

< 기술논문 >

말뚝 변위 측정시스템의 진동 평가에 의한 정확도 향상 대책

최영삼*, 정진태†, 이계영**, 한창수***

(2005년 1월 31일 접수, 2005년 11월 15일 심사완료)

A Measure for Improvement in Accuracy by Performance Evaluation of a DPRMs

Youngsam Choi, Jintai Chung, Kyeyoung Lee and Changsoo Han

Key Words : DPRMs(말뚝 변위 측정시스템), Line-Scan Camera(일차원 카메라), Pile Driving(항타), Penetration Depth(관입량), Measurement Deviation(측정편차)

Abstract

In this study, the performance of a DPRMs is evaluated and the measurement precision for the pile driving is presented. The DPRMs is a visual-measurement system for the pile rebound and the penetration movement using a high speed line-scan camera. The DPRMs generates the measurement deviation. It is caused by the strong impact for the pile driving. To reduce it, the vibration signal analysis about the pile driving is performed. As a result, it is confirmed that the tilting frequency of a camera-tripod structure corresponding to excitation frequency range of the ground is under 40Hz. Through the structure modification, the camera-tripod structure is redesigned to the model being free itself from the excitation frequency range of the ground. By the verification testing about the improvement effects, it is inspected that the tilting and measurement deviation of the redesigned DPRMs are reduced.

1. 서론

토목 및 건축현장의 기초공사에서 말뚝(pile)을 시공할 때는 말뚝이 어떻게 얼마나 관입되었는지를 판단할 방법이 필요하다. 말뚝을 어떠한 에너지로 얼마나 관입시켰느냐에 따라 말뚝이 발휘할 수 있는 지지력이 결정되기 때문이다. 따라서 건축현장에서는 몇몇 말뚝을 선택적으로 시험하여 확인하고 나머지는 최종관입량을 측정하여 시공관리를 하고 있다.

말뚝의 최종관입량의 측정방법은 수작업에 의한 방법과 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용하여 연속적인 관입량(penetration)을 측정하는 방법⁽¹⁾, 광학식 변위계를 이용하여 피 측정물의 명암의 경계 변화량을 검출하는 방법, 레

이저 센서(laser sensor)를 이용하는 방법⁽²⁾등이 사용되고 있다. 그러나 이와 같은 기존의 방법들은 작업자의 안전성, 측정 범위의 한계, 항타(pile driving)에 의한 진동 및 주변의 환경적 요인에 의해 편차가 발생하는 단점을 가지고 있다.

이러한 단점을 보완하여 개발된 것이 DPRMs(Digital Pile Rebounding and penetration Monitoring System)⁽³⁻⁵⁾이다. DPRMs은 말뚝의 관입량 및 반발량(rebounding)을 측정할 수 있도록 자동화시킨 항타 관리 시스템이다. Fig. 1과 같이 DPRMs의 구성요소로서 고속의 영상획득이 가능한 카메라(line-scan camera)와 말뚝에 부착되는 특정한 패턴을 갖는 표식(mark), 그리고 측정 데이터를 처리하는 PC로 구성되어 있다. 말뚝 항타시 카메라는 말뚝에 부착된 표식의 특정 패턴들 간의 길이 비를 측정하여 말뚝의 수직, 수평 및 회전 변위를 측정하게 된다.

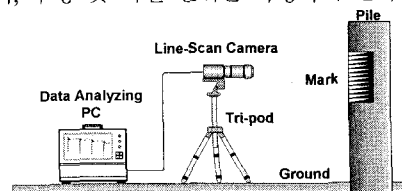


Fig. 1 Components of a DPRMs

† 책임저자, 정회원, 한양대학교 기계공학과

E-mail : jchung@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5287 FAX : (031)406-5550

* 한양대학교 일반 대학원 정밀기계공학과

** 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소

*** 한양대학교 공학대학 기계공학과

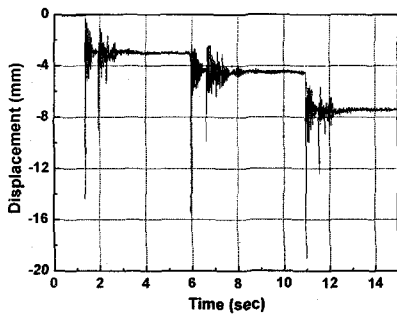


Fig. 2 Measurement for a real pile movement

Fig. 2 와 같이 DPRMs 은 항타시 카메라의 영상으로 말뚝의 반발량 및 최종관입량을 절대 변위로 측정하게 된다. 그러나 DPRMs 은 정밀한 계측을 위해 항타작업시 근접 측정을 필요로 한다. 이런 항타작업은 순간적으로 말뚝에 강한 충격을 가하여 지반진동을 발생시켜 인접지반을 매개로 DPRMs 의 계측 환경에 악영향을 주어 측정 정보의 신뢰성 및 객관성을 감소시키고 있다. 따라서 자동화된 정밀측정의 방법으로 급부상하고 있는 DPRMs 의 완전한 현장 적용성과 성능 향상을 위하여 항타시 발생 가능한 진동영향을 평가하고 측정 편차를 줄이는 것이 절실히 요구된다.

본 연구의 목적은 항타시 카메라의 진동에 의한 DPRMs 의 측정편차 및 편차 발생 원인을 규명하고 진동영향을 저감하여 측정정확도를 향상하는 것이다.

2. 진동신호 계측 시스템

2.1 실험구성

카메라의 진동신호를 측정하기 위해 Fig. 3 과 같이 계측 시스템을 구성하였다. 3 축가속도계(B&K 4626A), 단축가속도계(B&K 4381)를 카메라와 지반, 말뚝에 부착하였다. 적분기가 내장된 신호증폭기(B&K Nexus & LION UV-60)를 사용하여 카메라 수직,수평 방향 변위를 측정하였으며 지반과 말뚝에서는 가속도 신호를 계측하였다. 레코더(Teac LX-10)을 사용하여 진동신호를 계측한 후 Pulse Multi Analyzer(B&K 3560C)를 이용하여 측정 데이터를 분석하였다. 또한 DPRMs 의 말뚝 변위 측정도 동시에 이루어졌다.

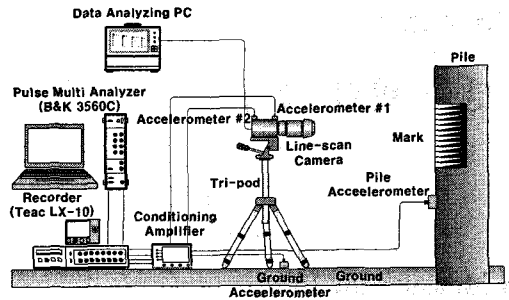


Fig. 3 Experimental set-up for the vibration signal analysis of a line-scan camera

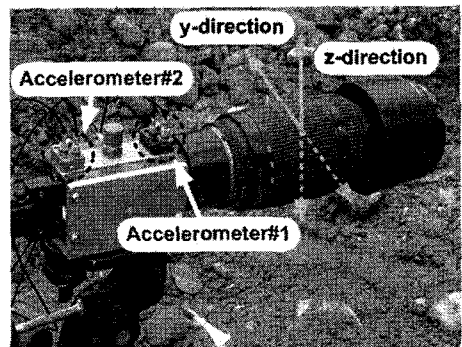


Fig. 4 Measurement for a line-scan camera vibration

2.2 측정조건 및 항목

DPRMs 의 진동 측정은 영종도 모의실험장에서 수행하였다. 가속도계의 진동 변위와 카메라가 측정한 말뚝 변위를 상호 비교하기 위하여 두 측정 시스템의 샘플링 속도(Sampling Rate)를 2kHz 로 동일하게 설정하였다. 또한 말뚝을 관입시키는 항타기의 햄머(Hammer) 높이는 0.8m 로 일정하게 유지하였다. Fig. 4 와 같이 항타시 카메라의 수평 방향(y)과 수직 방향(z)의 변위를 3 축가속도계의 y, z 방향의 변위를 측정하였고 동시에 DPRMs 도 말뚝의 y, z 방향의 변위를 측정하였다.

카메라의 가진원이 될 수 있는 말뚝과 카메라 인접지반의 주파수 분석(Frequency Analysis)을 위해 삼각대 밑 지반과 말뚝에 각각 가속도계를 부착하여 진동신호를 계측하였다. 또한 Fig. 3 처럼 삼각대가 놓여진 지반에 정(Chisel)을 고정시킨후 그 위에 가속도계를 부착하였으며, 말뚝의 수직 방향의 진동신호를 계측할 수 있도록 지그를 제작하여 진동신호를 계측하였다.

Table 1 Measurement conditions and items

Measurement Conditions	Measurement Items	
-Driving height: 0.8m	Vibration Measurement System	-Displacement of camera(y,z)
-Driving number: 1		-Ground Acc
-Sampling rate: 2kHz	DPRMs	-Displacement of Pile (y,z)
-Distance(Camer-Pile): 2.38m		

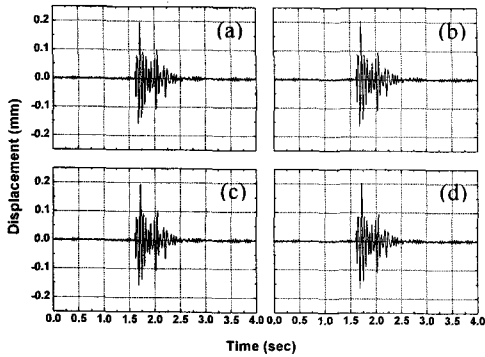


Fig. 5 Displacement of a line-scan camera: (a) z1-displacement, (b) z2-displacement(c) y1-displacement, (d) y2-displacement

이상의 측정조건과 항목을 Table 1 에 정리하였다.

3. 진동신호 분석

3.1 카메라의 y, z 방향 변위 및 틸팅(tilting)

말뚝에 부착된 표식을 촬영하는 카메라는 항타 충격에 의해 진동이 발생하게 되며 특히 카메라의 z 방향 변위는 DPRMs 이 측정하는 말뚝 관입량의 측정편차에 큰 영향을 미친다. 항타시 가속도계 1 지점과 2 지점에서의 y, z 방향의 변위를 Fig. 5 에 나타내었다.

항타시 카메라의 y, z 방향의 진동 변위의 크기는 0.2mm 정도로 거의 유사한 값을 갖는다. 또한 카메라의 틸팅(tilting) 을 구하기 위해 y, z 방향 각각 가속도계 1 번 지점 변위에서 2 번 지점 변위의 차를 구하여 Fig. 6 에 나타내었다. Fig. 6 을 통해 틸팅에 의한 z 방향의 변위가 y 방향 변위보다 크게 나타남을 확인할 수 있다.

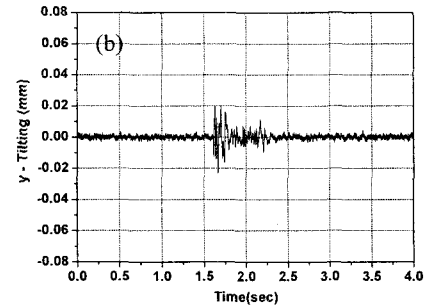
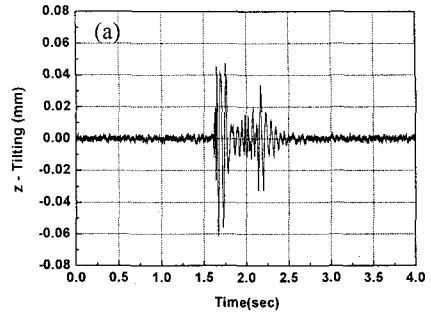


Fig. 6 Tilting of a line-scan camera :(a) z-direction, (b) y-direction

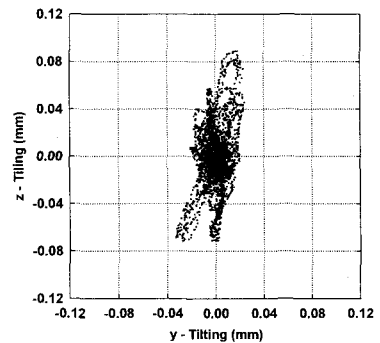


Fig. 7 2-Dimensional plane motion of a line-scan camera

Fig. 7 에서 카메라의 1 번 지점에서의 2 차원 평면운동의 양상을 알아보기 위해 y, z 방향의 틸팅을 시간에 따라 나타내면 틸팅에 의한 z 방향의 운동이 y 방향보다 크게 나타남을 알 수 있다.

3.2 측정편차

항타시 카메라의 틸팅이 발생하게 되어 Fig. 8 과 같이 말뚝에 부착된 표식과 카메라사이의 거리에 의해 비례적으로 DPRMs 의 측정편차가 발생하

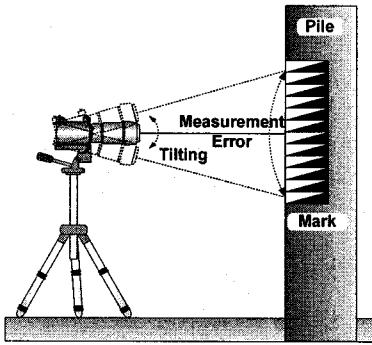


Fig. 8 Measurement error caused by line-scan camera tilting

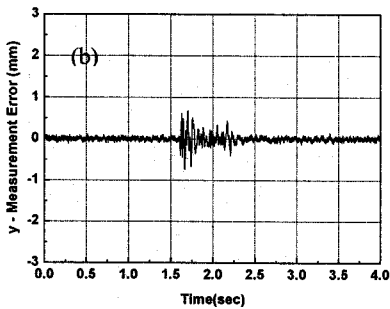
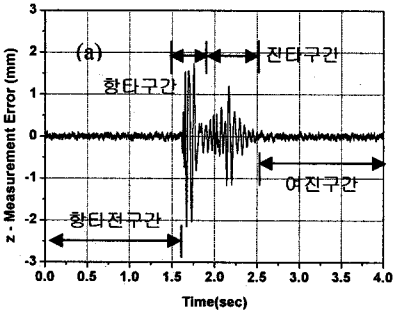


Fig. 9 Measurement errors of a DPRMs: (a) z-direction, (b) y-direction

게 된다. 그러므로 가속도계 사이의 거리, 카메라의 틸팅, 말뚝과 카메라와의 거리에 대한 비례식으로 시간에 따른 측정편차를 구하면 Fig. 9와 같다.

측정편차는 항타전 구간, 항타구간, 잔타구간과 여진구간으로 나누어 각각의 편차값을 Fig. 9에 나타내었다. 특히 항타와 잔타구간에서 측정편차가 가장 크게 발생하고 항타전 구간과 여진 구간에서 적음을 알 수 있다.

DPRMs에서 측정된 말뚝변위와 측정편차를 서로

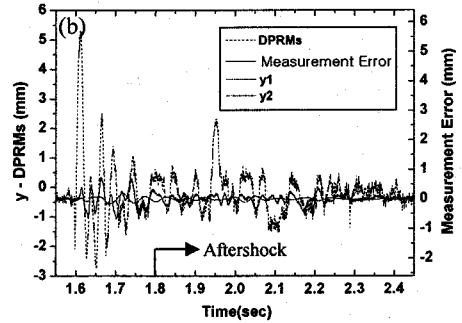
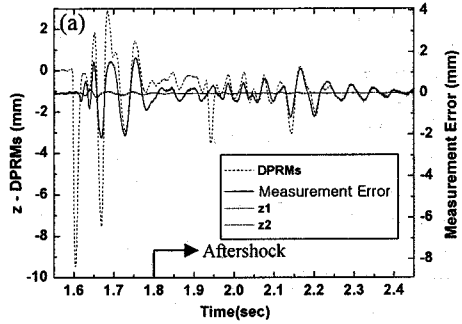


Fig. 10 Comparison of measurement errors: (a) z-direction, (b) y-direction

비교하여 추정편차가 말뚝변위에 어떤 영향을 주는지 Fig. 10에 나타내었다. 비교 그래프를 통해서 카메라의 y 방향 및 z 방향의 1번 지점과 2번 지점은 상당히 미소한 진동이지만 틸팅으로 인한 측정편차는 크게 발생함을 알 수 있다. 또한 말뚝이 첫 항타에 의해 말뚝이 리바운딩하는 순간까지 DPRMs의 측정편차가 거의 없기 때문에 항타와 잔타구간에서 DPRMs의 측정값을 신뢰할 수 있다 반면에 여진구간에서는 말뚝변위와 측정편차가 거의 일치함을 알 수 있다. 즉 여진시 발생하는 DPRMs의 말뚝 거동 측정값은 카메라의 틸팅에 의한 측정편차를 포함하고 있다.

4. 측정편차 발생 원인 분석

항타시 말뚝에 가속도계를 부착하여 얻은 시간응답(Time Response)과 카메라 삼각대가 놓여진 인접지반에 가속도계를 부착하여 얻은 시간응답을 이용하여 주파수분석(Frequency Analysis)을 수행하였다. Fig. 11(a)에서 가진원이 되는 말뚝에서 100Hz 미만의 저주파 성분의 특성을 살펴보면 20~40Hz, 60~70Hz, 80~100Hz의 성분이 크게 나타남을 알 수 있으며, 또한 Fig. 11(b)처럼 인접지반을 통해

카메라를 직접 가진하는 성분은 40Hz 미만의 저주파 성분을 알 수 있다.

DPRMs의 카메라-삼각대 구조의 z 방향 고유진동수(Natural Frequency)를 측정하기 위해 Fig. 12와 같이 가속도계(B&K 4371), 충격해머(Impact Hammer B&K 8202), 신호증폭기(Nexus), Pulse Multi Analyzer(B&K 3560C)를 이용하여 충격해머 실험을 구성하였다. 카메라 및 삼각대의 구조는 말뚝변위 측정기와 동일한 조건으로 하였다. 카메라에 가속도계를 #1~#3 번 지점까지 부착하고 충격해머를 사용하여 가진하였다. 그 결과 지반의 가진 주파수 대역과 일치하는 카메라-삼각대 구조의 톨팅 주파수는 40Hz 이하임을 알 수 있다.

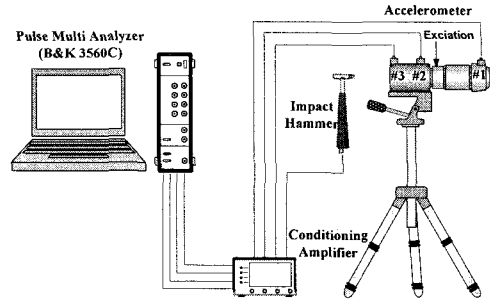


Fig. 12 Experimental Set-up for the vibration system Analysis of a Line-Scan Camera

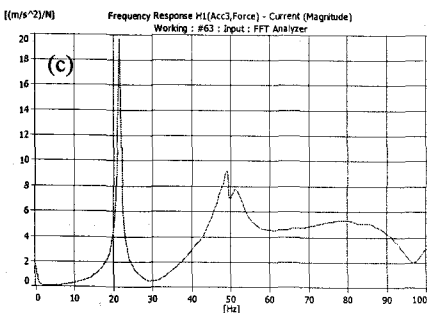
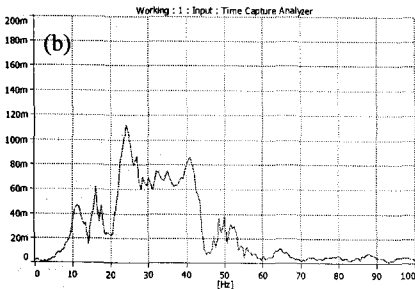
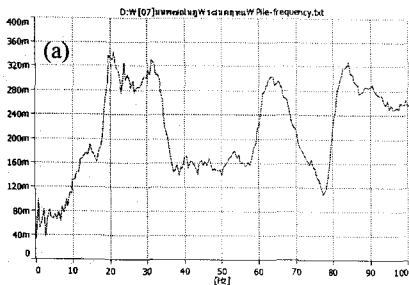


Fig. 11 Frequency response function: (a) pile, (b) ground. (c) Camera-Tripod

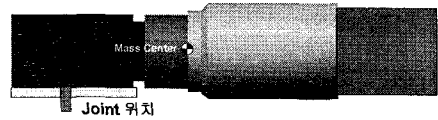


Fig. 13 Mass center and joint position of a line-scan camera

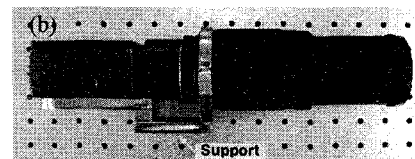
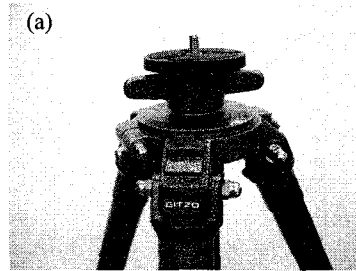


Fig. 14 Improvement of structures: (a) tri-pod and head, (b) camera support

Fig. 13와 같이 카메라의 무게중심을 구하였다. 카메라-삼각대 구조는 카메라 조인트부와 무게중심이 일치하지 않아 항타시 톨팅이 발생할 가능성이 크다. 그러므로 구조 변경을 통해서 조인트부와 무게중심을 일치시켜야 한다.

5. 카메라-삼각대 구조변경

Fig. 14(a)와 같이 측정편차를 최소화 하기 위해 삼각대 및 헤드부분을 구조변경하였다. 기존

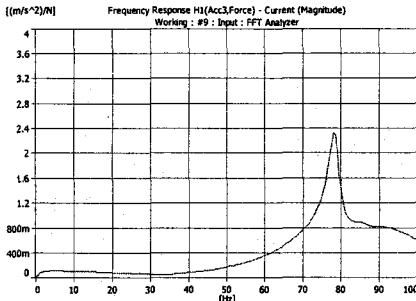


Fig. 15 Frequency response function of an improved DPRMs

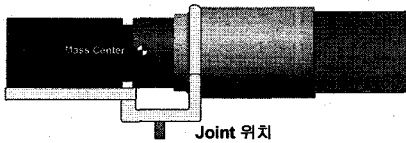


Fig. 16 Mass center and joint position of an improved line-scan camera

삼각대는 삼각대 헤드의 조인트부에 의해 카메라-삼각대의 조인트 강성이 추가되는 방식으로 헤드 부분의 영향으로 측정편차가 크게 발생하였다. 따라서 변경한 구조는 헤드부분을 제거하고 직접 볼트에 카메라 지지부를 결합시키는 방법을 적용하였다. 또한 향타시 카메라의 틸팅을 저감시키기 위해 Fig. 14(b)와 같이 카메라 지지부의 구조를 변경하였다. 이는 카메라 무게중심과 삼각대의 조인트부를 z 방향의 일직선상에 일치시키기 위함이다.

6. 개선효과 검증실험

구조변경된 삼각대 및 카메라 지지구조에 대하여 Fig. 12 와 같이 변경 전과 동일한 방법으로 충격해머로 가진하여 진동실험을 수행하였다. Fig. 15 에서 볼 수 있듯이 변경된 카메라-삼각대 구조의 1st 틸팅 고유진동수는 79Hz 으로서 기존의 22Hz 보다 3 배이상 증가하였으며 이는 삼각대, 헤드부분과 카메라 지지부의 구조변경에 따른 DPRMs 의 강성이 증가되었음을 확인할 수 있으며, 향타시 카메라 인접 지반에 의한 가진 주파수인 40Hz 이하 대역을 회피할 수 있음을 알 수 있다.

또한 기존의 카메라 조인트부는 Fig. 13 처럼 카메라 본체 뒷부분에 위치하고 무게중심은 앞부분에 위치하여 향타시 카메라의 틸팅의 현상을 극대화하는 결과를 초래하였다. 따라서 Fig. 16 처럼 무게중심과 카메라 조인트부를 최대한 근접하게 설계

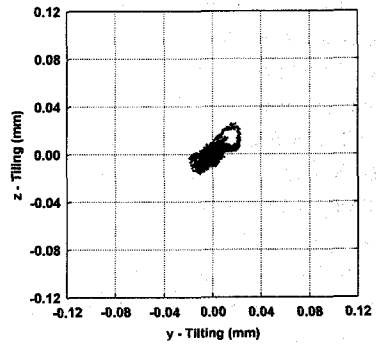


Fig. 17 2-Dimensional plane motion of an improved line-scan camera

Table 2 Comparison of measurement errors for the previous and improved DPRMs

실험구분		항 목			
		향타전 구간 (mm)	향타 구간 (mm)	여진 구간 (mm)	최대 측정편차 (mm)
변경 전	y 방향	0.047	0.287	0.047	1.136
	z 방향	0.081	0.806	0.080	3.076
변경 후	y 방향	0.039	0.184	0.038	0.850
	z 방향	0.041	0.232	0.044	0.893

하고 제작하여 틸팅의 영향을 최소화하였다.

삼각대 및 카메라 지지부의 구조변경후 변경전과 동일한 방법으로 향타시 DPRMs 의 측정편차에 대한 실험을 수행하였다. 구조변경된 DPRMs 는 Fig. 17 처럼 z 방향의 틸팅이 기존의 값에 비해 약 3 배이상 감소되었다. 그 결과 Table 2 와 같이 z 방향 최대 측정편차가 1mm 이내로 감소하였으며 y 방향도 1mm 이내로 구조변경 전보다 다소 감소하는 경향을 보여주고 있다. 구조변경 전/후 향타 구간별 측정편차와 최대 측정편차를 Table 2 에 정리하였다. 향타구간에서 z 방향의 RMS 측정편차는 구조변경 후 약 3 배이상 감소하였으며 최대 측정편차도 상당히 감소한 것을 볼 수 있다. y 방향도 향타구간에서의 측정편차와 최대측정편차가 감소한 것을 볼 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 토목/건축 공사 현장에서 말뚝의 관입량 및 반발량을 측정하는 DPRMs 의 측정정확도 분석하였다. DPRMs 이 측정한 말뚝 변위의 측정편차는 말뚝 향타시 카메라가 놓여진 인접지반을 매개로한 진동에 의하여 카메라의 y, z 방향의 틸팅이 발생하고 말뚝에 부착된 표식 사이의 거리에 비례하여 발생된다. 특히 DPRMs 의 z 방향 변

위에 대한 편차가 y 방향에 비해 크게 발생하였다.

또한 항타 및 잔타구간에서의 DPRMs의 측정값은 신뢰도가 높지만 여진구간에서는 카메라의 틸팅에 의한 측정편차가 크게 발생하였다.

DPRMs의 측정정확도와 현장적용성을 향상시키기 위하여 측정편차 발생 원인을 분석하였다. 항타시 말뚝과 인접지반의 주파수분석 및 카메라-삼각대 구조의 진동실험을 통하여 카메라 틸팅의 원인을 분석하였다. 그 결과 지반의 가진 주파수 대역과 일치하는 카메라-삼각대 구조는 40Hz 이하임을 확인하였다. 카메라-삼각대 구조의 조인트 부분의 강성을 증가를 위해 헤드가 없는 삼각대로 구조변경하였으며 카메라의 무게중심과 지지부가 최대한 일치하게 하였다. 개선효과 검증실험을 통해 구조변경된 DPRMs는 틸팅의 영향이 최소화되고 측정편차가 감소됨을 검증하였다.

참고문헌

- (1) Housel, W. S., 1965, Michigan Study of Pile-Driving
- (2) Hammers, Proceeding of the ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations, Vol. 91, No. SM5, pp.37~64.
- (3) Song-Soo Han, Seok-Ho Kim, 2000, "Pile Rebound and Penetration Monitoring System using Speckle Laser Sensors", Technical Report 2000-0415, Research Institute of Construction Equipment, Samsung Corporation.
- (4) Bum-Jae You, Sang-Rok Oh, Song-Soo Han, San-Heon Lee, 2003, "High-speed Visual Measurement System of Pile Penetration and Rebound Movement for Construction", , 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.435~441.
- (5) Se-Na Lee, Bum-Jae You, Mee-Seub Lim, Sang-Rok Oh, Song-Soo Han, Sang Heon Lee, 2002, "Visual measurement of pile penetration and rebound movement using a high-speed line-scan camera", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '02), vol. 4, pp.4307~4312.
- (6) Mee-Seub Lim, Bum-Jae You, Sang-Rok Oh, Song-Soo Han, Sang Hun-Lee, 2002, "Visual Precise Measurement of Pile Rebound and Penetration Movement Using a High-Speed Line-Scan Camera", Transaction on Control, Automation and Systems Engineering, No. 4, vol.4, pp.341~346.