

대형 원형강관 수직도 모니터링을 위한 3D 모니터링 시스템

구성민^{1,2}, 박해용¹, 오명학¹, 백승재^{1*}

¹한국해양과학기술원 ICT융합연구센터, ²KMOU-OST School 해양과학기술융합학과

Verticality 3D Monitoring System for the Large Circular Steel Pipe

Sungmin Koo^{1,2}, Haeyoung Park¹, Myoung Hak Oh¹, Seungjae Baek^{1*}

¹Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan Korea

²Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, KMOU-OST School, Busan, Korea

요약 석션버켓기초는 20m 이상의 수심 조건에서 경제적인 시공이 가능한 건설 공법이다. 석션버켓기초는 내부가 비어 있는 양동이 가 뒤집어진 형태의 구조물을 목표지점에 위치시킨 후, 버켓 내의 공기나 물을 흡입하여 내/외부의 수압차이에 의한 관입력으로 기초를 설치한다. 안정성 확보를 위해 버켓의 수직도 확보는 필수적이다. 그러나 해저지반의 불균질성이나 편심으로 인하여 버켓의 기울어짐이 발생할 수 있다. 석션버켓기초는 현재 시공과정에서 관입/인발 작업 반복을 통해 수직도를 확보하는 방법이 일반적으로 적용되고 있다. 그러나 이 방법은 현장 작업자의 경험 및 숙련도에 의존적이며 수직도 확보에 비교적 장시간이 소모된다. 본 논문에서는 실시간 석션버켓 수직도 모니터링 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 수직도 데이터를 수집하는 센서부, 수집된 데이터를 처리하여 무선 전송해 주는 컨트롤러부, 원형강관의 수직도 정보를 실시간으로 보여주는 디스플레이부로 구성되어 있다. 제안된 시스템은 기울기 센서와 임베디드 컨트롤러를 활용하여 구현되었다. 제안된 시스템의 실험 결과 roll/pitch가 0.028% 이내의 오차로 측정이 가능함을 확인하였다. 또한, 제안된 시스템을 석션버켓기초 모형실험에 적용하여 수직도 정보의 실시간 확인이 가능함을 보였다.

Abstract A suction bucket foundation, especially useful at depths of more than 20m, is a method of construction. The method first places an empty upturned bucket at the target site. Then, the bucket is installed by sucking water or air into it to create negative pressure. For stability, it is crucial to secure the verticality of the bucket. However, inclination by the bucket may occur due to sea-bottom conditions. In general, a repeated intrusion-pulling method is used for securing verticality. However, it takes a long time to complete the job. In this paper, we propose a real-time suction bucket verticality monitoring system. Specifically, the system consists of a sensor unit that collects raw verticality data, a controller that processes the data and wirelessly transmits the information, and a display unit that shows verticality information of a circular steel pipe. The system is implemented using an inclination sensor and an embedded controller. Experimental results show that the proposed system can efficiently measure roll/pitch information with a 0.028% margin of error. Furthermore, we show that the system properly operates in a suction bucket-based model experiment.

Keywords : Suction Pile, Verticality, Bucket Foundation, Tilt Sensor, Controller, Display

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설공법 개발, 20SCIP-B119960-05)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

*Corresponding Author : Seungjae Baek(KIOST)

email: smkoo@kiost.ac.kr

Received August 7, 2020

Revised October 20, 2020

Accepted November 6, 2020

Published November 30, 2020

1. 서론

교량, 해상 풍력발전기 등 해상 구조물 건설을 위해서는 하부구조 및 기초 시공이 선행되어야 한다. 해저지반 조건에 적합하고 경제성이 우수한 기초 시공 방식 선정은 전체 구조물의 안전성뿐 아니라 시공비에도 큰 영향을 준다. 일반적으로, 30m 미만 수심에서는 중력식(concrete gravity base structure, GBS)이나 모노파일(monopile) 형식의 기초가 사용되며, 30m-50m 수심에서는 자켓(jacket)이나 석션버킷(suction bucket)이 적용된 모노포드(monopod)와 트라이포드(tripod) 공법이 사용된다[1].

이 중, 석션버킷기초는 내부가 비어 있는 뒤집어진 양동이(bucket) 형태의 구조물을 목표지점에 위치시킨 후, 버킷 내의 공기나 물을 흡입(suction)하여 기초를 설치하는 공법이다. 즉, 관입 저항력보다 큰 석션압을 버킷에 가하여 외부와 내부의 수압 차이에 의한 관입력으로 버킷을 지반에 관입한다. 석션버킷기초는 20m 이상의 수심 조건에서 간편하고 경제적인 시공이 가능하기 때문에 해상기초 시공으로 관심을 받고 있으며[2], 관련 연구가 활발히 진행되고 있다[3-15].

파일이 기울어지면 구조물의 안정성 및 성능에 영향을 미치게 되므로 버킷의 수직도 확보는 매우 중요하다[11]. 그러나, 해저지반의 불균질성이나 편심으로 인하여 석션버킷기초 시공 중 버킷의 기울어짐이 발생할 수 있다. 석션버킷기초는 현재 시공과정에서 관입/인발 작업 반복을 통해 버킷의 수직도를 확보하는 방법이 일반적으로 적용되고 있다. 일본 나오에쓰항에서 석션 파일 설치 시 인발과 석션압으로 관입하는 작업을 반복하여 수직도 0.9도를 유지하며 시공한 사례가 있다[12]. 그러나, 인발과 관입을 반복하여 수직도를 확보하는 방법은 현장 작업자의 경험 및 숙련도에 따라 수직도 확보가 좌우되며, 수직도 확보를 위해 비교적 장시간이 소모되는 단점이 있다. 최근에는 석션압을 조절하여 수직도를 확보하는 기술과 [13, 14] 리프팅 케이블 길이를 조절하여 수직도를 확보하는 기술[11, 15] 등 석션 파일의 수직도를 확보하기 위한 다양한 기법들이 연구되고 있다. 그러나, 수직도 확보는 여전히 현장 작업자의 경험과 숙련도에 의존적이기 때문에 실시간으로 기초의 경사도를 모니터링 할 수 있는 시스템이 요구된다.

본 논문에서는 석션버킷기초를 위한 원형강관 석션 관입 시 수직도 모니터링을 위한 제어정보 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 강관의 수직도를 계측하는 센서

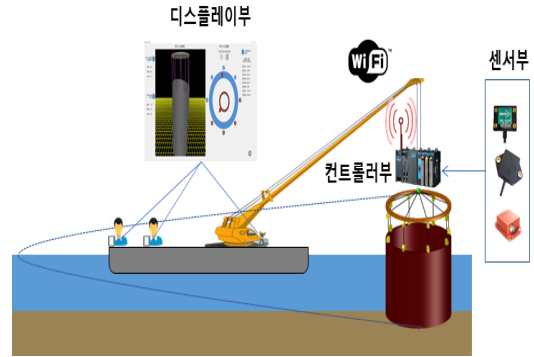


Fig. 1. Verticality 3D Monitoring System overview

부, 취득된 데이터를 분석하여 송신하는 컨트롤러부, 수직도 정보를 전송받아 실시간으로 표출하는 디스플레이부로 구성되어 있다. 제안된 시스템은 기울기 센서, 리눅스 기반 임베디드 컨트롤러 및 윈도우 기반 PC로 실제 구현되었으며, 축소 모형실험을 통해 강관 수직도의 실시간 계측이 가능함을 확인하였다. 개발된 시스템은 강관의 수직도 모니터링과 더불어 교량 건설 등 수직도 모니터링이 요구되는 다양한 분야에 활용할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 제안하는 대형 원형 강관 수직도 제어정보 시스템의 설계 및 구현에 관해 설명한다. 3장에서는 시스템의 실험 및 결과를 소개하고 마지막으로 4장에서 결론을 도출한다.

2. 설계 및 구현

2.1 시스템 설계

원형강관의 수직도 정보는 원형강관 자체의 roll/pitch/yaw, 원형 강관이 고정되어 있는 상부 구조물의 roll/pitch/yaw, 그리고 상부 구조물과 원형강관의 상대적 위치변화 및 연결 상태로 표현된다. 이들 정보의 효율적 수집과 표출을 위해 본 논문에서는 Fig. 1과 같은 형태의 강관 수직도 제어정보 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 센서부, 컨트롤러부, 디스플레이부로 구성되어 있다. 센서부는 최소 2축 이상의 기울기 측정이 가능한 센서로 구성되어야 하며, 데이터의 신뢰성을 위해 동종 센서를 복수 개 부착하거나 이종 센서를 복수 개 부착 후 수집된 데이터를 퓨전(fusion)함으로써 기존과 다른 수준의 정보를 제시하는 것이 가능하다. 이에 따라, 센서부는 RS-232/422/485 등의 UART 입력 및 아날로그/디지털 입력 신호 등 다양한 종류의 센서를 필요에 따라 복

수 개 장착할 수 있도록 설계하였다. 컨트롤러부는 다양한 복수 개의 센서로부터 데이터를 입력받아 수집된 데이터를 전처리하고 결정된 강관의 수직도 정보를 유/무선 통신으로 전송한다. 디스플레이부는 컨트롤러로부터 원형강관 수직도 데이터를 수신받아 3D로 디스플레이함으로써 원형강관 수직도 정보의 직관적인 파악을 가능하게 한다. 컨트롤러부와 디스플레이부는 유/무선 통신으로 데이터 송/수신이 가능하며 필요시 별도의 사설망을 구축하여 내부망으로 데이터를 주고받는다. 추가적으로, 컨트롤러는 계측된 정보에 따라 강관의 수직도를 동적으로 자동 제어하기 위해 복수 개의 아날로그/디지털 출력 신호를 인가할 수 있다.

Table 1. MTLT105D-R specifications

Seonsor performance	
Axes(Tilt)	Pitch: Roll
Range	±90°, ±180°
Resolution	0.05°
Static Accuracy (-40 to 70C)	0.5°
Dynamic Accuracy (-40 to 70C)	2.0°
Axes(Acceleration)	X, Y, Z
Range(g)	±4
Resolution (mg)	0.5
Accuracy (mg) (±1g input; -40 to 70C)	±10
Programmable Tilt Alarm Vout(V)	3.3
Bandwidth(Hz)	50
Electrical	
Input Voltage(V)	9 to 32
Power Consuption(mW)	< 400
Interface	RS-232
Environment	
Operating Temperature(°C)	-40°C to 70°C
Non-Operating Temperature(°C)	-55°C to 85°C
Physical	
Enclosure	Plastic
Size(mm)	50 x 40 x 15
Protection Class	IP67

Table 2. APAX-5580 specifications

System specifications	
CPU	APAX-5580-473AE: Intel Core i7 4650U 1.7GHz APAX-5580-433AE: Intel Core i3 4010U 1.7GHz APAX-5580-4C3AE: Intel Celeron 2980U 1.6GHz
Memory	1 slot 4GB DDR3 SO-DIMM (Maximum to 8GB)
BIOS	AMI(UEFI)
Graphics	Intel HD Graphics 5000/4400
Storage	1x mSATA (for operation system) 1x SD slot (for data storage) 1x SD slot (for OS backup)
LAN	1x Intel i210-IT GbE 1x Intel i218-LM GbE, support Intel AMT
USB	2x USB2.0 2x USB3.0 1x USB2.0(internal)
Audio	Line Out
Display	1x VGA (1920X1080@60Hz)
Serial Ports	1x RS-232/422/485, DB9, 50~115.2kbps
LED Indicators	PWR, RUN, SATA, UPS, ERR, Over Temp.,Abnormal Volt, SYS Recovery
Watchdog Timer	Programmable 256 levels time internal for 1 to 255secs
Expansion Slot	1x Full-size mPCIe slot 1x Half-size mPCIe slot
OS support	Microsoft Windows 7/8, Linux Kernel 3.X
Hardware specifications	
Dimensions(W x D x H)	128 x106 x110mm
Enclosure	Aluminum Housing
Mounting	DIN-Rail, Wall mount
Weight(Net)	1.8kg (4.0lbs)
Power Requirement	24VDC±20%
Power Consumption	28W(Typical), 72W(Max)
Operation Temperature	-10~60°C
Storage Temperature	-40~85°C
Relative Humidity	10~95%@40°C (non-condensing)

2.2 강관 수직도 제어정보 시스템 구현

센서부는 2축 기울기의 측정이 가능한 ACEINNA社의 MTLT105D-R를 사용하였다. Table 1은 센서의 세부 사양이다[16]. MTLT105D-R 센서는

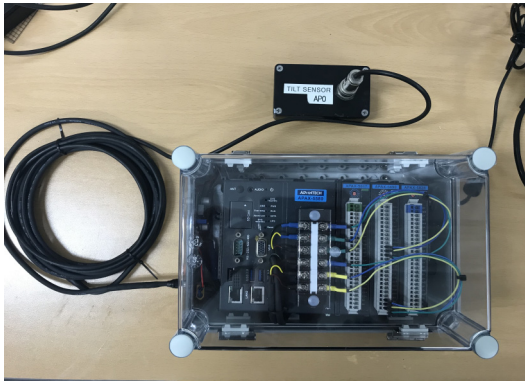


Fig. 2. Sensor and Controller parts for verticality 3D monitoring system

9V에서 32V 사이의 전압에서 동작하며 pitch와 roll 2축의 데이터를 50Hz의 주기로 측정하여 RS-232 통신으로 전송한다. 센서의 측정 오차는 0.5°에서 2° 사이로 pitch는 0.028%~1.111%, roll은 0.014%~0.056%의 오차가 발생 될 수 있으며 센서 오차 범위 이내의 허용 수직도가 요구되는 구조물에 본 시스템의 적용이 가능하다. 수직도 제어정보 시스템을 위한 센서는 해상 환경에서 센서의 해수노출로 인한 파손을 방지하기 위하여 별도 수밀 처리하였다.

컨트롤러부는 가변갯수의 UART/아날로그/디지털 입력 신호를 수집할 수 있는 ADVANTECH社의 APAX-5580을 사용하였다. 컨트롤러의 세부 사양은 Table 2에 나타내었다[17]. APAX-5580 시리즈는 24V DC로 동작하며 목적에 따라 CPU와 저장용량의 사양을 선택할 수 있고 윈도우와 리눅스를 모두 지원하여 호환성이 좋다. 특히, 다양한 포트들이 내장되어 있어 확장성이 좋고 확장 슬롯을 통해 추가로 필요한 UART/아날로그/디지털 입력 포트를 추가 할 수 있으며, 복수 개의 센서 입력 수집이 가능한 특징을 가진다.

센서를 통해 취득된 데이터는 컨트롤러 내에서 Kalman 필터를 통해 보정된 후, 디스플레이부로 전송된다. 데이터 전송은 유/무선 네트워크의 사용이 모두 가능하며, 공인 IP를 사용하는 경우에는 인터넷에 연결된 어느 컴퓨터에서도 정보 확인이 가능하다. 데이터 송수신 시에는 재전송 등의 기능으로 인해 데이터의 가용성 확보가 용이한 TCP 프로토콜을 사용하였다. 구현이 완료된 센서부와 컨트롤러부는 Fig. 2에 나타내었다.

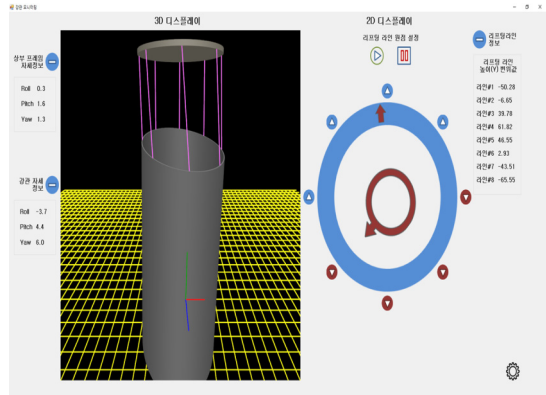


Fig. 3. 3D GUI program



Fig. 4. Set up window

2.3 3D GUI프로그램

디스플레이부에 표시되는 모니터링 프로그램은 Fig. 3와 같이 상부 프레임과 하부 강관 자세 정보, 3D 디스플레이 화면, 2D 디스플레이 화면, 리프팅 라인 정보, 설정 창 버튼으로 구성된다. 3D 디스플레이 화면은 마우스 휠 버튼과 드래그를 통해서 원형 강관을 줌 인/아웃 및 회전 시키며 세부상태를 확인할 수 있도록 구현하였다. 상부 프레임과 하부강관 자세 정보는 수직도 제어정보 시스템 S/W로부터 전송받은 센서 값을 출력해 주며, 추가적으로 yaw 값의 모니터링이 필요할 경우 제어정보 시스템 S/W의 변경만으로 구동이 될 수 있도록 roll, pitch, yaw 값이 표시되도록 구현하였다. 3D 디스플레이

화면은 상부프레임과 강관 자세가 실시간으로 반영되어 디스플레이되며 줌 인/아웃 기능, 회전 기능이 가능하다. 2D 디스플레이 화면은 원형 강관을 위에서 바라볼 때의 2차원 평면 디스플레이 화면으로 리프팅 라

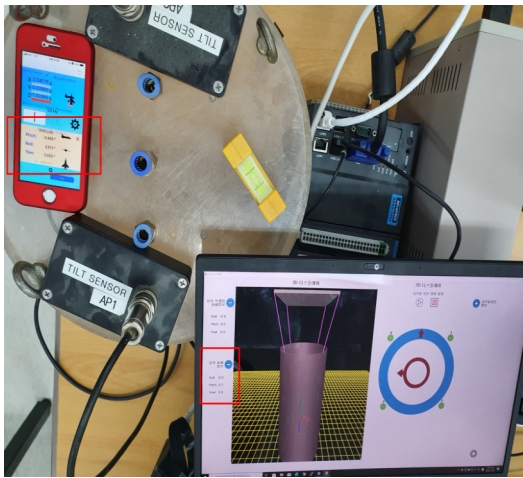


Fig. 5. Verticality pericision experiment

인 원점을 설정할 수 있도록 하였으며, 2D 디스플레이 화면 중앙에 원형 강관의 기울어짐정도를 나타내고 기울어짐이 허용 범위를 초과할 경우 주위의 인디케이터에 표시되는 색의 변화를 주어 강관이 어느 쪽으로 어느 정도 기울어졌는지 직관적으로 알 수 있도록 하였다. 리프팅 라인 정보는 초기 기준값으로부터 리프팅 라인별 높이 값을 출력하여, 수치적으로 전체 라인의 변위 값을 알 수 있도록 구성하였다.

설정 창은 메인 화면의 우측 하단의 버튼을 클릭하여 진입할 수 있으며, Fig. 4와 같이 3D 모델링 설정 창, 수평도 표시 범위 설정 창, 원형 라인 설정 창, 서버 연결 설정 창으로 구성된다. 3D 모델링 설정 창은 원형 강관 시공 형태에 맞게 상부 프레임의 모양과 리프팅 라인의 개수를 선택할 수 있으며, 사용자 편의에 따라 강관의 3D 모델 크기를 조절할 수 있도록 하였다. 수평도 표시 범위 설정 창은 시공 목적에 따라 강관의 기울기 허용 범위의 한계를 정할 수 있다. 설정된 값을 초과할 경우 메인 화면의 2D 디스플레이 창의 인디케이터 색을 통해 사용자가 알 수 있도록 해준다. 원형 라인 설정 창은 원형 강관 시공 시 리프팅 라인의 개수와 각 라인이 배치되는 각도를 임의로 지정할 수 있도록 해준다. 서버 연결 설정 창은 수직도 계측정보를 활용한 시스템 S/W의 IP 주소를 입력하여 접속할 수 있도록 해준다. 연결 성공 시점부터 센싱된 기울기 값을 3D GUI 수직도 모니터링 시스템에 디스플레이한다.

시스템 S/W는 강관으로부터 수직도 정보를 취득 및 수집하고 GUI 프로그램은 취득된 정보를 수직도 제어정보 시스템 S/W로부터 전송받아 화면에 표시하여 사용자

가 직관적으로 모니터링 할 수 있도록 한다. 해상건설 환경에서는 일반적으로 네트워크 상태가 고르지 못하다. 따라서, 무선 공유기를 통한 내부망 통신으로 데이터를 전송하도록 구성하였다.

3. 실험

석선버켓기초 공법의 경우 자체의 수직도 기준은 없으나, 석선파일 적용 대상구조물의 시방기준이나 설계 시 제시된 허용 수직도 이내로 시공되어야 한다[15]. 석선버켓기초를 위해 삽입되는 강관의 정밀한 수직도 확보를 위해서는 강관의 수직도를 실시간으로 모니터링하며 기울기를 조정하는 것이 효과적이다. 하지만, 현재는 삽입되는 강관의 수직도를 실시간으로 모니터링 할 수단이 없어 수직도가 만족될 때까지 관입/인발을 반복하며 수직도를 확보하는 방법을 사용해왔다. 본 논문에서 제안하는 시스템이 석선버켓기초 공법에 효과적으로 적용되기 위해서는 측정된 수직도의 정밀도와 실시간성이 중요하다. 따라서, 수직도의 정밀도와 실시간성을 확인하기 위한 실험을 수행하였다.

원형 강관 수직도의 정밀도는 센서의 정밀도에 의존적이다. 본 논문에서 제안한 시스템에서 사용된 2축센서의 오차는 약 1.1% 미만이다. Fig. 5는 제안된 시스템의 정량적 오차를 실제로 측정하기 위한 실험이다. 제안된 시스템은 수평 상태일 때 원점을 설정할 수 있도록 설계되어 있으므로 평형계를 이용하여 평형 상태일 때 센서의 영점을 맞추었다. 측정 결과 제안된 모니터링 시스템의 오차가 roll은 약 0° pitch는 약 0.05°로 측정되었고 상용프로그램의 오차는 roll은 약 2.5°, pitch는 약 0°로 측정되어 제안된 시스템이 상용프로그램에 비해 더 정밀하게 수직도를 측정할 수 있음을 확인했다.

Fig. 6는 제안된 시스템을 적용한 석선버켓기초 모형 실험이다. Fig. 7과 같이 원형 강관 모형 상부에 2개의 2축 기울기 센서를 부착하였고 실험을 진행하는 동안 제안된 시스템을 통해 모니터링을 진행하였다. 모니터링 시스템을 적용한 모형실험 환경을 통해 기울기 정보의 실시간 표시가 가능하며 강관의 수직도 확보에 효과적임을 확인하였다.

제안된 시스템의 데이터 표시에 걸리는 시간은 식 (1)과 같으며, T_{cal} 에 걸리는 시간은 식 (2), T_{trans} 에 걸리는 시간은 식 (3), T_{disp} 에 걸리는 시간은 식 (4)와 같다.

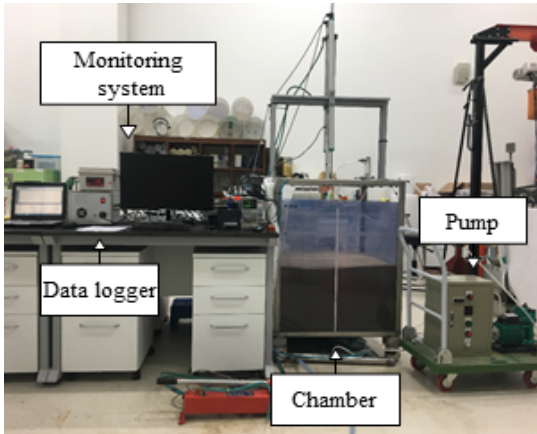


Fig. 6. Model test environment

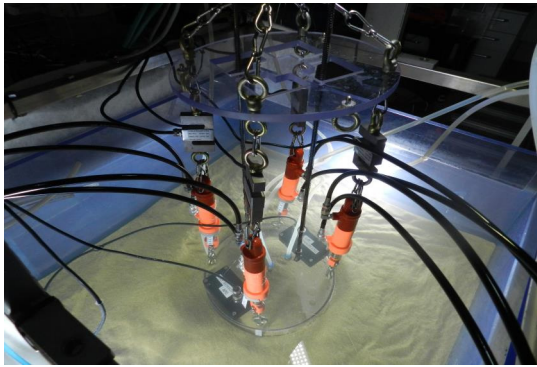


Fig. 7. Tilt sensor on circle pipe

$$T = T_{cal} + T_{trans} + T_{disp} \quad (1)$$

Where, T_{cal} denotes data calculate, T_{trans} denotes data transfer T_{disp} denotes data display

$$T_{cal} = T_{sens} + T_{hw} + T_{c-app} \quad (2)$$

Where, T_{sens} denotes sensor, T_{hw} denotes h/w line T_{c-app} denotes controller application

$$T_{trans} = T_{c-os} + T_m + T_{s-os} \quad (3)$$

Where, T_{c-os} denotes controller OS protocol stack, T_m denotes h/w medium T_{s-os} denotes server OS protocol stack

$$T_{disp} = T_{g-app} + T_{mon} \quad (4)$$

Where, T_{g-app} denotes GUI application, T_{mon} denotes monitor

T_{sens} 는 센서가 수직도 정보를 읽는 시간으로 제안된 시스템에 적용된 센서는 50Hz로 동작하므로 0.02초마다

1개의 데이터를 읽는다. T_{hw} 는 센싱된 데이터가 하드웨어 선을 따라 컨트롤러로 들어오는 시간을 의미하며 1psec 이하의 시간이 소요된다. T_{c-os} 와 T_{s-os} 는 데이터를 전송 및 수신하기 위해 운영체제가 처리하는 시간을 의미하고 T_{c-app} 과 T_{g-app} 은 컨트롤러와 모니터링 PC에서 데이터를 처리하기 위해 소요되는 시간을 의미한다. APAX 5580의 CPU는 1.7GHz로 동작하고 대부분의 PC의 CPU 또한 2.0GHz 이상으로 동작하므로 2000개의 명령어를 처리한다고 가정했을 때 약 1μsec가 소요된다. T_m 은 컨트롤러의 데이터가 3D GUI 프로그램으로 전송되는 시간을 의미하며, wi-fi 환경에서 ping 명령어를 통해 전송 지연시간을 확인해본 결과 약 11.8ms가 소요되었다. T_{mon} 은 모니터가 데이터를 표출해주는 시간으로 현재 대부분의 모니터는 60Hz 이상으로 동작하므로 약 0.016초가 소요된다. 따라서, 수직도 정보를 취득 후 표출까지 약 0.048초의 시간이 걸리므로 실시간성을 보장한다.

4. 결론

본 논문에서는 석선버켓기초 공법 활용 시 대형 원형강관의 수직도를 모니터링하기 위한 시스템을 제안했다. 수직도 모니터링 프로그램은 3D와 2D 디스플레이 화면 등으로 구성되며, 수평 상태일 때 원점을 설정할 수 있도록 하여 수직도 오차를 최소화한다. 또한, 원형 강관의 시공 형태에 따라 상부 프레임의 모양과 리프팅 라인 개수, 각도 등을 설정할 수 있도록 하여 다양한 상황에 사용 가능하며, 직관적인 인터페이스 사용으로 실제 시공 현장에서 효율적인 적용 및 정보 파악이 가능하다. 제안된 시스템의 오차 측정 결과 오차율 roll/pitch 오차 0.028%내로 정밀하게 수직도 측정이 가능함을 확인하였고 모형 실험 환경에서도 잘 동작함을 확인했다. 향후, 실제 석선버켓기초 시공 환경에서 제안된 시스템을 적용하여 실제 역 검증 테스트를 진행하여 시스템의 신뢰성을 검증할 예정이다.

References

[1] Myunghak Oh, Osoon Kwon, Keun-Soo Kim and Insung Jang, "Economic Feasibility of Bucket Foundation for Offshore Wind Farm", *Journal of the*

- Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No 4 pp. 1908-1914, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.4.1908>
- [2] Heejung Youn, Insung Jang, Myounghak Oh, Osoon Kwon, and Sungjun Jung, "Trend in suction bucket foundation for offshore wind turbine", KGS Fall National Conference, KGC, Gyeonggi, Korea, pp.494-403, September 2010.
- [3] Ryu, M. S., Lee J. S., Kwag, D. J., and Seo, Y. H., "Verification of tripod suction pile applicability through dynamic characteristic analysis of offshore wind turbine at each installation stage" *Journal of wind energy*, Vol. 10, No. 3, pp. 12-21, 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33519/kwea.2019.10.3.002>
- [4] Kim, B., Kim, Y., Jin, B., Bae, K., and Youn, H., "Numerical analysis on tilting control of suction pile for offshore wind power" *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 9, pp. 5-12, 2016.
- [5] Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT), "Development of erection method for marine bridge foundations", MOLIT, Korea, 2015.
- [6] Houlsby, G. T. and Byrne, B. W. (2000). "Suction caisson foundations for offshore wind turbines and anemometer masts" *Wind engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 249-255.
DOI: <https://doi.org/10.1260/0309524001495611>
- [7] Houlsby, G. T., Ibsen, L. B. and Byrne, B.W., "Suction caissons for wind turbines", *Proc., Int. Symp. on Frontiers in offshore geotechnics*, Taylor&Francis group, London, pp. 75-94, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1201/noe0415390637.ch4>
- [8] LeBlanc, C., Houlsby, G. T. and Byrne, B.W., "Response of stiff piles in sand to long term cyclic loading", *Geotechnique*, Vol. 60, No. 2, pp. 79-90, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.7.00196>
- [9] Kim, Y. S. and Jang, Y. S., "Analysis of load capacity and deformation behavior of suction pile installed in sand", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 11, pp. 27-37, 2011.
- [10] Lee, J. H., Kim, D. W., Chung, M. K., Kwak, K. S. and Jung, Y. H., "Numerical analysis of the suction pile behavior with different lateral loading locations", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 4, pp. 67-76, 2011.
- [11] Park, Haeyong, Oh, Myounghak, Kim, Sungwon, Han, Taekhee, and Baek, Seungjae, "Model Tests on Verticality Correction using Individual Length Control Method for Lifting Cable during Suction Pile Penetration", *J. Korean Soc, Hazard Mitig*, Vol. 19, No.5, pp.217-223, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.5.217>
- [12] Korea Ocean Research & Development Institute (KORDI), "Suction foundation structure technique manual", KORDI, Korea, 2010.
- [13] Kwag, D., Oh, M., and Kwon, O, "Field installation tests of monopod suction pile and tripod suction buckets", Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2013, Nantes, France, pp. 1-8, June 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2013-10100>
- [14] Kim, Y.S., Bae, K.T., Lee, J.P., Joung, J.W., and Choo, Y.W, "Model tests for tilting control of suction bucket foundation for offshore wind turbine", *J. Korean Soc. Hazard Mitig*, Vol. 17, No. 2, pp. 207-218, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.2.207>
- [15] Haeyoung Park, Myounghak Oh, and Hyoun Kang, "Effect of lifting Cables tension on verticality correction of suction pile during ground penetration", *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 7, No. 2, pp. 63-72, 2020.
DOI: <http://doi.org/10.20481/kscdp.2020.7.2.63>
- [16] DatasheetsPDF.com, "Sensor Module. MTLT105D-R Datasheet", Available From: <https://datasheetspdf.com/pdf/1266331/MEMSIC/MTLT105D-R/1> (accessed Aug. 03, 2020)
- [17] ADVANTECH, "APAX-5580 User Manual", Available From: http://advdownload.advantech.com/productfile/Downloadfile4/1-1JA3U71/APAX-5580_User_Manual_ed.1-FINAL.pdf (accessed Aug. 03, 2020)

구 성 민(Sungmin Koo)

[정회원]



- 2018년 8월 : 단국대학교 대학원 컴퓨터공학 (공학석사)
- 2019년 2월 ~ 현재 : KMOU-OST school 대학원 해양과학기술융합학과(박사과정)

<관심분야>

운영체제, 시스템소프트웨어

박 해 용(Haeyoung Park)

[정회원]



- 2011년 2월 : 단국대학교 지반공학대학원 (지반공학석사)
- 2011년 9월 ~ 2014년 6월 : ㈜새길이엔씨 대리
- 2015년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연구원

<관심분야>

해양지반, 해양기초

오 명 학(Myounghak Oh)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 2014년 2월 : 한국해양과학기술원 선임연구원
- 2014년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

<관심분야>

해양지반, 지반환경공학

백 승 재(Seungjae Baek)

[정회원]



- 2007년 2월 : 단국대학교 컴퓨터과학(이학석사)
- 2010년 2월 : 단국대학교 컴퓨터공학(공학박사)
- 2011년 6월 : ㈜프롬나이(벤처 창업)

- 2013년 9월 : Univ' of Pitt Post- doc.
- 2016년 2월 : 단국대학교 조교수
- 2016년 7월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

<관심분야>

운영체제, 스토리지 시스템, 시스템소프트웨어