	V ₁ ≤ 0.8 V _c	0.85
	> 500	1	V ₁ ≤ 0.9 V _c	0.80

치모형실험을 통해 초기설계를 검증하거나 최적화하여야 한다.

교각의 기초를 세굴로부터 보호하기 위해서 세

굴에 대한 안정성과 시공성 및 시공기간 등을 고려하여 G-3E 블록매트를 세굴방지공으로 사용하기로 하였다. G-3E블록은 Fig. 5에서 보듯이 각 면의 연결고리를 U형 볼트에 의해 서로 연결하여 매트화 할수 있고, 이렇게 조립된 콘크리트 블록매트를 세굴이 발생할 것으로 예상되는 부분에 설치하게 된다. 블록매트의 거치는 Fig. 6과 같다.

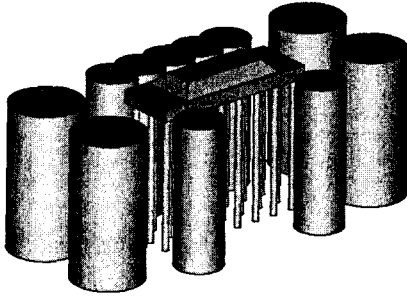


Fig. 4. Main pier of Incheon 2nd bridge

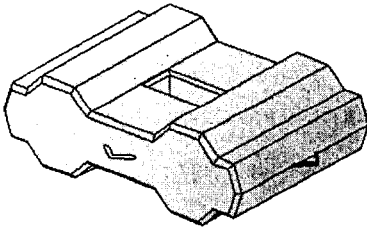


Fig. 5. G-3E block

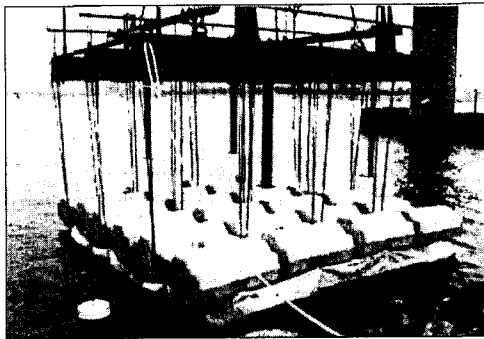


Fig. 6. Placing of concrete block mat

Fig. 4와 같은 복잡한 형상의 교각에서 발생하는 세굴양상을 파악하기 위해 Flow3D 프로그램이 사용되었다. 1968년 Los Alamos연구소에서 개발한 VOF(Volume of Fluid)법에 기초를 둔 CFD 프로그램으로 알려져 있는 Flow3D는 자유수면의 형상이

나 유사이동, 열전도 및 그 밖의 다양한 수리특성을 3차원으로 해석할 수 있다.

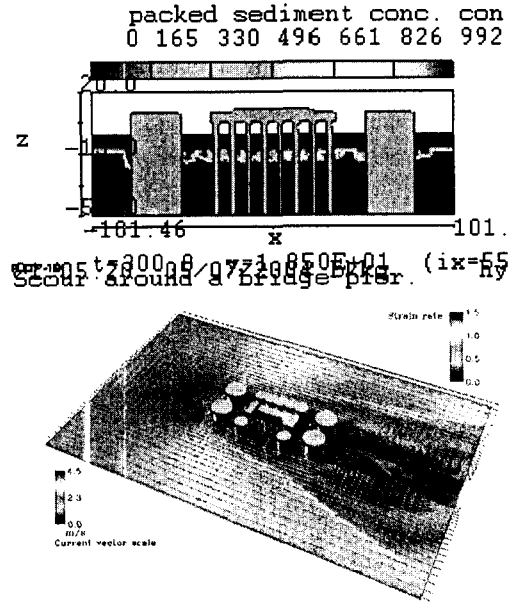


Fig. 7. Numerical result of scour around main pier

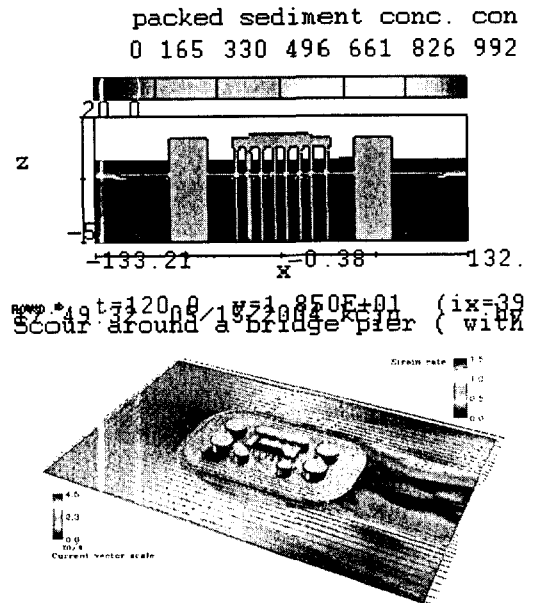


Fig. 8. Same as Fig 7, but with scour protection.

본 연구에서는 2가지 경우가 제시 및 비교되었고 그 결과는 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다. Fig. 7은 세굴 방지공을 설치하기 전의 세굴양상을 모의한 것

이고, Fig. 8은 세굴 방지공 설치 후의 세굴양상을 모의한 것이다.

우선 세굴방지공이 설치된 후 세굴양상이 확연히 감소하였음이 명백히 나타난다. 그림 7에서는 대부분의 교각부위에서 세굴이 발생하지만, 그림 8에서는 세굴 방지공 선단에서 세굴이 발생함을 알 수 있다. 따라서 세굴 방지공을 보다 효과적으로 설계하기 위해서는 세굴이 발생할 가능성이 있는 세굴 방지공 선단을 적절히 설계해야 한다.

4. 조석환경에서의 교각세굴 방지공법

조석환경에서의 세굴 방지공 설계절차를 제안하기 위해 인천 제2연육교 프로젝트의 설계절차를 예로서 설명하였다. Fig. 9는 이 프로젝트의 설계 과정을 보여준다.

설계과정의 첫 단계는 자료의 조사 및 수집으로서 실측 수치모형실험의 기본 자료로 활용하게 된다. 조류기록과 파랑기록, 풍속과 풍향, 퇴적물 자료 혹은 계획위치별 지질도 등의 자료가 이에 포함된다.

이렇게 확보된 조사 자료를 바탕으로 침식 및 퇴적, 파랑 및 조석에 관련한 수치 모형 실험이 실행된다. 침식 및 퇴적 수치 모형 실험은 2차원 파랑 변형 실험, 해수유동 실험 및 침식 퇴적 모형 실험을 통해 교각 세굴 수리 모형 실험 및 수치 모형 실험의 실험 조건을 제시하며, 침식 및 퇴적의 평면적 분포를 파악하게 하여 정확한 세굴심 추정 및 세굴범위를 파악을 가능하게 한다. 우선, 주어진 풍속 및 풍향, 해저면 및 해류조건으로부터 파랑변형을 모의하여 연안역, 호수나 하구 등에서의 파고를 예측한다. 또한 부유사퇴적모형을 사용하여 유사이동에 관한 수치실험도 수행함으로써 세립 퇴적물의 부유, 이동, 침전, 재부유 등을 고려한 퇴적 세굴량을 산정할 수 있다. 이러한 침식퇴적실험은 해수유동실험의 유동장을 이용하여 부유사 및 소류사의 이송확산을 해석하고 사업지구 및 주변 해역의 침식 및 퇴적의 양상을 파악하여 교각 세굴 수리 모형 실험 및 수치 모형 실험의 자료로 활용한다.

침식 및 퇴적에 관한 실측 수치모형실험의 결과는 교각 세굴 수리 및 수치 모형 실험의 실험조건을 제시한다. 이미 설명한 바와 같이 인천 제2연육교 프로젝트의 경우, Flow3D 모델을 이용하여 교각 주변에서의 세굴심과 세굴범위 등을 추정하였다. 한편 설계 조건에서 교각 주위의 세굴심을 파악하고, 수치 모형 실험의 결과를 입증하기

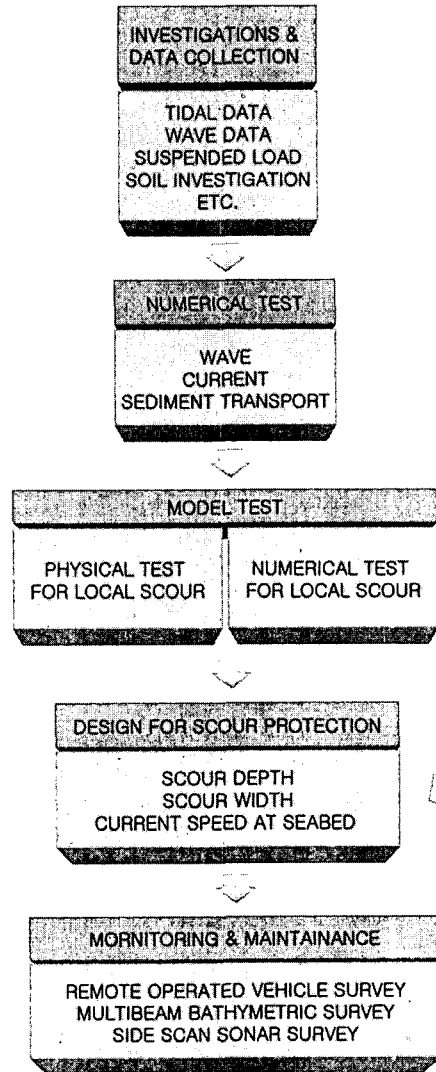


Fig. 9 Design procedure for scour protection

위해 교각 세굴 수리 모형 실험이 병행하여 수행된다. 특히, 세굴 방지공 설치 전후의 세굴특성을 비교해봄으로써, 설계된 세굴방지공의 안정성이 검토되어야 한다.

이상의 전반적 분석을 통해 세굴 방지공의 실시설계에 중요한 세굴심 및 세굴폭 과 해저에서의 유속 등을 최종적으로 결정하게 된다. 그리고 이 단계에서는 세굴 방지공에 적합한 재료도 선정하게 된다. 세굴 방지공이 설치된 후에도 세굴이 발생하므로, 교각에 대한 안정성을 확보하기 위해 계속적으로 세굴현상이 관측되어야 한다. 수중 비디오 촬영 조사(Remote Operated Vehicle)와 멀티빔 수심 조사(Multibeam Bathymetric Survey) 또는 해저면 영상조사(Side Scan Sonar Survey)등이 세

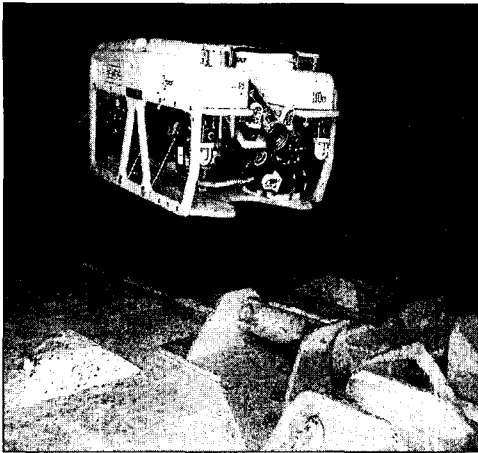


Fig. 11. An example of ROV images

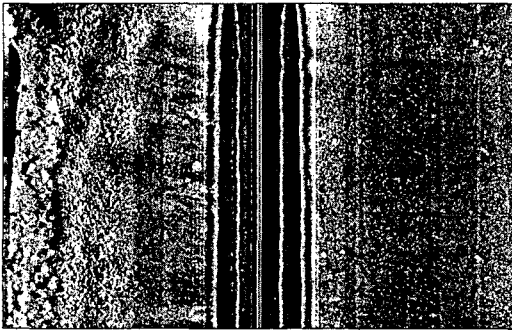


Fig. 12. An example of side scan sonar survey

굴 모니터링에 적용되는 방법들이다.

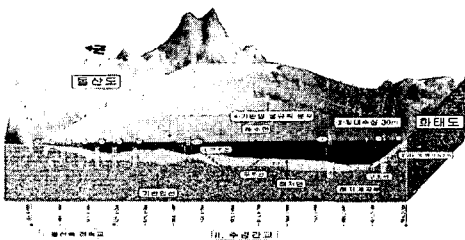


Fig. 13. 3-D bathymetric image by multi-beam sonar survey

5. 토 의

본 연구에서는, 해안지역에 건설하는 교량의 교

각에서 발생이 우려되는 세굴을 방지하기 위한 세굴 방지공에 대한 설계 절차를 살펴보고, 이를 바탕으로 적절한 세굴 방지공 설계 절차를 제안하였다. 언급한 바와 같이 조석환경에서의 교각세굴에 대해 적용 가능한 경험식은 찾아보기 힘들다. 따라서 수리 및 수치 모형 실험 등의 방법을 통하여 파랑 및 조류의 영향이나 교각의 다양한 형태를 고려한 세굴특성을 파악하고 세굴심을 추정할 수 있다.

한편, 세굴 방지공 설치 전후의 세굴양상이 비교 및 분석되었다. 두 가지 양상이 너무 다르므로 이를 바탕으로, 조석환경에서 최적의 세굴 방지공을 설계하기 위한 보다 실제적인 경험식이 개발되어야 하겠다.

참고 문헌

- Escarameia, M. (1998). *River and Channel Revetments: A Design Manual*. ThomasTelford Publications, London.
- Hoffmans, G.J.C.M., Verheij, H.C. (1997). *Scour Manual*. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Melville, B.W., Coleman, S.E. (2000). *Bridge Scour*. Water Resources Publications, Co, USA.
- Richardson, J.E., Panchang, V.G. (1998). Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers., *J. of Hydraulic Eng.*, 124(5), 530-540.
- Sumer, B.M., Fredsøe, J. (1992). Scour around vertical pile in waves. *J. of Waterway, Port, Coast. and Ocean Eng.*, 118(1), 15-31.
- Sumer, B.M., Fredsøe, J. (1998). Wave scour around group of vertical piles. *J. of Waterway, Port, Coast. and Ocean Eng.*, 124(5), 248-256.
- Sumer, B.M., Fredsøe, J. (2001). Scour around pile in combined waves and current, *J. of Hydraulic Eng.*, 127(5), 403-411.
- Sumer, B.M., Whitehouse, Rechar J. S., Torum Alf, (2001). Scour around coastal structures: a summary of recent research *Coastal Eng.*, 44, 153-190.
- Whitehouse, R.J.S. (1998). *Scour at Marine Structures*. Thomas Telford, London.
- Yen, C., Lai, J., Chang, W. (2001). Modeling of 3D flow and scouring around circular piers. *Proc. Natl. Sci. Council. ROC.*, 25(1), 17~26