

과제
번호
17CTAP
-C129825

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종 보고서

R&D / 17CTAP-C129825

시공 및 철거 중 구조물 붕괴예측을 위한 영상분석 기반 실시간 모니터링 기술 개발 최종보고서

2019. 03. 29.

주관연구기관 / 경북대학교 산학협력단
협동연구기관 / 주식회사 엠텍

영상분석 기반
시공 및 철거 중
구조물 붕괴예측을
위한
실시간 모니터링
기술 개발

최
종
보
고
서

2019

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원
국
토
교
통
부

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'시공 및 철거 중 구조물 붕괴예측을 위한 영상분석 기반 모니터링 기술 개발'(연구개발 기간 : 2017. 04. 01 ~ 2018. 12. 31) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2019. 03. 29.

주관연구기관명 : 경북대학교 산학협력단 임 기 병

협동연구기관명 : 주식회사 엠텍 심 동 일



주관연구기관책임자: 김 홍 진

협동연구기관책임자: 엄 수 광

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C129 825	해당 단계 연구 기간	2018. 01. 01 ~ 2018. 12. 31	단계구분	2 / 2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부과제명	시공 및 철거 중 구조물 붕괴예측을 위한 영상분석 기반 실시간 모니터링 기술 개발			
연구책임자	김 홍 진	해당단계 참여연구원 수	총: 25 명 내부: 25 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 220,000 천원 기업: 75,000 천원 계: 295,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 35 명 내부: 35 명 외부: 명	총 연구비	정부: 370,000 천원 기업: 75,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 495,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	경북대학교 산학협력단			참여기업명 주식회사 엠텍	
국제공동연구	-			-	
위탁연구	-			-	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의 제1항에 따를 때, 본 과제는 제24조의 제1항 제1호 각 목의 어느 하나에도 해당하지 않는 과제이다. 따라서 보안과제로 지정되지 아니한 일반과제에 해당한다.
-------------------------	--

요약	보고서 면수 : 116
----	--------------

○ 연구개발 최종 목표

- 시공 및 철거 중 구조물 붕괴예측을 위한 영상분석 기반 모니터링 기술 개발

○ 연구개발성과

- 영상기반 변위추출 기법 관련 논문 게재 (진동대 실험을 통한 다자유도 구조물의 영상기반 동특성 식별)

가설재 붕괴예측 기법 관련 특허 출원 (구조물 붕괴 예측 장치 및 구조물 붕괴 예측 방법)

경계선 분리인식 기법 개발

구조물 모니터링 프로그램 개발

무선경보 어플리케이션 (10월중 개발 예정)

요약문

연구의 목적 및 내용	최근 안전관리에 대한 국민의식이 발달함에도 불구하고 인천 조달청(PEB) 공사 중 붕괴(2015), 고성 엑스포장 공사 중 붕괴(2016), 종로 낙원동 호텔 철거 중 붕괴(2016) 등 안전 불감증으로 인한 구조물의 시공 및 철거 중 붕괴사고들이 발생하였다. 본 연구에서는 구조물의 시공 및 철거 시 붕괴사고를 방지하고, 안전성을 높이기 위해 가설 구조물의 거동 계측을 위한 영상분석 기반 구조물 모니터링 시스템을 개발하고자 한다. 또한 가설 구조물 모니터링 기술의 무선화 및 응용 앱을 연결하여 시공 및 철거 중 구조물의 붕괴위험시 경보시스템을 구축하여 스마트폰 알림 소프트웨어와 함께 연계하여 개발을 도모한다.				
	1) 가설 구조물 변위 측정을 위한 영상분석 기술개발 가설 구조물 경계선 분리인식 기법 개발 가설 구조물 붕괴 시뮬레이션 유사환경에서의 실험을 통한 실시간 다중 모니터링 시스템 검증 가설 구조물 붕괴위험 기준 설정 2) 무선 네트워크 기반 실시간 위험경보시스템 개발 가설 구조물 경계선 분리인식 기법을 적용한 실시간 다중 모니터링 프로그램 개발 - 웹/앱 기반 실시간 붕괴위험 무선 경보시스템 개발				
	연구의 흐름은 가설 구조물의 변위 측정을 위한 실시간 모니터링 시스템을 개발하고, 유사환경에서의 실험을 통한 모니터링 시스템 검증 및 앱 기반 무선 경보 시스템을 개발하는 것이다. 가설 구조물 경계선 영상분석 기반 실시간 모니터링 시스템 개발을 위해 별도의 표식을 부착하여 패턴을 인식하는 기술을 기초로, 가설 구조물의 경계선을 분리 인식하여 변위 측정을 위한 표식으로 사용하는 기술을 개발한다. 경계선 분리 인식 기법을 적용하여 여러 대상이 동시에 계측되는 실시간 다중 모니터링 프로그램을 개발하고, 유사환경에서의 실험을 통해 프로그램을 검증한다. 실시간 모니터링 시스템과 연계하여, 스마트폰 앱 기반 붕괴위험 무선 경보시스템을 개발한다.				
연구개발성과	- 별도의 표식이 불필요한 가설 구조물 모니터링 기술 - 가설 구조물 경계선을 이용한 다중 모니터링 프로그램 - 웹/앱 기반 실시간 붕괴위험 무선 경보시스템				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	1) 작업자의 안전을 확보 2) 구조물 붕괴로 인한 인명, 재산 피해 및 주변구조물에 대한 악영향 방지 3) 별도의 표식 부착필요가 없어 설치에 용이하고 비용절감 4) 효율적 모니터링 시스템을 이용한 민간분야 모니터링 시스템 시장의 확대				
국문핵심어 (5개 이내)	안전관리	영상분석	모니터링	가설 구조물	경보 시스템
영문핵심어 (5개 이내)	Safety management	Image analysis	Monitoring	Scaffolding	Warning system

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구수행내용 및 성과	12
2-1. 연구개발 추진전략·방법 및 추진체계	12
2-2. 주요 연구내용	15
2-2-1. 가설 구조물 경계선 분리인식 기법 개발	15
2-2-2. 가설 구조물 붕괴 시뮬레이션	21
2-2-3. 가설 구조물 경계선 분리인식 기법을 적용한 실시간 다중 모니터링 프로그램 개발	42
2-2-4. 유사환경 실험을 통한 실시간 다중 모니터링 시스템 검증	47
2-2-5. 가설 구조물 붕괴위험 기준 설정	94
2-2-6. 웹/앱 기반 실시간 붕괴위험 무선 경보시스템 개발	103
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	110
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	113
붙임. 참고 문헌	114

1. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구개발 목적

구분	내용
최종 목표	시공 및 철거 중 구조물 붕괴예측을 위한 영상분석 기반 모니터링 기술 개발
세부 목표	1) 가설 구조물 변위 측정을 위한 영상분석 기술개발 2) 무선 네트워크 기반 실시간 위험경보 시스템 개발

시공 및 철거 중 구조물 붕괴예측을 위한 영상분석 기반 모니터링 기술 개발



1-2. 연구개발의 필요성

가. 연구개발의 개요

대부분의 건축 구조물들은 하중이나 지진 등 자연 재해와 같은 외부 요인에 노출되어 있고, 시공, 철거와 같은 건설현장에선 빈번하게 안전사고가 일어나고 있다. 이로 인해 건설 현장과 같은 위험 요인이 존재한다고 판단되는 곳에 대한 안전관리가 필요하다. 이러한 구조물의 특성 및 안전성을 파악하기 위하여 변위는 매우 중요한 계측 요인이다. 변위는 하중에 대한 구조물의 거동을 나타내며, 이를 통해 구조물의 안전성 및 상태를 파악할 수 있다. 구조물이 많은 하중을 받거나 외부 요인으로부터 피해를 입었을 경우, 구조물에 심각한 변형과 변위가 발생하게 되므로 구조물의 안전성을 평가하기 위해 지속적으로 구조물의 변위를 계측하기 위한 모니터링 기술이 중요하다고 할 수 있다.



(a) 경주 마우나리조트 붕괴



(b) 울산 센트럴 코프레이션 공장건물 붕괴

그림 1. 사용 중 구조물의 붕괴

일반적인 구조물의 붕괴는 사용 중에 발생하며, 사용 중인 구조물의 상태에 따라 관련 인명 피해 또한 비사용 중인 구조물의 붕괴 피해보다 크다. 이러한 요건 때문에 대부분의 구조물 모니터링 기술은 사용 중 구조물에 대한 연구에 집중되어있다.

○ 시공 및 철거 시 안전관리를 위한 가설 구조물 모니터링 기술 개발



(a) 인천 조달청 붕괴 (2015)



(b) 고성 당항포 엑스포장 붕괴 (2016)

그림 02. 시공 중 구조물의 붕괴



(a) 논현동 나산백화점 붕괴 (2008)



(b) 종로 낙원동 호텔 붕괴 (2016)

그림 03. 철거 중 구조물의 붕괴

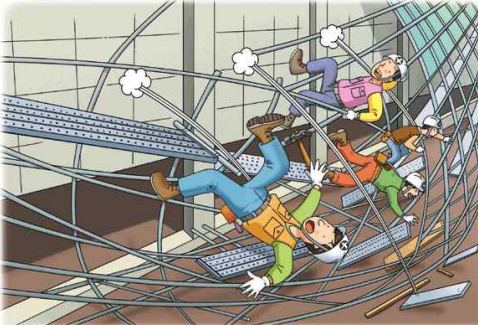
그러나 사용 중인 구조물에서 뿐만 아니라, 그림 02, 03과 같이 논현동 나산백화점 철거 중 붕괴(2008), 인천 조달청(PEB) 공사 중 붕괴(2015), 고성 엑스포장 공사 중 붕괴(2016), 종로 낙원동 호텔 철거 중 붕괴(2016) 등 안전 불감증으로 인한 구조물의 시공 및 철거 중 붕괴사고 또한 다수 발생하고 있다. 특히 나산백화점과 낙원동 호텔은 모두 철거 중 바닥에서 크레인의 무게를 견디지 못해 붕괴되어 작업자가 매몰되는 사고를 일으켰다. 본 과제에서 제안할 가설 구조물의 실시간 모니터링을 통해 위험경보를 알리는 시스템이 있다면 인명피해를 보다 최소화 할 수 있었을 것으로 사료된다.

표 01은 시공 또는 철거 중 구조물의 붕괴사고 피해사례 및 붕괴원인을 나타낸다. 표 01에서 나타난 바와 같이 시공 또는 철거 중 붕괴사고는 비계, 바닥, 상판, 거푸집 등의 붕괴에 의해 발생하였다. 특히 철거의 경우 구조물의 내력이 온전하지 않기 때문에 더욱 위험할 수 있다. 동바리 설치 등 철거 시 안전관리에 소홀하거나 크레인 등 무거운 물체를 바닥판이 견디지 못해 붕괴된 것을 확인하였다.

표 01. 시공 또는 철거 중 붕괴사고 피해사례 및 붕괴원인

구분 (철거/시공)	년도	사고	사고 원인	인명피해 (명)		비고
				사망	부상	
시공	2017	제주 수련원 붕괴	비계붕괴	0	3	
시공	2016	고성 당항포 엑스포장 붕괴	비계붕괴	1	2	
철거	2016	종로 낙원동 호텔 붕괴	바닥붕괴	2	2	
시공	2015	인천 조달청 신축창고(PEB) 붕괴	비계붕괴	1	4	
시공	2015	부산 경성대 신축공사장 붕괴	바닥붕괴	0	5	
시공	2015	동대구역 환승센터 공사장 붕괴	상판붕괴	0	12	
시공	2015	천안 신축공사장 붕괴	비계붕괴	3	4	
시공	2013	광주 월계동 주상복합 신축공사장 붕괴	거푸집붕괴	0	6	
시공	2010	부산 화명동 지하수영장 신축공사장 붕괴	거푸집붕괴	1	6	
철거	2008	논현동 나산백화점 붕괴	바닥붕괴	1	1	
시공	2005	경기 이천 물류센터 공사장 붕괴	바닥붕괴	9	5	

이러한 시공 및 철거 시 피해사례 중 다음의 그림 04에서는 신축공사 도중 가설 구조물의 붕괴로 인한 사고사례가 소개되어 있으며, 본 구조물이 아닌 가설 구조물의 붕괴에 의해서도 상당한 피해가 발생함을 알 수 있다.

	공사명 : ○○○특수학교 신축공사 공사규모 : 지하 1층, 지상3층, 2개동 재해정도 : 사망 1명 재해개요 : 길이 36m 벽체거푸집을 전도방지조치 소홀한 상태로 일괄 조립한 후 외부비계에서 전도 방지용 철선을 벽체거푸집 상부에 고정하던 중 벽체거푸집이 외측으로 넘어지면서 외부비계를 강타, 외부비계에 있던 피재자가 약 10m 아래 지상으로 떨어져, 사망
	공사명 : ○○○건물 신축공사 공사규모 : 지하2층, 지상4층 재해정도 : 사망 1명, 부상 3명 재해개요 : 강관으로 설치한 쌍줄비계(길이 약 72m, 높이 약 26m)가 도괴되어, 비계의 작업발판 위에서 외벽 돌붙임 및 줄눈 작업 중이던 근로자 1명 사망 하고, 3명이 부상

※ 출처 : 안전보건공단 재해사례

그림 04. 가설 구조물(비계) 붕괴사고 사례

시공 및 철거 과정에 따라 가설 구조물이 필수적으로 설치되며, 관련 붕괴사고 또한 이러한 가설 구조물의 붕괴에 의해 발생하거나, 가설 구조물의 변형을 통해 구조물 붕괴를 사전에 예측할 수 있다. 따라서 가설 구조물의 변위를 모니터링 대상으로 지정한다면, 가설 구조물 자체의 붕괴와 본 구조물의 붕괴조짐을 함께 관찰할 수 있다. 그러므로 공사현장에서 인명과 주변구조물에 대한 피해를 줄이기 위해서는 실시간 가설 구조물 모니터링 시스템이 필요한 실정이다.

○ 웹/앱 기반 실시간 붕괴위험 무선 경보시스템 개발

시공 및 철거 시 구조물의 안전을 위한 실시간 모니터링 시스템을 구축하고 나면, 이를 공사현장의 현장소장과 근로자 등이 접근 및 이용할 수 있어야한다. 이를 위해서는 사무실 PC, 개인 태블릿 등을 이용한 모니터링 시스템 접근이 가능해야하며, 위험 상황의 도래 시 작업자들에게 경보를 위한 시스템이 구축돼야한다. 웹사이트를 기반으로 한 실시간 모니터링 시스템을 개발하여 공사현장 실 이용자들의 접근성을 높이고자 하며, 더 나아가 스마트폰 어플리케이션과 연계·개발하여 일정 변위 초과 발생 시 자동으로 알람을 해주는 경보 시스템을 개발하고자 한다.

나. 연구개발 대상의 국내외 현황

일반적으로 수행되고 있는 가설 구조물(비계 및 동바리) 변위 측정은 대부분 육안검사의 수준으로서, 가설 구조물의 안전성에 대한 의식은 낮은 실정이다. 지금까지 가설 구조물의 변위를 대상으로 한 연구는 충분히 이루어지지 않았으며, 안전성 검사를 위한 기존의 모니터링 기술 또한 시공 및 철거 시 설치하는 가설 구조물이 아닌 본 구조물의 변위 측정에 집중되어있다.

○ 국내 현황

지상 라이다 및 고해상도 비디오카메라를 이용한 변위 계측 연구가 여러 대학 연구 기관에서 시도되었다. 또한 서로 다른 샘플주파수의 이중 데이터를 융합해 정확한 동적응답을 산정하는 연구가 다소 수행된 바 있다. 성균관대학교에서 가속도계 이중적분치의 선형성분을 수동적으로 제거하고 RTK-GPS 계측치와 비교해 변위를 산정했고, 한국과학기술원에서는 가속도와 변위센서를 융합해 정밀한 동적변위 및 속도를 산정하는 칼만필터 알고리즘을 발표한 바 있다. 최근 영상처리기법을 이용한 실시간 변위 측정 연구가 진행되었으나 별도의 패턴을 인식하여 변위를 측정하는 시스템으로 본 연구에서는 일정한 패턴이 아닌 가설 구조물을 촬영함으로써 명암차이, 색상, 두께 등을 이용하여 변위를 측정하고자 하며, 위험 시 경보를 알람으로써 기존연구와 차별성이 있다.

기업/기관	보유기술 / 수행연구
Em4Sys (박기환)	LDV/변위센서 개발· 상용화 ((주) 엠포시스, http://www.em4sys.com/)
연세대학교 (박효선)	지상 라이다를 이용한 구조물의 건전성 진단방법 개발 (이홍민 외 3명 2007)
부산대학교 (김남식)	디지털 카메라를 이용한 변위 계측 시스템 개발 (김남식 & 김성완 2010, 이종재 외 5명 2009)
세종대학교 (이종재)	
성균관대학교 (박선규, 윤홍식)	RTK-GPS와 가속도계 데이터를 융합한 변위 산정 (황진상 외 4명 2011)
한국과학기술원 (손훈)	가속도와 변위센서의 융합 및 칼만필터를 이용한 동적변위 산정 (한정현 외 3명 2012)
경북대학교 산학협력단 (신경재)	영상처리기법을 이용한 실시간 변위 측정 및 붕괴감지 시스템 (신경재 외 3명 2017)

○ 국외 현황

기업/기관	국가	보유 기술 / 수행 연구
Polytec	독일	장거리 / 고분해능 스캐닝 LDV 등 다양한 제품 개발
The state univ. of New Jersey	미국	교량 상판의 균열 탐지를 위한 컴퓨터-비전 기술 (Prateek et al. 2013)
Columbia Univ.	미국	칼만필터를 이용한 가속도와 변위 융합 기법의 이론적 제시 (Smyth and Wu 2006)
Hiroshima Univ.	일본	초당 10,000 프레임의 고속 카메라를 이용한 실시간 모달 변수 추정 (Yang et al. 2012)
Politecnico di Milano	이탈리아	비전 기반 진동 측정을 통한 구조물의 동특성 파악 (Cigada and Zappa 2012)

독일, 미국기업들을 중심으로 고성능 변위센서를 이용한 변위계측이 상용화되고 있다. 하지만 두 가지 이상의 이중 데이터의 융합을 통해 변위를 추정하는 경우 구조물의 동적응답 계측에 적용한 사례는 많지 않고, 아직 상용화되지 않았다. 칼만필터 등 시스템 관측기를 이용한 데이터 융합이 연구된 바 있으나 아직 이론적 수준이나 시험 단계에 그치고 있으며, 변위-가속도 융합이 주를 이루고 있다.

○ 기술개발 성숙도

본 연구에서는 시공 및 철거 중 구조물 붕괴예측을 위해, 영상분석을 이용한 실시간 모니터링 기술 개발을 하고자 하며 연구 착수단계에서 기술개발 성숙도는 TRL 2로 기술적 개념정립 단계라고 할 수 있다. 기존에 패턴인식을 이용한 모니터링시스템에서 기존 점이되는 표식을 부착하여 카메라, 캠코더 등과 같은 영상장비를 활용하여 모니터링을 수행하였다면 본 과제

에서는 이를 응용하여 별도의 패턴이 있는 표식의 부착 없이 시공 또는 철거 시 사용되는 가설 구조물(비계)의 경계선을 이용한 모니터링을 수행하고자 한다. 이러한 경계선에 대해서는 명암차이, 색상, 두께 등의 배경과의 차이를 이용하여 인식하여 변위를 측정하고자 한다. 또한 위험 시 무선으로 경보를 알리는 시스템을 추가하여 타 과제와의 차별성을 두었다. 연구 수행 중에는 실험적 증명 및 성능평가가 이루어질 예정이다. 모형을 통한 실험으로 모니터링 시스템의 성능을 실험적으로 증명한 후 최종적으로 Test bed를 이용하여 실시간 모니터링 기술에 대해 실험실에서의 성능을 평가하고, 기술개발내용에 대한 검증을 진행할 예정이다. 따라서 연구종료단계에서 기술개발 성숙도는 TRL 4 실험실 성능평가 단계라고 할 수 있다.

구분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☒	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☒	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

다. 연구개발의 중요성

○ 시공 및 철거 시 실시간 모니터링을 통한 구조물 붕괴예측의 필요성

구조물의 계획, 설계, 시공, 보강 후 건축물의 안전을 위해 꾸준한 유지관리가 필요하다. 유지관리방법 중 하나인 실시간 모니터링은 진행 중인 공사 현장이나 단기간에 과변형이 진행될 위험이 있는 건물에 안전진단 서비스의 일환으로 수행되곤 한다. 최근 비정형 건축물이 늘어나고 건물의 안전성에 대한 관심이 높아짐에 따라 아직 과변형이 발생하지 않은 건물이라도 설계상 변형-변위량이 집중될 수 있는 민감한 부위들을 준공초기부터 지속적으로 관찰하고 그 추이를 분석하는 상시 모니터링의 필요성이 대두되고 있다. 그러나 측정 환경이 양호한 완공 후 건물과는 달리 시공 및 철거 시의 구조물은 공사 장비 및 인력 등에 의한 간섭이 많으며, 그로 인한 모니터링의 제약이 필수적으로 뒤따른다. 간섭의 우려가 있는 별도의 표식 부착 없이, 시공 및 철거 시에 필수적으로 사용되는 가설 구조물의 변위를 계측 대상으로 한 실시간 모니터링 시스템은 그러한 공사 환경의 난점을 해결해 줄 수 있는 대안이며, 가설 구조물의 변형을 계측함으로써 가설 구조물 자체의 붕괴 뿐 아니라 본 구조물의 붕괴위험 또한 사전에 예측할 수 있는 기술이라 판단된다.

라. 선행 연구 내용 및 결과

○ 선행연구 과제

부처명	사업명	과제명	예산 (천원)	비 고
미래창조과학 부	지역혁신창의 인력양성사업	강구조 시설물 설계 및 시공기술 인력 양성 사업단	450,000	

(1) MIDAS 및 ABAQUS를 이용한 기존 기타 구조물 시스템 시뮬레이션

- 30m×36m×10.5m의 오픈형 공장(PEB 연속보 형)에 대한 선형해석을 수행

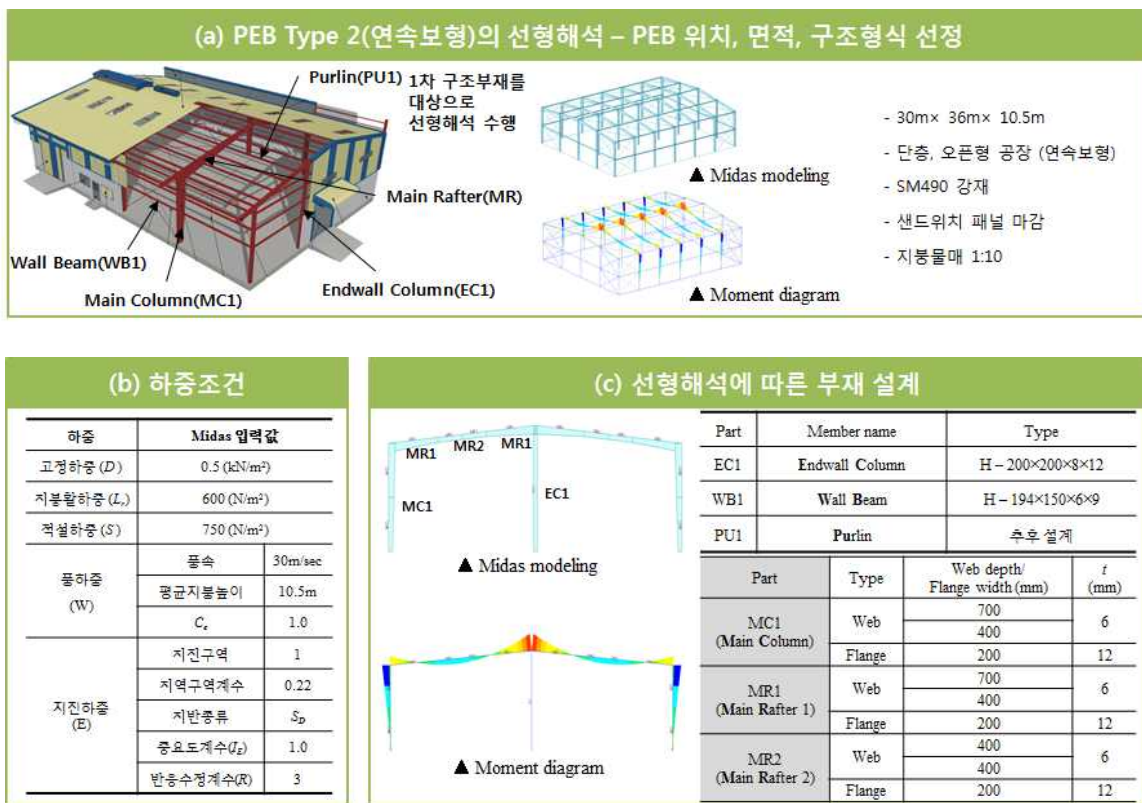


그림 05. 대상 기타 구조물 선형해석 결과

(2) 패턴인식을 통한 모니터링 기술 구축 및 검증

- LVDT와 같은 접촉식 측정 장치는 구조물에 직접 접촉하여 변위를 계측하므로 정확도가 높아 구조물 변위 계측에 가장 많이 사용
- 하지만 측정할 수 있는 최대 변위가 제한 되어 있기 때문에 대변형 측정에 자유롭지 못하고 LVDT 장치를 구조물에 고정하기 위해 추가설비장치가 필요하며, 이 고정설비장치의 움직임으로 인해 변위 측정에 큰 오차가 발생 가능
- LDV는 LVDT와 같은 접촉식 측정 장치의 단점을 보완 하고자 개발된 비접촉식 레이저 장비
- 정확도가 뛰어나지만 매우 고가의 장비로서 일반적인 변위 계측에 적용하기에는 한계

가 존재

- 영상기반 변위 계측시스템은 캠코더나 카메라 등의 영상 장치를 이용하여 기록된 영상에 구조물의 움직임을 분석하여 구조물의 변위를 측정하는 방법으로 패턴인식 시스템의 장기적인 측정상황을 관측하며, 단기적인 변형 및 장기적인 변형의 측정이 가능

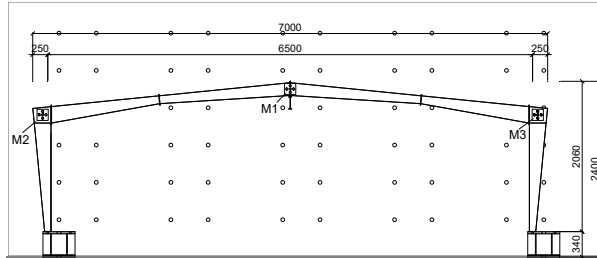


그림 06. 장기적인 패턴인식 시스템의 설치-정면도

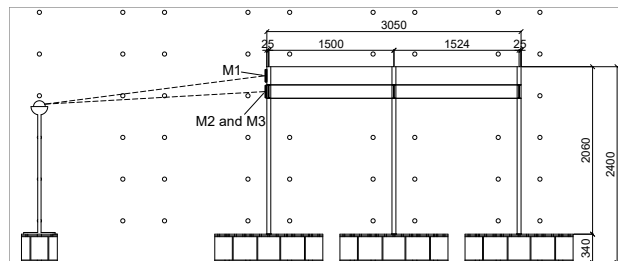


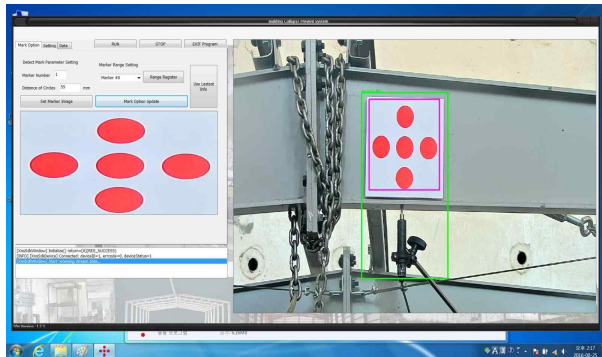
그림 07. 장기적인 패턴인식 시스템의 설치-측면도

- 영상기반 변위 계측시스템은 구조물의 변위를 측정하고 카메라의 움직임을 제어하는 하드웨어 부분과 기록된 영상을 처리하는 소프트웨어부분으로 구성

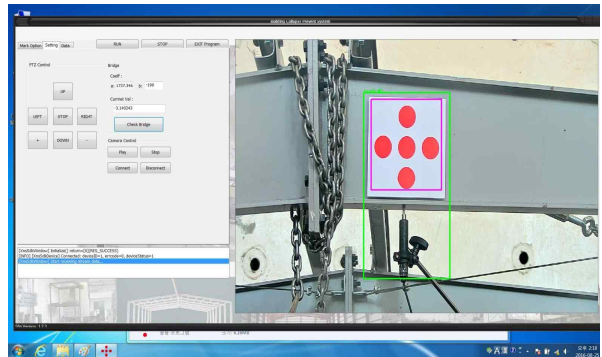


그림 08. PEB 처짐 측정 실험 전경

- 프로그램은 Visual Studio C# 이용하였으며, 영상처리기법은 Visual C++을 이용



(a) 마커옵션



(b) 카메라옵션

그림 09. 영상기반 변위 측정 프로그램

- 마커가 제대로 된 원의 형태로 설정되어야만 영상 처리 과정에서 정확한 원의 중심을 구할 수 있고, 이로 인해 측정 변위의 정밀도를 높이며 오차를 줄일 수 있음
- LVDT와 영상분석 기반으로 출력된 변위 비교 결과, 약 0.2mm 이내의 오차를 나타냄

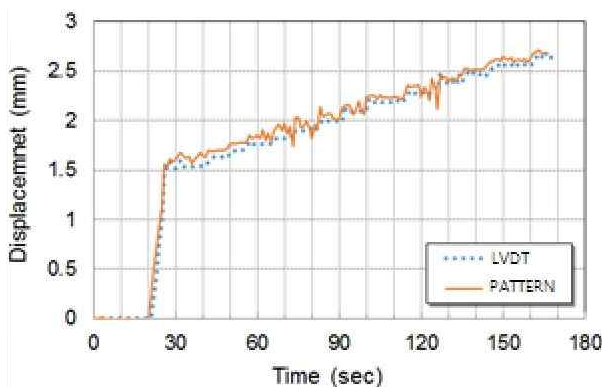


그림 10. LVDT와 영상분석의 변위 비교

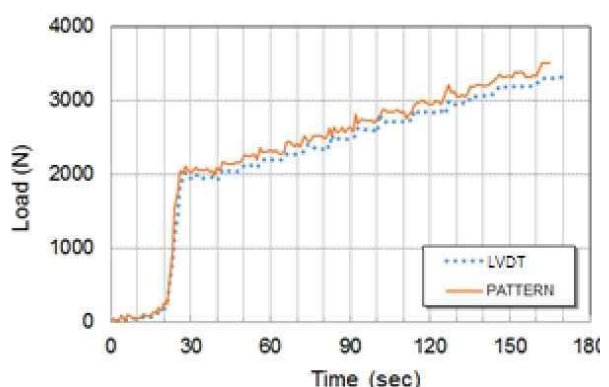


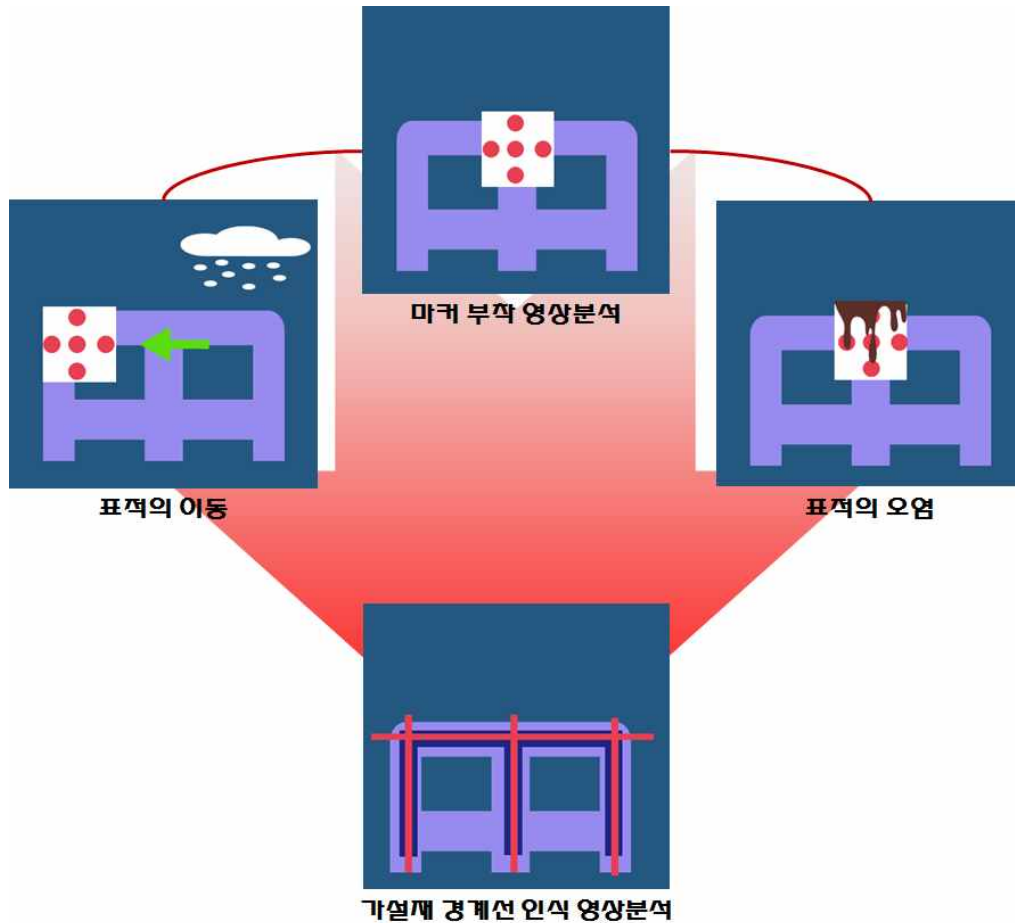
그림 11. LVDT와 영상분석의 하중 비교

○ 연구개발과제의 차별화 방안

- 기존 패턴인식을 통한 영상분석 기법은 변위 측정지점에 원형 마커를 부착하고, 마커를 표적으로 영상분석을 실시하여 변위를 파악하였으며, 한 대의 카메라가 하나의 표적만을 추적·관리 할 수 있었다. 그러나 본 연구개발과제에서 제안하고자 하는 영상분석 기법은 가설 구조물의 경계선을 분리 인식하여 표적으로 활용하고자 하며, 별도의 마커 부착이 필요 없을 뿐 아니라 여러 가설 구조물의 경계선을 동시에 인식하는 다중 모니터링 또한 가능하다.

기존 연구는 간섭이 미미한 실험실 환경 수준에서 검증이 된 연구이나, 본 제안 연구는 마커 부착이 필요 없으므로 다양한 간섭조건(기후, 분진 등)이 존재하는 현장 조건에도 적용이 가능하다.

- 구조물의 높이, 가설재 규격, 영상촬영위치(거리) 등의 정보만 있다면 영상분석 모니터링이 가능하다.



1-3. 연구개발 범위

연구의 흐름은 가설 구조물의 변위 측정을 위한 실시간 모니터링 시스템을 개발하고, 유사환경에서의 실험을 통한 모니터링 시스템 검증 및 앱 기반 무선 경보시스템을 개발하는 것이다. 가설 구조물 경계선 영상분석 기반 실시간 모니터링 시스템 개발을 위해 별도의 표식을 부착하여 패턴을 인식하는 기술을 기초로, 가설 구조물의 경계선을 분리 인식하여 변위 측정을 위한 표식으로 사용하는 기술을 개발한다. 경계선 분리 인식 기법을 적용하여 여러 대상이 동시에 계측되는 실시간 다중 모니터링 프로그램을 개발하고, 유사환경에서의 실험을 통해 프로그램을 검증한다. 실시간 모니터링 시스템과 연계하여, 스마트폰 앱 기반 붕괴위험 무선 경보 시스템을 개발한다.

가. 가설 구조물 변위 측정을 위한 영상분석 기술개발

가설 구조물 경계선 분리인식 기법 개발

가설 구조물 붕괴 시뮬레이션

유사환경에서의 실험을 통한 실시간 다중 모니터링 시스템 검증

가설 구조물 붕괴위험 기준 설정

나. 무선 네트워크 기반 실시간 위험경보시스템 개발

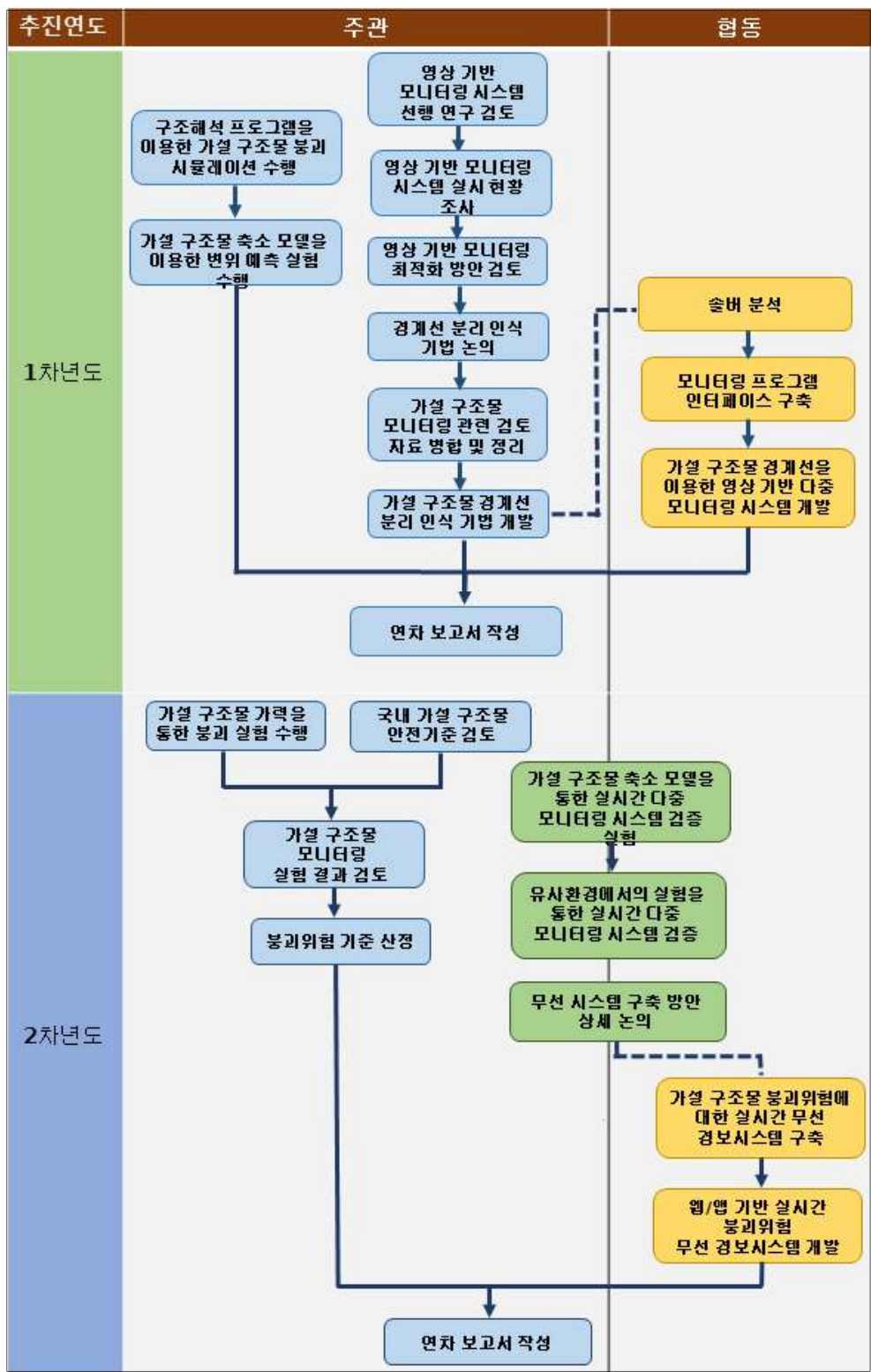
가설 구조물 경계선 분리인식 기법을 적용한 실시간 다중 모니터링 프로그램 개발

웹/앱 기반 실시간 붕괴위험 무선 경보시스템 개발

2. 연구수행 내용 및 결과

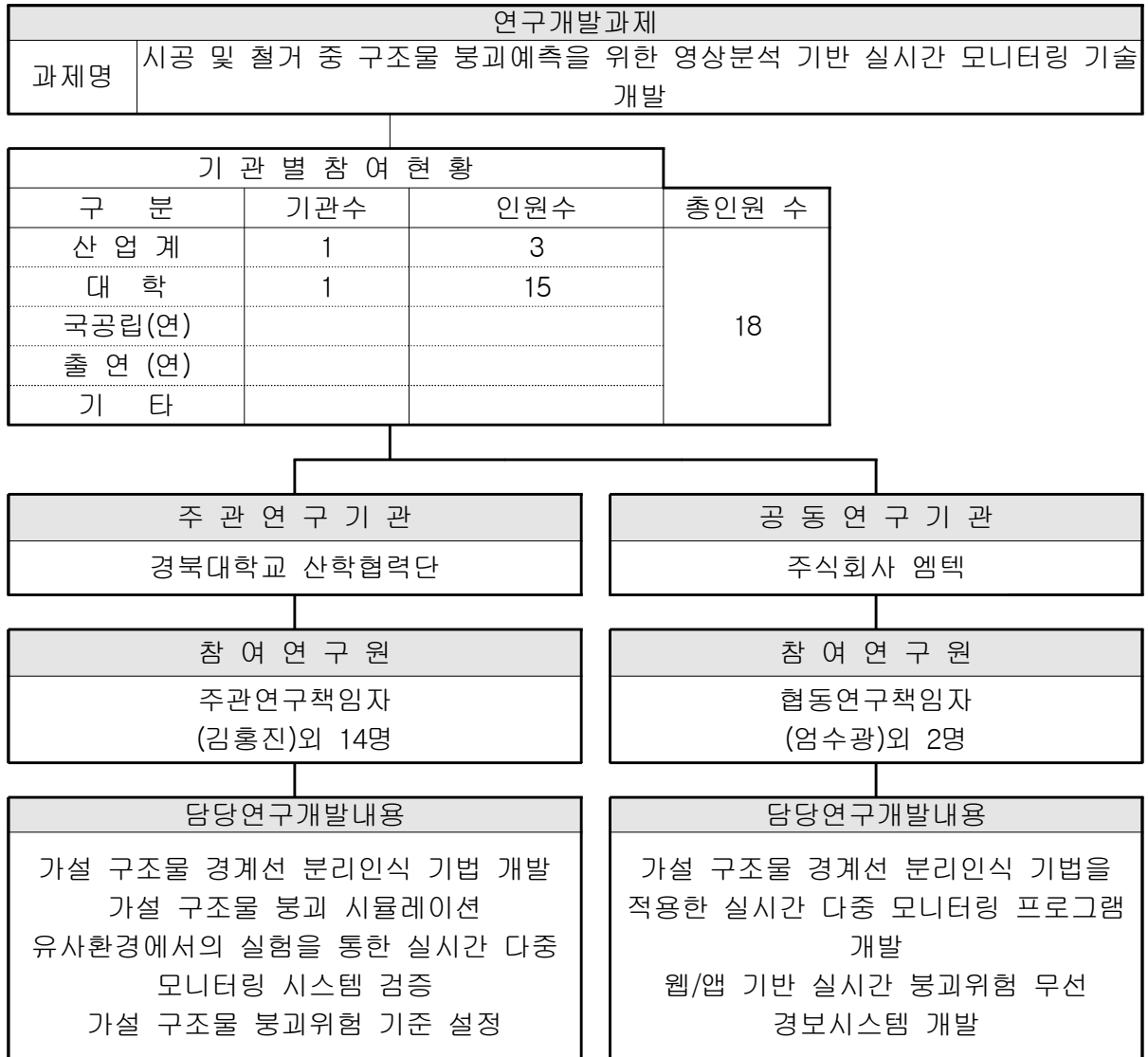
2-1. 연구개발 추진전략 · 방법 및 추진체계

가. 연구개발 추진전략 · 방법



나. 연구개발 추진체계

○ 연구수행 체계도



다. 연구개발 추진일정

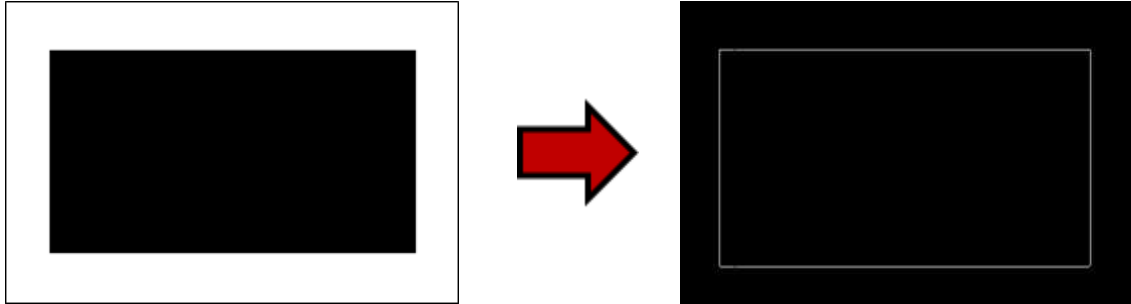
구분	연구과제명 (연구 수행기관)	관련 성과목표 /지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity 별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도			2차년도			
		핵심 성과	단위 성과	질적 성과 지표				2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
주관	가설 구조물 변위 측정을 위한 영상분석 기술개발 (경북대학 교 산학협력 단)	A	A-1	①	영상 기반 모니터링 시스템 실행현황 조사	조사 보고서	20							
				②	경계선 분리인식 선행연구 조사	조사 보고서	20							
				③	분리인식 기법 최적화 방안 제안	결과 보고서	60							
		A-2		①	국내 가설 구조물 안전기준 검토	보고서	20							
				②	가설 구조물 실험체 가력을 통한 붕괴 실험	실험 보고서	30							
총괄 (주관 / 협 동)	실시간 다중 모니터링 시스템 검증 (경북대학 교 산학협력 단, 주식회사 엠텍)	D-1		①	가력실험용 축소모델 실험체 제작	설계서	35							
				②	변위 비교를 통한 모니터링 시스템 성능분석	실험 보고서	50							
		D-2		①	가력실험용 실험체 제작	설계서	40							
				②	변위 비교를 통한 모니터링 시스템 성능분석	실험 보고서	50							
				③	앱 기반 무선 경보시스템 평가	자체 검증	20							
협동	무선 네트워크 기반 실시간 위험경보 시스템 개발 (주식회사 엠텍)	B-1		①	솔버 분석	분석 보고서	15							
				②	모니터링 프로그램 인터페이스 구축	자체 검증	20							
		B-2		①	가설 구조물 모니터링 프로그램	소프트 웨어 등록	50							
				②	가설 구조물 모니터링 프로그램 오차율개선	실험을 통한 자체 검증	15							
		C-1		①	붕괴위험 무선 경보 어플리케이션	소프트 웨어 등록	50							
				②	어플리케이션 호환성 검증	보고서	15							

2-2. 주요 연구내용

2-2-1. 가설 구조물 경계선 분리인식 기법 개발

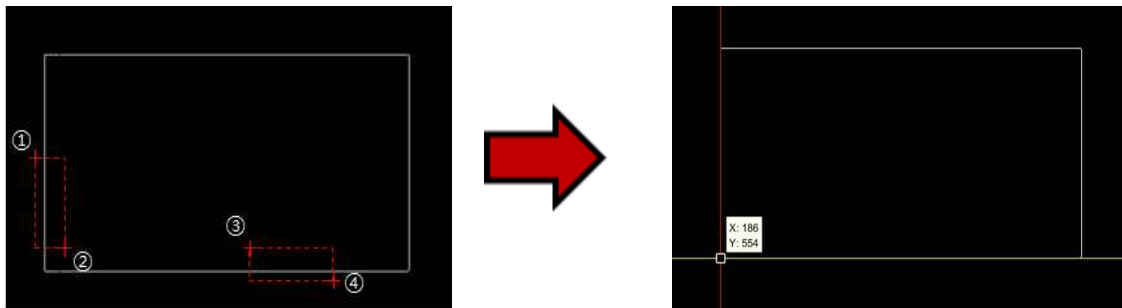
가. 경계선 분리인식 기법

우선 경계선 검출을 하고자 하는 대상 이미지를 선정하고, 경계선의 분리인식을 위해 영상의 이진화(Binarization)를 수행한다.



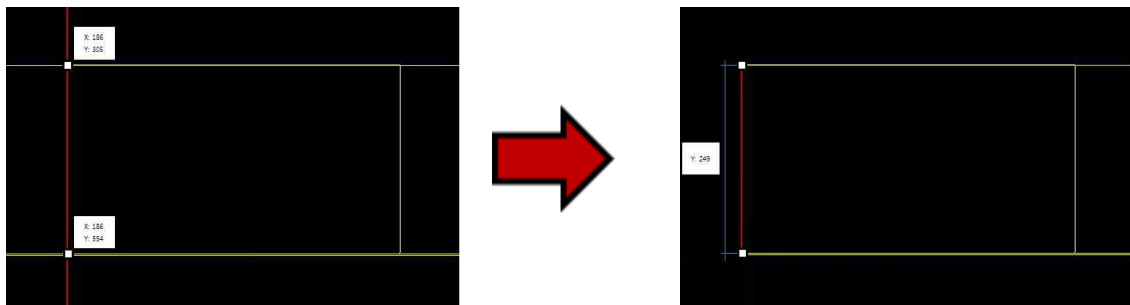
가. 그림 1. 영상 이진화(Image Binarization)

영상 이진화를 통해 영역이 구분되며, 구분의 경계선이 이미지 내에서 분리되어 나타나게 된다. 사용자의 입력을 통해 선택된 영역 내의 라인 정보를 검출하여 저장할 수 있다. 저장된 라인의 정보를 해석하여 라인과 라인이 만나는 교차점을 인식해낼 수 있다.



가. 그림 2. 라인 정보 검출 및 교차점 인식

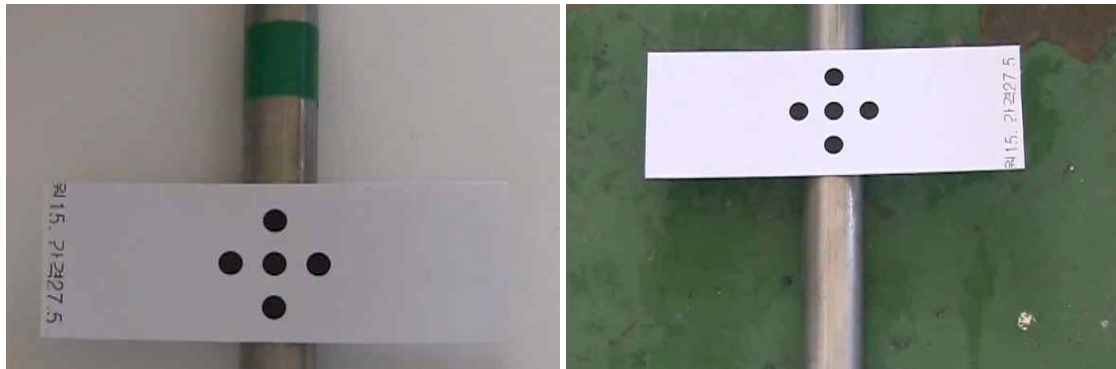
동일 과정을 반복하여 타 교차점들을 인식할 수 있다. 인식된 교차점들의 좌표 정보를 수학적으로 활용하여, 두 교차점을 지나는 경계선을 인식할 수 있다. 경계선 정보를 획득하고 나면 경계선의 양 끝점을 기준으로 경계선 내부를 분할하여 분할점들의 좌표를 저장할 수 있으며, 저장된 좌표의 추적을 통해 경계선의 변형을 계측할 수 있다.



가. 그림 3. 교차점 좌표를 활용한 경계선 분리인식

나. 경계선 분리인식 기법 최적화 방안

별도의 표식(Marker)을 부착하여 패턴을 인식하는 기술을 사용할 경우 주변의 환경에 영향을 거의 받지 않지만 별도의 장치 없이 가설 구조물의 경계선을 구분하기 위해서는 배경과 뚜렷하게 구분될수록 정확도의 확보를 유지할 수 있다. 영상분석을 통한 가설 구조물의 경계선 분석을 위한 방법을 크게 2가지로 구분하여 실시하였다. (1) 가설 구조물과 주변 배경의 색상 거리(L)를 통한 구분과 (2) 가설 구조물과 배경의 색조(Hue), 채도(Saturation), 명도(Value)를 구분하는 방법이다.



(a) 특정 배경(흰색)과 초록색 테이프

(b) 일반 배경과 비계 파이프

나. 그림 1. 주변 배경과 가설 구조물의 경계 분석 실험

그림 1은 두가지 경우에 대해서 실험을 통해 표식의 이동거리를 측정하고 가설 구조물(비계 파이프)의 이동을 경계선 분리인식 기법을 통해 측정, 비교하여 가설 구조물 경계선 분리인식 기법의 실현 가능성 및 정확도를 확보한다. 그림 1(a)는 가설 구조물에 초록 테이프를 부착하고, 주변 환경을 흰색으로 고정하여 확연하게 구분되도록 하였다. 그림 1(b)는 가설 구조물 본연의 색상과 일반 배경일 경우로 고려하여 분석하였다.

(1) 가설 구조물과 주변 배경의 색상 거리(L)를 통한 구분

- 빛의 3원색인 빨간색, 녹색, 파란색으로 표현되는 색상의 구분을 통해 경계선 분리 인식

$$\text{색상 거리}(L) = \sqrt{(R_{ref} - R_t)^2 + (G_{ref} - G_t)^2 + (B_{ref} - B_t)^2}$$

- 장점 : 명확하게 구분되는 경계의 경우 색상 거리의 조정을 통해 쉽게 경계 인식 가능

- 단점 : 다양한 색이 포함된 경우 다수의 처리 과정이 필수적임

여기서, R_{ref} , G_{ref} , B_{ref} : 기준이 되는 색상, 각 빨간색, 녹색, 파란색

R_t , G_t , B_t : 타겟 색상

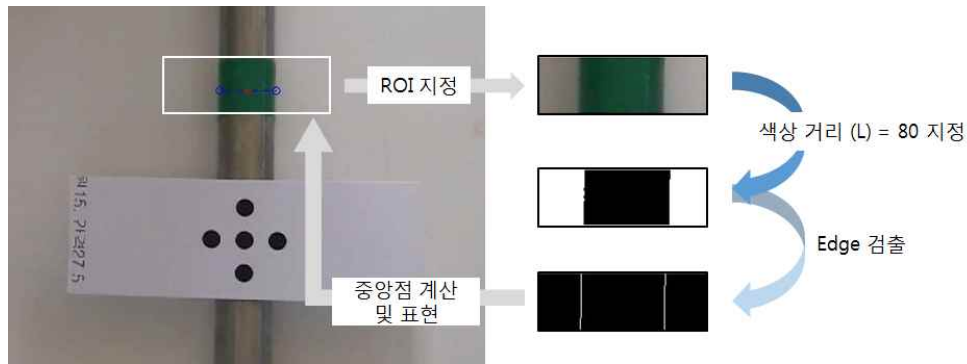
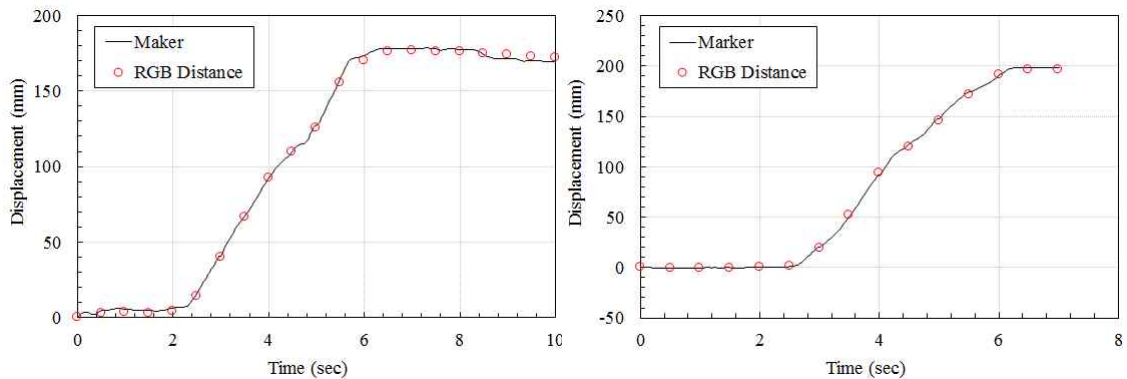


그림 2는 색상 거리를 통한 경계선 분리 인식 기법의 적용 순서를 나타낸다. 색상 거리 설정을 통해 비계 파이프와 배경의 구분을 명확하게 만들며, 이를 통해 경계선을 추출하여 경계선의 중심을 찾아 원본 영상에 나타나도록 하였다. 그림 3은 색상 거리를 통해 측정된 가설 구조물의 이동과 표식을 통한 거리 측정을 비교하여 나타내었다. 거의 정확하게 표식의 이동선을 따라감을 확인할 수 있었으며, 표 1의 비교를 통해 10mm 이상의 변위에서 오차율 2% 내외의 정확도를 확보하였다. 표식의 이동거리가 아주 미세할 경우 오차의 비율이 과대해지므로 10mm 이상의 값을 비교하였다.



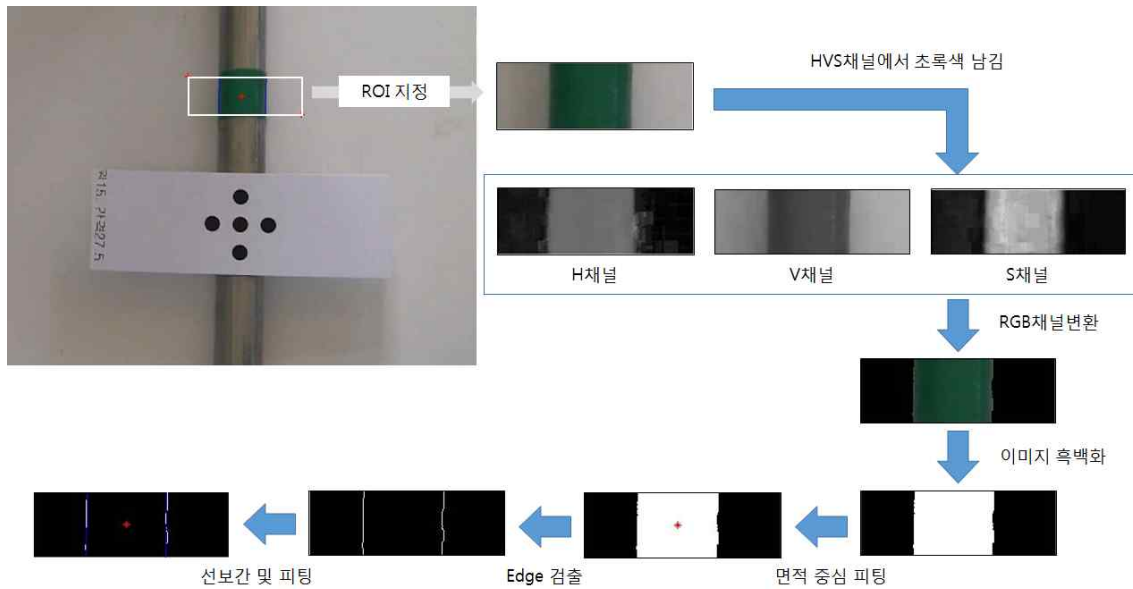
나. 그림 3. 표식(Marker)과 색상 거리를 통한 가설 구조물의 이동 측정

나. 표 1. 표식과 색상 거리를 통한 이동 측정 비교

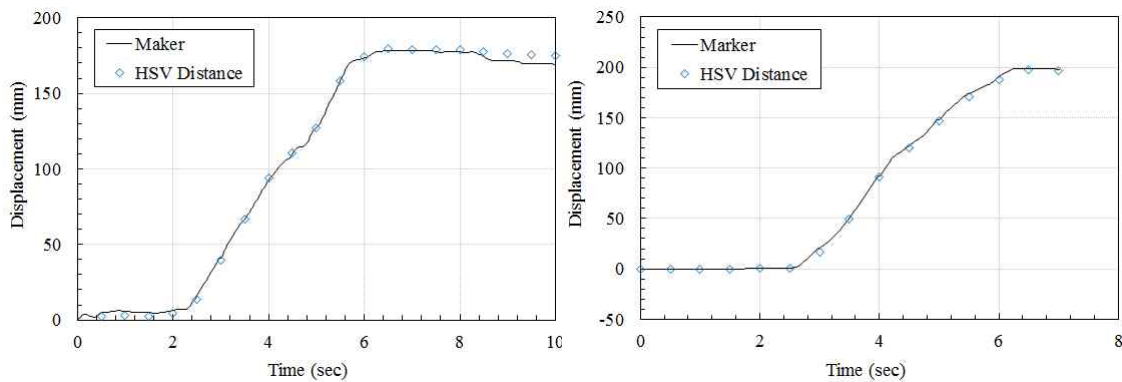
(a) 특정 배경(흰색)과 초록색 테이프				(b) 일반 배경과 비계 파이프			
Time (sec)	표식 (mm)	색상 거리 (mm)	Error (%)	Time (sec)	표식 (mm)	색상 거리 (mm)	Error (%)
0	0	0	-	0	0	0	-
0.5	4.9	2.9	-	0.5	-0.4	-0.8	-
1.0	5.6	3.4	-	1.0	-0.5	-0.5	-
1.5	4.8	3.0	-	1.5	-0.2	-0.6	-
2.0	6.5	4.3	-	2.0	0.8	0.3	-
2.5	16.4	13.8	15.8%	2.5	0.9	1.2	-
3.0	40.9	40.0	2.1%	3.0	20.5	18.9	7.6%
3.5	66.9	66.8	0.2%	3.5	51.4	52.2	1.4%
4.0	92.7	92.6	0.1%	4.0	91.8	93.8	2.1%
4.5	110.5	109.5	0.9%	4.5	122.3	120.0	1.9%
5.0	127.7	125.4	1.7%	5.0	148.0	145.4	1.8%
5.5	158.6	155.5	2.0%	5.5	174.2	171.4	1.6%
6.0	173.4	170.3	1.8%	6.0	191.1	191.5	0.2%
6.5	178.1	176.4	0.9%	6.5	198.7	196.3	1.2%
7.0	178.0	176.7	0.8%	7.0	198.0	196.9	0.5%
7.5	177.8	176.2	0.9%	(a) 특정 배경(흰색)과 초록색 테이프 - Error rate (%) = average(Error) = 2.0% (b) 일반 배경과 비계 파이프 - Error rate (%) = average(Error) = 2.0%			
8.0	177.3	175.9	0.8%				
8.5	174.1	174.6	0.3%				
9.0	171.6	173.7	1.3%				
9.5	169.8	172.6	1.6%				
10.0	169.2	171.8	1.5%				

(2) 가설 구조물과 배경의 색조(Hue), 채도(Saturation), 명도(Value)를 통한 구분

- 색조, 채도, 명도의 범위를 설정하여 가설 구조물의 경계선을 분리 인식
- 색조 : 색을 구별하는 고유 속성 / 채도 : 순수하고 선명한 정도 / 명도 : 밝고 어두운 정도
- 장점 : 사람이 분별하는 색의 경계 구분 가능, 3단계의 구분을 통해 정확도가 높음
- 단점 : 각 색조, 채도, 명도의 범위 설정에 있어서 색의 이해가 필수적임



나. 그림 4. HSV를 통한 경계선 분리 인식 기법의 적용



나. 그림 5. 표식(Marker)과 HSV 설정을 통한 가설 구조물의 이동 측정

그림 4는 HSV를 통한 경계선 분리 인식 기법의 적용 순서를 나타낸다. RGB 색상을 HSV 영상으로 변환하여 비계 파이프와 배경의 구분을 명확하게 만들며, 이를 통해 경계선을 추출하여 경계선의 중심을 찾아 원본 영상에 나타나도록 하였다.

그림 5는 HSV를 통해 측정된 가설 구조물의 이동과 표식을 통한 거리 측정을 비교하여 나타내었다. 거의 정확하게 표식의 이동선을 따라감을 확인할 수 있었으며, 표 2의 비교를 통해 10mm 이상의 범위에서 오차율 2.4%와 3.3%의 정확도를 확보하였다. 표식의 이동거리가 아주 미세할 경우 오차의 비율이 과대해지므로 10mm 이상의 값을 비교하였다.

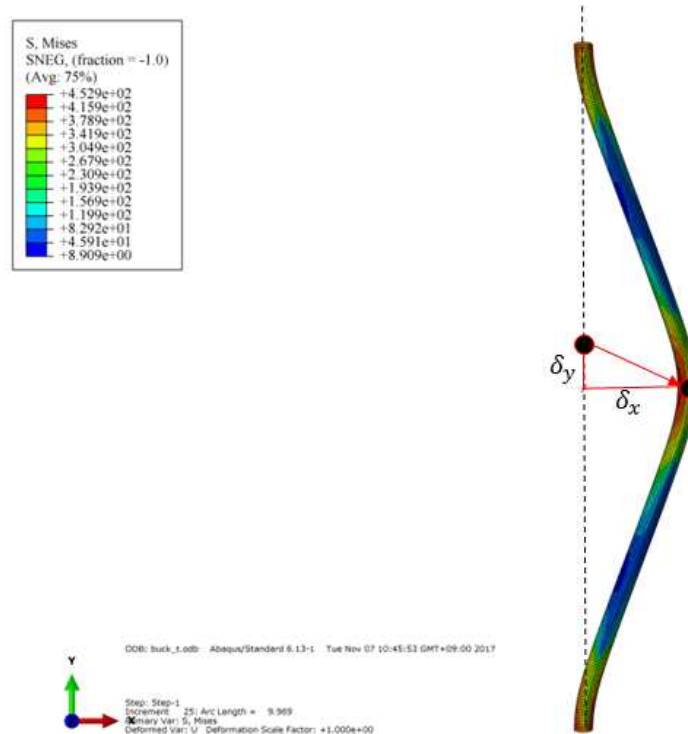
나. 표 2. 표식과 HSV를 통한 이동 측정 비교

(a) 특정 배경(흰색)과 초록색 테이프				(b) 일반 배경과 비계 파이프			
Time (sec)	표식 (mm)	색상 거리 (mm)	Error (%)	Time (sec)	표식 (mm)	색상 거리 (mm)	Error (%)
0	0	0	-	0	0	0	-
0.5	4.9	2.4	-	0.5	-0.4	-0.2	-
1.0	5.6	3.0	-	1.0	-0.5	-0.6	-
1.5	4.8	2.4	-	1.5	-0.2	-0.1	-
2.0	6.5	4.1	-	2.0	0.8	1.0	-
2.5	16.4	13.5	17.8%	2.5	0.9	0.7	-
3.0	40.9	39.5	3.4%	3.0	20.5	16.5	19.3%
3.5	66.9	67.1	0.3%	3.5	51.4	49.9	3.0%
4.0	92.7	93.7	1.0%	4.0	91.8	91.2	0.6%
4.5	110.5	110.6	0.1%	4.5	122.3	120.2	1.7%
5.0	127.7	127.4	0.2%	5.0	148.0	147.1	0.6%
5.5	158.6	158.1	0.3%	5.5	174.2	171.1	1.7%
6.0	173.4	174.0	0.4%	6.0	191.1	188.2	1.5%
6.5	178.1	179.3	0.7%	6.5	198.7	197.5	0.6%
7.0	178.0	178.9	0.5%	7.0	198.0	196.5	0.7%
7.5	177.8	179.2	0.8%	(a) 특정 배경(흰색)과 초록색 테이프 - Error rate (%) = average(Error) = 2.4% (b) 일반 배경과 비계 파이프 - Error rate (%) = average(Error) = 3.3%			
8.0	177.3	178.7	0.8%				
8.5	174.1	177.3	1.8%				
9.0	171.6	176.3	2.7%				
9.5	169.8	175.5	3.3%				
10.0	169.2	175.1	3.5%				

2-2-2. 가설 구조물 붕괴 시뮬레이션

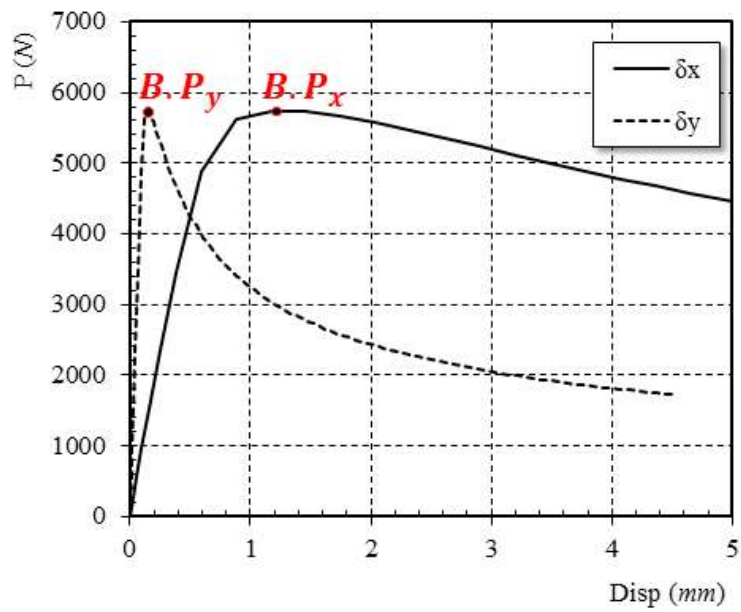
가. 가설 구조물 좌굴 전산해석

전산해석 프로그램 ABAQUS를 활용하여 수직부재의 좌굴 전산해석을 수행하였다. 부재 중앙부에 미소한 초기변형을 사전에 설정한 뒤 하중을 입력하여 좌굴을 유도하였다. 그림 1은 좌굴 시 부재 응력을 나타내고 있다.



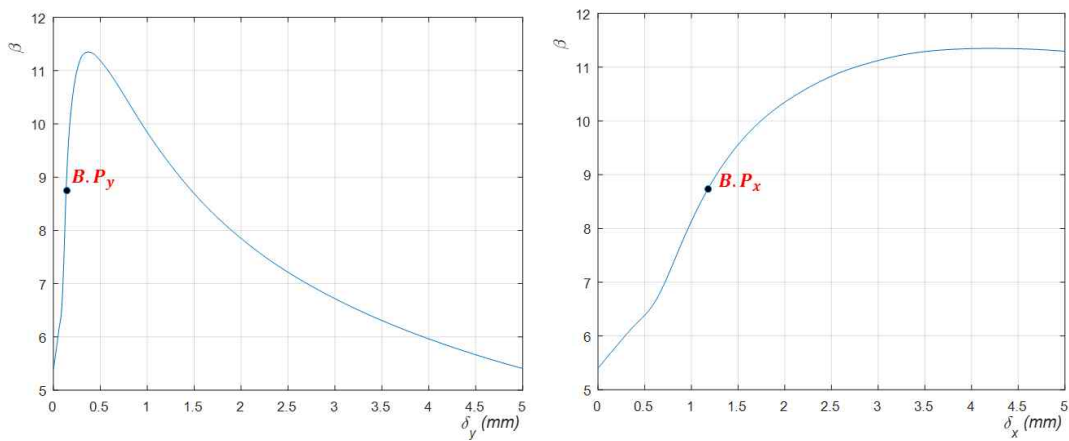
가. 그림 1. 수직부재 좌굴 시 응력

좌굴 발생 시 부재의 중앙부(또는 좌굴 취약부)에는 수직(δ_y)· 수평변위(δ_x)가 발생한다. 그림 2에는 이러한 수직(δ_y)· 수평변위(δ_x)와 하중 간의 관계를 나타내고 있으며, 이러한 관계를 통해 좌굴 시 하중, 수직(δ_y)· 수평변위(δ_x)의 변화 양상, 수직(δ_y)· 수평변위(δ_x)의 비율 등을 파악할 수 있다. 이 중 수직(δ_y)· 수평변위(δ_x)의 비율을 $\beta = \frac{\delta_x}{\delta_y}$ 로 설정할 수 있으며, 좌굴이 발생하는 좌굴점(Buckling Point) B.Px, B.Py 에 도달했을 시의 β 값을 미리 계산해낼 수 있다.



가. 그림 2. 하중-변위 그래프

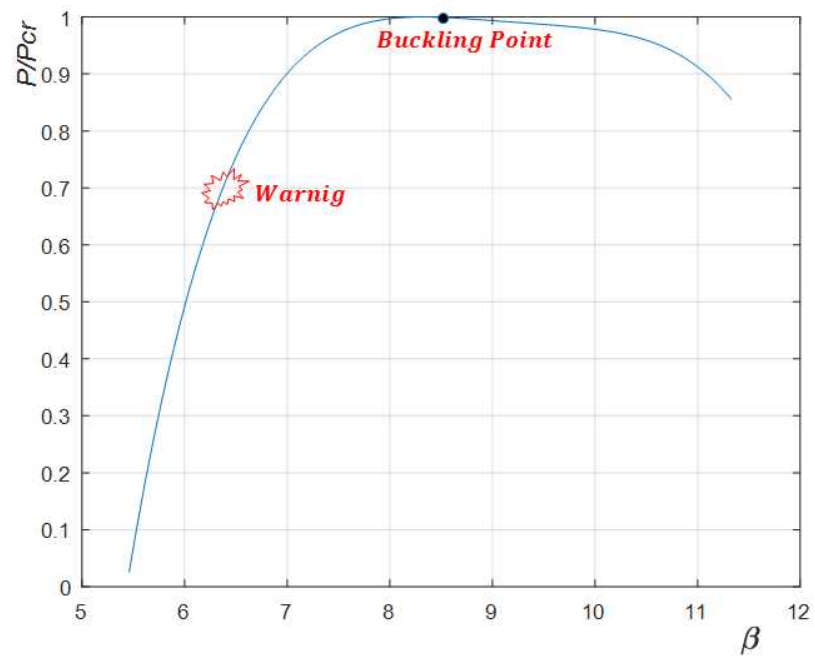
발생 변위와 β 의 관계를 그림 3에 나타냈으며, 분석 결과 좌굴 발생 이전까지 β 값은 꾸준히 증가하며, 좌굴 발생 이후에도 β 값은 다소 증가하다가 감소하는 결과를 나타냈다. 미리 구해놓은 좌굴 시의 β 값과 비교하여, 계측을 통해 관찰되는 β 값으로 좌굴이 발생하는 것을 예측할 수 있다.



가. 그림 3. 변위- β 그래프

영상기반 시스템을 통한 실시간 계측을 통해 β 값의 변화를 관찰할 수 있으며, 좌굴하중의 약 70%부터 좌굴발생위험 구간으로 판단할 수 있다.

그림 4에서와 같이, 실시간 계측을 통해 β 값이 좌굴발생위험 구간에 진입하면($\beta \geq 6.3$) 좌굴의 발생을 예측하여 사전 경고할 수 있다.



가. 그림 4. β -정규화 하중 그래프

나. 가설 구조물 축소모델 실험

(1) 연구 목적

시공, 철거와 같은 건설현장에서 빈번하게 안전사고가 발생하고 있다. 표 01에서 나타난 바와 같이 시공 또는 철거 중 구조물의 붕괴사고는 비계, 바닥, 상판, 거푸집 등의 붕괴에 의해 발생하였다. 아래의 표 02와 같이 최근 10년간 건설현장 안전사고 사망자 수 중 가설구조물이 붕괴되어 발생하는 사망자 수가 53.7%로 큰 비중을 차지하고 건설현장에서 가설구조물은 필수적으로 설치되며, 관련 붕괴사고 또한 이러한 가설구조물의 붕괴에 의해 발생한다. 따라서 본 시험에서는 가설구조물 요소부재인 단관파이프와 강재파이프서포트의 좌굴 실험을 통하여 부재의 하중-변위의 상관관계를 알아보고자 한다. 또한 지속적인 계측에 활용하기 위하여 기존의 변위계측 장비인 LVDT와 영상분석을 위해 카메라를 계측장비로 활용하여 두 데이터를 비교분석도 진행한다.

나. 표 01. 시공 또는 철거 중 붕괴사고 피해사례 및 붕괴원인

구분 (철거/시공)	년도	사고	사고원인	인명피해 (명)		비고
				사망	부상	
시공	2018	평택 국제대교 붕괴	상판붕괴	0	0	
철거	2018	서울 신대방동 4층 상가건물 붕괴	비계붕괴	0	1	
철거	2018	인천 부평 성당 붕괴	외벽붕괴	0	1	
철거	2018	대전 동구 원동 공장건물 붕괴	비계붕괴	0	0	
철거	2018	대구 달성군 공장건물 붕괴	벽돌벽붕괴	1	0	
철거	2018	서울 천호동 철거공사장 붕괴	비계붕괴	0	1	
시공	2017	충북 제천 강제동 신축공사 현장 거푸집 붕괴	거푸집붕괴	1	0	
시공	2017	제주 신화역사공원 공사장 붕괴	거푸집붕괴	0	8	
시공	2017	시흥 배곧신도시 공사현장 붕괴	거푸집붕괴	0	4	
철거	2017	서울 낙원동 숙박업소 건물붕괴	바닥붕괴	2	2	
철거	2017	서울 강남 역삼동 건물 붕괴	바닥붕괴	0	2	
시공	2017	제주 수련원 붕괴	비계붕괴	0	3	
시공	2017	포항 북구 양덕중학교 신축 공사장 붕괴	비계붕괴	1	1	
시공	2016	고성 당항포 엑스포장 붕괴	비계붕괴	1	2	
철거	2016	종로 낙원동 호텔 붕괴	바닥붕괴	2	2	
시공	2016	철곡군 석정읍 효성해링턴아파트 붕괴	비계붕괴	0	0	
시공	2016	칠산대교 구조물 붕괴	거푸집붕괴	0	6	
시공	2015	인천 조달청 신축창고(PEB)	비계붕괴	1	4	

		붕괴				
시공	2015	부산 경성대 신축공사장 붕괴	바닥붕괴	0	5	
시공	2015	동대구역 환승센터 공사장 붕괴	상판붕괴	0	12	
시공	2015	천안 신축공사장 붕괴	비계붕괴	3	4	
철거	2014	서울 강남구 신사동 에이랜드 건물 붕괴	비계붕괴	0	0	
시공	2013	광주 월계동 주상복합 신축 공사장 붕괴	거푸집붕 괴	0	6	
시공 (내부수리)	2012	충남 보령화력발전소 임시 구조물 붕괴	비계붕괴	2	11	
시공 (내부수리)	2012	충남 태안화력발전소 2호기 공사용 임시구조물 붕괴	비계붕괴	1	4	
시공	2011	강릉 오봉지구 저수지 공사장 붕괴	거푸집붕 괴	4	5	
시공	2011	경기 연천 공사현장 붕괴	거푸집붕 괴	0	2	
시공	2010	부산 화명동 지하수영장 신축공사장 붕괴	거푸집붕 괴	1	6	
시공	2010	홍성 홍주중 신축공사장 붕괴	거푸집붕 괴	1	2	
철거	2008	논현동 나산백화점 붕괴	바닥붕괴	1	1	
철거	2008	경기 연천 육군 군부대 막사 붕괴	외벽붕괴	1	0	
시공	2005	경기 이천 물류센터 공사장 붕괴	바닥붕괴	9	5	
시공	1999	평택 서해대교 붕괴	상판붕괴	3	0	
시공	1999	경남 사천 국도 2호선 확장공사 통로박스 붕괴	상판붕괴	1	13	

나. 표 02. 연도별 건설업 안전사고 사망자 수

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
총 사망자 수	210	362	376	373	357	387	346	349	391
가설건축구조물 사망자 수	74 (35.2 4%)	184 (50.8 3%)	209 (55.5 9%)	204 (54.6 9%)	184 (51.5 4%)	208 (53.7 5%)	214 (61.8 5%)	199 (57.0 2%)	216 (55.2 4%)
사다리	7	8	12	11	15	14	19	13	10
계단, 통로	3	2	3	4	5	8	6	5	7
비계	12	35	50	45	53	50	56	53	63
지보공	1	7	21	13	3	10	6	5	7
지붕, 대들보	15	8	16	18	10	25	33	29	13
작업대	0	10	14	9	10	6	8	1	5
건축구조물	11	59	62	36	49	53	50	49	81
개구부	15	28	20	31	24	25	15	27	24
기타	10	27	11	37	15	17	21	17	6

출처: 고용노동부 산업재해현황분석(2008~2016)

(2) 시험 방법

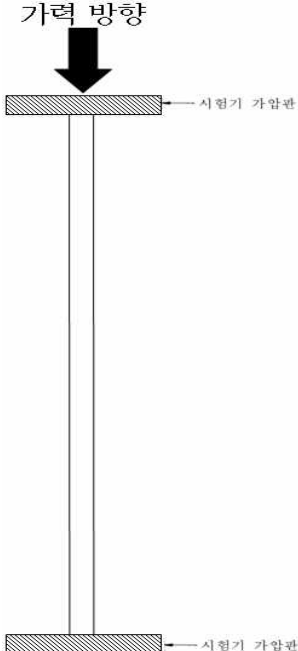
(가) 시험 개요

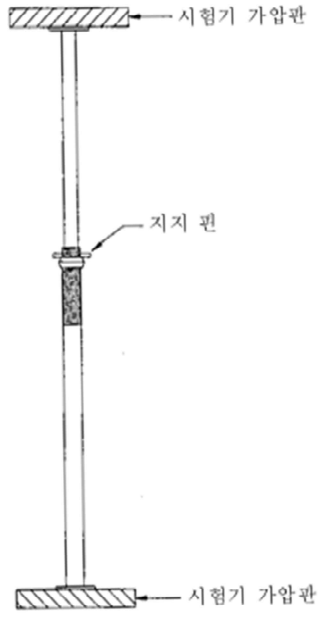
단관파이프와 강재파이프서포트의 하중-변위의 상관관계를 알아보기 위해 나이프엣지 누름에 의한 압축실험을 진행한다. 나이프엣지란 부재를 단관파이프와 강재파이프서포트의 길이를 2m에서 4m까지 0.5m씩 늘려가면서 각 5종류의 길이를 실험한다.

(나) 시험체 계획

① 시험체 일람표

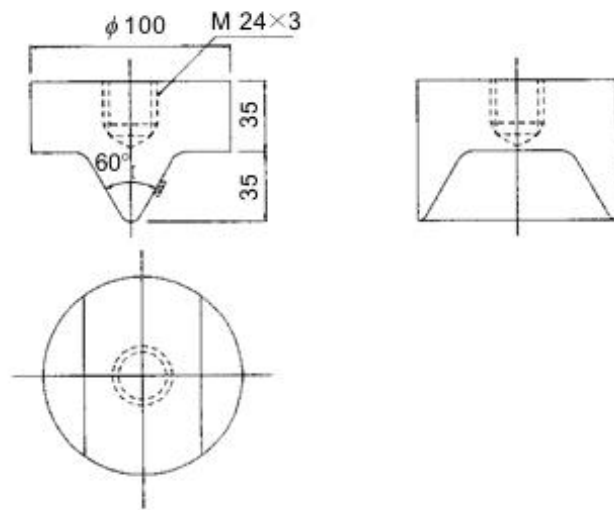
나. 표 03. 시험체 일람표

시험체	시험체 타입	주부재	시험 길이 (mm)	가력상세	시공상태
1	A1	○ - 2000× 60× 2.3T	2000		나이프엣지 지그 사용
	A2	○ - 2500× 60× 2.3T	2500		나이프엣지 지그 사용
	A3	○ - 3000× 60× 2.3T	3000		나이프엣지 지그 사용
	A4	○ - 3500× 60× 2.3T	3500		나이프엣지 지그 사용
	A5	○ - 4000× 60× 2.3T	4000		나이프엣지 지그 사용

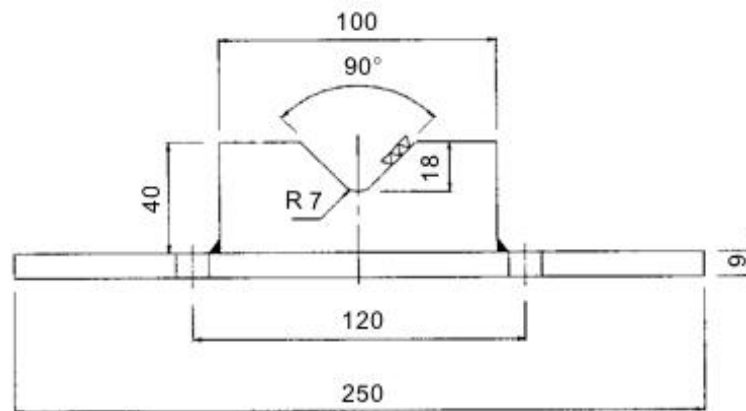
2	B1	외관 - STK400 ○ - 1700× 60.5× 2.3T 내관 - STK500 ○ - 1680× 60.5× 2.3T	2000		나이프엣지 지그 사용 지지 핀 사용
	B2	외관 - STK400 ○ - 1700× 60.5× 2.3T 내관 - STK500 ○ - 2000× 48.6× 2.5T	2500		나이프엣지 지그 사용 지지 핀 사용
	B3	외관 - STK400 ○ - 1700× 60.5× 2.3T 내관 - STK500 ○ - 2000× 48.6× 2.5T	3000		나이프엣지 지그 사용 지지 핀 사용
	B4	외관 - STK400 ○ - 1700× 60.5× 2.3T 내관 - STK500 ○ - 2280× 48.6× 2.5T	3500		나이프엣지 지그 사용 지지 핀 사용
	B5	외관 - STK400 ○ - 1700× 60.5× 2.3T 내관 - STK500 ○ - 2280× 48.6× 2.5T	4000		나이프엣지 지그 사용 지지 핀 사용

② 나이프엣지 지그 도면

단위: mm

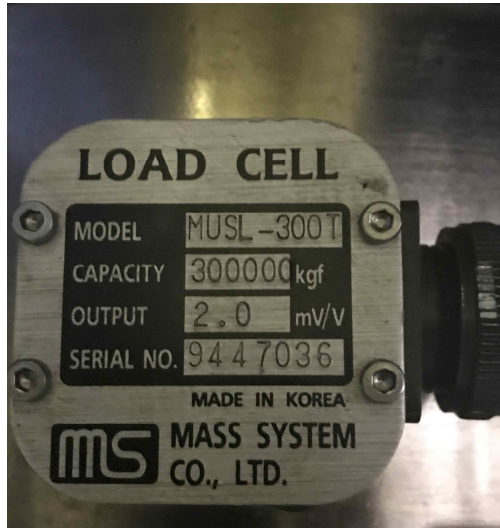


나. 그림 01. 나이프엣지



나. 그림 02. 나이프엣지 받이판

③ 기타 실험 준비 장비



나. 그림 03. LOAD CELL 3000kN



나. 그림 04. 데이터 로거(TDS-540)



나. 그림 05. 만능재료시험기(UTM) 3000kN



나. 그림 06. 실험 전경

(다) 기존 변위계측 장비(LVDT)를 통한 변위계측

- ① UTM과 반력바닥에 나이프엣지 지그를 설치.
- ② 0.5m간격으로 LVDT를 설치.(단, 2.5m, 3.5m시험체는 부재의 중앙부에 하나 더 설치한다.)
- ③ 시험체를 UTM에 고정.
- ④ 시험체에 설치해 놓은 LVDT를 연결.
- ⑤ 일정간격으로 가력하면서 시험체의 수평·수직 변위를 측정.
- ⑥ 위의 순서로 길이별 시험체를 실험.

(라) 영상분석을 통한 변위계측

- ① UTM과 반력바닥에 나이프엣지 지그를 설치.
- ② 시험체를 UTM에 고정.
- ③ 시험체에 영상분석을 위한 마커 부착.
- ④ 일정간격으로 가력하면서 시험체의 수평·수직 변위를 측정.
- ⑤ 위의 순서로 길이별 시험체를 실험.



나. 그림 07. 하부 나이프엣지 설치



나. 그림 08. 상부 나이프엣지 설치



나. 그림 09. LVDT 설치



나. 그림 10. 시험체 1 가력 후 전경



나. 그림 11. 시험체 2 가력 후 전경

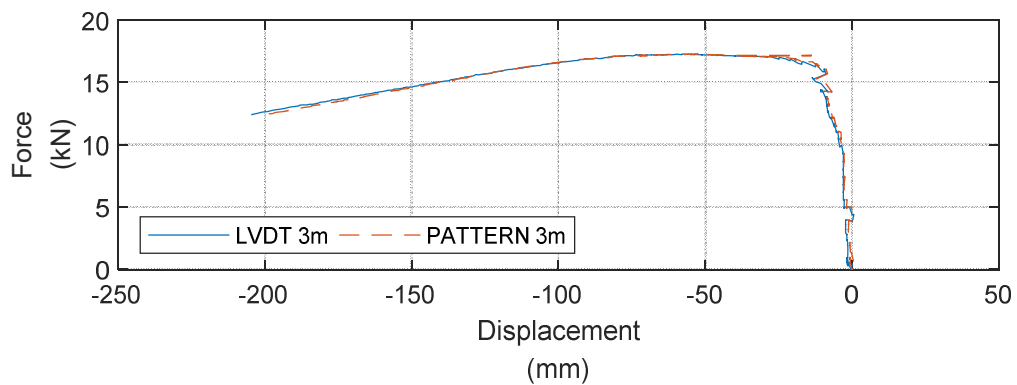
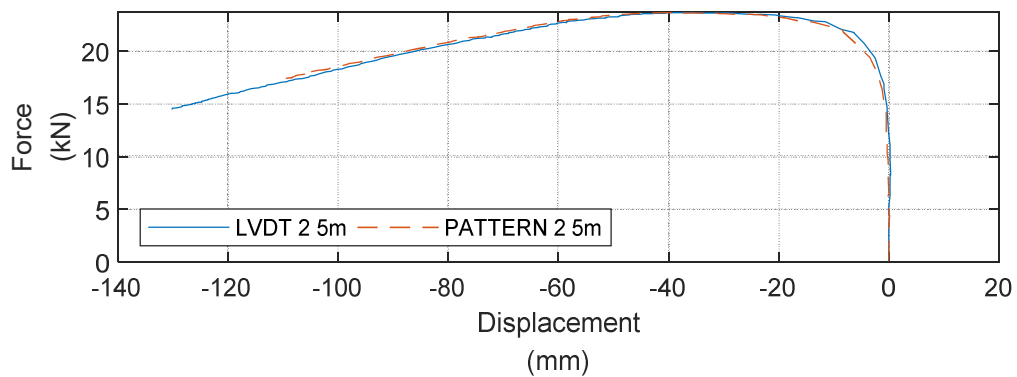
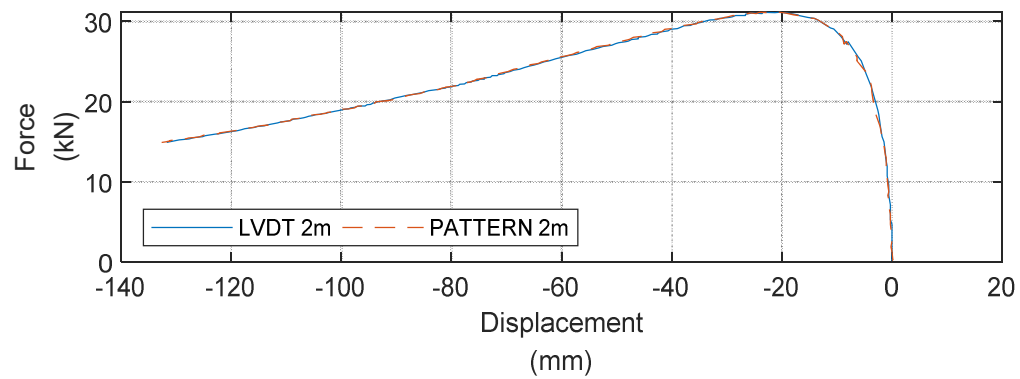
(3) 결과 분석

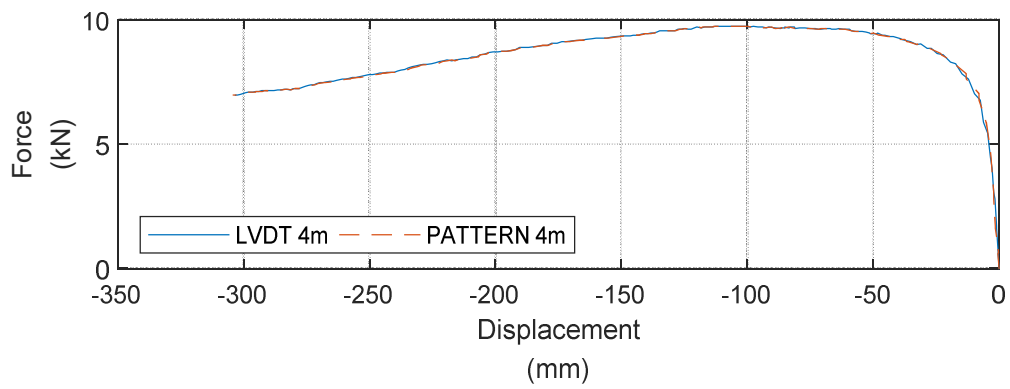
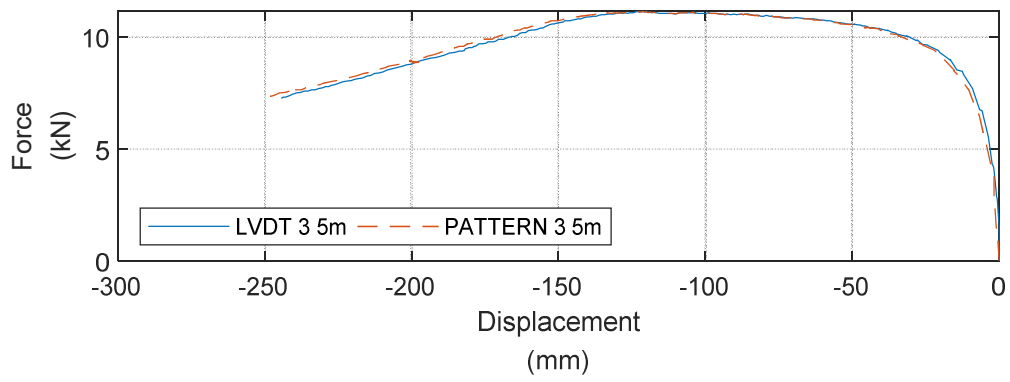
(가) LVDT 데이터와 영상분석 데이터 비교

시험을 통해 얻은 데이터를 비교하기 위하여 시험체 종류와 길이별로 구분하여 하중-변위 그래프를 작성한 결과 그림 과 같은 결과를 얻었다.

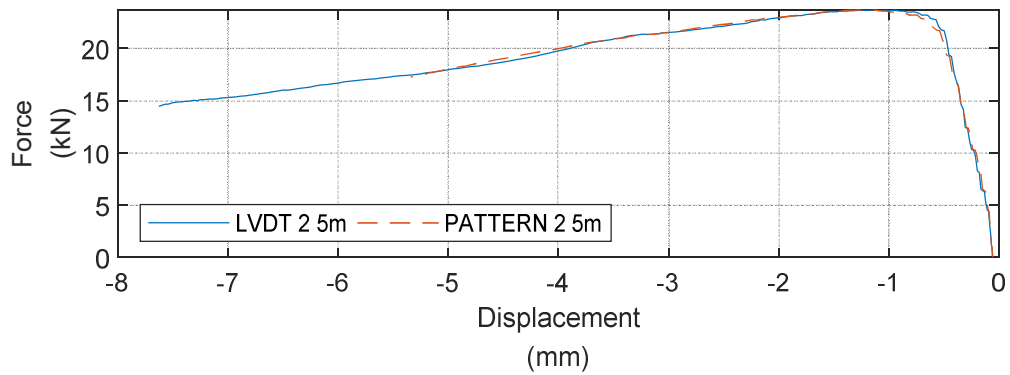
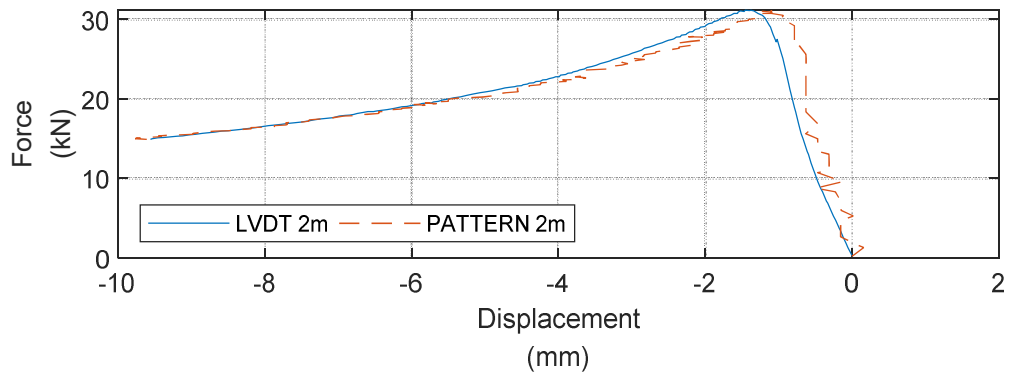
① 단관파이프(시험체 1)의 LVDT와 영상분석의 변위 비교

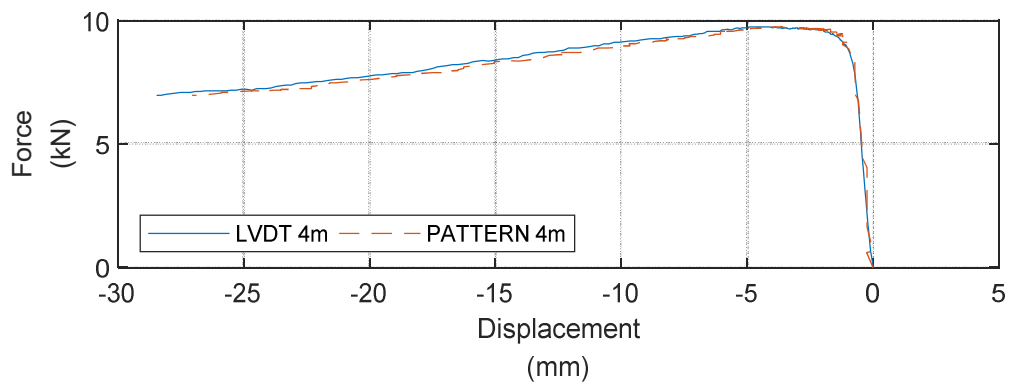
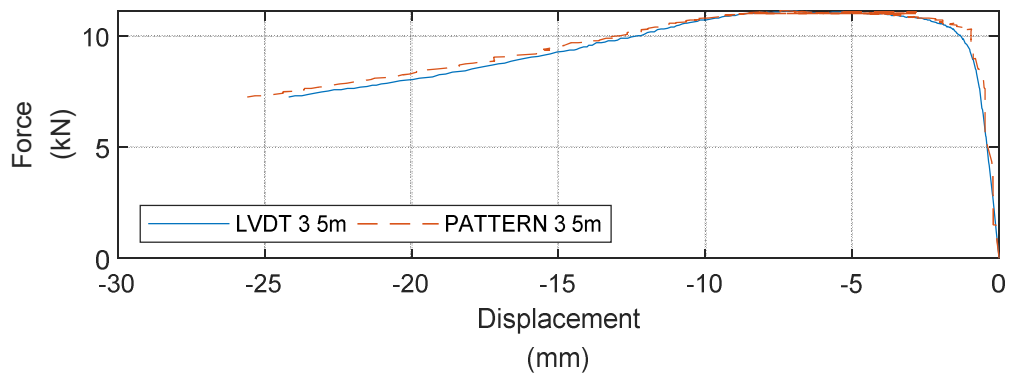
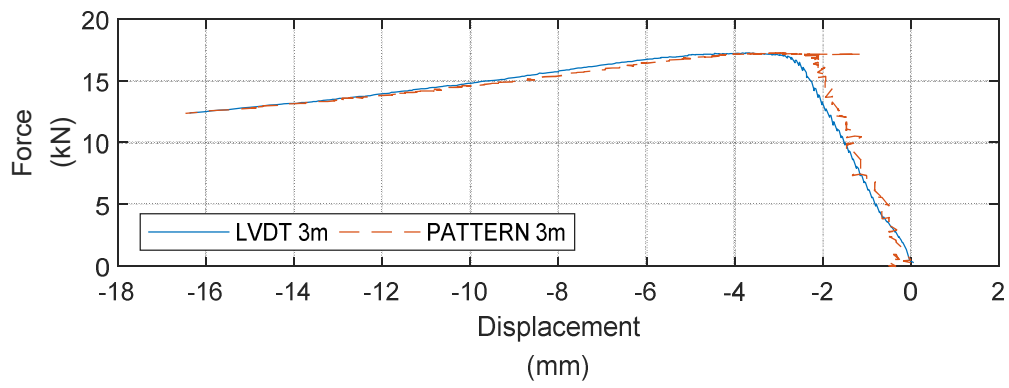
- 수평변위





- 수직변위

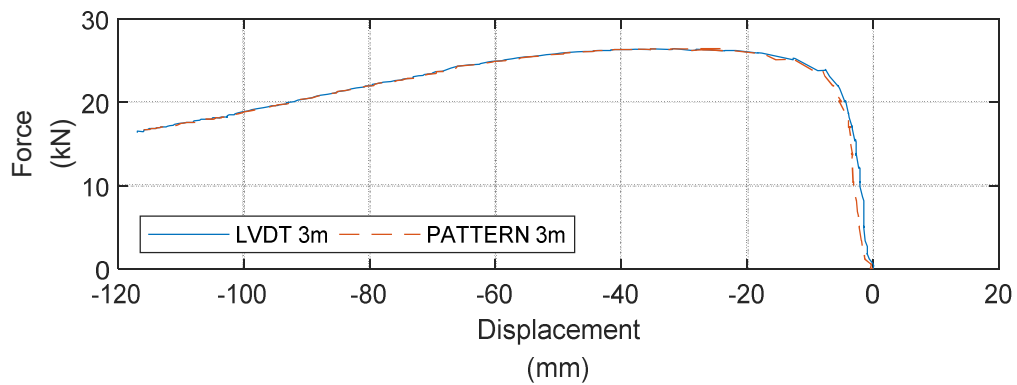
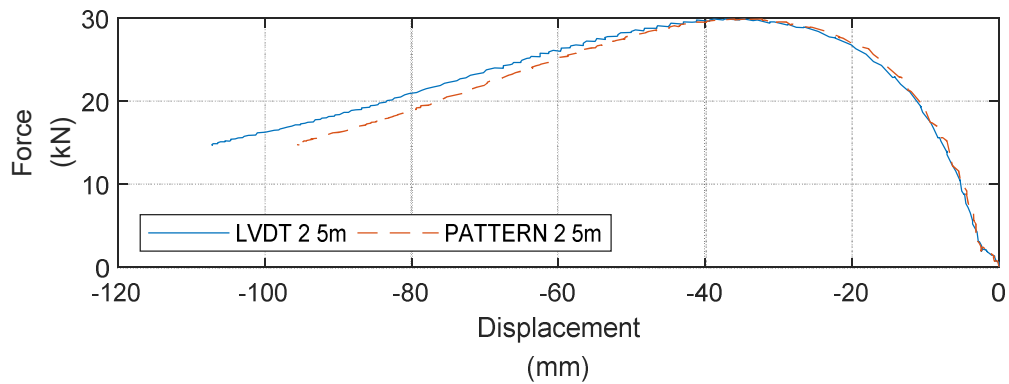
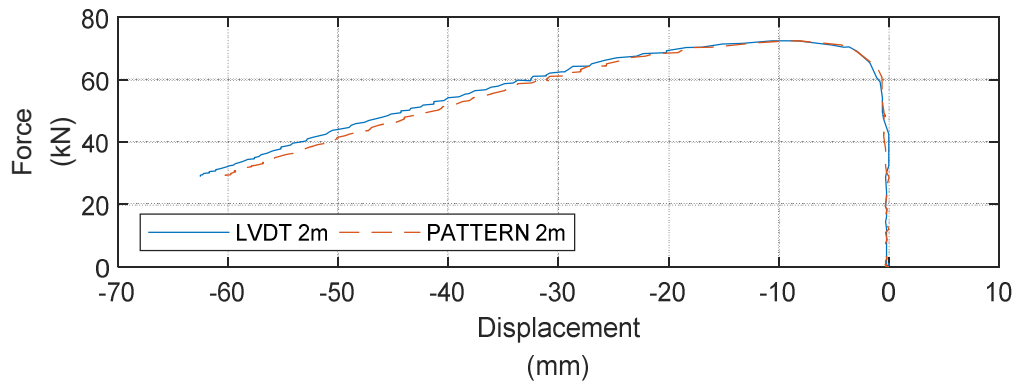


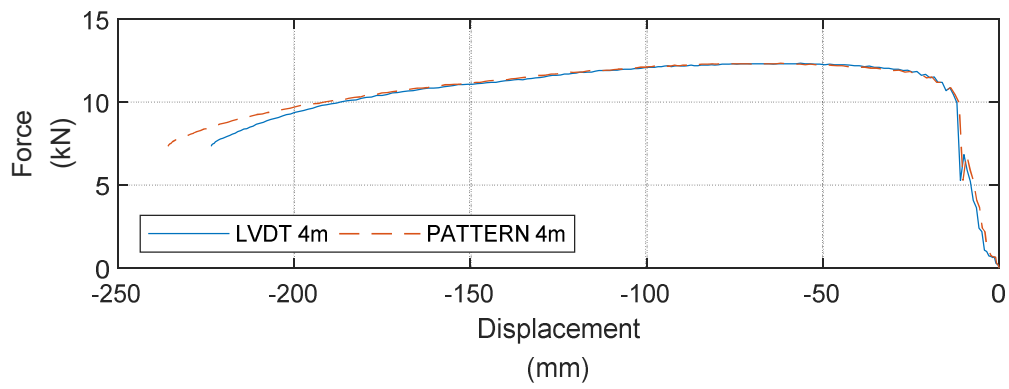
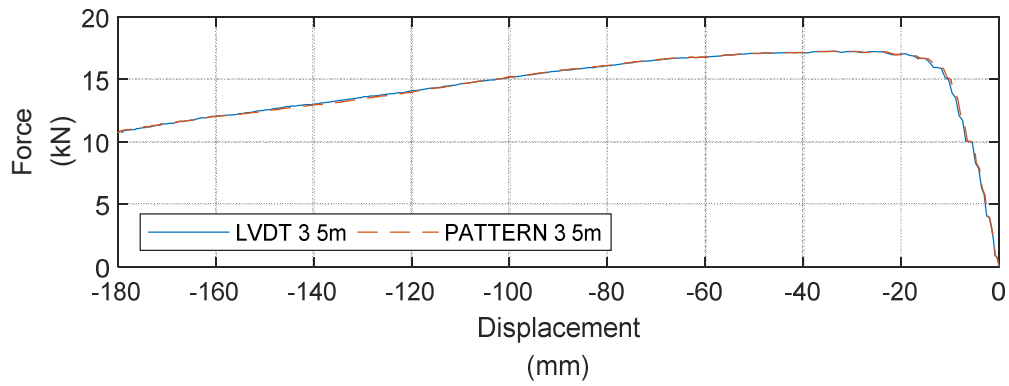


② 파이프서포트(시험체 2)의 LVDT와 영상분석의 변위 비교

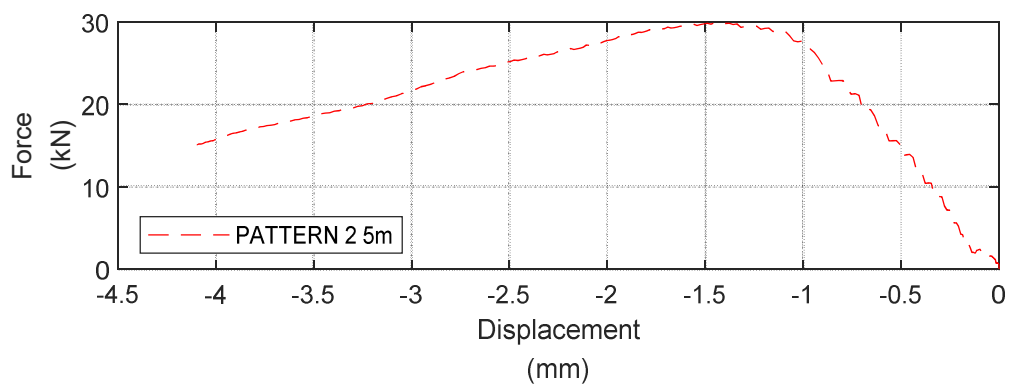
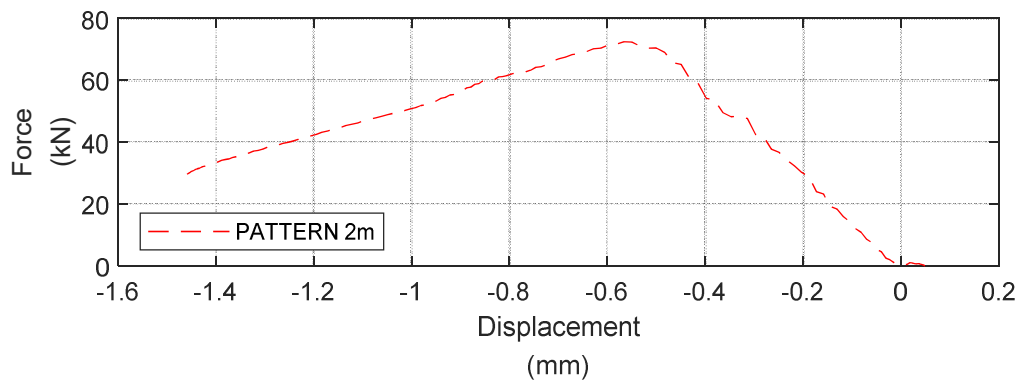
파이프서포트의 경우 중심부의 수직변위를 기존 변위 계측 장비로는 측정하는 것이 불가능하다. 따라서 앞의 데이터를 비교해 봄으로서 영상분석을 기반으로 한 변위 계측이 충분한 정확성을 가진다고 보고 파이프서포트의 중심부의 수직변위는 영상분석 데이터만을 활용한다.

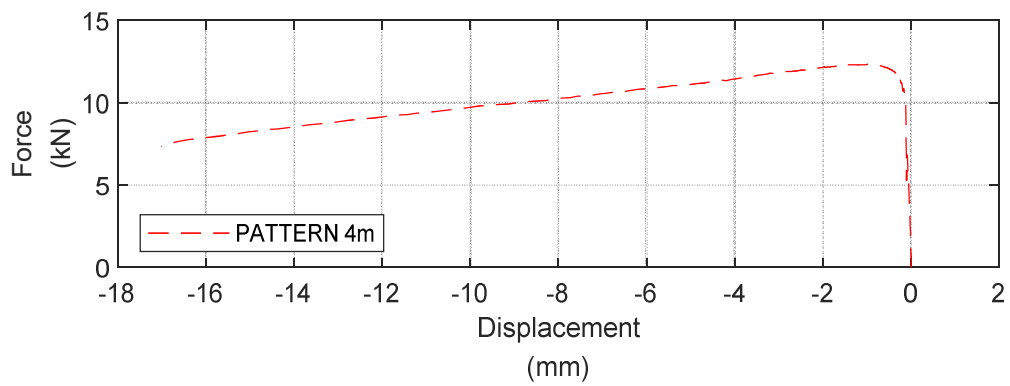
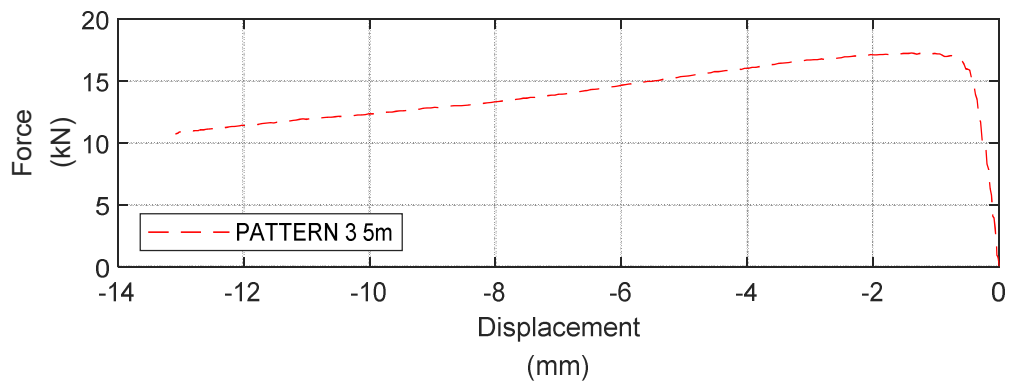
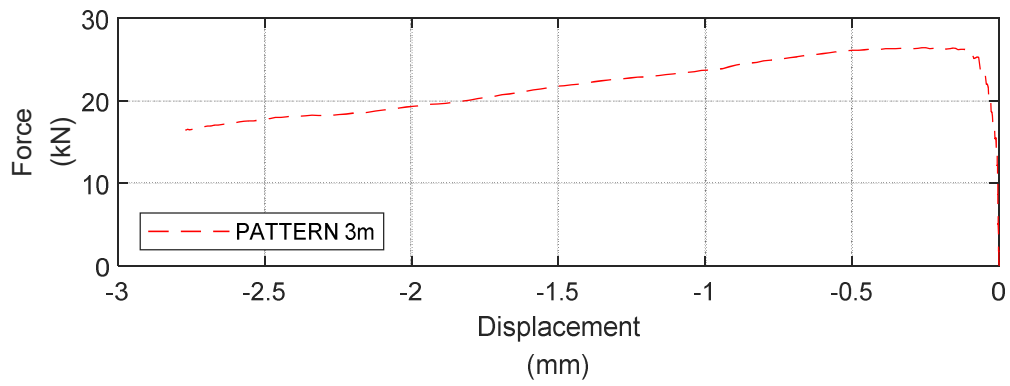
- 수평변위





- 수직변위





LVDT와 영상분석을 기반으로 출력된 변위 비교결과, 약 0.2mm 이내의 오차를 나타내었다. 마커를 부착하고 표적인식을 통한 영상분석의 정확성은 매우 높다고 볼 수 있다.

(나) 실험 결과 최대 좌굴하중과 이론 식에 의해 계산된 최대 좌굴하중 비교
 ① 단관파이프

나. 표 04. 단관파이프 좌굴하중 비교

시험체	이론 값 (kN)	실험 값 (kN)	오차 (%)
1-A1	45.47	36.81	11.0
1-A2	29.10	23.64	21.6
1-A3	20.21	16.86	8.50
1-A4	14.85	11.81	18.8
1-A5	11.37	9.56	19.1

② 강재 파이프서포트

나. 표 05. 강재 파이프서포트 좌굴하중 비교

시험체	이론 값 (kN)	실험 값 (kN)	오차 (%)
2-B1	88.61	72.44	18.25
2-B2	43.59	32.9	24.50
2-B3	30.54	24.93	18.37
2-B4	21.10	17.25	18.01
2-B5	14.56	12.05	17.22

(다) 실험 결과에 대한 오차원인 분석
 현실적으로는 부재의 초기변형 및 잔류응력이 존재하고, 하중이 단면도심에 작용하는 것은 쉽지 않다. 따라서 이러한 요인은 부재의 좌굴내력을 저감시킨다. KS규격에서도 제작 시 허용 오차를 1/1000으로 규정하여 어느 정도의 오차는 인정하고 있다. 좌굴의 경우 미세한 초기변형이 좌굴하중에 큰 영향을 주기 때문에 이러한 결과 발생하였다고 판단된다.

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{P}{EI}(y + y_0) = 0 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (1)$$

초기변형의 경우 부재에 $y = e_1 \sin \frac{\pi x}{L}$ 의 초기변형이 있다고 할 때, 부재의 힘의 평형방정식은 위의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)에서 나타난 바와 같이 y0만큼의 변형이 더 있게 되므로, 하중이 가해지기 시작할 때부터 기동부재가 처지기 시작하는 처짐형태의 문제라는 것을 알 수 있다.

(4) 결론

가설구조물 요소부재(단관파이프, 강재파이프 서포트)의 하중-변위의 상관관계를 알아보기 위해 나이프엣지 누름에 의한 압축실험을 실시하였다. 단관파이프 및 파이프서포트의 길이를 2m에서 4m까지 0.5m씩 늘려가면서 각각 5종류의 길이를 실험하였다.

단관파이프 및 파이프서포트의 LVDT와 영상분석의 변위 비교 결과 두 데이터가 매우 유사한 결과를 보여주는데, 이는 영상분석을 기반으로 출력된 변위 데이터가 신뢰성이 있다는 점을 의미한다. 단관파이프 및 파이프서포트의 좌굴하중의 이론 값과 실험 값의 비교로부터 단관파이프는 8.5%~21.6% 사이의 오차가 발생하였으며, 강재 파이프서포트는 17.22%~24.5%의 오차가 발생하였다. 오차원인으로는 실험 전 부재에 초기변형 및 잔류응력이 존재하고, 실험 중 하중이 단면도심에 작용하기 어렵다는 점으로 사료된다.

2-2-3. 가설 구조물 경계선 분리인식 기법을 적용한 실시간 다중 모니터링 프로그램 개발

(1) 프로그램 소개

본 프로그램의 명칭은 구조물 붕괴 예측 모니터링 시스템이고, 프로그램 사용 목적은 구조물 붕괴 예측이다. 구조물의 시공 및 철거 시 붕괴사고를 방지하고, 안전성을 높이기 위해 가설 구조물의 거동 계측을 위한 영상분석 기반 구조물 모니터링 시스템을 개발 하였다. 또한, 향후 가설 구조물 모니터링 기술의 무선화 및 응용 앱을 연결하여 시공 및 철거 중 구조물의 붕괴위험 시 경보시스템을 구축하여 스마트폰 알림 소프트웨어와 함께 연계할 수 있도록 설계, 개발 되었다



그림 1. 프로그램 정보

(2) 프로그램 기능

프로그램의 주요기능으로는 프로젝트관리, 초기측정, 실험포인트 설정, 변위측정 등이 있다.

(가) 프로젝트 관리

프로젝트 관리 탭에서는 프로젝트의 조회, 등록, 수정 및 삭제가 가능하다. 관리 가능 항목으로는 프로젝트명, 측정일자, 측정 포인트 개수, 측정 장소, 담당자, 비고 등이 있다. 사전 측정된 데이터가 있는 프로젝트인 경우 사전에 측정된 데이터를 그래프 및 데이터리스트 등으로 볼 수 있다.

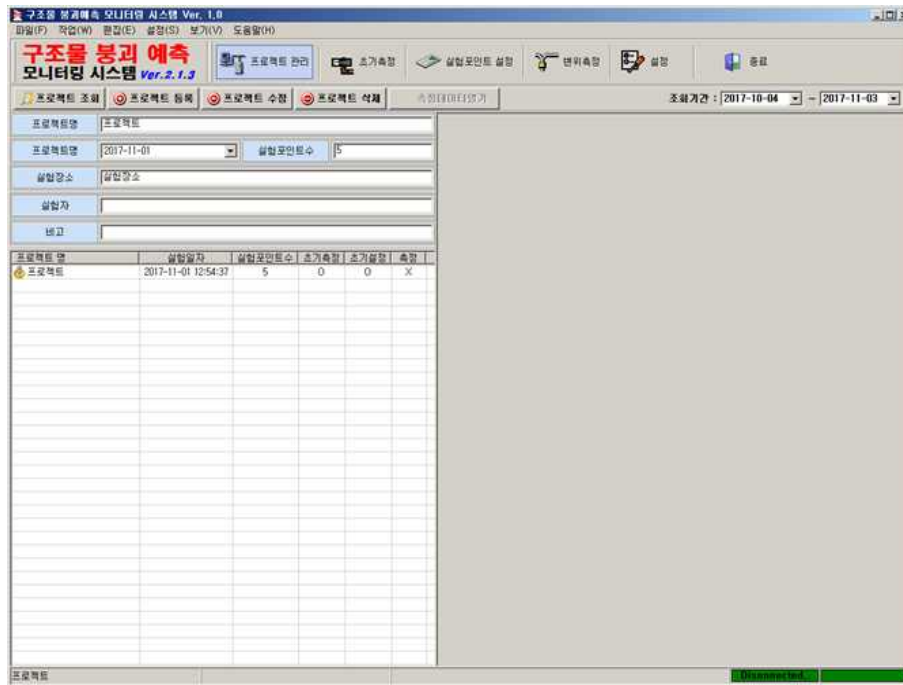


그림 2. 프로그램 인터페이스 (프로젝트 관리)

(나) 초기측정

초기측정 탭에서는 가설 구조물 측정 포인트가 전체적으로 나오게 카메라의 팬, 틸트, 줌, 포커스등을 변경 하며 초기 촬영을 할 수 있게 했다.

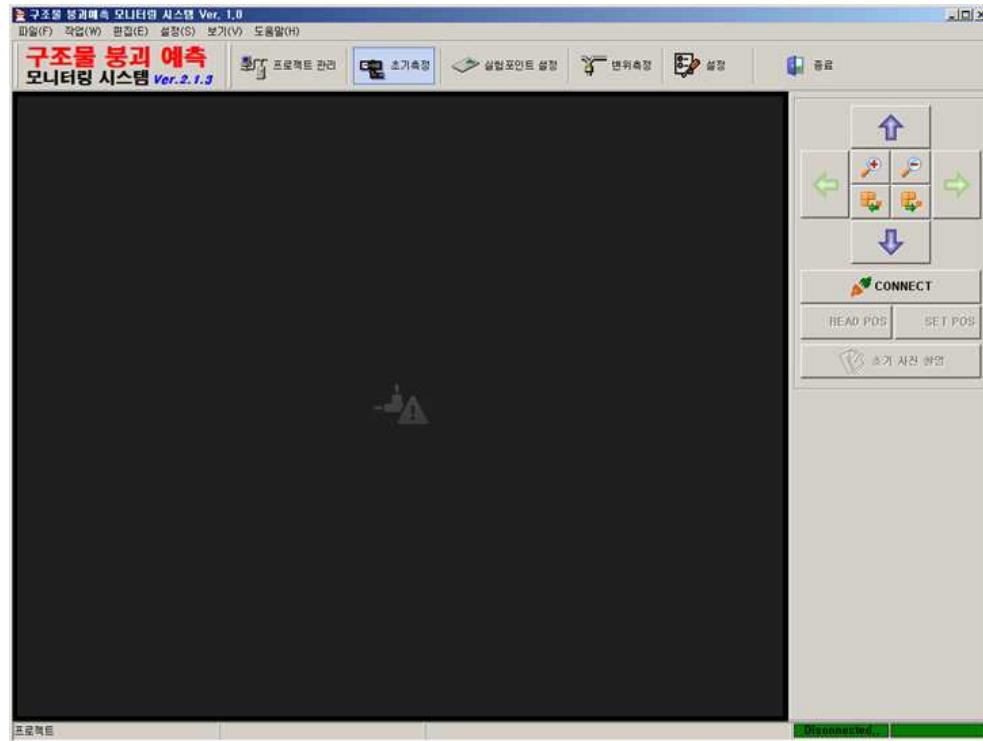


그림 3. 프로그램 인터페이스 (초기측정)

(다) 실험포인트 설정

실험포인트 설정 탭에서는 가설 구조물 측정 포인트 개수만큼 측정 범위를 지정한다.

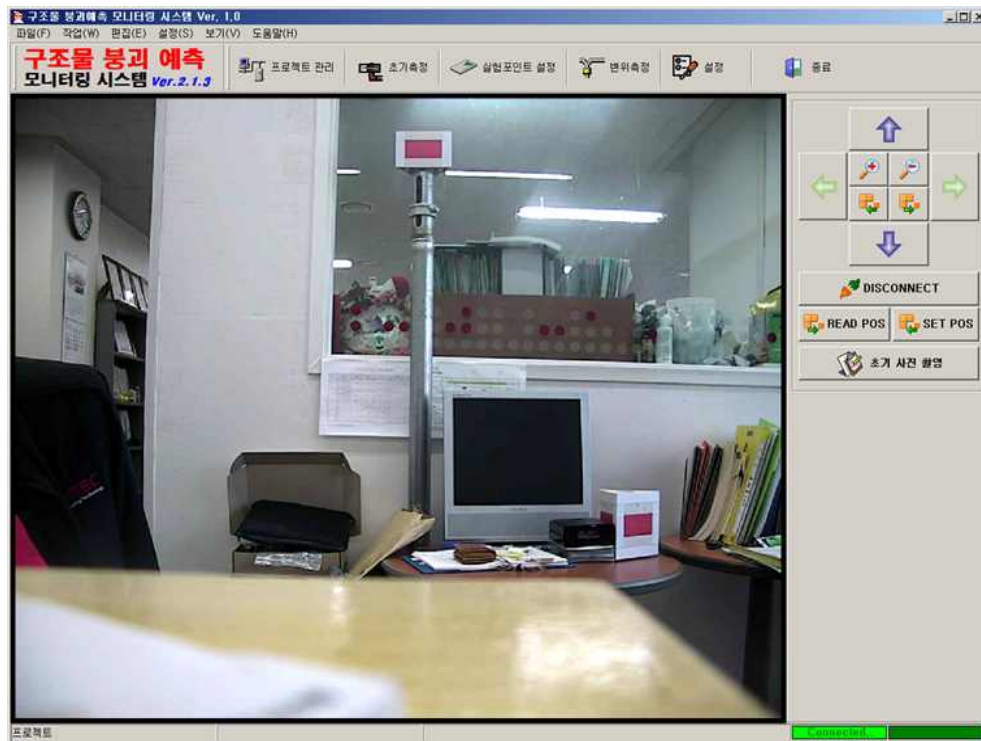


그림 4. 프로그램 인터페이스 (실험포인트 설정)

(라) 변위측정

변위측정 탭에서는 ‘실험포인트 설정’에서 설정한 포인트 별 측정 범위 내의 위치 변위량을 실시간으로 측정하여 나타낸다. 변위 변화량을 실시간으로 그래프 및 데이터리스트로 나타내고, 데이터를 저장한다.

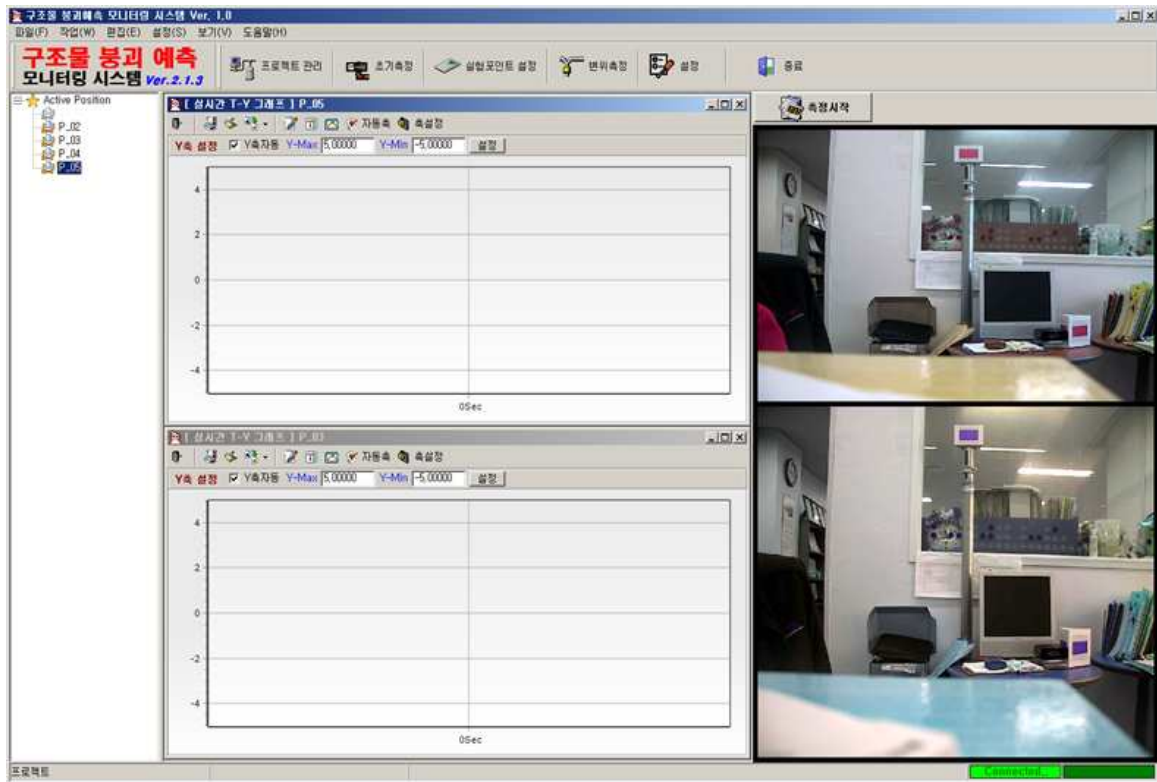


그림 5. 프로그램 인터페이스 (변위측정)

2-2-4. 유사환경 실험을 통한 실시간 다중 모니터링 시스템 검증

가. 시스템 비계 가력 실험에서 영상기반 계측 시스템 신뢰성 분석

구조물의 변형 정보는 구조물 안전성 및 사용성 평가에 중요한 데이터로 활용될 수 있다. 여러 계측 항목들 중에서 변위는 구조물의 상태를 가장 잘 나타내는 지표이다. 그러나 실제 구조물의 변위 측정을 위해서는 센서와 같은 측정 장치의 설치가 필수적이며 외부 환경에 따라 정확도의 한계를 가진다. 특히 우리나라 건설 현장에서는 거푸집 붕괴로 인한 구조물 붕괴 사고가 증가하고 있다. 그에 따라 건설 현장에서 하중에 따른 구조물의 변위를 영상기반 실시간 변위계측 시스템을 통해 경제적이고 정확한 계측으로 붕괴 예측 및 이명 피해를 예방 할 수 있다.

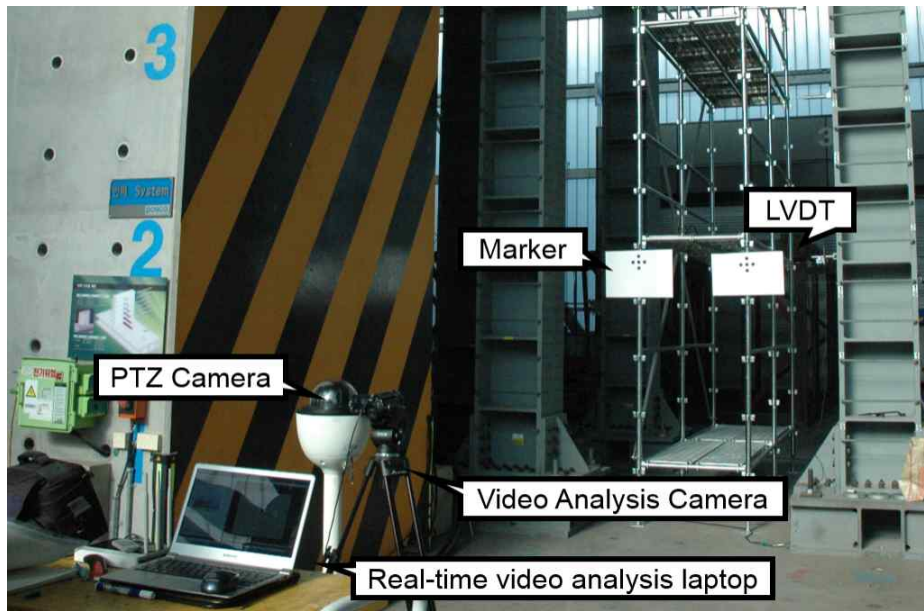
(1) 실험 계획

실험체 일람은 아래의 표 1에서와 나타난 것과 같이 시스템 비계로 구성되었다. 실험체는 현장에서 일반적으로 많이 사용하는 실물 크기로 실험체를 제작하여, 하중에 따른 좌굴실험으로 수평변위를 측정하였다. 비계의 규모는 610×3658×5900 mm으로, 6개의 기둥으로 구성되어 있으며 동일한 하중으로 가력하였다. LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와 비교할 수 있는 PTZ (Pan Tilt Zoom) 카메라와 일반적으로 영상 분석용으로 많이 사용하는 캠코더를 사용하였다.

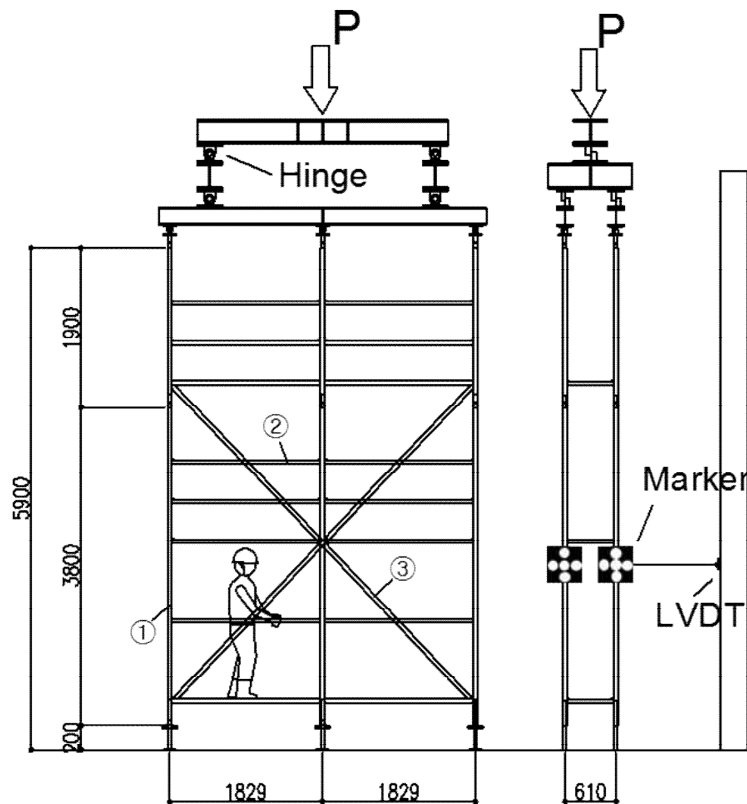
가. 표 1. 실험체 일람

Specimen	ES700 (STK690)
Standard	610 × 3658 × 5900 mm
① Main Column	φ 48.6mm × 1.8 t
② Width Support	φ 42.7mm × 1.8 t
③ Bracing Member	φ 42.7mm × 1.8 t

그림 1는 실험체의 설치 전경을 나타내며, 구조물의 영상을 취득하기 위해 실시간 변위 계측 시스템의 PTZ(Pan Tilt Zoom) 카메라와 통상적으로 많이 사용하고 있는 영상을 취득 후 프로그램을 이용하여 분석 후 변위를 얻을 수 있는 영상분석 캠코더를 설치하여 실시간으로 촬영하면서 실험을 진행하였다. 그리고 실험실의 환경을 고려하여 변위를 측정하는 기준점이 되는 마커와 카메라 사이의 거리는 6m, 지면과 마커의 중심점까지의 높이는 2.1m이다. 그림 2과 같이 영상기반 실시간 변위 계측 시스템과 LVDT의 변위를 비교하기 위해 마커를 시스템 비계 측면부에 부착하였으며 마커는 각 원의 지름이 □ 50mm, 원과 원 중심 사이의 수평/수직 거리는 70mm로 설정하였다.



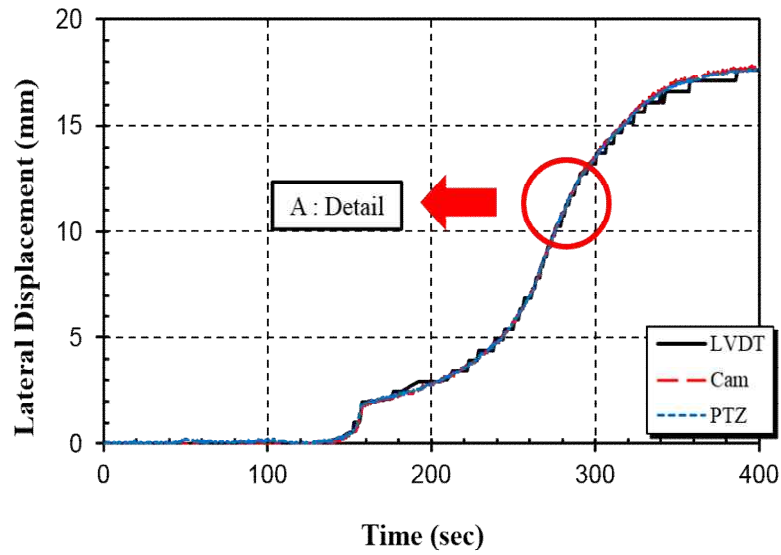
가. 그림 1. 실험체 전경



가. 그림 2. 실험체의 정면부와 측면부

(2) 실험 데이터 및 결론

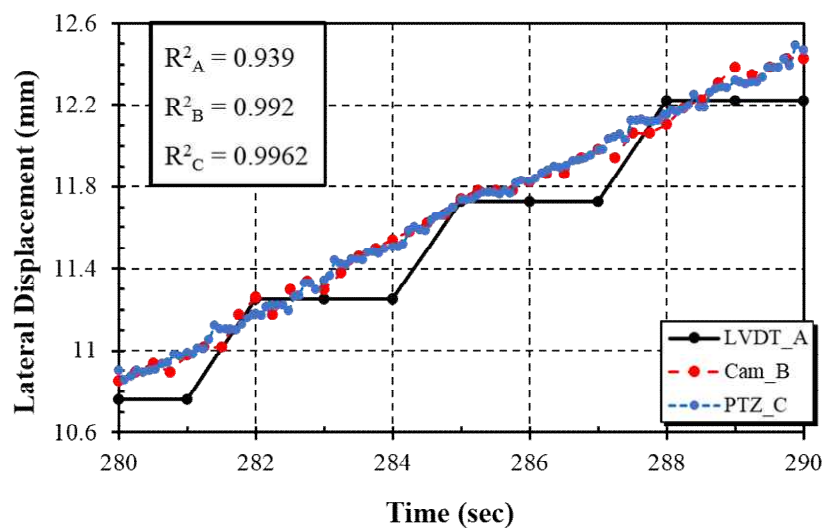
그림 3에서는 실험을 통해 각 장비들의 측정된 결과를 시간-수평변위 그래프로 비교하였다. 실험 결과는 좌굴 발생 이후 실험 종료 시 하중 101.96kN에서 LVDT의 최대 변위는 18.57mm, 영상분석용 캠코더의 최대 변위는 18.04mm이며 실시간 PTZ 카메라의 최대 변위는 18.15mm로 나타났다.



가. 그림 3. 시간-수평 변위 그래프

측정한 카메라의 해상도에 따라 1개의 픽셀 당 최대 오차 범위(MPC)를 계산한 결과 영상 분석 캠코더의 경우 1.43 mm/pixel로 나타났고, 실시간 PTZ카메라의 경우는 최대 0.96 mm/pixel로 오차범위가 나타났다.

그림 4에서는 각 장치의 정확도를 알아보기 위해 시간-수평 변위 그래프에서 가장 가파른 구간인 280초에서 290초를 확대하였다. 분산되어 있는 결과 값들을 이용하여 평균적인 기울기를 알 수 있는 추세선과 그래프의 정확도를 나타내는 척도로 사용되는 R2으로 정확도를 비교하였다. 그 결과 LVDT는 약 93.9%, 영상분석 캠코더는 99.2%, 실시간 변위 계측 시스템인 PTZ 카메라는 99.6%의 정확도로 나타났다.



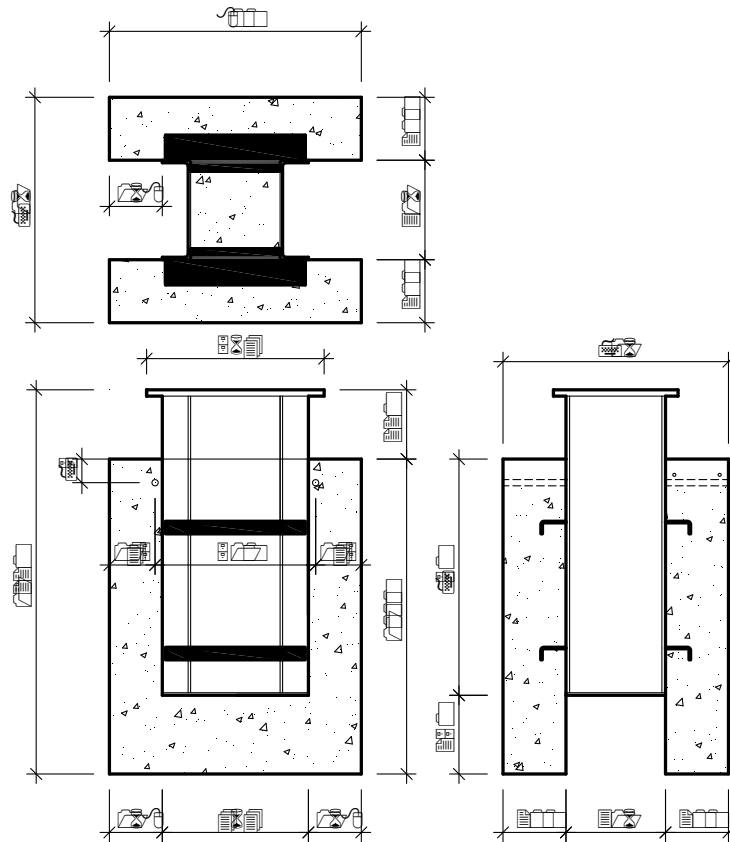
가. 그림 4. R2 값의 비교 그래프 (A Detail)

이 실험에 사용된 PTZ 카메라의 알고리즘을 통해 영상 기반 실시간 변위 계측 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 네트워크 PTZ 카메라로서 연결된 노트북을 통해 실시간으로 측정값을 그래프로 나타낼 수 있으며 데이터를 저장 및 비교 분석이 가능하다. 각 장치의 정확도로 LVDT는 93.9%, 영상분석 캠코더는 99.2%, 실시간 변위 계측 시스템인 PTZ 카메라는 99.6%로 실시간 변위 계측 시스템인 PTZ 카메라는 LVDT나 통상적으로 많이 사용되는 영상분석 캠코더보다 더 높은 정확도를 보였다. 또한 측정된 변위가 입력된 제한 값을 넘어 갈 경우 경고음을 통해 붕괴에 대한 피해를 줄일 수 있도록 개발 되었지만 영상기반 실시간 변위 계측 시스템은 조명이나 카메라와 마커의 각도에 따른 오차가 발생하기 때문에 적절한 대비책이 필요한 것으로 판단된다.

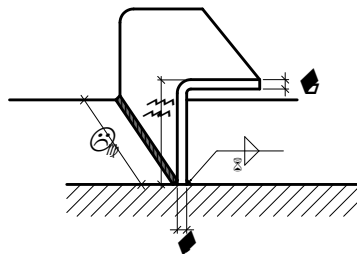
나. 피로하중에 의한 발생변위계측

(1) 실험계획

앵글 스테드 실험의 경우 콘크리트와 철골사이의 슬립이 매우 중요한 요소이다. 이를 측정하기 위해 본 연구에서는 LVDT와 패턴인식을 이용한 변위 측정 방법을 사용하였다. 그림 1은 실험체 상세도로 스테드의 형상을 나타내며, 스테드의 높이, 두께, 폭을 주요 변수로 설정하였다. 총 4개의 실험체에 대해 표 1과 같이 변수를 정하고 실험을 실시하였다. 실험체명에서 F는 스테드의 방향이 가력 방향과 같은 방향인 실험체를 나타내며, R실험체는 스테드의 방향이 반대인 실험체를 나타낸다.



(a) 실험체 도면



(b) 스테드 상세 모습

나. 그림 1. 실험체 계획

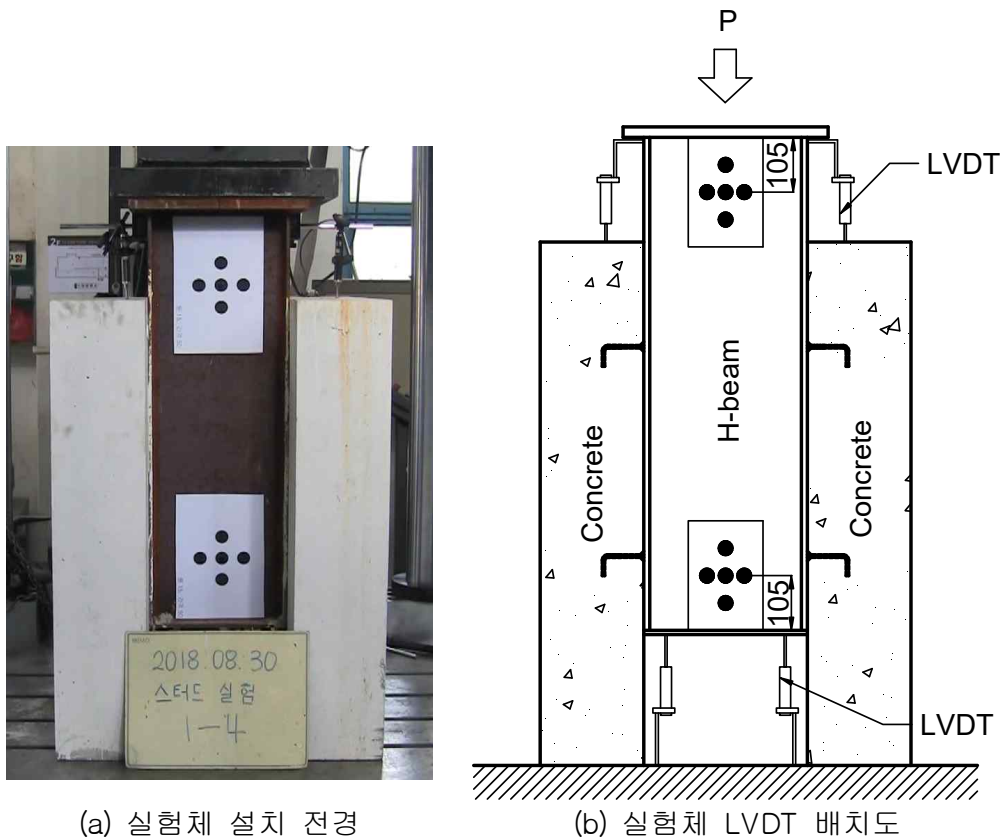
나. 표 1. 실험체 일람표

No.	Specimens	h_s	$L_c/2$	t_p
1	F-100-50-4.5	100	50	4.5
2	F-60-50-6.0	60	50	6
3	F-100-50-6.0	100	50	6
4	R-60-50-6.0	60	50	6

Note : h_s is height of stud; L_c is width of stud; t_p is thickness of stud

(2) 실험방법

실험체의 가력방법은 그림 2와 같이 3,000 kN의 만능 재료 시험기(UTM)를 사용하여 실험체 상부를 가력하였으며, 가력 속도는 0.1 mm/sec의 속도로 하였다. 실험체의 변위 측정은 그림 2(b)와 같이 상단부에 LVDT 2개와 하단부 LVDT 2개를 설치하였으며, 패턴을 통한 변위 분석을 상·하단부에 패턴을 설치하고 측정하였다. 패턴은 패턴 중심에서 철골의 상단부까지 105 mm 만큼 떨어진 위치와 패턴중심에서 철골의 하단부까지 105mm 떨어진 곳에 부착하였다. 패턴에서 원과 원 사이의 거리는 50 mm로 설정을 하였으며 이를 기준으로 변위를 측정하였다. 또한 상하 각각 패턴의 중앙부 변위를 측정하여 상하에 위치한 LVDT 변위와 각각 비교하였다.

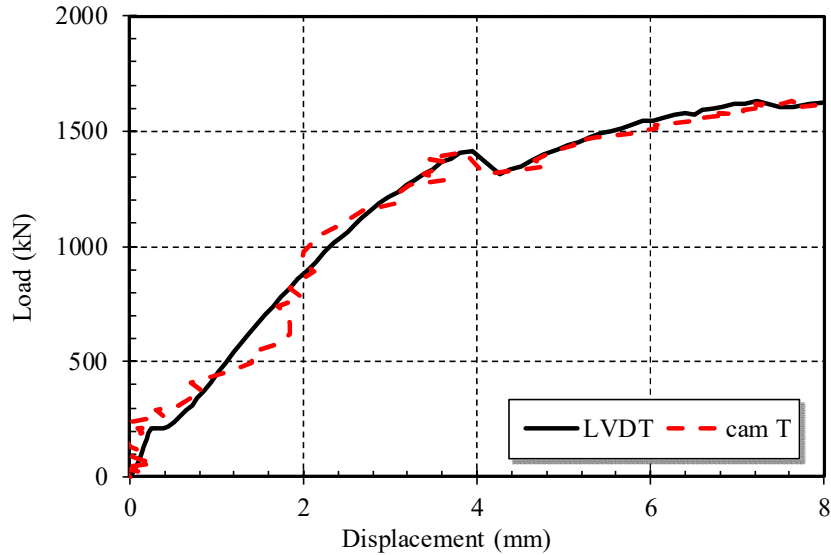


나. 그림 2. 실험체 설치 모습

(3) 실험결과

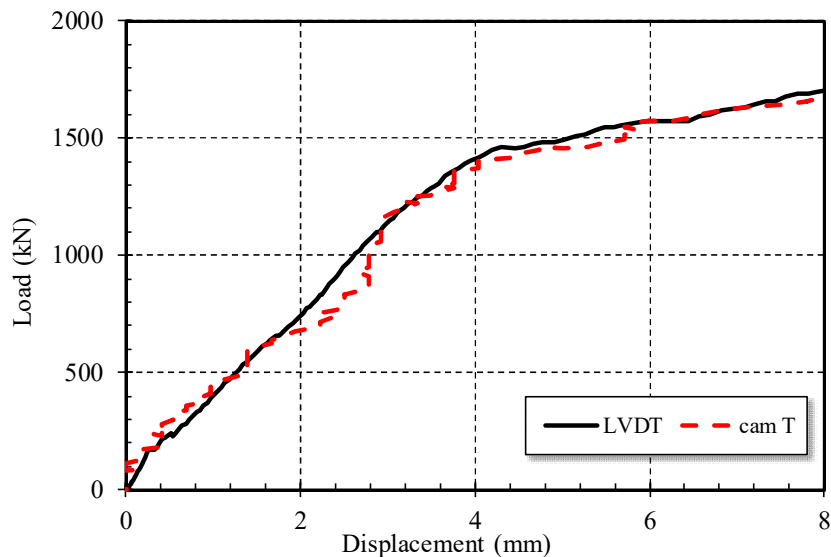
(가) 실험체 상부 변위 비교

그림 3은 F-100-50-4.5 실험체의 철골 중앙부 상단 하중-변위를 나타낸 그래프이다. 평균 오차율이 0.4%로 실험 초기의 변위 차가 크게 나타났으나 실험 중반으로 가면서 변위가 유사해짐을 확인할 수 있었으며 이때 오차는 0.02%로 확인하였다.



나. 그림 3. F-100-50-4.5 실험체 하중-변위 곡선

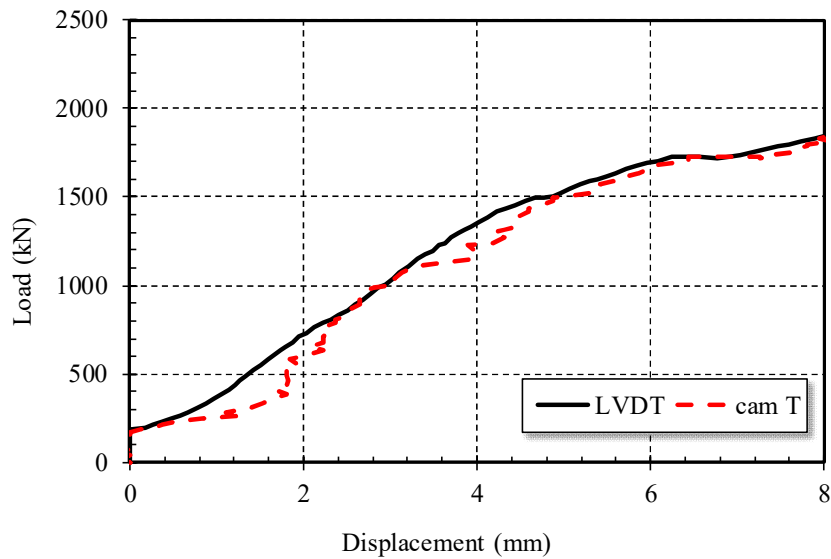
그림 4는 F-60-50-6.0 실험체의 철골 중앙부 상단 하중-변위를 나타낸 그래프이다. 평균 오차율이 0.2 %로 LVDT의 변위와 유사함을 확인하였다.



나. 그림 4. F-60-50-6.0 실험체 하중-변위 곡선

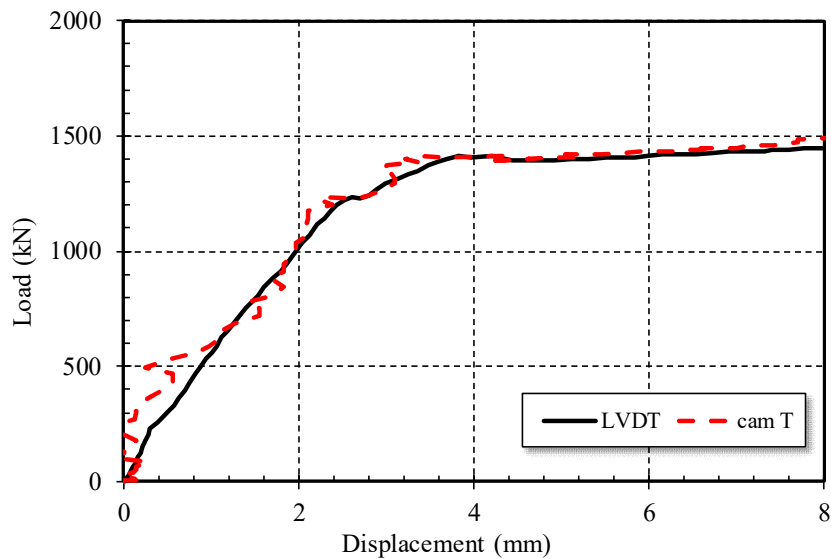
그림 5는 F-100-50-6.0 실험체 철골 중앙부 상단 하중-변위를 나타낸 그래프이다. 평균 오차율이 0.39 %로 실험 초기의 변위 차가 크게 나타났으나 실험 중반으로 가면서 변위가 유사해

짐을 확인할 수 있었으며 이때 오차는 0.01%로 확인하였다.



나. 그림 5. F-100-50-6.0 실험체 하중-변위 곡선

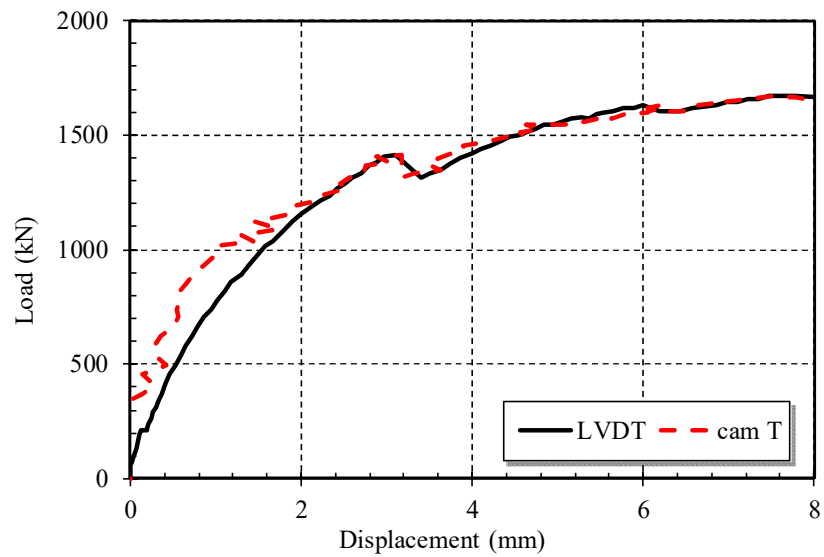
그림 6은 R-60-50-6.0 실험체 철골 중앙부 상단 하중-변위를 나타낸 그래프이다. 평균 오차율이 0.32%로 실험 초기의 변위 차가 크게 나타났으나 실험 중반으로 가면서 변위가 유사해짐을 확인할 수 있었으며 이때 오차는 1%로 확인하였다.



나. 그림 6. R-60-50-6.0 실험체 하중-변위 곡선

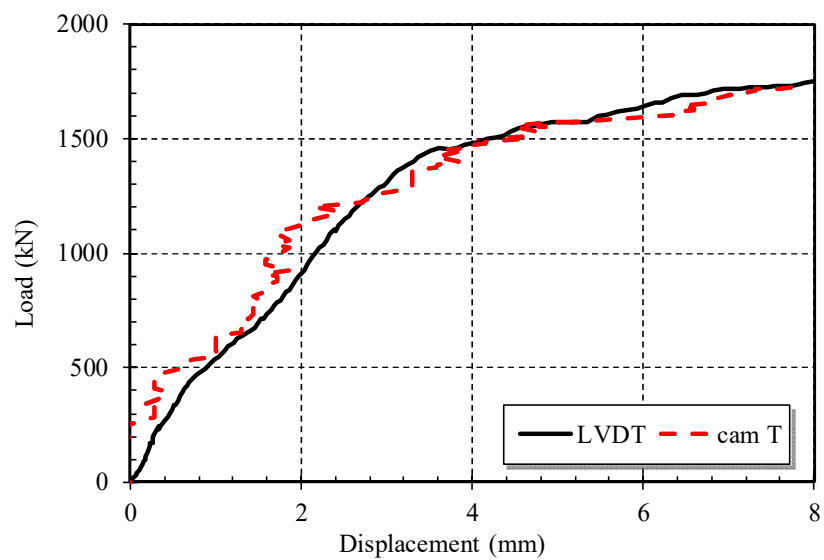
(나) 실험체 하부 변위 비교

그림 7은 F-100-50-4.5 실험체의 철골 중앙부 하단 하중-변위를 나타낸 그래프이다. 평균 오차율이 1%로 실험 초기의 변위 차가 크게 나타났으나 실험 중반으로 가면서 변위가 유사해짐을 확인할 수 있었으며 이때 오차는 0.01%로 나타났다.



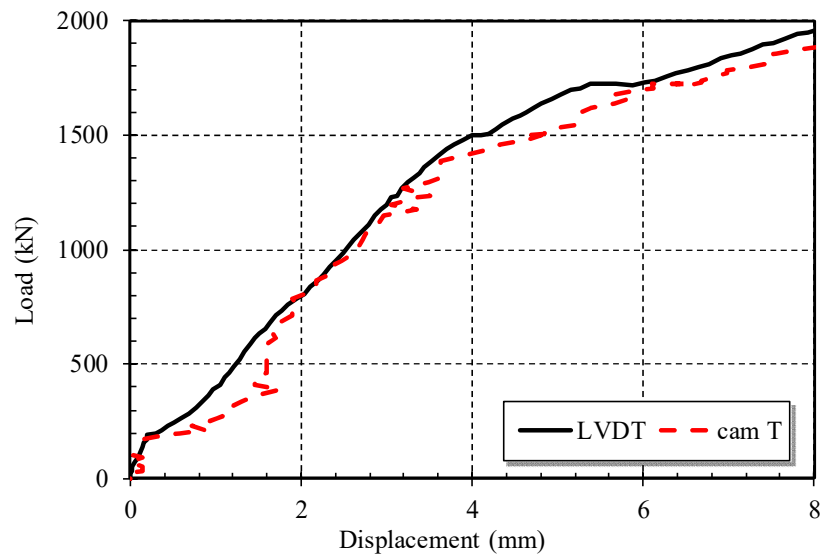
나. 그림 7. F-100-50-4.5 실험체 중앙부 하단 하중-변위 곡선

그림 8은 F-60-50-6.0 실험체의 철골 중앙부 하단 하중-변위를 나타낸 그래프이다. 평균 오차율이 0.8%로 실험 초기의 변위 차가 크게 나타났으나 실험 중반으로 가면서 변위가 유사해짐을 확인할 수 있었으며 이때 오차는 0.06%로 나타났다.



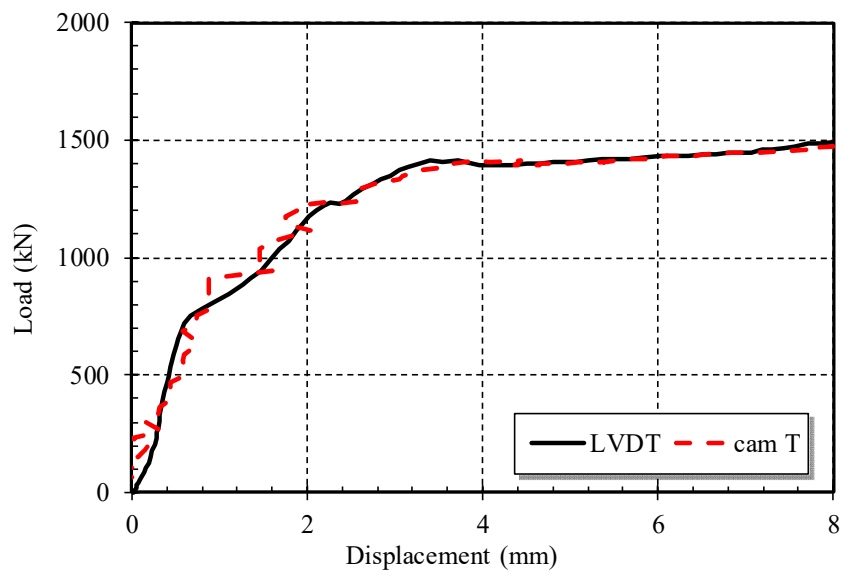
나. 그림 8. F-60-50-6.0 실험체 중앙부 하단 하중-변위 곡선

그림 9은 F-100-50-6.0 실험체의 철골 중앙부 하단 하중-변위를 나타낸 그래프이다. 평균 오차율이 0.3%로 LVDT의 변위 그래프와 거의 유사함을 확인할 수 있었다.



나. 그림 9. F-100-50-6.0 실험체 중앙부 하단 하중-변위 곡선

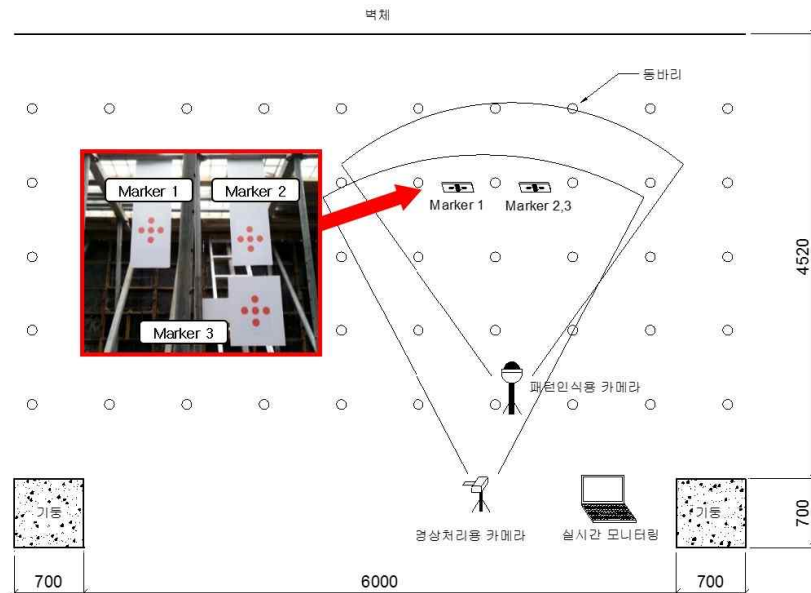
그림 10은 R-60-50-6.0 실험체의 철골 중앙부 하단 하중-변위를 나타낸 그래프이다. 평균 오차율이 0.37%로 실험 초기의 변위 차가 크게 나타났으나 실험 중반으로 가면서 변위가 유사해짐을 확인할 수 있었으며 이때 오차는 0.2%로 나타났다.



나. 그림 10. R-60-50-6.0 실험체 중앙부 상단 하중-변위 곡선

다. 슬라브 타설 현장 영상기반 실시간 다중 변위계측

구조물의 실시간 모니터링의 웹기반 시스템 구축을 위해 현장에서 패턴인식을 통한 실시간 모니터링의 실험을 수행하였다. 실험은 2층 바닥 슬래브의 콘크리트가 타설됨에 따라 슬래브에 발생하는 처짐량을 패턴인식 카메라를 통해 실시간으로 모니터링 및 저장하였다. 그림 1은 현장에서의 패턴인식 실험 배치도 및 Marker의 부착번호를 나타낸다. Marker 1,2의 경우 콘크리트가 타설될 슬래브 아래에 부착하였고 Marker 3의 경우 슬래브 거푸집을 지지하고 있는 동바리에 부착하였다.



다. 그림 1. 공사현장에서의 슬래브 처짐 측정을 위한 패턴인식시스템 설치도

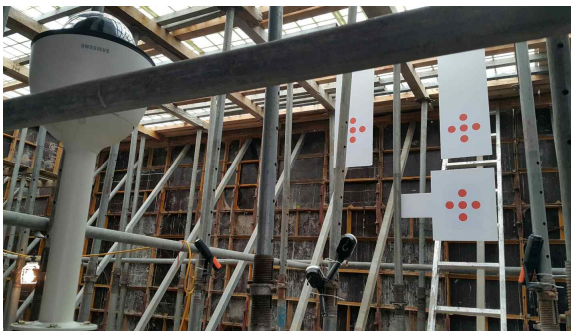
그림 2(a)는 슬래브 콘크리트 타설을 진행하는 모습을 나타내며, 그림 2(b)는 영상장비를 이용해 패턴의 움직임을 동영상으로 촬영하는 모습을 나타낸다. 그림 2(c)는 패턴인식용 카메라를 이용해 패턴의 모습을 실시간으로 촬영하는 것을 나타내며, 그림 2(d)는 패턴인식 프로그램을 이용하여 실시간 변위를 측정하여 모니터링 하는 모습을 나타낸다.



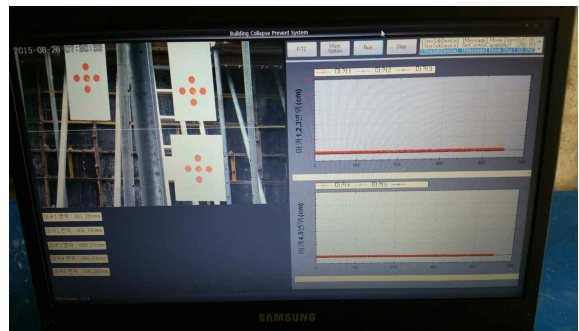
(a) 2층 바닥 슬래브 타설



(b) 동영상 촬영



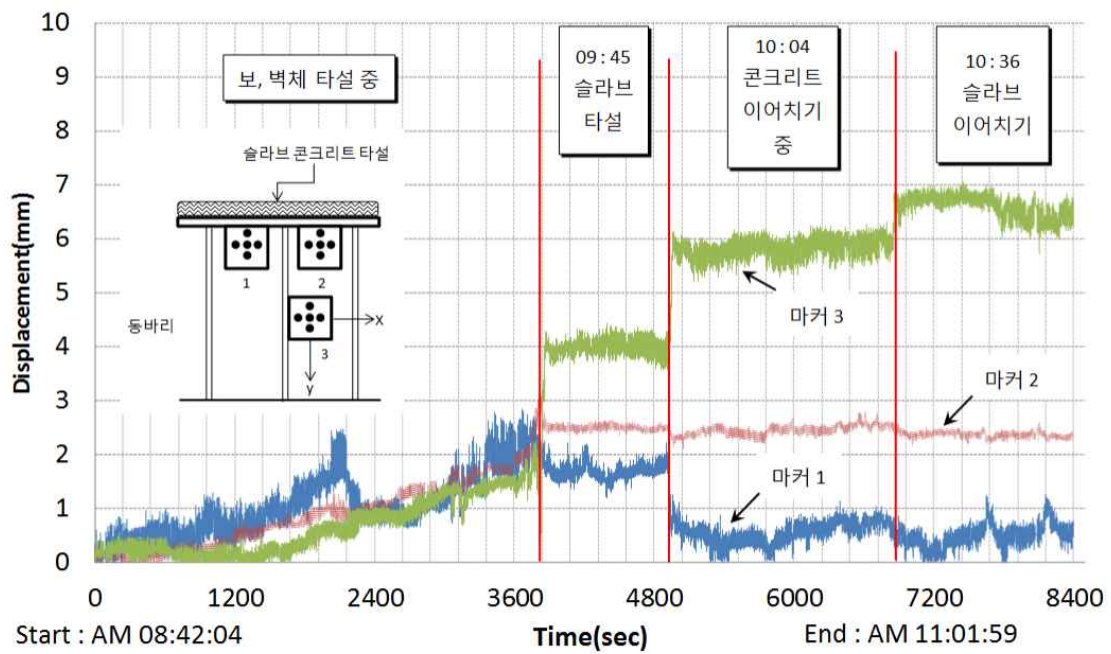
(c) 패턴인식용 카메라 촬영



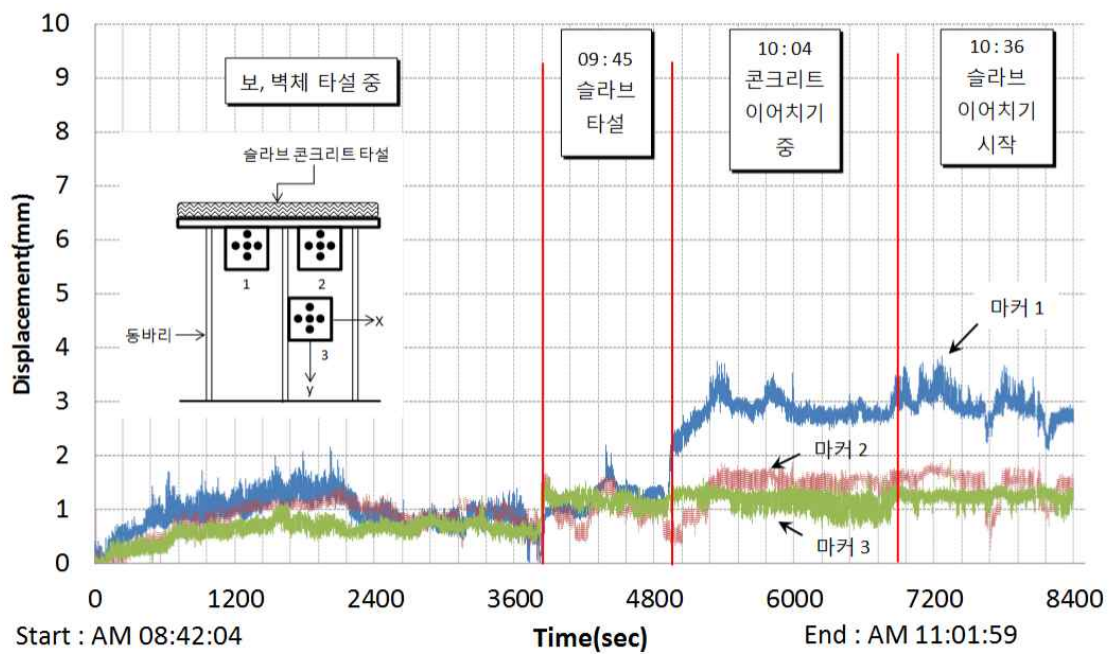
(d) 패턴인식 프로그램 실시간 변위 측정

다. 그림 2. 현장에서의 패턴인식 기술을 이용한 처짐량 측정 실험

그림 3 및 그림 4는 패턴인식 프로그램으로 측정된 Marker 1~3의 시간에 따른 수평 및 수직 변위를 나타낸다. 현장에서 실제 타설 시간에 맞춰 실험을 진행하다보니 실제 실험하고자 하는 슬래브만 타설하는 것이 아니라 그 주변 보와 벽체 타설이 먼저 이루어져 그림과 같이 구간을 나누어 그래프를 표현하였다. 콘크리트 타설의 순서는 측정 대상인 Marker 주변의 벽체와 보를 우선으로 하였고, 2층 바닥 슬래브의 순으로 시공되었다. 측정 시작인 08:42분에서 09:45분까지 벽체가 보를 타설하여 Marker 1,2,3에서 약 1.5mm~2mm의 수평 변위가 발생하였고, 약 1mm의 수직 변위가 발생하였다. 2층 바닥 슬래브 타설에 따라 Marker 1에서 약 2mm의 수평변위가 발생하였고, Marker 2에서 약 2.5mm의 수평변위가 발생하였으며 Marker 3에서 약 4mm의 수평변위가 발생하였다. 수직변위는 Marker 1,2,3에서 약 1mm~1.5mm 발생하였다. 슬래브 거푸집에 부착된 Marker 1의 최종 수평 변위는 약 0.5mm로 거의 변화가 없었으며, 수직변위는 약 3mm 정도로 나타났다. Marker 2의 최종 수평 변위는 약 2mm로 나타났으며, 수직 변위는 1.5mm로 나타났다. 동바리에 부착된 Marker 3의 최종 수평 변위는 약 7mm 정도로 나타났으며 수직 변위는 약 1mm로 나타났다.



다. 그림 3. 실시간 모니터링 데이터를 통한 수평 변위 그래프



다. 그림 4. 실시간 모니터링 데이터를 통한 수직 변위 그래프

라. 진동대 실험을 통한 다자유도 구조물의 영상기반 동특성 식별

(1) 서론

영상기반 동적변위계측에 관한 선행 연구들은 교량이나 모형 구조물 등 특정된 대상으로 수행되었기 때문에 추정된 동특성 범위가 한정적이다. Shin et al.은 다양한 진동수와 가동변위 케이스의 진동대 실험을 통해 영상기반 동적변위계측 시스템의 신뢰성을 검증하여 이와 같은 대상 범위의 한계를 극복하고자 하였다. 이러한 영상기반 동적변위계측 시스템의 신뢰성 검증을 바탕으로 실제 현장에 적용하고자 하며, 실제 구조물 동특성 식별에 적용하기에 앞서 모형구조물을 통한 동특성 식별 성능 검증이 요구된다.

본 연구에서는 동특성 식별 성능 검증을 위해 다자유도 구조물을 대상으로 한 영상기반 동특성 식별을 수행하고자 한다. 보다 폭넓은 구조물의 고유진동수 대역에 대한 적용성 검증을 위해 15 케이스의 모형건물을 제작하여 실험에 활용하였다. 진동대를 통해 백색잡음 실험과 모드 고유진동수 가진 후 자유진동 실험을 수행하여 계측결과를 통한 동특성 식별을 수행하였으며, 영상기반 계측을 통한 동특성 추정의 정확도는 LDS와 가속도계를 통해 추정된 동특성과의 비교를 통해 판단하고자 하였다.

(2) 실험 계획

(가) 실험 개요

본 연구에서 사용한 대상 구조물은 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 0.02\text{ m}$ 의 알루미늄합금 질량체와 폭 50 mm의 철제 기둥으로 구성되며, 기둥의 두께를 폭에 비해 매우 얇게 제작하여 가진 시 전체 구조물의 약축 방향 거동을 유도하였다. 대상 구조물은 1/2/3층, 3종류의 층으로 구성되었으며, 각 층 구조물마다 기둥의 두께를 1.5/2.0/3.0/4.5/6.0 mm, 5 종류로 구분하여 총 15 케이스의 대상 구조물을 설정하였다.

동적변위를 입력하여 이에 따른 대상 구조물의 응답거동을 계측하고자 하였으며, 이를 위해 진동대를 이용해 백색잡음 및 각 모드별 고유진동수의 Sine wave를 가진 하였다. 본 실험에 앞서 대상 구조물들에 가속도계를 설치한 후 백색잡음 실험을 미리 수행하여 가속도 값을 얻었으며, 계측 가속도 값의 FFT를 통해 각 모형구조물의 모드별 고유진동수를 구하였다. 각 모드별 고유진동수의 Sine wave 가진을 통해 구조물의 모드형상별 운동을 구현하고자 하였으며, 공진에 의한 변위증폭으로 적정변위 도달 후 가진을 중지하여 자유진동 운동을 유도하였다. 본 실험에서 설정한 15케이스의 구조물은 1차모드 고유진동수 기준으로 0.454~8.115 Hz까지 분포하며, 3차모드 고유진동수까지 고려하였을 때 최대 13.410 Hz까지 분포하여 계측 대상의 동특성이 다양하게 분포되어 있음을 알 수 있다.

(나) 계측 시스템

본 실험에서는 향후 현장 적용성을 고려하여 상용카메라 수준의 영상장비를 선정하였다. 실험에 사용된 영상장비로 상용 캠코더인 Sony 사의 FDR-AXP55을 선택하였으며, 최대해상도는 3840×2160 이다. 동특성 추정을 위해 가능한 높은 프레임 모드가 요구되었기 때문에, 본 실험에서는 해당 캠코더의 초당 최대 프레임 수인 60 fps(frame for second)를 선택하였다. 그러나 기계적 한계로 인해 실제 영상 수집은 59.84 Hz의 샘플링 주파수로 이루어졌으며, 60 fps 모드에서 지원되는 캠코더의 해상도는 1920×1080 이다.

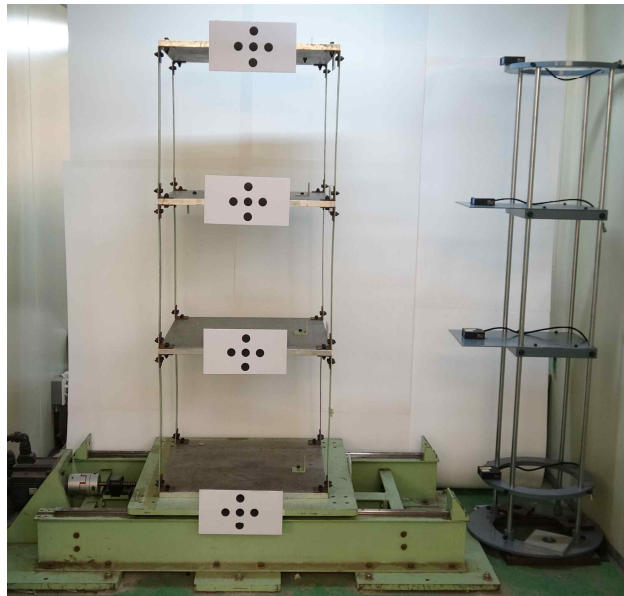
진동대 테이블을 포함한 구조물 각 층 변위를 나타낼 타겟을 부착하여 실험을 수행하였으며, 타겟은 간격 50mm로 십자배치된 지름 30mm의 원이다. 캠코더와 타겟 간의 거리는

2.5 m이며, 수집 영상 데이터의 시간동기화를 위하여 최대 4개의 타겟을 한 카메라로 동시 계측하였다. 한 대의 카메라로 다수의 타겟을 동시 계측하는 방식은 각 타겟 당 한 대의 카메라를 할당하여 계측하는 방식보다 영상분석을 위한 이미지의 해상도는 저하될 것으로 예상되나, 앞서 언급한 바와 같이 수집 데이터의 시간동기화를 통해 분석을 용이하게 하고자 하였고, 저하된 해상도는 신승훈 등의 연구(24)를 참조하여 영상화소 확대를 통해 극복하고자 하였다. 영상이미지의 변위 추출을 위한 영상분석 기법 또한 신승훈 등의 연구를 참조하였다.

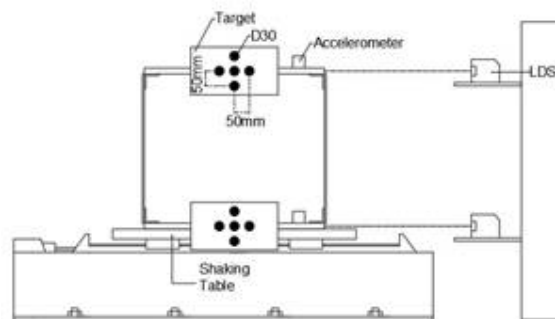
영상기반 변위계측 시스템의 정확도 분석을 위해, 각 층마다 가속도계 및 LDS를 추가로 설치하고 계측을 수행하여 결과를 비교하고자 하였다. 가속도계는 Metra Mess-und Frequenztechnik 사의 KB 12VD이고, 레이저 센서는 KAIS 사의 KL3-W400이다. 가속도계는 각 층의 알루미늄 질량체 위에 지그를 결합하고 볼트로 고정시켜 설치하였으며, LDS는 계측 대상 구조물 옆에 센서 거치용 지그를 세워 각 층의 타겟과 동일한 높이를 계측하도록 설치하였다. 가속도계를 통한 계측결과로 동특성 식별 결과를 비교하고, LDS를 통한 계측 결과로 동적변위계측 정확도와 동특성 식별 결과를 비교하고자 하였다. 가속도계와 LDS는 각각 1651.6 Hz와 1000 Hz의 샘플링 주파수로 계측 데이터를 수집하였다. 실험에 사용한 계측 시스템 구성요소의 상세 제원은 표 1에 표기하였다. 그림 1은 기동 두께 3.0 mm일 때의 3층 구조물 실험체 전경이며, 그림 2는 대상 실험체 구성과 타겟 및 센서 설치 위치 등을 표기한 실험 개요를 나타낸다.

라. 표 1. 동적 계측 시스템

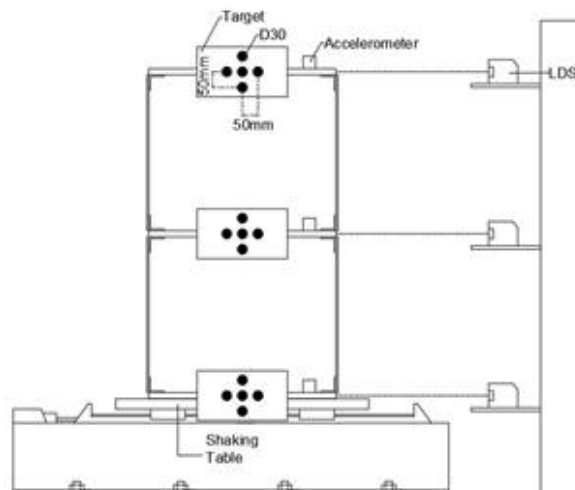
Component	Model	Technical specifications
Camcorder	 FDR-AXP55	Maximum resolution 1920 x 1080 (60 fps) 3840 x 2160 (30 fps)
LDS	 KL3-W400	Measurement distance 500 mm Measurable range ± 200 mm Optical mode Diffuse reflection Resolution 10 μ m
Accelerometer	 KB 12VD	Voltage Sensibility 10,000± 10 % mV/g Range ± 0.6 g Transverse Sensitivity < 5 %



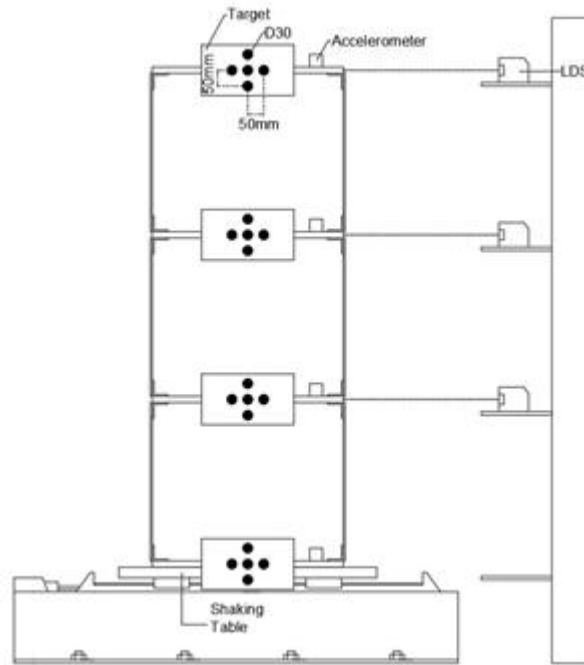
라. 그림 1. 3mm 두께 기둥으로 이루어진 3층 구조물 및 계측 장비



(a) 1층 구조물



(b) 2층 구조물

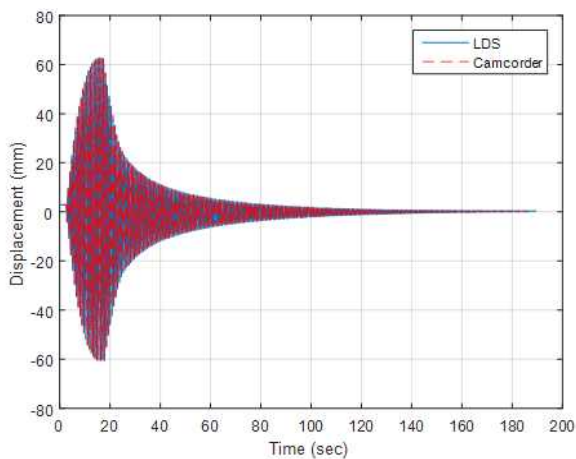


(c) 3층 구조물
라. 그림 2. 구조물 모델

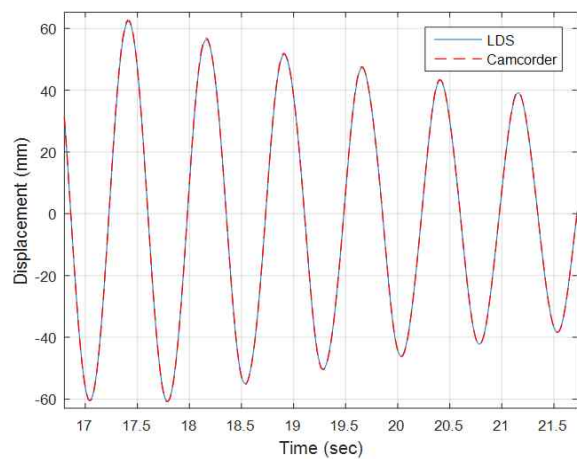
(3) 계측결과 분석

(가) 계측결과

시간 영역에서의 변위계측은 LDS와 캠코더 두 가지 센서로 진행하였다. 실험계획에서 전술 한 바와 같이 백색잡음 가진 실험과 모드별 고유진동수로 가진 후 자유진동 실험을 수행하였다. 자유진동 실험을 통해 LDS와 캠코더의 동적변위 계측결과를 비교하였고, 백색잡음 실험을 통해서도 동적변위 계측결과 및 진동수 영역에서의 비교에 활용하고자 하였다.



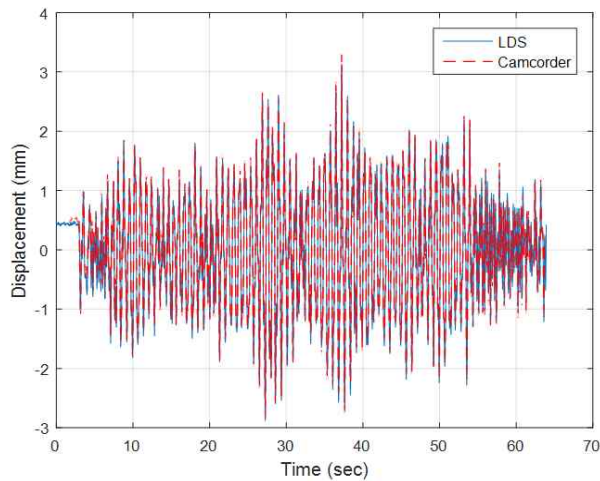
(a) 자유진동 시 최상층 변위



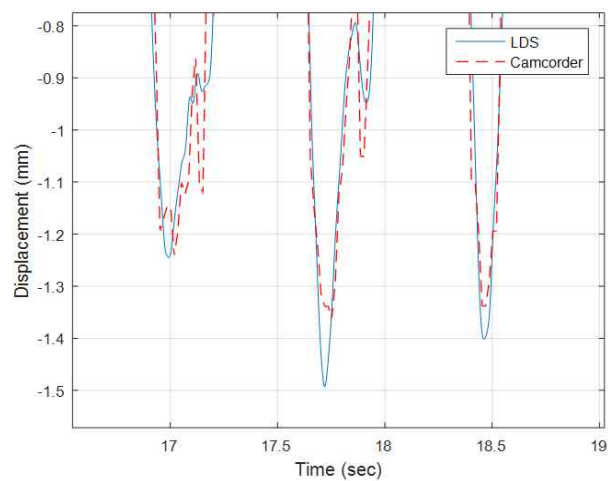
(b) 확대 그래프

라. 그림 3. 자유진동 시 측정된 시간이력 곡선 (3mm 두께 기둥으로 이루어진 3층 구조물)

그림 3은 기동 두께 3.0 mm일 때의 3층 구조물 실험체의 자유진동 계측 결과를 나타낸다. 그림 3(b)에서도 보이듯 LDS와 캠코더에 의한 자유진동 계측은 상당히 유사한 결과를 나타냈다. 그림 4와 같이 백색잡음 가진 시에도 전체적인 거동은 두 센서가 모두 유사하게 계측되었으나, 그림 4(b)에서 보이듯 캠코더에 의한 계측은 피크 부위에서 동적거동을 다소 놓치는 현상이 발견되었다. 이러한 현상은 상대적으로 낮은 캠코더의 샘플링 주파수로 인해 발생하는 한계로 판단된다.



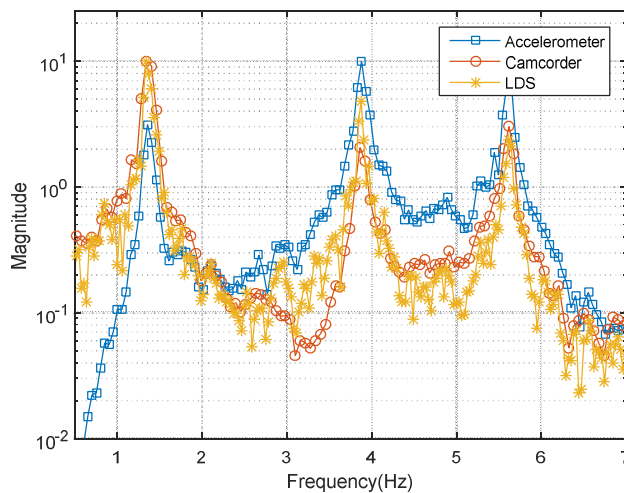
(a) 백색가진 시 최상층 변위



(b) 확대 그래프

라. 그림 4. 백색가진 시 측정된 시간이력 곡선 (3mm 두께 기동으로 이루어진 3층 구조물)

진동수 영역에서의 비교를 위해 그림 4에 나타난 백색가진 실험 계측변위 데이터의 PSD(Power Spectral Density)함수를 구하였으며, 가속도계를 통해 계측한 가속도값의 PSD함수도 함께 구하여 결과를 비교하고자 하였다. 그림 5는 동일 구조물의 세 가지 센서에 의한 진동수 영역 계측결과이다. 비교결과 계측 센서에 따라 PSD함수의 분포형상에서 다소 차이를 보였으나, 모든 센서로 부터의 계측 고유진동수가 거의 일치하였음을 알 수 있다.



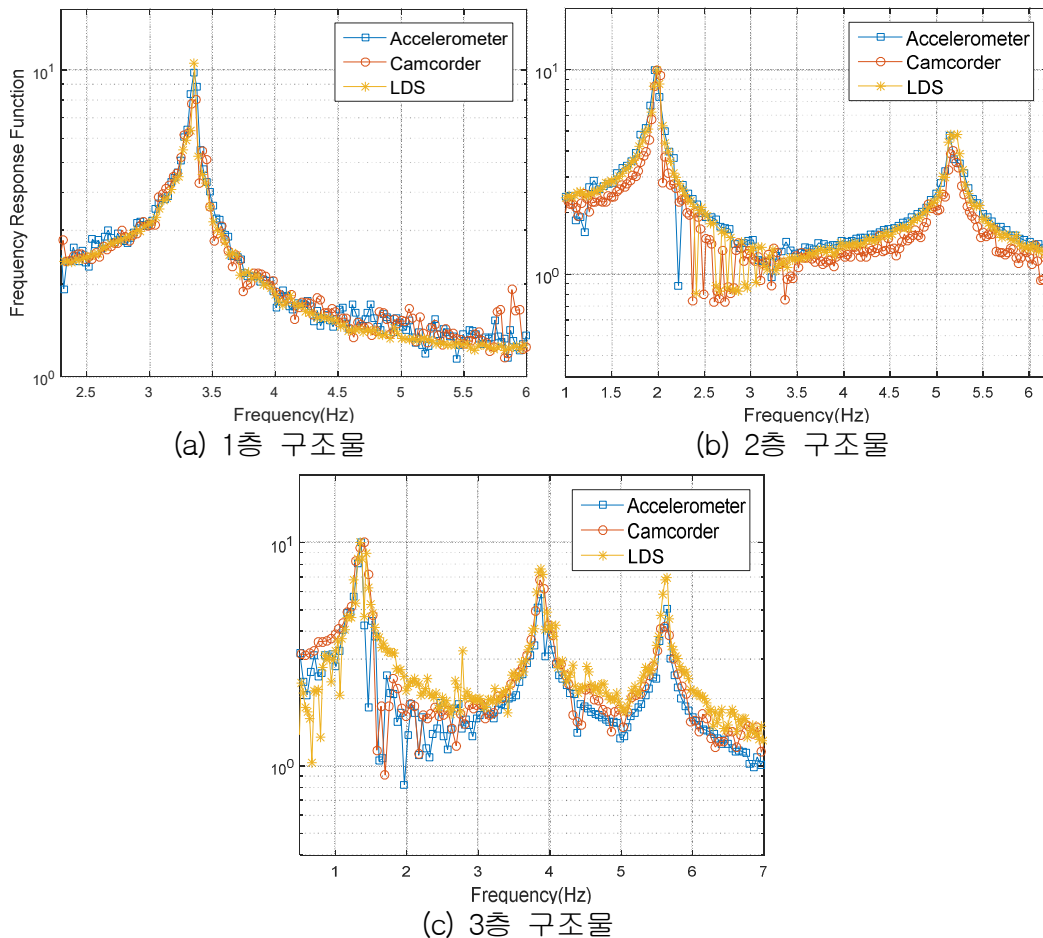
라. 그림 5. 백색가진 시 최상층의 PSD (3mm 두께 기동으로 이루어진 3층 구조물)

(나) 동특성 식별

계측된 백색잡음 가진 실험결과 데이터를 활용하여 15개 케이스에 대한 동특성 식별을 수행하였다. 동특성 식별 및 결과 비교는 모드 고유진동수, 모드 감쇠비 및 모드형상에 대해 이루어졌다. 동특성 식별을 위해 세 가지 센서의 계측 데이터로부터 그림 6과 같이 FRF(Frequency Response Function)를 계산하였으며, 계산된 FRF로부터 15개 케이스의 모드 고유진동수를 추정하였다. 또한 모드 감쇠비는 계산된 FRF의 피크의 폭을 이용한 Half-power bandwidth를 통해 추정하였으며, FRF의 Imaginary part의 피크 값으로부터 모드형상을 추정하였다.

추정된 모드 고유진동수 및 모드 감쇠비는 표 2와 3-3에 나타나있다. 모드별 고유진동수 추정 결과, 모든 센서로부터의 결과에서 전체적으로 유사한 추정 값을 나타내었다. 특히 캠코더 계측을 통한 추정결과의 경우, 최대 3.23%의 오차를 나타냈으며, 전체적으로 $\pm 1\%$ 미만의 낮은 오차를 보였다. 또한 59.84 Hz의 샘플링 주파수로 인해 Nyquist frequency가 30 Hz 미만임에도 불구하고, 가장 높은 고유진동수인 기동두께 3 mm인 3층 구조물의 3차모드 고유진동수를 가속도계 기준 -0.45 %의 낮은 오차로 식별해냈다.

모드 감쇠비의 추정은 기동두께에 따라 모형구조물의 강성이 커질수록 감쇠비가 커지는 경향을 보였으며, 이러한 경향은 세 가지 센서를 통한 결과에 전체적으로 동일하게 나타났다. 다만 고유진동수 추정 결과에 비해서는 가속도계 기준 추정 오차가 크게 나타났으며, 캠코더 계측을 통한 추정결과의 경우 -14.95~142.76 %의 오차범위를 보였다. 그러나 LDS 계측을 통한 추정결과의 경우 -68.93~125.15 %의 오차범위를 가졌음을 고려할 때, 캠코더 계측을 통한 모드 감쇠비 추정결과가 충분히 유효하다고 판단된다.



라. 그림 6. 백색가진 시 최상층의 FRF (3mm 두께 기동으로 이루어진 3층 구조물)

라. 표 2. 모드 진동수 측정 데이터 (Hz)

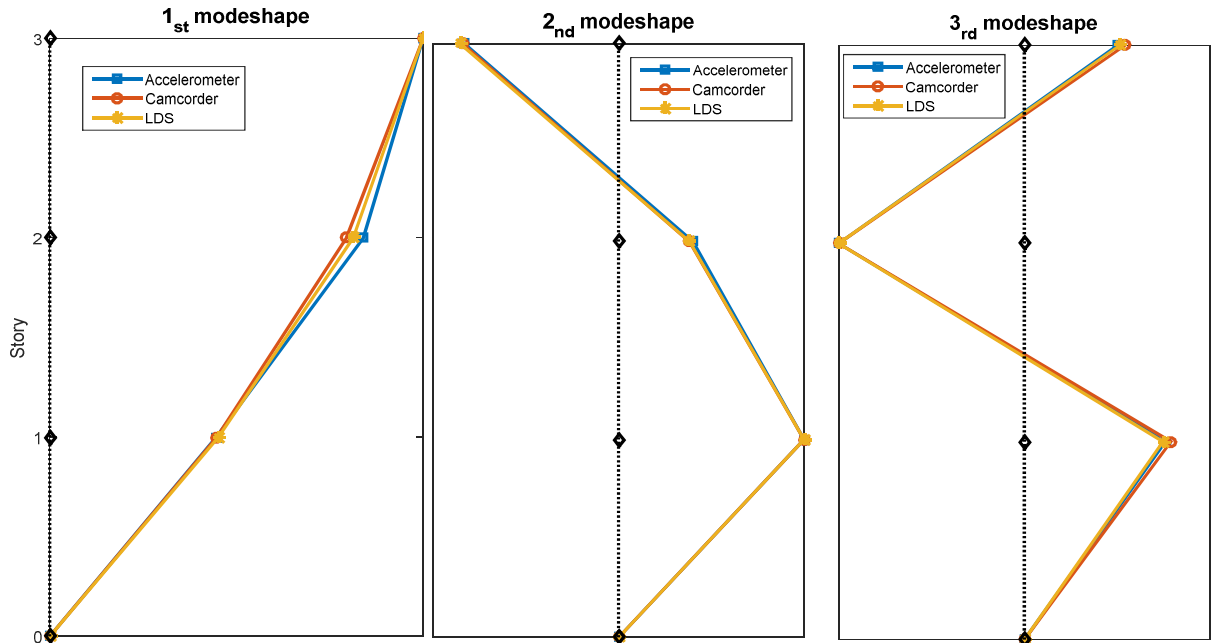
Column Thick. (mm)	Story of structure	Mode	Acc.	LDS	Camcorder
1.5	1	1st	1.462	1.434 (-1.92%)	1.463 (0.07%)
	2	1st	0.756	0.732 (-3.12%)	0.761 (0.66%)
		2nd	2.243	2.258 (0.67%)	2.224 (-0.85%)
	3	1st	0.454	0.427 (-5.82%)	0.439 (-3.22%)
		2nd	1.411	1.434 (1.63%)	1.434 (1.63%)
		3rd	2.218	2.228 (0.45%)	2.195 (-1.04%)
2.0	1	1st	1.890	1.892 (0.11%)	1.873 (-0.90%)
	2	1st	1.084	1.099 (1.38%)	1.054 (-2.77%)
		2nd	2.974	2.991 (0.57%)	2.985 (1.38%)
	3	1st	0.706	0.702 (-0.52%)	0.702 (-0.45%)
		2nd	2.218	2.197 (-0.95%)	2.195 (-1.04%)
		3rd	3.377	3.357 (-0.59%)	3.366 (-0.33%)
3.0	1	1st	3.352	3.357 (0.15%)	3.366 (0.42%)
	2	1st	1.966	1.984 (0.92%)	1.990 (1.22%)
		2nd	5.141	5.157 (0.31%)	5.180 (0.76%)
	3	1st	1.361	1.343 (-1.32%)	1.405 (3.23%)
		2nd	3.881	3.876 (-0.13%)	3.863 (-0.46%)
		3rd	5.645	5.646 (0.02%)	5.619 (-0.46%)
4.5	1	1st	4.965	4.974 (0.18%)	4.975 (0.20%)
	2	1st	3.024	3.052 (0.93%)	3.044 (0.66%)
		2nd	8.367	8.423 (0.67%)	8.429 (0.74%)
	3	1st	2.218	2.197 (-0.95%)	2.224 (0.27%)
		2nd	6.452	6.409 (-0.67%)	6.439 (-0.20%)
		3rd	9.375	9.399 (0.26%)	9.424 (0.52%)
6.0	1	1st	8.115	8.057 (0.71%)	8.078 (0.46%)
	2	1st	4.435	4.456 (0.47%)	4.449 (0.32%)
		2nd	12.150	12.080(-0.58%)	12.180 (0.25%)
	3	1st	3.226	3.174 (-1.61%)	3.219 (-0.22%)
		2nd	8.972	8.972 (0.00%)	8.897 (-0.84%)
		3rd	13.410	13.370(-0.30%)	13.350(-0.45%)

() is errors compared with data from accelerometer

라. 표 3. 모드 감쇠비 측정 데이터 (%)

Column Thick. (mm)	Story of structure	Mode	Acc.	LDS	Camcorder
1.5	1	1st	1.52	1.56 (2.18%)	1.66 (8.91%)
	2	1st	6.45	5.67 (-12.08%)	8.94 (38.57%)
		2nd	1.02	2.15 (110.82%)	2.47 (142.76%)
	3	1st	12.36	19.60 (6.51%)	14.57 (17.92%)
		2nd	3.92	3.02 (-22.84%)	4.14 (5.69%)
		3rd	2.73	3.03 (10.95%)	2.71 (-0.76%)
2.0	1	1st	1.28	2.31 (84.48%)	1.60 (25.76%)
	2	1st	1.85	4.16 (125.15%)	2.02 (8.97%)
		2nd	1.38	2.40 (74.32%)	1.18 (-14.53%)
	3	1st	5.10	4.88 (-4.36%)	5.77 (13.01%)
		2nd	2.18	2.89 (32.73%)	2.63 (20.69%)
		3rd	1.67	1.59 (-4.68%)	1.94 (16.40%)
3.0	1	1st	0.65	0.60 (-7.48%)	1.48 (127.72%)
	2	1st	2.49	2.34 (-5.87%)	2.45 (-1.51%)
		2nd	1.34	1.60 (19.38%)	1.48 (10.42%)
	3	1st	3.20	3.19 (-0.29%)	4.37 (36.80%)
		2nd	0.97	1.53 (58.18%)	1.35 (39.61%)
		3rd	0.95	1.00 (5.98%)	0.88 (-7.07%)
4.5	1	1st	1.21	1.27 (4.98%)	1.77 (45.90%)
	2	1st	3.33	2.41 (-27.66%)	2.84 (-14.95%)
		2nd	0.96	0.56 (-41.70%)	1.09 (12.93%)
	3	1st	3.57	3.05 (-14.41%)	3.50 (-1.91%)
		2nd	1.33	1.05 (-21.00%)	1.40 (5.64%)
		3rd	0.87	1.02 (17.72%)	0.88 (0.89%)
6.0	1	1st	1.33	0.45 (-66.09%)	1.26 (-4.89%)
	2	1st	1.25	0.94 (-25.07%)	1.66 (32.02%)
		2nd	0.54	0.88 (63.30%)	0.72 (32.35%)
	3	1st	3.60	3.88 (7.57%)	3.42 (-4.99%)
		2nd	1.40	0.44 (-68.93%)	1.29 (-7.75%)
		3rd	0.67	0.73 (8.24%)	0.74 (10.28%)

() is errors compared with data from accelerometer



라. 그림 7. 모드 형상 (3mm 두께 기둥으로 이루어진 3층 구조물)

모드형상 추정 결과 세 가지 센서 모두 1,2,3차 모드형상 추정에서 매우 유사한 결과를 보였다. 추정 결과는 가속도계를 기준으로 한 MAC(Modal Assurance Criterion) value를 통해 비교하였으며, 표 4에는 LDS와 캠코더를 통한 모드형상 추정 값의 평균 MAC value를 나타냈으며, 가속도계 계측 데이터를 통한 모드형상과 비교하였을 때, LDS를 통한 추정 결과가 최소 0.9996, 캠코더를 통한 추정 결과가 최소 0.9992의 MAC value를 가지며 높은 유사성을 보였다. 그림 7에는 기둥두께 3mm, 3층 구조물의 모드형상 추정 결과를 대표로 나타내었다.

$$MAC_{AB}^{(i)} = \frac{\left| \{\Psi_A^{(i)}\}^T \{\Psi_B^{(i)}\} \right|^2}{\left(\{\Psi_A^{(i)}\}^T \{\Psi_A^{(i)}\} \right) \left(\{\Psi_B^{(i)}\}^T \{\Psi_B^{(i)}\} \right)} \quad (1)$$

여기서 $\{\Psi_A^{(i)}\}$ 와 $\{\Psi_B^{(i)}\}$ 는 각각 가속도계와 나머지 2가지 계측 센서에 의한 i 번째 모드형상이다.

라. 표 4. 모드형상 추정 값의 평균 MAC value

Mode	LDS	Camcorder
1st	0.9997	0.9993
2nd	0.9996	0.9997
3rd	0.9998	0.9992

(4) 결론

영상기반 동적변위계측 시스템의 신뢰성 검증을 바탕으로 실제 현장에 적용하고자 하며, 이를 위해서는 실제 구조물 동특성 식별에 적용하기에 앞서 모형구조물을 대상으로 한 동특성 식별에 대한 검증이 요구된다. 본 연구에서는 동특성 식별 성능 검증을 위해 다자유도 구조물을 대상으로 한 영상기반 동특성 식별을 수행하고자 한다. 본 연구에서는 신승훈 등의 연구에서 수행한 신뢰성 검증을 바탕으로 폭넓은 동특성 범위의 다자유도 구조물을 대상으로 한 영상기반 동특성 식별을 수행하고자 하였다.

진동대를 통해 백색잡음 실험과 모드 고유진동수 가진 후 자유진동 실험을 수행하였으며, LDS와 가속도계를 통해 추정된 동특성과의 비교를 통해 추정 정확도를 판단하였다. 계측결과 시간 영역과 진동수 영역 모두에서 캠코더를 통한 영상기반 계측방법은 기존의 LDS, 가속도계와 매우 유사한 결과를 나타냈다.

동특성 식별 및 결과 비교는 모드 고유진동수, 모드 감쇠비 및 모드형상에 대해 이루어졌다. 동특성 식별을 위해 세 가지 센서의 계측 데이터로부터 FRF를 계산하였으며, 계산된 FRF로부터 15개 케이스의 모드 고유진동수를 추정하였다. 또한 모드 감쇠비는 계산된 FRF의 피크의 폭을 이용한 Half-power bandwidth를 통해 추정하였으며, FRF의 Imaginary part의 피크 값으로부터 모드형상을 추정하였다. 모드별 고유진동수 추정 결과, 모든 센서로부터의 결과에서 전체적으로 유사한 추정 값을 나타내었다. 특히 캠코더 계측을 통한 추정결과와 비교한 경우, 최대 3.23%의 오차를 나타냈으며, 전체적으로 $\pm 1\%$ 미만의 낮은 오차를 보였다. 또한 59.84 Hz의 샘플링 주파수로 인해 Nyquist frequency가 30 Hz 미만임에도 불구하고, 가장 높은 고유진동수인 기둥두께 3 mm인 3층 구조물의 3차모드 고유진동수를 가속도계 기준 -0.45 %의 낮은 오차로 식별해냈다.

모드 감쇠비의 추정은 기둥두께에 따라 모형구조물의 강성이 커질수록 감쇠비가 커지는 경향을 보였으며, 이러한 경향은 세 가지 센서를 통한 결과에 전체적으로 동일하게 나타났다. 다만 고유진동수 추정 결과에 비해서는 가속도계 기준 추정 오차가 크게 나타났으며, 캠코더 계측을 통한 추정결과와 비교한 경우 -14.38~140.70 %의 오차범위를 보였다. 그러나 LDS 계측을 통한 추정결과와 비교한 경우 -68.64~124.94 %의 오차범위를 가졌음을 고려할 때, 캠코더 계측을 통한 모드 감쇠비 추정결과가 충분히 유효하다고 판단된다. 또한 가속도계 계측 데이터로 추정한 모드형상과 비교하였을 때, LDS를 통한 추정 결과가 최소 0.9996, 캠코더를 통한 추정 결과가 최소 0.9992의 MAC value를 가지며 높은 유사성을 보였다.

마. 표적 촬영 각도에 따른 영상기반 변위계측 결과 비교

(1) 서론

영상기반 변위계측의 실제 현장 적용 시 주요 고려 사항 중 하나는 영상장비의 설치 위치이며, 다양한 현장 조건에 의한 영상장비 설치 위치에 따라, 수집되는 영상에는 촬영 각도에 의한 영상 왜곡이 발생할 수 있다. 왜곡된 영상 내에서 발생하는 변위는 실제 변위를 표현하지 못할 가능성이 매우 높으며, 이를 해소하기 위해 Lee et al.은 평면 호모그래피 행렬을 활용함으로써 이미지와 실제 변위 간의 일대일 대응을 구현하는 등 촬영 각도에 따라 왜곡되는 영상추출 변위를 보정하고자 하는 별도의 연구가 수행되었다.

그러나 왜곡영상 보정에 관한 선행연구는 교량의 처짐과 같은 1축 변위 계측시스템에 대해서만 다루어 적용범위가 제한적이다. 본 연구에서는 수집영상의 매 프레임 MPC(mm/pixel coefficient) 업데이트를 통해 축 방향과 상관없이 왜곡영상에 따른 변위를 보정하는 기법에 관해 다루고자 한다. 연구에 사용한 영상분석 기법은 Shin et al.의 연구를 참고하였다. 영상의 강제적 왜곡을 위해 다양한 촬영 각도를 설정하여 실험을 진행하였으며, 캠코더의 설치 위치를 통해 $0^\circ \sim 55^\circ$ 까지 5° 단위로 12가지 촬영 각도를 조정해가며 영상을 수집·분석하였다.

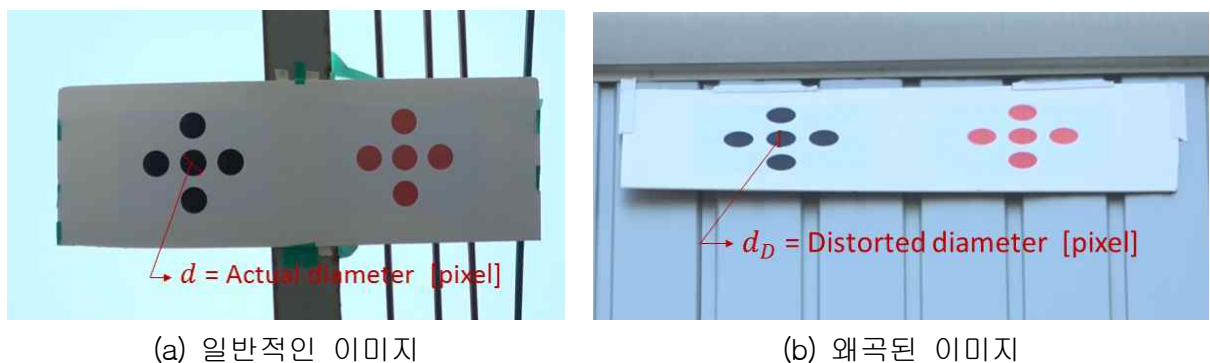
(2) 영상기반 변위계측

(가) 영상기반 변위계측 개요

영상기반 변위계측은 일반적으로 영상장비를 통한 분석대상 이미지 수집, ROI(Region Of Interest) 설정 및 표적의 위치 정보를 획득하는 과정을 갖는다. 프레임마다 획득된 위치 정보는 연속되는 프레임의 위치정보와의 템플릿 매칭을 통해 비교분석 되어 변위로 계산된다.

(나) 촬영 각도에 의한 왜곡 보정

연속되는 프레임 내에서 표적의 위치정보 변화를 픽셀 단위로 수집하게 되며, 픽셀 단위의 위치 변화량에 MPC를 곱하여 실제 변위를 얻을 수 있다. 그러나 영상장비 설치위치의 변화 또는 표적의 이동 및 변경 등으로 인해 촬영 각도가 변화하게 되는 경우 영상 왜곡이 발생하며, MPC 값에도 변화가 발생하게 된다. 이러한 상황에서 하나의 동일한 MPC를 연속되는 프레임에 적용할 경우 픽셀-실제변위 변환과정에서 오차가 발생하게 된다.



마. 그림 1. 일반적인 이미지와 카메라 각도에 의한 왜곡된 이미지

본 연구에서는 영상 왜곡 시 발생하는 픽셀-실제변위 변환과정에서의 오차를 줄이고자 한다. 위의 그림 1은 영상의 왜곡 없이 표적의 정면에서 촬영한 이미지와 촬영 각도에 의해 왜곡된 이미지이다. 아래와 같이 왜곡된 이미지에서는 타겟의 직경 d_D 또한 왜곡되어 직경을 나타내는 픽셀 값이 변하게 된다.

타겟 제작 시 사전에 입력한 실제 직경을 D [mm], 일반적인 이미지 상에서 직경을 나타내는 픽셀 값은 d [pixel] 이다.

$$D [mm] = d [pixel] \times MPC [mm/pixel] \quad (1)$$

이 때, 식 (1)과 같이 실제 직경과 이미지 상 직경을 나타내는 픽셀 값 간의 관계는 MPC 를 통해 정의된다. 영상분석 과정에서 픽셀 단위의 위치정보 변화를 수집하고, 상기 식 (1)과 같은 관계를 통해 구한 MPC 를 이용하면 다음의 식 (2)와 같이 픽셀 변화량 Δ 를 실제 변위(A.D, Actual Displacement)로 변환해낼 수 있다.

$$A.D [mm] = \Delta [pixel] \times MPC [mm/pixel] \quad (2)$$

그러나 영상수집 과정에서 왜곡이 발생할 경우 실제 직경과 이미지 상 직경간의 관계에도 왜곡이 발생하여 식 (1)에서 구한 동일 MPC 를 모든 프레임에 적용시킬 수 없다. 이러한 경우 실제 직경 D 와 왜곡된 이미지에서의 직경 d_D 간의 관계는 새로운 MPC_D 로 정의되어야 하며, 그 관계는 아래의 식 (2)와 같다.

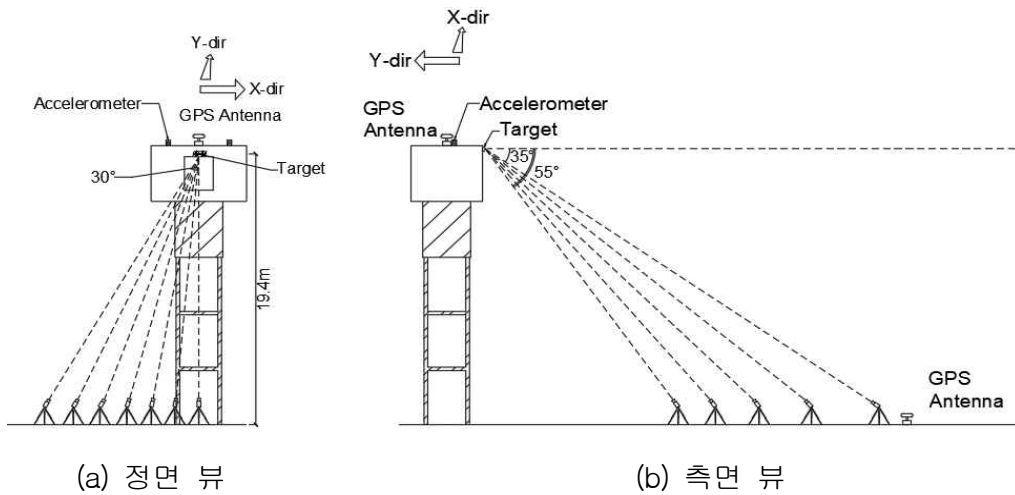
$$D [mm] = d_D [pixel] \times MPC_D [mm/pixel] \quad (3)$$

왜곡된 영상의 MPC_D 를 상기 식의 관계를 통해 구할 수 있으며, 구해진 MPC_D 를 식 (2)에 업데이트하여 적용하면 왜곡 영상에서의 실제 변위를 구해낼 수 있다. 본 연구에서 사용하는 영상분석 기법에서는 이와 같은 MPC_D 를 매 프레임 계산 및 적용하여, 영상의 왜곡과 관계없이 일정한 실제 변위를 구하였다. 또한 분석영상의 계측 평면 내에서 X, Y축 2방향 각각의 d_D 를 통해 해당 축의 MPC_D 를 구할 수 있으며, 2방향의 MPC_D 를 조합하여 평면 내 모든 방향의 MPC_D 를 얻어낼 수 있다.

(3) 실험 계획
(가) 실험 개요



마. 그림 2. 테스트 타워 전경



마. 그림 3. 실험 세팅

본 연구에서 사용한 계측 대상 구조물은 5층 높이(20 m)의 철골 타워이며, 그림 2에 대상 구조물의 전경이 나타나있다. 최상층의 평면은 6 m × 6 m이고 제어실로 운영되며, 그 아래층의 평면은 3 m × 3 m이고 가진실로 운영된다. 각 층의 층고는 4m이다. 가진실에 설치되어있는 가진장치를 통해 철골 타워를 공진시켰으며, 캠코더를 통해 적정 응답가속도 도달 후 자유진동까지의 과정을 촬영하였다. 영상의 왜곡을 인공적으로 유발시키기 위해 캠코더와 타겟의 촬영 각도를 0° ~ 55° 까지 5° 단위로 설정하여 총 12개의 촬영 각도로 실험을 진행하였다. 계측 현장의 공간적 제약으로 인해 0° ~ 30°까지는 최상층 돌출부의 하단에 타겟을 부착하여 촬영하였고, 35° ~ 55°는 최상층 외벽에 타겟을 부착하

여 촬영하였다.

또한 본 실험에 앞서 인력 가진을 통한 구조물 발생변위를 촬영하였고, GPS와 가속도계의 계측결과와 비교함으로써 본 연구에서 적용한 영상기반 변위계측 시스템의 유효성을 평가하고자 하였다. 그림 3은 계측 대상과 타겟 및 센서 설치 위치 등을 표기한 실험 개요를 나타낸다.

3.2 계측 시스템

본 실험에 사용된 영상장비는 상용 캠코더인 Sony 사의 FDR-AXP55이며, 최대해상도는 3840 x 2160이다. 해당 캠코더의 초당 최대 프레임 수인 60 fps(frame for second)를 선택하여 계측 대상 구조물의 동적거동을 계측하고자 하였으며, 60 fps 모드에서 지원되는 캠코더의 해상도는 1920 x 1080이다. 그러나 캠코더의 기계적 한계로 인해 실제 영상 수집은 59.84 Hz의 샘플링 주파수로 이루어졌다.

구조물의 최상부에 최상층(제어실) 변위를 나타낼 타겟을 부착하여 실험을 수행하였으며, 타겟은 간격 50 mm로 십자배치 된 지름 30mm의 원이다. 타겟의 손상 및 조도에 의한 영향 보정 등의 이유로 검은색과 붉은색의 타겟을 제작하였으나, 본 연구에서는 검은색의 타겟만을 사용하여 영상분석을 수행하였다. 촬영 각도 0° 일 때의 캠코더와 타겟 간의 거리는 19.4 m이며, 해당 거리와 캠코더-타겟 간의 촬영 각도를 이용하여 촬영 각도 별 캠코더 설치위치를 설정하였다. 연구에 사용한 영상분석 기법은 Shin et al.의 연구를 참고하였다.

영상기반 변위계측 시스템의 유효성 평가를 위해, GPS 및 가속도계를 추가로 설치하고 계측을 수행하여 결과를 비교하고자 하였다. GPS는 Leica사의 GR-100이며, 위성신호 증폭기 역할의 GNSS 장비 1대(AR25)와 기준점과 계측지점이 되는 소형안테나 2대(AS10)가 추가로 구성되어있다. 가속도계는 Kinematic사의 EpiSensor ES_U2를 사용하였다. 위성신호 수집을 위한 GPS 안테나 중 1대는 구조물로부터 30 m 떨어진 간섭이 없는 위치에 설치하여 고정시켰으며, 다른 1대는 구조물 최상층의 외부 거더 위에 부착하여 최상층 변위 발생에 따른 위치정보를 수집하도록 설치하였다. 가속도계 또한 최상층의 외부 거더 위에 부착하였으며, 가진 방향과 가진 수직 방향으로 설치하였다. GPS와 가속도계는 각각 10 Hz와 200 Hz의 샘플링 주파수로 계측 데이터를 수집하였다. 실험에 사용한 장비들의 상세 제원은 표 1에 표기하였다.

마. 표 1. 실험 장비 상세 제원

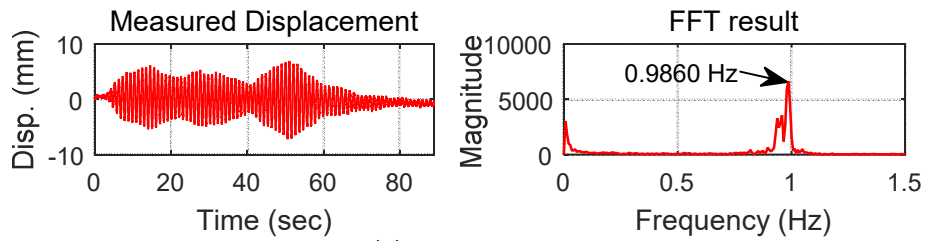
Component	Model	Technical specifications
Camcorder	 FDR-AXP55	Maximum resolution 1920 x 1080 (60 fps) 3840 x 2160 (30 fps)
GPS	 Leica GR-10	Fixed RTK positioning accuracy 10mm + 1ppm (rms) horizontal 20mm + 1ppm (rms) vertical GNSS signals GPS: L1 C/A, L2P, L2C, L5 GLONASS: L1 C/A, L2P, L2C Galileo: E1, E5a, E5b, AltBOC BeiDou: B1, B2, B32 QZSS: L1, L2C, L5 SBAS: WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS
Accelerometer	 EpiSensor ES_U2	Dynamic range 155 dB+ Linearity < 1000 μ g/g2 Cross-axis Sensitivity < 1 %

(4) 계측결과 분석

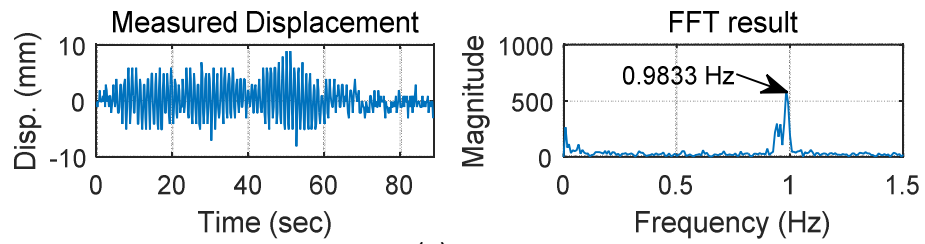
(가) 인력가진 계측결과

촬영 각도별 영상 촬영에 앞서 GPS와 가속도계를 통한 영상기반 변위계측 시스템의 유효성 평가를 수행하였다. 실험계획에서 전술 한 바와 같이 구조물 최상층에서의 인력 가진을 통해 변위를 생성하였으며 캠코더, GPS, 가속도계 세 가지 센서로 동시에 계측하였다. 캠코더, GPS 수집 데이터를 통해 시간영역에서의 변위계측 결과를 비교하였으며, 캠코더, 가속도계 수집 데이터를 통해 계측 그래프 파형을 비교하였다. 또한 세 가지 센서를 통한 계측결과로부터 구조물 진동수를 추정하여 결과를 비교하였다.

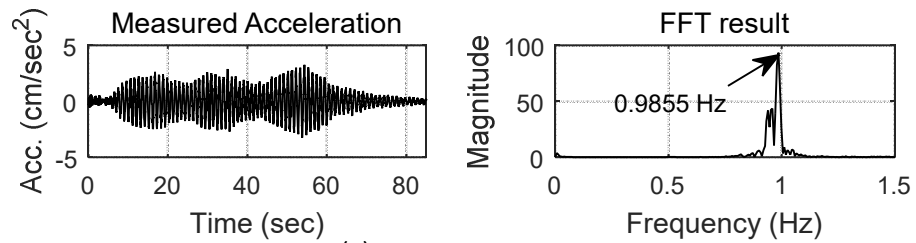
그림 4는 대상 구조물 최상층의 인력 가진 후 자유진동 계측 결과를 나타낸다. 이전 연구에서 구조물의 공진, 공진 후 자유진동 및 최대변위 발생시점 등에서 GPS와 캠코더를 통한 계측결과는 매우 유사하게 나타났다. 그러나 캠코더와 GPS의 변위 계측결과를 비교한 그림 5와 같이, 자유진동 시 변위감소 경향이 일정하지 않은 GPS 계측결과에 비해 캠코더의 계측결과는 대수감소의 파형을 나타내며 자유진동을 명확히 계측하였다. 또한 캠코더에 비해 GPS 계측결과는 노이즈가 많이 발견되었으며, 특히 ± 2 mm 이내의 계측결과에는 신뢰성이 존재하지 않는 것으로 판단되었다. 반면 캠코더를 통한 계측결과는 ± 0.5 mm 이내의 변위에서도 자유진동 파형을 나타내며 미소변위 계측능력을 보였다.



(a) Camcorder

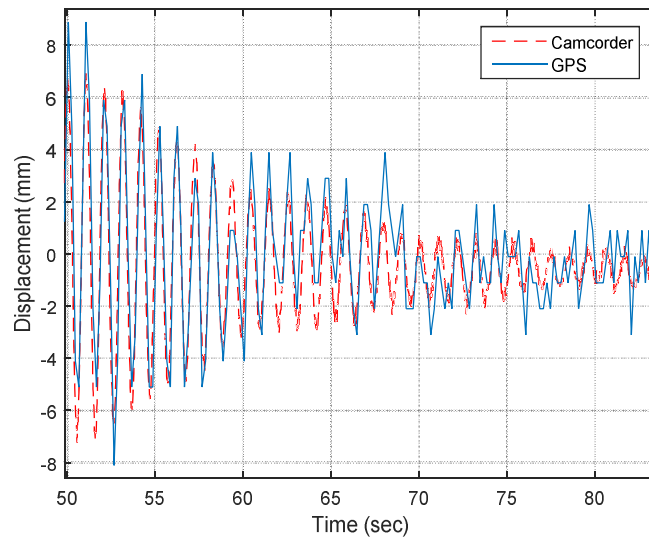


(b) GPS



(c) Accelerometer

마. 그림 4. 인력 가진 후 자유진동 결과



마. 그림 5. Camcorder와 GPS의 시간이력 확대 그래프

그림 4(a),(c)의 시간영역 계측결과에서 보이듯이, 캠코더와 가속도계는 매우 유사한 계측 그래프 파형을 나타냈다. 각각의 FFT 결과 또한 0.986 Hz와 0.9855 Hz의 매우 유사한 값을 추정할 수 있었다. 아래의 표 2는 캠코더, GPS 및 가속도계 계측결과로부터 추정된 대상구조물 진동수를 나타낸다. 계측 신뢰성이 높은 가속도계를 기준으로 하였을 때, 캠코더는 0.05 %, GPS는 0.22 %의 추정진동수 오차를 보였다. 일반적으로 기존 구조물 건전성 모니터링에 사용되는 센서인 GPS 및 가속도계와 계측결과를 비교해보았을 때, 영상기반 변위계측 시스템은 충분한 유효성을 갖는다고 판단된다.

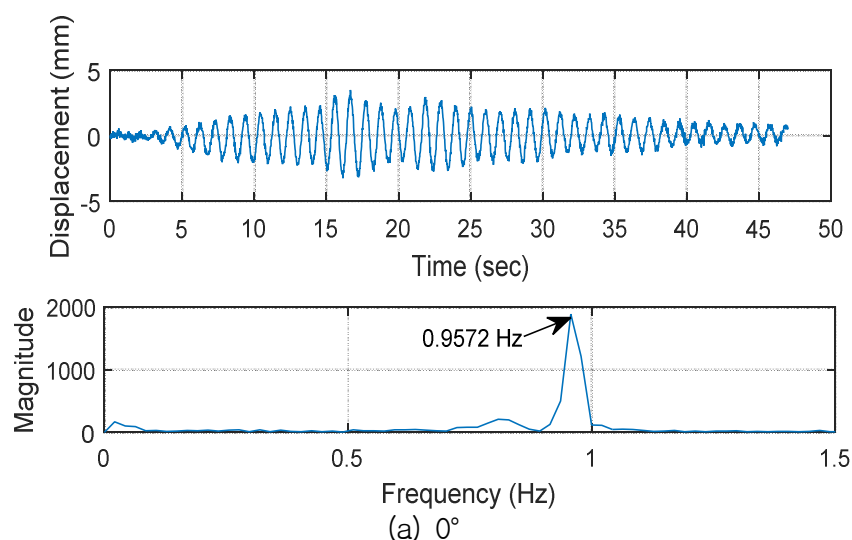
마. 표 2. 인력 가진 시험 측정 데이터로부터 추정된 진동수

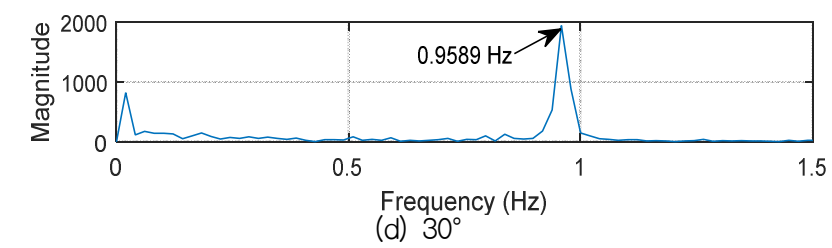
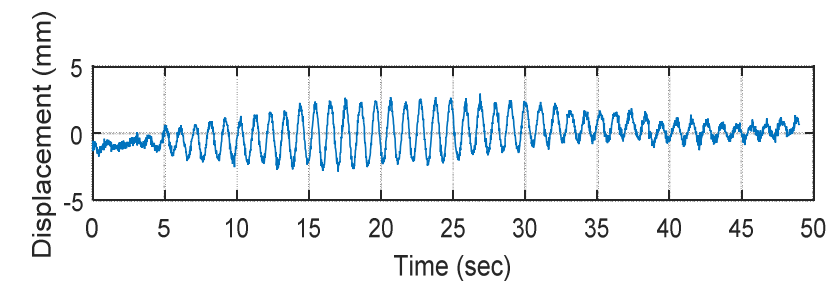
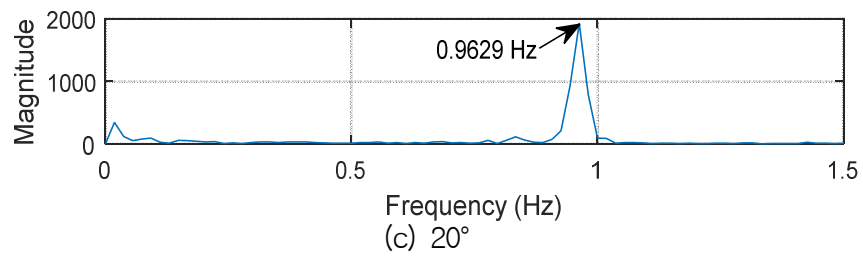
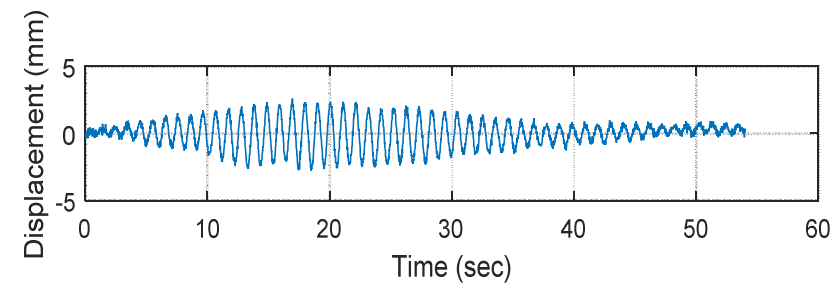
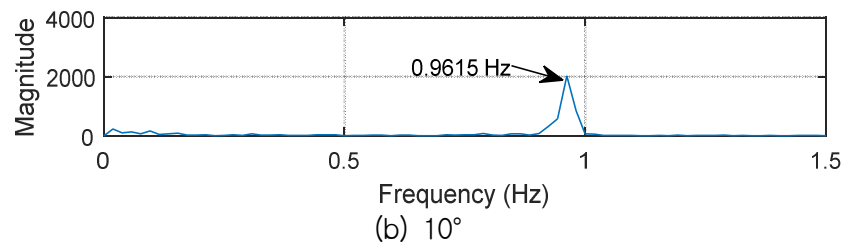
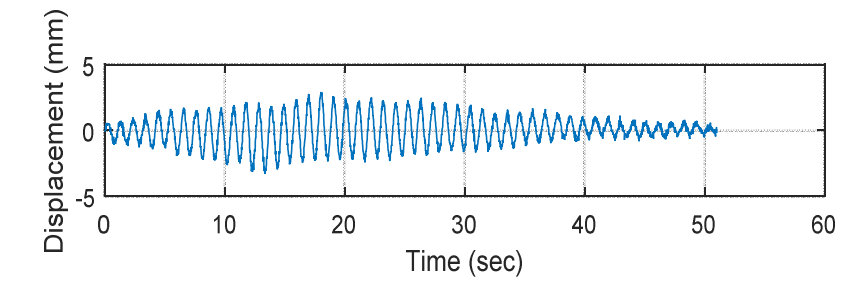
Measuring sensor	Camcorder	GPS	Accelerometer
Estimated Frequency [Hz]	0.9860 (0.05 %)	0.9833 (0.22 %)	0.9855

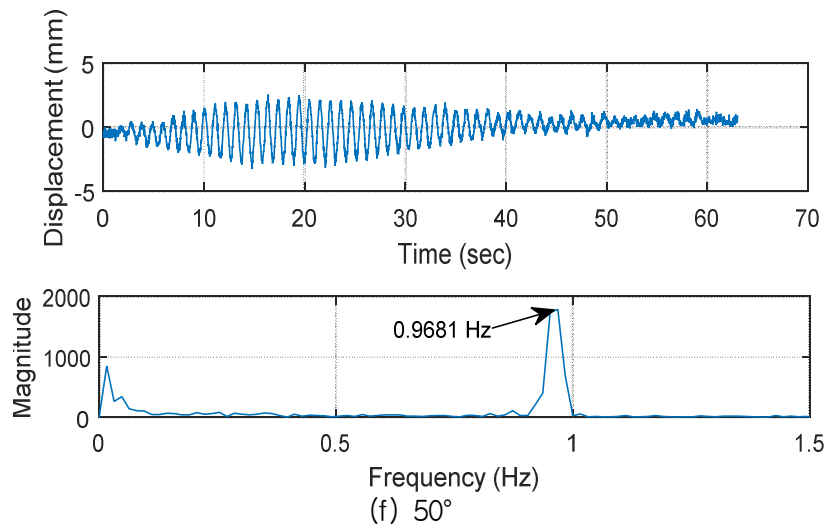
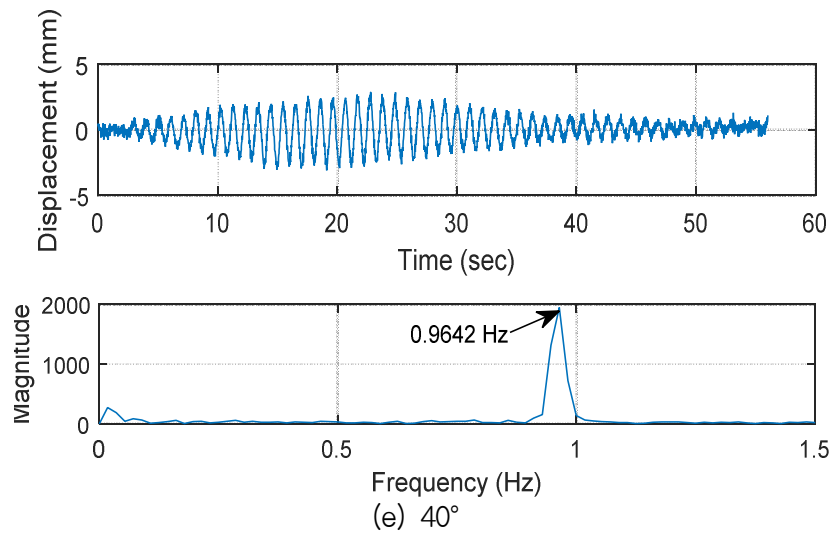
() is errors compared with estimated frequency from accelerometer

(나) 촬영 각도 별 계측결과

영상기반 변위계측 시스템의 유효성 평가를 수행한 후, 가진기를 통한 구조물 발생변위를 12가지 촬영 각도 별로 촬영하였다. 가진기를 통한 구조물 가진은 사전에 파악한 X축 방향 1차 고유진동수를 입력하여 수행하였으며, 적정 가속도에 도달 시 가진을 멈추고 자유진동을 유도하였다. 촬영 각도 별 계측들은 각각 독립적으로 수행되었기 때문에 실험 간 재현성에 한계가 있었으며, 완전한 동일 조건 하의 변위계측 결과 상관도를 비교할 수 없었다. 그렇기 때문에 영상분석 결과 검출된 일정 응답가속도 도달 시 최대 진폭 및 추정된 고유진동수 간의 비교를 통해 촬영 각도에 의한 영향을 판단하고자 하였다. 그림 6에 촬영 각도 별 변위계측 결과와 진동수 추정 값을 10° 간격씩 대표적으로 나타내었다.







마. 그림 6. 촬영 각도 별 변위계측 결과와 진동수 추정 값

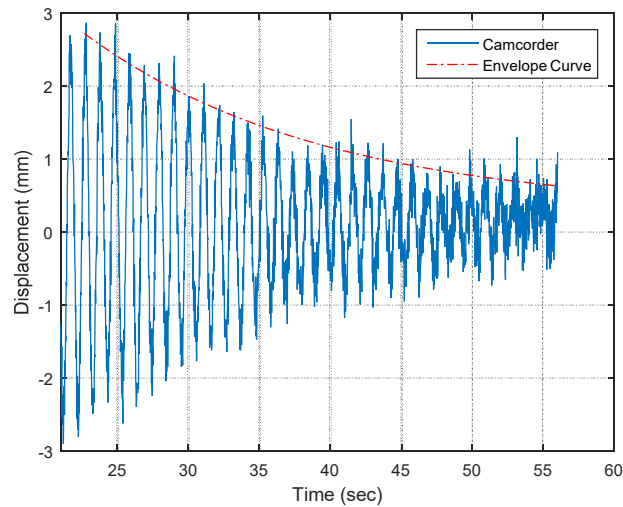
전체 실험 케이스에 대한 변위계측과 진동수 추정 결과는 표 3에 나타나있다. 왜곡이 없는 영상(촬영 각도 0°)을 기준으로 최대 진폭은 5.682 mm, 진동수 추정값은 0.9572 Hz로 나타났으며, 촬영 각도 별로 발생한 각각의 오차는 최대 5.72 %, 1.14 %로 나타났다. 촬영 각도에 따른 변위계측 결과는 최대 진폭 기준 0.325 mm, 오차율 기준 5.72 %의 미소한 오차를 나타냈다. 촬영 각도에 따른 계측은 각각 독립적으로 이루어졌으므로 완전한 동일 조건이 아니었음을 고려하였을 때, 다각도 동시촬영으로 인한 추가 실험 시 더욱 향상된 계측 정확도를 보일 것으로 판단된다. 진동수 추정에서도 촬영 각도 50°를 제외하고 전체적으로 1 % 미만의 오차율을 보이며 매우 유사한 추정 결과를 나타냈다.

마. 표 3. 촬영 각도에 따른 실험 결과

Shooting angle	Maximum amplitude [mm]	Error (%)	Estimated Frequency [Hz]	Error (%)
0°	5.682	–	0.9572	–
5°	5.709	0.48	0.9608	0.38
10°	5.419	4.63	0.9615	0.45
15°	5.674	0.14	0.9572	0.00
20°	5.357	5.72	0.9629	0.59
25°	5.530	2.71	0.9629	0.59
30°	5.535	2.59	0.9589	0.18
35°	5.878	3.45	0.9629	0.59
40°	5.480	3.56	0.9642	0.73
45°	5.539	2.52	0.9660	0.92
50°	5.378	5.35	0.9681	1.14
55°	5.634	0.84	0.9660	0.92

(다) 촬영 각도 별 감쇠비 추정결과 비교

촬영 각도에 의한 영향을 추가적으로 분석하고자 영상기반 변위계측 데이터를 통해 감쇠비를 추정하였다. 그림 7와 같이 계측 변위의 자유진동파형에 포락곡선을 생성하였으며, 추정된 대수감소 식과 앞서 구한 추정 진동수를 이용하여 감쇠비를 구하였다. 표 4는 촬영 각도 별 추정 감쇠비를 나타낸다. 계측대상 구조물의 감쇠비는 왜곡이 없는 영상(촬영 각도 0°)을 기준으로 약 1.070 %로 추정되었다. 촬영 각도가 변함에 따라 최소 1.025 %에서 최대 1.189 %의 감쇠비 추정결과를 보이며 촬영 각도와 상관없이 전체적으로 유사한 감쇠비를 나타냈다.



마. 그림 7. 포락곡선을 사용한 감쇠비 추정

마. 표 4. 촬영 각도 별 감쇠비 추정

Shooting angle	Damping ratio [%]	Error (%)
0°	1.070	—
5°	1.117	4.41
10°	1.189	11.11
15°	1.180	10.29
20°	1.091	1.98
25°	1.113	3.95
30°	1.107	3.43
35°	1.087	1.57
40°	1.088	1.64
45°	1.025	4.27
50°	1.060	0.96
55°	1.131	5.66

(5) 결론

영상기반 변위계측의 실제 현장 적용 시 주요 고려 사항 중 하나는 영상장비의 설치 위치이며, 다양한 현장 조건에 의한 영상장비 설치 위치에 따라, 수집되는 영상에는 촬영 각도에 의한 영상 왜곡이 발생할 수 있다. 그렇게 왜곡된 영상 내에서 발생하는 변위는 실제 변위를 표현하지 못할 가능성이 매우 높다. 본 연구에서는 수집영상의 매 프레임 MPC(mm/pixel coefficient) 업데이트를 통해 축 방향과 상관없이 왜곡영상에 따른 변위를 보정하는 기법에 관해 다

루고자 하였다. 연구에 사용한 영상분석 기법은 Shin et al.의 연구를 참고하였다. 영상의 강제적 왜곡을 위해 다양한 촬영 각도를 설정하여 실험을 진행하였으며, 캠코더의 설치 위치를 통해 $0^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 까지 5° 단위로 12가지 촬영 각도를 조정해가며 영상을 수집·분석하였다.

계측 대상구조물은 5층 높이의 철골타워이며, 구조물 최상층에 타겟을 설치하고 계측을 수행하였다. 가진 후 자유진동을 계측하였으며, 본 실험에 앞서 GPS와 가속도계를 통해 영상기반 변위계측의 유효성을 검증하고자 하였다. 구조물의 공진, 공진 후 자유진동 및 최대변위 발생시점 등에서 GPS와 캠코더를 통한 계측결과는 매우 유사하게 나타났다. 그러나 자유진동 시 변위감소 경향이 일정하지 않은 GPS 계측결과에 비해 캠코더의 계측결과는 대수감소의 파형을 나타내며 자유진동을 명확히 계측하였으며, 캠코더를 통한 계측결과는 ± 0.5 mm 이내의 변위에서도 자유진동 파형을 나타내며 GPS에 비해 우수한 미소변위 계측능력을 보였다. 또한 계측 데이터들의 FFT 결과를 비교하였을 때, 계측 신뢰성이 높은 가속도계 기준으로 캠코더는 0.05 %, GPS는 0.22 %의 추정진동수 오차를 보였다. 일반적으로 기존 구조물 건전성 모니터링에 사용되는 센서인 GPS 및 가속도계와 계측결과를 비교해보았을 때, 영상기반 변위계측 시스템은 충분한 유효성을 갖는다고 판단된다.

영상기반 변위계측 시스템의 유효성 평가를 수행한 후, 가진기를 통한 구조물 발생변위를 12가지 촬영 각도 별로 촬영하였다. 촬영 각도 별 계측들은 각각 독립적으로 수행되었기 때문에 실험 간 재현성에 한계가 있었으며, 동일 조건 하의 변위계측 결과 상관도를 비교할 수 없었다. 그렇기 때문에 실험 재현성에 영향을 덜 받는 구조물의 동특성의 비교를 통해 촬영 각도에 의한 영향을 판단하고자 하였으며, 일정 응답가속도 도달 시 최대진폭 및 추정된 고유진동수를 이용해 결과를 비교하였다. 왜곡이 없는 영상(촬영 각도 0°)을 기준으로 최대 진폭은 5.682 mm, 진동수 추정값은 0.9572 Hz로 나타났으며, 촬영 각도 별로 발생한 각각의 오차는 최대 5.72 %, 1.14 %로 나타났다. 촬영 각도에 따른 변위계측 결과는 최대 진폭 기준 0.325 mm, 오차율 기준 5.72 %의 미소한 오차를 나타냈다. 촬영 각도에 따른 계측은 각각 독립적으로 이루어졌기 때문에 완전한 동일 조건이 아니었음을 고려하였을 때, 다각도 동시촬영으로 인한 추가 실험 시 더욱 향상된 계측 정확도를 보일 것으로 판단된다. 진동수 추정에서도 촬영 각도 50° 를 제외하고 전체적으로 1 % 미만의 오차율을 보이며 매우 유사한 추정 결과를 나타냈다.

또한 촬영 각도에 의한 영향을 추가적으로 분석하고자 영상기반 변위계측 데이터를 통해 감쇠비를 추정하였다. 계측 변위의 자유진동파형에 포락곡선을 생성하였으며, 추정된 대수감소 식과 앞서 구한 추정 진동수를 이용하여 감쇠비를 구하였다. 계측대상 구조물의 감쇠비는 왜곡이 없는 영상(촬영 각도 0°)을 기준으로 약 1.070 %로 추정되었다. 촬영 각도가 변함에 따라 최소 1.025 %에서 최대 1.189 %의 감쇠비 추정결과를 보이며 촬영 각도와 상관없이 전체적으로 유사한 감쇠비를 나타냈다.

바. 표적 촬영 거리에 따른 영상기반 변위계측 결과 비교

(1) 개요

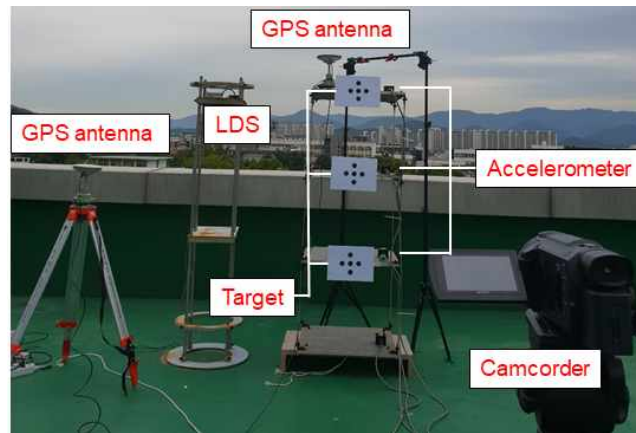
영상기반 변위계측 시스템(VDMS)은 별도의 데이터 처리 장비가 필요하지 않고, 휴대용 영상장비로 획득한 영상을 통해 변위 계측을 수행하기 때문에 계측 준비 절차가 간단하며, 현장 조건에 의한 영향도 적게 받는다. 초기의 영상기반 계측에 관한 연구는 터널· 교량과 같은 대형 구조물의 균열 검출 수준에 국한되었으나, 이후 다양한 연구를 통해 구조물의 처짐 및 변형 등의 검출에도 활용할 수 있음을 보였다. 또한 영상장비의 발달로 화소 수와 초당 프레임 수가 증가함에 따라 대상의 동적 거동을 계측하는 것이 가능해졌다. 영상기반의 동적 거동 계측에 관한 선행 연구들을 통해 계측 결과에 대한 신뢰성 또한 확보되었다.

계측 결과에 대한 신뢰성을 확보함에 따라 해결해야 할 사항은 실제 현장을 대상으로 한 적용성이다. 신승훈 등은 동적 거동 계측 가능범위 분석, 다자유도 모형 구조물을 대상으로 한 동특성 식별 및 실제 현장 적용 시 영상장비의 촬영 각도에 따라 발생하는 영상왜곡을 보정하는 연구를 수행하며 실제 현장 적용성에 대한 연구를 수행하였다. 또한 영상장비 설치 가능 위치에 따라 장거리 촬영이 강제될 수 있으며, 이러한 장거리 촬영의 경우 계측 데이터의 신뢰성 검증 역시 VDMS의 실제 현장 적용 시 요구된다. 따라서 본 연구에서는 장거리에서 촬영한 영상을 기반으로 변위 계측을 수행하고, 이를 기존의 모니터링 센서 계측 결과들과 비교함으로써 성능을 시험하고자 한다.

2. 실험 계획

(가) 실험 개요

본 연구에서는 $0.6\text{m} \times 0.6\text{m} \times 0.02\text{m}$ 의 알루미늄 합금 질량 체와 폭 50mm의 철제 기둥으로 구성된 3층 모형 구조물을 계측 대상으로 사용하였으며, 모형구조물의 각 층에 타겟을 부착하여 층 변위를 표시하였다. 대상 구조물을 강제 가력 후 자유진동을 유도하였으며, 자유진동 시 구조물의 거동을 영상장비, 가속도 센서, LDS 및 GPS를 이용하여 동시에 계측하고 그 결과를 비교하고자 하였다. VDMS의 신뢰성 검증을 위해 GPS, LDS와의 최상층 계측변위 비교를 수행하였으며, 계측 데이터들은 가속도 센서 계측결과와 더불어 Power Spectrum Density(PSD) 함수를 통한 진동수 영역에서의 비교에도 활용되었다. 대상 구조물 전경과 GPS, 가속도 센서, 상용 캠코더, LDS 및 타겟의 설치 위치를 그림 1에 나타냈다. GPS 안테나는 구조물 최상층과 외부 참조점에 설치하였고, LDS는 센서 설치용 지그에 부착하여 최상층 변위를 계측할 수 있도록 설정하였다. 캠코더는 타겟으로부터 3m 거리에 설치하여 구조물 전체를 촬영하였다.



바. 그림 1. 실험 세팅 확인

기존 구조물 모니터링 센서들과의 계측결과 비교를 통해 신뢰성을 확보한 후, VDMS의 장거리 적용성에 대한 테스트를 수행하고자 하였다. 고정된 대상 구조물로부터 50m 단위로 거리를 늘려가며 촬영 지점을 설정하였으며, 400m 거리까지 촬영하였다. 영상 수집은 일반 상용 캠코더와 장거리 촬영용 대물렌즈 두 가지를 사용하여 수행하였다. 촬영 지점 별로 대상 구조물을 2회 가력 후 자유진동을 수행하였으며, 자유진동 시 구조물의 거동을 VDMS, 가속도 센서 및 LDS를 이용하여 동시에 계측하고 그 결과를 비교하고자 하였다. 그림 2에는 장거리 계측 실험 전경을 나타냈으며, 그림 3에는 대상 구조물의 위치 및 계측 지점들을 표시한 항공 이미지를 표시하였다.



바. 그림 2. 장거리 실험 세팅



바. 그림 3. 계측지점

(나) 계측 시스템

실험영상은 두 종류의 영상장비를 통해 수집되었다. 향후 범용적인 적용을 고려하여 상용 캠코더인 Sony FDR-AXP55을 사용하였으며, 장거리 촬영용 대물렌즈 Celestron NexStar 90GT Refractor Telescope 도 Sony α 6500에 연결하여 함께 사용함으로써 상용 캠코더의 거리적 한계 파악 및 장거리 촬영 영상을 수집하고자 하였다. 대물렌즈는 렌즈 직경 90mm에 초점거리는 910mm이며, 연결된 카메라는 유효화소 2420만에 ISO 100으로 설정하였다. 두 영상장비 모두 60 fps(frame per second)로 설정하고 실험을 진행하였으나, 기계적 한계로 두 장비 모두 59.94 Hz의 샘플링 주파수로 실제 영상을 수집하였다. 장거리 대물렌즈의 경우 350m까지는 60 fps로 영상을 수집하였으나, 400m 거리에서 촬영 시에는 저하된 영상품질 향상을 위해 30 fps로 낮추어 영상을 수집하였다. 수집된 영상에 대한 분석은 Shin et al.의 연구를 참고하였다.

영상 분석을 위한 타겟은 50mm 간격으로 십자배치된 지름 30 mm의 원이다. 수직·수평 방향에 배치된 보조 원들을 활용하여 중심 원의 수직·수평 변위를 계측할 수 있으며, 각 층에 모두 부착하여 추후 층 변위 계측결과를 활용한 모형구조물 시스템 식별 또한 가능하도록 계획하였다.

가속도 센서 또한 각 층에 모두 설치하여 계측하였으며, 사용한 센서는 EpiSensor ES_U2이다. 가속도 계측 데이터는 R-das 프로그램을 통해 수집하였으며, 200Hz의 샘플링 주파수를 가진다. GPS는 Leica사의 GR-10을 사용하였으며, 위성신호 증폭기 역할의 GNSS 장비 1대(AR25)와 기준점과 계측지점이 되는 소형안테나 2대(AS10)를 추가로 구성하여 사용하였다. GPS 계측 데이터는 20Hz의 샘플링 주파수로 수집되었다. LDS는 KAIS사의 KL3-W400이며, 모형 구조물 최상층 타겟과 동일한 높이의 변위를 계측할 수 있도록 설치하였다. LDS 계측 데이터 수집은 TMR-211을 사용하여 1000Hz의 샘플링 주파수로 이루어졌다. 실험에 사용한 장비들의 상세 제원은 표 1과 같다.

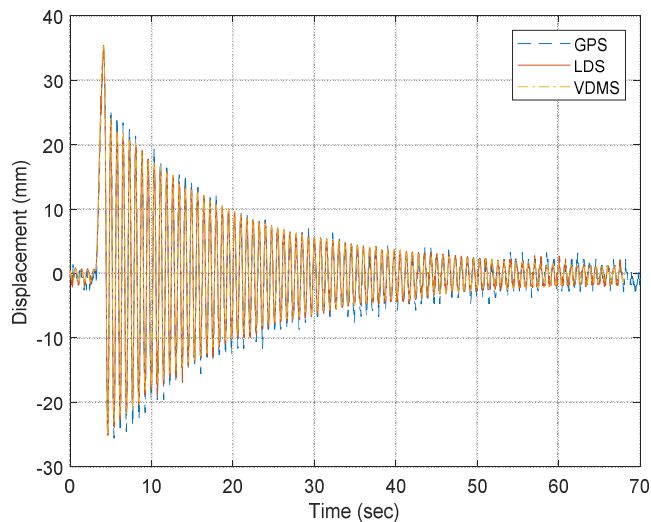
바. 표 1. 실험 장비 상세 제원(44-49)

Component	Model	Technical specifications
Camcor der	 FDR-AXP55	<u>Maximum resolution</u> 1920 x 1080 (60 fps) 3840 x 2160 (30 fps)
Digital camera	 Sony α 6500	[Video mode] <u>Image frame rate</u> 1/2/4/8/15/30/60/120 fps <u>Image size</u> 1920 x 1080 <u>ISO</u> 100 - 25600
Telescope	 Celestron NexStar 90GT	<u>Optical design</u> Refractor <u>Aperture</u> 90mm <u>Focal length</u> 910mm
Accelerometer	 EpiSensor ES_U2	<u>Dynamic range</u> 155 dB+ <u>Linearity</u> < 1000 μ g/g2 <u>Cross-axis Sensitivity</u> < 1 %
GPS	 Leica GR-10	<u>Fixed RTK positioning accuracy</u> 10mm + 1ppm (rms) horizontal 20mm + 1ppm (rms) vertical <u>GNSS signals</u> GPS: L1 C/A, L2P, L2C, L5 GLONASS: L1 C/A, L2P, L2C Galileo: E1, E5a, E5b, AltBOC BeiDou: B1, B2, B32 QZSS: L1, L2C, L5 SBAS: WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS
LDS	 KL3-W400	<u>Measurement distance</u> 500 mm <u>Measurable range</u> $\pm$ 200 mm <u>Optical mode</u> Diffuse reflection <u>Resolution</u> 10 μ m

3. 계측결과 분석

(가) VDMS 신뢰성 검증

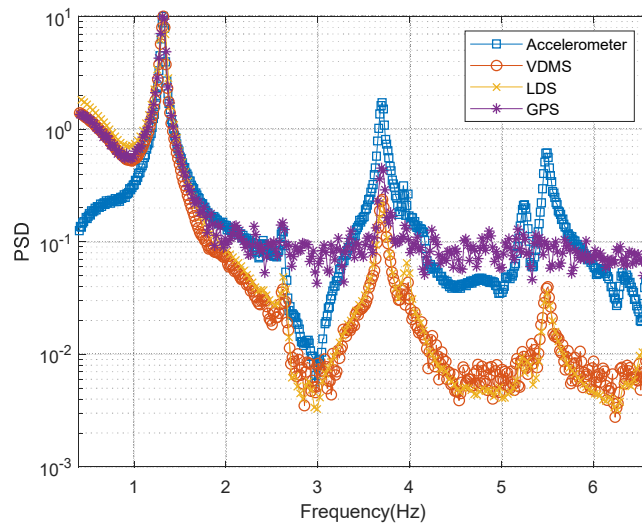
기존 구조물 모니터링에 활용되는 GPS 및 가속도 센서와 모형구조물의 정밀한 최상층 변위 획득을 위한 LDS를 함께 실험에 활용하고, VDMS와의 결과 비교를 통해 해당 시스템의 신뢰성을 검증하고자 하였다. 우선적으로 변위 영역에서의 검증을 위해 GPS와 LDS 및 VDMS를 통한 모형구조물 최상층의 변위 비교를 수행하였다. 모형구조물에 가한 최대진폭은 약 40 mm 수준으로 설정하였으며, 해당 수준에서의 계측 신뢰성이 검증된다면 초고층 구조물의 횡변위 허용 범위인 $h/500$ 수준에서의 계측 신뢰성 또한 충분히 확보될 것으로 판단된다. 다음의 그림 4는 자유 진동 시 최상층 변위 계측결과를 나타낸다.



바. 그림 4. 자유 진동 시 최상층 변위 계측결과

그림 4에서 나타난 바와 같이 VDMS의 계측 결과는 LDS의 정밀한 변위 계측 결과와 매우 유사하게 나타났다. 두 가지 방법 모두 강제 가력 시 최대 발생 변위 및 자유진동 시 대수 감소 파형을 정확히 계측해내며 우수한 동적 변위계측 능력을 나타냈다. 반면 GPS에 의한 계측은 자유진동 시 약 2~3 mm 정도의 오차를 보였으며, ± 2 mm 수준의 진동 계측 시 변위가 일정하지 않고 불규칙한 편차를 보이며 미소 변위 계측에 대한 한계를 나타냈다.

또한 진동수 영역에서의 비교를 위해 앞선 변위 계측 데이터와 더불어 가속도 센서를 통한 계측 결과를 활용하여 PSD 함수를 구하고 그 결과를 비교하고자 하였으며, PSD 결과는 다음의 그림 5와 같다. 동일 조건 하 비교를 위해 네 가지 계측방법 모두 모형구조물의 최상층 계측 데이터를 활용하였으며, 결과의 가시성을 위해 각 PSD 함수의 최대값 스케일을 통일시켰다. 그림 5에서 보이듯 가속도 센서, VDMS 및 LDS 계측 데이터를 이용한 PSD 함수에서는 3차 모드 이상의 진동수가 나타나지만, GPS 계측을 통한 PSD 함수에서는 2차 모드 진동수까지만 계측되었다. 또한 계측된 2차 모드 진동수 역시 다른 계측방법에 비해 인접 진동수와의 상대적인 차이가 적게 나타나 해당 성분의 명확성이 떨어졌다. 이를 통해 진동수 영역에서의 고차 모드 모니터링 시 상대적으로 명확하고 정확하게 계측하는 가속도 센서, VDMS 및 LDS에 비해 GPS의 데이터 유효성이 떨어지는 것으로 판단된다.



바. 그림 5. PSD 함수 결과

바. 표 2. 모드 진동수 추정 (Hz)

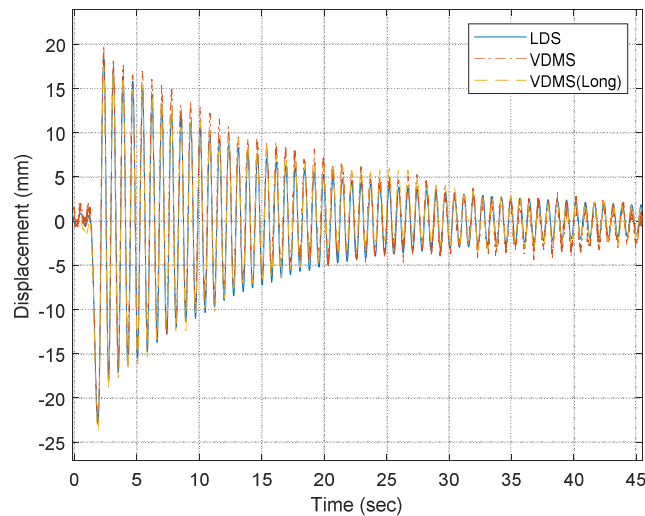
Mode	Accelerometer	VDMS	LDS	GPS
1st	1.318	1.317 (0.076%)	1.312 (0.456%)	1.309 (0.686%)
2nd	3.699	3.702 (0.081%)	3.688 (0.297%)	3.691 (0.217%)
3rd	5.493	5.502 (0.164%)	5.493 (0.000%)	-

() is error compared with data from accelerometer

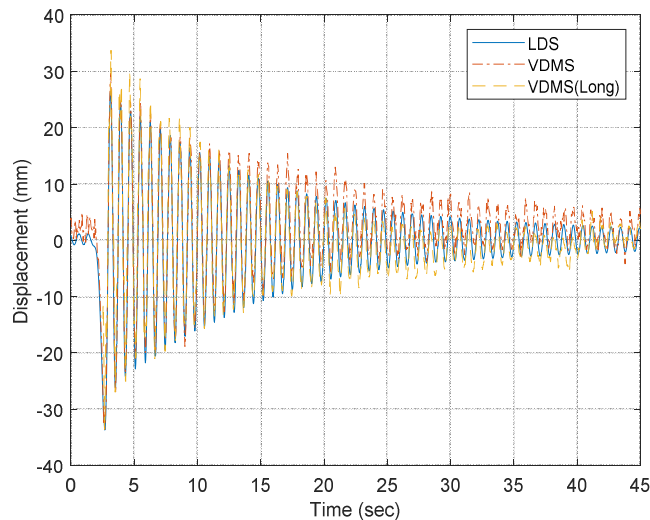
PSD 함수에 의해 계산된 모드별 고유진동수는 표 2에 나타나 있으며, 네 가지 계측방법에서 모두 명확하게 나타나는 1차 모드 고유진동수 값을 기준으로 하였을 때, 식별이 가장 뚜렷한 가속도 센서에 의한 결과 대비 VDMS는 0.076 %, LDS는 0.456 %, GPS는 0.686 %의 오차를 나타냈다. 기존의 구조물 모니터링 센서와의 변위 및 진동수 영역에서의 비교를 수행한 결과, VDMS는 3차 모드 수준의 고차 모드도 식별이 가능하고, 가속도 센서 결과를 참조 값으로 비교하였을 때, 최대 0.164%의 미소한 오차를 보이며 충분한 신뢰성을 갖는 것으로 판단되었다.

(나) VDMS 장거리 적용성 실험

기존 계측 센서들과의 비교를 통해 VDMS에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었으며, 신뢰성 검증은 바탕으로 실제 현장을 위한 장거리 적용성에 대한 테스트를 수행하였다. 실험 개요에서 기술한 바와 같이 50m 단위로 촬영 거리를 늘려가며 실험을 진행하였다. 계측 지점 별로 LDS로 계측한 최상층 변위와의 비교를 통해 계측 정확성을 분석하고자 하였으며, 다음 그림 6-7에 50m, 100m 거리에서의 계측결과를 나타냈다.



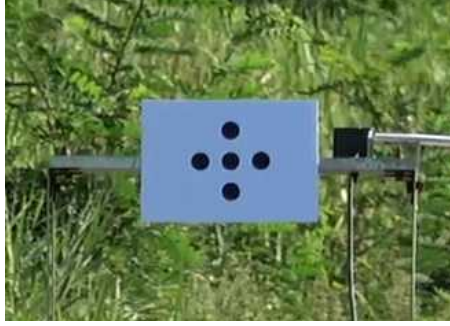
바. 그림 6. 50m 측정 변위



바. 그림 7. 100m 측정 변위

계측 결과, 상용 캠코더와 장거리 대물 렌즈 모두 최대 진폭에 있어서는 LDS와 매우 유사한 결과를 나타냈으나 두 결과 모두 사전 검증 실험에서는 나타나지 않던 계측 데이터의 밀링(drift) 현상이 발생했다. 이는 계측 환경이 야외에 노출되어있어, 주위에서 발생한 지속적인 바람이 영상장비에 작용했기 때문이라 판단되며, 야외환경의 온습도에 따라 발생한 아지랑이 또한 영향을 미쳤다고 판단된다. 이러한 현상은 100m 거리에서 더욱 많이 나타났다.

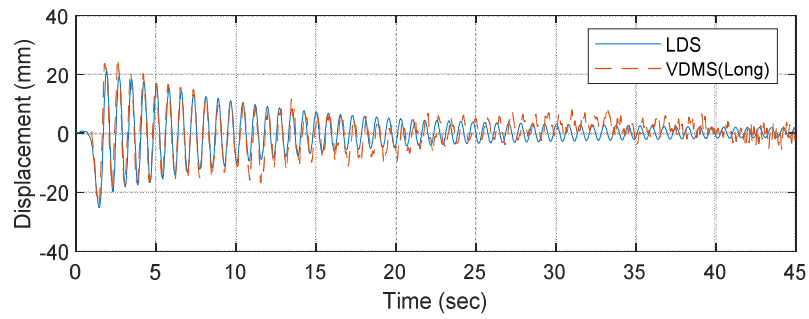
그림 8과 9는 50m와 150m 계측 거리일 때 상용 캠코더로 대상 구조물의 최상층 타겟을 촬영한 이미지를 나타낸다. 상용 캠코더는 150m 거리부터 광학 줌에서 디지털 줌으로 전환되었으며, 그림 9에서 보이듯 디지털 줌으로 전환 시 획득 영상의 선예도가 눈에 띄게 저하되었다. 이러한 이유로 인해 150m 거리부터는 일반 상용 캠코더로 획득한 영상은 분석에 있어 오류가 발생하였으며, 150m 이후의 계측 변위 비교는 LDS와 장거리 대물 렌즈 계측 결과 간에 수행하였다. 그림 10에 150m에서 400m 계측 거리까지의 변위 비교 결과를 나타내었다. LDS 결과와 비교했을 때, 전체적으로 발생 변위가 큰 계측 초기에는 유사한 대수감소의 진폭을 보였으나, 발생 변위가 작아지는 중반부 이후에는 불규칙한 값을 나타냈다. 또한 앞선 계측과 마찬가지로 외부 영향으로 인한 데이터 밀링 현상도 관찰되었다.



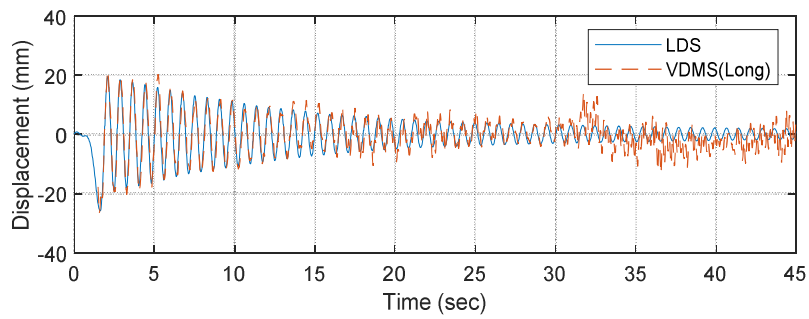
바. 그림 8. 50m 계측거리 타겟 촬영 이미지



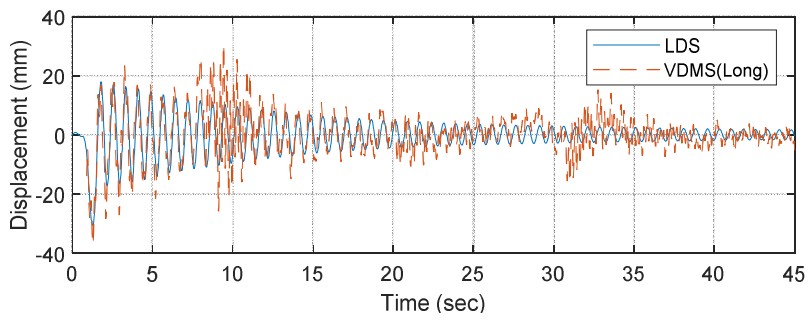
바. 그림 9. 150m 계측거리 타겟 촬영 이미지



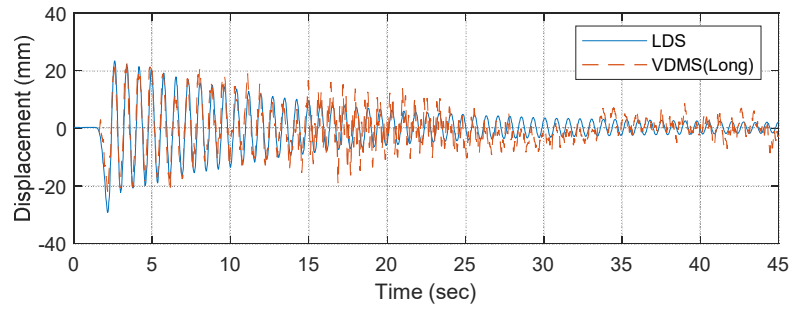
(a) 150m



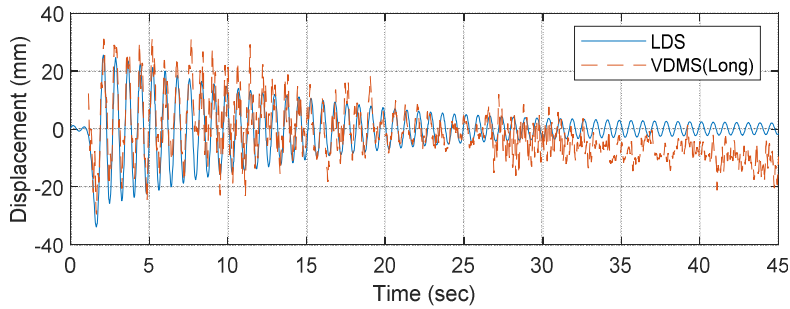
(b) 200m



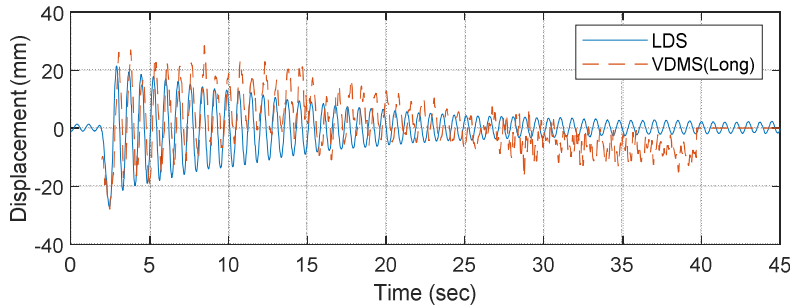
(c) 250m



(d) 300m



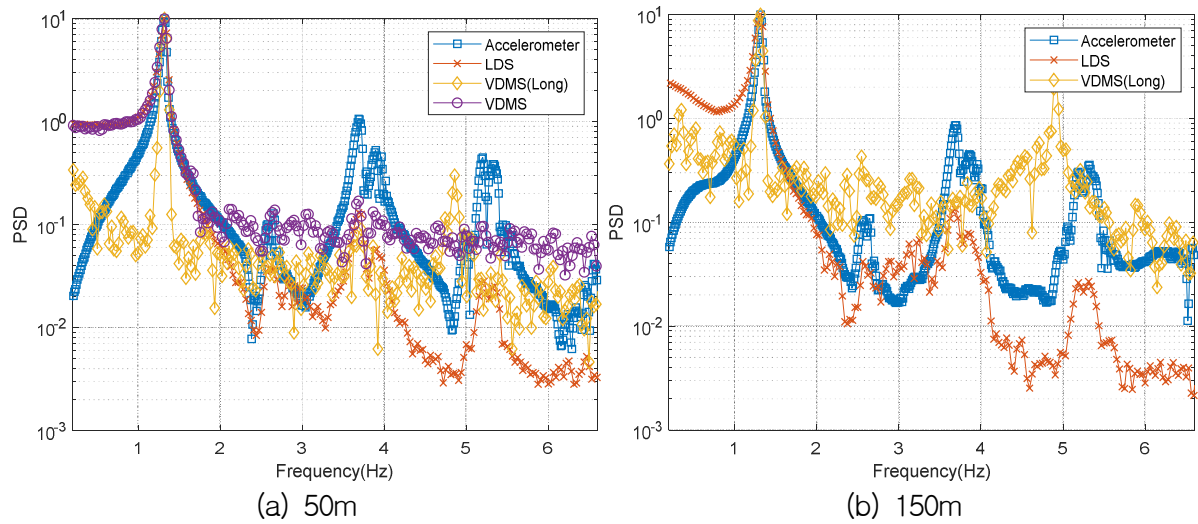
(e) 350m



(f) 400m

바. 그림 10. 거리에 따른 측정 변위

장거리 촬영 시 영상 품질의 저하 및 외부 환경의 영향으로 인해 변위 영역에서의 비교가 어려워졌으며, 추가적인 검증을 위해 진동수 영역에서의 비교를 함께 수행하였다. 진동수 영역에서의 비교에는 가속도 센서를 통해 수집된 계측 결과도 함께 사용하여 비교 대상으로 설정하였다. 그림 11에는 50m와 150m 거리에서의 계측 결과를 통한 PSD 함수를 나타내었다. 변위 영역과 마찬가지로 150m 계측 거리부터는 일반 상용 캠코더를 통한 계측에 오류가 발생하였으며, 150m 이후의 결과 비교는 가속도 센서, LDS 및 장거리 대물 렌즈를 통해 수행되었다.



바. 그림 11. PSD 함수 결과 - 50m, 150m 계측 거리

PSD 함수를 통한 진동수 영역에서의 분석 결과, 자유진동으로 인한 1차 모드 성분은 모든 계측 방법에서 명확하게 나타났다. 2차 모드 이상은 가속도 센서와 LDS 계측 결과에서만 나타났으며, 영상 분석을 통해서도 계측할 수 없었다. 장거리 촬영 시 동반되는 영상 품질의 저하 및 외부 환경으로 인한 영상 장비의 진동 등이 발생하였고, 이러한 조건들로 인해 자유 진동으로부터의 명확한 1차 모드 특성을 제외한 고차 모드 특성 계측에 장애가 되었다고 판단된다.

바. 표 3. 계측 거리별 고유진동수 측정 (Hz)

Measurement distance	Accelerometer	LDS	VDMS(Long)	VDMS
50 m	1.318	1.312 (0.455%)	1.317 (0.076%)	1.317 (0.076%)
100 m	1.306	1.312 (0.459%)	1.317 (0.842%)	1.289 (1.302%)
150 m	1.318	1.312 (0.455%)	1.317 (0.076%)	-
200 m	1.318	1.312 (0.455%)	1.317 (0.076%)	-
250 m	1.318	1.312 (0.455%)	1.317 (0.076%)	-
300 m	1.318	1.312 (0.455%)	1.317 (0.076%)	-
350 m	1.306	1.312 (0.459%)	1.317 (0.842%)	-
400 m	1.306	1.312 (0.459%)	1.288 (1.378%)	-

() is error compared with data from accelerometer

표 3에는 모든 계측 방법에 나타난 계측 거리 별 1차 모드 고유진동수를 표기하였다. 가속도 센서와 비교한 결과, LDS는 계측 거리와 무관하게 일정한 1.312Hz의 1차 모드 진동수를 나타냈으며, 0.5% 미만의 오차를 가졌다. 장거리 대물 렌즈를 통한 계측 결과 역시 400m 계측 거리를 제외하고는 1.317Hz의 일정한 1차 모드 진동수를 나타냈으며, 1% 미만의 오차를 가지며 정확한 계측 결과를 나타냈다. 1.288Hz의 추정 진동수를 나타낸 400m

경우에서도 1.378%의 오차를 보이며 상당히 유사한 결과를 보였다. 일반 상용 캠코더를 이용한 계측은 변위 영역 계측과 마찬가지로 100m 까지의 데이터만 유효하게 활용되었으며, 한계 거리였던 100m의 경우 1.302%의 낮은 오차가 발생했다.

(4) 결 론

기존 구조물 모니터링 기법에 대한 대안으로 VDMS를 활용하고자 하였으며, 본 연구에서는 선행연구인 동적 변위 계측 범위 및 성능, 촬영 각도에 의한 영향 분석에 이어 장거리 계측 적용성에 대해 검증하려 한다. 기존의 구조물 모니터링 센서인 GPS, 가속도 센서를 비교대상으로 선정하여 VDMS의 신뢰성을 검증하고자 하였으며, 정밀 계측 값을 얻기 위해 LDS 또한 추가적으로 설치하여 계측하였다.

변위 영역에서 VDMS의 계측 결과는 LDS의 정밀한 변위계측 결과와 매우 유사한 결과를 보였다. 두 가지 방법 모두 강제 가력 시 발생한 최대 변위 및 자유진동 시 대수감소 파형을 정확히 계측해내며 우수한 동적 변위계측 능력을 보였다. 반면 GPS에 의한 계측은 자유진동 시 약 2~3 mm 정도의 오차를 보였으며, ± 2 mm 수준의 진동 계측 시 변위가 일정하지 않고 불규칙한 편차를 보이며 미소 변위 계측에 대한 한계가 존재했다. 또한 계측 결과의 PSD 함수를 통한 진동수 영역에서의 비교도 함께 수행하였다.

진동수 영역의 비교에는 가속도 센서의 계측 데이터도 함께 활용하였다. 분석 결과, 가속도 센서, VDMS 및 LDS 계측 데이터를 이용한 PSD 함수에서는 3차 이상의 고차모드까지 진동수가 추정되었으나, GPS 계측결과를 통한 PSD 함수에서는 2차 모드 진동수까지만 계측되었다. 또한 계측된 2차 모드 진동수 역시 다른 계측방법에 비해 인접 진동수와의 상대적인 차이가 작게 나타나 해당 성분의 명확성이 떨어졌다. 네 가지 계측방법에서 모두 명확하게 나타나는 1차 모드 고유진동수 값을 기준으로 하였을 때, 식별이 가장 뚜렷한 가속도 센서에 의한 결과 대비 VDMS는 0.076 %, LDS는 0.456 %, GPS는 0.686 %의 오차를 나타냈다. 이를 통해 진동수 영역에서의 구조물 모니터링 시에도 VDMS의 데이터 유효성이 존재한다고 판단된다.

기존 센서와의 비교를 통해 구조물 모니터링에서의 VDMS 신뢰성을 검증한 후, 실제 현장 적용을 위한 장거리 계측 적용성에 대해 실험하였다. 50m 간격으로 최대 400m 까지 계측 거리를 설정하였으며, 기존에 사용했던 일반 상용 캠코더 이외에 장거리 촬영용 대물렌즈도 함께 사용함으로써 상용 캠코더의 거리적 한계 파악 및 장거리 촬영 영상을 수집하고자 하였다. 또한 선행 검증 과정에서 가장 정확성이 떨어졌던 GPS를 제외하고 실험을 진행하였다. 실험 결과, 일반 상용 캠코더로는 100m의 거리 한계를 나타냈으며, 대물렌즈를 사용한 경우 400m 까지 유효한 결과를 얻을 수 있었다. 일반 상용캠코더의 경우, 150m 이상에서는 해당 캠코더의 기계적 한계인 20배 광학 줌에서 디지털 줌으로 변환되며, 이는 획득 영상의 선예도 저하를 유발시켜 타겟 인식의 정확도를 크게 낮추는 결과를 나타냈다. 100m 까지의 계측 결과, 상용 캠코더 및 장거리 대물 렌즈를 통한 VDMS 계측 변위는 최대 진폭에서 LDS를 통한 계측값과 유사한 결과를 보였으나 사전 검증 실험에선 나타나지 않던 계측 데이터 밀림 현상이 발생했다. 상용 캠코더를 제외한 150m에서 400m까지의 계측 결과에서도 동일한 현상이 발생하였으며, 발생 변위가 작아지는 계측 중반부 이후에는 불규칙한 값을 나타내는 현상 또한 관찰되었다.

변위 영역에서의 결과 비교가 어려운 수준이었기 때문에, 추가적인 비교를 위해 진동수 영역에서의 계측 결과를 분석하였다. 가속도 센서, LDS 및 두 종류의 영상장비를 통한 VDMS 계측 결과를 활용하여 PSD 함수를 구하였으며, 계측된 모드 진동수를 통해 결과를 비교하였다. 사전 검증과 달리 VDMS 계측 결과는 1차 모드 진동수만 명확하게 계측이 되었으며, 2차 이상의 고차 모드는 식별이 불가능했다. 모든 계측 방법에서 나타난 1차 모드

진동수 값을 통해 결과를 비교하였으며, VDMS는 최대 1.378%의 낮은 오차를 보이며 우수한 고유 진동수 계측 능력을 나타냈다.

VDMS의 변위 영역 계측 결과에서는 외력에 의한 데이터 밀림 및 확대 영상의 품질 저하에 의해 데이터의 유효성이 떨어졌다. 계측 거리가 멀어져 확대 배율이 높아질수록 외부 환경에 의한 미세 진동만으로도 계측 결과에 큰 영향을 미쳤으며, 데이터 밀림 현상의 발생 또한 영상장비에 작용한 바람에 의해 계측 축이 서서히 이동한 것이라 판단된다. 영상 장비의 진동 저감 및 외부 영향으로부터 보호할 수 있는 추가적인 조치를 통해 변위 영역에서의 계측 신뢰성을 회복할 수 있을 것으로 기대되나, 상용 캠코더의 경우 분석에 적합한 영상 획득이 광학 줌 범위로 제한되기 때문에 20층 이상의 고층 구조물을 대상으로 적용하기는 부적합한 것으로 판단된다. 다만 VDMS의 변위 계측 데이터의 유효성이 떨어지는 조건에서도 대상의 자유진동에 포함된 1차 모드 특성은 명확하게 계측이 되었으며, 외부 환경으로부터의 영향이 통제되어 안정된 데이터가 수집된다면 진동수 영역에서의 고차 모드 계측 신뢰성 또한 확보할 수 있을 것이라 판단된다.

2-2-5. 가설 구조물 붕괴위험 기준 설정

가. 가설 구조물 안전기준 검토

(1) 개요

가설 구조물의 안전기준을 검토하기 위해 한국가설협회-정보자료실의 관련법규 항목 중 가설 구조물에 대한 관련법규에 속하는 가설공사 표준안전 작업지침을 바탕으로 검토하였다.

(2) 가설공사 표준안전 작업지침

가설공사 표준안전 작업지침을 검토하여 아래와 같이 구조적 안정성과 관련된 항목들만을 따로 편집하였으며, 붕괴 시뮬레이션 및 실험체 붕괴실험을 통해 해당 항목의 적절성을 판단하였다.

제3조(비계발판)

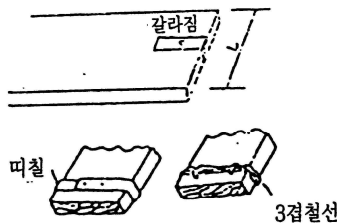
3. 재료의 강도상 결점은 다음 각 목에 따른 검사에 적합하여야 한다.

가. 발판의 폭과 동일한 길이내에 있는 결점치수의 총합이 발판폭의 1/4을 초과하지 않을 것

나. 결점 개개의 크기가 발판의 중앙부에 있는 경우 발판폭의 1/5, 발판의 갓부분에 있을 때는 발판폭의 1/7을 초과하지 않을 것

다. 발판의 갓면에 있을 때는 발판두께의 1/2을 초과하지 않을 것

라. 발판의 갈라짐은 발판폭의 1/2을 초과해서는 아니되며 철선, 띠철로 감아서 보존할 것 (그림 2)



(그림 2)

5. 비계발판은 하중과 간격에 따라서 응력의 상태가 달라지므로 <표 1>에 의한 허용 응력을 초과하지 않도록 설계하여야 한다.

표 1. 비계발판 작업으로서 목재의 허용응력

단위 : (킬로그램/평방센티미터)

목재의 종류 \ 허용응력도	압 축	인장 또는 휨	전 단
적송, 흑송, 회목	120	135	10.5
삼송, 전나무, 가문비나무	90	105	7.5

제4조(통나무)

3. 휨 정도는 길이의 1.5 퍼센트 이내이어야 한다.

제7조(통나무비계)

6. 벽연결은 수직방향에서 5.5미터 이하, 수평방향에서는 7.5미터 이하 간격으로 연결하여야 한다.
7. 기둥간격 10미터 이내마다 45도 각도의 처마방향 가새를 비계기둥 및 띠장에 결속하고, 모든 비계기둥은 가새에 결속하여야 한다.

제8조(강관비계)

6. 벽연결은 수직으로 5미터, 수평으로 5미터 이내마다 연결하여야 한다.
7. 기둥간격 10미터 마다 45도 각도의 처마방향 가새를 설치해야 하며, 모든 비계기둥은 가새에 결속하여야 한다.

제9조(강관틀비계)

4. 벽연결은 구조체와 수직방향으로 6미터, 수평방향으로 8미터 이내마다 연결하여야 한다.

제10조(달비계)

2. 와이어로우프 및 강선의 안전계수는 10 이상이어야 한다.

나. 가설재 붕괴예측 기법

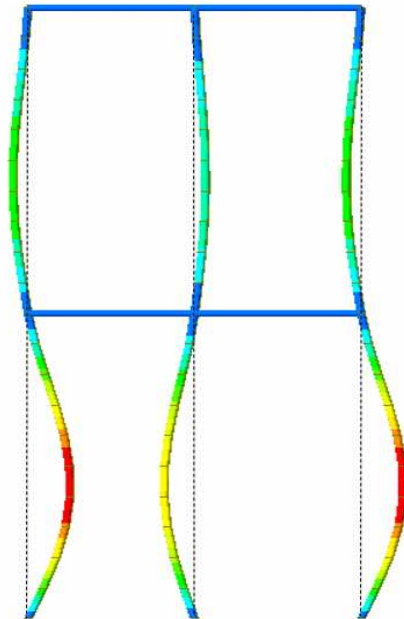
(1) 개요

동바리는 시공현장에 임시로 설치하는 가설구조물로서, 동바리의 갑작스러운 붕괴로 인한 인명피해가 빈번하다. 그러한 갑작스러운 붕괴의 대부분은 동바리의 좌굴에 의해 이루어지며, 단순 변위 계측만으로는 좌굴을 판단하는 것이 불가능하다.

본 절에서는 영상분석을 기반으로 별도의 계측센서 없이 동바리의 수직·수평변위를 동시에 계측하는 기법, 전산해석으로부터 구한 붕괴 시 수직·수평변위의 비율을 적용해 계측 시 붕괴예측 수행, 비계 및 동바리 붕괴예방 등 실제 현장에 적용하는 방안에 대해 설명한다.

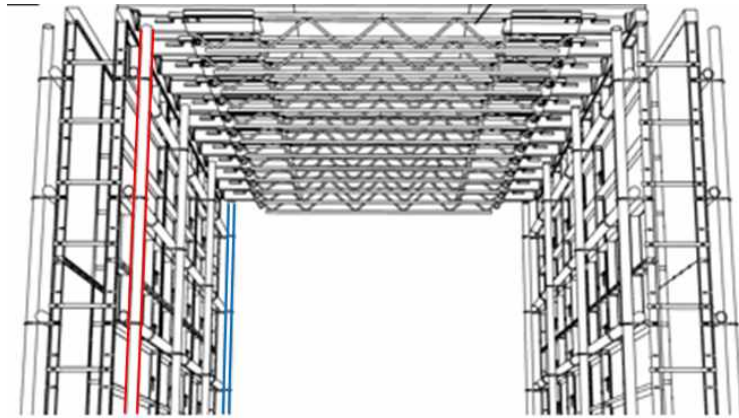
(2) 영상분석 기반 동바리 변위계측 시스템

동바리의 좌굴 시 그림 1과 같이 붕괴형상이 나타난다.



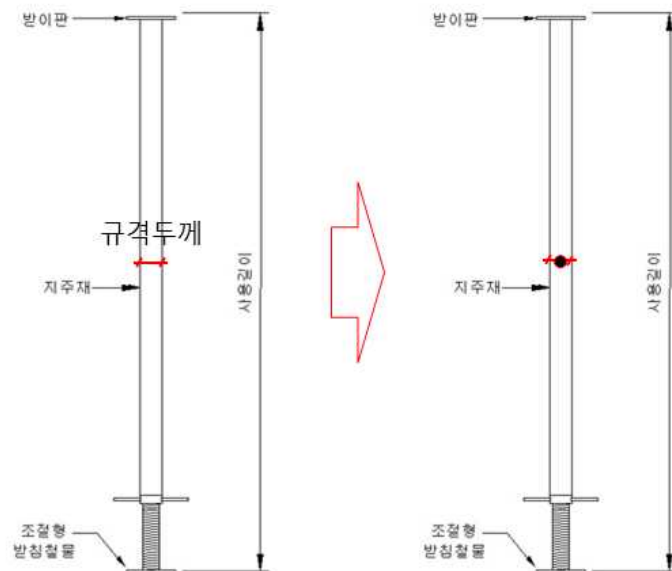
나. 그림 1. 동바리 붕괴모드

동바리는 규격화 된 부재로 구성되며, 각 부재의 폭을 사전에 알 수 있다. 계측영상에서는 가까운 부재의 폭은 넓게, 먼 부재의 폭은 좁게 나타난다. 따라서 그림 2와 같이 실제 부재의 폭을 사전에 알고 있기 때문에 계측값 산정을 위한 절대기준으로 활용할 수 있다. (같은 변위가 가까운 부재와 먼 부재에 동시에 발생하였을 때, 영상 내에서 각 부재의 발생 변위는 다르게 나타남. 사전에 설정된 실제 부재 폭과 영상 내 부재 폭의 비율을 파악하여, 영상 계측된 발생 변위를 실제 변위로 fitting할 수 있음)



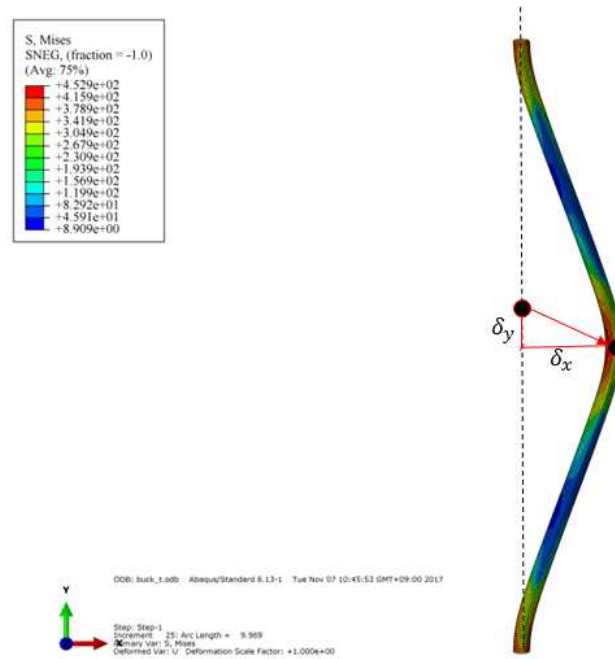
나. 그림 2. 영상분석 기반 다점 변위 계측 이미지

계측대상 내 타겟 혹은 타겟 대체 특징점이 존재하지 않을 경우, 수평변위(δ_x) 계측을 위한 특징점을 설정할 수 있다. 동바리의 부재는 규격 두께를 갖고 있기 때문에, 동바리 외측 경계선간의 거리는 일정하다. 따라서, 타겟 또는 타겟을 대체할 수 있는 특징점이 없을 경우, 경계선을 인식하여 경계선 간의 중앙을 계측을 위한 포인트로 설정할 수 있다.



나. 그림 3. 계측을 위한 추적포인트 산정

(3) 가설재 붕괴예측 기법 (수직· 수평 변위의 비율을 통한 붕괴 예측)
 동바리의 좌굴 시 그림 4와 같이 수직· 수평 변위가 발생한다.



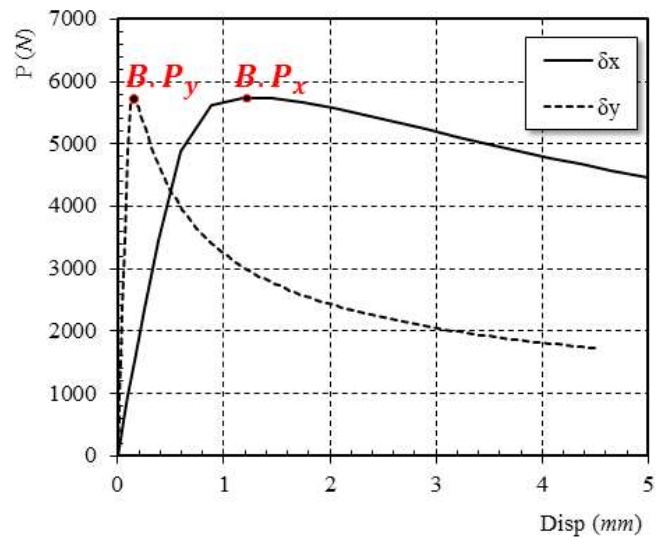
나. 그림 4. 좌굴 전산 해석

그림 5와 같이 하중재하 시 좌측의 그래프와 같이 하중 - 수직(δ_y)· 수평변위(δ_x) 관계가 나타나는데, 영상분석을 기반으로 동바리의 수직(δ_y)· 수평변위(δ_x)를 동시에 계측할 수 있다.

여기서, 수직· 수평변위의 비율을 $\beta = \frac{\delta_x}{\delta_y}$ 라 설정한다.

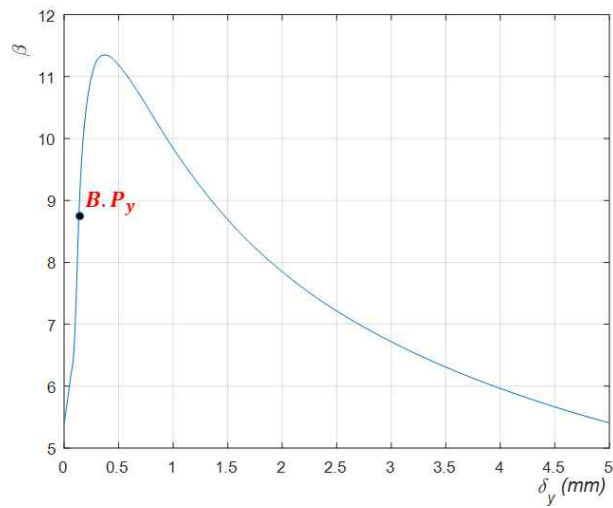
동바리 부재들은 사용현장 조건에 따라 다양한 규격이 존재하는데, 규격마다 각각 좌굴 시 발생 변위가 상이하러, 발생 변위만으로 좌굴을 판단하기가 어렵다. 그러나 좌굴 시 발생 변위의 비율 β 는 부재 규격에 영향을 받지 않기 때문에, 모든 규격에 적용 가능한 좌굴 판단 요인이다.

B.Px, B.Py 은 좌굴이 발생하는 좌굴점(Buckling Point)이며, 전산해석 또는 실험을 통해 좌굴 시의 β 값을 미리 구할 수 있다.

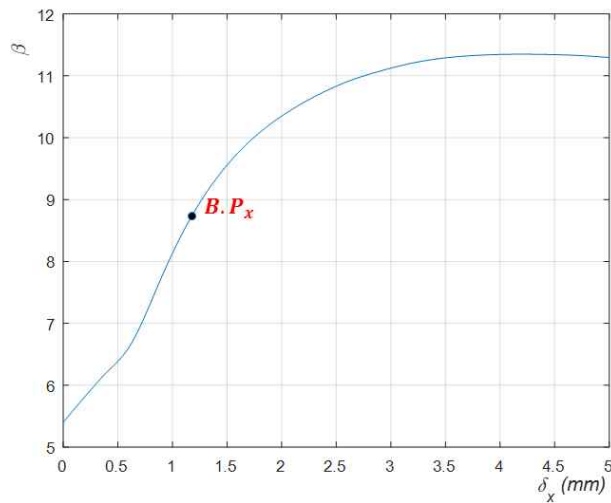


나. 그림 5. 좌굴 시 하중-변위 그래프

좌굴 발생 이전까지 β 값은 꾸준히 증가하며, 좌굴 발생 이후에도 β 값은 다소 증가하다가 감소하는 결과를 나타낸다. 동바리의 좌굴은 이러한 β 가 일정 값 이상이 되었을 때 발생 한다. 전산해석 또는 실험을 통해 미리 구해놓은 좌굴 시의 β 값과 비교하여, 계측을 통해 관찰되는 β 값으로 좌굴이 발생하는 것을 예측할 수 있다.

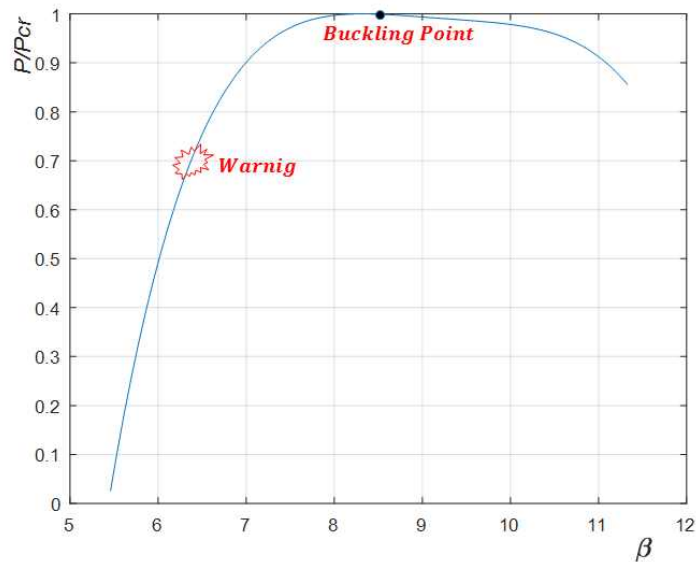


나. 그림 6. β -수직변위 그래프



나. 그림 7. β -수평변위 그래프

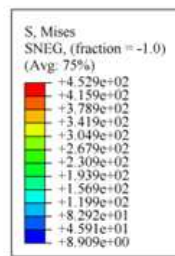
전산해석 또는 실험을 통해 좌굴 발생 시 β 를 미리 구하고, 실시간으로 수행되는 영상분석 기반 계측을 통해 β 가 위험범위(좌굴하중의 약 70%, $P/P_{cr} = 0.7$)에 도달했을 때 좌굴 발생을 예측 및 경고할 수 있다. (ex) $\beta \geq 6.3$ ($P/P_{cr} = 0.7$) 이면 좌굴 발생 위험)



나. 그림 8. β -정규화 하중 그래프

(4) 가설재 붕괴예측 기법 내용 (부재길이· 수평변위의 비율을 통한 붕괴 예측)

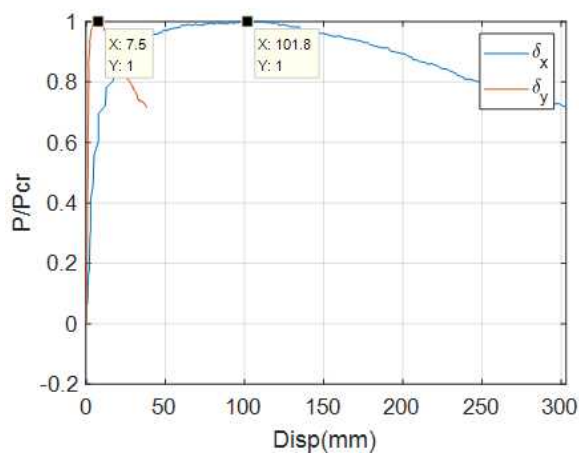
수직변위의 계측이 어려울 시 전체 부재길이와 수평변위의 상대적인 비율로 좌굴을 판단할 수 있다. 부재길이· 수평변위의 비율을 $\alpha = \frac{\delta_x}{L}$ 라 설정하고, 전산해석 또는 실험을 통해 좌굴 시 평균적인 α 값을 미리 구할 수 있다. 따라서, 전체 부재길이와 계측을 통해 수평변위의 계측을 통해 α 값이 좌굴 위험구간에 도달하는 것을 판단할 수 있다.



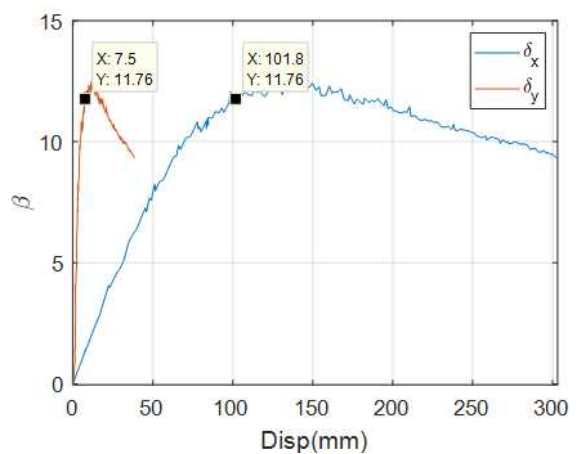
나. 그림 9. 수평변위만 계측 가능할 시 좌굴판단

(5) 실험 데이터 분석을 통한 개발 기법 검증

2-2-2-나. 절에서 수행한 가설 구조물 수직 부재의 좌굴 실험 데이터를 활용하여 개발한 붕괴예측 기법을 검증하였다. 다음의 그림 10은 하중 가력 시 발생한 수직·수평변위를 나타낸다. 해당 데이터를 통해 좌굴 시의 수직·수평변위를 파악할 수 있으며, 그림 11의 수직·수평변위의 비율(β) - 변위 관계를 통해 좌굴 시의 β 를 파악할 수 있다.

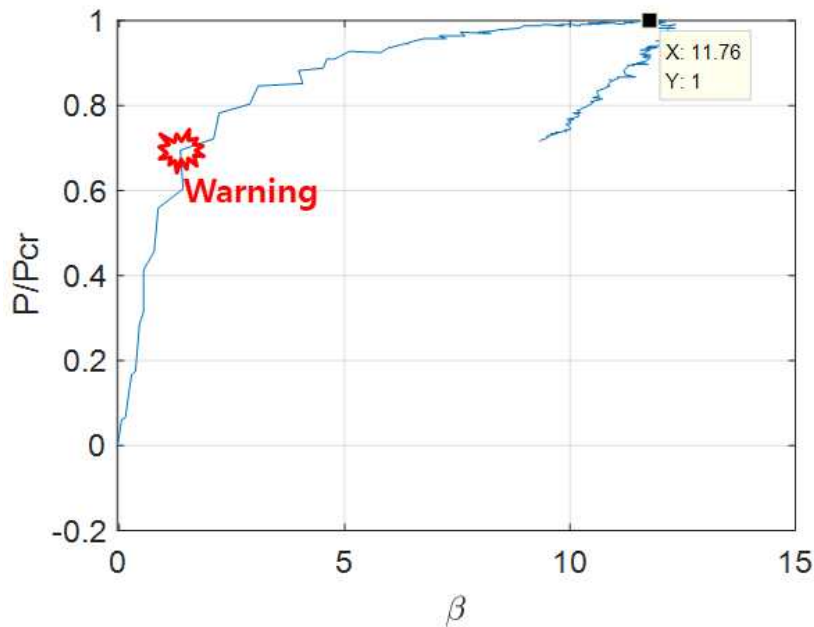


나. 그림 10. 하중-변위 관계



나. 그림 11. β -변위 관계

계측 데이터를 정리하여 분석한 하중과 β 의 관계는 다음의 그림 12와 같다. 앞서 파악한 바와 같이 β 값이 11.76 일 때 좌굴하중에 도달하였음을 알 수 있으며, 좌굴하중의 70% 수준을 붕괴 위험구간 진입점으로 설정할 수 있다. 붕괴 위험구간 진입 시 β 값은 약 2 정도로 나타났다. 실제 현장에서도 영상기반 실시간 계측을 통해 β 값을 파악할 수 있으며, 붕괴 위험구간 진입 여부를 판단할 수 있다.



(6) 결론

본 기법은 영상을 기반으로 하여 동바리의 수직·수평변위를 동시에 계측하고, 이 수직·수평변위의 비율을 이용하여 좌굴붕괴를 판단 및 예측하는 기술이다. 전산해석 또는 실험을 통한 붕괴 시뮬레이션으로부터 붕괴 시 수직·수평변위의 비율을 미리 구하고, 이러한 비율을 기초로 하여 계측과정에서 붕괴예측을 수행하는 기법이다. 동바리의 좌굴예상 부위에 타겟을 부착 혹은 좌굴예상 부위 사전 포커싱을 수행한 후 영상분석을 통해 발생변위를 추적한다. 실제 단관파이프 좌굴실험 데이터를 통한 분석 결과 수직·수평변위(β)가 약 11.76에 가까워질 때 좌굴이 발생함을 알 수 있었으며, 이러한 β 값은 부재의 길이에 무관하게 나타났다. 이를 통해 동일 종류의 수직 부재는 일정한 β 에서 좌굴함을 증명하였으며, 영상기반 계측을 통한 β 값 파악을 통해 좌굴을 예측할 수 있음을 검증하였다. β 값 파악을 위해서는 동시에 수직·수평변위 계측이 가능해야하며, 기존 변위계측 센서와는 달리 영상기반 변위계측으로는 이러한 동시 계측이 가능하다. 그러나 실험에서는 좌굴 방향을 의도하여 계측이 이루어졌기 때문에, 실제 현장 적용을 위해서는 좌굴 면에 수직한 방향에서의 계측이 요구된다. 가설 부재의 약축 설정 또는 다중 각도에서의 촬영을 통한 3차원 계측이 필요하다 판단된다.

2-2-6. 웹/앱 기반 실시간 붕괴위험 무선 경보시스템 개발

(1) 어플리케이션 소개

본 어플리케이션의 명칭은 구조물 붕괴 예측 모니터링 시스템이고, 프로그램 사용 목적은 메인 서버로 전송된 데이터를 분석하여 실시간으로 구조물 붕괴 위험을 모니터링하기 위해 개발되었다. 1차년도에 개발한 모니터링 프로그램과 연동하여 붕괴위험 경보하도록 하였으며, 본 어플리케이션으로 변위 측정 위치의 변위를 실시간으로 확인할 수 있을 뿐만 아니라, 실시간으로 분석 중인 영상이미지를 확인할 수 있다. 또한, 변위 측정 위치에서의 시간이력 변위데이터를 확인하여 구조물의 붕괴 예측을 판단할 수 있다. 해당 어플리케이션은 건설 현장 관리자를 비롯한 관할 관공서 전담인력에게 보급하여 붕괴 위험 시 대피여부를 판단하도록 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대되며, 명확한 보급 대상은 추후 행정적 논의를 통해 확정지어야 한다고 판단된다.

(2) 어플리케이션 기능

어플리케이션 기능으로는 사용자 로그인, 메뉴, 실시간 데이터, IMAGE, 이력 데이터, 실시간 변위가 있다.

(가) 로그인

보안 및 접근 권한을 위해 사용자ID와 비밀번호를 입력하여 로그인한다.

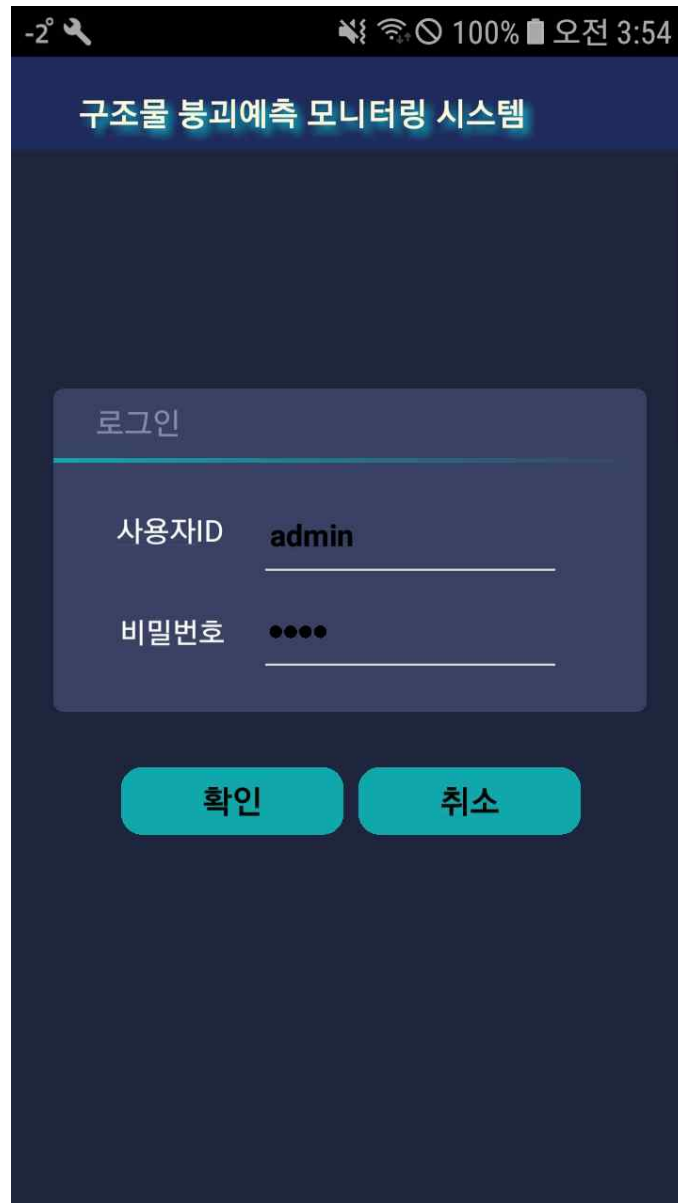


그림 6. 어플리케이션 인터페이스 (로그인)

(나) 메뉴

메뉴 버튼을 클릭하여 실시간 데이터, IMAGE, 이력데이터, 설정 항목으로 이동할 수 있다.



그림 2. 어플리케이션 인터페이스 (메뉴)

(다) 실시간 데이터
실시간 데이터 탭에서는 측정 위치 별 발생한 변위를 실시간으로 확인할 수 있다.



그림 3. 어플리케이션 인터페이스
(실시간 데이터)

(라) IMAGE

IMAGE 탭에서는 측정 위치에서의 변위와 함께 모니터링 중인 이미지를 같이 볼 수 있다.



그림 4. 어플리케이션 인터페이스 (IMAGE)

(마) 이력데이터

이력데이터 탭에서는 측정 위치에서의 시간이력 변위데이터를 그래프로 확인할 수 있다.

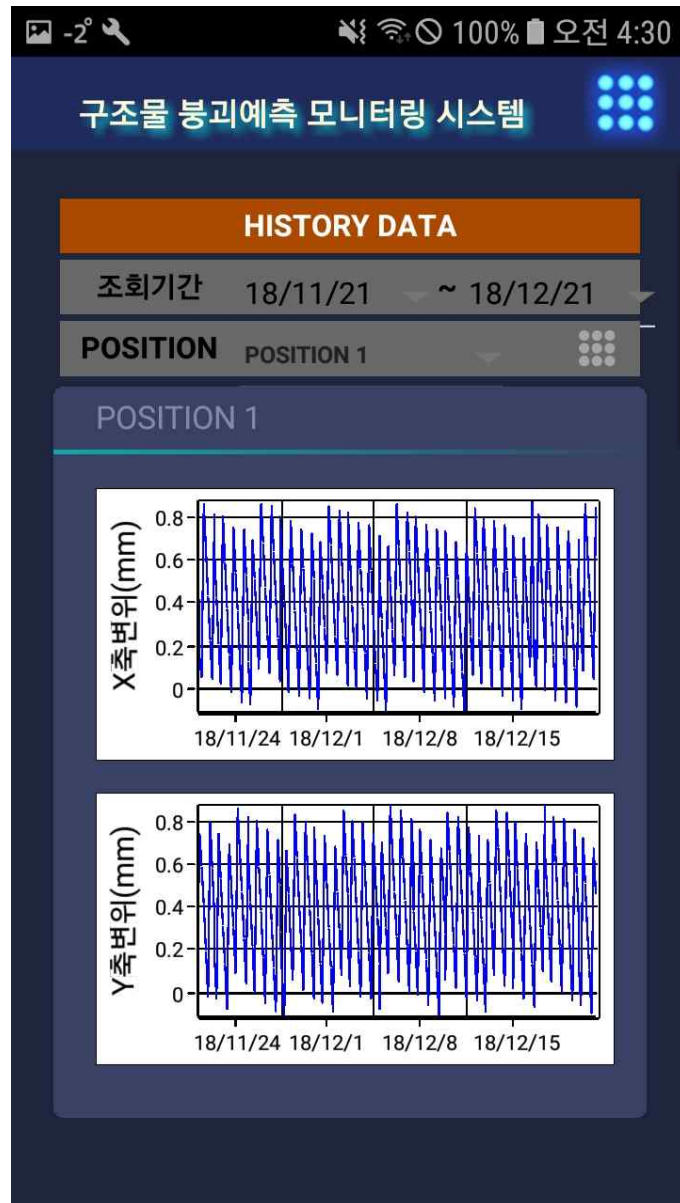


그림 5. 어플리케이션 인터페이스 (이력데이터)

(3) 무선 경보 키트

개발된 모바일 어플리케이션으로 붕괴위험 신호가 전송되면 현장에 설치된 마이크로 컨트롤러 기반 무선 경보 키트에 위험 경보를 전송할 수 있도록 연계 개발하였다. 아래의 그림 6은 붕괴위험 구간 진입 시 무선 경보 알람에 대한 개념도를 나타내며, 그림 7에는 아두이노 보드와 경보 센서를 이용하여 제작한 무선 알람 키트를 나타냈다. 무선 알람 키트는 모바일에서 전송하는 신호를 통해 작동되도록 제작하였으며, 어플리케이션에 발신 기능을 삽입하면 즉시 연동이 가능하도록 계획하였다.



그림 6. 붕괴위험 구간 진입 시 무선 경보 알람 개념도



그림 7. 무선 경보 키트 작동 화면

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3-1. 목표 달성도

가. 정성적 연구목표 달성도

	핵심성과	단위성과	질적성과지표	평가목표 및 착안점	결과물	달성도 (%)
1차 년도 (2017)	가설 구조물 경계선 분리인식 기법	영상 기반 모니터링 시스템 최적화	영상 기반 모니터링 시스템 실시현황 조사	선행연구 조사	선행연구 조사	100
			경계선 분리인식 선행연구 조사	알고리즘 코딩	알고리즘 코딩	100
			분리인식 기법 최적화 방안 제안	변위오차 5%	변위오차 2%	250
		가설 구조물 붕괴위험 기준 산정	국내 가설 구조물 안전기준 검토	구조안전성 관련항목 추출	구조안전성 관련항목 추출	100
			가설 구조물 실험체 가력을 통한 붕괴 실험	검증실험 1회	검증실험 1회	100
	가설 구조물 경계선 분리인식 기법을 적용한 실시간 다중 모니터링 프로그램	기존 구조물 손상 스캐닝 프로그램 벤치마킹	솔버 분석	솔버분석 및 개발 프로그램에 이식	솔버분석 및 개발 프로그램에 이식	100
			모니터링 프로그램 인터페이스 구축	프로그램 인터페이스 구축	프로그램 인터페이스 구축	100
		가설 구조물의 경계선을 이용한 영상기반 다중 모니터링 프로그램 개발	가설 구조물 모니터링 프로그램	프로그램 개발 및 소프트웨어 등록	프로그램 개발 및 소프트웨어 등록	100
			가설 구조물 모니터링 프로그램 오차율개선	계측 오차 5%	계측 오차 1%	500

2차 년도 (2018)	실시간 다중 모니터링 시스템 검증	가설 구조물 축소모델을 통한 실시간 다중 모니터링 시스템 검증	가력실험용 축소모델 실험체 제작	실험체 1건	실험체 1건	100
			변위 비교를 통한 모니터링 시스템 성능분석	변위오차 10 mm	변위오차 2 mm	500
		유사환경에서 의 실험을 통한 실시간 다중 모니터링 시스템 검증	가력실험용 실험체 제작	실험체 1건	실험체 3건	300
			변위 비교를 통한 모니터링 시스템 성능분석	계측 오차 5%	계측 오차 1%	500
			앱 기반 무선 경보시스템 평가	무선경보 키트 제작 및 구동	무선경보 키트 제작 및 구동	100
	앱 기반 실시간 붕괴위험 무선 경보시스템	붕괴 위험 무선경보 어플리케이션 개발	붕괴위험 무선경보 어플리케이션	소프트웨어 등록	소프트웨어 등록	100
			어플리케이션 호환성 검증	모니터링 프로그램 연동	모니터링 프로그램 연동	100

나. 정량적 연구목표 달성도

성과지표		목표	달성(달성률)	비고
논문	SCI급	3	-	
	일반학술지	3	3(100%)	한국풍공학회지 2건
				대한건축학회연합논문집 1건
특허	특허출원	1	1(100%)	“ 구조물 붕괴 예측 장치 및 구조물 붕괴 예측 방법” (출원번호: 10-2018-0048064)
	특허등록	1	-	
소프트웨어 등록		2	2(100%)	“ 구조물 붕괴 예측 모니터링 시스템” (C-2017-027314)
				“ 구조물 붕괴 예측 모니터링 프로그램(Mobile)” (C-2019-000710)
하드웨어 등록		1	1(100%)	“경보알람 장치”
기술이전		1	1(100%)	주식회사 엠텍 기술이전 : 정액기술료 1천만원
연구 기사 홍보		-	1(추가달성)	대한건축학회지 <건축> 1건

4. 연구결과의 활용 계획 등

- 가설 구조물 공사 중 붕괴방지 및 안전시공을 위한 패턴인식기술 현장적용
- 준공중인 건축물의 변위 측정으로 시공의 정확성 증진
- 실시간 모니터링 시스템 특허 출원, 노하우기술이전 및 기술지도 시행



그림 1. 동바리 변위측정



그림 2. 준공 중 건물 및 가설재 변위측정

- 건설작업 시 가설 구조물의 변위 측정으로 인명피해 사전 방지
- 가설 구조물 뿐 아니라 PEB 등 기타 구조물에도 적용가능성이 큼
- 학계 및 관련 업체에 연구결과 발표 및 연구의 결과물을 통한 수업 및 세미나 자료 활용
- 연구에서 수행된 실험의 과정 및 방법을 제공하여 차후 다양한 연구에 응용가능



그림 3. A창고 신축공사 중 가설재 붕괴



그림 4. PEB 구조물 및 화재실험 적용

- 현장 실시간 모니터링 시스템 구축: 가설 구조물에 대한 현장 모니터링 시스템을 구축하여 실시간 모니터링 시스템 구축
- 가설 구조물 실시간 모니터링의 웹, 앱 기반 시스템 구축: 구조물의 붕괴가능성이 있을 때 자동 경보시스템 구축



그림 5. 실시간 모니터링

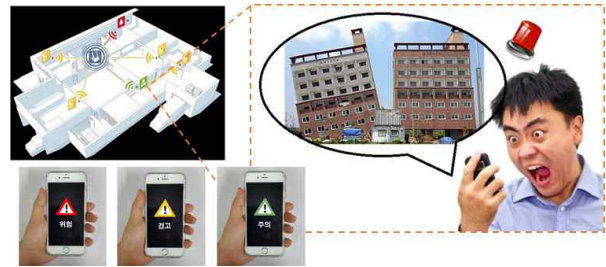


그림 6. 붕괴 전 알림

붙임. 참고 문헌

1. The National Academy of Engineering, "Grand Challenges for Engineering", National Academies Press, Retrieved from www.engineeringchallenges.org, p.56, 2008
2. Khuc, T. and Catbas, F. N., "Computer vision-based displacement and vibration monitoring without using physical target on structures", *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.13, No.4, pp.505-5016, 2016.
3. Heo, S.J., Woo, S.S., Mun, B.W., Mun, D.H., " Analysis of Vibration Acceleration Monitoring Data of Wind-induced Super-tall Building and Effectiveness Evaluation of System Identification Methods by using Output-only Data" , *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, Vol.21, No.1, pp.37-45, 2017
4. Kohut, P., Holak, K., Uhl, T., Ortyl, Ł., Owerko, T., Kuras, P., Kocierz, R., "Monitoring of a civil structure' s state based on noncontact measurements", *Structural Health Monitoring*, Vol.12, pp.411-429, 2013
5. Fukuda, Y., Feng, M.Q., Shinozuka, M., "Cost-effective vision-based system for monitoring dynamic response of civil engineering structures", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol.17, pp.918-936, 2010
6. Fukuda, Y., Feng, M.Q., Narita, Y., Kaneko, S., Tanaka, T., "Vision-based displacement sensor for monitoring dynamic response using robust object search algorithm", *Sensors Journal*, IEEE, Vol.13, pp.4725-4732, 2013
7. Fraser, C.S., Riedel, B., "Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol.55, pp.268-276, 2000
8. White, D.J., Take, W.A., Bolton, M.D., "Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry", *Géotechnique*, Vol.53, No.7, pp.619-631, 2003
9. Park, J.C., Cho, J.S., Gil, H.B. and Shin, J.I., " Vision-Based Technology for Structural Health Monitoring of Bridge," *Magazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.18, No.2, pp.10-16, 2014.
10. <http://blog.naver.com/mtecmttec?Redirect=Log&logNo=220292013969>
11. Lee, J.J., Shinozuka, M., " A vision-based system for remote sensing of bridge displacement" , *Ndt & E International*, Vol.39, No.5, pp.425-431, 2006
12. Kim, S.W., Kim, N.S., " Multi-point Dynamic Displacement Measurements of Structures Using Digital Image Correlation Technique" , *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.13, No.3, pp.11-19, 2009
13. Park, J.W., Lee, J.J., Jung, H.J., Myung, H., " Vision-based displacement measurement method for high-rise building structures using partitioning approach" , *NDT & E International*, Vol.43, No.7, pp.642-647, 2010
14. Lee, J.H., Ho, H.N., Shinozuka, M., Lee, J.J., " An advanced vision-based system for real-time displacement measurement of high-rise buildings" , *Smart Materials and Structures*, Vol.21, No.12, 125019, 2012
15. Choi, H.S., Cheung, J.H., Kim, S.H., Ahn, J.H., "Structural Dynamic Displacement Vision System using Digital Image Processing", *NDT&E International*, Vol.44, No.7, pp.597-608, 2011
16. Lee, J.H., Cho, S.J., Sim, S.H., " Vision-based displacement measurement system operable at arbitrary positions" , *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*

- pection, Vol.18, No.6, pp.123–130, 2014
17. Chen, S., Li, X., Zhang, H., Chen, G., Liu, A., & Du, X., “ Vision-based displacement test method for high-rise building shaking table test” , Journal of Vibroengineering, Vol. 17, No.8, 2015
 18. Kang, I.M., Lee, S.H., Shin, K.J., "Real-Time Displacement Measurement and Collapse Forecasting System using Image Processing", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.33, No.1, pp.27–32, 2017
 19. Kim, B.H., Yeo, K.S., Kim, S.J., “ Photogrammetry-based modal parameter extraction from motion pictures” , Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.20, No.3, pp.308–315, 2010
 20. Kim, S. W., & Kim, N. S. “ Multi-point displacement response measurement of civil infrastructures using digital image processing” , Procedia Engineering, Vol.14, pp.195–203, 2011
 21. Jo, B.W., Lee, Y.S., Kim, J.H., Kim, D.K., Yoon, K.W., "Development of Structure Dynamic Characteristics Analysis System Prototype using Image Processing Technique", The Journal of the Korea Contents Association, Vol.16, No.3, pp.11–21, 2016
 22. Choi, I.S., Kim, J.H., "Measurement of Dynamic Characteristics on Structure using Non-marker Vision-based Displacement Measurement System", Journal of the Computational Structural Engineering. Institute of Korea, Vol.29, No.4, pp.301–308, 2016
 23. Feng, D., Feng, M.Q., "Vision-based multipoint displacement measurement for structural health monitoring", Structural Control and Health Monitoring, Vol.23, pp.876–890, 2016
 24. Shin, S.H., Shin, K.J., Kim, H.J., “ Reliability verification of vision-based dynamic displacement measurement system” , Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol.21, No.3, 2017
 25. The National Academy of Engineering, "Grand Challenges for Engineering", National Academies Press, Retrieved from www.engineeringchallenges.org, p.56, 2008
 26. Khuc, T., Catbas, F. N. (2017). Computer vision-based displacement and vibration monitoring without using physical target on structures. Structure and Infrastructure Engineering, 13(4), 505–516.
 27. Heo, S. J., Park, H. H., Mun, D. H., Lee, S. H. (2017). System identification of a 5 story steel frame under ambient wind loads using RTK-GPS. Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, 21(1), 29–35.
 28. Kohut, P., Holak, K., Uhl, T., Ortyl, Ł., Owerko, T., Kuras, P., Kocierz, R. (2013). Monitoring of a civil structure's state based on noncontact measurements. Structural Health Monitoring, 12(5–6), 411–429.
 29. Fukuda, Y., Feng, M. Q., Shinozuka, M. (2010). Cost-effective vision-based system for monitoring dynamic response of civil engineering structures. Structural Control and Health Monitoring, 17(8), 918–936.
 30. Vest, C. M. (2008). Context and Challenge for Twenty-First Century Engineering Education. Journal of Engineering education, 97(3), 235–236.
 31. Fraser, C. S., Riedel, B. (2000). Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 55(4), 268–276.
 32. White, D. J., Take, W. A., Bolton, M. D. (2003). Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. Geotechnique, 53(7), 619–631.

33. Park, J. C., Cho, J. S., Gil, H. B., Shin, J. I. (2014). Vision-Based Technology for Structural Health Monitoring of Bridge. Magazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 18(2), 10–16.
34. <http://blog.naver.com/mtecmtec?Redirect=Log&logNo=220292013969>
35. Fukuda, Y., Feng, M. Q., Narita, Y., Kaneko, S. I., Tanaka, T. (2013). Vision-based displacement sensor for monitoring dynamic response using robust object search algorithm. IEEE Sensors Journal, 13(12), 4725–4732.
36. Lee, J. J., Shinozuka, M. (2006). A vision-based system for remote sensing of bridge displacement. Ndt & E International, 39(5), 425–431.
37. Kim, S. W., Kim, N. S. (2009). Multi-point dynamic displacement measurements of structures using digital image correlation technique. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 13(3), 11–19.
38. Lee, J. H., Ho, H. N., Shinozuka, M., Lee, J. J. (2012). An advanced vision-based system for real-time displacement measurement of high-rise buildings. Smart Materials and Structures, 21(12), 125019.
39. Choi, H. S., Cheung, J. H., Kim, S. H., Ahn, J. H. (2011). Structural dynamic displacement vision system using digital image processing. NDT E International, 44(7), 597–608.
40. Chen, S., Li, X., Zhang, H., Chen, G., Liu, A., Du, X. (2015). 1819. Vision-based displacement test method for high-rise building shaking table test. Journal of Vibroengineering, 17(8).
41. Shin, S. H., Shin, K. J., Kim, H. J. (2017). Reliability verification of vision-based dynamic displacement measurement system. Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, 21(3), 135–142.
42. Shin, S. H., Park, W. B., Kim, H. J. (2017). Vision-based system identification for MDOF structures through shaking table test. Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, 21(4), 179–186.
43. Shin, S. H., Park, W. B., Seol, D. H., Kim, H. J. (2018). Comparison of vision-based displacement measurement results for various target shooting angles. Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, 22(3).
44. <https://www.sony.co.kr/electronics/handycam-camcorders/fdr-axp55/specifications>
45. <https://www.sony.co.kr/electronics/interchangeable-lens-cameras/ilce-6500-body-kit/specifications>
46. <https://www.costco.ca/Celestron-NexStar-90GT-Computerized-Telescope.product.100229203.html>
47. https://kinemetrics.com/post_products/episensor-es-u2
48. https://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-GR10_83449.htm
49. <http://ekais.kr/ms-laser-displacement-sensor-kl3>
50. ASCE, (2017), Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (7–16), ASCE/SEI

뒷면지

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.