

초음파 반사이미지와 고유주파수 변화를 이용한 해상 기초구조물의 세굴도 평가

Scour Evaluation of Offshore Foundations by using Ultrasonic Reflection Images and Natural Frequency Variation

박기원* · 변용훈** · 최창호*** · 이종섭****

Park, Kiwon · Byun, Yong-Hoon · Choi, Changho · Lee, Jong-Sub

Abstract

Local loss of geomaterials, which reduces the stability of the structures, around foundation of offshore structure occurs due to the interaction between water and ground. The objective of this study is to evaluate scouring in offshore foundation structures by using ultrasonic reflection method and natural frequency analyses. Sand-cement mixture is prepared to model the ground, which is encountered the scour depth and the scour shape. Ultrasonic wave and natural frequency are measured according to the scour depth. Ultrasonic transducers are used to measure the ultrasonic wave, and strain gauges are used to measure the natural frequency. Ultrasonic transducers are fixed on horizontal movement system and rotational movement system for the change of location. Strain gauges are attached on upper part of model monopile. Ultrasonic reflection image and strain responses are monitored in laboratory experiment. Maximum scour depth is estimated by natural frequency, and the characteristics of the scour shape are estimated by ultrasonic reflection image. This study suggests that the ultrasonic scanning and natural frequency analyses may be effectively used to monitor the characteristics of the scour depth and shape.

Key words : Monitoring, Monopile, Natural frequency, Ultrasonic imaging, Scour

요 지

해상에 구조물이 존재할 경우 유수와 지반의 상호작용으로 인하여 기초구조물 주위의 지반이 국부적으로 소실되는 세굴현상이 발생한다. 본 연구의 목적은 초음파 반사이미지와 고유주파수 측정을 통하여 해상 기초구조물의 세굴도를 평가하는 것이다. 세굴현상을 모사하기 위하여 모래-시멘트 혼합시료를 사용하였으며, 세굴도 변화에 따른 초음파 반사이미지와 고유주파수를 측정하였다. 초음파 반사이미지 측정을 위하여 초점방식의 초음파 트랜스듀서가 사용되었고, 고유주파수 측정을 위하여 전기저항식 변형률계가 사용되었다. 초음파 트랜스듀서는 수평이동장치와 회전이동장치에 고정하여 이동시켰으며, 전기저항식 변형률계는 모형 모노파일의 상단에 부착하였다. 실내실험을 통해 세굴도 변화에 따른 초음파 반사이미지의 변화와 변형률 신호를 관찰하고, 각 단계에서의 세굴특성을 파악하였다. 실험결과, 고유주파수를 이용하여 최대세굴심도의 산정이 가능하였으며, 초음파 반사이미지를 통하여 고해상도 세굴단면의 획득이 가능하였다. 본 논문에서 제시한 초음파 반사이미지와 고유주파수 측정을 통한 세굴도 평가는 해상 기초구조물에서 발생할 수 있는 세굴심도와 형상을 모니터링하기 위한 매우 효과적인 방법이 될 수 있음을 보여준다.

핵심용어 : 고유주파수, 모니터링, 모노파일, 세굴, 초음파 이미지

1. 서 론

해상 구조물에 대한 수요가 증가함에 따라, 구조물에 발생

하는 위험요소를 파악하고 제어할 수 있는 방법에 대한 연구의 필요성이 증가되어왔다. 해상에 기초구조물이 존재할 경우, 유수의 침식유발능력과 지반의 침식저항능력의 상호작용으로

*고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정(E-mail: sakipark@korea.ac.kr)

Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University

**고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료

Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University

***한국건설기술연구원 Geo인프라연구실 수석연구원

Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology

****교신저자. 정회원. 고려대학교 건축사회환경공학부 교수(Tel: +82-2-3290-3325, Fax: +82-2-3290-3838, E-mail: jongsub@korea.ac.kr)

Corresponding Author. Professor, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University

인하여 기초구조물 주위의 지반이 국부적으로 소실되는 세굴 현상이 발생한다(Choi et al., 2003). 세굴현상으로 감소된 기초의 근입깊이는 기초구조물의 과도한 변위를 초래할 뿐 아니라, 기초의 지지력을 변화시켜 해상 기초의 붕괴 원인이 될 수 있다(Kim et al., 2004). 이러한 세굴현상은 흐름조건 및 해상지반조건, 그리고 기초의 형상에 따라 변화되는 외류 현상으로 인해 발생하며, 해상지반의 특성에 따라 부유사 이동 및 저질이동의 형태로 나타난다. 여기서, 저질이동이란 물의 흐름으로 해저면에 존재하는 지반 입자가 이동하는 현상을 의미한다. 또한, 세굴은 시간에 따라 특성이 변화하기 때문에 수치모형실험을 통한 세굴현상의 규명에는 어려움이 존재한다(Kim et al., 2005). 현재, 국내에서는 해상조건에서의 세굴현상을 정량적으로 평가하기 위한 기준이 제시되어 있지 않고, 해상 기초구조물의 세굴현상 모니터링기법에 대한 연구는 제한적으로 이루어져 왔다(Choi et al., 2003; Yeo et al., 2006).

세굴현상에 대한 연구는 주로 유수와 지반상태의 상호작용에 대한 연구와 기초구조물의 세굴심도 모니터링에 대한 연구로 나뉘어 수행되었다. 해상에 비해 비교적 심도가 낮은 하천의 경우, 하상조건, 침식유발특성과 지반종류에 따른 침식저항능력을 고려하여 세굴도를 예측하는 연구가 수행되어 왔으며(Briaud et al., 2001; Kwak et al., 2002), 이에 대한 검증을 위해 초음파 센서와 유속계를 이용해 현장 모니터링을 수행한 연구도 수행된바 있다(Lee and Kim, 2005). 또한, 교량과 댐 구조물에 세굴로 인한 공동이나 공극이 형성되어 발생할 수 있는 지반변위를 모니터링하기 위하여, Flex센서와 FBG(Fiber Bragg Grating)센서를 이용한 방법과 GPR(Ground Penetrating Rader)과 초음파 반사법을 이용한 비파괴 탐사방법의 개발과 현장적용에 대한 연구가 수행되어 왔다(Ballio and Radice, 2003; Choi et al., 2003; Lin et al., 2006; Zhou et al., 2011).

하천에 비해 심도가 깊은 해상의 경우, 기초구조물은 대구경이고, 대수심 상태에 있기 때문에 초음파 센서를 이용한 비파괴 탐사방법에 대한 연구가 중점적으로 수행되어 왔다(Lousheimer et al., 2007). 또한, 해상세굴의 경우 물의 흐름이 주변지형의 영향을 받으며, 세굴현상이 세굴도 평가에 중요한 인자로 작용하기 때문에, 세굴이 발생한 지리적 위치와 세굴형상에 대한 연구도 함께 수행되어 왔다(Whitehouse et al., 2008). 하지만, 국내의 경우 해상세굴 모니터링에 대한 연구가 대부분 세굴심도나 유속과 같은 단편적인 방법에 국한되어 왔으며, 세굴형상 및 해상기초의 동적특성 등을 복합적으로 고려한 모니터링 기법에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 해상기초 구조물의 세굴특성을 모니터링하기 위하여 고유주파수 측정 및 고해상도 초음파 반사법을 적용하고자 하였다. 고유주파수의 측정은 전기저항식 변형률계를 통한 동적 신호분석에 기초하였으며, 초점방식의 트랜스듀서를 이용한 초음파 반사법은 매질의 임피던스 불일치(Impedance mismatch)에 따른 초음파의 반사원리에 근거하였

다. 본 논문에서는 세굴현상을 모사하기 위하여 모형 모노파일 제작 및 실내 모형지반 조성에 대해 설명한 후, 각 모니터링 기법의 원리와 적용에 대하여 설명하였다. 초음파 반사법을 이용한 결과는 고유주파수 측정결과와 비교 및 분석하여 모니터링 기법의 현장적용방안에 대하여 토의하였다.

2. 실내 실험 구성

본 연구에서는 해저지반에 근입되어 있는 모노파일 주변지반에서 발생하는 세굴현상을 모사하기 위하여, Fig. 1과 같이 원통형 수조(Experimental tank)에 모형 모노파일을 설치한 후 모형지반을 조성하였다. 플라스틱 재질의 원통형 수조는 모형 모노파일의 크기와 지반시료의 높이를 고려하여, 직경과 높이를 각각 1000 mm 및 450 mm로 제작하였다.

2.1 모형 모노파일

모형 모노파일은 기초를 모사하기 위한 원통형 봉과 기초가 근입된 암반을 모사한 하부판으로 구성되어 제작하였다. 해저 암반에 근입된 상태를 모사하기 위하여, 원통형 봉 표면과 하부판의 중앙홀 내부를 나사산으로 가공하여 상호 고정될 수 있도록 하였다. 장주기 특성을 나타내는 대구경 기초구조물을 모사하기 위하여, 모형 모노파일 원통형 봉의 고유주파수가 5~20 Hz 범위에 포함되도록 제작하였다. 원통형 봉은 폴리에틸렌 재질로, 직경 25 mm, 길이 600 mm로 제작하였으며, 하부판은 MC나일론 재질로 가로·세로 500 mm, 높이 50 mm로 제작되었다. 하부판의 경우, 해저암반에 모노파일이 완전고정된 상태를 모사하기 위하여, 모서리를 따라 8개의 볼트로 철판(Steel plate)에 고정시켰다.

2.2 모형 지반

모노파일이 근입된 해저지반을 모사하기 위하여, 모래와 시멘트를 혼합하여 모형지반 재료로 사용하였다. 먼저, 균질한 지반의 조성을 위하여 주문진 표준사를 40번체와 50번체 사이에 잔류하도록 체가름을 수행하였다(Byun et al., 2011). 여기서 사용된 주문진 표준사의 평균입경(D_{50})은 0.36 mm이고, 비중(G_s)은 2.62이다. 모형지반을 세굴형상에 따라 성형하기 위하여 모래와 시멘트를 10:1의 무게비로 혼합하여 시료를 조성하였으며, 물/시멘트비는 200%로 하였다(Yu and Chang, 2001). 여기서 시멘트는 비중 3.15의 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 모형지반에서 충분한 깊이의 세굴을 성형할 수 있도록, 하부판으로부터 150 mm 높이까지 모래-시멘트 혼합시료를 조성하였으며, 해상조건을 모사하기 위하여, 시료의 상부 100 mm 높이까지 수위를 조성하였다. 모형지반은 충분한 성형성을 발휘하도록 조성 후 7일부터 세굴을 성형하였다. 세굴도 변화를 모사하기 위한 세굴심도(Scour depth)는 0, 70, 90, 110, 130 mm의 다섯 단계로 변화시켰으며, 세굴심도(S)와 세굴직경(D)의 비(S/D)는 0.4가 되도록 유지시켰다. 세굴의 형상은 Fig. 1과 같이 원추형이 되도록 하였으며, 세굴된 시료는 제거하였다.

3. 초음파 이미지를 이용한 모니터링 시스템

3.1 적용원리

초음파 영역대(20 kHz 이상)의 주파수를 가지는 압축파(P-wave)는 매질을 따라 전파될 경우 임피던스 차이(Impedance mismatch)가 발생하는 경계면에서 반사되어 돌아오는 특성을 가진다(Richert et al., 1970; Lee et al., 2009; Truong et al., 2010). 이러한 탄성과 탐사의 기본원리를 응용하여 금속의 결합 탐사, 해양 탄성과 탐사, 그리고 의학진단 에서 초음파 이미징 등과 같이 다양한 분야에 적용되어 왔다(Lee et al., 2009).

해상기초에 세굴이 발생할 경우, 해수와 해저지반 사이에는 임피던스가 불일치하는 경계면이 형성된다. 탄성파가 경계면에 수직으로 입사하게 되면 경계면의 반사특성과 전달특성의 영향을 받아 반사파와 전달파가 발생하게 된다. 본 연구에서는 경계면에서 발생한 반사파를 효과적으로 획득하기 위하여 고주파수 영역의 초음파 트랜스듀서를 사용하였으며, 획득된 반사이미지를 통해 해상기초의 세굴심도와 세굴형상을 모니터링하는데 적용하고자 하였다.

3.2 측정시스템

초음파 트랜스듀서는 음향에너지를 전기적인 신호로, 전기적인 신호를 음향 신호로 전환하는 장치로서, 트랜스듀서의 발신부 형상과 재질에 따라 주파수영역 및 지향성 등이 결정된다. 트랜스듀서의 선택시, 대상체의 조건에 따라 주파수영역, 지향성, 표면깊이(Skin depth)에 대한 고려가 필요하다(Lee and Santamarina, 2005). 본 연구에서는 세굴형상을 높은 해상도로 관찰하기 위하여, 작은 측정범위 안에서 고해상도의 이미징 획득이 가능한 500 kHz 대역의 초점방식(Focal type) 트랜스듀서를 사용하였다(Panametric, A3441). 본 연구에서 사용된 트랜스듀서는 수중측정이 가능한 Immersion type이며, 높은 감쇄특성을 나타내어 불연속지반의 탐측이 가능하다.

본 연구에서는 초음파 신호를 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 측정시스템을 구성하였다. 초음파 신호는 고전압의 임펄스(Impulse) 신호가 발신가능한 Pulsar amplifier(JSR Ultrasonics, DPR 300)를 사용하여 발신용 트랜스듀서(Source)를 통해 발신되었다. 발신된 신호는 시료에서 반사된 후, 수신용 트랜스듀서(Receiver)를 통해 측정되었다. 트랜스듀서 간에 전달되

는 직접파의 영향을 최소화하기 위하여, 발신용 트랜스듀서의 발신부에 알루미늄 재질의 쉴드를 부착하였으며, 트랜스듀서와 이동장치를 연결하는 봉(Connecting bar)에 고무재질의 이격재를 사용하였다. 수신 트랜스듀서로 획득된 신호는 신호 증폭기(Krohn-Hite 3945)를 이용하여 증폭된 후, 오실로스코프(Oscilloscope)를 통하여 컴퓨터에 저장하였다.

트랜스듀서의 이동은 세굴단면의 파악을 위한 수평이동과 최대세굴심도의 평가를 위한 회전이동으로 구분하여 수행하였다. 트랜스듀서를 일정간격으로 수평이동시키기 위해서 Fig. 3(a)와 같이 수평이동장치를 제작하였다. 손잡이(Knob)의 1회 전당 1.4 mm의 간격으로 일정하게 이동할 수 있으며, 총 이동거리는 수조의 크기와 최대세굴심도를 고려하여 500 mm로

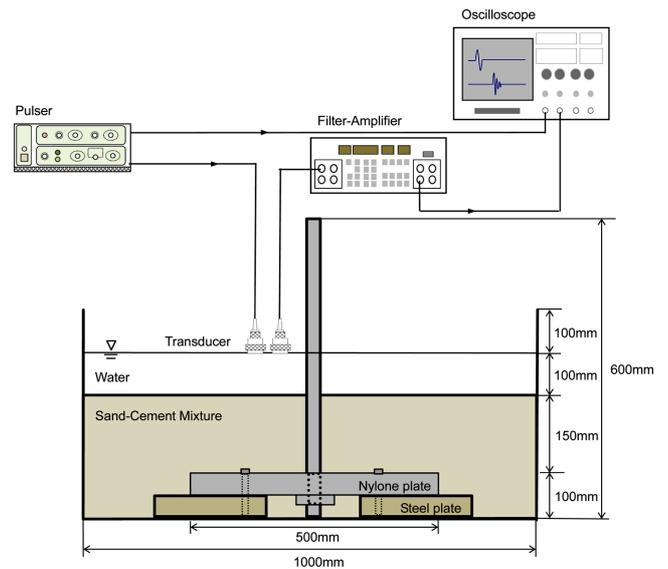


Fig. 2. P-wave scanning system

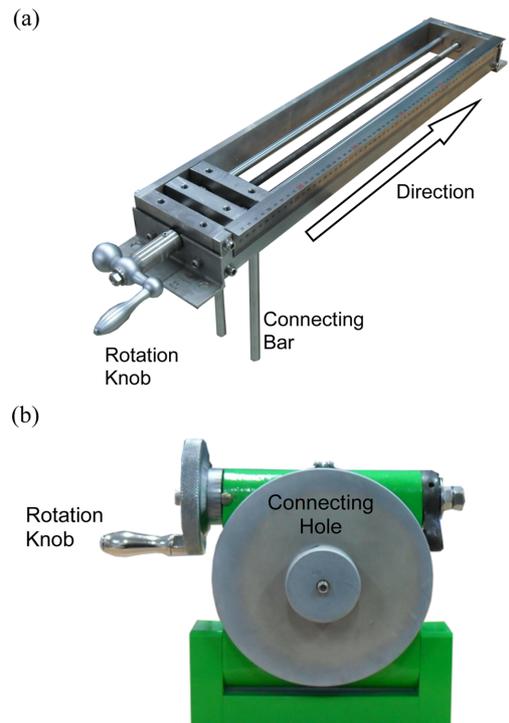


Fig. 3. Movement equipment: (a) Horizontal; (b) Rotational

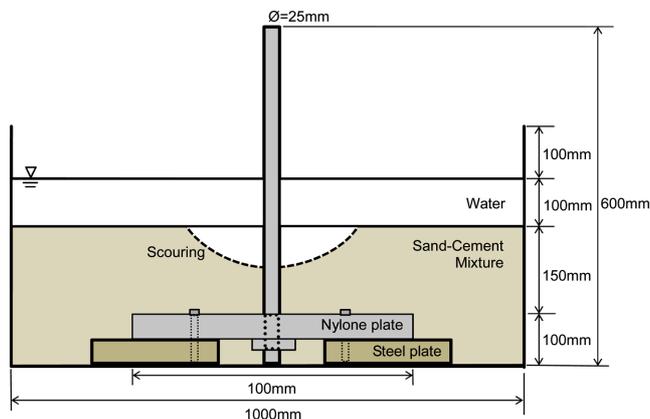


Fig. 1. Experimental setup

설계되었다. 수평이동장치는 추가적인 변위 발생을 방지하기 위해 볼트를 이용하여 수조와 고정하였다. 트랜스듀서의 회전 이동을 위한 회전이동장치는 Fig. 3(b)와 같이 제작되었다. 손잡이의 1회전당 0.5° 간격으로 일정하게 회전이동할 수 있으며, 360° 회전이 가능하도록 설계되었다.

3.3 신호처리 및 영상화

수신된 신호는 불필요한 대역대의 전기적 잡음(Noise)를 포함하고 있으며, 거리에 따른 감쇠현상과 신호의 반사각으로 인한 점진적인 진폭의 변화가 발생한다. 따라서 세굴심도와 세굴형상의 모니터링을 위해서는 효과적인 신호처리가 필수적이다. 본 연구에서는 수신단계에서 신호중첩법(Stacking)을 사용하여 1024개의 신호를 평균함으로써 잡음을 제거하였으며, 이를 통해 Fig. 4(a)와 같은 원신호(Original signal)를 획득하였다. 원신호는 시간에 따른 감쇠현상(Attenuation)으로 인하여 모니터링을 위한 영상화에 부적합하며, 이에 따라 감쇠로 인한 영향을 최소화하고, 신호의 민감도를 증가시키기 위해서는 신호의 증폭 및 보상과정이 요구된다. 신호보상은 전파시간의 증가에 따라 발생하는 감쇠효과를 고려하여 시간에 대한 함수를 원신호에 곱해주는 방법을 적용하였다(Zagzebski, 1996). 신호의 증폭 및 보상과정을 통해 Fig.

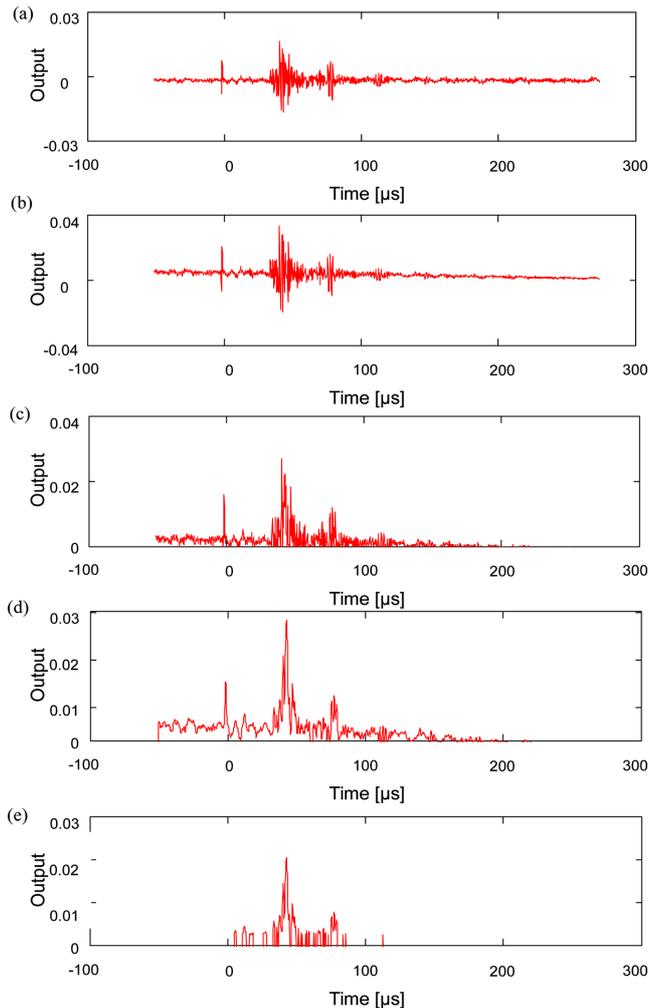


Fig. 4. Signal processing: (a) Original; (b) Compensation; (c) Rectification; (d) Moving average; (e) Rejection

4(b)과 같은 신호를 획득하였으며, 획득된 신호는 분석이 용이하도록 3가지 변환과정을 적용하였다. 신호변환과정은 신호의 크기만을 획득하는 방법인 신호정류(Rectification)와 시계열에 따른 경향성을 통해 평활화(Smoothing)하는 이동평균(Moving average), 그리고 Threshold를 기준으로 중요도가 낮은 신호를 제거하는 신호제거(Rejection)가 사용되었다(Lee et al., 2009). 신호정류와 이동평균법을 통하여 Fig. 4(c), (d)와 같은 신호를 획득하였으며, 정보의 중요도가 낮다고 판단되는 최대진폭값 대비 20% 이하의 값을 가지는 신호를 제거하여 Fig. 4(e)와 같이 나타났다.

본 연구에서는 신호처리된 신호를 영상 자료로 표현하기 위하여, Amplitude mode(A-mode)와 Brightness mode(B-mode) 두가지 영상화 방법을 적용하였다. 첫째, A-mode는 거리변화에 따라 탐측된 반사파의 진폭을 나타내는 방법으로, 거리에 따른 위상변화 모니터링에 적합하다. 둘째, B-mode는 신호의 진폭이 큰 부분을 백색으로, 작은 부분을 흑색으로 표현하여 신호의 진폭을 밝기로 변환하는 방법으로, 반사면의 형상과 위치의 모니터링에 적합하다.

3.4 실험 결과

세굴도 변화에 따른 수평이동실험에서 획득된 신호를 신호

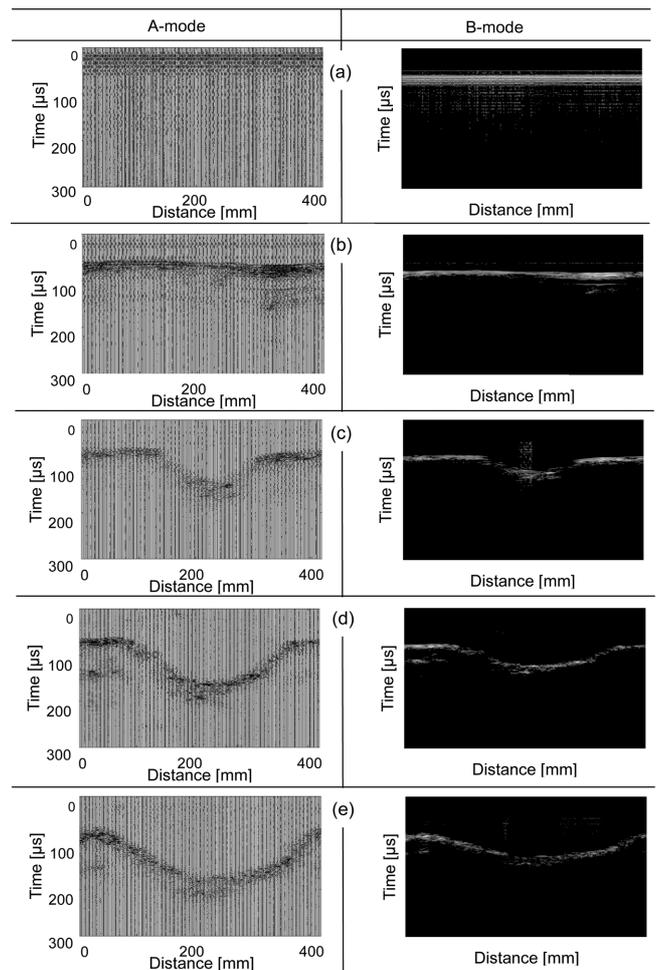


Fig. 5. P-wave horizontal scanning imaging with a variance of scour depth: (a) 0 mm; (b) 70 mm; (c) 90 mm; (d) 110 mm; (e) 130 mm

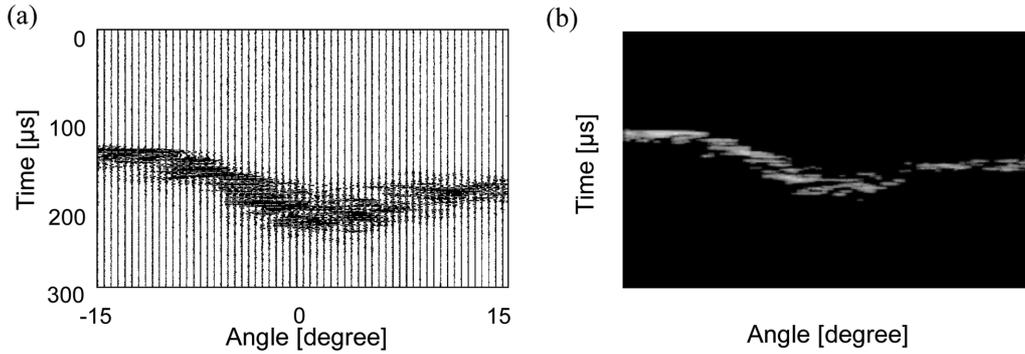


Fig. 6. P-wave rotational scanning imaging at scour depth of 130mm: (a) A-mode; (b) B-mode

처리한 후 A-mode와 B-mode를 이용하여 Fig. 5에 나타내었다. 실험결과로부터 모형지반과 물 사이의 임피던스 차이는 초음파 반사가 발생하기에 충분함을 보여주었고, 초음파 반사법을 통해 획득된 이미지는 지반시료와 물 사이의 경계를 정확하게 나타내었다. 또한, 초음파 반사 이미지는 세굴심도의 증가에 따른 세굴형상의 변화를 뚜렷하게 보여주었다. 여기서 주목해야할 점은 세굴형상이 급격하게 변화하는 구간에서는 완만한 경사구간에 비해 경계면의 선명도가 떨어지는 것이다.

세굴심도가 130 mm인 경우에 실시한 회전이동실험에서 신호처리 후 획득한 A-mode와 B-mode 이미지를 Fig. 6에 나타내었다. 실험결과로부터 회전이동장치를 이용하여 측정된 초음파 반사이미지는 수평이동장치를 이용한 이미지와 유사한 모습을 보였다. 이처럼 회전이동실험을 통해 측정된 초음파 반사이미지는 지반시료와 물 사이의 경계를 구분하였으나, 회전각이 커질수록 경계면의 선명도는 낮아지는 경향이 나타났다.

4. 고유주파수 모니터링 시스템

4.1 원리

기초구조물의 동적해석시, 고유주파수는 세굴심도의 변화에 영향받게 된다(Park et al., 2005). 이러한, 세굴도 모사실험을 위해 제작된 모형 모노파일의 고유주파수(f_r)는 다음의 식 (1)과 같이 산정할 수 있다. 해상 기초구조물에 세굴이 발생할 경우, 식 (1)에서 노출된 파일의 길이(L_p)는 변화되고, 파일의 단위길이당 질량(m_p) 및 강성(k_p)이 변화하게 된다. 즉, 세굴심도가 변화하면, 고유주파수가 변화함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 모형 모노파일의 고유주파수를 분석하여 세굴심도를 모니터링 하였다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_p}{m_p}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1.875^4 E_p I}{m(\alpha L_p)^4}} \quad (1)$$

4.2 측정시스템

본 연구에서는 Fig. 7과 같이 측정시스템을 구성하여 모형 모노파일의 고유주파수를 모니터링 하였다. 동적거동을 모니터링하기 위한 측정 센서로는 게이지 길이가 1mm인 전기저항식 변형률계(Strain gauge)를 선택하였다. 변형률계를 통해 측정된 신호는 데이터로거에 수집된 후, 수신기(Receiver)로 무선 송신되며, 수신기로 전송된 신호는 수신기와 유선으로

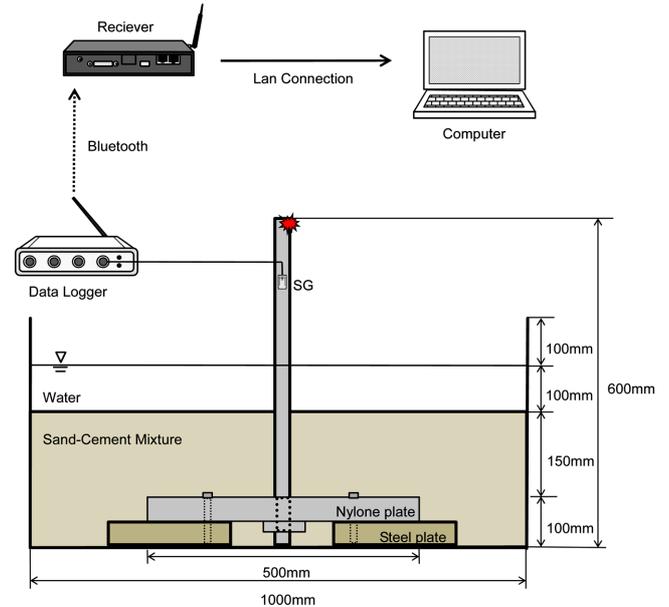


Fig. 7. Natural frequency measurement system

연결된 컴퓨터에서 저장 및 모니터링이 가능하도록 측정시스템을 구성하였다. 데이터로거를 이용하여 Low pass filtering을 1000 Hz로 설정하였으며, 샘플링속도는 데이터로거의 한계값인 100 Hz로 설정하였다.

4.3 분석 및 결과

모형 모노파일의 주파수변화를 측정하기 위하여, 충격해머를 사용하여 모노파일 상단에 가진을 수행하였다. 모노파일에 설치된 전기저항식 변형률계를 통하여 측정된 원신호는 Fig. 8과 같이 나타났으며, 모형 지반의 세굴심도가 깊어질수록 파장의 주기가 증가하는 것으로 나타났다. 세굴심도가 70 mm 이하인 경우, 모형 모노파일의 고유주파수에 비해 상대적으로 낮은 샘플링속도로 인하여 파(Wave)의 형상이 왜곡되는 현상이 나타났으며, 세굴심도가 110 mm인 경우 수신불량으로 추정되는 구간이 관찰되었다. 이와 같이, 고유주파수 산정시, 오차를 최소화하기 위하여 수신불량 구간과 형상왜곡 구간의 데이터는 제외하고, 10주기 동안의 신호를 산술평균하여 고유주파수를 산정하였다.

각 세굴심도의 성형단계별로 고유주파수를 산정할 수 있었으며, 세굴심도에 따른 모형 모노파일의 고유주파수와 고유주기 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 고유주파수와 시료의 세굴심

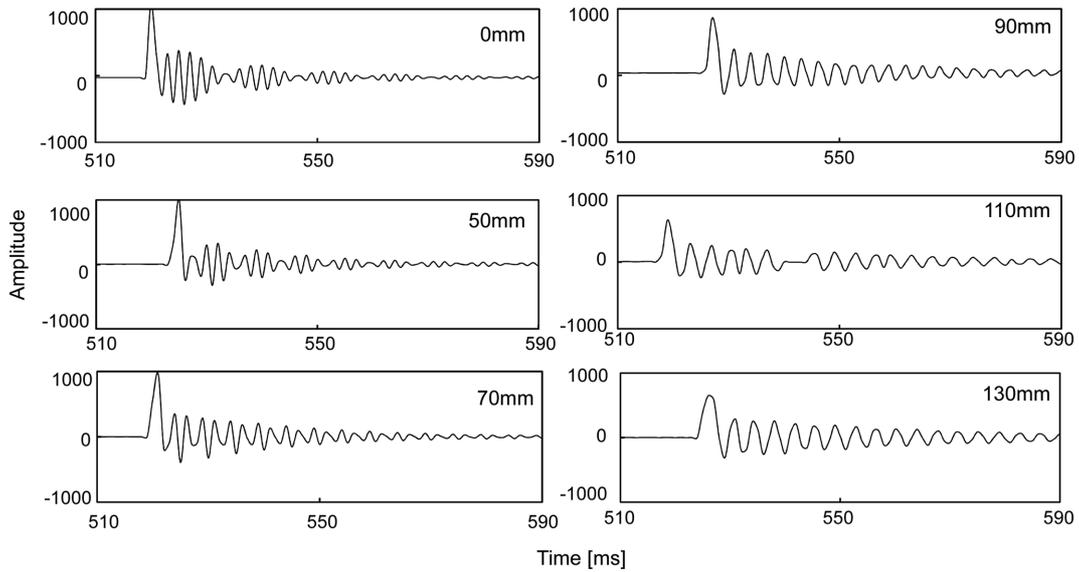


Fig. 8. Raw data with a variance of scour depth

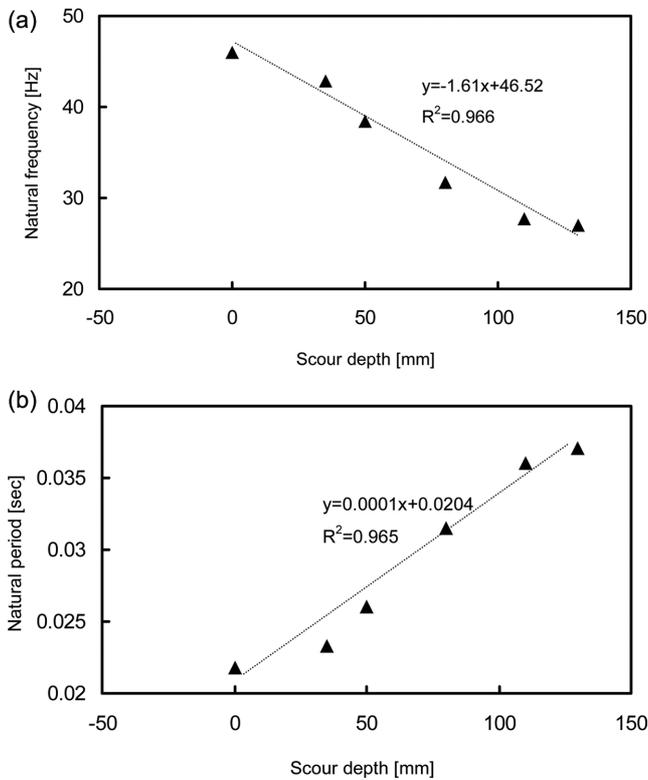


Fig. 9. Scour depth variance: (a) by natural frequency; (b) by natural period

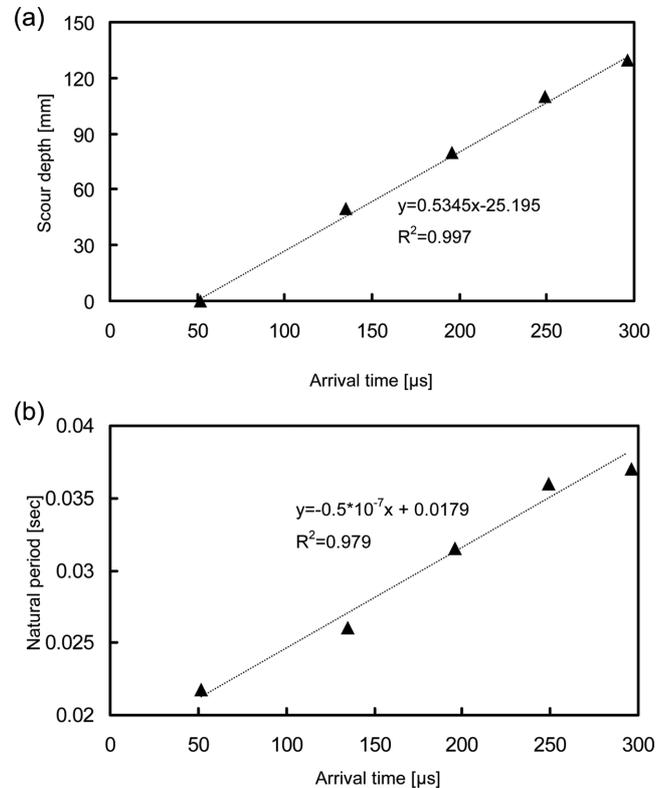


Fig. 10. Arrival time variance: (a) by scour depth change; (b) by natural frequency change

도는 선형적인 반비례 관계를 나타냈다. 이는 원기동형의 구조물은 식 (1)을 이용하여 고유주파수를 산정할 경우, 고유주파수가 파일의 길이(Lp)에 선형적으로 비례하기 때문이다.

5. 분석 및 고찰

본 연구에서는 해상기초에서 발생하는 세굴현상을 모니터링하기 위해, 초음파 트랜스듀서 및 전기저항식 변형률계를 이용하여, 세굴단면의 반사이미지와 세굴심도에 따른 고유주파수를 측정하였다. 먼저 초음파 반사이미지의 경우, 초음파

가 물과 지반의 경계면에서 반사되어 도달되는 초기시간(First arrival time)은 물의 초음파 속도(1480 m/s)를 통하여 트랜스듀서로부터 경계면까지의 거리, 즉 세굴심도로 환산할 수 있다. Fig. 10(a)는 초음파 측정구간 이내의 최대 초기도달시간 변화양상을 나타낸 것이며, 초기도달시간과 고유주파수가 선형적으로 비례함을 알 수 있다. 또한, 세굴심도별 최대 초기도달시간과 고유주파수의 변화양상을 Fig. 10(b)와 같이 나타낸 결과, 초기도달시간과 고유주파수는 선형적으로 반비례함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 모니터링 수행시 고유주파수와 초음파 측정을 통해 상호추정이 가능하며, 이를 통해

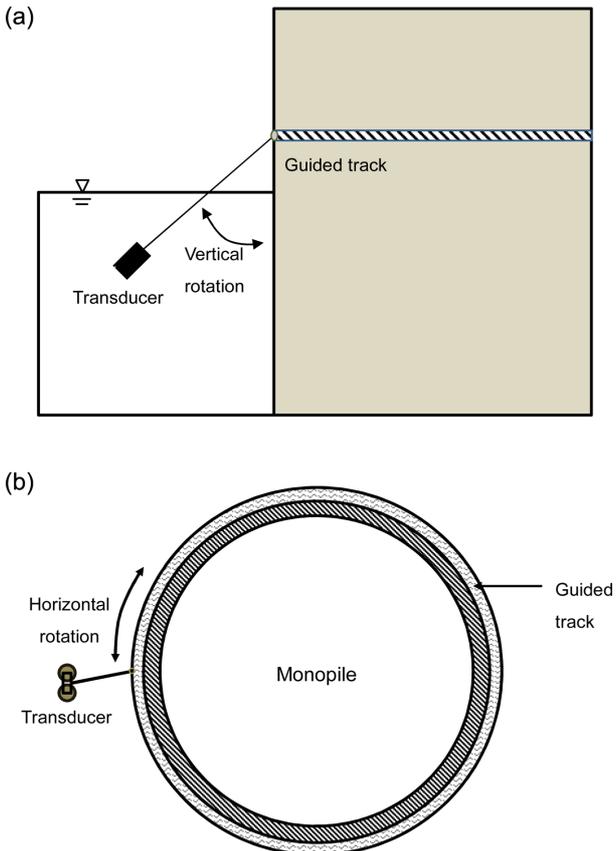


Fig. 11. Offshore scour monitoring by rotational movement system using P-wave scanning: (a) Side view; (b) Top view

신뢰도 높은 세굴심도의 평가가 가능함을 보여준다.

초음파 반사이미지를 이용하여 세굴형상 분석시, B-mode를 이용한 반사이미지는 경계면에 대하여 정확한 구분을 제시하였다. Fig. 6를 보면, 물과 지반의 경계면이 수평할 경우, 높은 해상도의 구분선이 나타났으나, 세굴이 발생하여 경계면에 경사가 발생한 경우, 구분선의 해상도가 비교적 낮은 모습이 관찰되었다. 이는 트랜스듀서를 통해 발신된 파와 경계면이 이루는 각도가 수직을 벗어나기 때문에, 경계면에서 모드변환 (Mode conversion)이 발생하고, 진폭이 감소하는 경향을 나타내는 Snell's law에 기인한다(Lee et al., 2009).

회전이동장치를 이용하여 초음파 반사이미지를 측정할 경우, 수평이동장치를 이용한 경우와 유사한 결과를 보여주었다. 이는 트랜스듀서의 크기, 지향성, Fresnell's ellipse 때문인 것으로 판단된다(Lee et al., 2009). 초음파 측정시 Fresnell's ellipse와 트랜스듀서의 크기를 고려하여 트랜스듀서의 이동간격을 설정한다면, 회전이동장치와 수평이동장치를 사용한 경우에서 동일한 세굴형상 이미지의 획득이 가능함을 보여주었다. 따라서, 해상기초에 회전이동장치를 적용할 경우, 고정된 위치에서 Fig. 11(a)와 같이 각도를 변화시킴으로써 방사방향의 세굴단면에 대한 초음파 반사이미지를 얻을 수 있다. 또한, Fig. 11(b)와 같이 트랜스듀서가 해상기초의 외벽에 설치된 선로(Guided rail)를 따라 수평회전이동(Horizontal rotation)하도록 구성이 가능하며, 이때, 외벽의 각 지점에서 측정된 세굴단면 이미지를 종합하면 3차원 해상 세굴이미지를 획득

할수 있을것으로 보인다.

초음파 트랜스듀서를 사용하여 탐측시, 반사가 일어나는 위치에 대한 불확실성이 존재하기 때문에 모노파일 주변부에 형성된 최대 세굴심도의 산정에는 어려움이 존재하였다. 고유주파수를 이용한 모니터링의 경우 모노파일 주변부의 세굴심도 변화에 대한 추정이 가능하였지만, 세굴형상의 파악에는 어려움이 있었다. 따라서, 초음파 반사법과 고유주파수 측정은 세굴도 모니터링에 있어서 상호보완적이며, 이를 통해 더 높은 수준의 신뢰도를 가진 세굴도 평가가 가능할것으로 예상된다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 해상기초구조물에 발생하는 세굴현상을 모니터링하기 위해 초음파 반사법과 고유주파수 측정법을 이용하여 실내모형실험을 수행하였다. 초음파 반사법을 이용한 모니터링은 트랜스듀서를 수평방향 이동실험과 회전방향 이동실험으로 구분하여 수행하였다. 초음파 반사법은 고해상도 스케닝 이미지의 출력이 가능하도록 고유주파수가 500 kHz인 초점방식 트랜스듀서를 사용하였으며, 고유주파수 획득을 위한 동적응답 측정은 전기저항식 변형률계를 사용하였다. 해상기초구조물을 모사하기 위하여, 모형 모노파일을 제작하였고, 세굴심도와 세굴형상을 변화시켜, 모래와 시멘트를 혼합한 모형 지반을 조성하였다. 세굴도 변화에 따른 모니터링을 통하여 얻은 초음파 반사 이미지와 반사된 초음파의 초기도달시간, 모형 모노파일의 고유주파수 변화를 관찰하였다. 본 연구를 통해 제시된 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 초점방식 트랜스듀서를 사용한 초음파 반사이미지는 세굴단면의 변화를 명확하게 보여주었다.
- 2) 현장적용을 위해 제안된 회전이동식 초음파 반사 모니터링 기법은 수평이동식 초음파 반사 모니터링과 달리 회전각도 변화와 수평회전이동(Horizontal rotation)을 통해 해상에서의 3차원적 세굴 초음파 이미지의 획득이 가능할 것으로 예상된다.
- 3) 전기저항식 변형률계로 측정된 고유주파수는 최대 세굴심도의 변화와 선형적인 반비례관계를 보여주었다.
- 4) 전기저항식 변형률계를 이용한 고유주파수 분석은 해상기초구조물에 인접한 지반의 세굴심도를 추정 가능하게 하고, 초음파 반사법을 통한 반사 이미지는 해상기초구조물 주변지반에 발생한 세굴형상에 대한 공간적인 분포를 제공한다. 고유주파수 측정 및 초음파 반사법은 세굴도 모니터링에 상호보완적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업 10기 술혁신E04 “대구경 대수심 해상기초시스템 기술 개발”과제의 지원으로 이루어진 것입니다.

References

- Ballio, F. and Radice, A. (2003) A non-touchsensor for local scour measurements, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 41, No. 1, pp. 105-108.
- Briaud, J.L., Chen, H.C., Li, Y., Nurtjahyo, P., and Wang, J. (2001) "Pier contraction scour in cohesive soils", NCHRP Report 516, pp. 10-29.
- Byun, Y.H., Truong, Q.H., Tran, M.K., and Lee, J.S. (2011) Evaluation of shear zone in direct shear test using elastic, electromagnetic waves and cone tip resistance, *Journal of KGS*, Vol. 27, No. 2, pp. 43-52.
- Choi, J.S., Yeo, W.K., and Kim, M.M. (2003) Determination of bridge scour depth considering flow conditions and bed characteristics, *Journal of KWRA*, Vol. 36, No. 6, pp. 893-899.
- Kim, S.H., Mha, H.S., and Lee, S.W. (2004) Dynamic behaviors and failure probability of bridges under combined effects of earthquake and local scour, *Journal of KSCE*, Vol. 24, No. 5A, pp. 1103-1110.
- Kim, Y.B., Yeo, W.K., and Lee, J.K. (2005) "Experimental investigation of Riverbed materials by using the characteristics of ultrasonic scour sensor", Korea Water Resources Association annual conference 2005, Korea Water Resources Association, pp. 1128-1132.
- Kwak, K.S. (2002) S-SRICOS Method : prediction of scour depth around bridge piers in cohesive soils, *Journal of KGS*, Vol. 18, No. 2, pp. 13-21.
- Lee, I.M., Truong, Q.H., Kim, D.H., and Lee, J.S. (2009) Discontinuity detection ahead of a tunnel face utilizing ultrasonic reflection : Laboratory scale application, *Journal of TUST*, Vol. 24, pp. 155-163.
- Lee, J.S. and Santamarina, J.C. (2005) P-wave reflection imaging, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 28, No. 2, pp. 197-206.
- Lee, Y.K. and Kim, J.C. (2005) Experimental study on the scour of Bridge under marine condition, *Journal of KGES*, Vol. 6, No. 3, pp. 35-44.
- Louwersheimer, W.F., Verhagen, H.J., and Olthof, J. (2007) "Scour around an offshore wind turbine", Delft University of Technology, Delft.
- Lin, Y.B., Lai, J.S., Chang, K.C., and Li, L.S. (2006) "Flood scour monitoring system using fiber bragg grating sensors", *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, pp. 1950-1959.
- Park, B.C., Oh, K.H., and Park, S.B. (2005) Integrity assessment of spread footing piers for scour using natural frequency, *Journal of KOSHAM*, Vol. 5, No. 2, pp. 29-35.
- Richart, F.E., Hall, J.R. and Woods, R.D. (1970) "Vibration of soils and foundation", Prentice-Hall, USA.
- Truong, Q.H., Lee, C., Cho, G.C., and Lee, J.S. (2010) Geophysical monitoring techniques for underwater landslide in 1g models, *Journal of JEEG*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-19.
- Whitehouse, R., Harris, J., Sutherland, J., and Rees, J. (2008) "An assessment of field data for scour at offshore wind turbine foundations", 4th International Conference on Scour and Erosion in Tokyo on November 2008, HR Wallingford, pp. 1-8.
- Yeo, W.K., Lee, H., Kim, J.H., and Kwak, M.S. (2006) "An interdisciplinary study on the scour depth estimation of Incheon Bridge", Korea Water Resources Association annual conference 2005, Korea Water Resources Association, pp. 562-566.
- Yu, C. and Chang, P.W. (2001) Influence of mixing conditions on the strength of solidatified sandy soils with cement, *Journal of KSAE*, Vol. 43, No. 6, pp. 135-142.
- Zagzebski, J.A. (1996) *Essentials of Ultrasound Physics*, Mosby Inc., Missouri.
- Zhou, Z., Huang, M., Huang, L., Ou, J., and Chen, Genda (2011) "An optical fiber grating sensing system for scour monitoring", *Advances in Structure Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 67-78.

© Received February 7, 2013

© Revised February 13, 2013

© Accepted March 18, 2013