

전기비저항과 전단파 토모그래피를 이용한 해상 기초구조물의 세굴도 평가

Scour Monitoring for Offshore Foundation using Electrical Resistivity and Shear Wave Tomography

박기원¹⁾ · 이종섭¹⁾ · 최창호²⁾ · 변용훈[†]

Kiwon Park · Jongsub Lee · Changho Choi · Yonghoon Byun

Received: June 12th, 2014; Revised: July 4th, 2014; Accepted: August 7th, 2014

ABSTRACT : An embedded length of monopile caused by a scouring should be evaluated to monitor the stability of offshore foundations, because offshore foundations are affected by horizontal load. The objective of this study is to evaluate the scouring around offshore foundation by using electrical resistivity and to estimate ground stiffness by using shear wave tomography. The electrical resistivity profiles and shear wave tomography were measured according to the scour depth of model ground prepared with sand and cement. Several electrodes and bender elements were used to measure the electrical resistivity and shear waves, respectively. The electrode sets are attached on the monopile surface and bender elements are arranged in 7×7 arrays by using nylon frames. The electrical resistivity profiles and shear wave tomography are acquired by laboratory experiment. Maximum scour depth was estimated by electrical resistivity profiles and the ground stiffness of model ground was estimated by shear wave tomography. This study suggests that the electrical resistivity profiles and shear wave tomography may be useful for monitoring the stability of the offshore foundations.

Keywords : Electrical resistivity, Monitoring, Monopile, Scour, Shear wave tomography

요지 : 해상 기초구조물은 수평하중에 지배적인 영향을 받으며, 세굴 발생으로 인한 모노파일의 근입깊이 및 지반강성의 감소는 구조물의 안정성을 저하시키게 된다. 본 연구의 목적은 전기비저항 모니터링 기법을 이용하여 기초구조물의 연직 세굴심도를 평가하고, 전단파 토모그래피를 통해 지반강성의 공간적 분포 및 변화양상을 파악하는 것이다. 해상 기초구조물에서의 세굴현상을 모사하기 위하여 하단이 고정된 모형 모노파일을 중앙에 위치시킨 후 모래 및 시멘트를 이용하여 모형 지반을 조성하였다. 전기비저항을 측정하기 위하여 모형 모노파일에 수평 및 수직배열로 구분하여 전극쌍을 설치하였으며, 전단파 측정을 위해서 사각형 프레임에 벤더 엘리먼트를 7×7 로 배열하였다. 세굴도 변화에 따라 위치별 전기비저항과 전단파 토모그래피 이미지를 측정하였다. 실내실험을 통해 세굴도 변화에 따른 위치별 전기비저항 변화와 전단파 토모그래피를 관찰하였고, 각 단계별 지반 변화양상을 파악하였다. 위치별 전기비저항의 변화를 통해 최대세굴심도 평가가 가능했으며, 전단파 토모그래피를 통해 세굴로 인한 지반의 전단강성 변화를 추정할 수 있었다. 본 논문에서 제시한 전기비저항과 전단파 토모그래피는 세굴현상으로 인한 해상 기초구조물 주변의 지반특성을 모니터링하기 위한 매우 효과적인 방법이 될 수 있음을 보여준다.

주요어 : 전기비저항, 모니터링, 모노파일, 세굴, 전단파 토모그래피

1. 서론

육상에 시공되는 기초구조물의 경우, 주로 상부구조물에서 전달된 연직하중을 지반에 전달하는 역할을 수행한다. 반면에 해상 기초구조물의 경우, 상부구조물로 인한 연직하중보다는 풍하중 및 파랑하중과 같은 수평방향 하중에 지배적으로 영향받게 된다. 해상 기초구조물의 한 종류인 모노파일은 수평하중에 대하여 해저지반에 근입된 말뚝의 주변을 통해 저항한다. 따라서 해저지반에 근입된 모노파일의 깊이와 주변부 지반강성은 해상구조물의 안정성에 중요한

요소가 된다.

기초구조물 주변부에서 유수로 인한 침식작용이 지반의 저항을 초과하게 되면 국부적으로 지반이 소실되는 세굴현상이 발생한다. 이러한 세굴현상은 기초의 근입깊이를 감소시키며, 결과적으로 기초의 전도나 국부적인 손상을 초래할 수 있다. 이에 따라 세굴현상으로 인한 지반손실의 영향을 평가할 수 있는 실험적 방법에 대하여 연구가 이루어져 왔다(Choi et al., 2003; Yeo et al., 2006; Park et al., 2013). 수심이 비교적 얇은 하천의 경우, Flex 센서와 FBG 센서를 이용하여 직접적으로 지반변위를 측정할 수 있으며, GPR

1) School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

2) Korea Institute of Construction Technology

† School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University (Corresponding Author : asan1103@korea.ac.kr)

(Grounding Penetrating Rader)과 같은 물리탐사기법을 이용하여 세굴도를 평가해 왔다(Ballio & Radice, 2003; Lin et al., 2006; Zhou et al., 2011). 한편 해상의 경우 수심이 깊기 때문에 직접적인 지반변위의 측정이 어려우며, 제한된 물리탐사기법 적용에 대한 연구가 있어 왔다.

세굴현상은 지질학적 및 수리학적 특성뿐만 아니라, 기상의 영향을 받아 시간에 따라 변화하게 된다. 그러나 기존의 물리탐사기법을 이용한 세굴 모니터링은 현장 접근성 및 경제성으로 인해 연속적인 측정에 어려움이 있어 왔다. 이에 따라 접근성이 떨어지는 해상풍력 기초구조물의 안정성을 평가하기 위하여 연속적인 세굴도 측정이 가능한 모니터링 기법이 필요한 실정이다. 추가로 수평하중을 받는 해상 기초구조물의 안정성 평가에 중요한 지반강성의 공간적 분포 및 변화양상에 대한 평가도 요구된다.

본 연구에서는 해상 기초구조물 주변에 발생하는 세굴현상을 모니터링하기 위하여 전기비저항을 이용하였으며, 세굴로 인한 지반강성의 공간적 분포 및 변화양상을 파악하기 위하여 전단파 토모그래피를 활용하였다. 본 논문에서는 먼저 세굴현상을 모사하기 위해 조성된 모형 모노파일 및 모형 지반에 대해 설명한 후, 각각 기법에 따른 실내실험 방법 및 결과에 대해 기술하였다.

2. 실내 모형 실험

본 연구에서는 해저지반에 근입된 모노파일과 주변지반에서 발생하는 세굴현상을 모사하기 위하여 모형 모노파일을 제작하고 모형 지반을 조성하였다.

2.1 모형 모노파일

모형 모노파일은 Fig. 1과 같이 해저지반에 근입된 상태의 기초구조물을 모사하기 위하여, 직경 및 높이가 각각

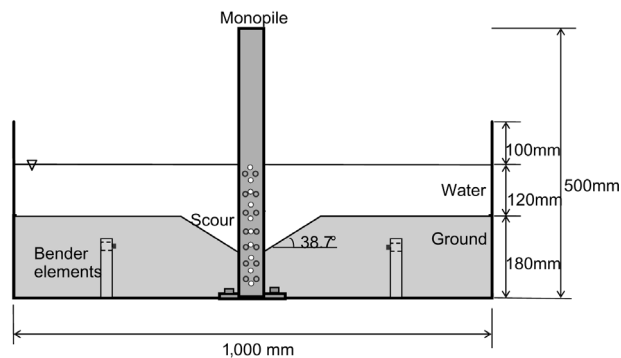


Fig. 1. Schematic drawing of model monopile and ground prepared in water tank

1,000 mm 및 400 mm인 수조에 완전고정하여 설치하였다. 모형 모노파일은 한 변이 50 mm인 사각기둥 형태로 제작되었으며, 파일에 인접한 영역의 전기저항을 측정하기 위하여 스테인레스 스틸재질의 직경 3 mm, 길이 10 mm인 원통형 전극을 설치하였다. 전극의 배열은 방향성에 따른 모니터링 적합도를 파악하기 위하여 수평배열과 수직배열로 구분하여 모형 모노파일 반대편 주변에 각각 설치하였으며, 이를 통해 전기저항 측정 시 전극간의 발생할 수 있는 전기적인 영향을 최소화하였다. Fig. 2를 보면, 수평배열의 경우 7쌍의 전극을 40 mm 간격으로 설치하였으며, 수직배열의 경우 10개의 전극을 30 mm 간격으로 설치하여, 인접한 두 개의 전극으로 전기저항을 측정하도록 구성하였다. 전극이 모형 모노파일 주변으로 돌출되지 않도록 전극의 표면과 모노파일 주변이 한 평면상에 위치하도록 전극을 설치하였다. 또한 전극과 모형 모노파일의 사이에 물의 침투를 막기 위하여 비전도체인 에폭시를 사용하여 고정하였다. 한편 해저압반에 모노파일이 완전고정된 상태를 모사하기 위하여, 모형 모노파일은 볼트로 바닥 판에 결합되었다.

2.2 모형 지반

모노파일이 근입된 해저지반을 모사하기 위하여, 모래 및 시멘트를 사용하여 모형 지반을 조성하였다. 모래는 40번체와 50번체 사이에 잔류하는 평균입경(D_{50})이 0.36 mm

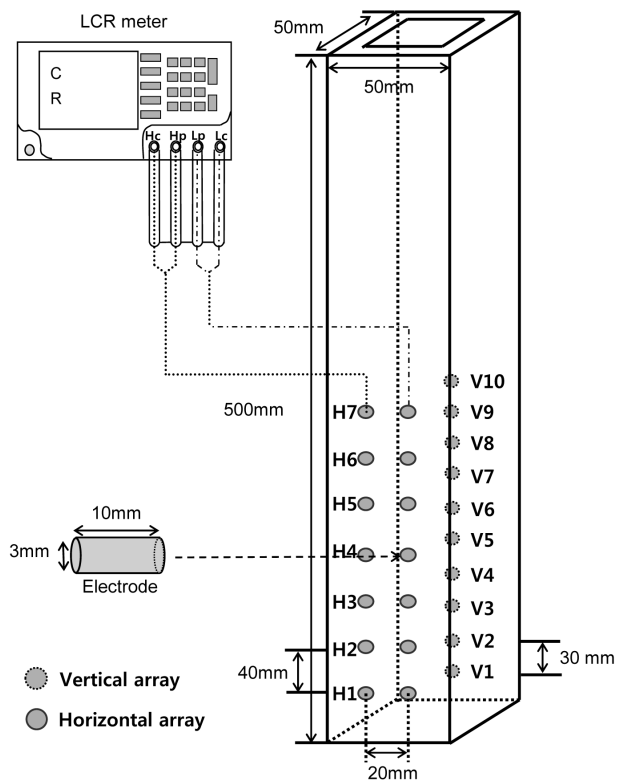


Fig. 2. Monitoring system for measurement of electrical resistivity

인 주문진 표준사를 사용하였으며, 시멘트는 1종 포틀랜드 시멘트를 이용하였다. 모형 지반은 모래와 시멘트를 중량비 10:1로 혼합한 후, 하부판으로부터 높이 180 mm까지 조성하였다. 해상조건을 모사하기 위하여, 모형 지반은 수면으로부터 시료 상부까지 깊이 120 mm가 되도록 수침시켰다. 세굴심도(S)는 0, 50, 70, 100 mm의 4단계로 변화시켰으며, 이때 세굴단면은 Fig. 1과 같이 원추형을 유지하여 세굴심도-세굴직경 비(S/D)가 0.4가 되도록 하였다.

3. 전기비저항을 이용한 세굴 모니터링

전기비저항은 전기전도도의 역수이며, 일반적으로 포화된 흙의 전기전도도는 간극물과 간극을 채우고 있는 전해질 용액의 전기전도도에 의해 결정된다. 본 연구에서는 흙과 간극수의 전기비저항 간의 차이에 근간하여 전기비저항 탐사기법을 해상세굴 모니터링에 적용하고자 하였다.

3.1 전기회로 구성

세굴심도의 변화에 따른 위치별 전기비저항을 측정하기 위하여, 모형 모노파일에 수평 및 수직배열에 따라 전극을 설치하였다. 모형 모노파일에 설치된 전극은 Fig. 2와 같이 2개 전극을 한 쌍으로 구성하여, High current(H_c) 및 High potential(H_p) 단자와 Low current(L_c) 및 Low potential(L_p) 단자에 각각 연결하였다. 두 전극 사이에 분포하는 흙의 전기저항(R)은 전위차(V) 및 전류(I)를 측정하여 Ohm's law(R=V/I)를 통해 산정된다. 각 전극에 연결된 전선은 동축전선을 사용함으로써 전선간 전자기장의 형성을 최소화하였다. 모형 모노파일 주변부의 세굴 발생에 따른 전기저항의 측정을 위하여 Fig. 2와 같이 LCR meter(Intec LCR-819)를 사용하였다.

3.2 사용주파수 선정

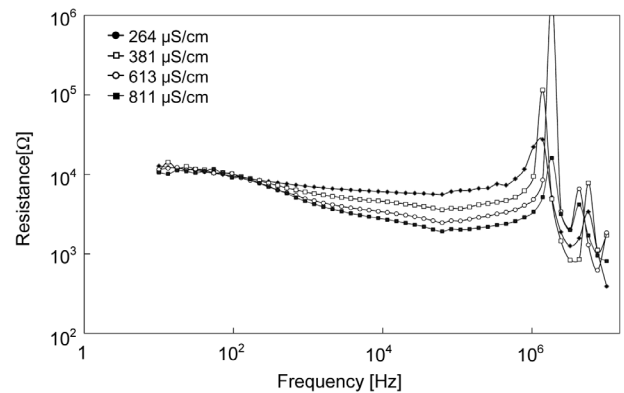
전기저항은 측정장비의 사용주파수에 따라 변화하게 된다. 이에 따라 지반의 전기저항 측정 시 안정적인 전기저항 획득을 위하여 공명현상이 발생하지 않는 범위의 사용주파수를 선택해야 한다(Lee & Santamarina, 2007; Kim et al., 2009; Kim et al., 2011). 본 연구에서는 사용주파수의 선정을 위하여 임피던스 분석기(HP 4192A, Input Voltage : 1V)를 사용하여 1 Hz~13 MHz 범위에서의 주파수 연속측정(Frequency sweeping)을 수행하였다. 또한 전기전도도의 변화에 따른 안정적인 주파수 범위의 확인을 위하여 264 μS/cm, 381 μS/cm, 613 μS/cm, 811 μS/cm의 농도의 소금물용액에서 주파수 연속측정을 수행하였다. 4가지 농도에서의 수평

배열과 수직배열의 전기저항 주파수 연속측정 결과를 Fig. 3에 정리하여 나타냈다. 두 가지 배열방식의 경우 모두 1 kHz 이하에서는 농도변화에 따른 전기저항의 구별이 어려움이 있으며, 1 MHz 대역에서는 주파수가 급격히 증가하는 공명현상이 발생하였다. 따라서 수평배열과 수직배열의 주파수 연속측정 결과와 LCR meter의 허용주파수 대역(1 Hz~100 kHz)을 고려하여, 안정적인 사용주파수는 10 kHz로 결정되었다.

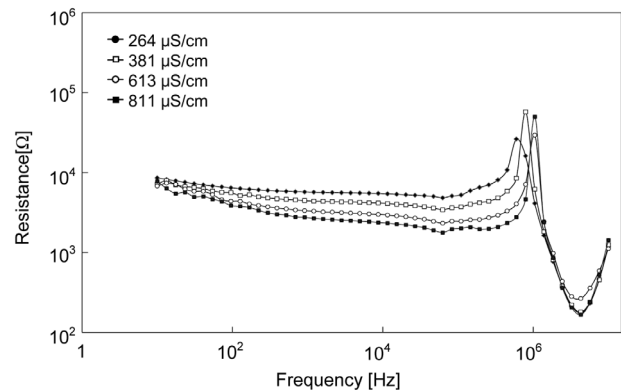
3.3 전기저항 - 전기비저항 보정

전기저항은 대상체 고유의 특성뿐만 아니라 전극의 재질 및 형상, 그리고 연결방식의 영향을 받기 때문에 지반의 특성을 얻기 위하여 측정된 전기저항을 고유의 전기비저항으로 환산하는 과정이 필수적이다. 본 연구에서는 전기저항을 전기비저항으로 환산하는 방법으로 농도에 따른 보정방법을 사용하였다(Kim et al., 2009). 전극쌍은 각각의 위치와 배열마다 Eq. (1)과 같이 전기저항과 전기비저항 사이의 선형적 관계로 나타낼 수 있다(Yoon et al., 2011).

$$\rho[\Omega \cdot m] = \beta \cdot R[\Omega] \quad (1)$$



(a) Vertical array



(b) Horizontal array

Fig. 3. Frequency sweeping

여기서 β 는 전극의 형상계수를 의미하며, R은 전기저항을 ρ 는 전기비저항을 나타낸다. 전기비저항은 동일한 용액의 전기전도도를 Conductivity meter로 측정된 후, 전기비저항과 전기전도도의 역수관계를 이용하여 산정하였으며, 수평배열과 수직배열의 전극쌍 중 최하부에 위치한 전극쌍의 전기저항-전기비저항 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 전기저항-전기비저항 관계는 모든 전극쌍에서 Fig. 4와 같이 선형 비례관계로 나타났으며, 실험을 통해 얻은 각 전극별 전기저항-전기비저항 관계의 형상계수는 Table 1과 Table 2에 정리하였다.

3.4 실험 결과

본 연구에서는 세굴심도를 0, 50, 70, 100 mm로 변화시켜 위치별 전기저항을 측정하였다. 측정된 전기저항은 각각

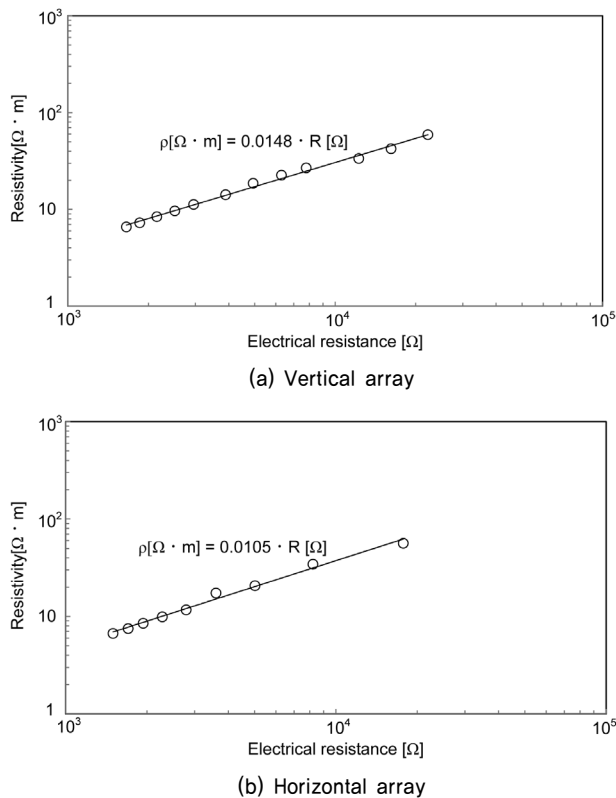


Fig. 4. Correlation between electrical resistance and electrical resistivity

Table 1. β value in vertical array

Position	V1-V2	V2-V3	V3-V4	V4-V5	V5-V6	V6-V7	V7-V8	V8-V9	V9-V10
β [m]	0.0148	0.016	0.010	0.011	0.017	0.011	0.019	0.019	0.015

Table 2. β value in horizontal array

Position	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
β [m]	0.0105	0.0158	0.9962	0.9922	0.0108	0.0078	0.0047

의 전극쌍에 따라 기존의 수립된 전기저항-전기비저항 관계를 이용하여 전기비저항을 산정하였으며, 세굴도 변화에 따른 위치별 전기비저항은 Fig. 5와 같이 나타났다. 세굴도가 0 mm인 경우, 수직배열에서는 V5와 V6 사이에서 지표면이 존재할 것으로 추정되었으며, 수평배열에서는 H4와 H5 사이에 지표면이 존재할 것으로 추정되었다. 세굴도가 100 mm인 경우, 수직배열에서는 V2와 V3 사이에 세굴면이 존재할 것으로 추정되며, 수평배열에서는 H2와 H3 사이에 세굴면이 존재할 것으로 추정되었다.

4. 전단파 토모그래피를 이용한 지반강성 평가

토모그래피는 특정 대상체의 특성의 공간적 분포를 평가하기 위하여, 경계영역 내에서 획득된 자료를 수학적으로 분석하는 기법으로써, 토모그래피 이미지를 통해 미지의 영역에 대한 공간적 특성을 표현할 수 있다(Santamarina & Fratta, 1998; Lee et al., 2005; Truong et al., 2010). 본 연구에서는 대상체의 전단파 속도를 분석한 후, 획득된 전단파 토모그래피 이미지를 이용하여 모형 지반에서의 강성분포를 추정하고자 하였다.

4.1 전단파 트랜스듀서 및 측정시스템

본 연구에서는 전단파를 발신 및 수신할 수 있는 트랜스듀서로써 벤더 엘리먼트를 사용하였다. 벤더 엘리먼트는 길이 및 너비가 10 mm 및 6 mm로 제작하였으며, 전기적인 보호를 위해 전도 페인트로 코팅한 후, 방수를 위해 에폭시로 코팅하였다. 벤더 엘리먼트의 위치를 고정시키기 위하여, Fig. 6과 같이 길이, 두께, 높이가 각각 300 mm × 10 mm × 30 mm인 사각형 프레임 사용하였다. 각 변에는 7개의 벤더 엘리먼트가 설치되도록 구성하였으며, 중복된 정보를 피하고 픽셀에서 요구되는 해상도를 만족시키기 위하여 벤더 엘리먼트 상이의 중심간격은 45 mm가 되도록 배열하였다. 앞 장의 전기비저항 측정 시, 전기적인 영향을 최

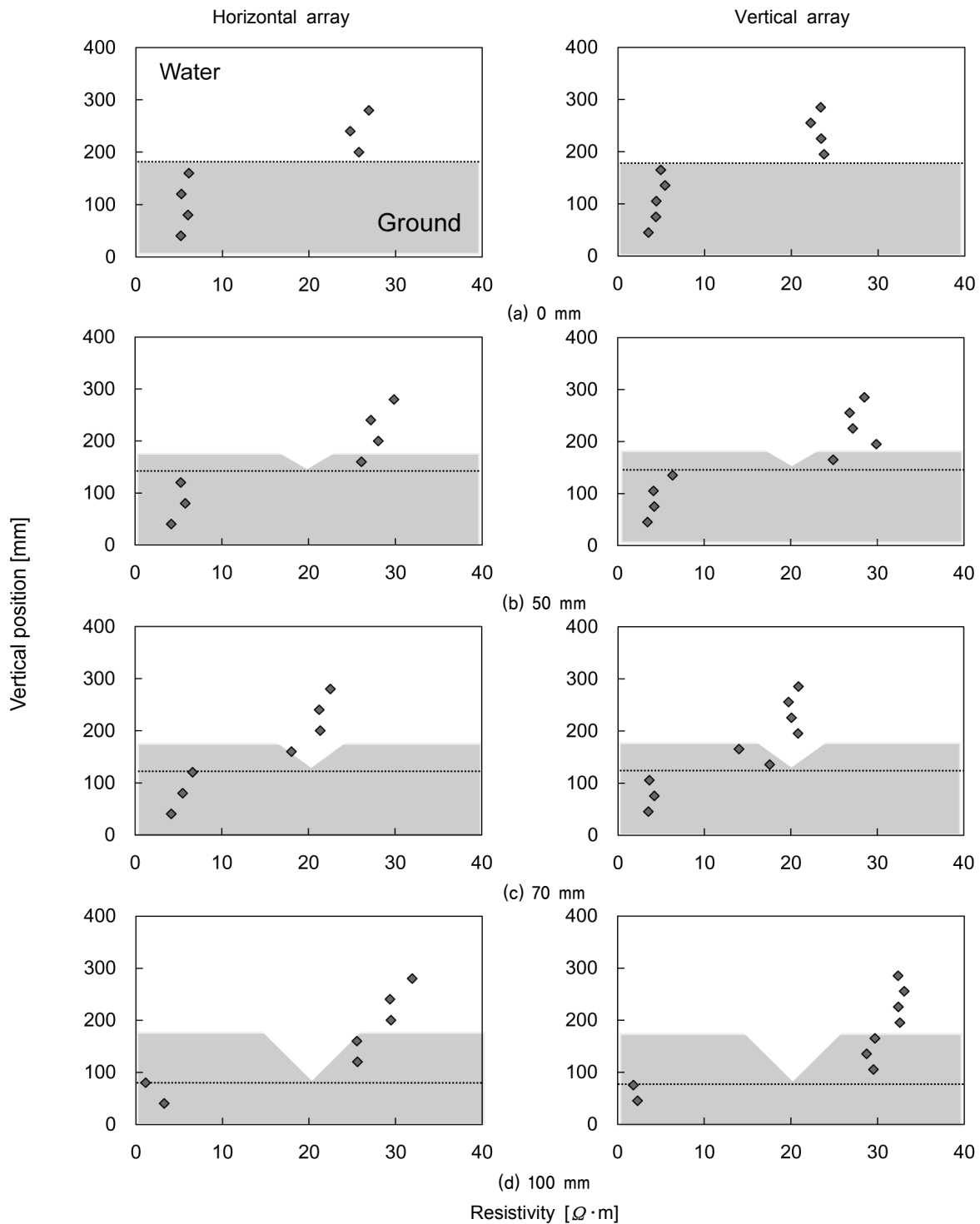


Fig. 5. Electrical resistivity measured according to scour depth

소화하기 위하여 프레임은 MC나일론 재질로 제작되었다. 또한 프레임의 위치이동을 억제하기 위하여 바닥 판에 볼트를 이용하여 고정시켰다.

본 연구에서 전단파 토모그래피 이미지를 얻기 위해 사용된 전단파 측정 시스템은 Fig. 6과 같이 신호발생기(Agilent 3320A), 필터 및 증폭기(Krohn-Hite 3945), 오실로스코프(Agilent 54624A)로 구성하였다. 전단파 측정 시 입력파는

신호발생기에서 단일 정현파를 선택하였으며, 정현파는 모형 지반의 공진주파수를 고려하여 1~2 kHz의 주기를 갖도록 설정하였다(Lee & Santamarina., 2005). 또한 전단파를 안정적으로 획득하고 잡음을 제거하기 위하여, 필터 및 증폭기에서 주파수가 100 Hz 이하 또는 측정주파수의 10배 이상의 주파수를 갖는 신호는 필터링하였으며, 1,024개의 신호를 중첩하였다.

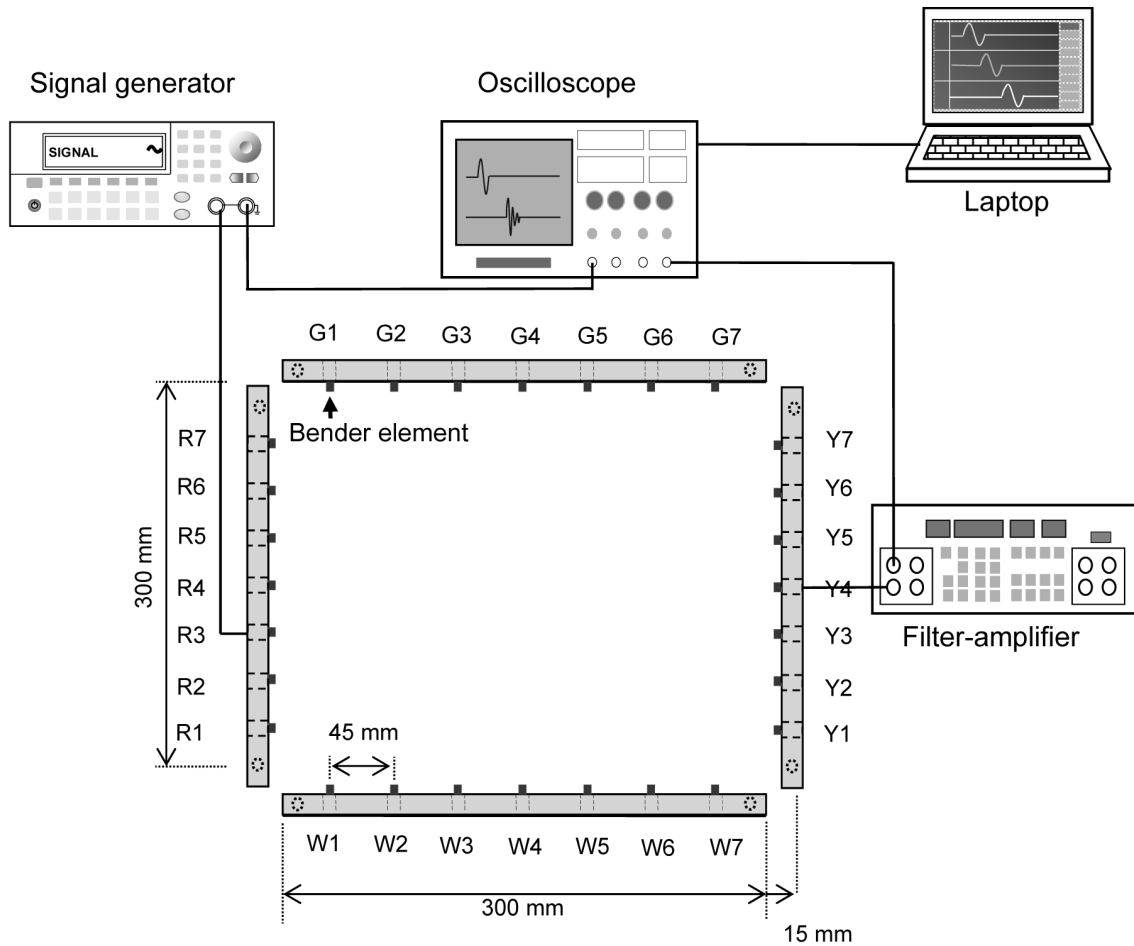


Fig. 6. Frame mounted with transducers and measurement system for shear wave tomography

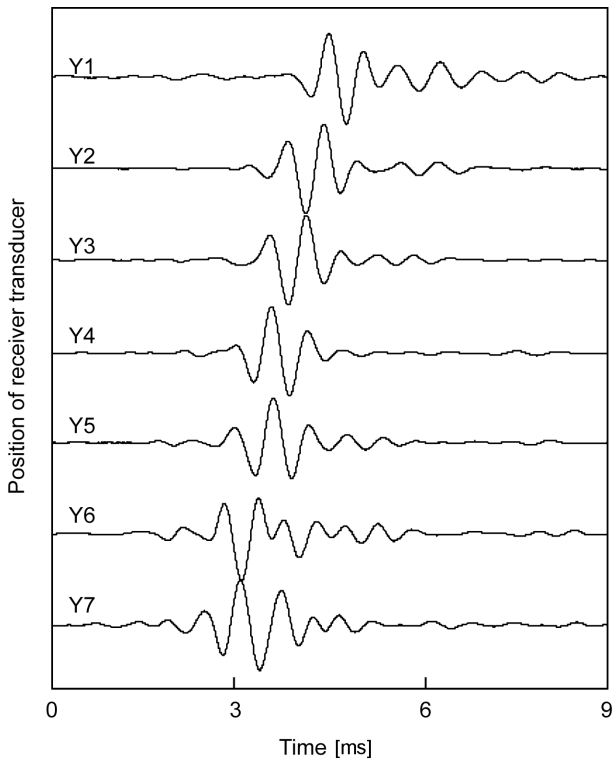


Fig. 7. Example of shear wave signals measured

4.2 신호 처리

본 연구에서는 모형 지반의 세굴 발생 전(0 mm)과 발생 후(100 mm)인 경우에 모형 모노파일 주변부의 전단파 신호를 획득하여 세굴 발생에 따른 지반강성의 공간적 분포 및 변화양상을 관찰하였다. 먼저 모형 지반에서 전단파 측정결과 프레임의 한 변에 설치된 벤더 엘리먼트의 위치에 따른 전단파의 변화양상은 Fig. 7과 같이 나타났다. 전단파의 파형분석을 통해서 각각의 초기도달시간을 얻은 후, 송수신 벤더 엘리먼트간의 직선거리를 계산하여 전단파 속도를 산정할 수 있다.

토모그래피 분석 시 각각의 위치에서 측정된 데이터는 중첩되는 정보를 포함하게 되며, 이러한 중첩되는 정보의 공간적인 분석을 통하여 픽셀로 대변되는 영역에 대한 대표값을 추정할 수 있다. 전단파 토모그래피 분석 시 특정 픽셀을 지나는 전단파의 초기도달시간에 대한 정보의 수는 각 영역마다 동일하지 않게 된다. 본 연구에서는 Truong et al. (2010)에 의해 제안된 토모그래피 분석방법을 사용하여, 각 영역마다 동일하지 않은 정보를 보완하여 이미지화하였다.

세굴 발생 전과 세굴 발생 후에 측정된 데이터의 공간적 분포(Spatial coverage)와 특이치(Singular value)는 Fig. 8과 같이 나타났다.

4.3 실험 결과

세굴 발생 전과 후의 초기 추정값과 정규화된 최소자승해(Regularized least-square solution)로 산정된 토모그래피

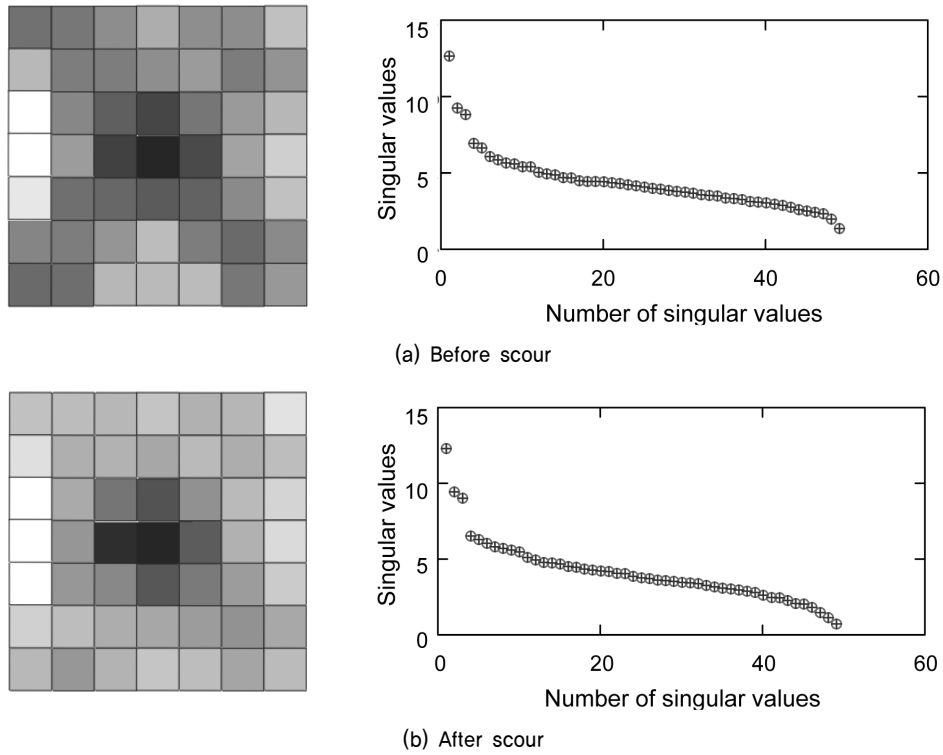


Fig. 8. Tomography – spatial coverage and singular value

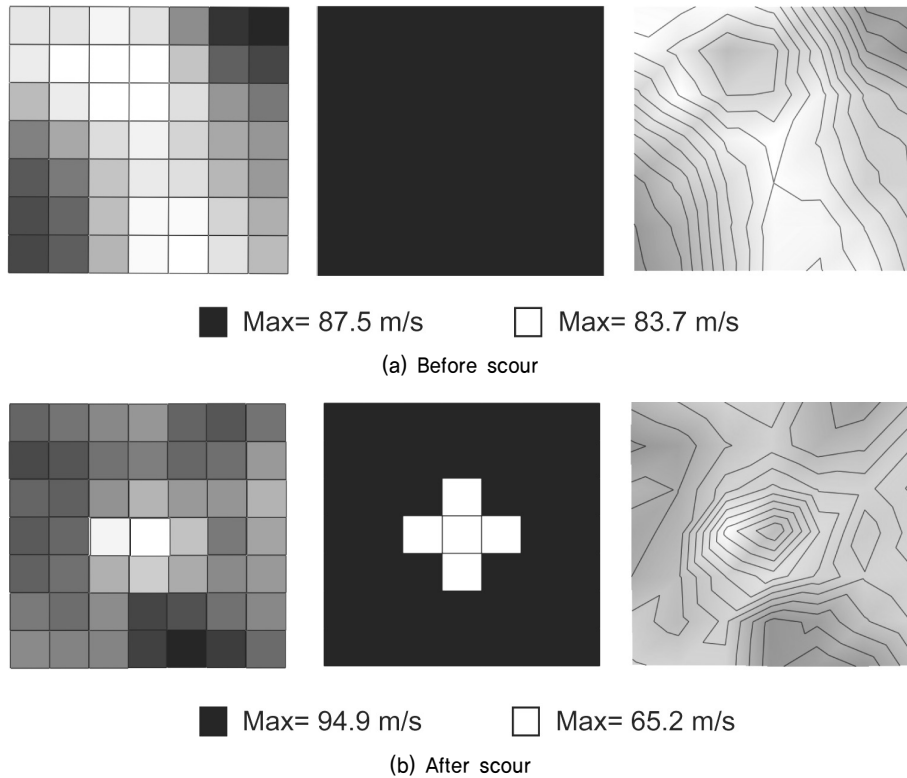


Fig. 9. Tomographic image obtained from the regularized least square solution with initial guess for crosshole and full illumination

이미지를 Fig. 9에 나타내었다. 초기 추정값은 퍼지해(Fuzzy logic solution)에 기초하였으며, 토모그래피 이미지는 세굴 현상에 따른 전단파 속도의 차이를 시각적으로 명확히 대조하기 위해 경계값을 이용하여 나타내었다. 또한 등고선을 이용하여 모형 지반에서의 전단파 속도의 점진적 변화를 시각화하였다. 분석 결과, 세굴 발생 전의 지반 상태를 나타내는 Fig. 9(a)에서는 전단파 속도가 대상 평면 내에서 85.4 m/s의 평균값을 보였으며, 최대값 및 최소값이 각각 87.5 m/s와 83.7 m/s로 나타났다. 반면 세굴 발생 후의 지반상태를 나타내는 Fig. 9(b)에서는 세굴이 발생함에 따라 대상 평면 내에서 전단파 속도의 평균값은 81.8 m/s로 감소하였으며, 최대값 및 최소값이 각각 94.9 m/s와 65.2 m/s로 나타났다.

5. 토 의

본 연구에서는 모형 모노파일의 주변에 설치된 한 쌍의 전극을 이용함으로써 국부적인 전기비저항의 측정을 통하여 세굴심도를 추정하고자 하였다. 최대 세굴심도가 0 mm인 경우, 수직배열에서는 전극 V6가 설치된 높이 180 mm를 기준으로 V5-V6와 V6-V7의 전극쌍에서 측정된 전기비저항의 차이가 크게 나타남을 보여주었다. 이는 실제 모형 지반이 높이 180 mm로 조성된 것을 감안하면, 전기비저항으로 추정된 세굴심도의 신뢰성이 높은 것으로 판단된다. 또한 수평배열에서는 H4의 전극쌍과 H5의 전극쌍에서 측정된 전기비저항의 차이가 크게 나타났으며, H4와 H5의 중간지점이 높이 180 mm인 것으로 볼 때, 세굴심도 추정 시 배열방식에 따른 차이는 크게 나타나지 않았다. 이와 같은 결과는 최대 세굴심도와 상관없이 동일한 경향을 보여주었다. 여기서 주목해야 할 것은 최대 세굴심도가 증가함에 따라 세굴형상의 반경도 동시에 증가하여, 모형 지반과 물 사이의 전기비저항의 차이가 더욱 분명해지는 점이다. 전기비저항 탐사기법을 현장에 적용할 경우, 모노파일에 설치되는 전극의 간격에 따라 세굴심도를 추정할 수 있는 분해능을 향상시킬 것으로 판단된다.

전단파의 이동 경로에 따라 선으로 표현된 전단파 속도는 초기 추정값을 이용한 정규화된 최소자승법을 적용하여 픽셀기반의 토모그래피 이미지로 변환하였다. 분석결과, 대상 평면 내에서 전단파 속도의 평균값은 세굴 발생 전 85.4 m/s에서 세굴 발생 후 81.8 m/s로 감소하였으며, 전단파 속도의 최대값과 최소값의 차이는 세굴 발생 전 3.8 m/s에서 세굴 발생 후 29.7 m/s로 크게 증가하였다. 이는 세굴 발생으로 모노파일 주변의 지반강성이 전체적으로 감소할 뿐만 아니라, 모노파일에 근접한 영역에서 지반강성의 감소량이

크게 발생했음을 알 수 있다. 전단파 토모그래피 기법의 경우 다량의 트랜스듀서 적용이 가능하다면 모노파일 주변의 영역을 세분화하게 되어 더욱 해상도 높은 지반강성의 분포를 이미지화할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 해상 기초구조물 주변에 발생할 수 있는 세굴현상을 모니터링하기 위하여 전기비저항 및 전단파 토모그래피 기법을 설명하였다. 세굴도 변화에 따른 모니터링 기법의 성능을 검증하기 위하여 실내 모형실험을 수행하였다. 모형 모노파일에는 전기비저항을 측정하기 위한 전극쌍을 수평 및 수직배열로 구분하여 설치하였으며, 세굴심도의 증가에 따른 두 배열방식의 전기비저항 추상도를 획득하였다. 실험결과 배열방식의 차이와 상관없이 실제 세굴심도와 전기비저항 측정으로 추정된 세굴심도는 유사하였다. 한편 모형 모노파일을 중심으로 모형 지반에 설치된 사각형 프레임에 각 변마다 7개의 벤더 엘리먼트를 배열하여 전단파를 측정 후, 전단파 토모그래피 이미지를 획득하였다. 세굴 발생 전과 후에 토모그래피 이미지를 분석한 결과 모노파일 주변지반에서 전단파 속도의 평균값은 감소하였으며, 전단파 속도의 최대값과 최소값의 차이는 크게 증가하였다. 본 연구에서 제안된 전기비저항 및 전단파 토모그래피 기법을 이용한 세굴 모니터링은 해상 기초구조물 주변의 세굴심도 평가 및 지반강성의 공간적 분포 및 변화양상을 파악하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부가 주관하고 국토교통과학기술진흥원이 시행하는 2010 건설기술혁신사업(과제번호: 10기술혁신E04), “대구경(직경 5 m급) 및 대수심(수심 60 m 이하) 해상풍력기초시스템 기술 개발” 과제의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

References

1. Ballio, F. and Radice, A. (2003), A non-touchsensor for local scour measurements, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 41, No. 1, pp. 105~108.
2. Choi, J. S., Yeo, W. K. and Kim, M. M. (2003), Determination of bridge scour depth considering flow conditions and bed characteristics, *Journal of Korea Water Resources Association*,

- Vol. 36, No. 6, pp. 893~899 (in Korean).
3. Kim, J. H., Yoon, H. K. and Lee, J. S. (2011), Void ratio estimation of soft soils using electrical resistivity cone probe, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 137, No. 1, pp. 86~93.
 4. Kim, J. H., Yoon, H. K., Jung, S. H. and Lee, J. S. (2009), Development and verification of 4-electrode resistivity probe, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 3C, pp. 127~136 (in Korean).
 5. Lee, J. S., Fernandez, A. L. and Santamarina, J. C. (2005), S-wave velocity tomography: small-scale laboratory application, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 28, No. 4, pp. 336~344.
 6. Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2005), Bender elements: performance and signal interpretation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 9, pp. 1063~1070.
 7. Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2007), Seismic monitoring short-duration events - liquefaction in 1g models, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 44, No. 6, pp. 659~672.
 8. 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, No. 6, pp. 1950~1959.
 9. Park, K., Byun, Y. H., Choi, C. H. and Lee, J. S. (2013), Scour evaluation of offshore foundations by using ultrasonic reflection images and natural frequency variation, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 2, pp. 125~132 (in Korean).
 10. Santamarina, J. C. and Fratta, D. (1998), Introduction to discrete signal and inverse problems in civil engineering, ASCE Press, pp. 269-315.
 11. Truong, Q. H., Lee, C., Cho, G. C. and Lee, J. S. (2010), Geophysical monitoring techniques for underwater landslide in 1g models, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 15, No. 1, pp. 1~19.
 12. Yeo, W. K., Lee, H., Kim, J. H. and Kwak, M. S. (2006), An interdisciplinart study on the scour depth estimation of Incheon bridge, Korea Water Resources Association Annual Conference 2005, Korea Water Resources Association, pp. 562~566 (in Korean).
 13. Yoon, H. K., Jung, S. H. and Lee, J. S. (2011), Characterization of subsurface spatial variability by cone resistivity penetrometer, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, No. 7, pp. 1064~1071.
 14. 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.