

현장타설말뚝의 굴착공 벽면거칠기 및 연직도 측정 시스템(BKS-LRPS)의 개발 및 적용성에 관한 연구

A Study on Development and Application of New Borehole Roughness and Verticality Measurement System (BKS-LRPS) for Drilled Shafts

박 봉 근¹ Park, Bong-Geun

남 문 석² Nam, Moon S.

최 용 규³ Choi, Yong-Kyu

Abstract

A new borehole roughness and verticality measurement system (BKS-LRPS) for rock socketed drilled shafts were developed and verified its field application. The stability of BKS-LRPS was verified for several field conditions, which included the effect of measuring unit shaking, the application of water/air calibration factors, and the resistance of high water pressure inside piles. Also, effective measurement distances for various conditions of turbidity were defined in the field by measuring borehole roughness and vertical alignment for 6 drilled shafts. Vertical alignments for all drilled shafts could be measured by BKS-LRPS. However, borehole roughness was not able to be measured due to high turbidity caused by RCD drilling processing. Based on the BKS-LRPS field verification, BKS-LRPS is the first borehole roughness and verticality measurement system applying both in the water and air.

요 지

현장에서 암반에 근입된 현장타설말뚝의 굴착공 벽면거칠기 및 연직도를 측정할 수 있는 장치(BKS-LRPS)를 개발하였으며 개발된 장치에 대한 현장시험을 실시하였다. 여기서 현장 측정 과정에서 측정 장치의 흔들림 분석, 공기 중과 수중에서의 보정계수 적용, 말뚝내부의 높은 수압에 따른 레이저 센서 시스템의 안정성 분석을 실시하였다. 또한 혼탁도에 따른 측정 가능 여부를 판단하기 위해 6개의 현장타설말뚝 굴착공에서 거칠기 및 연직도 측정을 실시하였다. 현장측정 결과 연직도는 공기중 이나 혼탁도가 낮은 수중조건에서 측정할 수 있었다. 그러나 거칠기도 공기중 이나 수중 조건에서 측정할 수 있었는데 굴착공 하부의 혼탁도가 높은 수중조건에서는 측정할 수 없었다. 실시된 일련의 현장시험을 통하여 BKS-LRPS는 공기 중과 수중에서 적용 가능한 최초의 굴착공 거칠기 및 연직도 측정 시스템임을 알 수 있었다.

Keywords : BKS-LRPS, Rock socketed drilled shafts, Roughness, Vertical alignment

1 정회원, (주)백경지엔씨 대표이사 (Member, President, Backyoung G & C Co., Ltd.)

2 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 (Member, Senior Researcher, Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation)

3 정회원, 경성대학교 건설·환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Kyungsoong Univ., ykchoi@ksu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 암반 소켓벽면의 거칠기에 따른 거동을 중심으로 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주면마찰력을 예측하기 위한 연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있으며, 암반 소켓벽면 거칠기의 영향을 거칠기 계수(RF; Horvarth 등, 1983), 무차원 거칠기 계수, ψ (Kulhawy & Phoon, 1993), 주면저항계수(SRC; Seidel & Collingwood, 2001) 등을 통해서 반영하였다(정상섭 등, 2006).

말뚝 기초 분야에서 레이저 센서의 적용 사례는 굴착벽면의 거칠기 측정시스템 개발(Collingwood, 2000; Liang, 2002)에서 찾아볼 수 있으며 국내에서는 조찬환 등(2003)과 정상섭 등(2006)의 연구에서 찾아볼 수 있다. 그러나 이러한 장치들은 공기중에서만 작동가능하였으므로 굴착수중에서는 사용할 수 없었다.

따라서 본 연구에서는 공기 중이나 수중에서 거칠기 측정이 가능하도록 개발된 측정 시스템(BKS-LRPS)을 이용하여 공기중 또는 수중조건에서 현장실험을 실시하였으며 그 결과를 분석하였다.

2. 기존 거칠기 측정 시스템에 관한 고찰

2.1 휴스턴 대학교의 거칠기 시스템에 관한 고찰

그림 1에는 휴스턴 대학교에서 개발한 굴착공 측정 시스템(Liang, 2002)을 나타내었으며, 이 시스템은 레이저 센서부, 엔코더부 및 데이터 수집용 컴퓨터부 등 크게 3가지 주요 부분으로 구성되어있다. 연결박스에는 AC-DC 컨버터가 내장되어 있어 엔코더와 레이저 장치에 전원을 공급해 준다. 또한 엔코더 시스템회로 보드가

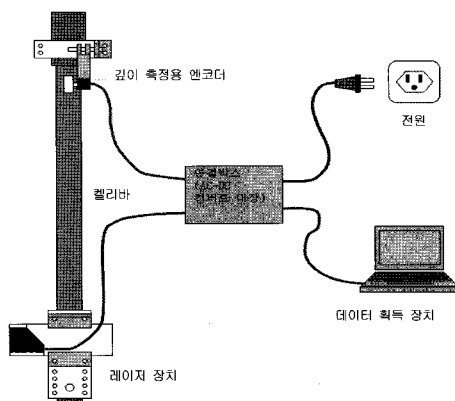


그림 1. 측정 시스템 모식도

이 연결 박스에 내장되어 있으며 엔코더 출력신호, 레이저 장치 회로, 샘플 트리거 등이 연결 박스에 연결되어 있다. 연결 박스 위에 있는 LED판으로 부터 시스템의 켜짐/꺼짐 상태를 알 수 있다.

이러한 거칠기 측정 시스템을 이용한 현장 실험은 2002년 5월 휴스턴 대학교 공대 건물 부근에서 실시되었다. 실험을 실시하는 동안 측정시스템을 잘 지지시킬 수 있도록 마운팅 프레임에 이용하였다. 시추공의 깊이가 1.83m 이었으므로 바가 굴착공의 하부에 위치할 때 마운팅 프레임이 시추공 바닥에 몇 차례 닿았지만 측정 시스템은 충격 후에도 손상되지 않았다.

이와 같은 현장 실험 결과를 바탕으로 Liang(2002)은 휴스턴 대학교 거칠기 시스템에서 개선해야 할 사항을 다음과 같이 제시하였다.

① 센서 하강 시 흔들림 최소화 필요

캘리바에 부착된 거칠기 측정 시스템을 이용하여 깊이 1.83m의 굴착공에서 거칠기 측정을 하였는데 여기서 수평 방향으로 약 2.54cm 흔들림이 발생하였다.

② 레이저 센서부의 크기 축소 필요

휴스턴 시스템의 레이저 센서부의 크기는 길이 27.80 cm, 폭 21.02cm, 높이 7.71cm이며 무게는 약 13.6N이므로 다른 사용 제품에 비해 비교적 크게 만들어 졌다.

③ 회로의 증폭 능력 확대, 노이즈 감소 및 회로기판 축소 필요

마이크로 프로세서를 이용하여 모든 아날로그 회로를 대체하면 회로기판의 크기 축소 및 시스템 노이즈의 최소화가 가능할 수 있을 것으로 보였다.

2.2 모나쉬 대학교의 SocketPro 시스템에 관한 고찰

SocketPro(Collingwood, 2000)에서는 굴착벽면의 프로파일을 정밀하게 측정하기 위하여 레이저를 이용한 거리 측정 기술을 도입하였다. 호주도로연구협회(Australian Road Research Board, 이하 ARRB라 칭함)의 레이저 센서 규격(Collingwood, 2000)을 살펴보면 본 저자는 SocketPro에서는 펄스 레이저 센서(그림 2)를 사용한 것으로 판단하였는데 이 센서에서는 반사파의 도착시간을 이용하여 거리를 측정하였다. SocketPro의 실물을 사진 1에 나타내었다.

SocketPro에 사용된 레이저센서는 ARRB에 의해 공급되었다. 따라서 본 저자는 모나쉬 대학교의 경우 자체적으로 레이저센서 검증을 하지 않은 것으로 판단하였다. Collingwood(2000)의 연구논문에서 수록된 ARRB에 의한 센서 검증 결과를 그림 3(a)와 (b)에 나타내었다. 그림 3(a)에서와 같이 SocketPro에 사용된 레이저 센서의 출력은 거리 변화에 따라 직선성을 나타내고 있었다. 또한 그림 3(b)에서는 실제 거리에 대한 오차 변화를 나타내었다. 이러한 레이저 센서의 유효측정영역은 100mm이었으며 유효측정영역이 작을수록 절대오차도 작아진다. 따라서 SocketPro는 현장시추공에서 석고로 본을 떠서 제작한 시편의 거칠기를 측정하는 데 적합한 레이저 센서시스템인 것으로 본 저자는 판단하였다.

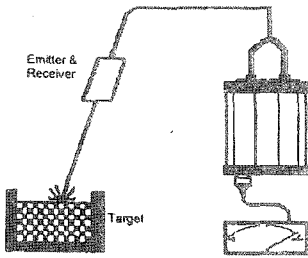


그림 2. 펄스 레이저센서

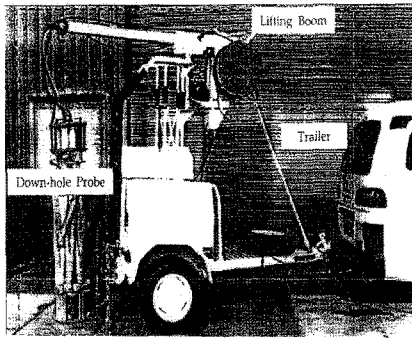
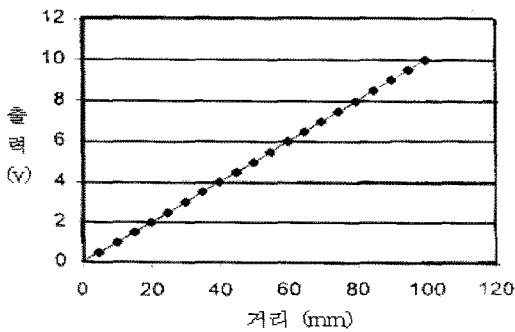
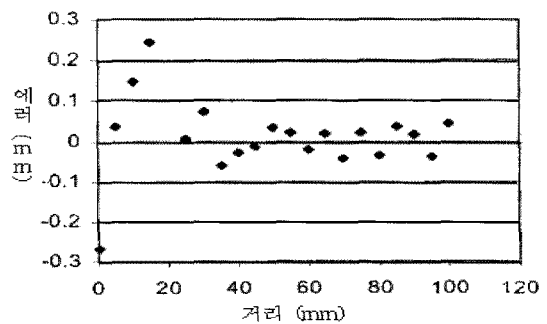


사진 1. SocketPro



(a) 거리에 따른 출력 변화



(b) 거리에 따른 오차 변화

그림 3. ARRB에 의한 센서 검증 결과(Collingwood, 2000)

2.3 기존 장치들의 성능 분석

휴스턴대학의 측정시스템은 전기공학과와 도로표면 거칠기 측정 장비를 활용하여 개발되었으며 더 이상의 수정이나 보완은 없는 상태이고, 모나쉬대학의 장비는 현재 굴착수에서도 사용할 수 있도록 보완 중에 있다.

휴스턴대학의 측정시스템은 상용화가 아닌 연구 목적으로 개발되었으며 거칠기에 따른 주면마찰력의 거동분석 연구에 사용되었고 해당 연구 대상 현장(공기중 상태)만을 고려하여 개발되었다. 반면 모나쉬대학의 측정시스템은 수중에서도 사용할 수 있으나 혼탁도가 있는 상황에서는 측정이 불가능하므로 이에 대한 보완 연구가 진행 중에 있다.

본 연구에서는 거칠기 측정에 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 영향요소를 분석하였으며, 특히 굴착 혼탁수에서 측정이 가능한 영역을 정량화하였다.

3. 거칠기 측정 장치(BKS-LRPS)의 개발 과정 요약

3.1 BKS-LRPS 개발 개요

굴착공 내에서는 공기 중, 수중, 혼탁도, 염분도 등과 같은 매질 변화가 예상된다. 또한 현장 시공 특성(예를 들면, 굴착 깊이, 굴착 직경, 지하수위, 빛의 밝기, 수압, 거칠기의 크기 등), 지반 조건(예를 들면, 풍화암, 연암, 경암 등) 및 암석의 종류 등과 같은 많은 변수들이 존재하므로 개발 시 현장의 다양한 영향요소들 뿐만 아니라 다음 항목들도 고려하였다.

- ① 측정된 데이터의 전송방법
- ② 전송 데이터의 처리를 위한 프로그램 개발

- ③ 수압을 고려한 방수 시스템, 방수시스템의 동결로 인한 센서의 파손, 방수시스템 적용 시 센서 보정 계수 결정 등
- ④ 현장 측정 결과의 해석기법

개발기간 동안 여러 번의 시행착오(예를 들면, 회로 수정, 프로그램 변경 등)를 겪었다. 시행착오로 인한 개발 기간을 단축하기 위해 전자 분야의 개발과 병행하여 레이저 센서시스템의 개발, BKS-LRPS(Backyoung-KyungSung Laser Roughness Profiling System)의 실내 모형검증시스템의 개발, 대형 BKS-LRPS의 개발을 순차적으로 진행하였다(박봉근, 2007). 이와 같은 일련의 개발 과정을 그림 4에 나타내었다.

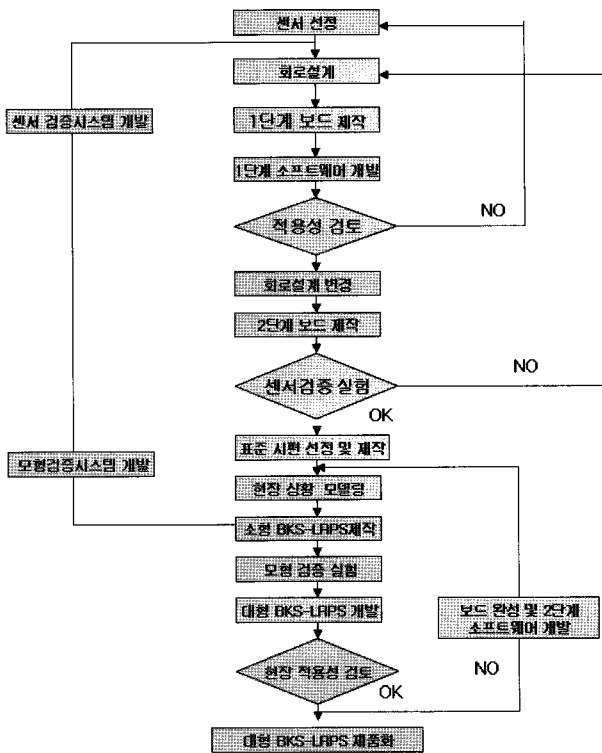


그림 4. 대형 BKS-LRPS 개발 흐름도

3.2 BKS-LRPS용 레이저센서 및 보정 장치

그림 5에는 레이저 센서부의 구성 요소 및 원리에 대하여 나타내었다. 이러한 센서부는 ① 레이저 다이오드 모듈, ② 볼록 렌즈, ③ 위치감도가 좋은 검출기(PSD)로 구성되었다.

레이저 다이오드 모듈은 물체 표면 위에 광점을 생성하기 위하여 레이저 빔을 방출한다. 볼록 렌즈는 반사된 빛을 모으고 PSD 상에 이미지 점으로 그것을 수렴한다. 만약 측정 장치와 물체 표면 사이의 거리가 변하면 PSD 위에 있는 이미지 점의 위치도 동시에 변한다. 이미지 점의 위치와 빛의 강도에 따라 PSD는 현재 신호들을 전자 회로로 출력할 수 있는데 여기에서는 레이저 삼각측량 광학 서브시스템의 원리가 사용된다.

공기 중 조건, 수중 조건, 혼탁도 조건 및 방수 시스템 등에서 레이저 측정값의 변화를 분석하였으며 개발된 BKS-LRPS 레이저 센서 및 보정시스템(사진 2)의 특징을 다음과 같이 요약할 수 있었다(박봉근, 2007).

- ① 기존의 레이저 센서는 공기 중에서만 사용이 가

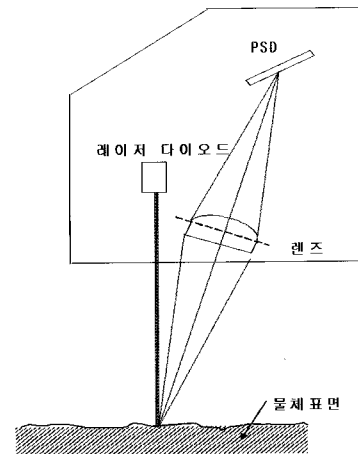
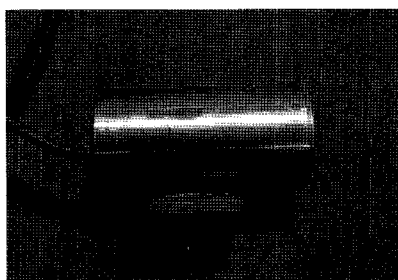


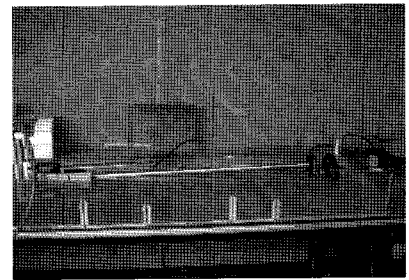
그림 5. 레이저 삼각 거리 측정 장치



(a) 센서 측면부



(b) 센서 정면부



(c) 레이저 센서 보정시스템

사진 2. 레이저 센서 및 보정시스템

능하였지만, 개발된 레이저 센서 시스템은 공기 중 및 수중에서 모두 사용할 수 있었다. 수중 사용을 위하여 완벽한 방수시스템을 구성하였다.

- ② 굴착 심도가 깊을 경우 높은 수압에서도 견딜 수 있는 방수 시스템을 구성하였다.
- ③ 인체에 안전한 빔(등급 2)을 사용하였으며, 측정 중에도 눈으로 볼 수 있는 가시광선 영역(650nm)을 선택하여 사용하였다.
- ④ 일반적으로 레이저 센서는 색깔 또는 빛의 밝기 등에 영향을 받을 수 있으므로 개발된 레이저 센서에서는 650nm 이외의 빛은 PSD에 감응되지 않으며, 출력 보정회로가 내장된 것을 사용하였다.
- ⑤ 측정유효영역의 한계로 인한 오차 요인을 개선하여 BKS-LRPS용 레이저 센서부의 유효 측정 영역을 25.0~225.0mm, 최소 측정간격을 0.1mm까지 확보하였다.

개발된 레이저센서에 대한 보정실험 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다. 각각의 보정실험에서 보정계수는 참값을 측정값으로 나누어서 구하였다.

- ① 방수 조건 및 매질 변화에 따른 보정을 실시하였으며 레이저센서 보정시스템의 측정 한계로 인하여 유효 측정 영역을 충분하게 규명하는 데에는 한계가 있었다. 또한 동일한 점에 대하여 거리 변화를 측정하는 1차원적 실험이었으므로 실험적 오차 요인을 내포하고 있었다.
- ② 공기 중에서 투명 방수관 부착 유무에 따른 보정계

수는 1.006, 공기 중에서 방수시스템에 따른 보정계수는 1.041로 분석되었다. 또한 공기 중에서 맑은 물로의 매질 변화에 따른 보정계수는 1.226으로 큰 변화를 보였으며 혼탁액(혼탁도 19.6NTU)에서의 보정계수는 1.243이었다.

- ③ 레이저 측정값의 경우 방수 시스템에 의한 영향보다는 매질 변화에 따른 영향이 크게 나타났다.

따라서 레이저 센서 보정실험에서 구한 보정계수를 그대로 사용하는 것은 곤란할 것으로 생각되었으며 실내 모형보정실험 등에 의하여 깊이방향으로 변화를 줄 수 있는 2차원적 실험에서 얻어진 많은 데이터를 축적하여 통계적 분석 방법에 기초하여 유효측정영역 및 보정계수를 결정하는 것이 바람직할 것으로 생각되었다. 측정시스템의 신뢰성 확보와 엄밀한 보정계수의 획득을 위하여 소형 BKS-LRPS를 제작하고 모형보정시스템을 제작하여 추가적인 보정실험을 수행하였다.

3.3 소형 BKS-LRPS 및 모형보정시스템

BKS-LRPS 실내모형보정시스템(그림 6)에서는 현장 조건을 고려할 수 있도록 하였다. 즉 재질 변화, 공기 중/수중에서 측정공간의 조도 및 방수 시스템, 공기 중과 수중에서 유효 측정영역, 염분농도, 맑은 물에서 혼탁도 변화, 소금물(3%)에서 혼탁도 변화, 공기 중 및 수중에서 거칠기 형태, 측정체 재질 표면의 반사도 등에 따른 보정을 실시하였다. 그림 6에서는 측정위치를 확인할 수 있는 엔코더 시스템, 레이저 센서의 방수 시스

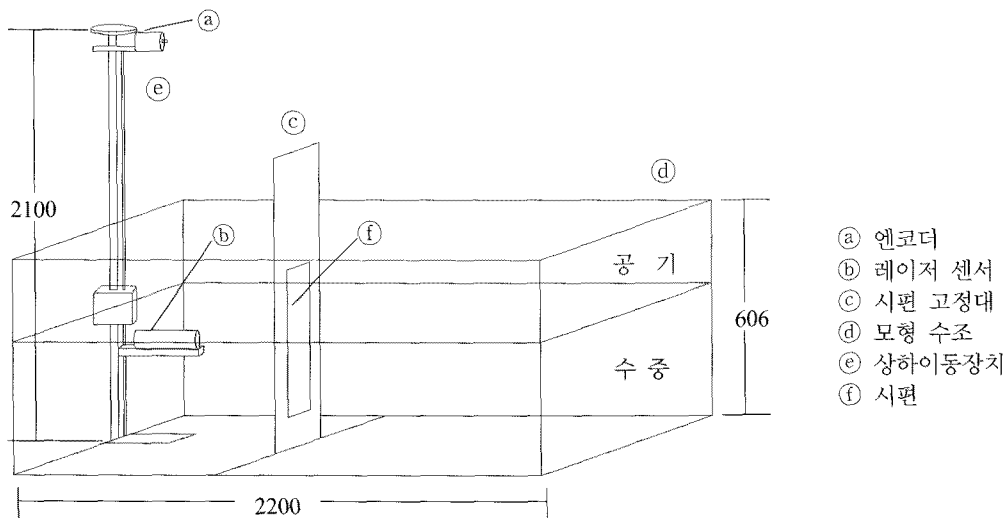


그림 6. BKS-LRPS 실내모형검증시스템 모식도

템 및 전자 회로용 보드를 대형 BKS-LRPS 시스템의 것과 동일하게 하였다.

BKS-LRPS 실내 모형보정시험 결과는 다음과 같다 (박봉근, 2007).

- ① 측정체 재질, 측정공간의 조도, 공기 중과 수중 등의 매질, 유효측정영역, 염분농도, 맑은 물에서 혼탁도, 소금물에서 혼탁도, 거칠기 형상 및 측정체 표면의 반사도 등에 따른 보정을 실시하여 신뢰도를 확보하였다.
- ② 매질과 방수시스템에 따른 보정을 실시하였으며, 그 보정계수는 다음과 같이 설정할 수 있었다.
공기 중에서 방수관에 대한 보정계수 : 1.013
공기 중에서 방수액에 대한 보정계수 : 1.033
공기 중에서 방수시스템에 대한 보정계수 : 1.046
수중에서 방수시스템에 대한 보정계수 : 1.350
- ③ BKS-LRPS에 사용된 레이저 센서의 유효 측정영역은 400.0mm로 결정할 수 있었다. 다만, 유효 측정영역이 227.7mm이내에서는 표준편차가 0.2mm 이내 이었으나 그 보다 큰 유효 측정영역에서는 표준편차가 0.5mm까지도 나타났다.
- ④ BKS-LRPS의 실내 모형보정시스템을 사용하여 최대 실험 가능한 거리인 438.0mm까지 실험을 수행하여도 측정이 가능하였다. 공기 중 유효 측정영역이 400.0mm인 점과 수중에서의 보정계수(1.350)를 고려할 경우 수중에서의 유효 측정영역은 540.0mm 까지 확장될 수 있을 것으로 판단되었다.
- ⑤ 염분도 변화에 따른 실내 모형보정시험 결과 염분농도 3%이내에서는 레이저 센서 거동에는 영향이 없음을 확인하였다.
- ⑥ 혼탁도에 대한 유효 측정영역을 다음과 같이 제

안하였다(박봉근 등, 2008).

$$EMD = B_{ks} \times T_b^{-0.64}$$

EMD : BKS-LRPS의 유효 측정 거리(mm)

B_{ks} : 흙 입자에 따른 BKS-LRPS 계수(1149.2)

T_b : 맑은 물에서의 혼탁도(NTU)

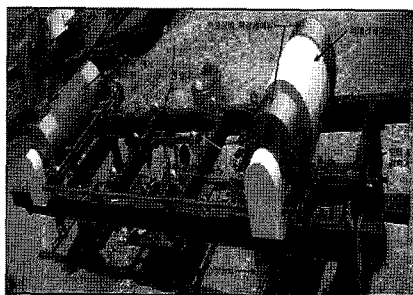
- ⑦ 낮은 혼탁도에서는 흙 입자의 크기에 따른 영향이 크지만 높은 혼탁도 영역에서는 흙 입자에 의한 영향이 크지 않았다.

3.4 대형 BKS-LRPS

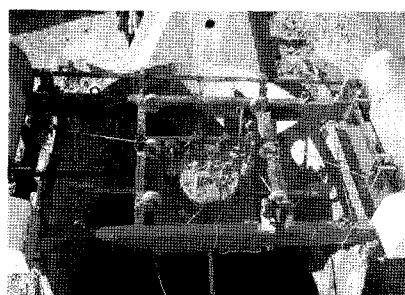
현장 실험용 대형 BKS-LRPS 시스템은 다양한 말뚝 직경에 대하여 적용할 수 있어야 한다. 거칠기 측정 시 레이저 센서의 흔들림을 최소화하고, 레이저 센서와 관련 회로를 소형화하여야 암반 소켓부 거칠기를 보다 정확하게 측정할 수 있으므로 기계적 장치, 레이저 센서의 선정 및 프로그램에 대하여 연구를 수행하였다.

BKS-LRPS의 기계적 장치를 사진 3(a)에 나타내었다. 측정장치는 좌·우에 있는 드림에 감겨 있는 와이어의 끝에 매달려 있으며 와이어를 풀면서 측정 장치를 굴착공 아래로 내리게 되는데 이때 수평방향의 흔들림을 최소화할 수 있어야 한다. 왼쪽 드림 가운데에는 레이저 센서와 연결된 케이블이 감겨져 있었다. 자중에 의해 케이블이 풀리는 것을 방지할 수 있도록 감속 모터가 설치되어 있으며 측정 장치를 상향으로 끌어올리기 위한 기계적 장치가 설치되어 있다. BKS-LRPS를 지면 또는 말뚝 위에 쉽게 거치 할 수 있도록 바닥 부분에 고정 장치가 설치되어 있다. 그리고 와이어가 하향으로 움직일 때 심도를 측정할 수 있도록 센서가 설치되어 있다.

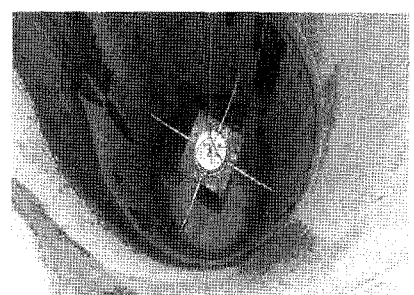
사진 3(b)에는 현장타설말뚝 굴착공에 연직도 및 거칠



(a) 기계적 장치



(b) 말뚝 거치



(c) 케이스 내부에서의 센서부

사진 3. 대형 BKS-LRPS의 기계적 장치((주)백경지앤씨, 2006)

기를 측정할 수 있도록 굴착 케이싱에 거치된 BKS-LRPS 모습을 나타내었다. 레이저 센서를 소형화시켜 4개의 센서를 90°각도로 배치하였으므로 1개의 레이저 센서로 여러 차례 측정할 때 나타날 수 있는 측정 위치에 따른 오차 발생을 감소시킬 수 있었고, 측정 시간의 과다 소요로 인한 공기 지연을 해결할 수 있었다. 또한 레이저 측정 장치의 수평을 쉽게 맞추기 위하여 레이저 센서가 달려 있는 중심추에 연결된 와이어를 나사식으로 만들어 미세한 수평까지도 조정할 수 있도록 하였다. 4지점에서 와이어를 사용하여 레이저 센서가 말뚝 아래로 내려갈 때 기계적 진동 또는 바람의 영향을 최소화하도록 하여 측정 중 흔들림을 방지하였다.

사진 3(c)에는 굴착 케이싱 내부로 하향시킨 레이저 센서부를 나타내었다. 레이저 센서의 유효 측정 영역 내에서 모든 말뚝 직경에 적용 가능하도록 중심 추에 연결된 바(Bar)에 레이저 센서를 설치하였다.

본 연구에서 개발된 대형 BKS-LRPS의 특징을 요약하면 다음과 같다(박봉근, 2007).

- ① 시공 상태(수중 조건, 염분 조건, 혼탁도 조건 등), 시추공 내의 조도상태 등을 고려하여 현장에서 직접 적용 가능하였다.
- ② 4개의 와이어가 지지하고 있는 중심추의 무게로 인하여 센서 하강 시 흔들림을 최소화하였다. 특히 수중에서는 흔들림이 거의 나타나지 않았다.
- ③ 레이저 센서를 소형화시켜 4개의 센서를 사용함으로써 반복 측정 시 오차 발생, 측정 시간의 과다 소요 등의 문제점을 개선하였으며, 데이터의 신뢰성을 향상시켰다.
- ④ 디지털 방식을 채택하여 회로의 증폭 능력 확대, 노이즈 감소 및 회로기판 소형화 등을 이루었다.
- ⑤ 레이저 측정 데이터와 엔코더 측정값의 전송 속도와 기능은 매우 우수한 특성을 나타냈다.
- ⑥ 필요시 4개 이상의 센서를 추가 설치할 수 있도록 하였다.
- ⑦ 감속 모터가 부착되어 자중에 의해 케이블이 풀리는 것을 방지하고 측정 장치를 상향으로 끌어

올리도록 하였다.

- ⑧ 현장타설말뚝 굴착공 벽면 거칠기 및 수직도를 측정할 수 있었다. 또한 측정 중에 사용자가 스케일을 변환할 수 있도록 하였다.

4. 소구경 현장타설말뚝의 탁본 시편에 대한 거칠기 측정시험 결과 및 분석

4.1 개요

편마암질의 풍화암 지역에 근입된 총 3본의 소구경 현장타설말뚝(직경: 200.0mm, 길이: 0.3m)에서 굴착면으로부터 탁본한 시편에 대한 거칠기를 측정하였다. 연암 지역의 거친~매끈한 굴착면 거칠기를 굴착공의 4방향(동, 서, 남, 북)에서 탁본하여 본당 4개의 시편을 석고로 성형하여 이것을 시편당 10.0mm 간격으로 10회 반복 측정하였으며 총 40회의 거칠기 측정을 실시하였다.

본 현장에서는 지표면에 기반암이 노출되어 있었다. 지반조건을 파악하기 위하여 총 4공의 NX 보링을 실시하였으며, 시추 심도는 말뚝 선단 하부로 최소 2.0m 이상(최대 10m)으로 계획하였다. 지반조사 결과 연암 지역의 지층은 육안상 신선한 암이나, 수직방향의 절리가 많이 분포하였으며, RQD 값은 0~41의 범위로 나타났다. 지하수위는 지표면 하부 약 0.5m에 위치하였다.

근입부 암반의 상태를 정량적으로 파악하기 위하여 공내재하실험, 일축압축실험, 점재하시험을 수행하였으며, 채취된 암석시료에 대한 일축압축강도(q_u), 점하중강도(PLT), 탄성계수(E_m), 변형계수(D_m), RMR, GSI 등의 결과를 표 1에 요약하였다.

4.2 측정결과 및 분석

백경 KG 2-E(동), KG 2-W(서), KG 2-S(남) 그리고 KG 2-N(북)의 4개 방향에서 거칠기를 측정하였으며 각 방향에서는 탁본된 거칠기 시편에서 1.0cm 간격으로 10회 측정하였는데 10회의 측정 결과는 다양한 형태의 프로파일링을 나타내고 있었다. 따라서 이러한 다양한 형

표 1. 대상지반의 지반물성 요약

구분	q_u (MPa)	E_{mass} (MPa)	D_{mass} (MPa)	RQD (%)	RMR	Q-value	GSI
편마암질 연암	50	527	253	14	34	1.08	36
풍화암 지역	2.5~4.3	182~362	140				

태의 프로파일링을 평균한 결과를 그림 7에 나타내었다.

5. 굴착공 벽면거칠기의 현장측정시험 결과 및 분석

5.1 공기중 조건의 현장측정시험

5.1.1 개요

BKS-LRPS의 굴착공벽 거칠기의 현장측정시험(사진

4 참조)은 OO 현장에서 실시되었다. 올케이싱공법으로 시공된 현장타설말뚝(직경 1,500mm, 길이 : 12.2m)에 대하여 굴착공 내의 공기중 조건에서 거칠기를 측정하였다.

본 현장에서의 말뚝 시공은 풍화암층까지 케이싱을 근입시킨 다음 슬라임 제거 등을 거쳐 레미콘을 타설하면서 케이싱을 인발하게 되는데 이 과정에서 굴착공의 거칠기는 풍화암 지반에서 형성될 수 있었다. 따라서 먼

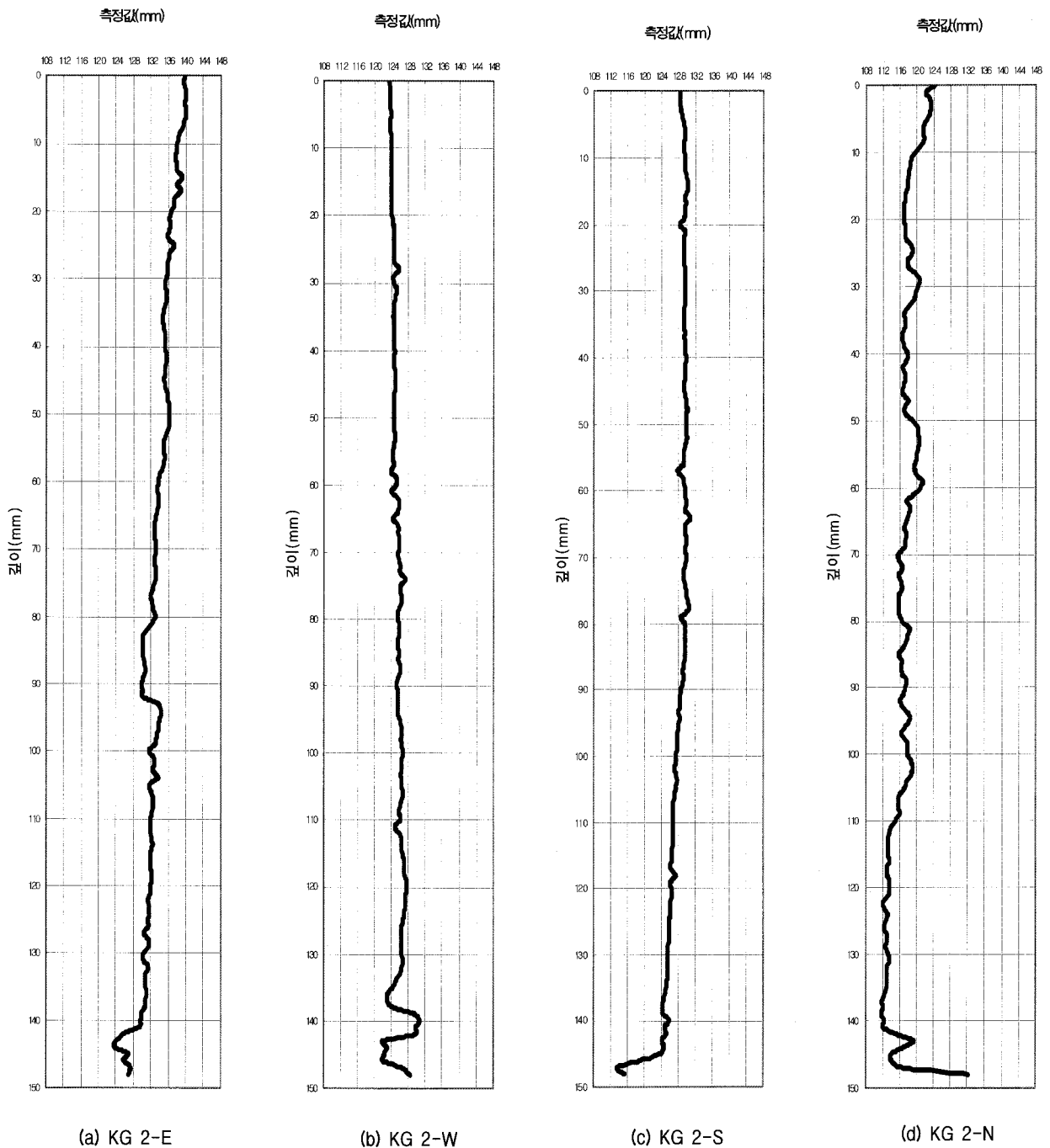


그림 7. 4개 방향에서 측정한 평균 거칠기 측정치 예

저 케이싱을 1m만큼 인발한 후 풍화암층의 거칠기를 측정하였는데 이 과정에서 지하수 유입에 의한 선단부의 확공 현상도 확인할 수 있었다.

지반조사 결과에 근거하면, 본 현장의 지층은 지표면에서부터 매립층, 퇴적층, 풍화토층, 풍화암층으로 구성되어 있었다. 풍화토층은 GL 4.5m에서부터 GL 14.8m까지 분포하고, 풍화암층은 GL 14.8m에서부터 분포되었다. 현장타설말뚝은 원지반에서 약 4.0m 터파기 후에 시공되었다. 시험말뚝에 대한 지층 개요는 표 2에 요약하여 정리하였다.

5.1.2 측정 결과 및 분석

OO 현장에서 얻어진 BKS-LRPS 프로파일링 결과를 그림 8에 나타내었다. 케이싱 인발 후 그림 8에서 원으로 표시된 부분에서 풍화암층의 거칠기가 노출될 수 있었으며 이 부분에 대한 측정을 실시하였다. 여기서 센서 1번(S1)과 센서 2번(S2)의 프로파일링에서는 약간의 흔들림이 발생하였는데, 이는 공기 중에서 바람에 의해 측정 장치가 영향을 받은 것으로 보인다. 반면 센서 3번(S3)과 센서 4번(S4)의 경우 프로파일링에서는 공기 중에서 바람에 의한 영향이 거의 나타나지 않았다.

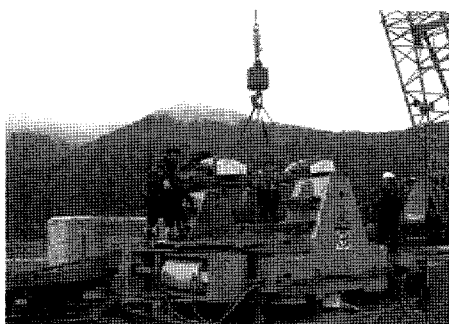
5.2 굴착 혼탁수 조건의 현장측정시험

대구경 현장타설말뚝은 연암층에 1D 이상 근입시키

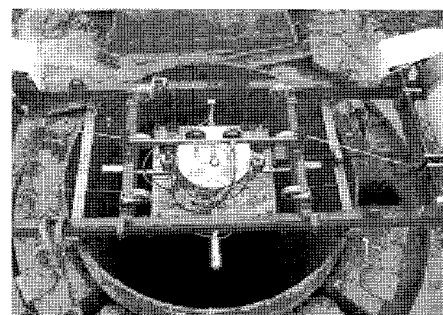
는 선단지지말뚝으로 설계되어 있었으므로 굴착 혼탁수 조건에서 공벽 거칠기 및 연직도를 측정하기 위하여 선단부의 슬라임을 제거하여 혼탁도를 낮추는 과정이 필요하였다. RCD 공법에서는 선단부 슬라임을 제거하기 위해 맑은 물로 씻기를 실시한 후 철근망을 삽입하고 레미콘을 타설하도록 시방서에 명시하고 있다. 그러나 최근 환경 오염 및 민원 발생 등의 이유로 육상부에서는 이러한 규정은 거의 무시되고 있으며 실제로는 에어블로잉(airblowing) 후 레미콘을 타설하고 있는 실정이다. 더욱이 마찰말뚝으로 설계되는 현장타설말뚝에서는 대형오거(일명 BG 장비)를 사용하므로 씻기 작업조차도 할 수 없는 상황이다. 따라서 현장타설말뚝공법 적용현장에서 굴착공 내 혼탁도를 낮출 수 없는 현실적인 제약이 따르고 있다.

현장에서 씻기 후 철근망을 근입하고 및 레미콘을 타설하는 후속 공정들이 약 1시간 내외의 짧은 시간에 이루어져야 하므로 BKS-LRPS의 설치 및 측정을 실시하기에는 많은 어려움이 발생하였다. 또한 측정을 위한 충분한 시간이 확보되어 있더라도 굴착공 내 높은 혼탁도로 인하여 측정 영역을 확보할 수가 없었다.

따라서 본 연구에서는 상기에 설명한 것과 같은 사유로 인하여 굴착 혼탁수 조건에서는 거칠기 측정을 위한 현장 적용시험은 제대로 이루어질 수가 없었다. 현재까지는 측정자료를 확보하지는 못하였으나 지속적으로 노력을 경주할 예정이다.



(a) BKS-LRPS 모습



(b) BKS-LRPS를 고정시킨 상태

사진 4. 고속철도 OO현장 BKS-LRPS 현장 측정 시험 전경

표 2. 고속철도 OO현장 지층 개요

지층명	분포심도(m)	지층 특성
매립층	0.0 ~ 1.8	실트섞인 모래, 자갈, 전석으로 매립 습윤, 느슨
퇴적층	1.8 ~ 4.5	실트질 모래, 황갈색, 습윤, 느슨 내지 보통조밀
풍화토층	4.5 ~ 14.8	회갈색, 상부 조밀한 상태에서 하부로 갈수록 매우 조밀한 상태로 됨
풍화암층	14.8 ~	매우 조밀, 심한 풍화 상태, 회갈색

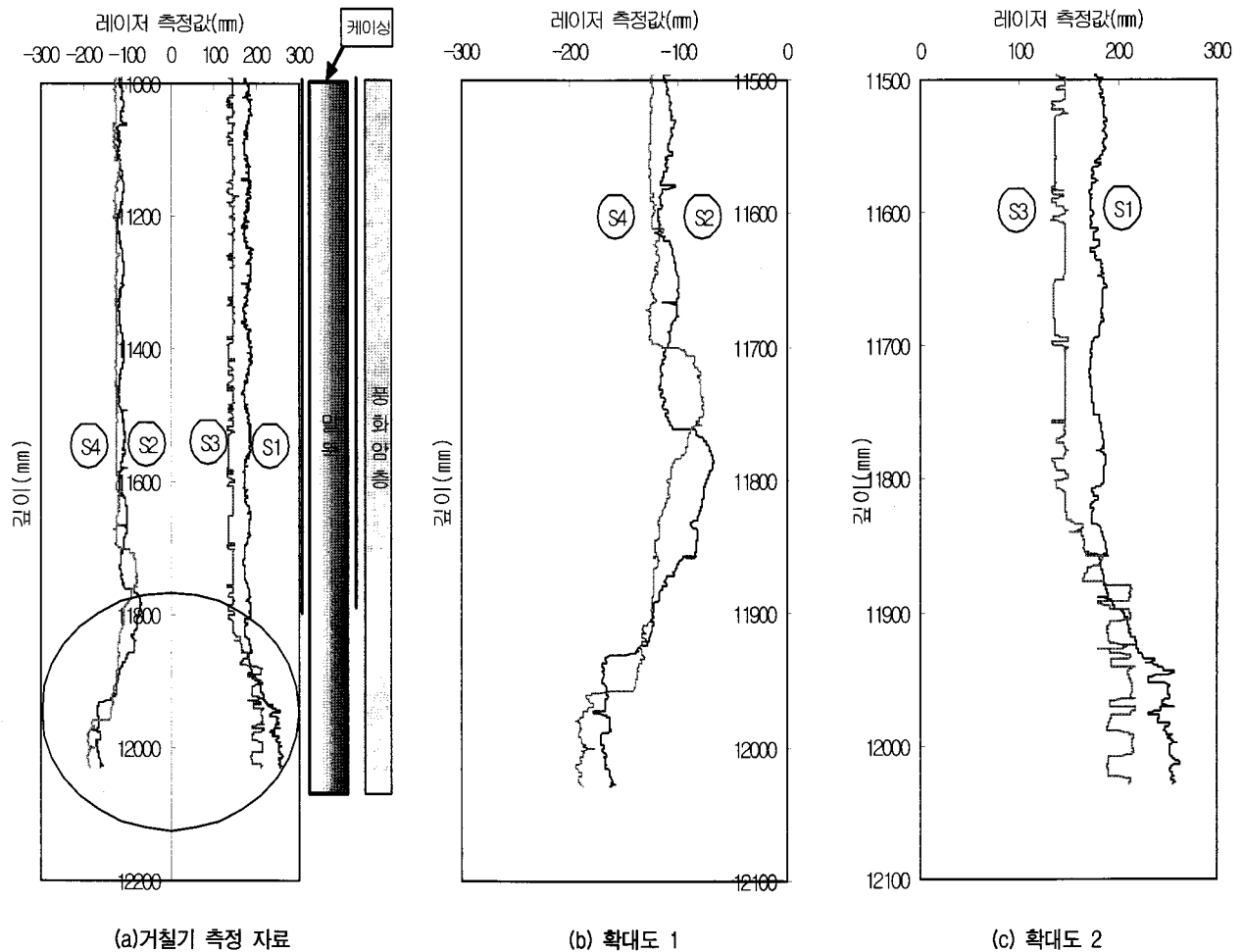


그림 8. 거칠기 측정 예

BKS-LRPS를 사용할 경우 잠정적으로 측정 굴착공에서만이라도 시방규정을 준수하게 하는 방안이 필요하며 아울러 굴착공 내 혼탁도를 낮출 수 있는 방안을 개발하는 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 생각되었다.

6. 연직도 측정에 대한 현장시험 결과 및 분석

6.1 공기중 조건의 현장측정시험

고속철도 OO 현장에 대한 지반 조건은 5.2절에서 설명하였다. 고속철도 OO 현장에서 말뚝 3본(직경 : 1,500mm, 길이 : 10.1, 10.8, 12.2m)에 대해 연직도 측정을 실시하였다. 이 때 얻어진 BKS-LRPS 프로파일링 결과는 그림 9에 나타내었다.

고속철도 OO 현장에서의 연직도 측정은 공기 중에서 실시되었으며, 희생강관(용접)을 사용하지 않고 케이싱

(볼트 연결)이 근입된 상태에서 측정이 이루어졌다. 따라서 그림 9(b)의 경우 약 3.0m와 5.5m 지점 그리고 그림 9(c)의 경우 0.0m와 2.0m 지점에서 미세한 변곡점이 나타났다. 이것은 케이싱 조합시 볼트 연결부에 의한 프로파일링 변화에 기인하였다. 이와 같이 BKS-LRPS에 의한 연직도 측정에서는 미세한 변화까지도 측정할 수 있으므로 거칠기 측정, 연직도 측정 뿐 만아니라 케이싱 근입시 지반에 의한 케이싱의 변형과 케이싱 조합 상태까지도 분석 가능할 것으로 판단되었다.

고속철도 OO 현장에서의 연직도 측정 결과를 표 4에 요약 정리하였다. 고속철도 OO 현장에서의 연직도 결과를 살펴보면 두 개의 센서에 의해 측정된 결과가 거의 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 따라서 두 개의 센서에서 얻어진 평균 연직도는 말뚝의 허용 시공오차를 평가하기에 충분한 것으로 판단되었다. 측정된 평균 연직도의 경우 1/203~1/232로 나타났다.

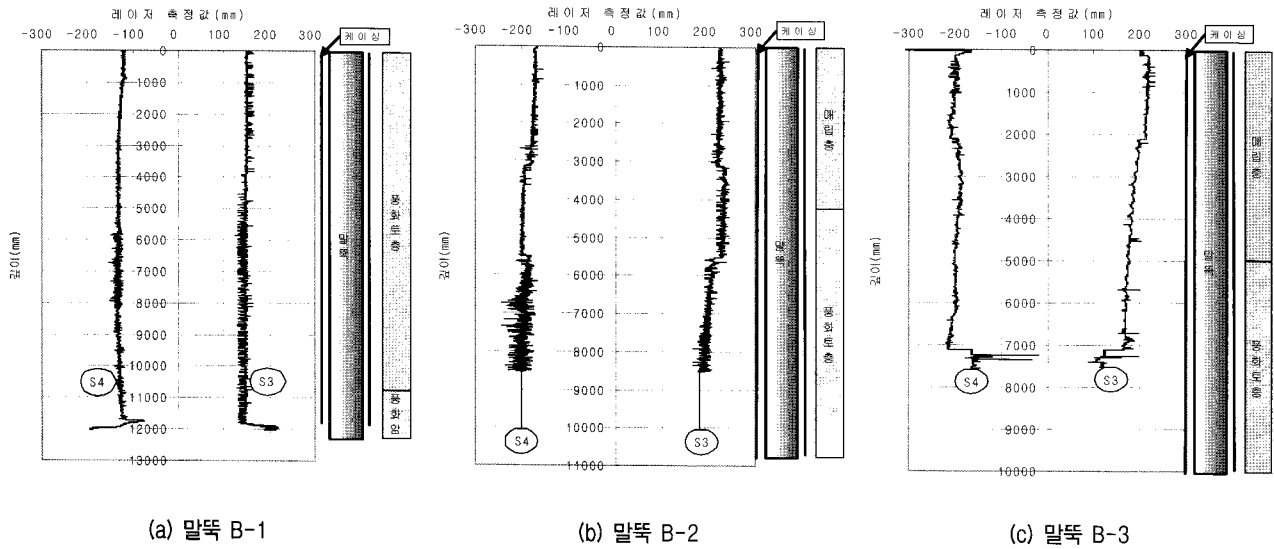


그림 9. 고속철 OO현장의 말뚝 연직도 측정사례

표 4. 고속철도 OO 현장의 연직도 측정 결과

말뚝 번호	센서	레이저 측정값(mm)		A-B (mm)	말뚝심도 (m)	연직도 ((A-B)/B)	평균 연직도
		초기(A)	최종(B)				
B-1	S3	160	214	-54	12	-1/222	1/211
	S4	-118	-178	60		1/200	
B-2	S3	222	182	40	8.5	1/213	1/232
	S4	-169	-181	12		1/250	
B-3	S3	205	166	39	7.0	1/179	1/203
	S4	-179	-210	31		1/226	

표 5. 양산 OO 현장의 지층 요약

지층 명	분포 심도(m)	지층 특성
매립토층	0.0 ~ 6.5	황갈색, 습윤상태, 느슨함.
퇴적토층	6.5 ~ 32.7	점토질 실트, 실트질 모래, 모래질 자갈
풍화암층	32.7 ~ 35.4	회갈색, 습윤상태, 매우조밀함
연암층	35.4 ~	담홍색, 보통 풍화, TCR = 40%

6.2 굴착 혼탁수 조건의 현장측정시험

6.2.1 개요

양산 OO 현장은 연약지반층이 약 30m 정도 분포하여(표 5 참조) 희생강관을 사용하도록 설계되었다. 그러나 희생강관의 선단 보강이 이루어 지지 않아 시공 과정에서 선단부의 변형에 대한 조사가 필요하였다. 이를 위하여 BKS-LRPS에 의한 연직도 측정을 수행하였다.

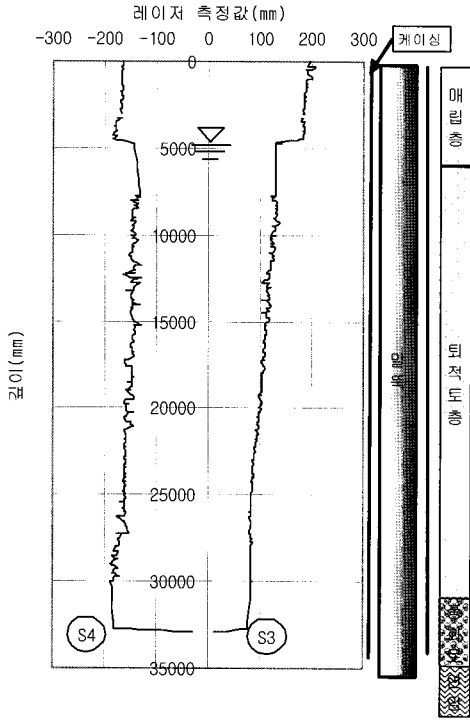
현장타설말뚝은 연약층 심도가 깊어 희생강관을 사용하는 RCD 공법으로 설계되어 있었다. 시공 순서는 희생강관을 먼저 근입시킨 후 연암층에서는 RCD 장비에 의한 굴착을 하였다. 연직도 측정은 말뚝 내부의 슬라임을 제거하지 않은 상태에서 7일 이상 방치 후에 실

시하였다. 굴착공 바닥에 슬라임이 약 2m 잔류하였다.

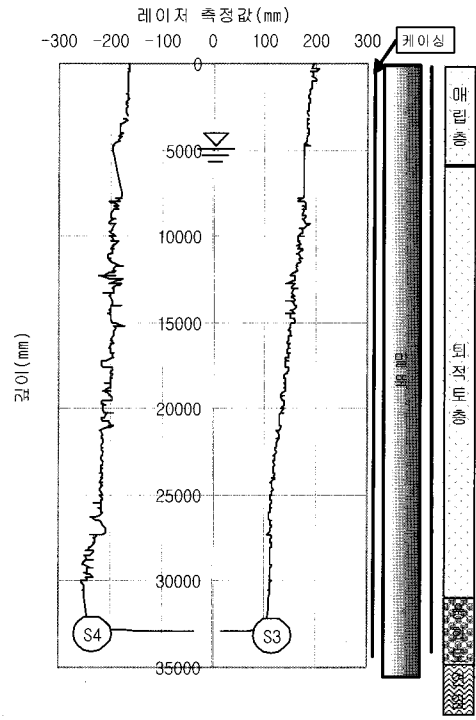
본 현장시험에서 와이어로 측정 장치를 내릴 때 흔들림 분석, 수중 약 30m 이상에서 수압에 의한 레이저 센서 시스템의 안정성 분석, 그리고 현장의 혼탁도에 따른 측정 가능 여부 등을 분석할 수 있었는데 그 결과는 참고문헌(박봉근, 2007)을 참고할 수 있다.

6.2.2 측정결과 및 분석

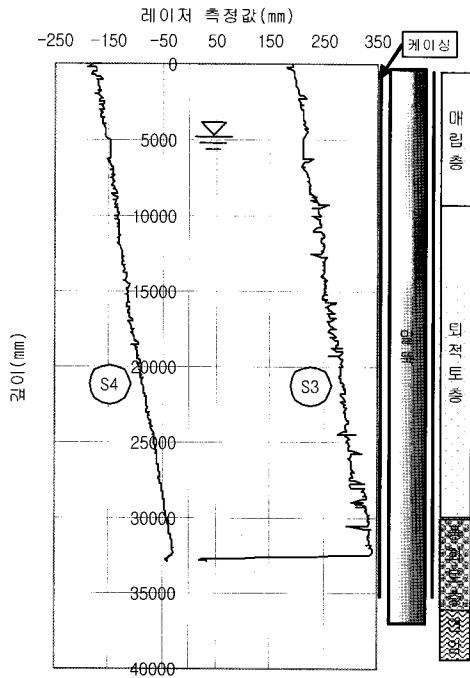
양산 OO 현장에서 말뚝 3본(직경 : 1,500mm, 길이 : 32.0, 34.1, 35.2m)에 대해 연직도를 측정하였다. 이때 얻어진 BKS-LRPS 프로파일링 결과는 센서 4개 중 2번 센서(S2)가 작동되지 않아 3번 센서(S3)와 4번 센서(S4)에 의한 프로파일링 결과만을 그림 10에 나타내었다. 그



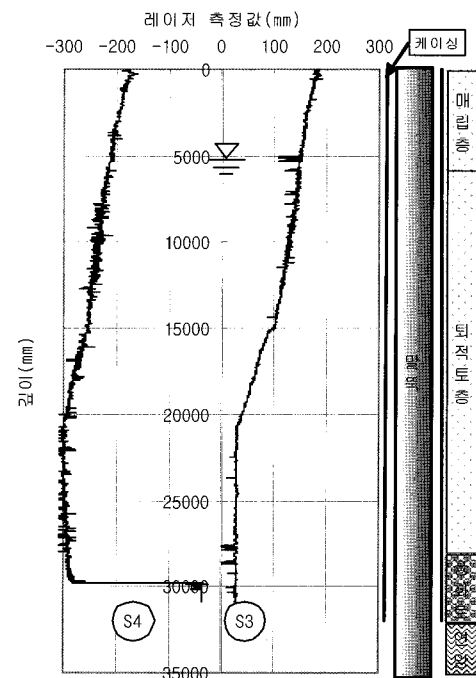
(a) 보정 전의 측정 결과(말뚝 A-1)



(b) BKS-LRPS 보정계수 적용 결과(말뚝 A-1)



(c) BKS-LRPS 보정계수 적용 결과(말뚝 A-2)



(d) BKS-LRPS 보정계수 적용 결과(말뚝 A-3)

그림 10. 양산 oo현장의 말뚝들에 대한 연직도 측정 결과

림 10(a)에는 말뚝 A-1에서 공기 중과 수중(약 5m 지점)에서 측정된 프로파일링을 나타내었다. 여기서 매질 변화가 있는 5m 지점에서 레이저 측정값은 크게 감소하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 레이저 센서의 매질 변화

에 따른 영향에 기인하였다. 그림 10(b)에는 공기중 측정 결과에 방수시스템에 대한 보정계수 1.350(박봉근, 2007)을 적용한 결과를 나타내었다. 그 결과 수중에서의 측정 결과를 공기 중 조건으로 변환하여 연직도 분석을 할

표 6. 양산 OO 현장의 연직도 측정 결과

말뚝 번호	센서	레이저 측정값(mm)		A-B (mm)	말뚝심도 (B)	연직도 ((A-B)/B)	평균 연직도
		초기(A)	최종(B)				
A-1	S3	198	114	84	30	-1/344	1/355
	S4	166	253	-87		1/355	
A-2	S3	191	337	-146	32	-1/219	1/229
	S4	165	30	135		1/238	
A-3	S3	183	40	143	20	1/140	1/155
	S4	176	294	-118		-1/169	

수 있었다. 그림 10(c)와 (d)의 경우도 그림 10(b)와 동일한 방법으로 분석하였다. 그림 10(d)의 경우 20.0m 지점에서 3번 센서(S3) 시스템의 케이싱 부분이 굴착공 케이싱과 밀착된 상태로 하향 방향으로 내려가면서 측정되어 거의 일정한 측정값을 나타내었다. 이것은 A-3말뚝의 연직도가 1/155 정도로 크게 경사되어 굴착되었으므로 3번 센서(S3)는 거의 케이싱에 밀착된 상태이고, 4번 센서(S4)는 하향으로 갈수록 점점 멀어져서 측정범위를 벗어나게 되어 20.0m 지점에서 일정한 값을 나타내었다. 따라서 20.0m 이후에서의 3번과 4번 센서의 측정값은 신뢰할 수 없다고 판단하여 말뚝 A-3에 대한 연직도 분석시 말뚝 심도를 20.0m로 하였다. 양산 OO 현장의 연직도 측정 결과를 표 6에 요약하여 정리하였다. 양산 OO 현장에서의 연직도 결과를 살펴보면 두 개의 센서에 의해 측정된 결과가 거의 유사하게 나타났다. 따라서 두 개의 센서에서 얻어진 평균 연직도는 말뚝의 허용 시공오차를 평가하기에 충분한 것으로 판단되었다.

그림 10에서 알 수 있듯이 굴착슬라임이 잔류하고 있는 굴착공 선단부의 두께 2.0m에서는 측정치를 얻을 수가 없었으며 그 상부에서는 수중조건에서 연직도 측정이 제대로 이루어 졌다. 따라서 굴착 후 7일 정도 경과한 굴착수중에서는 혼탁도가 저하되어 측정을 할 수 있었다.

일반적으로 거칠기 측정에서는 아주 정밀한 레이저 센서를 사용하며 측정 데이터가 매우 커 데이터 통신 문제, 데이터 저장 용량, 센서의 사용 수량, 소프트웨어 등에서 차이가 발생하므로 고가의 장비가 된다. 반면 연직도 측정에서는 거칠기 측정 장치와 비교해 낮은 수준의 정밀도, 회로, 소프트웨어 등이 요구되므로 저가의 장비가 된다. 거칠기 측정에서는 1.0mm당 20개의 데이터가 수집되고 ±0.1mm의 정밀도가 요구되는 반면 연직도 측정에서는 100.0mm에 10개의 데이터만 읽고 ±1.0mm의 정밀도로도 측정할 수 있다. 본 연구에서 개발한 BKS-LRPS 측

정시스템은 동일 시스템으로 거칠기 및 연직도 측정을 할 수 있다. 즉 거칠기 측정을 위하여 개발되었으나 측정 수준만 하향으로 조정하면 연직도 측정에도 사용할 수 있다.

그림 10의 연직도 측정 결과로부터 거칠기 측정 가능성을 추정해 볼 수 있었다. 굴착슬라임이 잔류하고 있는 하부 2m에서는 거칠기 측정이 불가능할 것으로 추정되었지만 그 위의 굴착수 조건에서는 거칠기 측정이 가능할 수 있었을 것으로 추정되었다.

7. 결론 및 제언

본 연구의 결과 및 제언은 다음과 같다.

- (1) 현장에서 대구경 소켓말뚝의 굴착공 벽면 거칠기를 측정할 수 있도록 개발된 거칠기측정시스템(BKS-LRPS)은 공기 중 뿐만 아니라 수중에서도 사용 가능하였다. 또한 BKS-LRPS는 굴착공의 연직도 측정에도 부가적으로 사용할 수 있었다.
- (2) 대구경 현장타설말뚝 굴착공에 대하여 거칠기 측정을 위한 현장시험을 수행하였다. 거칠기는 공기중에서만 측정되었으며 굴착 혼탁수 조건에서는 측정되지 않았으나 혼탁도를 저하시킬 수 있다면 슬라임부를 제외한 굴착수 내에서는 측정될 수 있을 것으로 추정되었다. 연직도는 공기중이나 수중조건에서 측정할 수 있었으며 굴착슬라임이 잔류하는 수중조건에서는 측정할 수 없었다.
- (3) 대구경 현장타설말뚝 굴착공에 대하여 연직도 측정을 위한 현장시험을 수행하였다. 연직도는 공기중이나 수중조건에서 측정할 수 있었으며 굴착슬라임이 잔류하는 수중조건에서는 측정할 수 없었다.
- (4) BKS-LRPS는 현장조건에서 굴착공 벽면거칠기를 측정할 수 있도록 개발된 장비이지만 연직도 측정

에도 활용할 수 있었다. 이 장비의 완전한 활용을 위하여 RCD굴착에 의한 굴착공 내의 혼탁도를 낮출 수 있는 방안에 대한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것으로 생각되었으며 이에 대한 보완 연구를 진행하고 있다. 아울러 측정된 거칠기의 정량화 및 이를 이용하여 주변마찰력이나 선단지지력을 산정하는 연구 등이 추가적으로 이루어져야 할 것으로 생각되었다.

참 고 문 헌

1. 박봉근 (2007), *BKS-LRPS(Backyoung-KyoungSung Laser Roughness Profiling System)의 개발 및 검증에 관한 연구*, 경성대학교 박사 학위논문.
2. 박봉근, 김명학, 권오근, 남문석, 최용규 (2008b), “수중에서 사용가능한 굴착공 벽면거칠기 측정 시스템(BKS-LRPS)의 굴착공 내 혼탁도 보정에 관한 연구”, *한국지반공학회논문집*, 2008. 10, pp.25-32.
3. 정상섭, 설훈일, 이상윤, 안상용 (2006), “현장타설말뚝의 주변마찰력 영향인자 분석”, 한국지반공학회, 한국지반공학회 창립 22주년 기념 기술위원회 공동 학술세미나, pp.351-362.
4. 조친환, 이명환, 김성희 (2003), “국내 현장타설말뚝의 주변 접촉부에 대한 일정 강성 전단시험”, 한국지반공학회, *한국지반공학회 정기학술대회*, pp.147-152.
5. (주)백경지앤씨 (2006), “BKS-LRPS의 연구개발보고서”, Report No. BK-06-01.
6. Collingwood, B. (2000), “The Effects of Construction Practices on the Performance of Rock Socket Bored Piles”, *Ph. D. Thesis*, Department of Civil Engineering, Monash University, Clayton, Vic., Australia.
7. Horvath, R. G., Kenney, T. C., and Kozicki, P. (1983), “Methods of Improving the Performance of Drilled Piers in Weak Rock”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20, pp.758-772.
8. Kulhawy, F. H., and Phoon, K. K. (1993), “Drilled Shaft Side Resistance in Clay Soil to Rock”, *Design and Performance of Deep Foundations*, GSP No. 38, pp.172-183.
9. Liang, R. (2002), “Development of A Laser Triangulation Distance Measurement Device and Its Application to Borehole Roughness Detection”, *MSEE Thesis*.
10. Seidel, J. P., and Collingwood B. (2001), “A New Socket Roughness Factor for Prediction of Rock Socket Shaft Resistance”, *Canadian Geotechnical Journal*, February, pp.138-153.

(접수일자 2008. 10. 1, 심사완료일 2009. 3. 17)