

## 굴착공 벽면거칠기 측정시스템(BKS-LRPS)의 혼탁도 보정에 관한 연구 A Study on Turbidity Calibration of Borehole Roughness Measurement System (BKS-LRPS)

박봉근<sup>1)</sup>, Bong-Geun Park, 최용규<sup>2)</sup>, Yongkyu Choi, 김명학<sup>3)</sup>, Myung-Hak Kim, 권오균<sup>4)</sup>, Oh-Kyun Kwon, 남문석<sup>5)</sup>, Moon S Nam

<sup>1)</sup> (주)백경지앤씨 대표이사, Member, President, Backyoung G&C Co., Ltd.

<sup>2)</sup> 경성대학교 건설환경공학부 교수, Member, Prof., Department of Civil & Environmental Engrg., KyungSung Univ.

<sup>3)</sup> 인제대학교 토목공학과 교수, Member, Prof., Department of Civil Engrg., Inje Univ.

<sup>4)</sup> 계명대학교 토목공학과 부교수, Member, Associate Prof., Department of Civil Engineering, Keimyung Univ.

<sup>5)</sup> 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원, Member, Senior Researcher, Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation

**SYNOPSIS** : Based on recent studies, the side resistance of rock socketed drilled shafts was affected by unconfined compressive strength of rock, socket roughness, rock types and joints, and initial normal stress. Especially, the socket roughness was affected by rock types and joints, drilling methods, and diameters of pile. In this study, a new roughness measurement system (BKS-LRPS, Backyoung-KyungSung Laser Roughness Profiling System) usable in water was developed. Based on the laboratory model tests, an EMD (Effective Measurement Distances) according to various turbidity was proposed as  $EMD = 1149.2 \times T_b^{-0.64}$

**Keywords** : BKS-LRPS, Borehole Roughness, Effective Measurement Distance, Rock Socketed Drilled shafts, Turbidity

### 1. 서론

최근 Horvath 등(1983), O'Neill 등(1996), Seidel과 Collingwood(2001)의 연구에 따르면 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주면마찰력은 암석의 일축압축강도 외에 굴착면의 거칠기, 암반의 재료특성, 초기 수직응력, 말뚝의 직경, 암반의 절리 및 풍화도 등에 크게 영향을 받는 것으로 알려졌다. 특히 주면마찰력에 영향을 미치는 인자 중 굴착공의 거칠기는 암반의 종류, 말뚝의 직경, 그리고 말뚝의 시공법에 따른 영향이 큰 것으로 알려져 있다(박봉근, 2007).

대부분 레이저 센서의 굴착공 거칠기 측정에 관한 연구들은 공기 중 사용에 국한되어 있다. 그 일례로 휴스턴 대학(Nam, 2004; Liang, 2002)과 모나쉬 대학(Collingwood, 2000)에서 굴착공의 거칠기를 측정할 수 있는 시스템을 개발하였으나 이러한 연구들 역시 공기 중에서만 적용 가능한 것이었다. 따라서 일반적으로 공기 중과 수중 상태가 공존하는 대부분의 현장 말뚝시공조건에서도 굴착공 거칠기 측정이 용이한 측정 시스템에 대한 개발 필요성이 대두되었다. 아울러 이러한 시스템들을 적용하기 위해서는 공기 중에서

수중으로의 매질 변화에 따른 레이저 센서의 측정값과 참값 사이의 보정계수에 대한 연구, 굴착공의 높은 수압에도 견딜 수 있는 방수 시스템 적용에 따른 보정계수에 대한 연구, 공기 중과 수중 각각에서의 유효측정영역에 대한 연구, 재질 변화에 따른 레이저 센서의 거동 연구, 육상과 해상 조건을 고려한 염분농도에 따른 거동 연구, 거칠기 형태에 따른 거동 연구, 그리고 맑은 물과 흙탕물에서의 거동 연구 등이 요구되어 진다.

본 연구에서는 Backyoung-KyungSung Laser Roughness Profiling System(이하 BKS-LRPS라 칭함)의 수중에서 혼탁도 변화에 따른 유효 측정영역을 결정하고 혼탁도와 BKS-LRPS의 유효 측정 거리의 관계식을 얻을 수 있었다. 이때 얻어진 관계식에 간단하게 측정된 굴착공의 혼탁도를 적용하여 BKS-LRPS의 현장 적용 여부를 결정하고 적용이 어려울 경우 굴착공 내 혼탁도를 기준치 이하로 낮추어야 하였다.

## 2. 실내 모형검증시스템

BKS-LRPS 실내 모형검증시스템을 그림 1에 나타내었다. 측정 시편을 시편 고정대에 부착시키고 엔코더와 레이저 센서를 사용하여 시편과 레이저 센서 사이의 거리를 측정할 수 있는 장치이다. 그림 1의 BKS-LRPS 실내 모형검증시스템을 사용하여 공기 중과 맑은 물(수중)에서의 유효 측정 영역 검증실험을 실시하였다. 또한 육상조건과 해상조건에서 혼탁도를 고려한 BKS-LRPS 실내 모형검증실험을 실시하였다.

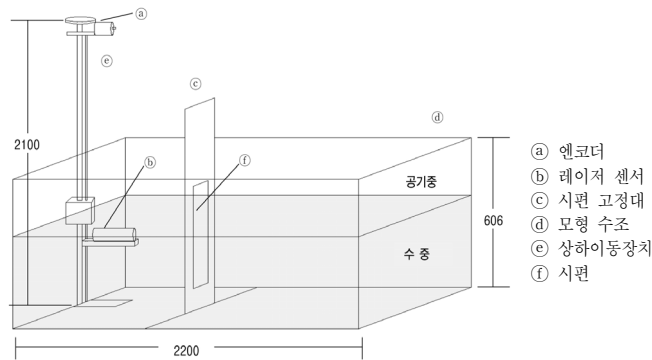


그림 1. BKS-LRPS 실내 모형검증시스템의 모식도

## 3. 공기 중과 맑은 물에서 BKS-LRPS의 실내 모형검증실험

공기 중과 맑은 물에서 레이저 센서의 유효 측정 영역을 검증하기 위한 목적으로 그림 1의 BKS-LRPS 실내 모형검증시스템을 사용하여 실내 모형검증실험을 실시하였다. 실험은 시공 중 말뚝 내부에서 굴착공 벽면과 레이저 센서의 거리 변화를 고려하여 실험을 실시하였으며, 공기 중과 맑은 물에서 BKS-LRPS 레이저 센서의 측정 한계를 확인하기 위해 실시하였다.

### 3.1 실험조건

공기 중에서 레이저 센서의 유효 측정 영역을 검증하기 위한 실내 모형검증실험은 표 1과 같은 조건에서 실시하였다.

표 1. 공기 중 및 맑은 물에서 BKS-LRPS의 실내 모형검증실험 조건

측정조건	공기 중	맑은 물
시편 재질/형태	알루미늄/평면	알루미늄/평면
측정 범위(mm)	67.7-467.7	78.0-438.0
측정 간격(mm)	20	30-50
혼탁도(NTU)	0	0

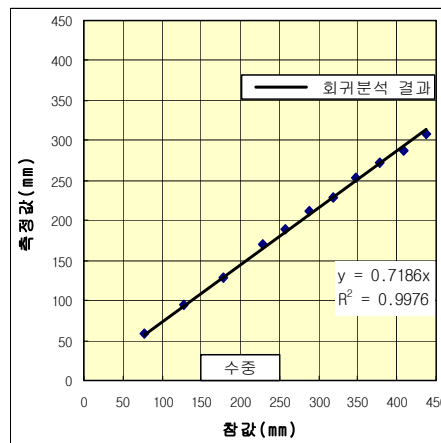
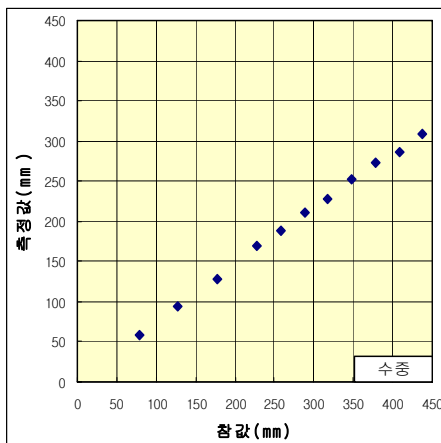
### 3.2 공기 중에서 유효 측정 영역

공기 중에서 유효 측정영역 검증을 위한 실내 모형검증실험 결과를 표 2와 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)를 보면 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 일정한 경향을 보이는데, 이는 레이저 센서 측정값으로 400mm이상에서는 측정 영역을 벗어나 측정되지 않음을 알 수 있었다. 여기서, 참값이란 실제 시편과 센서와의 실거리를 말한다.

표 2. 공기 중 조건에서의 검증실험 결과의 통계적 분석

구분	측정상태 시편종류	공기 중									
		평면의 알루미늄시편									
참값(A:mm)		67.7	87.7	107.7	127.7	147.7	167.7	187.7	207.7	227.7	247.7
공기 중 평균값(mm)		64.8	82.5	103.2	121.7	140.3	160.2	180.1	199.4	218.1	236.9
표준편차(B:mm)		0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.12	0.14	0.11	0.06	0.21

구분	측정상태 시편종류	공기 중									
		평면의 알루미늄시편									
참값(A:mm)		267.7	287.7	307.7	327.7	347.7	367.7	387.7	427.7	447.7	467.7
공기 중 평균값(mm)		255.1	277.2	293.3	311.1	332.2	349.1	369.3	389.8	400.0	400.0
표준편차(B:mm)		0.13	0.32	0.36	0.32	0.42	0.34	0.50	0.38	0.00	0.00



(a) 수중에서 참값 변화에 따른 레이저 측정값 (b) 수중에서 참값 변화에 따른 레이저 측정값의 회귀분석 결과

그림 2. 공기 중에서 유효 측정영역 검증을 위한 분석결과

그림 2(b)는 레이저 센서의 측정영역을 벗어난 지점을 제외한 부분에 대한 회귀분석 결과를 보여주고 있다. 공기 중에서 참값이 67.7~387.7mm 구간에 대한 회귀분석 결과 얻어진 결과는 일차방정식으로 표현되고  $y = 0.9542x$ 와 같다. 이 회귀분석에 대한 신뢰도는  $R^2 = 0.9999$ 로 나타났다. 여기서,  $y$ 는 측정값(mm) 이고  $x$ 는 참값(mm) 이다. 이러한 결과로부터 공기 중에서 유효 측정영역은 참값 67.7~387.7mm 구간으로 신뢰도가 높은 직진성이 있음을 알 수 있었다.

상기의 분석을 통하여 알 수 있듯이 본 연구에서 개발한 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.

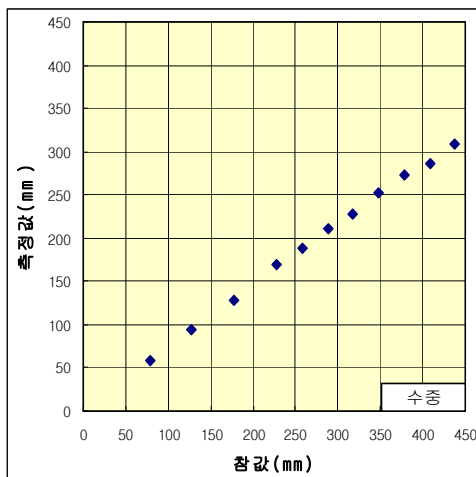
### 3.3 맑은 물에서 유효 측정 영역

맑은 물에서 유효 측정영역 검증을 위한 실내 모형검증실험 결과를 표 3과 그림 3에 나타내었다. 그리고 표 3의 결과로부터 그림 3의 결과를 얻었다. 그림 3(a)를 보면 공기 중과 다르게 수중에서 참값에 따라 438.0mm까지 일정한 증가 경향을 보였다.

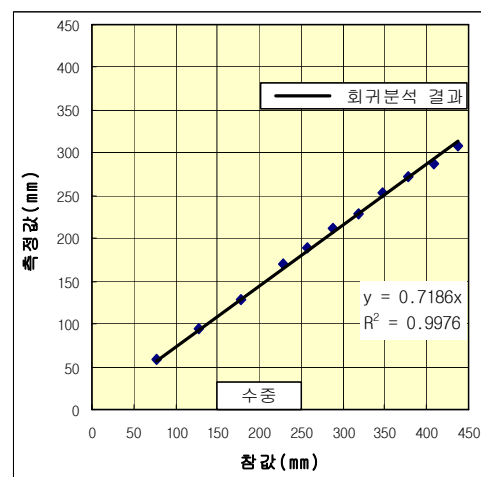
그림 3(b)는 참값이 78.0~438.0mm인 구간에 대해 회귀분석 결과를 보여주고 있는데, 수중에서 참값이 78.0~438.0mm 구간에 대한 회귀분석 결과 얻어진 일차방정식은  $y=0.7186x$ 이고, 회귀분석에 의한 신뢰도는  $R^2 = 0.9976$ 으로 나타났다. 여기서,  $y$ 는 측정값(mm) 이고  $x$ 는 참값(mm) 이다. 이러한 결과로부터 수중에서 유효 측정영역은 참값 78.0~438.0mm 구간으로 신뢰도가 높은 직진성이 있음을 알 수 있었다.

표 3. 맑은 물 조건에서의 검증실험 결과의 통계적 분석

구분	측정상태 시편종류	수 중										
		평면의 알루미늄시편										
참값(A:mm)		78.0	128.0	178.0	228.0	258.0	288.0	318.0	348.0	378.0	408.0	438.0
공기 중 평균값(mm)		58.1	93.7	128.3	169.5	188.7	211.6	228.6	253.0	272.5	286.6	308.6
표준편차(B:mm)		0.09	0.08	0.06	0.18	0.35	0.26	1.06	0.59	1.43	0.70	0.65



(a) 수중에서 참값 변화에 따른 레이저 측정값



(b) 수중에서 참값 변화에 따른 레이저 측정값의 회귀분석 결과

그림 3. 수중에서 유효 측정영역의 검증을 위한 분석결과

상기의 분석을 통하여 알 수 있듯이 실내 모형검증시스템 장비 크기에 기인하여 438.0mm까지만 측정이 가능하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 BKS-LRPS의 공기 중에서의 유효 측정영역이 400.0mm임을 감안할 때 수중에서의 유효 측정영역은 540.0mm (400.0mm×1.35)까지 확장될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 혼탁도를 고려한 BKS-LRPS의 실내 모형검증실험

굴착공의 혼탁도 측정만으로 BKS-LRPS의 현장 적용 가능 여부를 판단하고 유효 측정 영역의 예측을 위한 제안식을 얻기 위하여 실내 모형검증시스템(박봉근, 2007)을 이용하여 혼탁도 변화에 따른 레이저 센서의 거동에 대한 연구를 다음과 같이 실시하였다.

##### 4.1 실험계획

탁도 측정방법으로는 육안판별법과 기기분석법으로 분류된다. 특히 기기분석법은 시료에 조사된 광량에 대해 혼탁입자들에 의한 산란도를 측정하는 네펠로법(Nephelometry)을 많이 사용한다. 이러한 기기분석법에 의한 혼탁도 측정 단위를 NTU(Nephelometry Turbidity Unit)라고 한다. 본 연구에서도 탁도를 측정하기 위해 기기분석법을 사용하였으므로 NTU 단위를 사용하였다. 기기분석시 사용되는 탁도 표준 물질은 일본공업규격(JIS)에 의하면 물 1ℓ 중에 정제 카올린(kaolin) 1μN을 포함한 경우의 탁도를 1도(또는 1ppm)이라고 한다. 이때 사용되는 카올린 입자는 원료의 산지, 조성, 정제방법에 따라 기기분석법에서 광학적 측정치가 다를 수 있다.

본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 혼탁액에 포함된 세립분의 종류와 함유량은 레이저 센서의 유효 측정 영역 결정에 매우 중요한 영향인자일 것으로 예상하였다. 우선적으로 세립분 함량이 매우 높을 것으로 예상되는 교육용 점토(시료 1)를 대표 시료로 선정하였다. 또한 현장조건을 반영할 수 있도록 하기 위하여 현장의 굴착공 내 슬라임(시료 2)을 현장 시료로 선정하였다. 시료 1의 경우 액성한계가 56%, 세립분(실트 및 점토)이 95%정도인 고소성 점토(CH)로 나타났으며, 시료 2의 경우 액성한계가 25%, 세립분이 50%에 근접하는 사질토(SC)로 나타났다. 시료의 물성시험 결과를 표 4.에 요약하였으며 그림 4에는 입도분포곡선을 도시하였다.

육상부와 해상부의 현장조건을 고려할 수 있도록 맑은 물과 소금물(염분 3%) 조건을 선정하였는데 해수의 경우 염분 농도가 3% 이하로 측정되었다.

혼탁도에 의한 유효측정영역 확인 실험조건은 표 5와 같다.

##### 4.2 실험 절차

먼저 시료 1에 대하여 다음과 같은 방법으로 시험을 실시하였다.

- 1) 분석용 전자저울에 3리터 비이커를 올려놓은 후 제로 세팅한다.
- 2) 약 0.005N의 교육용 점토를 비이커에 넣고 정확하게 무게를 측정한다.
- 3) 2)에 약 0.1N의 맑은 물을 비이커에 넣고 정확하게 무게를 측정한다.
- 4) 계량을 완료한 후 고속 교반기를 사용하여 점토 입자를 충분히 분산시켜 혼탁도가 매우 높은 용액을 만든다. 이러한 용액을 마개가 있는 용기에 보관한다.
- 5) BKS-LRPS 실내 모형검증시스템의 모형 수조에 맑은 물 약 800N을 채운다.
- 6) 4)의 혼탁액은 입자가 침전될 수 있으므로 사용 전에 충분히 흔들어 5)에 일정량 투입 후 충분히 분산시킨다.
- 7) 분산된 혼탁액을 탁도계(TN-100)를 사용하여 혼탁도를 측정한다.
- 8) 이러한 혼탁액에 대하여 시편과 레이저 센서간의 거리를 증가시키면서 레이저 센서의 값을 측정한다.

9) 상기 6)에서 8)까지의 과정을 반복하여 혼탁도를 점진적으로 증가시킨다.

현장에서 채취한 슬라임을 건조시켜 준비한 시료(시료 2)를 이용하여 상기와 동일한 방법으로 실내 모형검증실험을 실시하였다. 해상조건(3% 염수)에 대한 시험에서는 맑은 물 대신 3%의 염수를 사용하고 나머지 절차는 동일하였다.

표 4. 시료 1과 시료 2에 대한 물성 실험결과

시료명 \ 구분	통일분류	세립분 함량 (%)	비 중	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수	비 고
대표시료 1	CH	95	2.666	56	19	37	교육용 점토
현장시료 2	SC	50	2.726	25	12	13	화성OO현장

표 5. 혼탁액 보정실험 조건

현장조건 실험조건	육상조건 (맑은 물)		해상조건 (3% 소금물)
	대표 시료 1	현장 시료 2	대표 시료 1
시료 종류	알루미늄10		
거칠기	평면		
측정범위(m)	0.078-0.438		
측정간격(m)	0.05(0.078-0.228), 0.03(0.228-0.438)		
혼탁도(NTU)	10.8, 18.0, 27.2, 43.1, 63.3	17.0, 35.5, 46.1, 56.8, 64.2	10.8, 21.6, 32.7, 43.1, 63.3

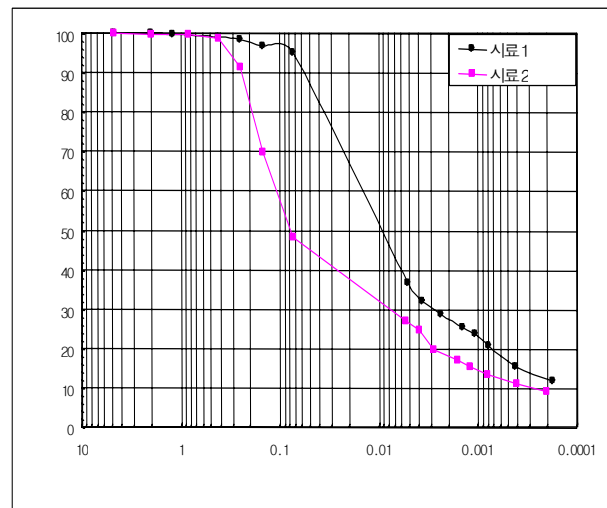


그림 4. 시료 1과 시료 2에 대한 입도 분포 곡선

### 4.3 육상조건에서 혼탁도 변화에 따른 유효측정영역

그림 5는 육상조건(맑은 물)에서 시료 1의 혼탁도 변화에 따른 레이저 센서의 측정한계를 보여주고 있다. 여러 가지 혼탁도에서 측정된 결과들은 동일한 선형성을 보여주고 있으나 혼탁도의 증가에 따라 레이저 센서의 참값과 측정값의 측정 영역은 감소하는 경향을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 혼탁도는 레이저 센서의 측정 영역에는 영향을 미치나 측정 영역 내에서 참값과 측정값에는 영향이 없으므로 혼탁도에 따른 보정계수가 필요 없다는 것을 알 수 있었다. 즉, 이와 같은 실내 모형검증실험 결과를 활용하면 현장 시공 과정에서 굴착공내의 혼탁도를 알 수 있다면 BKS-LRPS의 현장 굴착공 내에서의 사용 가능 여부를 결정할 수 있을 것으로 판단되었다.

그림 6은 맑은 물에서 시료 1과 2의 혼탁도와 유효측정영역의 관계를 보여주고 있는데 혼탁도가 증가함에 따라 유효 측정영역은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 여기서 세립분의 함량이 높은 시료 1에서 유효측정영역의 하한계가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 하한계에 대하여 회귀분석 한 결과 유효측정영역(y)과 혼탁도(x)의 관계는  $y=1149.2x^{-0.6264}$ 와 같은 지수함수로 나타났으며 신뢰도  $R^2=0.9945$ 로 나타났다. 여기서 그림 7에서 지수함수 아래쪽 영역은 측정 가능한 영역을 의미한다.

그림 6에서 BKS-LRPS 혼탁도 기준선으로 표시된 것은 슬라임을 채취한 현장에서 굴착공 내에 있는 슬라임 제거 후 채취한 물의 혼탁도로 약 38NTU로 측정되었다. 따라서 그림 7에서 시료 2에 대한 혼탁도(NTU)-참값의 그래프로부터 BKS-LRPS를 적용 시 유효측정영역은 약 0.15m임을 알 수 있었다.

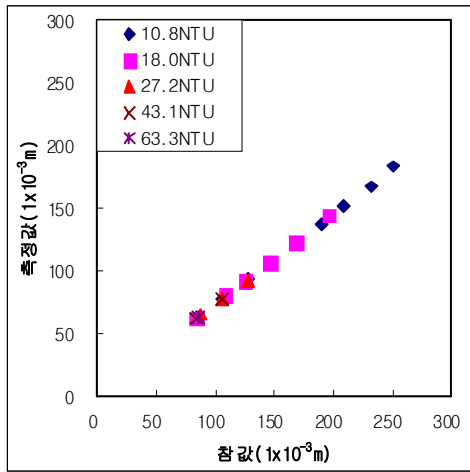


그림 5. 육상조건에서 혼탁도에 따른 레이저 센서의 거동 (교육용 점토의 경우)

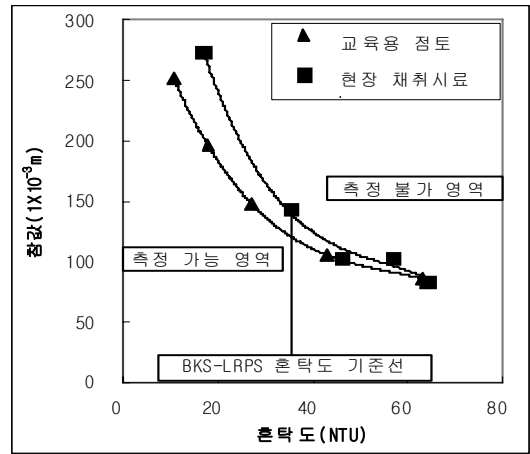


그림 6. 육상조건에서 혼탁도에 따른 유효측정영역

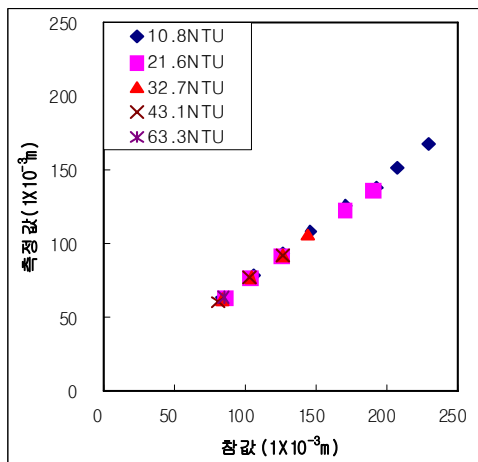


그림 7. 해상조건에서 혼탁도에 따른 레이저 센서의 거동

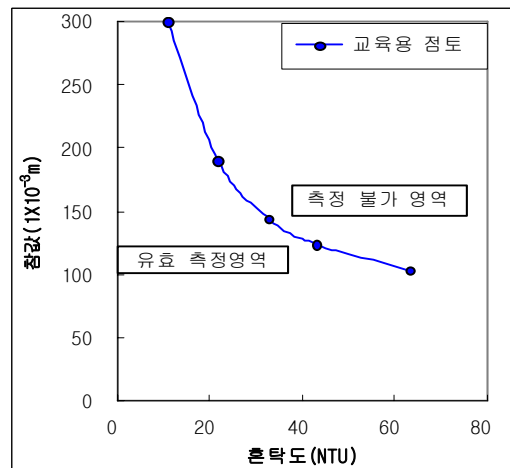


그림 8. 해상조건에서 혼탁도에 따른 유효측정영역

#### 4.4 해상조건(3% 소금물)에서 혼탁도 변화에 따른 유효측정영역

그림 7에는 시료 1의 혼탁도에 따른 측정한계를 나타내었는데 여기서 참값에 대한 측정값의 선형성은 동일하였으나 혼탁도가 증감함에 따라 측정한계는 감소하는 경향을 보였다. 현장 시공 과정에서 혼탁도를 알 수 있다면 이와 같은 실내 모형검증실험 결과를 기준으로 BKS-LRPS의 현장 적용 가능 여부를 결정할 수 있을 것으로 판단되었다.

그림 8은 소금물에서 혼탁도 변화에 따른 레이저 센서의 유효측정영역의 범위를 보여주고 있다. 육상부와 마찬가지로 유효측정영역은 혼탁도의 증가에 따라 지수함수적으로 감소하는 것을 알 수 있었다.

#### 4.5 혼탁도에 따른 유효측정영역의 결정

2종류의 시료에 대하여 육상조건과 해상조건에서 수행한 혼탁도 모형시험결과를 그림 9에 함께 나타내었으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

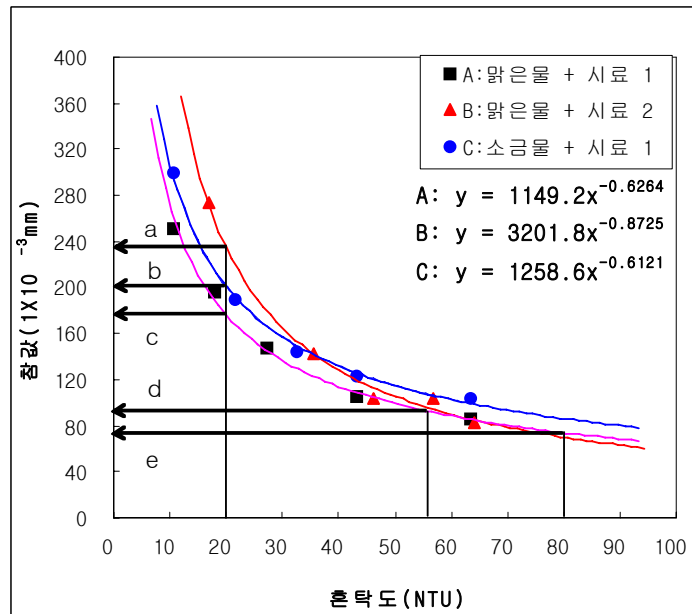


그림 9. 굴착액의 혼탁도에 따른 유효 측정 영역 결정

##### ① 세립분의 함량에 따른 영향

육상부 조건(맑은 물)에서 시료 1(세립분 함량 95%)과 시료 2(세립분 함량 50%)에 대한 혼탁도에 따른 유효측정영역(그림 9의 a, c)을 비교한 결과 낮은 혼탁도(예, 20NTU) 영역에서는 시료 1(a)의 유효 측정 영역은 약 24cm이었으나 시료 2(c)의 경우 약 24cm로 나타났다. 다시 말해 낮은 혼탁도 영역에서는 세립분 함량이 높을수록 유효 측정 영역은 작아짐을 알 수 있었다. 56NTU이상의 영역시료 1과 시료 2의 유효 측정 영역은 거의 차이가 없었다. 즉 낮은 혼탁도 영역에서는 세립분 함량이 높을수록 유효 측정 영역은 작아짐을 알 수 있었으며 높은 혼탁도에서는 세립분의 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

혼탁도가 낮은 경우 유효측정영역은 혼탁도에 따라 급격하게 줄어드는 것을 알 수 있으며 약 56NTU 이상의 영역(그림 9의 d 및 e)에서는 유효측정영역은 거의 일정한 값을 나타내고 있었다.

##### ② 염분의 영향

세립분 함량이 우세한 기준시료 1에 대한 육상부와 해상부 조건에서의 유효 측정영역(그림 9의 b, c)을 비교 하였는데 혼탁도에 따라 유효측정영역이 크게 변화하지 않는 것을 알 수 있었다.

##### ③ 유효측정거리에 관한 제안식

육상부 조건에서 수행된 세립분이 95%인 기준시료 1에 대한 실험 결과에 근거하여 유효측정영역을 안전측으로 식 (1)과 같이 제안할 수 있었다.



$$EMD = B_{ks} \times T_b^{-0.64} \quad (1)$$

$EMD$  : BKS-LRPS의 유효 측정 거리( $1 \times 10^{-3}m$ )

$B_{ks}$  : 흙 시료와 염분에 따른 BKS-LRPS 계수

$T_b$  : 맑은 물에서의 혼탁도(NTU)

여기서, 세립질 성분이 95%이상을 차지하는 시료 1에 대한 유효 측정영역을 하한계로 볼 수 있었으며 육상부 조건에서 유효측정거리가 줄어드는 것으로 나타나고 있었으므로 이러한 조건에서  $B_{ks}$ 는 1149.2로 구할 수 있었다.

## 5. 결론 및 제언

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 혼탁도가 증가함에 따라 BKS-LRPS의 유효측정영역은 감소하는 경향을 보였다. 따라서 굴착공의 혼탁도는 BKS-LRPS의 유효측정영역을 결정하는 중요한 요인임을 알 수 있었다.
- (2) BKS-LRPS의 유효측정영역은 안전측으로 다음과 같이 제안할 수 있었다.

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

$EMD$  : BKS-LRPS의 유효 측정 거리( $1 \times 10^{-3}m$ )

$B_{ks}$  : 흙 입자에 따른 BKS-LRPS 계수(1149.2)

$T_b$  : 맑은 물에서의 혼탁도(NTU)

- (3) 낮은 혼탁도 영역에서는 세립분 함량이 높을수록 유효 측정 영역은 작아짐을 알 수 있었으며 높은 혼탁도에서는 세립분의 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 혼탁도가 낮은 경우 유효측정영역은 혼탁도에 따라 급격하게 줄어드는 것을 알 수 있으며 약 56NTU이상의 영역에서는 유효측정영역은 거의 일정한 값을 나타내고 있었다.
- (4) BKS-LRPS의 유효측정영역에 미치는 염분의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 박봉근 (2007), "BKS-LRPS(Backyoung-KyungSung Laser Roughness Profiling System)의 개발 및 검증에 관한 연구", 경성대학교 박사학위논문
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Nam, M. S. (2004), "Improved Design for Drilled Shafts in Rock", *Ph. D. Thesis*, Department of Civil

and Environmental Engineering, University of Houston, Texas. Department of Electrical Engineering, University of Houston, Texas.

6. O'Neill, M. W., Townsend, F. C., Hassan, K. M., Buller, A., and Chan, P. S. (1996), "Load Transfer for Drilled Shafts in Intermediate Geomaterials." *FHWA Publication No. FHWA-RD-95-172*, Department of Transportation, Federal Highway Administration, Research and Development, McLean, VA.
7. 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.