

# 석선파일 관입중 수직도 확보를 위한 리프팅케이블 자동 제어 모듈 모형실험

박해용\*, 구성민\*, 오명학\*, 백승재\*, 정상기\*

\*한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터

e-mail:hypark@kiost.ac.kr

## Tests on Automatic Module of Lifting Cable Control for Verticality during Penetration of Suction Pile

Haeyong Park\*, Sungmin Koo\*, Myounggak Oh\*, Seungjae Back\*, Sangki Jung\*

\*Dept. of Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

### 요약

석선파일 관입시 위치별 케이블의 개별 길이제어에 의해 장력차이로 인해 기울어진 위치에서 관입에 저항하도록 하고, 반대편에서는 관입을 유도함으로써 수직도를 보정할 수 있다. 본 연구에서는 케이블 개별 제어 자동화를 위해 수직도를 계측하는 시스템과 액추에이터를 장착한 리프팅케이블 개별 길이제어 시스템을 연계한 자동화 모듈을 개발하였다. 자동화 모듈을 이용하여 모형실험을 수행한 결과, 석선파일 지반관입중 수직도 계측에 의한 기울기를 바탕으로 위치별 액추에이터의 길이를 자동으로 조절하여 목표 수직도 이내로 설치됨을 확인하였다.

케이블 개별 제어 자동화시스템을 개발하였고, 이를 검증하기 위해 모형실험을 수행하였다.

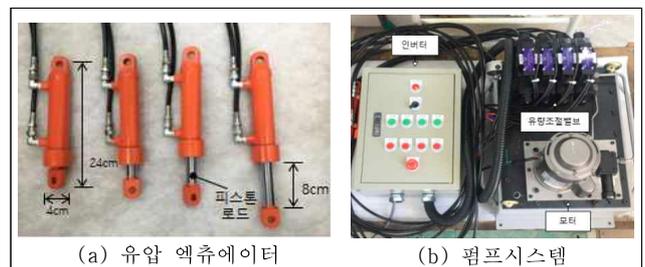
### 1. 서론

석선파일 관입시 수직도 확보를 위해 기존에는 관입/인발을 반복적으로 수행하여 수직 오차를 보정하는 방법이 적용되었다. 그러나 이는 작업자의 경험 및 숙련도에 의해 오차가 발생할 수 있어 체계적으로 수직도를 보정할 수 있는 기술이 필요하다. 이를 위하여 석선 파일 관입과정에서 수직도를 보정하기 위해 기울어진 위치와 각도에 따라 개별적으로 리프팅 케이블의 길이를 조절할 수 있는 기법을 고안하였다. [1] 이를 검증하기 위해 현장테스트를 수행하였고, 석선파일 관입중 파일의 경사도에 따라 위치별 리프팅케이블의 길이를 수동으로 조절하는 방법을 적용하였다. [2] 실험에 의하면 수동으로 케이블의 길이를 조절하여 파일의 수직도 보정이 가능하지만, 기울어진 위치가 변화될 경우 관입과정에 적용되는 본 기법이 용이하지 않았다. 이에 기울어진 위치에 따라 케이블의 길이를 조절하는 자동화 기법이 필요하다. 한편, 케이블의 길이 조절시 석선파일의 수직도를 실시간으로 파악할 수 있도록 2축 경사계와 정보제공 컨트롤러, GUI로 구성된 수직도 제어정보시스템을 개발하였다. 본 연구에서는 석선파일 설치시 목표로 하는 수직도만큼 자동적으로 보정할 수 있도록 개별제어 시스템과 수직도 제어정보시스템을 연계하여

### 2. 석선파일 수직도 확보 기술 개발

#### 2.1 리프팅케이블 개별 길이제어 시스템

석선파일 관입중 리프팅케이블 개별 길이제어는 케이블에 유압식 액추에이터를 장착하여 구현하였다. 모형실험에 적용되는 유압 액추에이터와 액추에이터 작동을 위한 펌프시스템은 그림 1과 같다. 하나의 액추에이터는 최대 8cm까지 조절할 수 있으며, 피스톤 조절속도는 석선파일의 관입속도를 고려하여 분당 1cm로 정하였다. 펌프시스템에는 액추에이터를 개별적으로 조절할 수 있도록 솔레노이드 밸브를 액추에이터 수량과 동일하게 구성하였으며, 인버터를 설치하여 선택적으로 액추에이터의 길이 변화가 가능하도록 하였다.



[그림 1] 모형실험용 액추에이터 및 펌프시스템

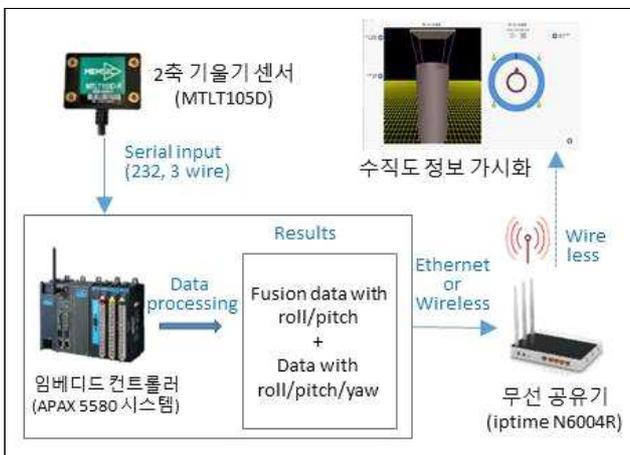
## 2.2 수직도 제어정보시스템

석선파일의 수직도 정보는 2축(roll/pitch)의 기울어진 상태로 표현된다. 이들 정보의 효율적 수집과 표출을 위해 아래 그림 2와 같은 형태의 수직도 제어정보시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 석선파일의 경사를 측정하는 센서부, 측정된 기울기 정보를 필터링하여 나타내어 주는 컨트롤러부, 수직도 정보를 2D 또는 3D로 가시화시켜주는 디스플레이부로 구성되어 있다.

센서부는 최소 2축 이상의 기울기 측정이 가능한 센서로 구성되어 있다. 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 복수 개 장착할 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 2축 기울기 센서를 적용하였으며 측정 오차는 0.014%~1.111%로 목표 수직도가 0.1°일 경우 오차는 0.001° 수준으로 사용이 적합한 것으로 파악되었다.

컨트롤러부는 DVANTECH社의 APAX-5580 컨트롤러를 통해 다양한 복수 개의 센서로부터 데이터를 입력받아 수집된 데이터를 전처리하고 결정된 수직도 정보를 유/무선 통신으로 전송할 수 있도록 설계되어 있다.

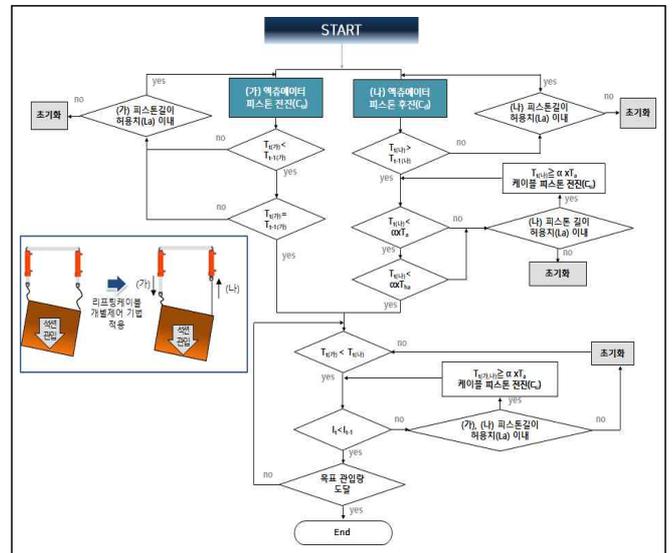
디스플레이부는 컨트롤러로부터 석선파일의 수직도 데이터를 수신받아 2D 또는 3D로 디스플레이함으로써 수직도 정보의 직관적인 파악을 가능하게 한다. 컨트롤러부와 디스플레이부는 유/무선 통신으로 데이터 송/수신이 가능하며 필요시 별도의 사설망을 구축하여 내부망으로 데이터를 주고받는다. 추가적으로 컨트롤러는 계측된 정보에 따라 강관의 수직도를 동적으로 자동 제어하기 위해 복수 개의 아날로그/디지털 출력 신호를 인가할 수 있다. [3]



[그림 2] 수직도 제어정보시스템

## 2.3 수직도정보 연계 케이블 자동 제어 모듈

석선파일은 자침이 완료된 후 지반에 관입시키기 위해 크레인을 하강시켜 리프팅케이블이 느슨해지도록 한 후 석선압을 가하여 관입시킨다. 관입시 기울어짐이 발생하게 되면 케이블 개별 제어기법을 적용하여 관입중 수직도를 보정하게 된다. 이와 같은 석선파일 설치시 케이블 개별 제어기법 운용을 위한 케이블 초기셋팅 방법, 케이블 길이제어 운용방법, 수직도 및 목표관입량 판단과 같은 알고리즘을 수립하였다(그림 3). 여기서  $T_1$ 는 운용시 케이블 장력,  $T_a$ 는 케이블 허용장력,  $T_{1a}$ 는 케이블 허용장력,  $L_a$ 는 액츄에이터 허용길이,  $C_u$ 는 액츄에이터 피스톤 전진(케이블의 길이가 늘어남)시간,  $C_d$ 는 후진(케이블의 길이가 줄어듬)시간으로 정의된다.



[그림 3] 리프팅케이블 개별 길이제어 운용 알고리즘

케이블 개별제어 리프팅시스템 운용 알고리즘을 기반으로 기존의 수직도 제어정보시스템에서 측정된 수직도 정보와 연동되어 액츄에이터를 개별제어하는 자동화 모듈을 개발하였다. 자동화 수직도제어 모듈의 개념도는 다음 그림 4와 같다.



[그림 4] 수직도 제어정보시스템과 리프팅케이블 제어시스템 연계 자동화 모듈 개념도

제어 모듈의 자동화를 위해 액츄에이터 스위치를 on/off하는 relay 회로, relay 회로를 제어하는 컨트롤러, 외부와 인터페

이스를 위한 serial 통신 회로 등을 구성하였다. 제어 모듈의 부에서 serial 인터페이스로 접속하여 특정 명령을 전송함으로써 컨트롤러를 통해 relay회로를 구동하여 액추에이터를 상승 또는 하강시키게 된다.

액추에이터의 상승 또는 하강을 위해 전송하는 명령은 NMEA0183과 유사한 구조로써 아래 표 1과 같이 설정하였다. 즉, 최초 패킷의 시작을 알리는 STX로 문자열 '\$KIOST'를 설정하였고, 구분기호는 ','를 사용한다. 또한, 4개 액추에이터의 상승/하강 버튼을 각각 SSR(Number)로 구분하여, on 시키고자 할때는 '1', off 시키고자 할때는 '0'을 설정한다. 패킷을 끝을 알리는 ETX는 '\*' 문자를 사용하고, 최종 4B에는 해당 패킷의 신뢰성 있는 통신을 위해 XOR 체크섬을 추가한다. 이때, 체크섬 값은 NMEA0183과 동일하게 계산하여 추가하면된다. 예를 들어 '\$START,1,0,0,0,0,0,0,\*4B'를 전송하는 경우, 1번 액추에이터의 '상승' 동작이 수행되며 그 외 모든 액추에이터는 동작을 정지한다.

[표 1] 제어모듈 전송 명령 구조

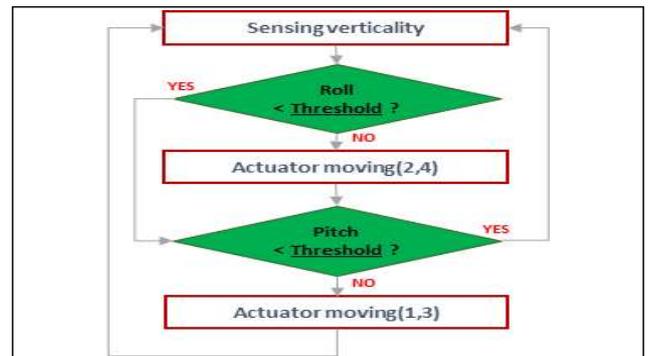
Example : \$START, 1,0,0,0,0,0,0,*4B				
\$START	1	0	*	4B
STX(패킷 시작)	SSR1번 제어값	SSR2~8번 제어값	ETX (패킷 끝)	XOR 체크섬

액추에이터 개별 제어모듈을 사용자가 PC에서 손쉽게 사용가능하도록 하기 위해 그림 5와 같이 GUI로 구현하였다. 내부적으로 serial 통신을 위한 환경설정을 통해 connect/disconnect 설정할 수 있도록 되어 있어 제어모듈과 접속이 가능한 기능을 구현하여 수직도 제어정보시스템 컨트롤러부와 연계할 수 있다. 기본적으로는 네 개의 액추에이터를 조절할 수 있으며, 각각의 액추에이터 별로 '상승/하강' 버튼을 통해 직관적 제어가 가능하도록 하였다.



[그림 5] 리프팅케이블 길이조절용 액추에이터 제어 모듈 GUI

이를 바탕으로 수직도 제어정보시스템의 수직도 정보에 기반하여 리프팅케이블 액추에이터 길이를 자동적으로 조절할 수 있는 모듈을 개발하였다. 리프팅케이블 액추에이터 길이 자동 조절 기술은 수직도 제어정보시스템에서 수집된 2축의 기울기(roll, pitch) 정보를 기반으로 허용 기울기 이내가 되도록 기울어진 위치의 액추에이터는 피스톤을 후진시켜 케이블의 길이를 줄여주게 되고, 반대편의 액추에이터는 피스톤을 전진시켜 케이블 길이를 늘려주게 된다. 기울어진 위치에 따라 액추에이터의 전진/후진 구간을 설정하여 기울기 보정이 가능하도록 하였다.



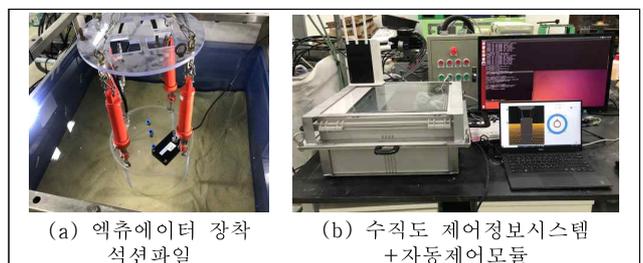
[그림 6] 리프팅케이블 액추에이터 길이 자동 조절 흐름도

### 3. 모형실험을 통한 성능 분석

개발한 액추에이터 개별 길이제어 자동화모듈을 검증하기 위해 석션과일 관입 실내 모형실험시스템에 장착하여 파일 관입시 수직도 보정 실험을 수행하였다.

모형 석션과일은 직경 30cm, 길이 20cm이고 80×80×80cm인 모형토조에 주문진 표준사를 높이 40cm까지 포설한 후 수심이 30cm가 되도록 물을 채웠다. 그림 7(a)와 같이 파일 상판 네 지점에는 액추에이터가 설치되어 있고, 기울기를 자동화 모듈에 제공하기 위해 2축 경사계가 부착되어 있다.

본 실험에서의 목표수직도는 센서의 오차를 감안하여 0.2°로 설정하였다. 실험은 모형석션과일을 지반에 거치시킨 후 석션에 의해 관입이 용이하도록 10cm정도 강제관입을 한 후 자동화 제어모듈이 내장된 수직도 제어정보시스템(그림 7(b))을 활성화시키고 석션관입하는 방법을 적용하였다.

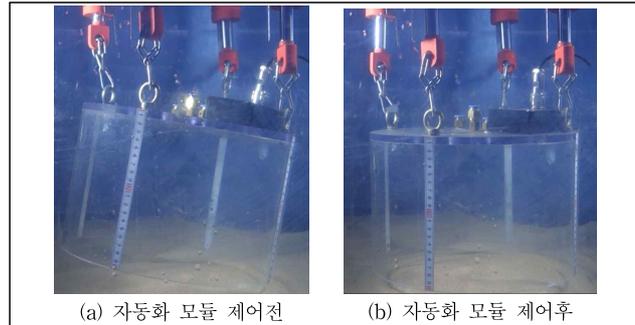


(a) 액추에이터 장착 석션과일

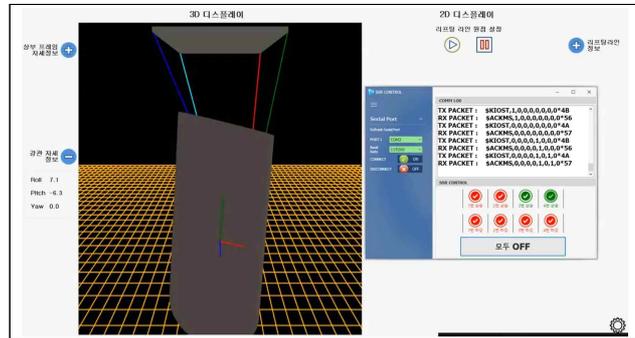
(b) 수직도 제어정보시스템 + 자동제어모듈

[그림 7] 액추에이터 개별 제어 자동화 모듈 모형실험

예비실험으로 액추에이터를 수동으로 조작하여 그림 8(a)와 같이 임의로 기울어진 상태를 구현한 후 자동화 제어모듈을 활성화시켜 자동조절에 의해(그림 9) 액추에이터 조절에 의해 파일의 수직도가 보정됨을 확인하였다(그림 8(b)).

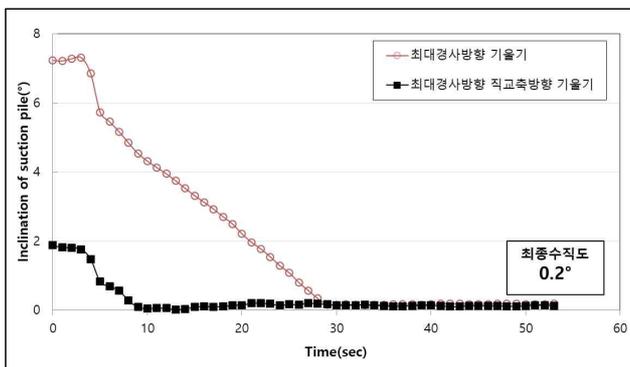


[그림 8] 액추에이터 개별 제어 자동화 모듈 적용 실험



[그림 9] 자동화 모듈에 의한 액추에이터 길이조절 GUI

석선파일 관입과정에서 기울어짐이 0.2°이상일 경우 기울어진 위치는 액추에이터의 피스톤이 후진되어 케이블에는 장력이 발생되어 파일 관입에 저항하게 되고, 반대편에서는 액추에이터의 피스톤이 후진되어 케이블 장력이 이완되어 파일이 관입되는 것을 확인하였다. 모형실험에 의해 리프팅케이블 길이조절용 액추에이터 자동 제어 모듈을 적용하여 석선관입전 약 7°의 기울어진 파일이 지반에 석선관입되면서 관입이 완료(관입량 약 6cm)되기까지 설정된 기울기인 0.2°이내로 수직도가 보정되는 것으로 나타났다(그림 10).



[그림 10] 석선파일 관입중 수직도 제어실험 결과

#### 4. 결론

리프팅케이블 길이를 조절하기 위한 액추에이터 자동화 제어 모듈을 적용하여 석선관입중 기울어진 위치에 따라 액추에이터의 피스톤을 개별적으로 자동 제어함으로써 파일의 수직도 확보가 가능할 것으로 판단된다. 다만, 자동화 적용시에도 작업자가 관입상태 및 수직도 정보를 모니터링하면서 현장에서의 외부 여건 변화에 대처할 수 있는 관리는 필요할 것으로 생각된다.

#### 감사의글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술 연구사업(케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설공법 개발, 20SCIP-B119960-05) 및 해양수산부 해양수산과학기술진흥원의 R&D사업인 “항만인프라 재해 및 재난 대응을 위한 스마트 유지보수 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- [1] 박해용, 오명학, 김성원, 한택희, 백승재, “석선파일 관입시 리프팅케이블 개별 길이조절 기법에 의한 수직도보정 모형실험”, 한국방재학회지, 제 19권 5호, pp.217-223, 10월, 2019년.
- [2] 박해용, 오명학, 강현, “석선파일 지반관입중 리프팅케이블 장력에 의한 수직도보정 효과”, 한국연안방재학회지, 제 7권 2호, pp.63-72, 4월, 2020년.
- [3] 구성민, 박해용, 오명학, 백승재, “대형 원형강관 수직도 모니터링을 위한 3D 모니터링 시스템”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 21 No. 11 pp.870-877, 2020