

수중에서 적용가능한 대구경 현장타설말뚝의 굴착공 벽면거칠기 측정장치의 보정에 관한 연구

Calibration of Borehole Roughness Measurement System for Large Diameter Drilled Shafts in Water

박 봉 근¹ Park, Bong-Geun

남 문 석² Nam, Moon S.

최 용 규³ Choi, Yongkyu

Abstract

Based on recent studies on rock socketed drilled shafts, it was found that the side resistance of rock socketed drilled shafts is affected by unconfined compressive strength of rock, socket roughness, rock types and joints, and initial normal stress. Especially, the socket roughness is affected by rock types and joints, drilling methods, and diameters. Since existing roughness measurement systems could be conducted only in the air, a new roughness measurement system, which can measure rock socket roughness in the air and also in the water, is needed. However, the development of new roughness measurement system for civil engineers has been faced with difficulties of electrical applications. In this study, the laboratory verification system for BKS-LRPS (Backyoung-KyungSung Laser Roughness Profiling System) was developed, which can be applied both in the water and air. Based on the laboratory verification, it was found that the improved BKS-LRPS could define effective measurement distances for the conditions reflecting the apparatus and in-situ situations.

요 지

암반에 근입된 현장타설말뚝의 주면마찰력에 대한 최근의 연구결과에 따르면 주면마찰력은 암석의 일축압축강도 외에 굴착면의 거칠기, 암반의 재료특성, 초기 수직응력, 말뚝의 직경, 암반의 절리 및 풍화도 등에 크게 영향을 받는 것으로 보고되어 있다. 지금까지 개발된 굴착면 거칠기 시스템들은 공기 중에서만 측정가능하므로 현장의 굴착공 내에서 직접 측정하는 것은 불가능하였다. 따라서, 본 연구에서는 수중에서 사용가능한 굴착공 벽면거칠기 측정 시스템(BKS-LRPS)을 개발하였으며, 특수 제작된 보정장치를 통하여 여러 가지 경우에 대한 검증을 수행하였다. 연구결과에 의하면, 개발된 BKS-LRPS는 장치제작조건 및 현장조건을 반영하도록 계획된 검증조건들에 대하여 유효측정영역을 제시할 수 있었다.

Keywords : BKS-LRPS, Effective measurement distance, Rock socketed drilled shafts, Side friction, Side roughness

1 정회원, (주)백경지앤씨 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., KyungSung Univ., ykchoi@ksu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

Horvath et al.(1983), O'Neill & Hassan(1994), Seidel & Collingwood(2001), 이명환 등(2003)의 연구에 따르면 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주변마찰력은 암석의 일축압축강도 외에 굴착면의 거칠기, 암반의 재료특성, 초기 수직응력, 말뚝의 직경, 암반의 절리 및 풍화도 등에 크게 영향을 받는 것으로 보고되어 있다. 지금까지 굴착면의 거칠기 측정을 위한 시스템 개발은 휴스턴 대학교(Liang, 2002; Nam, 2004)와 모나쉬 대학교(Collingwood, 2000) 등에서 연구되어 왔다. 그러나 이러한 시스템들은 공기 중에서만 측정가능하므로 현장의 굴착공 내에서 직접 측정하는 것은 불가능하였다.

본 연구에서는 수중에서 사용가능한 레이저센서 시스템을 개발하였으며 BKS-LRPS(Backyoung-Kyungsung Laser Roughness Profiling System; 이하 BKS-LRPS라 칭함)의 개발에 사용된 소형 BKS-LRPS 시스템을 모형보정 장치를 이용하여 보정하였다. 이 때 거칠기 측정용 시편을 제작하였는데 재질 변화에 따른 실내모형보정실험을 통해 시편 제작이 용이한 재질을 선택하였으며, 현장에서 예상되는 거칠기 형태 4종에 대하여 공기 중과 수중에서 레이저 센서의 거동에 대한 실내모형보정실험을 실시하였다. 또한 측정 시 흔들림, 혼탁도, 빛의 밝기, 측정 대상 물체의 반사성, 거칠기 재질, 거칠기 형태, 측정치의 재현성, 염분도 등에 따른 영향에 대하여 다양하게 연구하였다. 실내 모형보정시스템 개발 및 모형보정실험은 향후 현장 적용 시 측정 결과의 신뢰성 구축을 위하여 선행되어야 할 중요한 연구 성과였다. 거칠기 측정을 위한 실내 모형보정 시스템을 활용하여 소형 BKS-LRPS의 거동을 연구하였다.

2. 굴착공 벽면거칠기 측정장치 및 보정시스템

2.1 굴착공 벽면거칠기 측정장치의 요구 특성

기존의 휴스턴 대학(Nam, 2004)과 모나쉬 대학(Collingwood, 2000)에서 개발한 굴착공의 벽면거칠기 측정 시스템의 장·단점과 국내 대구경 현장타설말뚝의 시공 특성을 고려하여 본 연구에서는 굴착공 벽면거칠기 측정 시스템에 대한 요구 특성들을 다음과 같이 설정하였다.

- ① 유효 측정 거리(Effective measurement distance)
거칠기 측정 장치는 레이저 삼각 측량 거리 측정(Laser

triangulation distance measurement) 기술에 기초하여 디자인되었다. 유효 측정 범위는 물체로부터 20~400mm 이며 측정 오차는 1% 미만 이었다. 또한 말뚝 직경 1,000~3,000mm에도 적용 가능하도록 레이저 센서를 소형화 하여 센서부 중심에서 바(Bar)에 레이저 센서를 부착하였다.

- ② 데이터 전송 속도(Data transfer rate)

현장 적용성을 위하여 빠른 측정 속도에 대하여 신뢰성 있는 데이터의 전송이 가능하였다.

- ③ 측정 해상도(Measurement resolution)

본 장비의 해상도는 0.1mm 이하이었다.

- ④ 칼라 영향 방지 기능(Color blind)

물체 표면 칼라 변화 또는 빛의 밝기에 영향을 받지 않았다. 밝은 빛이나 어두운 빛 등 모든 환경에서 같은 결과를 출력할 수 있도록 하였다.

- ⑤ 깊이 엔코더(Depth encoder)

엔코더는 거칠기 프로파일 측정의 정확성을 향상시키기 위하여 엔코더를 포함하였다. 측정 장치에 부착된 레이저 센서가 상하로 움직이는 거리와 측정 거리 데이터는 정확하게 기록되도록 하였다.

- ⑥ 기계적인 장치(Mechanical accessories)

굴착공 벽면 레이저 거칠기 측정 장치를 적용하기 위하여 특별한 기계적 장치가 디자인되었다. 전원과 데이터 습득 하드웨어는 공기 중 및 수중 모두에서 작동 가능하였다. 특히 센서의 흔들림, 안정적인 전원 공급, 방수 등이 중요하다. 또한 현장 조건에 적합되도록 하였다.

- ⑦ 소프트웨어 인터페이스(Software interface)

사용자가 데이터 습득, 전송 및 분석 등이 편리하도록 시스템화 되었다. 또한 연직도 측정에서도 사용 가능하고 거칠기 데이터를 축소 및 확대하여 볼 수 있도록 하였다. 아울러 5m/분의 측정 속도에서도 신뢰성 있는 결과를 확보하였다.

2.2 레이저 센서

레이저 센서의 소형화, 정밀도 및 유효 측정 거리를 감안하여 기존 시판되는 위치 감응 소자(PSD)를 선택하였

다. 기존 연구자들이 사용한 레이저 센서는 눈에 보이지 않는 적외선 영역(850nm)을 사용함으로써 사용 중에 시각 장애를 줄 수 있다고 판단하였다. 따라서 시각에 치명적인 영향을 피하면서 눈에 보이는 650nm의 가시성 레이저 빔을 사용하는 레이저 센서를 선택하였다. 선정된 레이저 센서의 공기 중에서의 규격을 표 1에 나타내었다.

레이저 센서의 중요 구성은 레이저 다이오드, 렌즈부, 위치감응 소자(PSD) 등이지만, 아날로그/디지털(A/D) 컨버터를 내장한 측정회로와 RS-232/422 변환 장치가 추가적으로 필요하다. PSD에 들어온 레이저의 신호 강도를 증폭한 후, 0~5V 범위로 변경한다. 그리고 A/D컨버터를 이용하여 디지털 데이터로 변환시킨다. 이들 데이터를 다시 RS-232나 422 변환기를 통해 2바이트 데이터로 초당 200번 출력하게 된다. 출력 보정회로가 내장되어 있다는 점에 착안하여 BKS-LRPS를 위한 레이저 센서 시스템을 제작하였다. 이 때 레이저 센서는 굴착공의 심도와 연직도에 따라 센서부는 케이싱이나 소켓부에 부딪치지 않도록 제작하였다. 그리고 레이저 센서 시스템의 레이저 빔의 측정 경로는 그림 1과 같이 측정된다.

2.3 실내 모형보정시스템

센서 검증시스템을 통하여 선정된 센서를 검·교정(박

봉근, 2007)한 후 2차원 모형보정시스템을 이용하여 검·교정하였다. 이 시스템에서는 현장상황을 유사화할 수 있도록 하였다. 또한, 측정위치를 확인할 수 있는 엔코더 시스템, 레이저 센서의 방수 시스템 및 전자 회로용 보드를 대형 BKS-LRPS 시스템과 동일한 것을 사용하였다. 그림 2에는 소형 BKS-LRPS의 모형보정시스템을 나타내었다.

모형보정시스템은 측정 시 레이저 빔의 상태 또는 공기 중에서 수중으로 센서가 이동할 때의 상태 등을 직접 육안으로 관찰할 수 있도록 투명 아크릴로 제작하였다. 또한 레이저 센서는 높은 수압에서도 완벽하게 방수되어야 하고 현장에서 예상되는 충격 등에도 손상되지 않도록 스테인레스 스틸 케이스에 안전하게 장착시켰다. 모형 용기는 수중 측정이 가능하고 수압에 견딜 수 있도록 2중으로 보강하였다. 측정위치 확인용 엔코더는 센서를 하부로 이동시키는 핸들에 부착하여 엔코더 회전수와 핸들의 회전수를 길이로 환산하여 실제 길이를 측정할 수 있도록 고안하였다.

그림 1에는 모형보정시스템에서 사용된 레이저 센서(㉑)와 모형체 시편(㉒)을 보여준다. 핸들(㉓)을 회전시켜 상하이동대(㉔)를 통하여 레이저센서(㉑)가 상·하로 이동할 때 발생하는 진동으로 인하여 측정값에 영향이 미치지 않도록 하여야 한다. 검·교정 시편은 모형체 벽

표 1. 선정된 레이저 센서 규격

항 목	규 격
측정범위 (measurement range)	20 ~ 400mm
절대오차 (absolute accuracy)	±0.5% 20 ~ 200mm ±1% 200 ~ 400mm
재현성 (repeatability)	±0.25% 20 ~ 200mm ±0.5% 200 ~ 400mm
해상도 (resolution)	0.1mm
광원 (laser source)	650nm - 1.2mW
안전 등급 (safety class)	Class 2
작동 온도 (operating temperature)	-20 ~ 50℃
전원 (power requirements)	10 ~ 30V DC

註. 공기 중에서의 측정값 기준임.

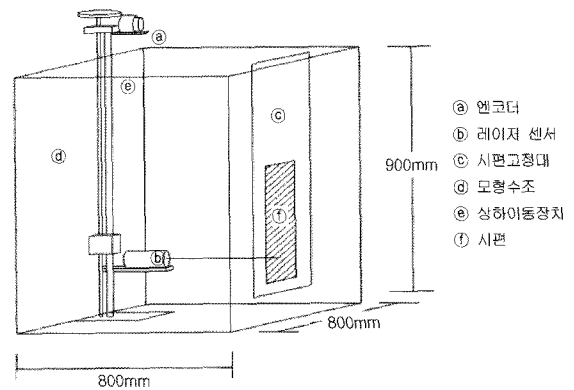


그림 2. 소형 BKS-LRPS의 실내 모형보정시스템

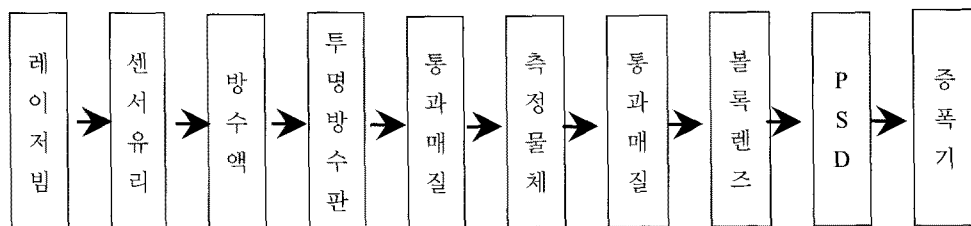


그림 1. BKS-LRPS에서 레이저 빔의 측정 경로

면에 수직도를 유지한 상태에서 튼튼하게 고정되어야 하므로 알루미늄 지지판(㉔)에 모형체 시편을 접착제로 고정시켰다.

3. 굴착공벽면 거칠기 측정장치의 보정실험 계획 및 절차

3.1 레이저센서 보정 실험계획 및 절차

레이저 센서에 관한 기존의 연구들은 대부분 공기 중에서 실시되었다. 그러나 말뚝 시공과정에서 굴착공에 지하수가 있을 때 기존의 레이저 센서를 이용하여 굴착공 벽면거칠기를 측정할 수 없다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 레이저센서 시스템을 제작하였으며 공기 중 조건 및 수중 조건에서의 보정실험계획을 표 2에 나타내었다.

레이저 센서를 이용하여 공기 중 조건, 수중 조건, 혼탁도 조건 및 방수 시스템 조건 등에서 레이저 측정값의 변화를 검토하였다. 먼저, 디지털 버니앰캘리퍼스의 값을 기준으로 10mm 단위로 레이저 센서를 수평으로 이동시킬 때 레이저 센서에서 측정된 값을 모니터링 하였다. 이와 같은 실험을 반복하여 데이터의 재현성을 검토하였다. 또한 시공현장에서 필연적으로 나타날 수 있는 수중 환경에 대한 적용성 및 탁도에 따른 레이저 센서의 유효 측정 영역 등에 대하여 검토하였다. 센서 보정시스템은 흔들림이 없고, 공기 및 수중 조건 모두에서 사용 가능하며, 단지 디지털 버니앰캘리퍼스의 기준값에 대하여 일차원적으로 검·교정할 수 있었다.

3.2 굴착공 벽면거칠기 측정장치의 보정실험 계획

본 연구에서는 모형보정시스템을 이용하여 ① 재질

변화에 따른 실내모형보정실험, ② 공기 중/수중에서 측정공간의 조도 및 방수 시스템에 따른 실내 모형보정실험, ③ 공기 중과 수중에서 유효 측정영역 확인을 위한 실내 모형보정실험, ④ 염분농도에 대한 실내 모형보정실험, ⑤ 맑은 물에서 혼탁도 변화에 따른 실내 모형보정실험, ⑥ 소금물(3%)에서 혼탁도 변화에 따른 실내 모형보정실험, ⑦ 공기 중 및 수중에서 거칠기 형태에 따른 실내 모형보정실험, ⑧ 측정체 재질 표면의 반사도에 따른 실내 모형보정실험 등에 대하여 실험계획을 수립하였다. 상기의 실험 계획을 요약 정리하여 표 3에 나타내었다. 그리고 거칠기 형상을 변화시켜 제작한 모형시편을 그림 3에 나타내었다.

3.3 굴착공 거칠기 측정장치의 보정실험 절차

모형보정실험 절차를 계열별로 설명하면 다음과 같다. 여기서 그림 2에 있는 모형보정시스템을 사용하였으며, 측정 시편을 시편 고정대에 부착시키고 엔코더와 레이저 센서를 사용하여 다양한 보정조건에서 거칠기를 3회씩 반복 측정하였다. MC 1 조건에서는 재질 변화에 따른 레이저 센서의 거동을 확인하기 위하여 실시하였다. 이때 사용된 재질은 플라스틱, 알루미늄, 시멘트 그리고 석고와 같이 4종이었으며 시편-센서 간 거리는 83mm와 178mm로 하여 공기 중과 수중 조건에서 실시하였다.

MC 2 조건에서는 측정공간의 조도 변화에 따른 레이저 센서의 거동을 확인하기 위하여 실시하였다. 시공 중 말뚝 내부의 조도 변화를 고려하여 실험을 실시하였다. 이 때 사용된 시편은 그림 3의 시편 A에 대하여 실시하였다. 또한 시편-센서 간 거리를 144mm 떨어뜨린 후 공기 중과 수중 조건에서 실시하였다. 아울러 어두운 조건과 밝은 조건, 투명 방수판 미부착, 투명 방수판 부착, 투명

표 2. 레이저 센서 보정실험을 위한 실험계획

구 분	공 기 중			수 중		비 고
	투명 방수판 미부착	투명 방수판 부착	방수 시스템	수중	카올린 혼탁액	
				방수시스템		
SC - 1	㉔	-	-	-	-	a→b
SC - 2	-	㉔	-	-	-	a→b→c→b
SC - 3	-	-	㉔	-	-	a→d→c→b
SC - 4	-	-	-	㉔	-	a→d→c→e
SC - 5	-	-	-	-	㉔	a→d→c→f

비고; a : 레이저센서, b : 공기중, c : 투명방수판, d : 방수액, e : 수중, f : 카올린혼탁액, → : 진행방향

표 3. 실내 모형보정실험 계획표

실험계열	실험종류	실험조건 분류		기호구분	
		측정조건	형상 및 재질		
MC 1	재질 변화에 따른 보정실험	측정조건	공기중 및 수중	MC 1 - 1 (a) 	
		형상	평면		
		재질	플라스틱(1), 알루미늄(2), 시멘트(3), 석고(4)		
		측정거리	83mm(a), 178mm(b)		
MC 2	측정조도 및 방수시스템에 따른 보정실험	측정조건	공기 중(1), 수중(2)	MC 2 - 1 a - 1 	
		형상 및 재질	평면 및 알루미늄		
		방수상태	투명방수판 미부착(1), 투명방수판부착(2), 방수시스템(3)		
		측정조도	밝음(a), 어두움(b)		
MC 3	유효측정 영역 확인용 보정실험	측정조건	공기 중(a), 수중(b)	MC 3 - 1 (a) 	
		형상 및 재질	평면 및 알루미늄		
		측정거리 (mm)	공기 중 (a)		67.7(1), 87.5(2), 107.7(3), 127.7(4), 147.7(5), 167.7(6), 187.7(7), 207.7(8), 227.7(9), 247.7(10), 267.7(11), 287.7(12), 307.7(13), 327.7(14), 347.7(15), 367.7(16), 387.7(17), 427.7(18), 447.7(19), 467.7(20)
			수중 (b)		78.0(1), 128.0(2), 178.0(3), 228.0(4), 258.0(5), 288.0(6), 318.0(7), 348.0(8), 378.0(9), 408.0(10), 438.0(11)
MC 4	소금물 농도에 따른 보정실험	측정조건	공기 중 및 소금물	MC 4 - 1 	
		형상 및 재질	평면 및 알루미늄		
		측정거리	108mm		
		소금물농도	0%(1), 1%(2), 2%(3), 3%(4)		
MC 5	맑은 물에서 혼탁도에 따른 보정실험	측정조건	맑은 물	MC 5 - (a)-1 	
		형상 및 재질	평면 및 알루미늄		
		혼탁도(NTU)	측정거리(mm)		
		10.78(a)	84.7(1), 105.6(2), 127.2(3), 146.6(4), 167.7(5), 190.1(6), 208.9(7), 232.2(8), 251.0(9), 271.9(10)		
		18.03(b)	83.9(1), 108.6(2), 125.5(3), 146.5(4), 168.7(5), 196.2(6), 209.3(7)		
		27.20(c)	87.9(1), 105.4(2), 127.4(3), 147.4(4), 167.9(5)		
		43.10(d)	84.3(1), 105.4(2), 127.9(3)		
63.30(e)	85.8(1), 108.1(2)				
MC 6	소금물(3%)에서 혼탁도	측정조건	소금물(3%)	MC 6 - (a)-1 	
		형상 및 재질	평면 및 알루미늄		
		혼탁도(NTU)	측정거리(mm)		
		10.78(a)	84.6(1), 106.4(2), 126.7(3), 146.3(4), 171.3(5), 193.1(6), 207.1(7), 229.8(8)		
		21.60(b)	85.8(1), 103.2(2), 125.4(3), 146.3(4), 169.9(5), 190.1(6), 214.1(7), 230.8(8)		
		32.70(c)	84.0(1), 104.3(2), 126.9(3), 144.1(4), 169.7(5)		
		43.10(d)	81.0(1), 103.3(2)		
63.30(e)	85.1(1), 103.1(2)				
MC 7	거칠기 형상에 따른 보정실험	측정조건	공기 중 및 수중	MC 7 - 1 	
		재질	알루미늄		
		형상	평면(1), 직각(2), 삼각(3), 원형(4), 사다리(5)		
MC 8	측정체 반사도에 따른 보정실험	측정조건	공기 중 및 수중	MC 8 - 1 	
		형상 및 재질	평면 및 플라스틱		
		측정거리	83mm		
		페인트무광처리	무처리(1), 1/2 처리(2), 전부 처리(3)		

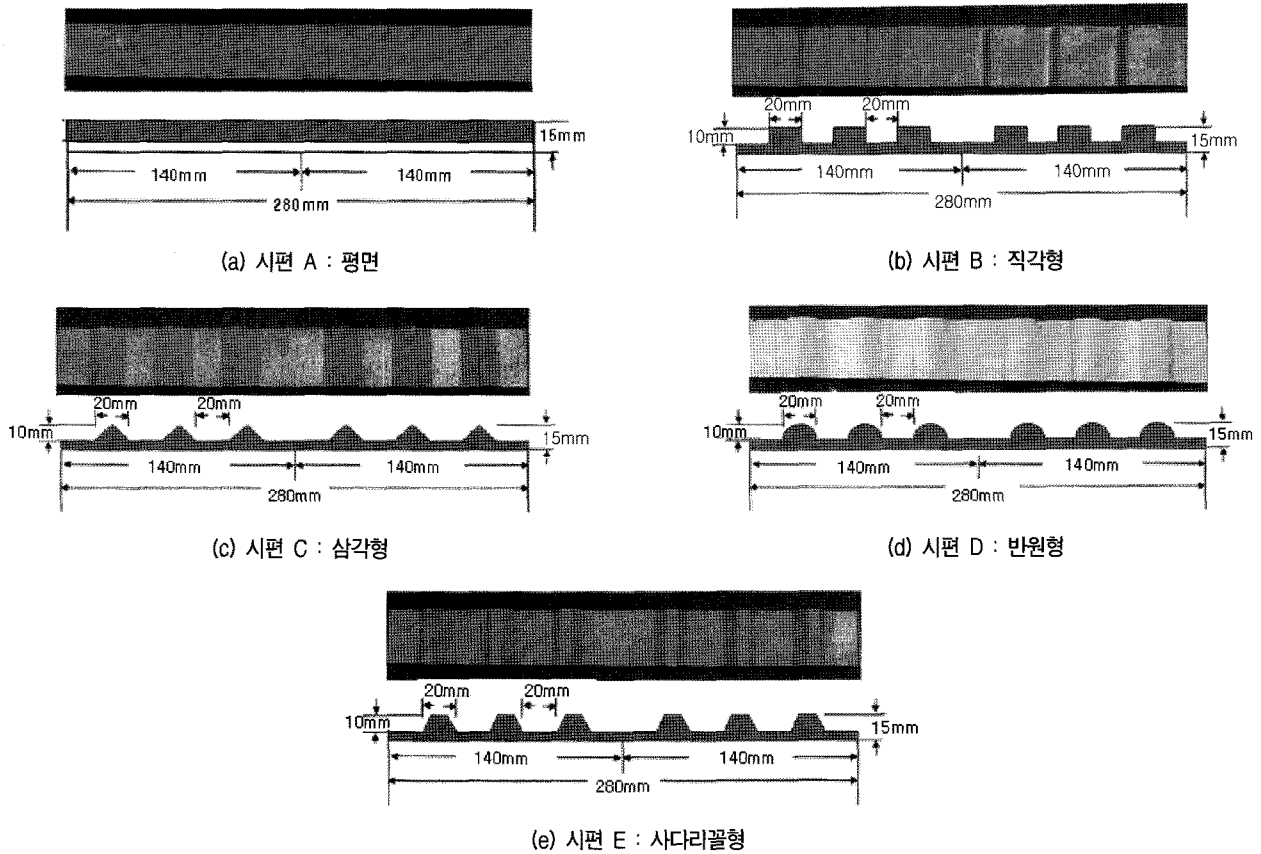


그림 3. 거칠기 형상에 따른 시편의 종류

방수판 및 방수액 조건 등으로 변화시켜 측정하였다.

MC 3 조건에서는 공기 중과 수중 각각에서 레이저 센서의 유효 측정 영역을 검증하기 위하여 실시하였다. 실험은 시공 중 말뚝 내부에서 굴착공 벽면과 레이저 센서의 거리 변화를 고려하여 실험을 실시하였으며 소형 BKS-LRPS 레이저 센서의 측정 한계를 확인하기 위하여 실시하였다. 이때 사용된 시편은 그림 3의 시편 A에 대하여 실시하였다. 또한 공기 중과 수중에서의 유효 측정 영역에서의 차이를 고려하여 공기 중과 수중 조건 각각에서 실시하였다.

MC 4 조건에서는 소금물의 농도 변화에 따른 레이저 센서의 거동을 확인하기 위하여 실시하였다. 이 실험은 육상부가 아닌 해상에서 말뚝 시공이 이루어지는 점을 고려하여 시편 A에 대하여 실시되었다. 또한 시편-센서 간 거리는 약 108mm인 상태에서 공기 중과 소금물 농도 0, 1, 2 그리고 3% 조건에서 실시하였다.

MC 5 조건에서는 맑은 물에서 혼탁도 변화에 따른 레이저 센서의 거동을 확인하기 위하여 실시하였다. 이 실험은 육상부에서 말뚝 시공이 이루어지는 경우 말뚝 내부의 혼탁도를 고려하여 유효 측정 영역을 확인하기

위하여 실시하였다. 또한 이 실험은 맑은 물에서 혼탁도 변화에 기인한 소형 BKS-LRPS 레이저 센서의 측정 한계를 확인하기 위하여 실시하였다. 이때 사용된 시편은 시편 A이다. 본 연구에서는 학생 교재용으로 판매되고 있는 싯트질 점토 0.005N를 맑은 물 0.1N에 분산시킨 원액을 실내 모형검증실험 장치의 맑은 물에 일정량씩 투입하여 혼탁도를 증가시켰다. 그리고 탁도계(TN-100)를 사용하여 각각의 혼탁도를 측정하였다. 또한 각각의 혼탁도에서 측정 한계 영역을 확인하기 위해 측정 거리를 변화시켜 실시하였다.

MC 6 조건에서는 소금물에서 혼탁도 변화에 따른 레이저 센서의 거동을 확인하기 위하여 실시하였다. 이 실험은 해상부에서 말뚝 시공이 이루어지는 경우 말뚝 내부의 혼탁도를 고려하여 유효 측정 영역을 확인하기 위하여 실시하였다. 또한 이 실험은 소금물에서 혼탁도 변화에 기인한 소형 BKS-LRPS 레이저 센서의 측정 한계를 확인하기 위하여 실시하였다. 이때 사용된 시편은 시편 A이다. 또한 측정 방법은 MC 5 조건과 유사하게 실시하였다.

MC 7 조건에서는 공기 중과 수중에서 거칠기 형상에 따른 레이저 센서의 거동을 확인하기 위하여 실시하였다.

굴착공 벽면의 거칠기 형상을 평면, 직각, 삼각, 원형 및 사다리 형태로 모사하여 시편을 제작하였다. 표준 시편의 거칠기 형태를 레이저 센서로 측정된 결과와 비교하여 현장에서 측정된 결과를 해석하는데 활용하기 위하여 실시하였다. 이 때 그림 2의 시편 A, 시편 B, 시편 C, 시편 D 그리고 시편 E의 5종을 사용하였다. 여기서 재질 변화에 따른 실내 모형검증실험 결과를 근거로 하여 표준시편 제작이 용이한 알루미늄 재질을 선택하였다.

MC 8 조건에서는 공기 중과 수중에서 거칠기 면의 반사정도에 따른 레이저 센서의 거동을 확인하기 위하여 실시하였다. 반사정도를 정량적으로 확인하지 못하였으나 반사도가 있는 구간과 없는 구간으로 설정하여 제작된 1종에 대하여 실시하였다. 또한 공기 중과 수중 조건에서 비교 실험하였다.

4. 보정실험 결과 및 분석

4.1 레이저센서의 보정실험

현장타설말뚝의 시공 과정에서는 공기 중에서 물속으로 측정 매질 변화에 의한 영향이 있을 것으로 판단된다. 레이저센서 보정실험 결과 방수 조건 및 매질 변화에 따른 보정이 필요한 것으로 나타났다. 보정계수는 참값과 측정값의 비로 정의할 수 있으며 레이저센서 보정

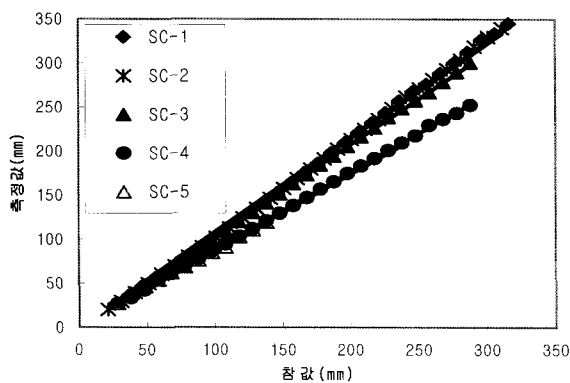


그림 4. 레이저센서 보정실험 결과 요약

표 4. 측정 조건에 따른 회귀분석 결과

구분	회귀식	R ²	비 고	보정계수
SC-1	$y=1.0792x$	0.9983	공기 중 투명 방수판 미부착	1.000
SC-2	$y=1.0727x$	0.9978		투명 방수판 부착
SC-3	$y=1.037x$	0.9995	방수시스템	1.041
SC-4	$y=0.8805x$	0.9998	맑은 물	1.226
SC-5	$y=0.8684x$	0.9919	물 혼탁도 19.2NTU	1.243

실험결과를 그림 4에 나타내었으며 보정계수를 표 4에 요약하였는데 여기서 공기 중에서 투명 방수판 부착 유무에 따른 보정계수는 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. 이러한 결과는 레이저 측정값의 경우 방수 시스템에 의한 영향보다는 매질 변화에 따른 영향이 크다는 것을 알 수 있었다.

여기서 그러나 레이저센서 보정시스템의 측정 한계로 인하여 유효 측정 영역을 규명하기에는 한계가 있는 것으로 판단되었다. 레이저센서 보정실험은 동일한 점에 대하여 거리 변화를 측정하는 1차원적 실험이므로 실험적 오차 요인을 내포하고 있다고 판단되었으므로 표 4에 요약한 보정계수를 그대로 사용하는 것은 곤란할 것으로 생각되었다.

따라서 실내 모형보정실험 등에 의하여 깊이방향으로 변화를 줄 수 있는 2차원적 실험에서 얻어진 많은 데이터를 축적하여 통계적 분석 방법을 바탕으로 유효 측정영역 및 보정계수를 결정하는 것이 바람직할 것으로 생각되었다.

4.2 재질 변화에 따른 검증실험(MC1 계열)

측정된 결과를 그림 5에 나타내었는데 시편-센서 간 거리 참값이 83mm와 178mm일때 공기 중과 수중에서

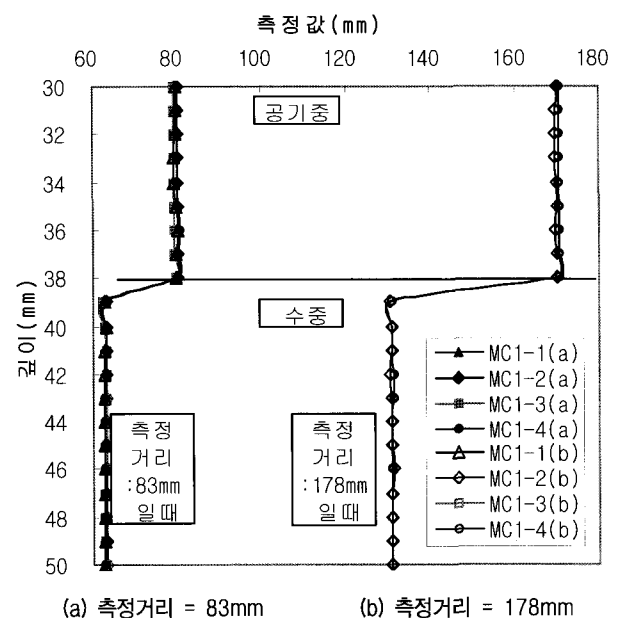


그림 5. 재질 변화에 따른 측정결과 비교

의 레이저 프로파일링을 동시에 나타내었다. 그림에서와 같이 공기 중과 수중 조건에서 재질 변화에 따른 변화는 없는 것으로 판단되었다. 측정결과(그림 5)를 통계적으로 분석하였다. 여기서 MC 1-1과 MC 1-2의 표준편차는 MC 1-3과 MC 1-4보다 전반적으로 낮은 값을 보였는데 이는 시멘트와 석고 시편의 성형 과정에서 양생 시 시편 표면에서의 기포 발생에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 공기 중과 달리 수중에서는 재질의 변화에 따른 표준편차 차이보다는 시편-센서간 거리 참값 변화에 영향이 더 큰 것으로 판단된다. MC 1-1(a)의 경우 공기 중 평균과 수중 평균의 차(㉠-㉡)가 약 17mm, MC 1-1(b)의 (㉢-㉣)이 약 39mm로 재질 변화에 관계없이 거의 동일한 것으로 나타났다. 또한 공기 중 표준편차와 수중 표준편차는 MC 1-3(a)의 0.31을 제외하고는 0.13 내에서 분포하였다. 따라서 이러한 분석 결과를 근거로 할 때 재질 변화에 따른 레이저 센서의 측정값 차이는 없는 것으로 판단되었다.

4.3 조도 및 방수 시스템에 따른 검증실험(MC 2 계열)

MC 2 조건에서 측정된 결과로부터 측정공간의 조도 변화, 투명 방수판 부착, 방수액, 공기 중에서 방수시스템, 그리고 수중에서 방수시스템에 따른 모형보정실험 결과에 대하여 고찰하였다.

4.3.1 측정공간의 조도에 따른 영향 분석

그림 6은 공기 중에서의 조도에 따른 3회 측정값의

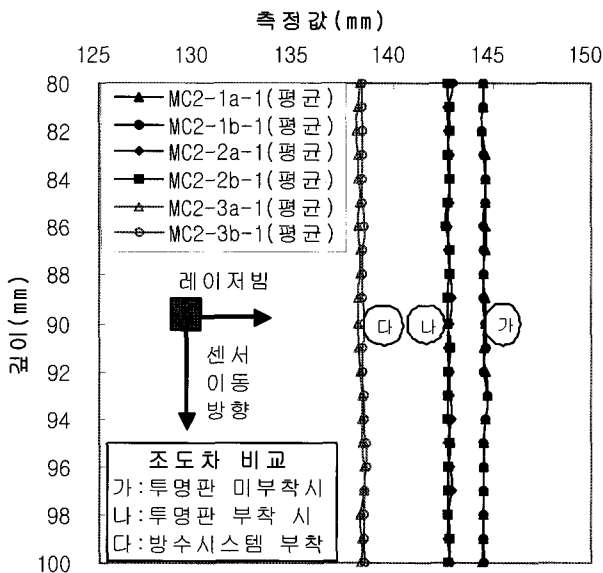


그림 6. 공기 중에서 방수조건 적용 시 조도의 영향

평균치에 대한 레이저 프로파일링 거동을 보여주고 있다. 여기서 기호 ㉠, ㉡, ㉢는 각각 투명방수판 미부착 시, 투명방수판 부착 시 그리고 방수시스템(방수액 + 투명방수판) 적용 시 측정치이다. 측정공간의 조도 변화에 따른 모형보정실험 결과로부터 평균표준편차의 차이 0.01mm 수준에서 측정공간의 조도 변화에 따른 영향이 없음을 알 수 있었다.

그림 7에는 공기 중과 수중에서의 방수시스템 사용 시 밝은 상태(MC 2-3a-2 조건)와 어두운 상태(MC 2-3b-2 조건)에서 평균값에 대하여 레이저 프로파일링 거동을 비교하여 나타내었다. 공기 중에서 평균값은 139.4mm와 139.3mm로 나타났으며, 공기 중에서의 평균표준편차는 모두 0.13 mm로 나타났다. 그리고 수중에서의 평균값은 모두 108.0mm로 나타났으며, 수중에서의 평균표준편차는 0.10mm와 0.08mm로 나타났다. 이러한 결과에 대하여 평균표준편차의 차이는 0.02mm를 보였다. 따라서 수중 조건에서 측정공간의 조도 변화에 따른 모형보정실험 결과로부터 측정공간의 조도 변화에 따른 영향이 없음을 알 수 있었다.

4.3.2 방수시스템에 따른 효과 분석

소형 BKS-LRPS의 레이저 센서를 수중에서 사용하기 위해서는 수압에 견딜 수 있는 투명 방수판이 필수적이다. 따라서 이러한 투명 방수판을 부착하는 경우와 부착하지 않는 경우에 대한 레이저 측정값의 거동을 파악하는 것이 매우 중요하다. 표 5에 공기 중 및 수중에서 방수시스템 효과에 대한 실내 모형보정실험 결과를 나타

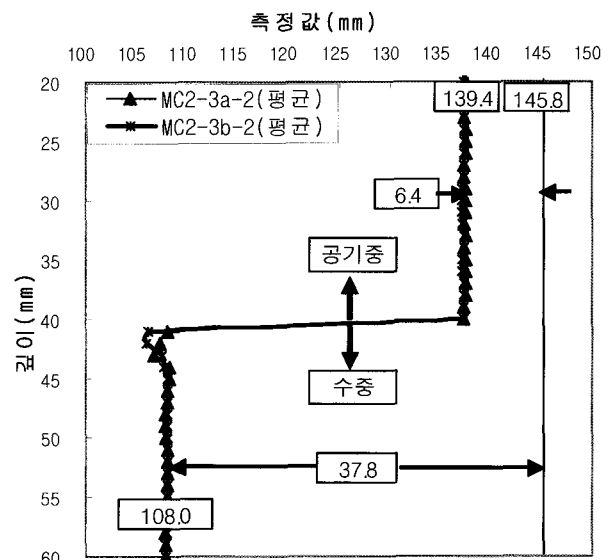


그림 7. 공기 중/맑은 물에서 방수시스템 사용 시 조도의 영향

표 5. 방수시스템 효과에 대한 분석 결과

측정조건 분석항목	공기중						수중		비 고
	투명 방수판 미부착		투명 방수판 부착		투명 방수판 및 방수액		투명 방수판 및 방수액		
	A (MC 2-1a-1)	B (MC 2-1b-1)	C (MC 2-2a-1)	D (MC 2-2b-1)	E (MC 2-3a-1)	F (MC 2-3b-1)	G (MC 2-3a-2)	H (MC 2-3b-2)	
참값	144.5	144.5	144.5	144.5	144.5	144.5	145.8	145.8	
측정값 평균	144.5	144.5	142.7	142.7	138.0	138.3	108.0	108.0	
A-C	1.8	--	--	--	--	--	--	--	방수판의 공기 증 효과
B-D	--	1.8	--	--	--	--	--	--	
C-E	--	--	4.7	--	--	--	--	--	방수액의 공기 증 효과
D-F	--	--	--	4.4	--	--	--	--	
E-G	--	--	--	--	30.0	--	--	--	방수시스템의 수중 효과
F-H	--	--	--	--	--	30.3	--	--	
A-G	--	--	--	--	--	--	37.8	--	방수판의 수중효과
B-H	--	--	--	--	--	--	--	37.8	
A-E	6.5	--	--	--	--	--	--	--	방수시스템의 공기 증 효과
B-F	--	6.2	--	--	--	--	--	--	
평균	1.8		4.6		30.2		37.8		
	6.4		--		--		--		
A/B	1.000	--	--	--	--	--	--	--	공기 증 조도 보정계수(1.000)
C/D	--	--	1.000	--	--	--	--	--	
E/F	--	--	--	--	0.998	--	--	--	방수시스템의 조도 보정계수(1.000)
G/H	--	--	--	--	--	--	1.000	--	
A/C	--	--	1.012	--	--	--	--	--	공기 중 판수판 보정계수(1.013)
B/D	--	--	--	1.013	--	--	--	--	
A/E	--	--	--	--	1.047	--	--	--	공기중 방수시스템 보정계수(1.046)
B/F	--	--	--	--	--	1.045	--	--	
A/G	--	--	--	--	--	--	1.350	--	수중 방수시스템 보정계수(1.350)
B/H	--	--	--	--	--	--	--	1.350	

내었다.

(1) 공기 중 방수판 부착 시

그림 6에서 기호 ㉔와 ㉕는 각각 밝은 상태에서 투명 방수판 미부착 조건(MC 2-1a-1)과 부착 조건(MC 2-2a-1)에서의 측정 결과를 보여주는 데 공기 중에서 투명 방수판을 사용하였을 때 레이저 측정값이 1.8mm(참값: 144.5mm 일 때) 감소된다는 사실을 알 수 있었다.

또한 그림 6에서 기호 ㉔와 ㉕는 각각 어두운 상태에서 투명 방수판 미부착 조건(MC 2-1b-1)과 부착 조건(MC 2-2b-1)에서의 측정 결과를 보여주는 데 공기 중에서 투명 방수판을 사용하였을 때 레이저 측정값이 1.8mm(참값: 144.5mm 일 때) 감소된다는 사실을 알 수 있었다.

따라서 측정공간의 조도, 즉 빛의 밝기에 따른 영향은 거의 없는 것으로 판단되었으나 투명 방수판에 따른 영

향은 있다고 판단되었다.

또한 표 5에서 참값 144.5mm일 때 투명 방수판 미부착시(MC 2-1a-1과 MC 2-1b-1)와 투명 방수판 부착시(MC 2-2a-1과 MC 2-2b-1)의 측정값 평균의 차이(A-C 및 B-D)는 1.8mm이고, 그때의 비인 A/C와 B/D의 평균 값은 1.013으로 나타났으며 이 값을 소형 BKS-LRPS의 공기 중 투명 방수판에 대한 보정 계수라고 할 수 있다.

(2) 공기 중 방수액 사용 시

그림 6에서 기호 ㉔와 ㉕는 각각 밝은 상태에서 방수액을 사용하지 않은 조건(MC 2-2a-1)과 사용한 조건(MC 2-3a-1)에서의 측정 결과를 보여준다. 공기 중에서 방수액을 사용하였을 때 레이저 측정값이 4.7mm(참값: 144.5mm 일 때) 감소된다는 사실을 알 수 있었다.

또한 그림 6에서 기호 ㉔와 ㉕는 각각 어두운 상태에

서 방수액을 사용하지 않은 조건(MC 2-2b-1)과 사용한 조건(MC 2-3b-1)에서의 측정 결과를 보여준다. 공기 중에서 방수액을 사용하였을 때 레이저 측정값이 4.6mm(참값: 144.5mm일 때) 감소된다는 사실을 알 수 있었다.

측정공간의 조도, 즉 빛의 밝기에 따른 영향은 거의 없는 것으로 판단되었으나 방수액에 따른 영향은 있다고 판단되었다.

또한 표 5에서 참값 144.5mm일 때 방수액을 사용하지 않은 경우(MC 2-2a-1과 MC 2-2b-1)와 사용한 경우(MC 2-3a-1과 MC 2-3b-1)의 측정값 평균의 차이(C-E 및 D-F)는 4.6mm이고, 그 때의 비인 C/E와 D/F의 평균값은 1.033으로 나타났으며 이 값이 소형 BKS-LRPS의 공기 중 방수액에 대한 보정 계수이다.

(3) 공기 중 방수시스템 사용 시

그림 6에서 기호 ㉔와 ㉕는 각각 밝은 상태에서 방수 시스템을 사용하지 않은 경우(MC 2-1a-1)와 사용한 경우(MC 2-3a-1)에서의 측정 결과를 보여준다. 그 결과 공기 중에서 방수 시스템을 사용하였을 때 레이저 측정값이 6.5mm(참값: 144.5 mm일 때) 감소된다는 사실을 알 수 있었다.

또한 그림 6에서 기호 ㉖와 ㉗는 각각 어두운 상태에서 방수 시스템을 사용하지 않은 경우(MC 2-1b-1)와 사용한 경우(MC 2-3b-1)에서의 측정 결과를 보여준다. 그 결과 공기 중에서 방수 시스템을 사용하였을 때 레이저 측정값이 6.2mm(참값: 144.5mm일 때) 감소된다는 사실을 알 수 있었다.

따라서 측정공간의 조도, 즉 빛의 밝기에 따른 영향은 거의 없는 것으로 판단되었으나 방수시스템에 따른 영향은 있다고 판단되었다.

또한 표 5에서 참값 144.5mm일 때 방수시스템을 사용하지 않은 경우(MC 2-1a-1과 MC 2-1b-1)와 사용한 경우(MC 2-3a-1과 MC 2-3b-1)의 측정값 평균의 차이(A-E 및 B-F)는 6.5mm와 6.2mm이고, 그것의 평균은 6.4mm를 보였다. 그 때의 비인 A/E와 B/F의 평균값은 1.046으로 나타났으며 이 값이 소형 BKS-LRPS의 공기 중 방수시스템에 대한 보정 계수가 된다.

(4) 수중 방수시스템 사용 시

표 5에는 공기 중 및 수중에서 방수시스템 효과에 대한 실내 모형보정실험 결과를 나타내었다. 표 5에서 측정조건 G, H의 측정결과를 그림 7에 도시하였다. 그림

7은 공기 중과 수중의 밝은 상태에서 방수시스템을 사용한 경우(MC 2-3a-2)에서의 측정 결과를 보여준다. 수중에서 방수 시스템을 사용한 경우의 레이저 측정값이 공기 중에서 방수시스템을 사용하지 않은 경우에 비하여 37.8mm(참값: 145.8mm일 때) 감소된다는 사실을 알 수 있었다.

또한 그림 7은 공기 중과 수중의 어두운 상태에서 방수시스템을 사용한 경우(MC 2-3b-2)에서의 측정 결과를 보여준다. 수중에서 방수 시스템을 사용한 경우의 레이저 측정값이 공기 중에서 방수시스템을 사용하지 않은 경우에 비해 37.8mm(참값: 145.8mm일 때) 감소된다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 앞에서 언급한 바와 같이 측정공간의 조도, 즉 빛의 밝기에 따른 영향은 거의 없는 것으로 판단되었으나 수중에서 방수시스템에 따른 영향은 있다고 판단되었다.

또한 표 5에서 참값 145.8mm일 때 방수시스템을 사용하지 않은 경우(참값: 145.8mm)와 사용한 경우(MC 2-3a-2와 MC 2-3b-2)의 측정값 평균의 차이(A-G 및 A-H)는 37.8mm를 보였다. 그 때의 비인 A/G와 A/H의 평균값은 1.350으로 나타났으며 이 값이다. 따라서 1.350을 소형 BKS-LRPS의 수중 방수시스템에 대한 보정 계수이다.

4.3.3 방수 시스템에 대한 보정계수 결정

표 5에서 MC2 계열의 모형보정실험 결과를 종합 분석한 결과 다음과 같이 요약할 수 있었다.

- ① 조도 즉 빛의 밝기에 따른 영향은 없는 것으로 나타났으며 따라서 보정 계수를 별도로 고려할 필요가 없다.
- ② 방수시스템에 따른 영향이 있는 것으로 판단되었으며, 측정영역(공기 중, 수중) 및 방수상태(방수판, 방수액 등)에 따른 보정 계수를 산정할 수 있었다.

소형 BKS-LRPS에 대한 레이저 센서 시스템의 조도 및 방수시스템에 대한 보정 계수를 표 6과 같이 제안할 수 있었다. 여기서 레이저센서의 방수시스템, 굴착공의 수중에서의 매질변화 등에 대한 보정계수는 1.350으로 나타났는데 이는 레이저센서의 보정실험에서 구한 보정계수 1.226(표 4 참조)과는 다소 상이하였다. 이는 레이저 센서 보정시스템의 한계(측정거리의 제한, 1차원적 실험, 측정회수의 제한 등)에 기인한 것으로 보이며

표 6. 조도와 방수상태에 따른 보정 계수

조 건		구 분	참값 (I)(mm)	측정값 (II)(mm)	보정계수 (I/II)	비 고
조도			144.5	144.5	1.000	A/B, C/D, E/F, G/H
			142.7	142.7		
			138.0	138.3		
			108.0	108.0		
방수 상태	공기 중	방수판	144.5	142.7	1.013	A/C, B/D
			144.5	142.7		
		방수액	144.5	138.0	1.033	C/E, D/F
			144.5	138.3		
	수 중	방수시스템	144.5	138.0	1.046	A/E, B/F
			144.5	138.3		
		방수시스템	145.8	108.0	1.350	A/G, B/H
			145.8	108.0		

로 보정계수 1.226은 레이저센서의 활용가능성 및 매질 변화에 따른 보정계수의 필요성을 제공하는데 기여한 것으로 보아야 할 것이다.

소형 BKS-LRPS를 이용하여 구한 측정값으로 실제거리를 구하는 절차는 다음과 같다. 예를 들어 수중에서 측정값이 108.0mm라고 가정할 경우 수중에서의 보정계수 1.350을 적용하면 실제 측정 거리는 다음과 같다.

실제 측정거리

= 수중에서 방수시스템 사용 시 측정값 x 수중에서 방수시스템에 대한 보정계수

= 108.0mm x 1.350

= 145.8mm

= 공기 중 참값

4.4 유효 측정영역 보정실험(MC3 계열)

소형 BKS-LRPS의 실내 모형보정시스템을 활용하여 공기 중 및 수중에서 유효 측정영역을 보정하기 위하여 표 3의 실험 계획에 따라 실내 모형보정실험을 수행하였다. 또한 앞에서 설명한 소형 BKS-LRPS 레이저 센서의 보정시스템에 의한 유효 측정 영역 결과를 검증하였다.

(1) 공기 중

그림 8에서 참값 387.7mm까지는 일정한 증가 경향을 보였으나 427.7 mm이상의 참값에서는 427.7mm일 때 389.8mm, 참값이 447.7 와 467.7mm일 때는 400.0mm의 측정값으로 일정하게 나타났다. 이것은 레이저 센서 측

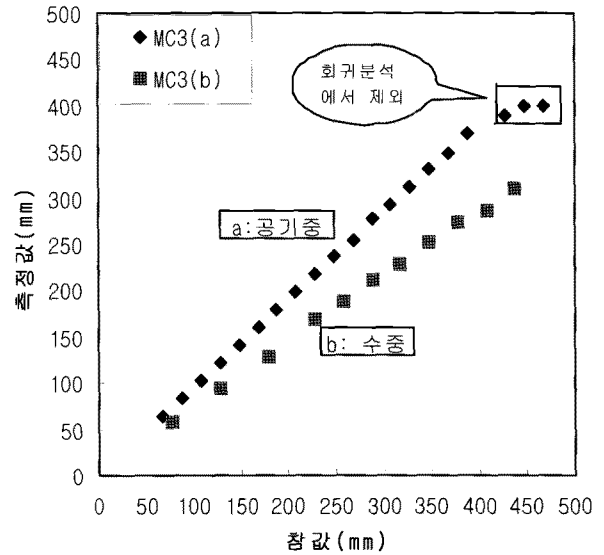


그림 8. 공기 중 및 수중에서 유효 측정영역 결정을 위한 측정결과

정값으로 400mm이상에서는 측정 영역을 벗어나 측정되지 않음을 알 수 있었다. 공기 중에서 참값이 67.7~387.7mm 구간에 대한 회귀분석 결과 얻어진 일차방정식은 $y=0.9478x$ 이고, 회귀분석에 의한 신뢰도는 $R^2=0.9988$ 로 나타났다. 이러한 결과로부터 공기 중에서 유효 측정영역은 참값 67.7~387.7mm 구간으로 신뢰도가 높은 직선성이 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 개발한 소형 BKS-LRPS의 유효 측정영역은 400mm까지 사용할 수 있는 것으로 판단되었으며 247.7mm이상의 측정거리에서는 0.2mm이상의 표준편차가 나타나고 있으나 실용적인 측면에서는 사용성에 문제가 없는 것으로 판단되었다.

(2) 수 중

그림 8을 보면 공기 중과 다르게 수중에서 참값에 따라 438.0mm까지 일정한 증가 경향을 보였다. 또한 수중에서 참값이 78.0~438.0mm 구간에 대한 회귀분석 결과 얻어진 일차방정식은 $y=0.7219x$ 이고, 회귀분석에 의한 신뢰도는 $R^2=0.9978$ 로 나타났다. 이러한 결과로부터 수중에서 유효 측정영역은 참값 78.0~438.0mm 구간으로 신뢰도가 높은 직선성이 있음을 알 수 있었다.

모형보정시스템의 최대 실험 가능한 거리인 438.0mm까지 실험을 수행하여도 측정이 가능하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 소형 BKS-LRPS의 공기 중에서의 유효 측정영역이 400.0mm임을 감안할 때 수중에서의 유효 측정영역은 540.0mm($400.0\text{mm} \times 1.35$)까지 확장될 수 있을 것으로 판단되었다.

4.5 염분농도에 대한 보정실험 결과 및 분석

소형 BKS-LRPS 모형보정시스템을 활용하여 염분농도에 대한 보정계수를 검증하기 위하여 모형보정실험을 수행하였다. 현장타설말뚝 굴착공에 대한 거칠기 및 수직도 측정 시 공기 중과 수중 조건이 공존하는 경우가 많기 때문에 공기 중과 수중 그리고 바닷물에서 예상되는 매질 변화에 따른 실내 모형보정실험을 수행하였다. 바닷물의 경우 소금물 농도가 약 3‰로 구성되어 있다. 따라서 해상에서의 시공과정을 모사하여 소금물 농도를 0, 1, 2 그리고 3‰로 구분하여 보정실험을 하였다.

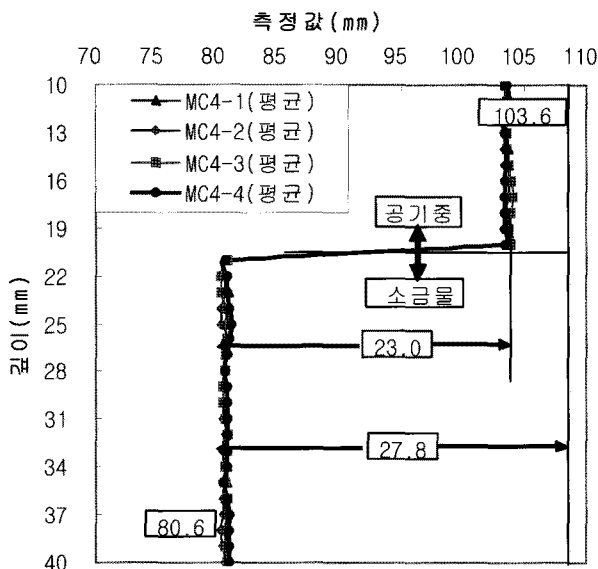


그림 9. 염분농도 변화에 따른 소형 BKS-LRPS의 거동 비교

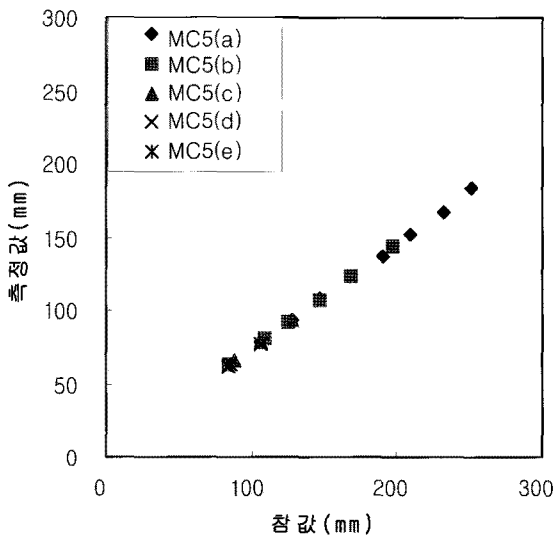
보정계수를 결정하기 위하여 시편 A(평면)를 사용하였으며, 공기 중에서 소금물로 매질 변화에 따른 레이저 측정값 변화를 조사하였다.

그림 9에는 MC4 조건에서 실시한 모형보정실험 결과를 나타내었다. 참값 108mm에 대하여 염분농도가 0, 1, 2 및 3‰로 증가 하였으나 소금물 중 평균값은 거의 변화가 없었다. 또한 소금물 농도가 증가하여도 공기 중 평균값(a)과 소금물 중 평균값(b)의 비(a/b)는 거의 일정하게 1.28을 보였다. 이러한 결과로부터 소형 BKS-LRPS의 레이저 센서는 염분농도 변화에 따른 영향이 없음을 알 수 있었다.

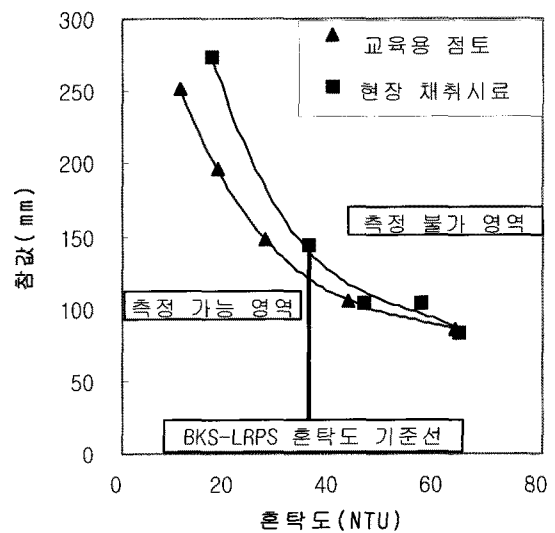
4.6 혼탁도에 따른 보정실험 결과 및 분석

4.6.1 맑은 물

소형 BKS-LRPS의 실내 모형보정시스템을 활용하여 공기 중과 맑은 물 조건에서 탁도 변화에 따른 보정계수를 검증하기 위하여 표 3의 실험 계획에 따라 모형보정실험을 수행하였다. 일반적으로 혼탁도를 일으키는 입자는 지반 조건, 입자의 조성 등에 따라 광학적 측정값이 매우 다르다. 따라서 본 연구에서는 육상부에서 말뚝 시공이 이루어지는 경우 말뚝 내부의 혼탁도를 고려하여 유효 측정 영역을 확인하기 위한 실험을 실시하였다. 이러한 실험은 맑은 물에서 혼탁도 변화에 기인한 소형 BKS-LRPS의 레이저 센서의 측정 한계를 확인하기 위하여 실시하였다. 이 때 사용된 점토는 학생 교재용으로 판매되고 있는 실트질 점토 약 0.005N를 맑은 물 0.1N



(a) 측정치 비교(교육용 점토)



(b) 유효 측정영역 결정

그림 10. 맑은 물에서 혼탁도 변화에 유효 측정영역 결정 및 측정치 비교

에 분산시킨 원액을 실내 모형보정실험 장치의 맑은 물에 일정량씩 투입하여 혼탁도를 증가시켰다. 또한 특정 현장에서 채취한 굴착공 내 굴착 슬라임을 이용하여 혼탁도를 변화시켰다. 그리고 탁도계(TN-100)를 사용하여 각각의 혼탁도를 측정하였다. 또한 각각의 혼탁도에서 측정 한계 영역을 확인하기 위하여 측정 거리를 변화시켜 실시하였다.

그림 10(a)에는 맑은 물에서 혼탁도 증가에 따른 측정치 예를 나타내었다. 혼탁도를 5가지로 변화시켜 측정을 실시하였으며 혼탁도가 있더라도 측정치는 참값과 선형관계를 나타내고 있어 보정계수는 1.0으로 나타났다. 그림 10(b)에는 혼탁도에 따른 유효측정영역을 나타내었다. 여기서 교육용 점토와 현장채취시료에 대한 유효측정영역을 나타내었다. 그림 10(b)에서 알 수 있듯이 혼탁도가 증가함에 따라 유효 측정영역은 감소하는 경향을 나타냈다. 맑은 물에서 교육용 점토에 대한 유효영역이 짧게 나타나므로 이에 대한 혼탁도와 유효 측정영역 사이의 실험결과를 회귀분석 한 결과 $y = 1149.2x^{-0.6264}$ 의 지수함수의 관계를 나타냈고, 회귀분석에 대한 신뢰도는 $R^2 = 0.9945$ 로 나타났다. 이 그림에서 그래프 아래쪽 영역은 측정 가능한 영역을 의미한다.

상기의 함수관계를 활용하면 현장의 혼탁도를 측정하여 굴착공 내의 유효측정거리를 추정할 수 있을 것이다. 예를 들면 인천 OO 현장에서 콘크리트타설 직전에 채취한 물의 혼탁도를 측정된 결과 38NTU로 측정되었으므로 약 130~150mm까지 측정 가능한 영역임을 알

수 있었다. 따라서 이와 같은 실내 모형보정실험 결과를 기준으로 소형 BKS-LRPS의 현장 적용 여부를 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

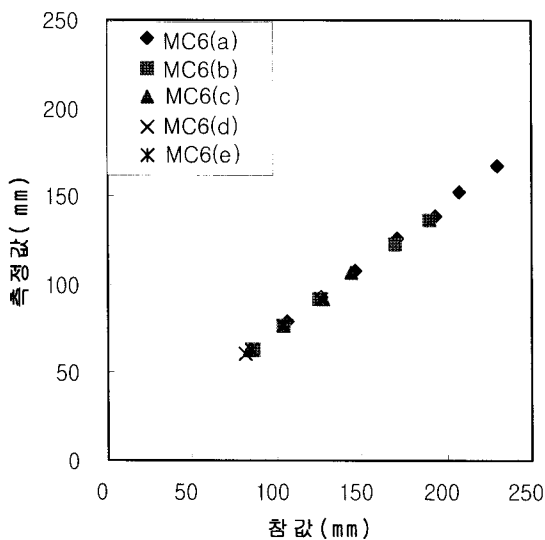
4.6.2 소금물(3%)

소형 BKS-LRPS 모형보정시스템을 활용하여 공기 중과 소금물 조건에서 탁도 변화에 따른 보정계수를 산정하기 위하여 모형보정실험을 수행하였다. 본 연구에서는 해상부에서 말뚝 시공이 이루어지는 경우 말뚝 내부의 염분농도와 혼탁도를 고려하여 유효 측정 영역을 확인하기 위한 실험을 실시하였다. 이러한 실험은 소금물(3%)에서 혼탁도 변화에 기인한 소형 BKS-LRPS 레이저 센서의 측정 한계를 확인하기 위하여 실시하였다. 그림 11(a)에는 소금물에서 혼탁도 증가에 따른 측정치 예를 나타내었다. 혼탁도를 5가지로 변화시켜 측정을 실시하였으며 혼탁도가 있더라도 측정치는 참값과 선형관계를 나타내고 있어 보정계수는 1.0으로 나타났다. 그림 11(b)에는 혼탁도에 따른 유효측정영역을 나타내었다.

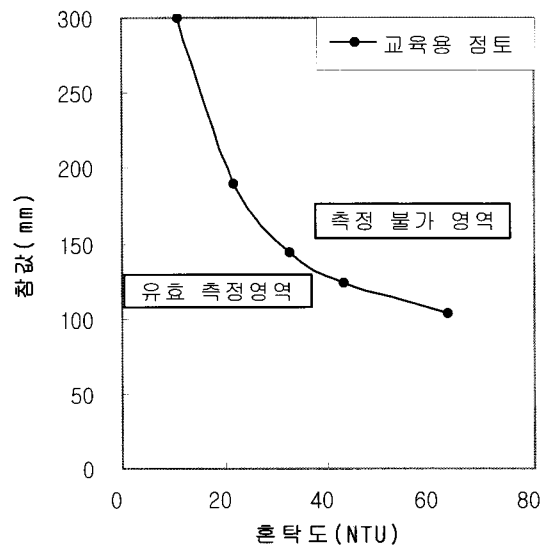
4.7 공기 중/맑은 물에서 거칠기 형태에 따른 보정실험 결과 및 분석

4.7.1 시편 B: 직사각형

그림 12(a)는 시편 B에 대한 것으로 구간별 길이가 20mm, 높이가 10mm인 알루미늄 직사각형 시편에 대한 프로파일링을 공기 중과 수중에서 측정한 결과를 보이



(a) 측정치 예(교육용 점토)



(b) 유효측정 영역

그림 11. 소금물(3%)에서 혼탁도 변화에 따른 영향 비교

고 있다. 그림에서와 같이 중간부에서 레이저 측정값의 급격한 변화는 공기 중에서 수중으로의 매질 변화에 기인한다.

소형 BKS-LRPS에 사용된 엔코더는 해상도를 1mm 이상으로 설정하였다. 그러므로 시편 거칠기의 길이는 엔코더의 해상도에 기인하여 1mm 간격으로 점이 찍히고 있음을 보인다. 따라서 엔코더에 의한 시편 B의 길이는 거칠기 형태와 관계없이 엔코더에 의해 정확하게 20mm를 보이고 있다. 그러나 직각을 이루는 지점에서 레이저 거동은 거칠기의 높이에 따라 차이는 있지만 약 10mm 높이에 대해 엔코더 상에서 1~2mm 폭에 대해 곡선 형태를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 시편의 상부에 대한 엔코더 상의 길이는 16mm로 측정되었는데 이러한 현상은 레이저 광점의 크기에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 이때 시편 B에 대해 측정된 거칠기 높이는 약 8.5mm로 참값 10mm보다 낮은 값을 보였다. 이러한 원인은 레이저 센서의 방수시스템 등에 있는 것으로 판단되었다. 따라서 공기 중에서 방수시스템에 대한 보정계수 1.046을 적용한 그래프와 참값에 대한 그래프를 그림 12(b)에 나타내었다. 그 결과 직각을 이루는 모서리 부분에서는 참값과 차이가 발생하였으며, 보정 후 거칠기 높이는 미세한 차이는 있었으나 잘 일치하는 것으로 판단되었다.

수중에서 엔코더에 의한 시편 B의 길이는 공기 중에서와 같게 20mm를 보이고 있다. 그러나 직각을 이루는 지점에서 레이저 거동은 거칠기의 높이 약 10mm에 대해 엔코더 상에서 2mm 폭에 대해 곡선 형태를 나타내

고 있음을 알 수 있었다. 시편의 상부에 대한 엔코더상의 길이는 16mm로 측정되었다. 또한 이때 시편 B에 대해 측정된 거칠기 높이는 약 7.0mm로 참값 10mm 및 공기 중에서 보다 낮은 값을 보였다. 이러한 원인은 레이저 센서의 방수시스템 및 매질 변화 등에 있는 것으로 판단되었다. 따라서 공기 중과 수중에서 시편 B에 대한 레이저 센서의 거동은 약간 차이는 있으나 전반적으로 유사한 형태를 보이고 있음을 알 수 있었다. 따라서 수중에서 방수시스템에 대한 보정계수 1.350을 적용한 그래프와 참값에 대한 그래프를 그림 12(c)에 나타내었다. 그 결과 직각을 이루는 모서리 부분에서는 참값과 차이가 발생하였으며, 보정 후 거칠기 높이는 미세한 차이는 있었으나 잘 일치하는 것으로 판단되었다.

4.7.2 시편 C: 삼각형

그림 13(a)는 시편 C에 대한 것으로 구간별 길이가 20mm, 높이가 10mm인 알루미늄 삼각형 시편에 대한 프로파일링을 공기 중과 수중에서 측정한 결과를 보이고 있다. 그림에서와 같이 중간부에서 레이저 측정값의 급격한 변화는 공기 중에서 수중으로의 매질 변화에 의한 기인한다.

소형 BKS-LRPS에 사용된 엔코더는 측정간격을 1mm 이상으로 설정하였다. 그러므로 시편의 거칠기의 길이는 엔코더의 측정간격에 기인하여 1mm간격으로 점이 찍히고 있음을 보인다. 따라서 엔코더에 의한 시편 C의 길이는 엔코더에 의해 시편 B보다 명확하게 20mm를 보이고 있다. 그러나 시편 B의 직각 형태와 달리 엔코더에 의한

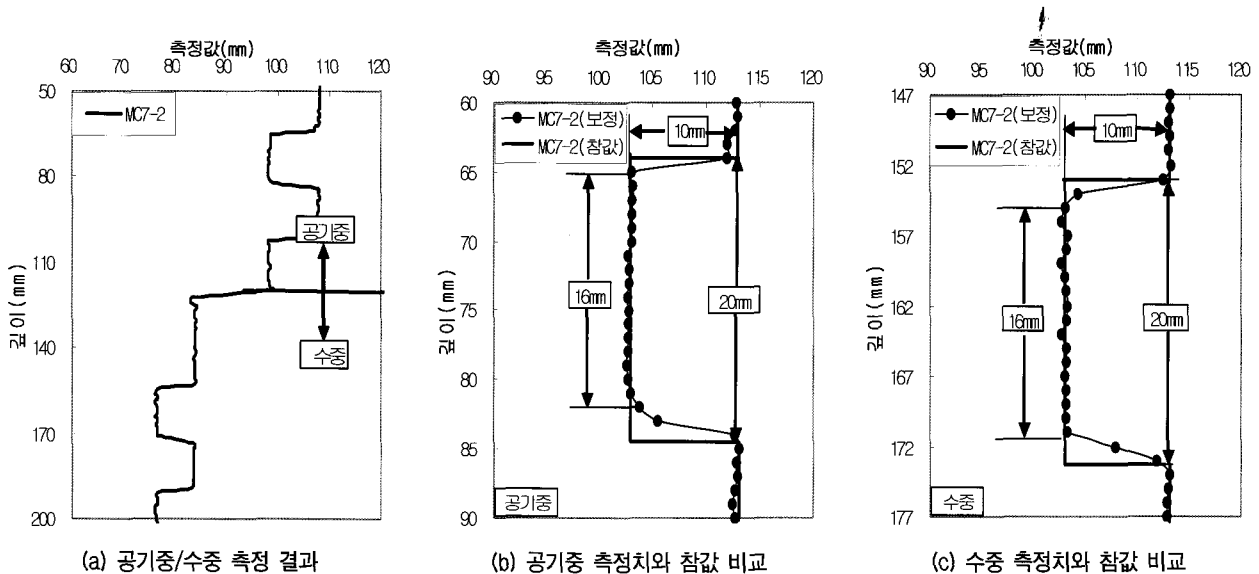


그림 12. 공기 중과 수중에서 시편 B에 대한 레이저 프로파일링 측정치

곡선 형태의 폭이 없는 것이 특징이다. 즉, 레이저 센서가 거칠기 시편을 통과할 때 삼각형의 완만한 경사에서는 시편의 형태를 있는 그대로 프로파일링 하고 있음을 알 수 있었다. 그림에서와 같이 시편의 꼭지점에서의 레이저 프로파일링은 엔코더의 해상도 1mm에 의해 원형 또는 요철 형태를 보임을 알 수 있었다. 이러한 현상은 레이저 광점이 위치하는 지점에 따라 형태가 변할 수 있음을 의미한다. 또한 이때 시편 C에 대해 측정된 거칠기 높이는 약 7.9mm로 참값 10mm 및 시편 B보다 낮은 값을 보였다. 이러한 원인은 레이저 센서의 방수시스템 및 거칠기 형태 등에 있는 것으로 판단되었다. 보정계수를 적용하여 보정된 참값을 그림 13(b)에 나타내었다.

수중에서 엔코더에 의한 시편 C의 길이는 공기 중에서와 같이 20mm를 보이고 있다. 그러나 삼각을 이루는

지점에서 레이저 거동은 거칠기의 높이 약 10mm에 대해 7.4mm로 측정되었다. 이러한 원인은 레이저 센서의 방수시스템 및 매질 변화 등에 있는 것으로 판단되었다. 보정계수를 적용하여 보정된 참값을 그림 13(c)에 나타내었다.

또한, 시편 C의 경우 시편 B와 달리 최대 거칠기 크기를 나타내는 점에서 엔코더 상으로 시편의 길이 10mm씩을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 공기 중과 수중에서 시편 C에 대한 레이저 센서의 거동은 약간 차이는 있으나 전반적으로 유사한 형태를 보이고 있음을 알 수 있었다.

4.7.3 시편 D: 원형

측정치를 그림 14(a)에 나타내었으며 공기 중과 수중

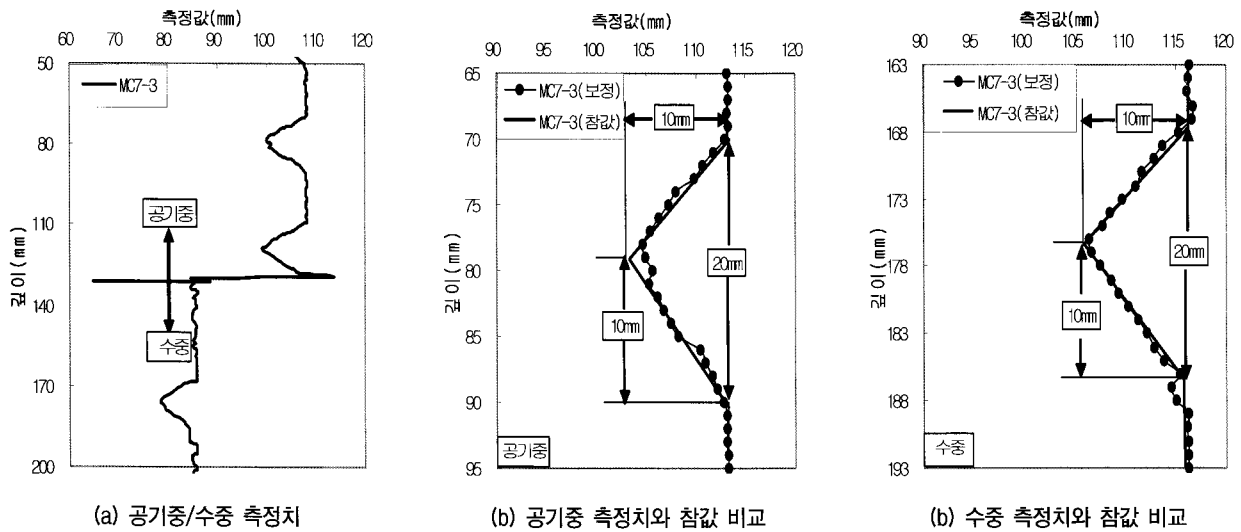


그림 13. 공기 중과 수중에서 시편 C에 대한 레이저 프로파일링 측정치

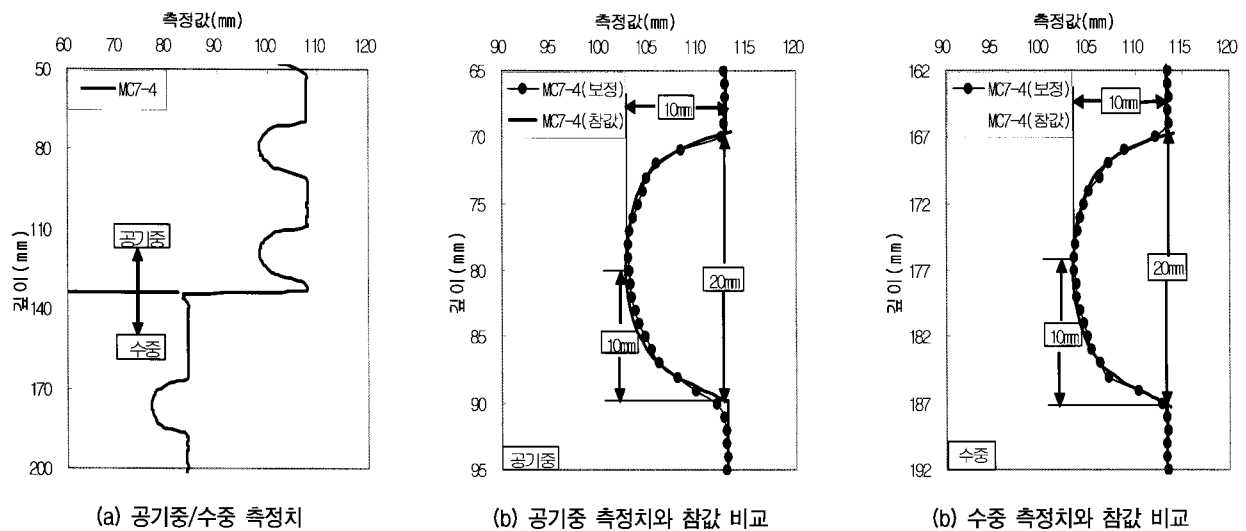


그림 14. 공기 중과 수중에서 시편 D에 대한 측정결과

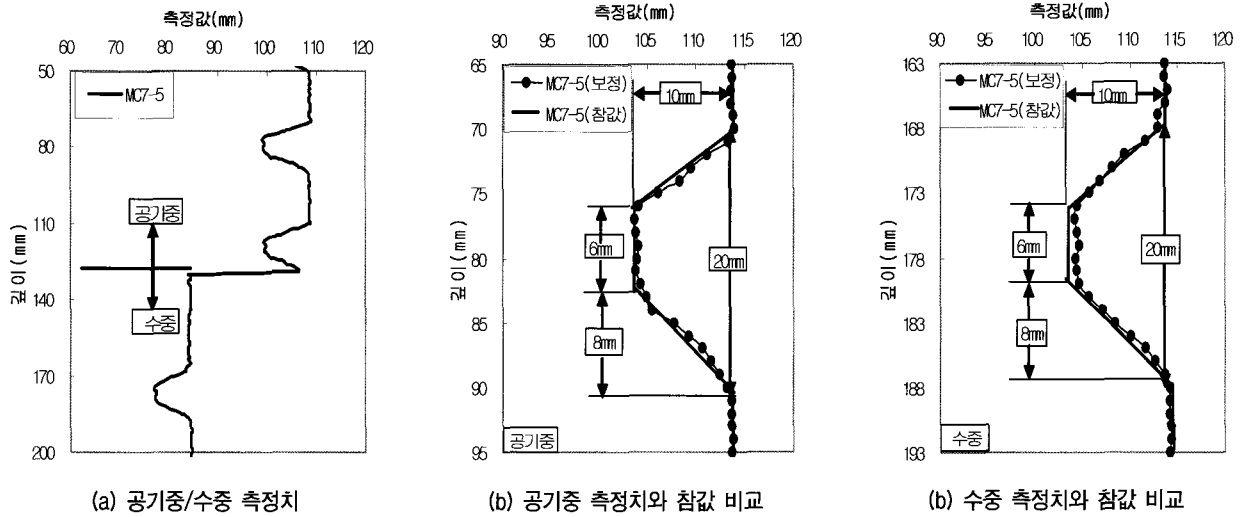


그림 15. 공기 중과 수중에서 시편 E에 대한 측정결과

에서 측정된 값에 보정계수를 적용하여 구한 참값을 그림 14(b)와 (c)에 나타내었다. 여기서 공기 중과 수중에서 시편 D에 대한 레이저 센서의 거동은 약간 차이는 있으나 전반적으로 유사한 형태를 보이고 있음을 알 수 있었다.

4.7.4 시편 E: 사다리꼴

측정치를 그림 15(a)에 나타내었으며 공기 중과 수중에서 측정된 값에 보정계수를 적용하여 구한 참값을 그림 15(b)와 (c)에 나타내었다. 여기서 공기 중과 수중에서 시편 E에 대한 레이저 센서의 거동은 약간 차이는 있으나 전반적으로 유사한 형태를 보이고 있음을 알 수 있었다.

4.8 측정체 재질 표면의 반사도에 따른 보정실험(MC8 계열)

반사성이 높은 플라스틱 평면 시편에 약 200mm까지는 시편 자체의 반사를 막기 위하여 무광택 처리하고, 약 200~400mm 부분은 반사성이 있는 상태를 유지하였다. 그림 16에 실험결과를 도시하였는데 여기서 시편이 반사성이 없는 상태에서는 거의 동일한 측정값을 보였고, 반사성이 있는 상태에서는 높은 측정값을 보이며 노이즈 형태를 보였다. 본 연구에서는 반사도를 정량적으로 측정하지 못하여 정성적인 분석에 그쳤다.

본 실험은 유리와 같이 반사성이 높은 플라스틱 시편에서 이루어졌는데 암반의 굴착표면이 반사성이 높을 경우 반사도를 정량적으로 분석하여 거칠기 측정 시 레이저 센

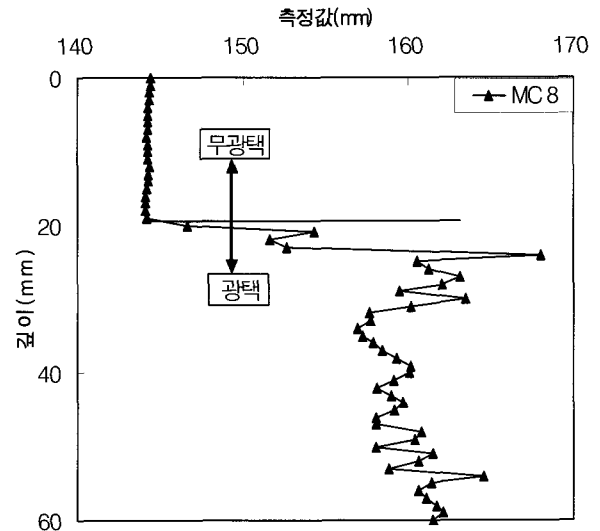


그림 16. 측정체 반사도에 따른 측정결과

서에 대한 영향을 연구할 필요가 있다고 판단된다.

5. 결론

BKS-LRPS의 현장 적용성 검토에 앞서 현장에서 발생 가능한 조건들에 대하여 실내 모형보정시스템을 사용하여 소형 BKS-LRPS의 거동을 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 물속에서 수압에 견딜 수 있도록 하기 위하여 투명 방수판과 방수액을 사용한 레이저센서 및 방수시스템을 개발하였으며 보정실험을 실시하여 레이저센서의 보정계수를 구할 수 있었고 여러 가지 현장조

건을 고려한 연구 방향 설정을 위한 기초 자료로 활용할 수 있었다.

- (2) 모형보정실험에서는 측정체의 재질, 측정공간의 조도, 매질변화, 방수시스템, 염분농도, 혼탁도, 거칠기 형상, 측정체의 반사도 등을 변화시켰다. 매질변화 및 방수시스템 적용에 의한 보정계수를 산정할 수 있었으며, 혼탁도, 염분농도는 유효측정영역의 결정에 영향을 미칠 수 있었고 측정체의 높은 표면 반사도는 측정자체를 곤란하게 할 수도 있을 것으로 판단되었다.
- (3) 매질 변화에 따른 측정실험에서 공기 중에서 맑은 물로 레이저가 통과할 때 공기 중과 맑은 물에서의 측정값의 비는 1.350으로 나타났으므로 맑은 물에서의 측정값을 공기 중 측정값으로 보정할 때 BKS-LRPS의 방수시스템에 대한 보정계수로 사용할 수 있었다.
- (4) 플라스틱, 알루미늄, 시멘트, 석고 등의 4종에 대해 재질 변화에 따른 실내 모형보정실험에서 공기 중과 수중에서 동일한 측정치가 나타났으므로 재질 변화에 따른 보정계수는 1.0으로 구할 수 있었다.
- (5) 거칠기 형상에 따른 보정실험에서 엔코더에 의한 분해능을 1mm로 할 경우 시편의 길이를 정확하게 측정할 수 있었는데 레이저센서 측정치에서는 직각 또는 변곡점에서 미세한 광점의 찌그러짐 현상이 발생하였으나 평균 거칠기측정에 중요한 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 박봉근 (2007), BKS-LRPS(Backyoung-Kyungsung Laser Roughness Profiling System)의 개발 및 검증에 관한 연구, 경성대학교 대학원 박사학위청구논문, 2007. 2.
2. 이명환, 조천환, 유한규, 권형구 (2003), “국내 암반에 근입된 현장타설말뚝의 소켓벽면 거칠기에 관한 연구”, 한국지반공학회 정기학술대회, pp.431-438.
3. 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.
4. 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.
5. Liang, R. (2002), “Development of A Laser Triangulation Distance Measurement Device and Its Application to Borehole Roughness Detection”, *MSEE Thesis*, Department of Electrical Engineering, University of Houston, Texas.
6. Nam, M. S. (2004), “Improved Design for Drilled Shafts in Rock”, *Ph. D. Thesis*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston, Texas.
7. O’Neill, M. W. and Hassan, K. M. (1994), Drilled Shafts: Effects of Construction on Performance and Design Criteria, Proceedings of the Conference on Deep Foundations, U.S. Department of Transportation, Orlando, FL, 1994.
8. Seidel, J. P., and Collingwood, B. (2001), “A New Socket Roughness Factor for Prediction of Rock Socket Shaft Resistance”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, February pp.138-153.

(접수일자 2008. 2. 2, 심사완료일 2009. 8. 21)