

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘구조물 안전성 향상을 위한 가속도계 및 GPS-RTK 융합을 통한 구조물 6자유도 동적거동 정밀계측 (변위오차 2mm급) 시스템 개발 및 상용화’(연구개발 기간 : 2015. 6. ~ 2018. 6.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018. 8. 2.

주관연구기관명 : 한국과학기술원 (대표자) 신 성 철

공동연구기관명 : 풍산 FNS (대표자) 류 상 우

참여기관명 : (대표자)



주관연구기관책임자: 손 훈
공동연구기관책임자: 천성욱
참여기관책임자:

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	16CTAP－C097371－02	해당 단계 연구 기간	2017. 6. 19. ~ 2018. 6. 18.	단계구분	3/3 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	첨단융합			
연구과제명	대과제명	－			
	세부과제명	구조물 안전성 향상을 위한 가속도계 및 GPS－RTK 융합을 통한 구조물 6자유도 동적거동 정밀계측 (변위오차 2mm급) 시스템 개발 및 상용화			
연구책임자	손 훈	해당단계 참여 연구원 수	총: 22 명 내부: 22 명 외부: 0 명	해당단계 연구개발비	정부: 300,000 천원 기업: 200,000 천원 정부 외: 천원 계: 500,000 천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 28 명 내부: 28 명 외부: 0 명	총 연구개발비	정부: 900,000 천원 기업: 200,000 천원 정부 외: 천원 계: 1,500,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국과학기술원 건설환경공학과			참여기업명 풍산 FNS	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
3축 가속도계와 GPS－RTK를 융합하여 구조물 6자유도 변위, 속도, 가속도, 각변위를 변위기준 2mm 이하의 오차와 100Hz 이상의 샘플주파수로 실시간 계측할 수 있는 구조물 변위 모니터링 시스템 시작품 개발 및 상용화 - 영종대교(인천), 이순신대교(여수), 시후멘대교(중국), San Francisco－Oakland Bay Bridge(미국) 현장 실험을 통해 2mm 급 수준의 정밀도 검증 - 연구개발성과의 기술이전 3건 (풍산 FNS, 티엠이엔씨, 이제이텍) - 공인인증 획득 (3건) 및 건설신기술 출원 (1건) 을 통한 상용화 - 국내, 미국, 중국, 말레이시아 등 현장 검증을 통한 국내외 건설 인프라 유지관리 시장 진출				보고서 면수	66

〈 요약 문 〉

연구의 목적 및 내용	- 최종목표: 사회기반시설 및 건설구조물 건전성 모니터링, 정밀시공, 내하력 평가의 정확도 향상을 위해, 3축 가속도계와 GPS-RTK를 융합하여 구조물 6자유도 변위, 속도, 가속도 및 각변위를 변위기준 2mm 이하의 오차와 100Hz 급의 샘플주파수로 계측 가능한 세계 최초/최고 구조물 동적거동 모니터링 시스템의 개발 및 상용화(판매단가 1천만원 수준) - 당해연도 목표: (1) 실시간 6자유도 동적거동 모니터링 시스템 시제품(S/W) 개발, (2) 공인인증 및 건설신기술 인증을 통한 상용화				
연구개발성과	- 구조물 6자유도 동적거동 실시간 산정기법: GPS의 속도 계측치와 RTK 위치 계측치, 가속도계의 가속도 계측치를 융합하여 오차 2 mm 수준, 샘플주파수 100 Hz로 3축 변위, 속도, 가속도를 실시간 동시 산정하는 알고리즘 개발 - 실시간 6자유도 동적거동 모니터링 시스템 시제품: 1차년도에 개발한 GPS-RTK 변위계측 모듈과 3축 가속도계 모듈을 통합하여 계측 데이터 패킷을 서버로 전송하는 통합 모듈 시제품 개발 - 영종대교(인천), 이순신대교(여수), 시후멘대교(중국), San Francisco Bay Bridge(미국) 등 현장 실험으로 2mm 급 수준의 정밀도 검증 1차년도 기술이전: (주)풍산FNS 비독점적 통상실시권 (정액기술료 총 2억원) 2차년도 기술이전: (주)이제이텍, (주)티엠이앤씨에 비독점적 통상실시권 (정액기술료 총 1억원) 계약완료 - 건설신기술 출원: 1차심사 통과 및 현장실사 완료(2차심사 8월 예정) - 영종대교 교량계측시스템 구축사업 참여 (총 49억원 규모의 사업)				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 변위, 속도, 가속도, 각변위의 6자유도 동적거동을 동시에 계측할 수 있어 기존 가속도계, 경사계, RTK-GNSS를 하나의 시스템으로 대체 가능하므로 계측의 편의성과 적용범위가 증대 - 부착식 센서를 통해 변위계측이 가능하므로 해상장대교량, 원자력발전소, 댐, 항만, 해상 플랜트, 지진 변위 계측 등 다양한 분야에 적용 가능 - 국내외 현장적용실험: 관리주체와의 긴밀한 협의 하에 영종대교와 같은 구조물의 내하력 평가시험 및 중국, 미국 등 해외현장에 적용하여 국내외 시장진출 모색 - 수요처 및 해외시장 개척 (2018년 이후): 연구성과 홍보, 국내판로 모색 및 확장, 해외 시장 개척을 통해 시장 진입, 점유율 확대, 신시장 진출을 통해 과제 종료후 5년간 35억원, 시장 안착시 연간 80억원의 매출 기대				
핵심어 (5개 이내)	동적거동 계측	구조물 모니터링	데이터융합	GPS-RTK	가속도계

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	▪ Objective: To develop and commercialize dynamic response monitoring system of structures for health monitoring, precise construction and load capability assessment of civil infrastructures. The system measures 6DOF displacement, velocity, acceleration and angular displacement with 2mm of RMS error and 100Hz of sampling frequency by fusing the data obtained from a 3 axes accelerometer and a GPS-RTK. ▪ Objective of the year: (1) development of a 6DOF structural response estimation algorithm through the data fusion of acceleration and GPS measurements, (2) Development of prototypes of 6DOF structural response monitoring system(H/W)				
Results	▪ Real-time algorithm for estimating 3-axis displacement, velocity, acceleration and 3D angular displacement simultaneously by fusing velocity measurement of single GPS, displacement measurement of GPS-RTK and acceleration measured by accelerometer ▪ Sensor module prototype integrating GPS-RTK displacement measurement module and 3D accelerometer module developed in the 1st year and transferring data packets to a server ▪ Technology transfer in 1st project year: Poongsan FNS (USD 200,000 of fixed amount licensing fee) ▪ Technology transfer in 2nd project year: EJtech and T.M.Enc (USD 100,000 of fixed amount licensing fee) ▪ Technical commercialization: Participation in a Yeongjong grand bridge measurement system establishment project (Size of project: USD 4,900,000)				
Expected Contribution	▪ Field application tests: Youngjong grand bridge, POSCO building (2017) and overseas bridge sites including the Unites States and China ▪ KOLAS Certification (2018) / Preparation for NET ▪ Promotion of development result, domestic market exploitation, global market entry and extensiveness of global market (after 2018). Sales are expected at USD 350,000 for 5 years after completion of the project, and USD 800,000 per year with 1% global market share				
Keywords	Dynamic response measurement	Structural health monitoring	Data fusion	GPS-RTK	Accelerometer

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	6
2. 국내외 기술 개발 현황	11
3. 연구 수행 내용 및 성과	21
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	53
5. 연구개발성과의 활용 계획	55
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	57
7. 연구개발성과의 보안등급	58
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	59
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	60
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	61
11. 기타 사항	62
12. 참고 문헌	63

제1장 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적



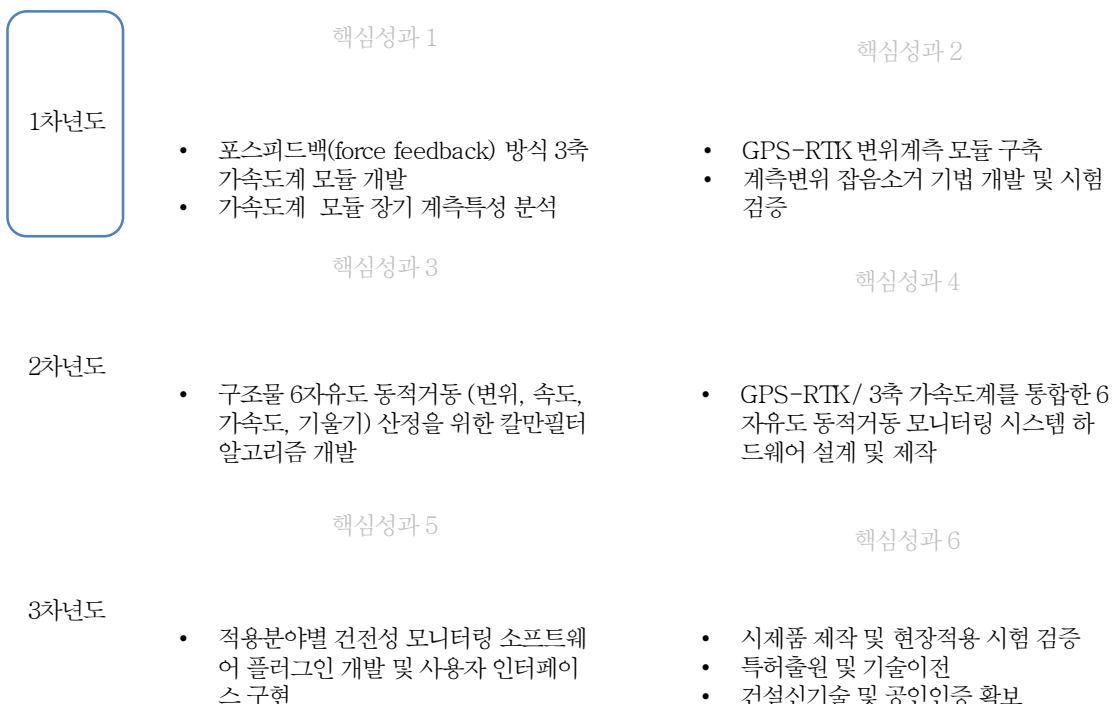
■ 최종목표

3축 가속도계와 GPS-RTK를 융합하여 구조물 6자유도 변위, 속도, 가속도 각변위를 변위기준 2mm 이하의 오차와 100Hz 이상의 샘플주파수로 계측하는 시스템 개발 및 상용화 (TRL 9단계, 세계 최초/최고 기술, 제품단가 1천만원 이내)

■ 최종성과물

- 구조물 거동 장기계측이 가능한 6자유도 동적거동 모니터링 시스템 시제품
- 특허출원, 참여기업으로의 기술이전, 품질시험, 공인인증 및 건설 신기술 획득
- 교량/고층건물 건전성 모니터링 및 내하력검사 검증 실험을 통한 실용화 및 상용화

■ 전체과제 구성 및 연계성



2. 연구개발 필요성

2.1. 연구개발 배경

- 국민의 안전의식 변화: 경주리조트 체육관 붕괴사고, 석촌호수 싱크홀 발생 등 연이은 구조물 붕괴사고로 인해 대형참사가 발생하면서 안전에 대한 국민의 불안감이 팽배하고 있다. 최근 대국가 신뢰도에 까지 악영향을 미치기 시작하면서, 사회기반시설물의 안전성 확보 요구가 증대되고 있다[1].
- 노후화 구조물의 증가: 전 세계적으로 인프라 구조물 및 노후화 구조물이 급격히 증가하고 있는 추세다. 국내 교량과 터널의 경우 2025년에는 지금보다 그 수가 41% 증가하고, 30년 이상 고령화 구조물의 경우 7배 정도 증가할 것으로 예상된다[2]. 따라서 향후 고령화 구조물의 증가 및 성능 저하로 인해 유지보수에 필요한 경제적 부담이 증가할 것으로 예상된다.
- 사회기반시설물 안전/유지관리 인력 부족: 사회적으로 구조물 안전관리 및 유지관리의 필요성이 증대되고 있음에도, 3D 직종이라는 인식으로 인해 구조물 안전관리 인력의 연간 이직률이 매우 높아 수적, 질적 측면에서 전문인력 수급이 매우 어려운 상황이다 (2013년 기준 한국도로공사 구조물 안전 관리 인력의 연간 이직률 60%, 1인당 관리 교량 수 25.1[2]).

2.2. 연구개발 필요성

- 계측장비의 해외의존도 심각: 구조물 동적거동 계측에 사용되는 센서 및 계측장비는 해외 의존도가 대단히 높으며[3], 특히 가속도계 및 변위 센서는 대부분 해외제품이다. 일례로 남해대교, 광안대교 등 국내 장대교량에 적용된 가속도계는 전부 미국 Kinemetrics 사의 제품이다[3]. 국내 유지관리 기술의 비약적 발전을 위해서는 기술의 바탕이 되는 센서 및 계측장비의 국산화가 절실하다.
- 구조물 동적변위 계측의 중요성: 구조물의 과다변위 발생은 안전성과 직결되므로 건전성 평가에 있어 변위는 가장 중요한 동적응답이다. 교량의 정/동적처짐(변위)은 허용응력법, 강도설계법에 근거한 교량 설계에 있어 기본이 되는 물리량[4]이며, 고층빌딩에서도 최상층 변위이력 및 층간변위를 통해 건전성이 평가된다[5].
- 기존 동적변위 계측기술의 한계: 변위는 고정지점을 기준으로 계측되는 물리량으로 변위계측의 중요성에도 불구하고, 현실적으로 계측하는 것이 어렵다. 구조물 변위계측에 가장 많이 활용되는 LVDT(linear variable differential transformer)의 경우 고정지점 확보를 위해 복잡한 가설구조물의 설치가 필요하므로 설치시간 및 비용이 과다하고 상시계측이 어렵다. GPS-RTK의 경우 샘플주파수와 변위 정밀도가 각각 20 Hz와 1-5cm에 불과[6]하며, 특히 수직변위 계측에 취약하다. 레이저 변위센서, LDV, LiDAR 역시 기준좌표가 될 지면에 설치해야 하므로 장기거동 모니터링에 있어서 적용성이 떨어진다. 특히 LDV와 LiDAR는 장비 가격이 1억원을 상회하여 망실 및 도난의 위험 때문에 일상계측 현장에 적용하기 어렵다.

2.3. 개발기술 독창성

- 6자유도 동적 거동 계측: 하나의 센서로 구조물의 6자유도 변위, 속도, 가속도 및 각변위를 동시에 계측할 수 있는 시스템은 현재 전세계적으로 상용화된 사례가 없다 (세계 최고/최초).
- 고정밀도 및 고해상도 변위 계측: 제안 시스템은 가속도계/GPS-RTK의 융합을 통해 기존 변위계측 기술보다 높은 정밀도 (2mm 이내)와 샘플주파수 (100Hz)로 변위를 계측한다.
- 높은 가격 경쟁력: 높은 정밀도 및 샘플주파수 해상도에도 불구하고 기존 GPS-RTK (4,500만원), LDV 및 LiDAR (1억 이상) 장비와 비교해 월등히 저렴한 가격으로 상용화 가능할 것으로 예상된다 (1,000만원 이내).
- 다양한 적용 분야: 제안된 6자유도 동적거동 계측장비의 경우 일체형으로서 교량, 건물, 원전 시설물, 풍력 발전기, 댐 등 다양한 대상 구조물에 설치하여 시공중 및 상시 동적거동 계측이 가능하며, 휴대용

장비로 내하력 검사 및 현장실험 장비로도 활용 가능하다.

- 해외시장 개척 용이성: 일반적으로 건설분야에서 개발되는 신기술을 해외에 적용하기 위해서는 적용 현지의 설계/시방서 규정 및 관련 건설 분야 법규 심의를 통과하고 논의해야 하므로 상대적으로 해외 영업 및 사업화가 어렵고 현장 적용까지의 기간이 오래 소요된다. 반면 제안 기술은 이미 전세계적으로 상용화되어 널리 보급된 GPS 및 가속도계 계측장비 관련 규정만 준수하면 곧바로 적용이 가능하므로 해외시장 개척이 상대적으로 용이하다.

2.4. 타산업 연계 및 국제협력 가능성

- 타산업 연계: 본 과제는 일차적으로 제안된 6자유도 구조물 거동 모니터링 기술의 사회기반 시설물 및 건설 구조물 적용을 목표로 하나, 추후 다음과 같은 타산업계로 적용 확대 및 시장 개척이 가능하다.
 - (1) 지진계측 분야: 현재 국내 지진관측소에서는 대부분 해외에서 생산된 가속도계와 지진계(속도계)를 통해 지진을 관측하고 있으나, 변위의 경우 지반진동으로 인해 고정점 확보가 힘들어 계측이 어렵다. 본 제안 시스템은 지진 계측 뿐 아니라 지진으로 유발되는 영구변위까지 계측 가능하므로 지진계측 시스템의 효용성 및 정밀도를 제고할 수 있다.
 - (2) 국방분야: 제안 시스템은 미사일 및 군용 무인비행체에 탑재가 가능하므로, 비행체의 정밀위치추적을 통해 군 무기체계의 정밀타격 성능을 제고할 수 있으며, 국가 미사일 방어망 국산화 및 국산 무기체계 개발에 활용가능성이 충분하다.
 - (3) 신재생에너지 분야: 풍력발전기 주요 구조부재 및 블레이드의 변형 및 장기처짐을 실시간 계측함으로써 풍력발전기 구조 건전성 모니터링에 활용가능하다.
 - (4) 무인자동차 분야: 자동차, 로봇 등 무인자동차 분야에 필수적인 위치인식 및 제어기술에 적용할 수 있으며, 나아가 로켓, 자율주행 자동차, 국토지리정보 데이터베이스 구축 등의 분야에도 활용가능하다.
- 국제협력 가능성: 제안기술과 관련해서는 기술개발을 위한 국제협력 보다는 제안기술의 해외현장 적용 실험 및 시장개척을 위한 국제협력 가능성이 높다. 특히 최근 사회기반시설 건설이 급격히 증가하고 있는 중국, 인도, 베트남 등과 같은 신흥국과의 국제 협력을 통해 신설 구조물 시공중 또는 상시 구조물 건전성 모니터링 시스템 구축사업에 참여할 수 있다. 또한 사회기반시설물의 노후화가 급속히 진행되고 있는 선진국들과는 기존 교량의 노후도 및 건전성 평가를 위해 실시되는 동적거동 기반 내하력 평가실험에 제안기술을 활용하는 국제협력 및 사업화를 추진을 고려할 수 있다.



그림 1. 제안과제는 지진계측 데이터를 통한 영구변위 추정, 국방 무기체계의 정밀타격 성능 제고, 신재생에너지 구조부재 변형 계측, 무인자동차 분야의 위치인식 등 다양한 분야로의 적용확대 및 시장진출이 가능하다.

3. 연구개발 범위

구분(연도)	핵심성과	단위성과	연구개발 수행 내용
1차년도 (2015.06~ 2016.06)	사회기반시설 및 구조물 장기거동 모니터링용 3축 가속도계 개발	포스피드백 방식 3축 가속도계 모듈 개발	- 가속도계 성능 목표 설정 및 3축 가속도계 모듈 개발 - 가속도계 원가절감 요소 도출 및 시제품 제작 - 기존 상용 가속도계와의 비교를 위한 진동대 실험
		가속도계 장기 계측특성 분석	- 개발 가속도계 모듈과 Kinematics ES-U2의 성능비교 실험 수행 - 가속도계 장기간안정도 특성실험 수행 - KOLAS 인증 획득
	GPS-RTK 변위계측기법 개발	GPS-RTK 변위계측 시스템 구축	- GPS-RTK 칩셋 목표성능 설정 및 최적 모델 선정 - GPS-RTK 정밀 변위획득 모듈 구축 - GPS-RTK 변위계측 시스템 보완사항 도출 및 계측성능 평가를 위한 진동대 시험 수행
		계측변위 잡음소거기법 개발 및 실험검증	- GPS-RTK 오차요인 분석 - 정밀도 향상을 위한 변위계측 모듈 안테나 선정 - 저주파수 잡음소거 및 샘플주파수 향상 알고리즘 개발 - 계측 정밀도 평가 및 적용성 평가를 위한 대전 엑스포다리 및 영종대교 현장실험
2차년도 (2016.06~ 2017.06)	GPS-RTK 및 3축 가속도계 데이터 융합을 통한 6자유도 동적거동 실시간 산정기법	구조물 6자유도 동적거동 (변위, 속도, 가속도, 기울기) 산정을 위한 칼만필터 알고리즘 개발	- 단일 GPS 속도 계측치 정밀도 평가 - 단일 GPS 속도 계측치를 이용한 데이터 융합 기법 개선 - 제안 기법을 구현한 소프트웨어 제작 - 실험실 수준 실험을 통한 성능 검증
		정밀도 평가를 위한 국내외 현장실험	- 인천 영종대교 현장 검증실험 - 여수 이순신대교 정밀도 검증 실험 - 중국 Ningbo 시후멘대교 정밀도 검증 실험
	실시간 6자유도 동적거동 모니터링 시스템 시제품(H/W)	GPS-RTK / 3축 가속도계를 통합한 6자유도 동적거동 모니터링 시스템 하드웨어 설계 및 제작	- GPS-가속도계 시스템 하드웨어 통합을 위한 센서부 및 기구부 제작 - 센서 계측 데이터 취득 및 전송을 위한 DAQ 통합 보드 제작 - Rover 및 base 센서모듈 시제품 개발
		멀티 센서 네트워크 설계 및 구현	- GPS-RTK 일대다 통신 채널 구축 - 멀티센서 네트워크 구축을 위한 UDP 통신망 설계 및 구현

구분(연도)	핵심성과	단위성과	연구개발 수행 내용
3차년도 (2017.06~ 2018.06)	실시간 6자유도 동적거동 모니터링 시스템 시제품 (S/W)	적용분야별 건전성 모니터링 소프트웨어 플러그인 개발 및 사용자 인터페이스 구현	- 하드웨어 시제품에서 전송받은 패킷에서 6자유도 동적거동 계측치 추출기법 개발 - 디지털 패킷 형태로 서버에 무손실 전송할 수 있는 기법 개발 6자유도 동적응답(3자유도 변위, 속도, 가속도 및 3자유도 각변위)을 그래프 형식으로 실시간 확인할 수 있는 기본 계측 인터페이스 구축 - 동적응답 데이터 산정 코드의 모듈화를 통한 범용성 및 확장성 확보
	공인인증 및 신기술 획득을 통한 상용화	시제품 제작 및 현장적용 시험 검증	- GPS-RTK 칩셋 및 GPS 안테나 재선정 - GPS-RTK 칩셋: Piksi Multi, Swift navigation - GPS 안테나: GPS 500, Swift navigation - 실시간 6자유도 변위 모니터링 시스템 케이스 재설계를 통한 사이즈 축소 (115 x 115 x 110 mm) - San Francisco-Oakland Bay Bridge 현장실험을 통한 개발 시스템 검증: 변위 계측 정확도: 1.68 mm - Qingfeng Bridge 현장실험을 통한 개발 시스템 검증: 변위 계측 정확도: 1.91 mm
		건설신기술 및 공인인증 확보	- 성능시험 공인인증 획득 (한국산업기술시험원, KOLAS 인증기관) - 환경 적응력 공인인증 획득 (충남테크노파크 자동차 부품센터, KOLAS 인증기관): 저장/운용, 저온 저장/운용, 진동, 충격 시험 (MIL-STD-810) - 방진/방수 보호 공인인증 획득 ((주)원텍, KOLAS 인증기관): IP67 (KS C IEC 60529) - 건설신기술 신청 - 신청기술명: 가속도계와 GPS-RTK를 이용한 동적거동의 실시간 정밀계측 기술 1차 심사 통과 (신규성, 진보성, 경제성) - 현장실사를 통한 정밀도 및 사용성 검증완료 2차 심사 (적용성, 보급성) 8월 예정
		연구성과 홍보 및 국내외 판로 모색/확장	- 관련 국제학회 기조연설 7th International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (San diego, California, USA, 2017) 13th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology (Tokyo, Japan, 2017) - 기술 홍보 2017 국토교통과학기술대전 참가 (2017.04.24.-26) - 발명의 날 기념식 우수 발명품 전시 (2017.05.16.) - The 7th World Conference on Structural Control and Monitoring (Qingdao, China, 2018.07.22.-25) 참가 - 국내외 판로 모색 및 확장 2018년 하반기 대전시와 협업을 통해 유등교, 신상교, 죽동천교 중에 1개 교량에 개발 시스템 설치 예정 - 중국 CCCC, 미국 Caltrans와 협업 및 기술 시연을 통한 향후 판로 모색 중

제2장 국내외 기술 개발 현황

1. 국내외 기술 동향

- 변위센서를 통한 동적변위 계측기술

관련기술 동향		
기업/기관	국가	보유기술/수행연구
Em4Sys (박기환)	한국	속도, 변위 계측용 LDV 개발 · 상용화
연세대학교 (박효선)	한국	지상 LADAR를 이용한 구조물의 건전성 진단방법 개발
부산대학교 (김남식)	한국	동영상 카메라를 이용한 변위 계측 시스템
세종대학교 (이종재)	한국	2대의 카메라로 구조물의 각변위를 계측
Polytec	독일	장거리 / 고분해능 스캐닝 LDV 등 다양한 제품 개발
MetroLaser	미국	동시에 16개 지점의 측정이 가능한 LDV 개발
Univ. of Wisconsin-Madison	미국	스캐닝 LDV의 자유진동 응답을 이용한 모달 특성 산정
Imperial College	영국	스캐닝 LDV의 속도측정을 통한 모달 특성 연구
도쿄대학교	일본	상시진동 하에서 LDV를 이용한 교량 손상평가
Riegl	오스트리아	3차원 지형지물 계측용 장거리 레이저 스캐너 상용화
Faro	독일	100m 급 고속 3차원 레이저 스캐너 상용화
Universita di Parma	이탈리아	LADAR 기법을 동적변위 측정에 활용
Hiroshima Univ.	일본	10,000 fps의 고속 카메라를 이용한 실시간 모달 변수 추정
Politecnico di Milano	이탈리아	비전 기반 진동 측정을 통한 구조물의 동특성 파악
Univ. of Massachusetts Lowell	미국	카메라 2대로 계측한 풍력발전기 운영 데이터를 이용해 형상 정보를 추출

- 국내: (1) Em4sys가 유일하게 LDV 상용화에 성공한 바 있으나[7], 변위계측의 정확도에 한계가 있어 이를 활용한 연구는 주로 속도계측에 국한되어 있음. (2) 지상 LADAR 시스템을 이용해 구조물 변위를 계측하는 연구가 수행됐으나[8], 낮은 샘플주파수의 한계 때문에 주로 정적변위 계측에만 활용되고 있음. (3) 비전 기반 변위계측기술은 최근 국내에서 활발히 연구되고 있는 분야로, 1대의 고 해상도 카메라를 사용한 면내변위 계측과, 다수의 표적판과 카메라 2대를 이용한 3차원 변위 계측 연구가 시도된 바 있음[9,10].
- 해외: (1) LDV의 경우 독일, 미국기업을 중심으로 고성능 기기가 상용화되어 널리 활용되고 있으나, 국내와 마찬가지로 주로 속도 계측에 국한되어 있음[11-12]. (2) LADAR는 Riegl, Faro를 필두로 다수의 해외업체에서 고성능 3차원 지형지물 측량용 스캐너를 출시, 판매 중이고, 미국 등지의 유수 연구기관에서는 구조물 변위 측정 및 검사 분야에 LADAR 시스템 적용 가능성 여부를 활발히 연구 중이며[13-16] 향후 그 응용범위가 더욱 확장될 것으로 예상됨. (3) 국내와 마찬가지로 카메라를 이용해 구조물의 동적응답이나 동특성을 획득하려는 비전센서 연구 역시 꾸준히 지속되고 있음[17].

전망 및 한계

- 대부분의 토목구조물은 LDV를 이용한 변위 계측에 있어 실험실 수준보다 그 환경이 극히 열악하므로, LDV 특유의 스펙클 잡음(speckle noise)이 많이 발생함. 또한 변위계측에 있어 신호가 왜곡되는 현상을 보이므로 대형구조물 적용에 한계가 있음.
- 레이저 기반 지상 LADAR 시스템은 지형 및 구조물의 3차원 형상 데이터를 취득하는 용도로 개발됐기 때문에 구조물 동적응답 계측용으로 활용하기에는 정밀도가 떨어지며, 거울의 회전을 통해 변위를 계측하므로 샘플주파수가 낮다는 한계를 보임.
- 비전기반 계측의 경우 변위계측을 위해 계측지점에 표적판을 부착해야 하므로 번거롭고, 표적판을 붙인 특정 지점만의 응답을 계측할 수 있음. 더불어 카메라 촬영이 불가능한 어두운 곳 및 야간에는 적용에 한계가 있으므로 향후 이 부분에 관한 보강연구가 절실함.
- 상기 기술한 모든 변위센서는 지면상의 고정점에 설치해야 하므로 해상교량 모니터링, 지진시 계측이 어렵고, 단가가 높아 근본적으로 상시 모니터링에 적용이 어려움. 따라서 구조물 단기 계측에 주로 활용될 것으로 예상되며, 적용성 확대를 위해서는 많은 기술발전이 필요함.

■ GPS 기반 변위계측기술

관련기술 동향		
기업/기관	국가	보유 기술 / 수행 연구
인천대학교 (최병길)	한국	GPS를 이용한 장대교량 실시간 거동 모니터링 연구
비티컨설턴트	한국	대형구조물 모니터링용 GPS-RTK 기반 변위계측 시스템 현장적용
포스코건설	한국	자사 송도사옥 풍하중 모니터링 시스템에 GPS-RTK 적용하고 상시계측 수행
부경대학교 (이종출)	한국	GPS-RTK를 이용한 고층구조물 변위관리 시스템 및 소프트웨어를 개발
연세대학교 (박효선, 손홍규)	한국	기지국 거리에 따른 오차범위를 정량적으로 분석하고 모형실험을 통해 GPS 변위계측 및 모니터링 가능성을 검증
시미즈 건설	일본	GPS-RTK를 이용한 건물의 풍하중 응답 계측
Univ. of California	미국	GPS-RTK를 이용한 지진 영구변위 계측
Univ. of Pantras	그리스	10Hz 샘플주파수의 DGPS로 건물모형의 3차원 변위를 계측
Univ. of Nottingham	영국	통합 GPS-RTK 시스템으로 타워의 지진응답 계측
Exeter Univ.	영국	GPS-RTK를 이용한 장대교량 모니터링 연구 수행
Univ. of Illinois	미국	여러 개의 저가형 GPS 센서의 계측치 평균을 통해 GPS의 정밀도를 개선
SwiftNav	미국	100만원 안팎의 저가형 GPS-RTK 모듈 상용화 (정밀도 2-5cm, 샘플주파수 최대 50Hz)

- 국내: (1) GPS의 최대 단점인 정밀도 문제를 대폭 개선한 GPS-RTK의 도입을 계기로 국내에서도 GPS 기반 변위계측에 관한 연구가 활성화되고 있음[19-21]. (2) 현재 시공중, 완공후 구조물 모니터링 용도로 GPS-RTK 시스템이 영종대교[22], 포스코 송도사옥[19], 인천대교[23] 등 대형 사회기반시설 및 빌딩시설에 많이 적용되고 있는 추세임. (3) GPS-RTK의 가장 큰 문제점은 낮은 계측 정밀도로, 정밀도 향상을 위해 기상상태, 주변환경, 센서 배치 등 여러 조건에서의 오차 분석연구가 수행된 바 있으나 후속 연구는 미진한 상황임.
- 해외: (1) 지진계측, 지반변위, 교량, 빌딩 등 여러 분야에 GPS-RTK의 적용성 연구가 수행되고 있으나, 낮은 샘플주파수 때문에 단기 동적거동 계측보다는, 정적변위의 변화추이를 감시하기 위한 장기 거동계측에 많이 활용되고 있음[24,25]. (2) 경제성 문제를 해결하기 위해 저가형 GPS를 활용한 연구가 시작단계에 있음. (3) 국내와 마찬가지로 GPS-RTK의 정밀도 향상을 위한 연구 사례는 많지 않으며, 정밀도 수준 역시 최소 1cm 이상으로 아직 건설구조물 적용에는 어려움이 있음.

전망 및 한계
■ GPS 기반 변위계측 기술은 RTK(Real-Time Kinematics) 기법이 도입되면서 정확도가 향상되어 최근 각광받고 있으나, 아직 대부분의 상용제품과 연구결과에서 데이터의 품질은 정확도 1-5cm, 샘플주파수 20Hz 정도에 불과하고, 특히 교량 등의 거동분석에 중요한 수직방향 변위계측 정밀도가 2 - 10cm로 수평방향 정밀도보다 2배 가량 낮음. ■ 건설구조물 적용분야에 있어 국내기술 수준은 해외와 큰 차이가 없는 것으로 판단되나, 해외의 경우에는 적용성 확대를 위한 연구가 국내보다 활발하게 진행되고 있음. ■ 대형 구조물 장기 모니터링용으로 적용 가능한 변위센서가 거의 없는 상황에서, GPS외에는 마땅한 대안이 없어 앞으로도 많은 수요가 있으리라 전망됨. 또한 현재 고성능의 저가형 GPS모듈 출시가 본격화되고 있으므로 이를 이용한 구조물 건전성 모니터링 수요가 더 증가할 것으로 예상됨.

■ 이중 데이터 융합을 통한 변위 산정

국외 관련기술 동향		
기업/기관	국가	보유 기술 / 수행 연구
성균관대학교 (박선규, 윤홍식)	한국	GPS-RTK / 가속도계 데이터 융합을 통한 변위산정기법 비교 평가
서울대학교 (이해성, 김호경)	한국	가속도계로 측정된 구조물의 가속도와 간헐적으로 계측한 변위를 융합하여 동적변위 및 속도이력을 추정하는 기법 개발
KAIST (손훈)	한국	가속도의 이중적분시 누적되는 오차를 간헐적으로 계측된 변위로 보정해 정밀한 동적변위를 산정하는 칼만필터 및 스무딩 기법 개발
KAIST (명현)	한국	비전기반 센서, 레이저, RF 기반 거리센서를 융합하여 구조물의 정, 동적 변위를 모니터링하는 칼만필터 기반 6자유도 변위추정 시스템 개발
UNIST (심성한)	한국	서울대학교에서 개발한 기법을 적용, 가속도 및 변형을 계측치를 융합하여 변위를 추정하는 기법 개발
Columbia Univ.	미국	칼만필터를 이용한 가속도와 변위 융합 기법을 제안하였고, 후속연구를 통해 장대교량의 변위산정에 적용함
Univ. of California	미국	지진시 발행하는 대량의 지반변위를 GPS와 가속도계의 융합으로 산정하는 기법 개발
Patras Univ.	그리스	가속도 데이터를 이용한 GPS변위 데이터 잡음소거 기법을 개발하고 이를 단경간 인도교에 적용
Hong Kong Polytech Univ.	홍콩	경험적 모드분석법과 적응필터를 이용한 GPS - 가속도계 데이터 융합기법 개발

■ 국내: (1) 해외에서 관련연구가 주목을 받으면서, 국내에서도 최근 서로 다른 샘플주파수의 이중 데이터를 융합해 정확한 동적응답을 산정하는 연구가 활발히 진행되고 있음[26,27]. (2) 최근 몇몇 연구진에 의해 칼만필터 기반 구조물 동적변위 산정기법이 발표되었으며[28,29], 이는 국외에서 소개된 기법 대비 정확도, 실시간 변위산정 여부, 계산량 측면에서 우수한 것으로 평가됨. (3) 학문적 완성도는 뛰어나나 현재까지 실구조물 현장적용 실적은 아직 미비함.

■ 국외: (1) 미국을 중심으로 구조물 변위산정을 위한 데이터 융합 연구가 이루어지고 있으나[30] 고전적 상태공간모델을 채택하여 산정 정밀도 수준이 높지 못함. (2) 이중 데이터 융합을 통한 변위산정 연구는 해외에서도 사례가 많지 않음. 다만 최근 현장적용 연구가 시도되면서 각종 센서를 융합하여 기술 실용화 단계 진입을 시도하고 있음[31]. (3) 기술의 발전 가능성을 인정받으면서 최근 미국을 위시한 여러 국가의 산학계에서 실용화 연구 계획을 수립 중임.

전망 및 한계

■ 이중 데이터 융합은 서로 다른 샘플주파수를 갖는 둘 이상의 데이터를 융합, 각자의 단점을 보완하고 더욱 정밀한 데이터를 산정하는 기법으로, 향후 대형구조물 등의 변위 계측을 위해 많은 연구와 적용성 검토가 이뤄질 것으로 보임.

■ 현재 대형구조물 장기 거동 모니터링에 적합하고 충분한 정밀도를 제공하는 변위센서가 없는 만큼, 다양한 센서 조합의 적용성 연구를 거쳐 향후 많은 실용화 연구가 예상됨.

■ 국내 개발 기법의 정확도 및 적용성이 해외 기법에 비해 동등 이상의 성능을 보이는 만큼 국내에서도 상용화 연구가 시급한 것으로 판단됨.

2. 관련분야 특허동향

- 본 제안기술과 관련되거나 권리침해의 소지가 있는 특허를 국토교통과학기술진흥원의 특허논문정보 계량분석시스템을 이용해 검색한 결과, GPS 및 가속도계 융합을 통한 구조물 변위산정과 유사한 특허는 전무한 것으로 확인됐다. 따라서 향후 실용화 및 사업화시 연구 성과와 관련되어 분쟁이 예상되지 않으며, 특허 선점을 통한 핵심기술 확보가 가능한 것으로 판단된다.
- 구조물 변위계측 관련 특허의 경우, 국내의 경우 2005년 이후 44건만이 출원 된 것으로 집계됐다. 이는 일본 1300건, 미국 993건, 유럽 167건에 비해 매우 적은 수로, 국내 변위계측 관련 기술개발 노력이 선진국에 비해 매우 뒤처진다는 것을 시사한다. 더불어 국내특허 가운데 기존 변위센서를 이용한 모니터링 시스템이 18건으로 가장 많으나, 이에 비해 변위센서 자체 개발품에 관한 특허는 3건에 불과해 국내 센서분야 원천기술 확보수준이 선진국에 비해 매우 낮은 것으로 분석됐다.
- 해외특허의 경우 구조물 변위계측 관련 출원수가 2007년 이후 매년 꾸준히 300여건 수준을 유지하고 있으며, 전체 특허출원 건수가 2460건에 달한다. 또한 국내와 달리 변위센서 개발품에 관한 해외특허가 2005 ~ 2013년 동안 매년 20% 이상 꾸준히 출원되고 있다. 변위계측 분야에서 특히 일본은 국내의 전체 특허출원 건수의 50%를 차지할 정도로 기술 성숙도가 높다. 그러나 해외특허는 기존 레이저 변위계 등 단거리 센서의 개량품이 주를 이루고 있으며, 국내와 마찬가지로 대형 건설구조물에 적용할 수 있는 관련 특허는 거의 전무한 상황이다.

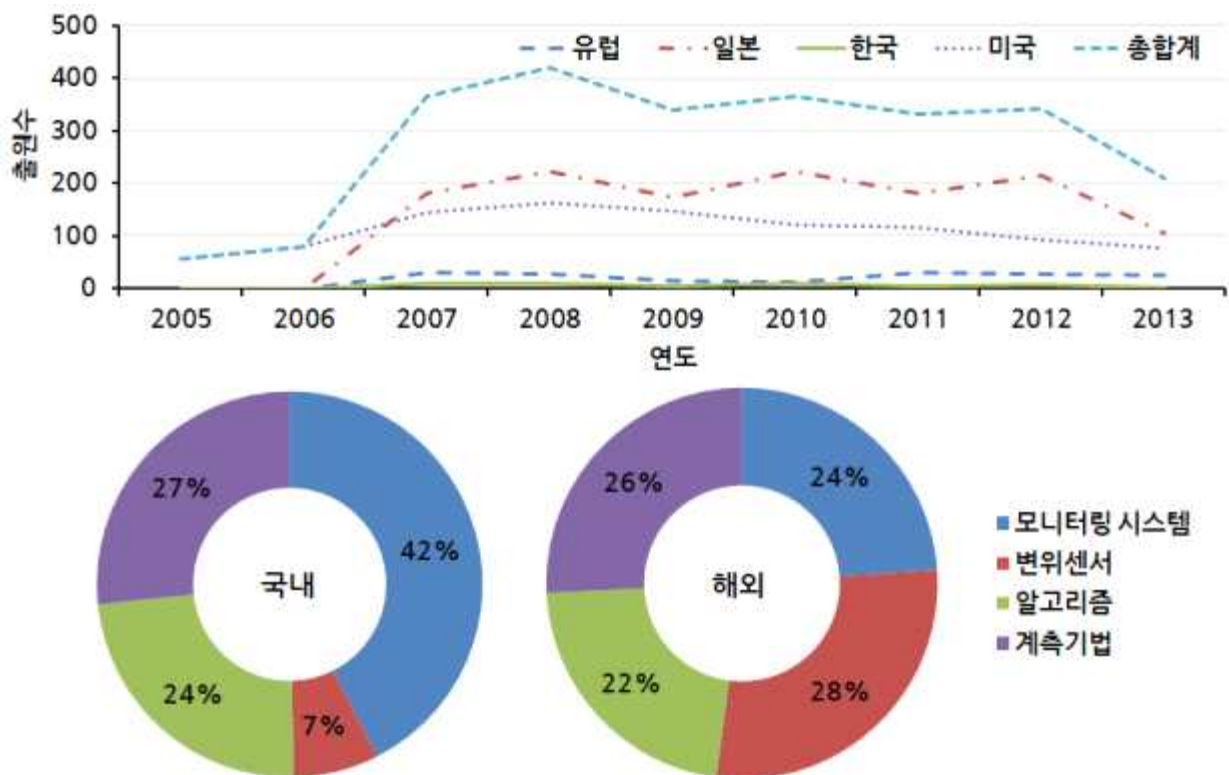


그림 2. 국내외 구조물 변위계측 관련 특허 건수 및 유형별 출원 추이

3. 관련 연구과제 분석

부처명	사업명	과제명	연구내용	예산 (억원)
국토해양 부	건설핵심기술 연구개발사업 (2003)	고층건물 변위조절설계 자동화기술 개발 및 실용화	3차원 모델러 구축 / 3차원 구조해석 구현 / 3차원 부재 설계구현 - 사용자 요구사항 반영 개발된 변위조절 설계 소프트웨어와 매뉴얼 작성	4.81
중소기업 청	중소기업 상용화기술 지원 (2006)	무선통신 및 이동통신 기술을 적용한 실시간 3차원 변위감시 시스템 개발	- 실시간 3차원 변형량 측정범위 0.01~1000mm - 무선네트워크를 활용한 데이터 송수신 기술 - 관절형 3차원 변위측정장비 및 DAQ 모듈 - 실시간 온라인 서비스 프로그램 관리자	0.71
교육과학 기술부	중견연구자 지원 (2007)	3개의 레이저 빔 스캐닝을 이용한 3차원 진동 측정 시스템 개발	- 헤테로다인 레이저 간섭계, 고주파용 복조회로, 고분해능 수광센서, 주파수 해석 알고리즘 개발 3차원 진동 및 형상측정용 무진동 레이저 고속 레이저 스캐닝 시스템, 좌표인식 알고리즘, 모드형상 소프트웨어 개발 - 비행시간법을 활용한 3차원 형상측정용 거리측정기, 3차원 운전중 변형형상 알고리즘, 애니메이션용 GUI 소프트웨어 개발	4.83
교육과학 기술부	이공분야 신진교수 연구지원사업 (2008)	Vision-based system을 이용한 구조물의 다지점 동적변위응답 측정기법 개발 및 변형률 응답 변환기법 응용	- 다지점 동적변위응답 계측을 위한 카메라의 화상왜곡현상 및 패턴노이즈의 보정 - 진동대 실험을 통한 모형구조물의 변위응답 계측 후 검증 - 계측된 변위응답신호의 변환기술을 통한 변형률 응답 추정	0.27
교육과학 기술부	일반연구자 지원 (2009)	다중영상처리기법을 이용한 처짐 및 회전변위 계측과 이를 활용한 교량의 건전성 평가	- 교량의 다지점처짐 및 회전변위의 동시 원격계측을 위한 영상처리기법 개발 - 진동문제를 보완하고 사용성을 높인 영상취득장비 하드웨어 플랫폼 개발 - 처짐 및 지점 회전변위를 활용한 교량 건전성 평가 - 실교량 실험을 통한 현장 검증	0.92
교육과학 기술부	중견연구자 지원 (2009)	장대형교량의 수행성능에 기초한 실시간 안전성 평가 시스템 개발	- 실시간 수행성능 중심의 장대형교량 안전성 평가기술 개발 - 안전성 평가를 위한 실시간 신호처리 기술 및 DBMS 기술 개발 - 대형교량 안전성 평가에 적합한 독립계측시스템 개발	3.57
교육과학 기술부	기본연구지원사 업 (2011)	거대 구조물 건전도 모니터링용 임베디드 로봇 시스템 개발	- 거대 구조물의 실시간 건전도 진단을 위한 임베디드 모니터링 로봇 시스템 개발 - 비전, 레이저, RF기반 거리센서를 결합한 다중모듈 방식 시스템 설계 및 현장적용성 검증	1.60
국토해양 부	건설기술혁신사 업 (2012)	구조물의 동적거동 정밀계측을 위한 LADAR와 LDV의 통합형 비접촉식 레이저 시스템 개발	- LADAR/LDV 동시 연속스캐닝 기법 개발 - 이중 및 멀티샘플주파수 데이터의 융합을 위한 필터링 알고리즘 개발 - 실시간 동적응답 획득을 위한 소프트웨어 구축 및 현장적용성 검증	0.5

- 제안과제와의 중복성 및 차별성 분석: 앞서 언급한 과제들은 변위계측을 목적으로 한다는 점에서 공통점이 있으나 실질적 접근방법에 있어서는 많은 차이를 보인다. 또한 제안기술은 기존 기술보다 높은 정밀도 및 높은 샘플주파수를 갖는 변위계측을 목표로 한다. 그나마 제안기술과 다소 유사성이 있는 과제에 국한해 아래에 차별성을 언급한다.

비교과제 #1	구조물의 동적거동 정밀계측을 위한 LADAR와 LDV의 통합형 비접촉식 레이저 시스템 개발
소관기관(부처)	국토해양부
연구기간	2012.11.19. ~ 2014.05.18.
연구목표	원거리 비접촉식 LiDAR와 LDV를 융합하여 측정대상 구조물의 가속도, 속도, 변위 및 계측지점의 동적좌표 등 모든 동적 응답을 고밀도, 고정밀도, 고해상도로 계측할 수 있는 기법 개발
연구내용	▪ LADAR / LDV 동시 연속스캐닝 기법 개발 ▪ 이종 및 멀티샘플주파수 데이터의 융합을 위한 필터링 알고리즘 개발 ▪ 실시간 동적응답 획득을 위한 소프트웨어 구축 및 현장적용성 검증
차별성	1억원 이상의 고가의 레이저 계측장비인 LDV와 LADAR의 융합을 통해 변위를 계측하는 시스템으로, 본 제안 시스템과는 칼만필터를 통한 변위산정이라는 측면에서 유사하다. 그러나 상기 과제는 구조물의 면외거동만을 산정하며, 센서를 지면에 거치함으로써 해상교량 등의 환경에서 계측이 불편하고 고가의 센서 시스템 채택으로 경제성이 낮으며, 날씨에 영향을 받으므로 상시 모니터링이 불가능하다. 제안 시스템은 부착형으로 구조물의 6자유도 동적거동을 환경 제약 없이 경제적으로 장기 모니터링할 수 있다는 점에서 차별화된다.

비교과제 #2	다중영상처리기법을 이용한 처짐 및 회전변위 계측과 이를 활용한 교량의 건전성 평가
소관기관(부처)	국토해양부
연구기간	2009.05.01. ~ 2011.04.30.
연구목표	다중영상처리기법을 활용한 교량의 처짐 및 회전변위 계측과 이를 활용한 교량의 건전성 평가
연구내용	▪ 교량의 다지점처짐 및 회전변위의 동시 원격계측을 위한 영상처리기법 개발 ▪ 진동문제를 보완하고 사용성을 높인 영상취득장비 하드웨어 플랫폼 개발 ▪ 처짐 및 지점 회전변위를 활용한 교량 건전성 평가 ▪ 실험교량 실험을 통한 현장 검증
차별성	영상장비(비디오카메라)로 획득한 구조물의 영상을 처리해 교량의 변위를 계측하는 기법으로, 변위계측이라는 점만 제외하면 본 제안 시스템과 유사점은 없다. 단거리 계측시 정확도가 우수하고 경제성이 좋으나, 장거리 계측시 높은 해상도를 구현하기 위해 고가의 장비가 필요하다. 또한 계측위치에 표적판을 설치해야 하고, 목표지점의 조도가 떨어지면 계측이 불가능하므로 상시모니터링에 부적합하다. 반면 제안 시스템은 환경에 제약없이 6자유도 동적거동을 계측할 수 있다는 점에서 차별화된다.

비교과제 #3	거대 구조물 건전도 모니터링용 임베디드 로봇 시스템 개발
소관기관(부처)	교육과학기술부
연구기간	2009.05.01.~2012.04.30.
연구목표	거대구조물의 실시간 건전도 진단을 위한 임베디드 모니터링 로봇 시스템 개발
연구내용	- 고정점으로부터 100m 내외의 거리에서 1mm 이하, 50Hz 이상의 처리속도를 위해 비전, 레이저 및 RF 기반 거리센서를 융합하여 정적인 변위뿐만 아니라 동적인 변위를 실시간으로 모니터링하고, visual inspection까지 수행할 수 있는 이동 로봇 구조 설계 - 초기 영점 보정 자동화 시스템 개발 - 다중모듈 구성시 오차전파 최소화 개념 설계 - 레이저 포인트 좌표 검출을 위한 영상처리 알고리즘 개발
차별성	상기 과제는 비전, 레이저, RF 기반 거리센서를 칼만필터로 융합하여 6자유도 변위를 계측하는 로봇 시스템으로, 교량 또는 빌딩에 일정 간격으로 표적판을 설치하여 표적판에 맺힌 레이저의 상을 비전 센서로 계측하여 변위를 산정한다. 본 제안과제와는 달리 각 표적판의 레이저 위치의 상대변위를 통해 교량의 변위를 산정하므로 오차전파의 소지가 있으며, 표적판의 이동을 위해 레일을 설치해야 한다. 반면 제안과제는 단순 부착식으로 간단한 설치만으로 6자유도 변위, 속도, 가속도, 각변위까지 모두 계측이 가능하다.

비교과제 #4	무선통신 및 이동통신 기술을 적용한 실시간 3차원 변위감시 시스템 개발
소관기관(부처)	중소기업청
연구기간	2006.07.01.~2007.06.01
연구목표	배관의 고온, 고압하에서 변형되는 정도를 정량화하고 배관의 변형을 3차원 그래픽으로 처리
연구내용	3차원 변형측정을 위한 유니버설 조인트형 그립 개발 - Multi-link형 3차원 변형 계측장비로부터 용접물의 3차원 변형치를 디지털 신호로 변환하여 RF통신, CDMA 통신, 블루투스 등 다양한 통신방식을 활용하여 서버로 데이터 전송하는 기술 개발 - 여러 장소에 설치된 3차원 변형 계측장치로부터 변위측정상태를 실시간 확인하는 기술 개발
차별성	상기과제는 LDVT와 구조적으로 유사한 3차원 관절식 변형계측장비(접촉식)를 도입하여 배관의 정적 변위(변형량)를 계측하나, 본 제안과제는 계측시 센서의 고정점 부착이 필요없고 동적거동을 계측가능하다는 점에서 상기 과제와 차별성이 있다. 상기 과제는 구조물의 변위를 계측한다는 점에서 본 제안과제와 유사하나, 발전소 플랜트 배관의 고온, 고압 하에서 변형정되는 정도를 정량화해 배관의 변형을 파악하는 플랜트 특화 시스템으로 그 용도가 상이하다.

4. 관련분야 시장분석

■ 변위계측기술 시장분석

- 변위센서: 현재 시장에 소개된 변위센서는 주로 근접센서(Proximity sensor), 각변위센서(rotary position sensor), 선형변위센서(linear displacement sensor)이며, 이 가운데 공장 자동화 시스템 등에 적용되는 근접센서가 약 49%로 가장 큰 비중을 차지하고 있다 (표 1). 그러나 사회기반시설 및 건설구조물에 적용할 수 있는 선형변위센서가 가장 높은 성장률을 보일 것으로 예측된다[32].
- 건설구조물용 변위센서: 건설구조물에 적용가능한 유형인 선형변위센서가 전체적으로 높은 성장률을 보이고 있으므로 업계에서 이 분야의 전망이 긍정적으로 평가되고 있다. 특히 선형변위센서 가운데 레이저 변위계(laser-triangulation system)가 연간 10.6%의 고성장이 예측되고 있다[32].

표 1. 변위계측센서의 북미시장 전망 및 성장률 예측 (단위: 백만 달러)[32]

유형	2007년	2011년	연평균 성장률 예측
근접센서	788.9	930.2	4.2%
각변위센서	428.3	514.3	4.7%
선형변위센서	358.0	450.1	5.9%
계	1,575.2	1,894.6	4.7%

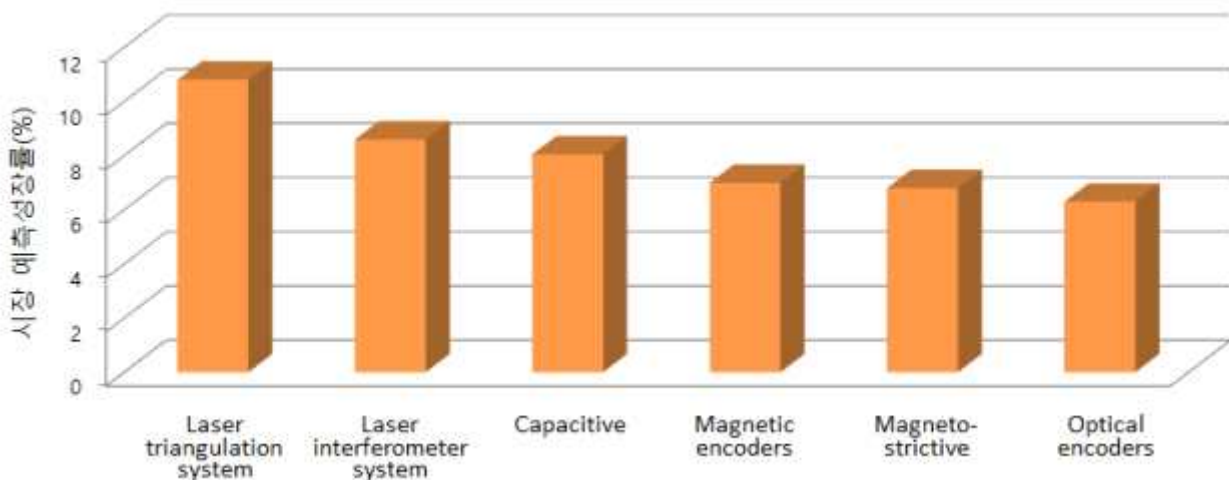


그림 3. 선형변위센서의 향후 시장 예측성장률[32]

- GPS, LDV, LADAR: 전세계적으로 GPS는 연평균 23.7%의 성장률을 보여 2016년 260억 달러 규모의 시장으로 발전할 것으로 예상된다[33, 34]. 특히 해양, 항공, 자동차, 레저, 스마트폰, 물류, 기계제어 등 여러 분야에서 경제성장, 일자리 창출 등의 원동력으로 자리매김할 것으로 예상된다. LADAR는 2013년 2억 달러 규모에서 연평균 16.32%의 성장률을 보여 2018년에는 5억 5천만 달러 규모로 성장할 것으로 예상된다 [35]. LDV는 현재 4억 달러 규모의 시장을 형성하고 있으며 약 4.2%의 성장률이 예상된다[35].

■ 제안기술 활용분야 시장분석

- 구조물 건전성 모니터링 분야: 전세계 구조물 안전성 평가 및 건전성 모니터링 시장 규모는 2013년 현재 60억 달러 규모로 추산되고 있으며, 이 가운데 센서 및 계측시스템이 차지하는 비중은 약 33%인 20억 달러 규모이다[36].
- 내하력 평가 분야: 내하력 평가 기술은 구조물의 효율적인 보강과 더불어 국내사회기반시설물의 구조물의 노후화에 따라 그 기술의 영향력과 수요가 더욱 커지고 있다. 내하력 평가 분야에 대한 정확한 시장 규모는 집계돼있지 않으나, 한국도로공사가 2014년 미국 시장에서 약 145억 원의 매출을 기록한 바 있으며, 2015년엔 약 395억 원을 예상하고 있다[37]. 또한 미국 정부는 2017년까지 약 3600억 달러의 예산을 투입 예정이다[37].

■ 지역별 시장분석

- 선진국: 대다수 선진국의 기반 시설물은 노후화를 겪고 있는 상태이며, 더 많은 구조물들이 노후화 단계에 진입하고 있다. 이를 효율적으로 관리하기 위해 구조물 건전성 모니터링 시장의 확대는 불가피한 상태이다. 2007년 기준으로 선진국의 경우 시설물 유지관리 투자비중이 이탈리아 57.2%, 영국 38.0%, 독일 26.0%, 일본 21.7%에 달할 정도로 구조물 건전성 모니터링을 포함한 전반적인 시설물 유지관리 시장을 확대하고 발전시키는 데 집중하고 있다 (우리나라는 8%) [38]. 향후 선진국의 구조물 유지관리 시장은 신규건설 대비 10~57%의 확대와 발전이 있을 것으로 전망된다 [38].
- 신흥국: 아시아 지역 신흥국의 전체 건설시장은 8.9%의 성장률(세계 평균 5.2%)을 보이고 있으며, 2020년에는 10조 달러 규모로 성장할 것으로 전망된다[39]. 신규 건설시장의 확대와 더불어 신흥국의 구조물 건전성 모니터링 시장도 규모가 커지며 활성화 될 것으로 보이는데, 2020년까지 신흥국의 구조물 유지관리/모니터링/성능개선 시장이 신규건설시장 대비 평균 32% 수준에 이를 것으로 보인다[40]. 2010년에서 2020년 사이 국가별 구조물 유지관리 시장의 성장규모는 베트남 47%, 캄보디아 49%, 카자흐스탄 47%, 우즈베키스탄 51%, 몽고 63%, 필리핀 47%, 방글라데시 46%, 스리랑카 48%로 전망된다[41].
- 제안기술의 진출가능 시장규모: 앞서 언급한 구조물 건전성 모니터링 분야 관련 센서/계측시스템 분야 시장 규모는 연 20억 달러로 추산된다. 이 가운데 제안기술 적용이 가능한 가속도계 및 변위센서 시장은 25% 수준인 연 5억 달러 규모로 추산된다. 또한 기존 선진국 시장 외에 평균 45% 수준의 성장률을 보이는 신흥국 시장을 감안할 때 평균 연 17%의 증가세를 보일 것으로 예상된다. 따라서 5년 내 구조물 건전성 모니터링 분야 가속도/변위센서 시장은 연 8억 달러를 돌파할 것으로 보이며, 제안기술이 해외시장에 성공적으로 진입해 가속도/변위센서의 대체품으로 시장의 1%를 점유할 경우, 연간 8백만 달러 규모의 매출이 기대된다.

5. 동향분석 종합결론

- 국내 센서 기술은 선진국 대비 3~4년의 격차를 가지고 뒤떨어지고 건설구조물용 센서의 해외 의존도가 높은 것으로 분석된다. 특히 가속도계 및 변위센서는 대부분 해외제품으로 국가경쟁력 제고를 위해 가속도계 등 구조물용 센서 기술 분야의 적극적인 투자로 센서 및 계측장비의 국산화가 절실하다.
- 기존의 정적 및 저주파수 변위산정 외에도 최근 고주파수/고정밀도 변위 계측에 대한 수요는 계속 증대되고 있으며 이를 반영한 변위산정 기법 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 가격 및 성능면에서 우수한 데이터 융합 기반의 변위산정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근 국내 연구 성과는 국외 기술에 비해 정밀도와 적용성 측면에서 우수한 것으로 평가된다.
- 전 세계적으로 구조물 및 노후화 구조물이 급격히 증가하고 있는 추세다. 선진국의 많은 사회기반 시설물은 이미 노후화 단계에 진입하고 있으며, 이를 효율적으로 관리하기 위해 구조물 건전성 모니터링 시장의 확대는 불가피하다. 더불어 신흥국에서도 신규 건설시장의 확대와 더불어 구조물 건전성 모니터링 시장도 규모가 대폭 증가하면서 활성화되고 있으며, 이로 인해 구조물 동적변위의 정밀계측에 대한 필요성이 증가될 것으로 보인다.
- 제안과제의 목표시장인 건설구조물 모니터링 분야의 가속도/변위센서 시장은 현재 연 5억 달러 규모이며, 5년내 연 8억 달러 수준에 올라설 것으로 예측된다.

	Positive	Negative
Internal factors	Strengths S 기존 기술 대비 기술적 우월성: 높은 정밀도 및 높은 샘플링 주파수로 구조물 6자유도 변위, 속도, 가속도, 각변위를 동시에 실시간 계측 가능한 세계 최초/최고 기술	Weaknesses W 제안 통합시스템에 사용되는 가속도는 본연구진에서 자체 생산 계획이나 내부 GPS는 기존 해외에서 수입되는 상용제품을 활용함
External factors	Opportunities O 전 세계적 노후구조물의 증가 및 신흥국을 중심으로 한 신규 구조물 건설 증가로 인한 구조물 거동 파악 및 안전진단에 유용한 동적변위의 정밀계측에 대한 필요성 증대	Threats T 미국, 영국 등 선진국에서는 이미 데이터 융합기술을 활용한 변위계측기술의 현장적용 사례가 보고되어 핵심기술 선점 기회가 상실될 위협요인 존재

그림 4. 제안과제의 SWOT 분석 결과

제3장 연구 수행 내용 및 성과

1. 1차년도

단위성과 1-1: 포스피드백 방식 3축 가속도계 모듈 개발

- 성능목표: (1) 대역폭 0-100Hz, (2) 최대측정가속도 $\pm 4g$ 및 분해능 $1\mu g$
- 가속도계 성능 목표 설정 및 3축 가속도계 모듈 개발
 - 군사용 가속도계는 최대 측정 가속도 $\pm 25g$, 대역폭 0-600Hz이나 분해능이 낮아 건설구조물에 적합하지 않음. 따라서 이를 보완하여 건설구조물 계측에 적합하도록 최대 측정 가속도 $\pm 4g$, 대역폭 100Hz, 분해능 $1\mu g$ 로 설계, 개발함
 - 3축 제어부 및 필터부를 설계, 제작하고 3축 가속도계 결합하여 포스피드백(force-feedback) 방식 3축 가속도 측정이 가능한 모듈 개발 및 제작 완료



그림 5. 본 과제에서 개발한 포스피드백 방식 3축 가속도계 모듈 시제품

- 가속도계 원가절감 요소 도출 및 시제품 제작
 - 개별 축 측정에 따른 가공요소 및 제품 소요량 축소 설계 및 제작
 - 3축 모듈을 통합하여 가속도 정보를 측정 가능한 모듈 설계 및 개발
 - 민수용 가속도 센서 신호 처리에 특성에 맞는 신호 처리 회로 개발
 - 고가의 세라믹 기판을 이용한 제품 → 상용 FR-4 소재 PCB 기판 제작을 통한 원가 절감
 - 3축 모듈을 통합하여 3채널 가속도 신호 제어/처리 통합한 원가 절감 모듈 개발
 - 설계 기술을 반영한 가속도계 모듈 4기 제작 완료

표 1. 군사용 가속도계와 개발 가속도계 비교

구분	군사용 가속도계	개발 가속도계
케이스	1축	3축
재평형회로	세라믹 기판 사용	FR-4 기판 사용
	1채널	3채널

- 기존 상용 가속도계와의 비교를 위한 진동대 실험
 - 건설 구조물 가속도 계측에 많이 적용되는 dc대역 계측가능한 가속도계 2종(Kinemetrics ES-U2, PCB 3713E112G)와 개발 가속도계의 진동대 실험을 통해 건설 구조물 계측 적합성을 비교 평가
 - 정확성과 정밀성이 입증된 레이저 도플러 진동계(laser Doppler vibrometer, LDV)의 속도 계측치를 미분해 reference로 활용
 - 실험결과 건설구조물의 공진주파수가 위치한 저주파 대역(0-10Hz)에서의 계측 정확도 및 바이어스 변화특성에서 모두 개발 가속도계의 성능이 기존 가속도계보다 우수함을 확인



그림 6. 건설 구조물 적합성 평가 실험 구성, (a) 진동대에 설치된 개발 가속도계와 Kinemetrics ES-U2, PCB 3713E112G 가속도계, (b) reference 계측에 활용된 LDV

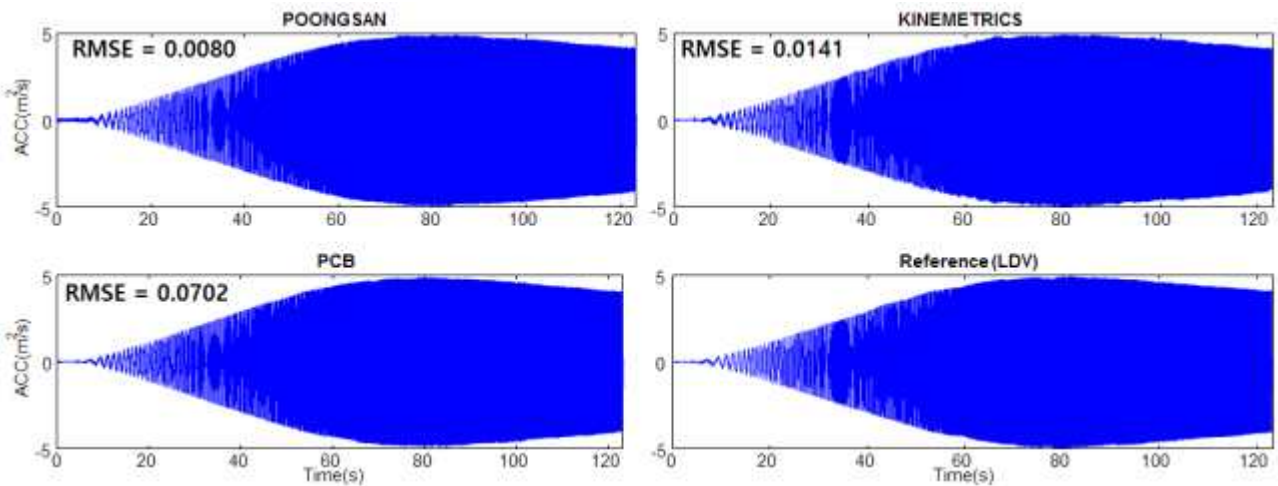


그림 7. 개발 가속도계와 수입 가속도계 2종의 0-10Hz 주파수 스위프 신호 응답을 계측하고 reference(LDV)와의 RMS 오차를 계측한 결과 개발 가속도계의 성능이 가장 우수한 것으로 확인됨

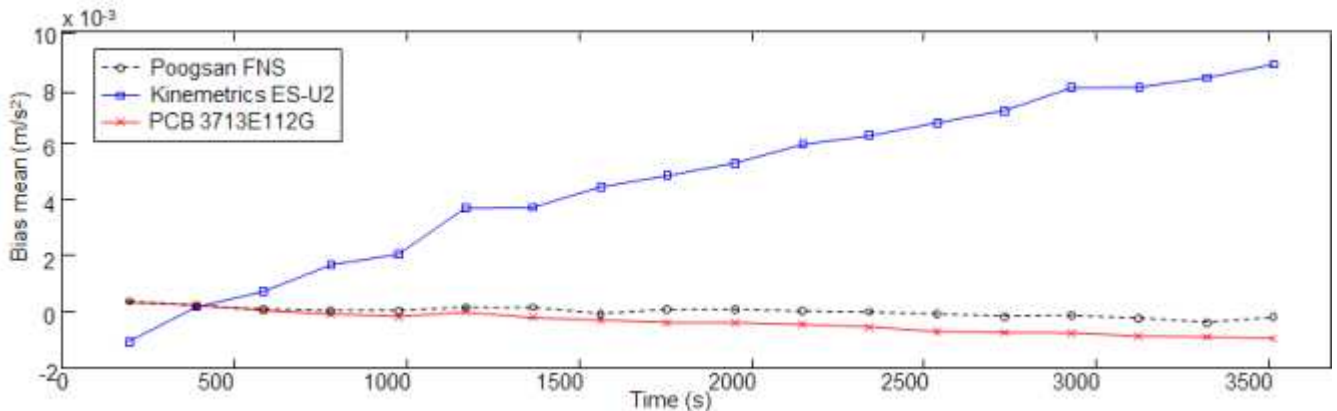


그림 8. 개발 가속도계와 수입 가속도계 2종의 시간에 따른 바이어스 변화. 개발 가속도계의 바이어스가 가장 변화가 작고 안정적임

단위성과 1-2: 가속도계 장기 계측특성 분석

- 성능목표: (1) 대역폭 0-100Hz, (2) 최대측정가속도 $\pm 4g$ 및 분해능 $1\mu g$
- 개발 가속도계 모듈과 Kinometrics ES-U2의 성능비교 실험 수행
 - 최대측정가속도와 선형성을 체크하기 위한 비선형도 시험 결과, 개발 가속도계는 최대측정 가속도 $4g$ 를 만족하며, 비선형도가 Kinometrics ES-U2의 2.6%에 불과한 것으로 나타남

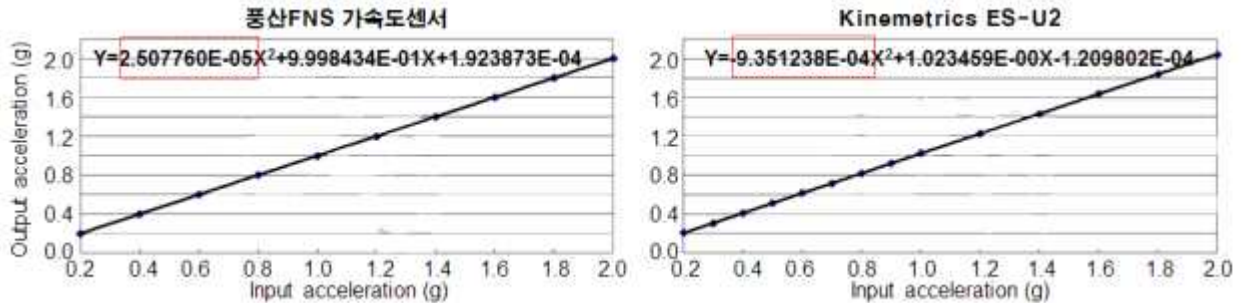


그림 9. 최대측정가속도와 선형성을 체크하기 위한 비선형도 시험 결과, 개발 가속도계는 수입 가속도계보다 우수한 특성을 보임

- 대역폭 시험 결과 개발 가속도계는 연구개발목표인 계측주파수 DC-100Hz를 만족하나, ES-U2는 저주파 대역에서 응답이 비대칭적이며 40Hz부터 응답의 크기가 대폭 감소해 계측 성능에 한계를 보임

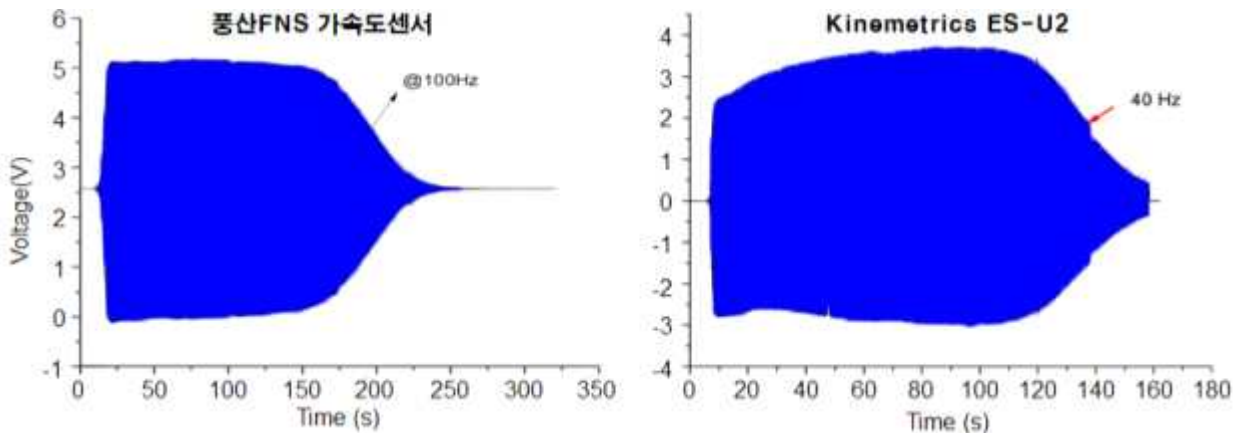


그림 10. 대역폭 평가시험 결과, 수입 가속도계는 40Hz 이상 대역에서 계측 정확도가 떨어지는 반면, 개발 가속도계는 100Hz까지 정확한 계측이 가능한 것으로 나타남

- 가속도계 장기간안정도 특성실험 수행
 - 가속도계의 장기간안정도 평가를 위해 한 달간 데이터(총 22회)를 취득하여 1년 동안 바이어스의 변화량을 예측하는 실험을 진행
 - 실험 결과 1년 경과 후 바이어스 변화량이 X축 260ug, Y축 180ug, Z축 312ug에 불과할 것으로 예측됨

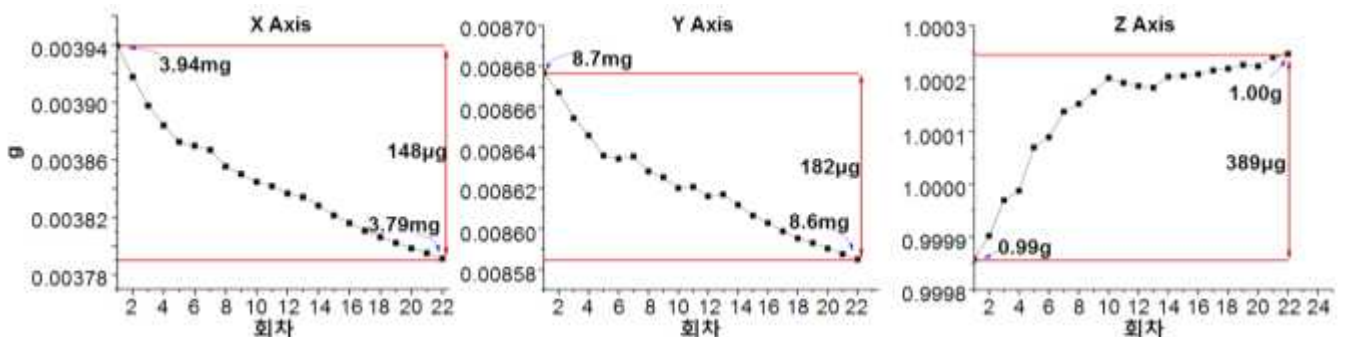


그림 11. 개발 가속도계는 1년 동안 바이어스 변화량이 최대 312ug에 불과할 것으로 예측됨

표 2. One-year composite repeatability 예측 결과

변화량	X	Y	Z
22회 측정 바이어스 변화량	148 μ g	182 μ g	389 μ g
1년 예상 추정 변화량 1mg 이내 (안정화단계인 14회차부터의 추세 기준)	260 μ g	180 μ g	312 μ g

■ 각변위 시험을 통한 분해능 평가

- 가속도계를 레이트 테이블에 장착하여 정밀하게 기울이면서 입력가속도를 1 μ g 간격으로 변화시켜, 0-10 μ g까지 양방향으로 데이터를 취득하여 선형성을 평가한 결과 1 μ g의 선형적인 데이터를 확인

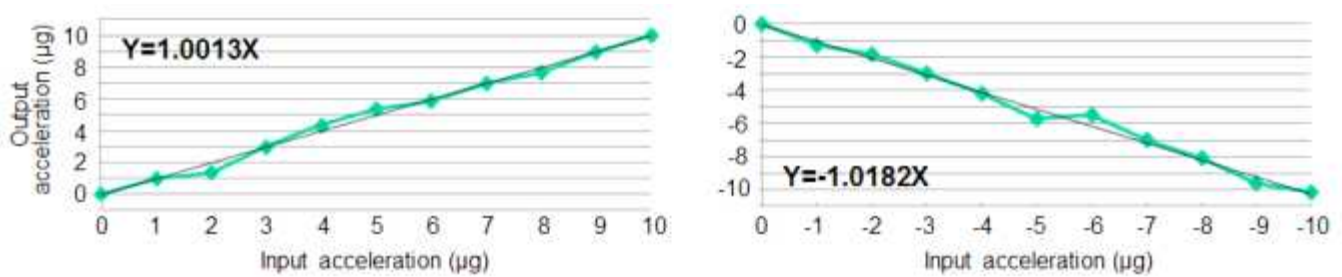


그림 12. 각변위 시험 결과 개발 가속도계는 연구목표인 분해능 1 μ g를 만족하는 것으로 나타남

■ KOLAS 인증 획득

- KOLAS 인증 업체에서 MIL-STD-810 시험 규격에 준하는 환경 시험을 진행하였으며, 고온저장, 고온운용, 저온저장, 저온운용, 진동, 충격 시험 후 육안으로 검사한 결과 시험품의 외관성 균열 및 파손이 발생되지 않았으며 정상동작 확인
- 가속도센서에 발생 될 수 있는 방수·방진의 신뢰성 확보를 위한 KS C IEC 60529 규격에 준하는 환경시험을 진행한 결과 IP67에 준하는 성능 확인하여 KOLAS 인증 획득

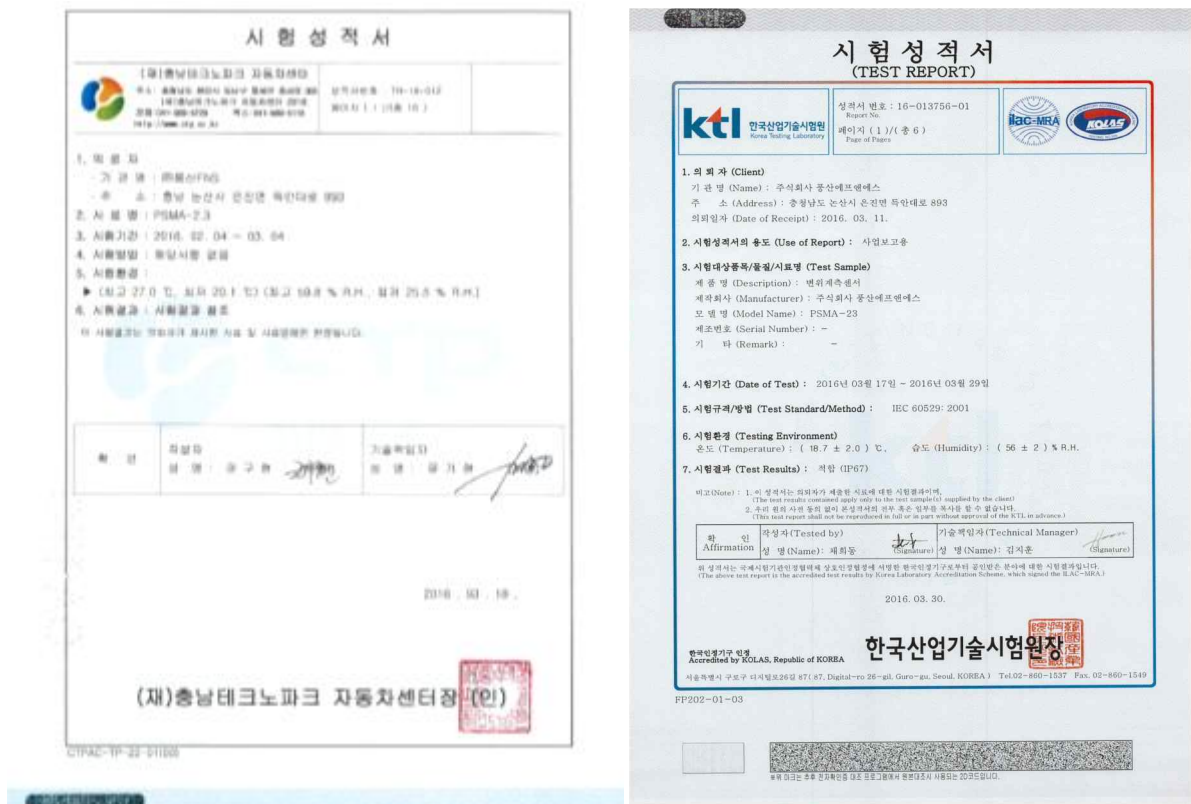


그림 13. 환경시험 및 IP시험 성적서

단위성과 1-3: GPS-RTK 변위계측시스템 구축

- 성능목표: (1) 수평변위 정밀도 1cm, 수직변위 정밀도 2cm 이내, (2) 샘플주파수 20Hz
- GPS-RTK 칩셋 목표성능 설정 및 최적 모델 선정
 - 최종 성과물의 목표 성능을 고려하여 GPS-RTK의 샘플주파수 20Hz 이상, 수평위치 기준 정밀도 2-5cm, 가격 100만원 이하로 설정
 - 국내외 시판되는 저가형 GPS-RTK 모듈의 성능 및 가격을 조사하여, 가격이 100만원 이하로 경제적 이면서 정밀도가 1-2cm 수준으로 높은 Swift Navigation 사의 Piksi GPS-RTK 칩셋을 선정

표 3. GPS-RTK 모듈 개발에 고려된 상용 칩셋

			
제품명	Trimble BD930	Swiftnavigation Piksi GPS-RTK kit	Ublox Neo-7P
가격	\$21,000~	\$995	\$500~
정밀도	1~2cm	1~2cm	50cm
RTK 샘플주파수	20Hz	10Hz	10Hz
크기	51x41x7mm	53x53x7mm	20x20x10mm

- GPS-RTK 정밀 변위획득 모듈 구축
 - 시리얼 포트를 통해 GPS-RTK 칩셋에서 획득한 RINEX 및 JSON 형식의 위성신호를 전송받은 후 ASCII로 변환하는 소프트웨어 컴포넌트 개발
 - 단일 GPS 및 GPS-RTK에서 전송된 정보로부터 변위산정에 필요한 계측치(단일 GPS의 속도, GPS-RTK의 base-rover 상대위치)를 추출하고 계측치 신뢰도를 평가하는 C++기반 소프트웨어 컴포넌트 개발
 - 적응필터 기반 원점보정을 통해 절대위치를 미터 단위의 변위로 환산하는 소프트웨어 컴포넌트 개발
 - 하드웨어/소프트웨어 통합 및 계측시험 수행

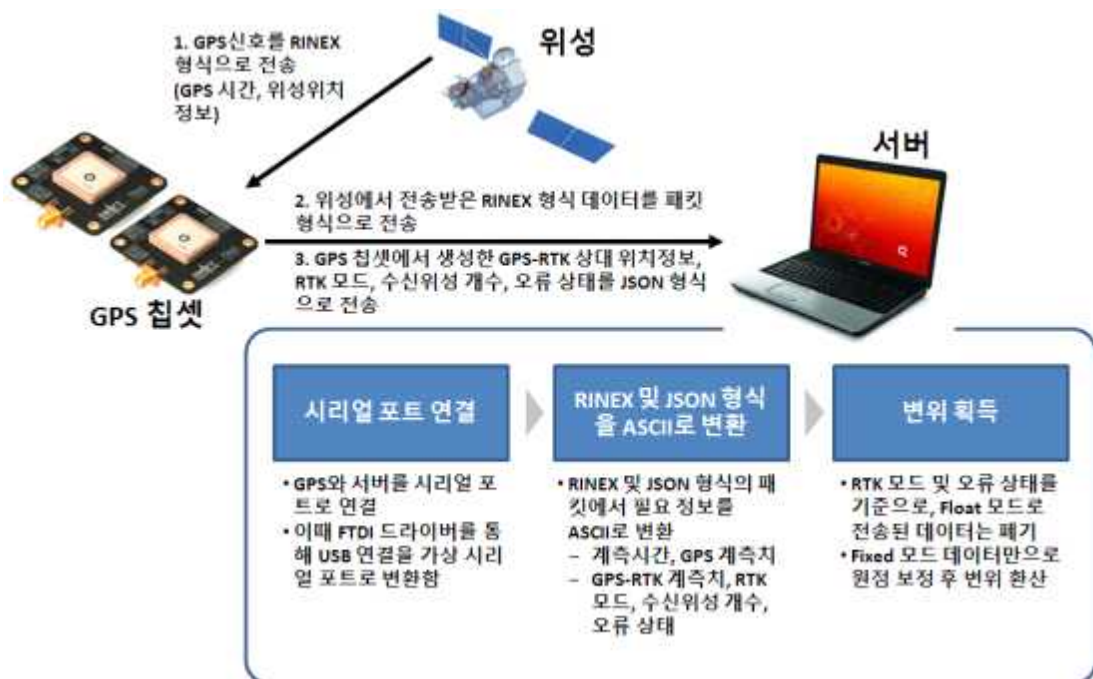


그림 14. GPS-RTK 변위 계측 시스템 개요

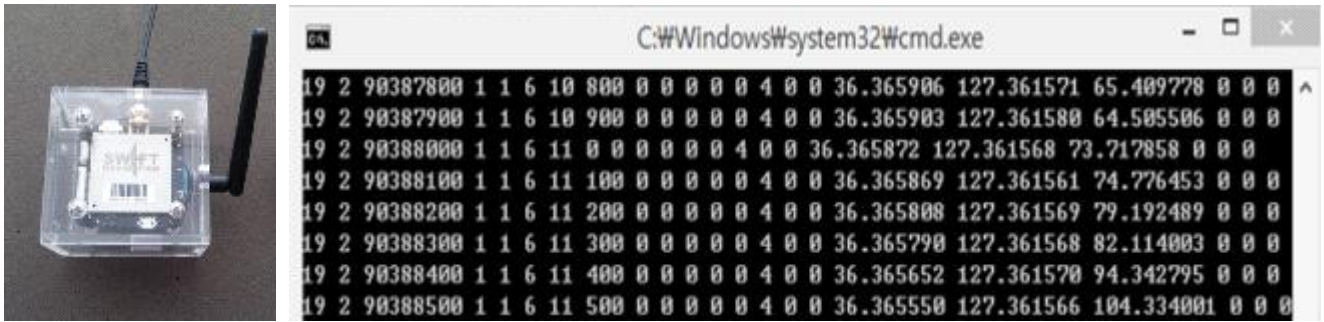


그림 15. 개발된 GPS-RTK 변위계측 하드웨어 컴포넌트(좌) 및 계측치를 ASCII 형식으로 계측치를 실시간 취득하는 소프트웨어 컴포넌트

- GPS-RTK 변위계측 시스템 보완사항 도출 및 계측 성능 평가를 위한 진동대 시험 수행
 - 일정한 주파수의 사인파로 진동을 가하는 진동대에 가속도계와 GPS 안테나를 설치하여 GPS-RTK 변위계측 시스템에서 송신하는 데이터의 무결정을 검증하고, 계측성능을 평가
 - 실험 결과 GPS-RTK는 20Hz의 샘플 주파수를 보이며, 정밀도는 당초 목표로 설정한 수평방향 기준 1cm 이내의 오차를 가짐. 주파수 분석 결과 0.2Hz 미만의 저주파 잡음이 오차의 주 원인인 것으로 분석됨

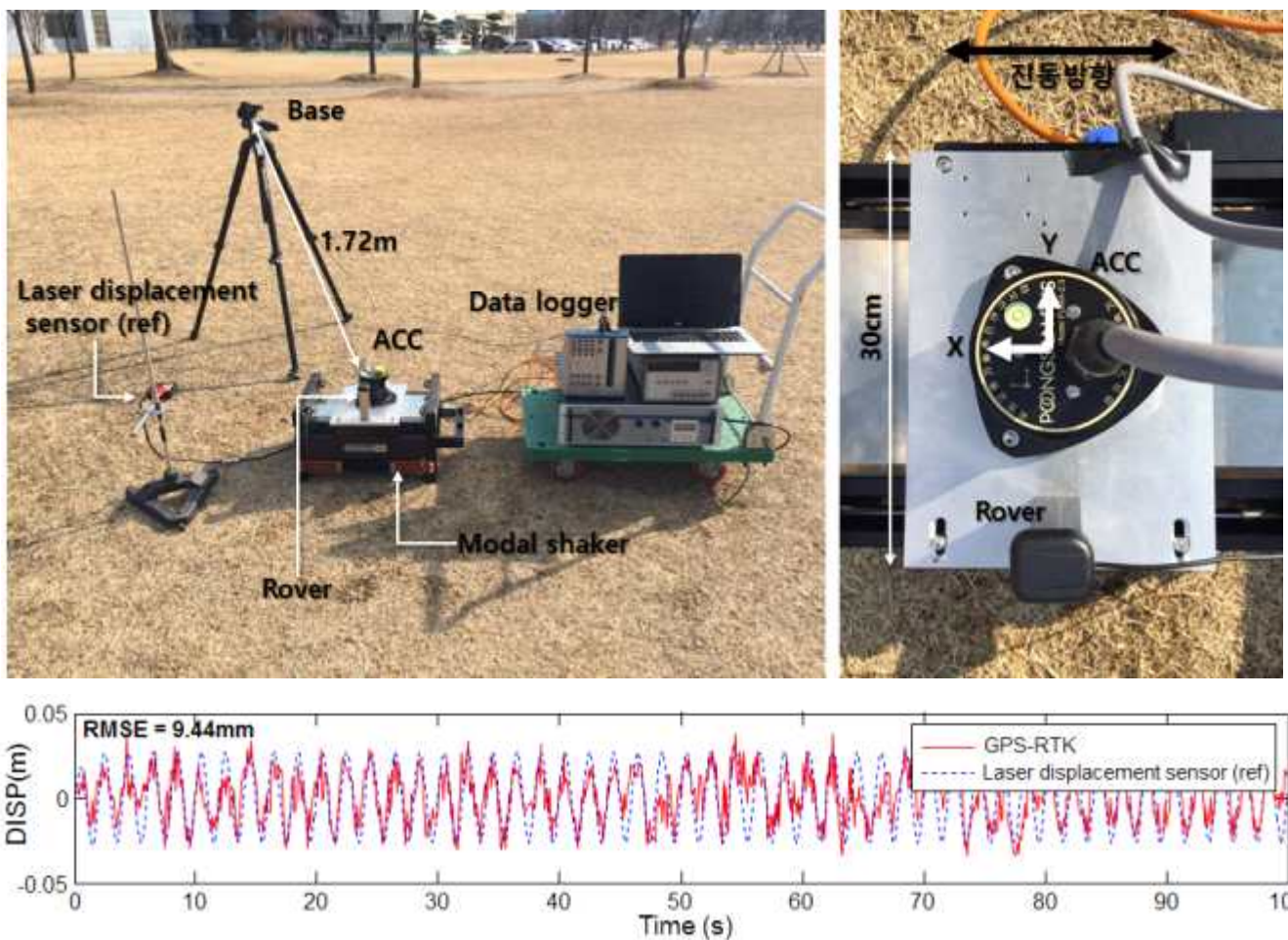


그림 16. 진동대 실험에서 취득한 GPS-RTK 변위 데이터와 레이저 변위계로 취득한 reference 변위

단위성과 1-4: 계측변위 잡음소거 기법 개발 및 실험검증

- 성능목표: (1) 수평변위 정밀도 1cm, 수직변위 정밀도 2cm 이내, (2) 샘플주파수 20Hz
- GPS-RTK 오차요인 분석
 - GPS-RTK의 계측 정밀도에 가장 크게 영향을 미치는 요인은 (1) 위성신호 입사각에 따른 안테나의 지향성 변동으로 인한 위상변동(phase variation), (2) 구조물의 외벽, 바닥 등에서 반사된 위성신호가 직접 수신된 신호와 중첩되어 오차를 유발시키는 멀티패스(multi-path)인 것으로 분석됨
 - 위상변동 및 멀티패스를 보정하지 않는 저가 안테나의 경우 0.3Hz 미만의 저주파 대역 잡음이 많이 발생하며, 이는 장대교량, 초고층빌딩 등 구조물 고유주파수와 중복되므로 계측 정밀도에 큰 영향을 미침
- 정밀도 향상을 위한 변위계측 모듈 안테나 선정
 - GPS-RTK 계측 정밀도와 안테나 간 상관관계 분석: 위상변동 및 멀티패스 보정기능을 제공하는 고정밀 안테나 사용시 저가형 안테나보다 50% 이상 잡음이 감소되는 것으로 확인됨
 - 경제성 및 향후 L1/L2 GPS-RTK 계측으로의 기술확장을 고려해, 개발 모듈의 안테나로 Tallisman TW 3870 모델을 선정

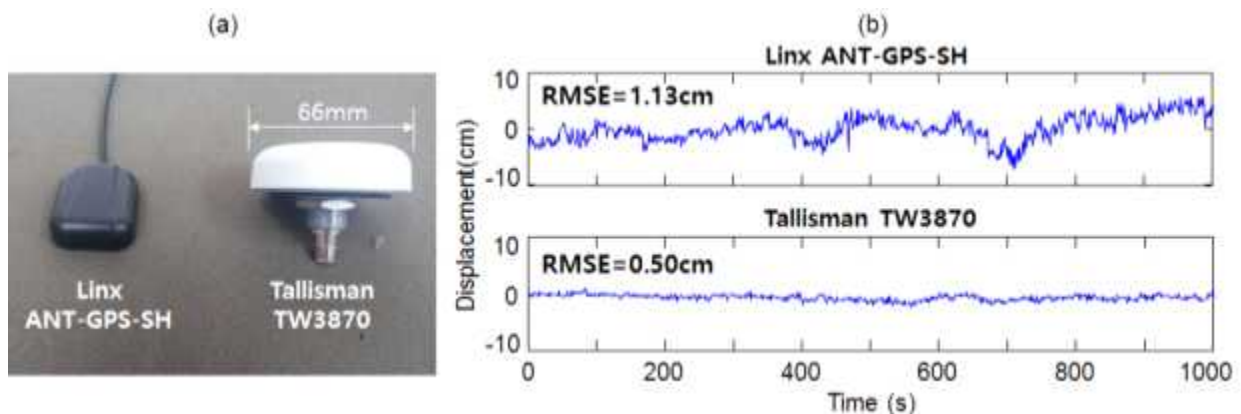


그림 17. 안테나와 노이즈의 상관관계 분석 (a) 저가형 Linx ANT-GPS-SH (2만원대)과 고정밀도 Tallisman TW3870 안테나(28만원), (b)정지상태(영변위) 계측시 안테나에 따른 변위신호

- 저주파수 잡음소거 및 샘플주파수 향상 알고리즘 개발
 - GPS-RTK 칩셋에서 전송되는 위성 수, 모호정수, 정밀도 모드를 종합해 GPS-RTK 계측치의 신뢰도를 평가하고, 낮은 신뢰도의 위치 데이터는 배제
 - RTK가 아닌 단일 GPS에서 정밀도 손실 없이 지속적으로 계측되는 속도 데이터(오차 3cm/s 이내, 샘플주파수 50Hz)를 GPS-RTK 변위 데이터와 칼만필터로 융합하여 오차 5mm 이내의 변위 데이터를 샘플주파수 50Hz로 산정함

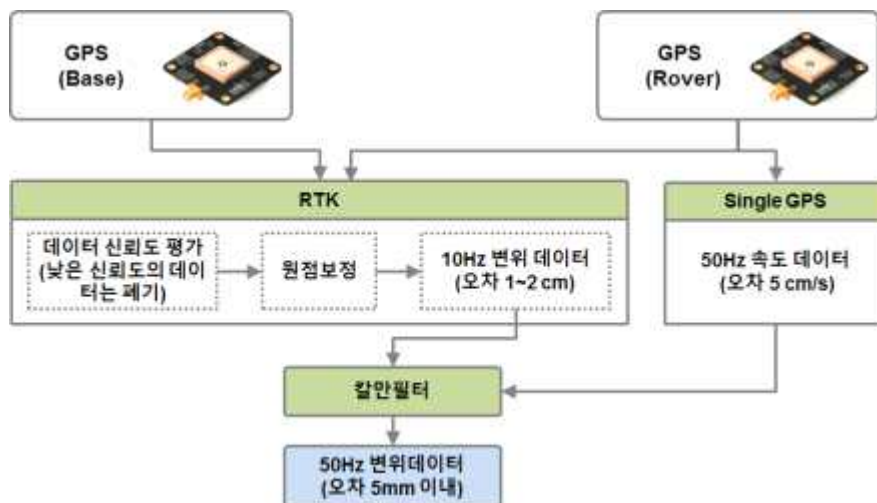


그림 18. GPS-RTK 잡음소거 알고리즘. GPS-RTK로 계측한 변위 데이터와 단일 GPS로 계측한 속도 데이터를 칼만 필터로 융합해 오차 5mm, 샘플주파수 50Hz의 고품질 변위 데이터 산정

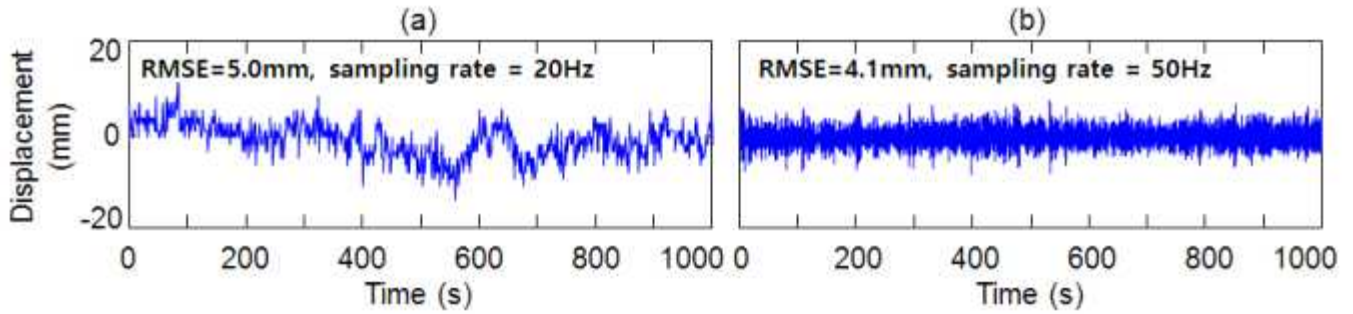


그림 19. 정지상태(영변위) 계측데이터를 이용한 GPS-RTK 저주파 잡음소거 및 샘플주파수 조정 알고리즘 결과, (a) GPS-RTK 변위 데이터 (샘플주파수 20Hz), (b) GPS-RTK 변위 데이터와 단일 GPS 속도 데이터를 칼만필터로 융합하여 산정한 변위 (샘플주파수 50Hz)

- 계측 정밀도 평가 및 적용성 평가를 위한 대전 엑스포다리 및 영종대교 현장실험
 - 개발된 GPS-RTK 모듈의 적용성을 확인하고 보완사항을 도출하기 위해 대전 엑스포다리와 영종대교에서 현장실험을 수행
 - 실험결과 현재 base-rover간 통신거리가 1km 수준인 것으로 확인되었으며 통신거리의 증가가 필요한 것으로 판단됨. 따라서 현재 연구진은 통신 안테나의 교체 또는 인터넷을 통한 base-rover간 실시간 원격통신 방안을 연구 중임

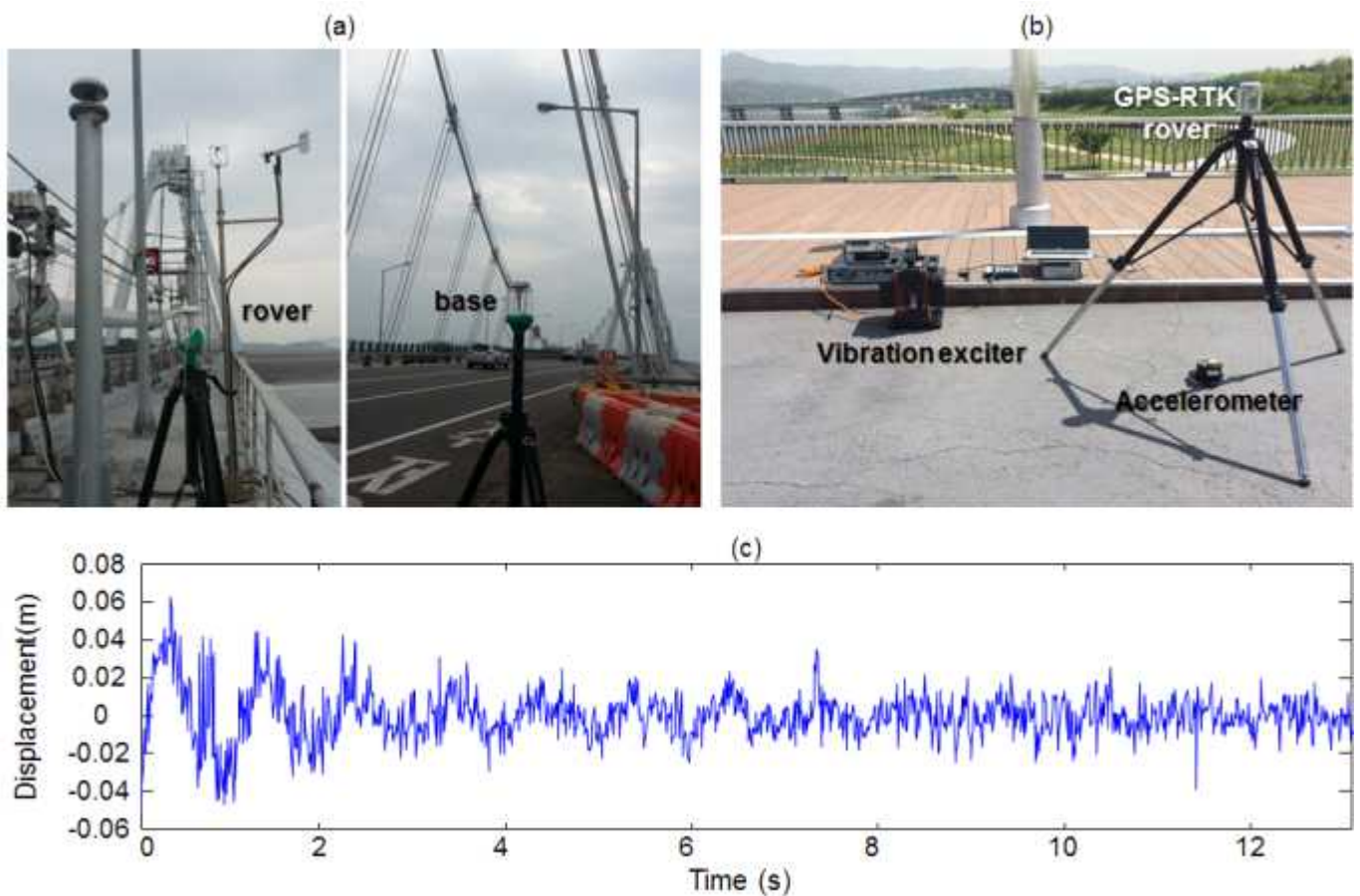


그림 20. 개발된 GPS-RTK 모듈의 현장적용성 확인 및 보완사항 도출을 위한 현장실험, (a) 영종대교, (b) 대전 엑스포 다리, (c) KTX 통과시 영종대교 변위

2. 2차년도

단위성과 2-1: 구조물 6자유도 동적거동 산정을 위한 칼만필터 알고리즘 개발

- 성능목표: (1) 정확도 2 mm, (2) 샘플 주파수 100 Hz
- 단일 GPS 속도 계측치 정밀도 평가
 - 고정된 삼각대에 GPS 안테나를 부착하고 움직임이 없는 상태에서 GPS-RTK와 단일 GPS에서 각각 변위와 속도를 취득하는 실험실 규모 실험을 통해 단일 GPS 속도와 RTK 변위의 미분치(속도)를 비교
 - GPS-RTK 변위는 5.8 mm의 RMS 오차를 보일 뿐 아니라 저주파 잡음으로 인해 비선형 바이어스가 지속적으로 발생하여 데이터 융합에 불리함
 - 그러나 단일 GPS 속도는 23.5 mm/s의 오차로 비교적 낮으며, 전형적인 백색잡음의 특성을 보여 칼만 필터 기반 데이터 융합에 유리
 - 따라서 본 과제에서는 단일 GPS 속도를 칼만필터 모델에 반영하기로 결정함

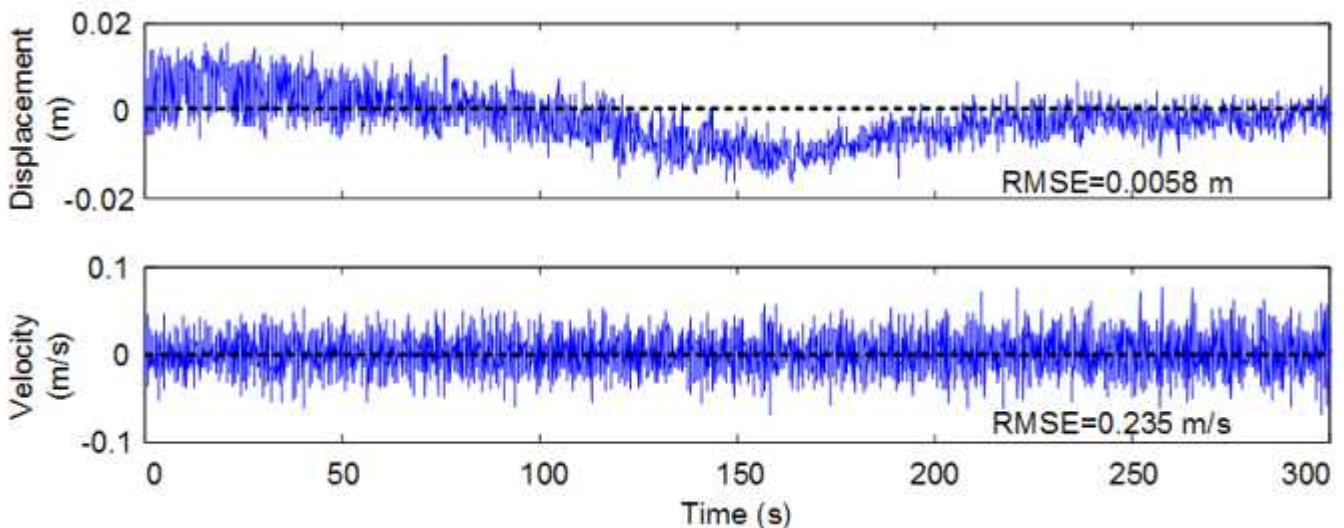


그림 21. GPS-RTK 변위(위)와 단일 GPS 속도(아래)의 오차 비교. GPS-RTK 변위는 저주파 잡음으로 인한 비선형 바이어스 성분이 많아 단일 GPS 속도보다 칼만필터 적용시 정밀도 저하의 요인이 됨

- 단일 GPS 속도 계측치를 이용한 데이터 융합기법 개선
 - 1차년도에 제안한 칼만필터 기반 데이터 융합기법은 GPS-RTK 변위의 저주파 잡음에 따른 비선형적 바이어스 변화에 따라 변위 산정치가 유사한 형태로 편이되는 단점이 있었으며, 이로 인해 2 mm를 다소 상회하는 오차를 보임
 - 이 문제를 해결하기 위해 비선형적 바이어스 변동이 발견되지 않고 정밀도가 뛰어난 단일 GPS 속도 데이터를 활용하기로 결정
 - GPS-RTK는 base GPS와 rover GPS의 2개의 칩셋을 이용하므로, base와 rover 각각에서 2 개의 속도 데이터 취득이 가능. 이 때 base는 고정된 상태이므로 base에는 오로지 잡음만이 계측되며, rover는 구조물에 부착되어 움직이는 상태이므로 구조물의 속도와 잡음이 혼합된 데이터가 계측됨
 - 따라서 두 속도 데이터에 미리 적응필터를 적용, base의 속도 데이터로 rover에 혼입된 잡음을 추정하여 rover 속도 데이터에서 제거한 뒤 칼만필터에 적용하는 기법 제안
 - GPS-RTK 데이터는 수신된 위성의 개수와 Fixed/Float 모드 상태를 기반으로 신뢰도를 평가하고, 신뢰도가 낮아 변위 산정에 많은 오차를 유발할 것으로 예상되는 데이터는 폐기하게 됨
 - 칼만필터에는 가속도계에서 계측된 100 Hz 가속도 데이터, GPS-RTK에서 계측된 10 Hz 변위, 단일 GPS에서 계측된 50 Hz 속도가 융합되어, 100 Hz의 변위, 속도, 가속도, 각변위 데이터가 2 mm 이내

의 정밀도로 산정됨

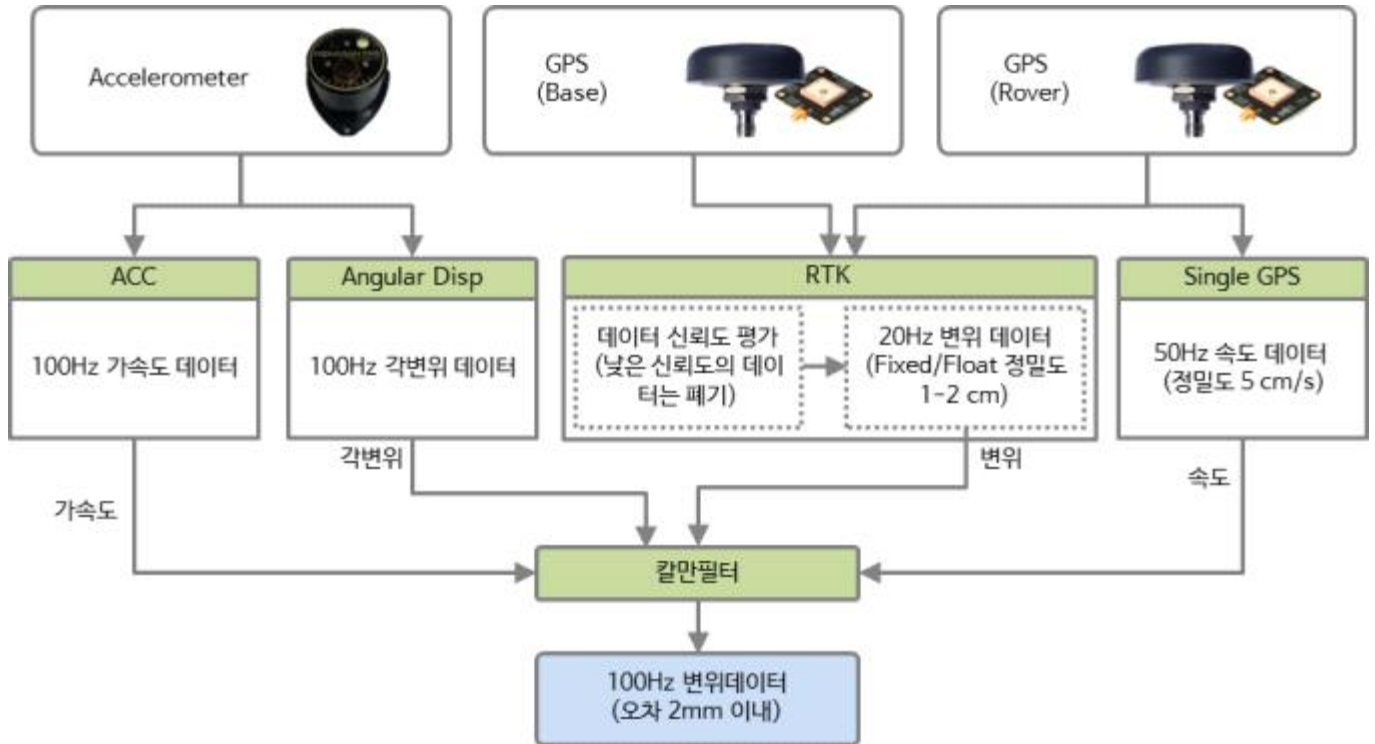


그림 22. 본 과제에서 제안한 가속도계-GPS 데이터 융합 기법 개요

- 제안 기법을 구현한 소프트웨어 제작
 - 센서모듈의 데이터 패킷에서 전송된 GPS-RTK 위치(GPS_RTK_POS), 정밀도 모드(FIX_FLOAT), 위성개수(NUM_SAT), rover의 속도(VEL_ROVER), base의 속도(VEL_BASE), 가속도(ACC)를 추출하여 데이터 신뢰도 평가, 축변환, 적응필터 등의 선처리를 거친 뒤 2단계 칼만필터에서 고정밀 고해상도 가속도, 속도, 변위, 각변위를 산정하는 소프트웨어 제작

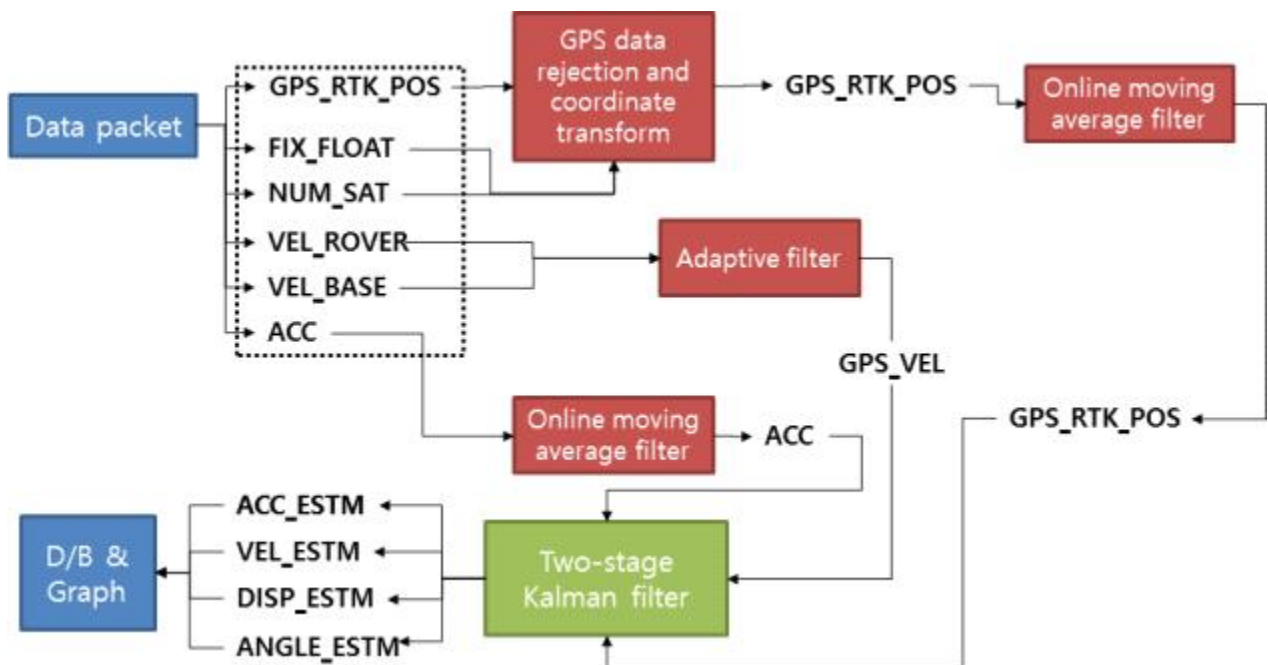


그림 23. 제안 기법의 데이터 흐름도. GPS-RTK, 단일 GPS, 가속도계에서 계측한 데이터에 적응필터 등을 적용한 뒤 2단계 칼만필터에 입력하여 고정밀 고해상도 가속도, 속도, 변위, 각변위를 산정함

- 실험실 수준 실험을 통한 성능 검증
 - 가진기에 의한 4층 전단빌딩 모델 수평진동시 제안 기법으로 변위를 추정하고, 이를 레이저 변위센서와 비교하여 정밀도 평가
 - 다양한 진동에 대해 변위추정치를 평가한 결과, 평균 1.09 mm의 오차를 보임

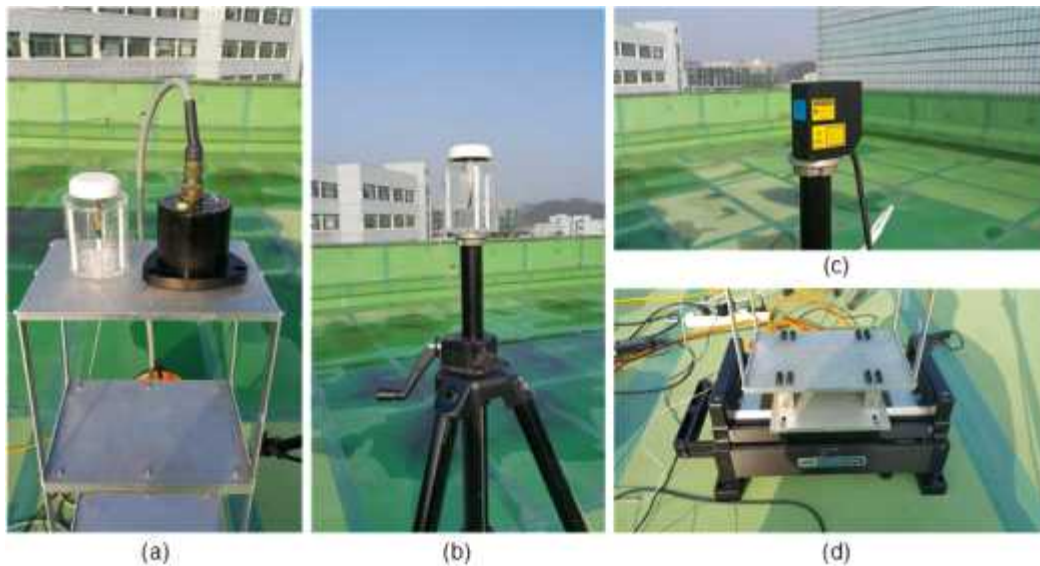
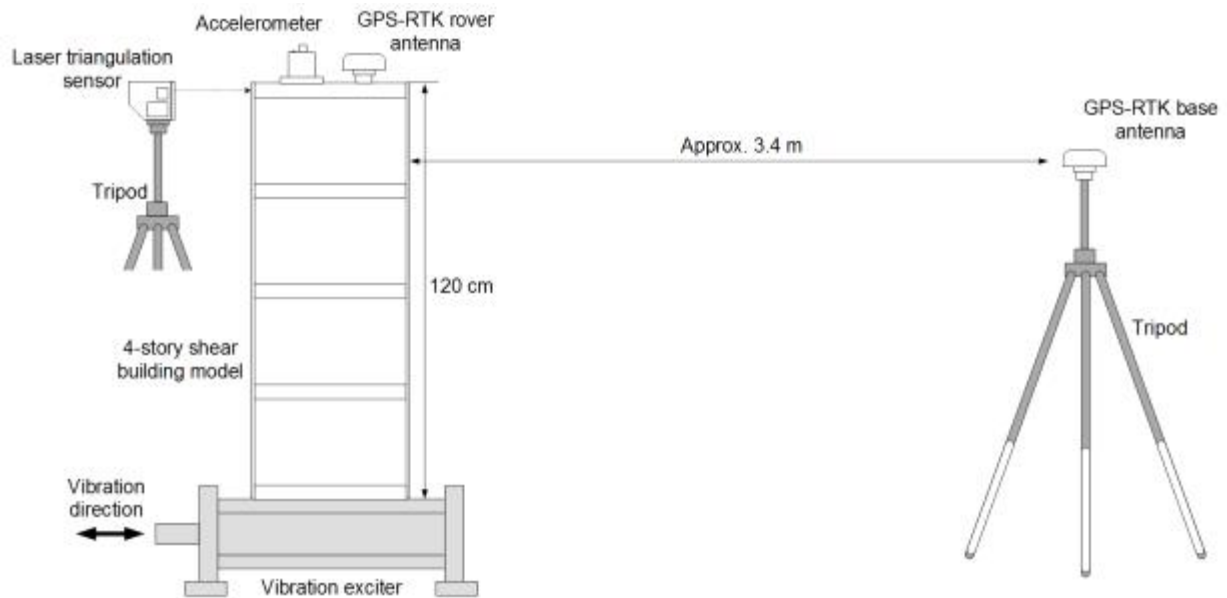


그림 24. (a) 4층 전단빌딩 모델과 가속도계, rover, (b) base, (c) 레이저 변위계, (d) 가진기

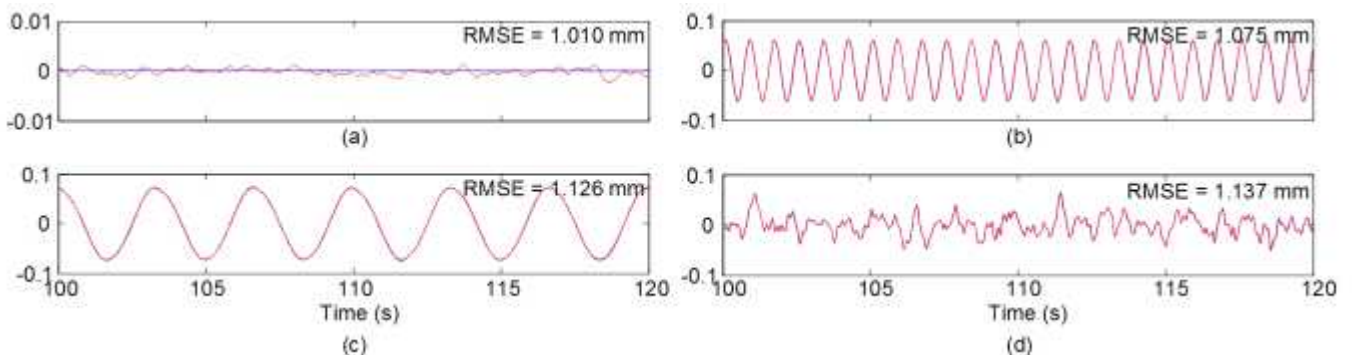


그림 25. 여러 유형의 구조물 변위에 대한 변위추정치. (a) 영변위, (b) 1.2 Hz 사인파, (c) 0.3 Hz 사인파, (d) 의사 지진파

단위성과 2-2: 알고리즘 성능 검증을 위한 국내외 현장실험

- 성능목표: (1) 정확도 2 mm, (2) 샘플 주파수 100 Hz
- 인천 영종대교 현장 검증실험
 - 영종대교 현수교 구간 주경간 중앙부의 수직변위를 제안 기법으로 계측하고, 교각 기초부에 LDV를 설치해 계측 정밀도를 평가
 - 분석결과 GPS-RTK의 오차가 21.63mm인 반면, 제안 기법은 1.55mm의 오차를 보임

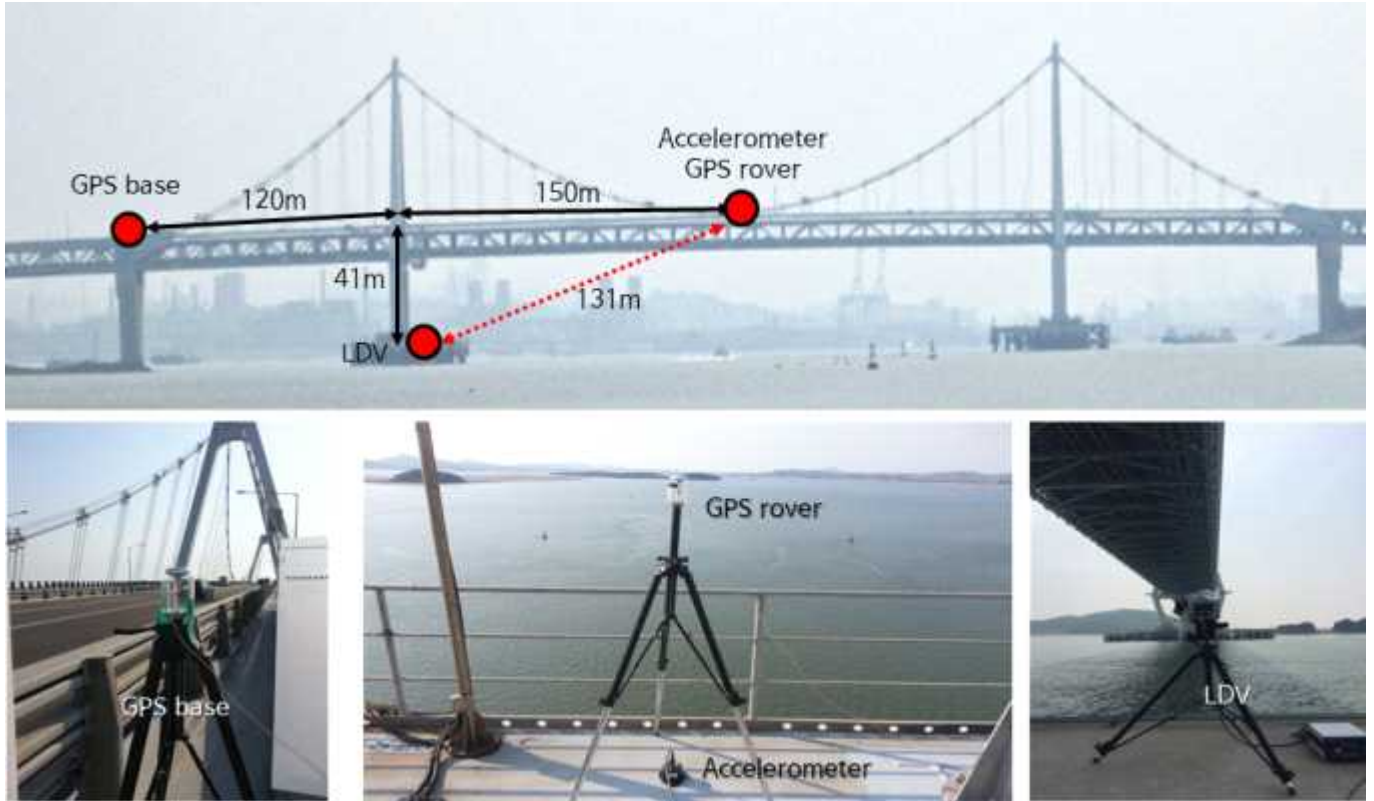


그림 26. 영종대교 현장실험 개요 및 설치한 센서 모듈 및 레퍼런스 변위센서

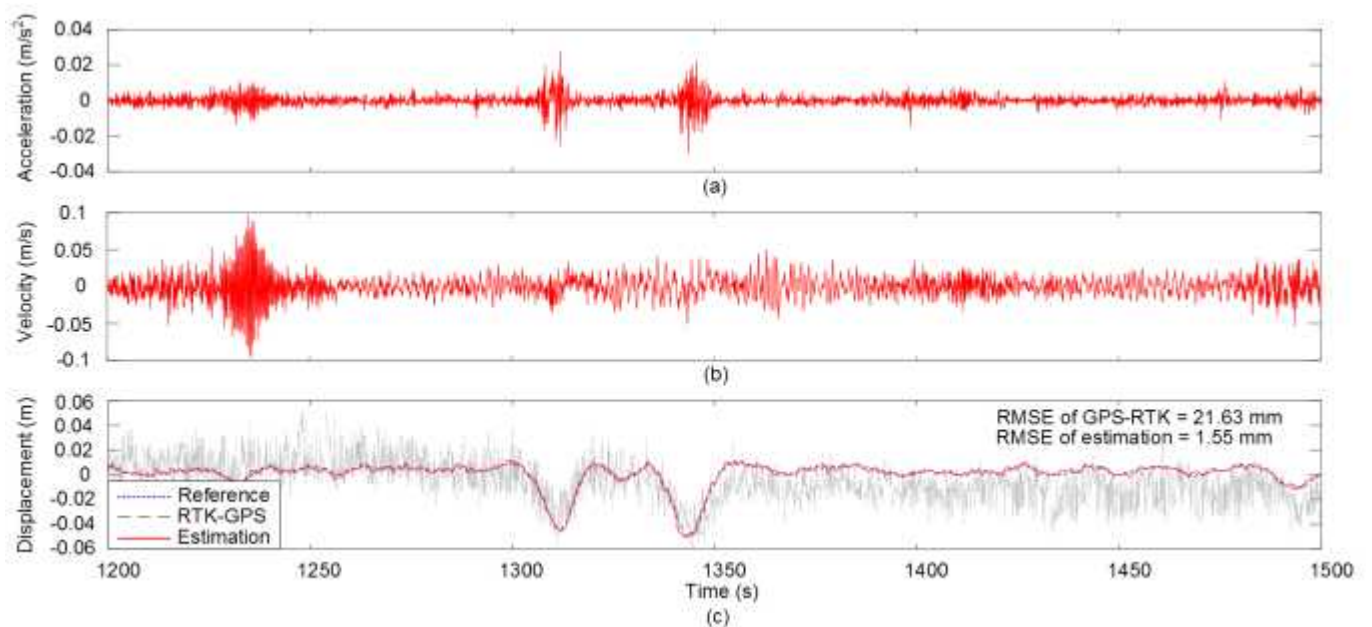


그림 27. 제안 기법을 통한 영종대교 동적응답 산정 결과. (a) 가속도, (b) 속도, (c) 변위

■ 여수 이순신대교 정밀도 검증 실험

- 영종대교 현수교 구간 측경간 중앙부의 수직변위를 제안 기법으로 계측하고, 계측지점 수직위치 지면에 LDV를 설치해 계측 정밀도를 평가
- 분석결과 기존의 가속도-변위 데이터 융합기법으로는 오차가 21.63mm인 반면, 향상된 가속도-속도-변위 데이터 융합기법으로는 오차가 1.23mm로 나옴



그림 28. 이순신대교 실험에 적용된 센서모듈 및 레퍼런스 변위센서, (a) 가속도계 및 rover GPS, (b) base GPS, (c) LDV

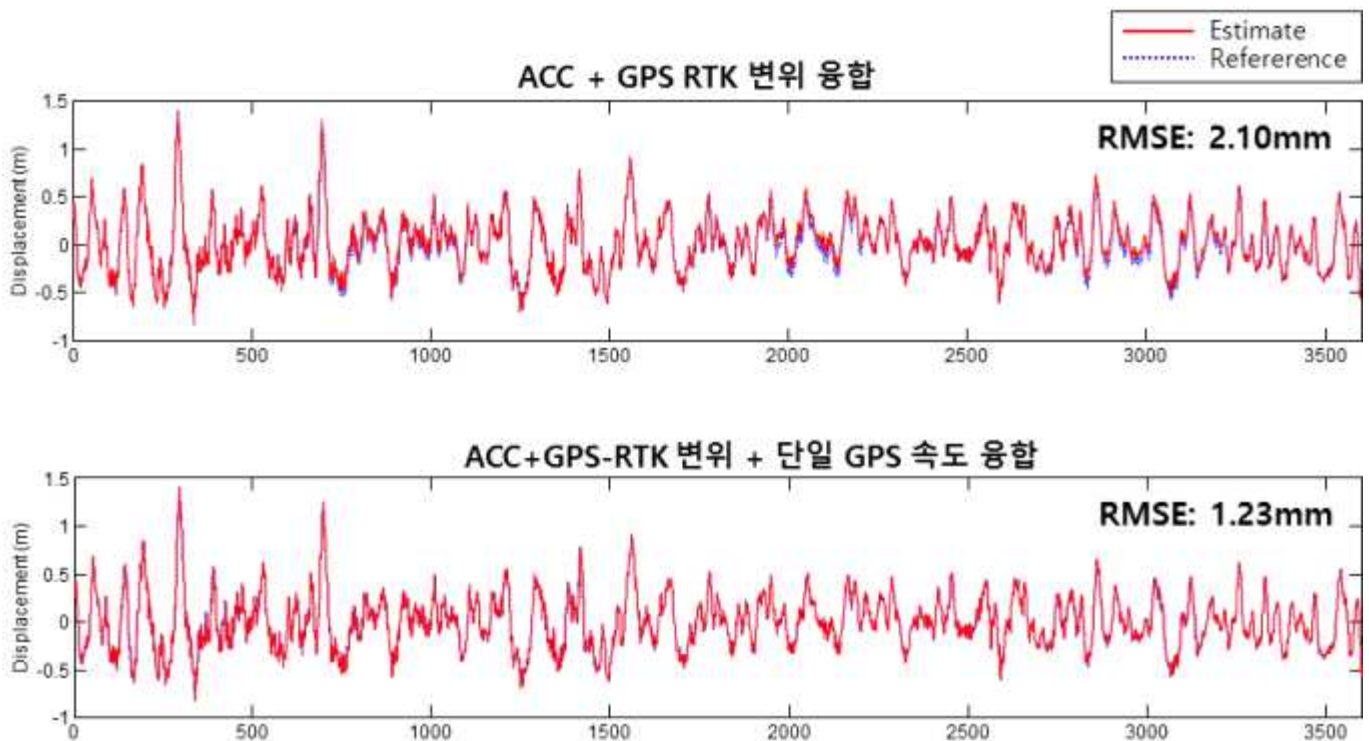


그림 29. 제안 기법을 통한 이순신 대교 동적응답 산정 결과.

■ 중국 닝보 시후멘대교 정밀도 검증 실험

- 중국 닝보에 위치한 시후멘(西候門) 대교의 현수교 구간 측경간 중앙부 수직변위를 제안 기법으로 계측하고, 계측지점 수직위치 지면에 장거리 레이저 변위계를 설치해 계측 정밀도를 평가
- 분석결과 제안 기법은 장거리 레이저 변위계 계측치와 2.15mm의 오차를 보이거나, 이는 장거리 레이저 변위계의 정밀도가 1 mm 내외로 비교적 낮기 때문인 것으로 판단됨



그림 30. 중국 시후멘대교 실험 전경. GPS rover와 가속도계(좌)와 장거리 레이저 변위계(우)

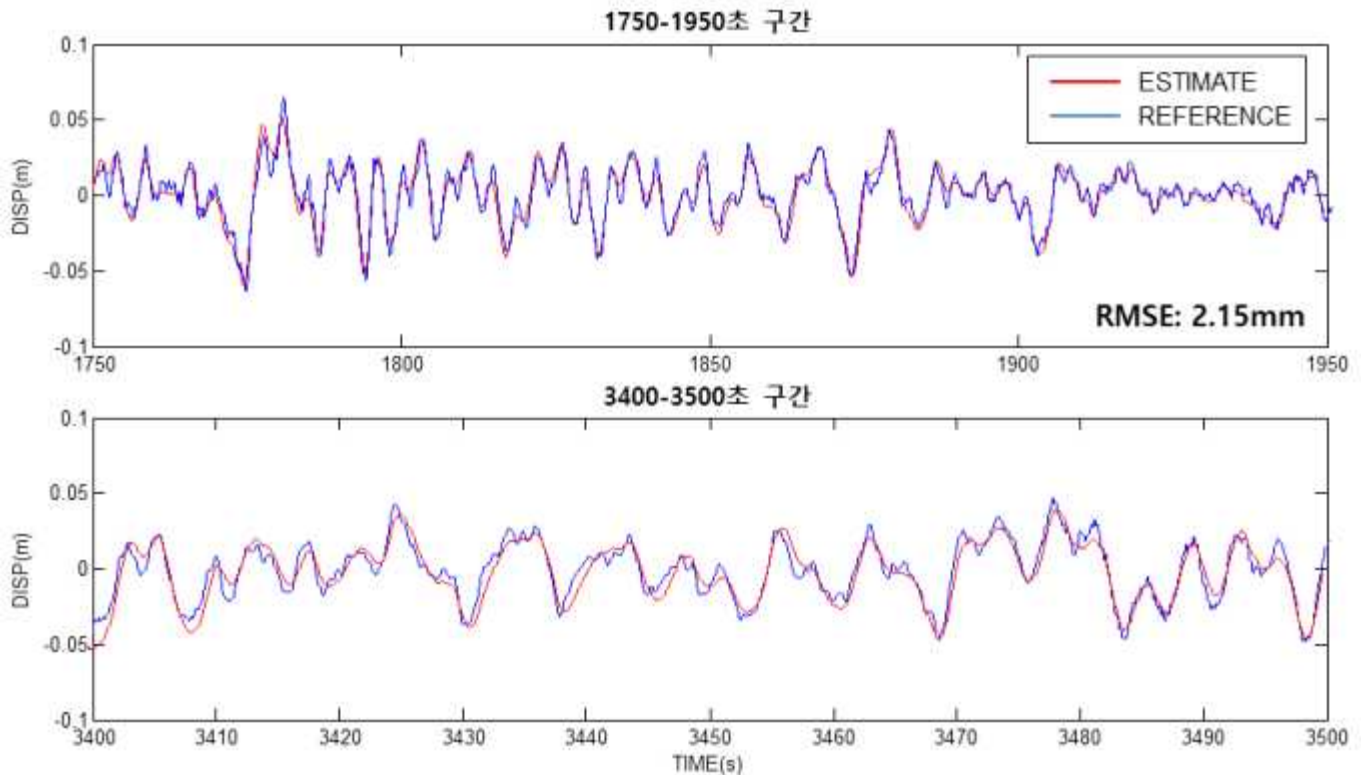


그림 31. 제안 기법을 통한 시후멘대교 교량 응답 산정치

단위성과 2-3: GPS-RTK / 3축 가속도계를 통합한 6자유도 동적거동 모니터링 시스템 하드웨어 설계 및 제작

- 성능목표: (1) 정확도 2 mm, (2) 샘플 주파수 100 Hz
- GPS-가속도계 시스템 하드웨어 통합을 위한 센서부 및 기구부 제작
 - GPS 및 가속도계의 통합을 위해 전자부와 필터부를 재설계하고, 통합 모듈용 케이스를 설계
 - DAQ 통합보드에 따라 전자부를 수정하고 검증시험 수행
 - 통합모듈을 위한 가속도 센서 제작

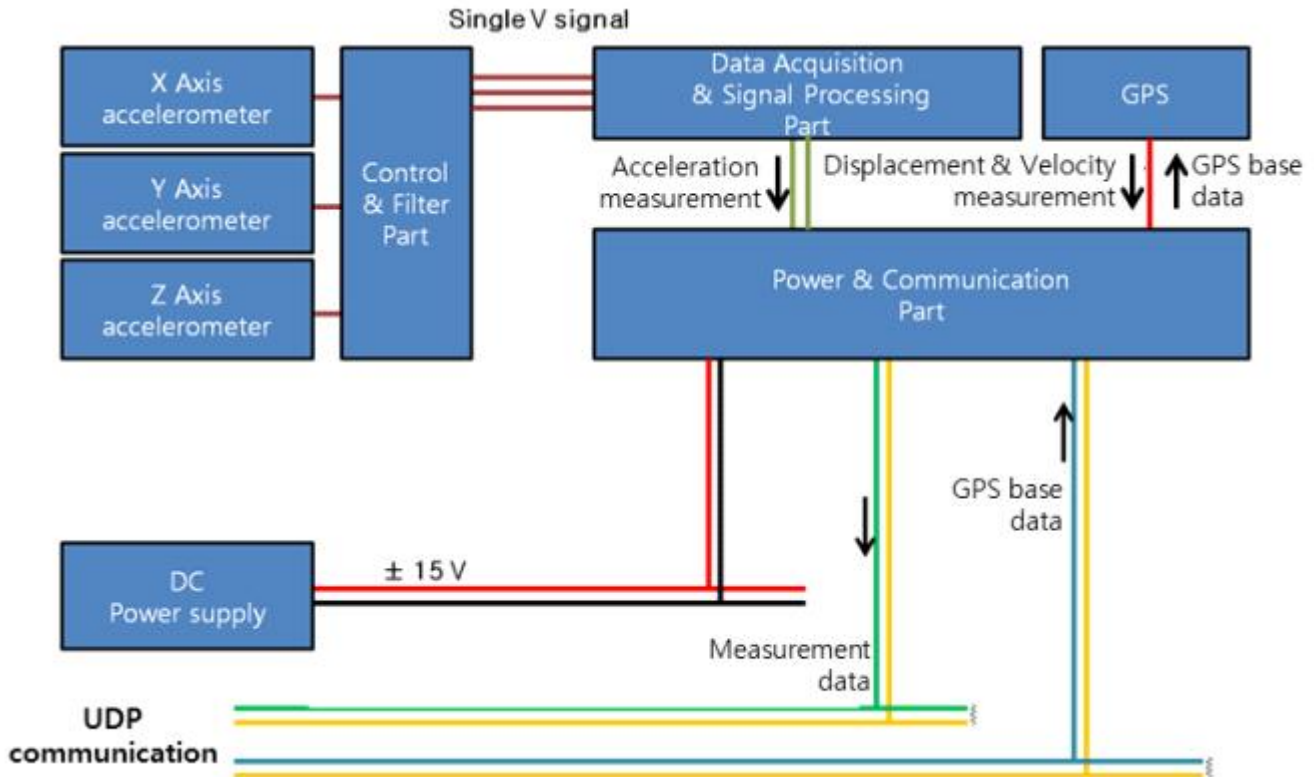


그림 32. GPS Rover + 가속도계 센서부의 블록 다이어그램

- 센서 계측 데이터 취득 및 전송을 위한 DAQ 통합 보드 제작
 - GPS 및 가속도계의 통합 데이터 취득을 위해 DAQ(data acquisition) 통합 보드의 운용개념을 설계하고 제작 완료
 - DAQ 통합 보드의 입력부는 데이터 전송률 10 pps의 UART 인터페이스로 제작되었으며, $\pm 10V$ 아날로그 출력의 가속도 센서, $+5V$ 아날로그 출력의 온도센서로 구성됨
 - DAQ 통합보드의 출력부는 GPS base 데이터 통신과 계측 데이터 통신을 위해 UDP 통신 인터페이스로 이루어짐
 - DAQ 통합보드의 처리부 ADC(analog digital converter)의 해상도는 24 bit, 샘플링 주파수는 최소 100 sps로 설정됨
 - ADC의 동시제어를 위해 CPLD(complex programmable logic device)가 사용되었으며, 4채널 ADC 제어 및 MCU 인터페이스를 담당
 - MCU에서는 칼만필터 기반 데이터 융합 알고리즘의 전처리부를 담당하며, Cortex-M7급 MCU가 사용됨. MCU는 GPS 데이터를 직접 취득하며, UDP 통신을 제어함

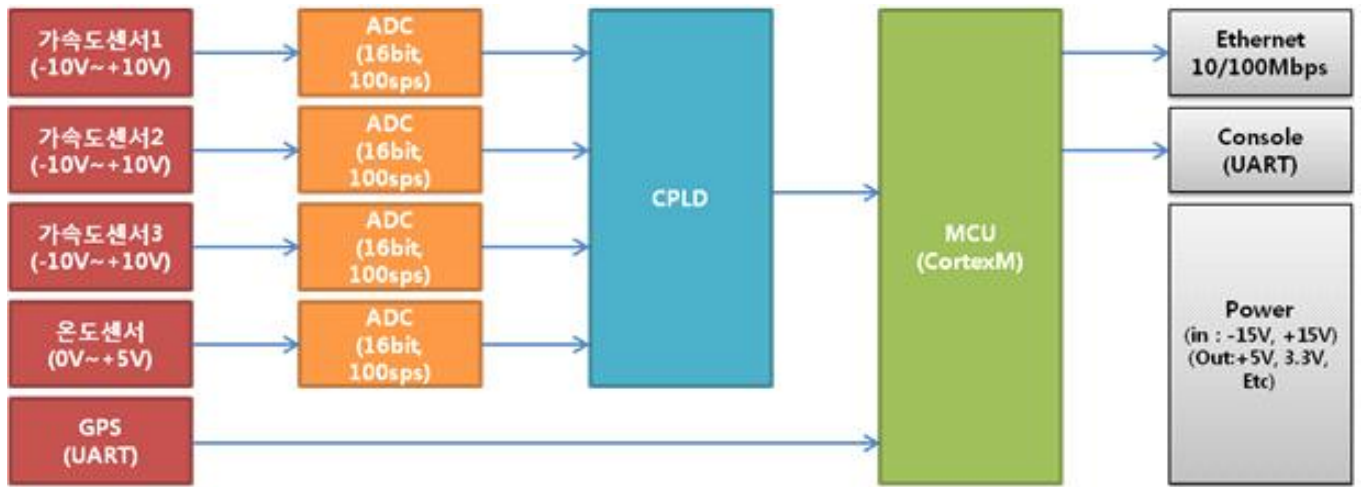


그림 33. 통합 DAQ 보드 블록 다이어그램

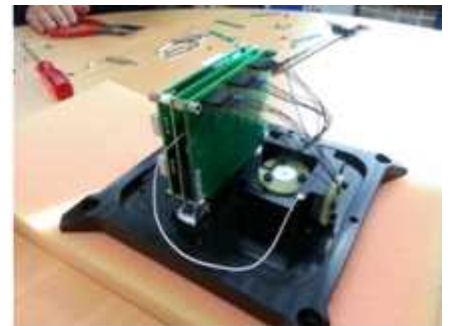
- Rover 및 base 센서모듈 시제품 개발
 - 센서부, 기구부, DAQ 통합보드를 일체화하여 하나의 센서 모듈을 개발하고 시제품 6기 제작 완료



〈Network & Power 보드〉



〈DAQ & Acc_Power 보드〉



〈가속도계 제어보드〉



〈GPS안테나 & 커넥터〉



〈GPS 모듈〉

그림 34. 개발된 가속도계+GPS 통합 센서모듈

단위성과 2-4: 멀티 센서 네트워크 설계 및 구현

- 성능목표: (1) 정확도 2 mm, (2) 샘플 주파수 100 Hz

■ GPS-RTK 일대다 통신 채널 구축

- 기존 Piksi GPS 칩셋의 high-speed FIFO 방식 통신환경은 윈도우 OS 기반으로만 국한되어 있으며, 기본적으로 요구되는 구성요소에 의해 하드웨어의 크기가 커지는 문제가 있음. 또한 OS 운영으로 인해 불필요한 애플리케이션이 작동되어야 함. 따라서 본 연구에서는 UART 방식의 통신환경으로 변경하여, 단순 데이터 획득을 위한 MCU 기반 센서로 변환하여 이 문제를 해결. Piksi GPS 칩셋의 FT232HQ 칩을 통해 전원공급과 더불어 1,000,000 baudrate 수준의 UART 통신이 가능
- 기존 Piksi GPS 칩셋은 433MHz, 915MHz 주파수의 라디오 통신을 통해 base와 rover가 통신하면서 base와 rover가 데이터를 송수신함. 그러나 일대일 통신만이 가능하며, 무선통신이 원활하지 않을 경우 데이터 손실이 일어날 수 있고, GPS-RTK가 간헐적으로 수립하지 않는 현상이 발생함. 또한 두 칩셋 간 장애물이 생길 수 있는 복잡한 구조물에서 적용하기 힘들고, 통신거리가 상대적으로 짧음
- 따라서 본 연구에서는 유선 UART 통신을 이용해 base와 rover를 연결. 이 경우 데이터 손실이 거의 없고 GPS-RTK가 안정적으로 수립되며 통신거리가 상대적으로 길어짐



그림 35. 기존 GPS 칩셋간 라디오 기반 무선통신은 일대일 통신만 가능할 뿐 아니라 자료 손실, RTK 누락, 짧은 통신거리 등의 단점이 있으나, 본 연구에서는 UART 기반 유선통신으로 수정 변경하여 일대다 통신을 가능하게 하고 여러 단점을 해소함

■ 멀티센서 네트워크 구축을 위한 UDP 통신망 설계 및 구현

- 본 연구에서 개발된 센서모듈과 서버의 통신 프로토콜로 TCP/IP와 UDP가 고려됨.
- TCP/IP는 센서모듈과 서버의 데이터 패킷 송수신에 앞서, 센서모듈이 동기화(SYNC) 신호를 전송하면 서버가 이 신호를 받아 다시 동기화와 인식(ACK) 신호를 전송하고, 다시 센서모듈이 인식 신호를 전송하면서 연결이 수립됨. 이 과정에서 클라이언트가 서버로부터 인식 신호를 전송받지 못하면 대기 모드에 들어감. 따라서 실시간 통신에서 매우 불리함
- 반면 UDP는 이러한 동기화 및 인식 신호 송수신 과정을 거치지 않고, 단순히 클라이언트가 서버에 곧바로 데이터 패킷을 전송하므로 실시간 통신에 유리. 그러나 통신과정에서 패킷이 소실될 경우 해당 시점의 측정 데이터가 통째로 누락될 우려가 있음
- 따라서 본 연구에서는 데이터 패킷 2개를 동시에 전송하는 기법을 채택함. 이 경우 데이터 패킷이 2번

연속 누락되는 경우가 아니라면 계측데이터가 소실되지 않음

- GPS base는 계측한 GPS 데이터를 통신보드를 거쳐 UDP 방식으로 허브/스위치에 전송하며, 이 데이터는 GPS rover에 UDP 방식으로 GPS 로버에 전송되어 RTK 데이터를 계산하게 함. 가속도계와 GPS 로버가 통합된 통합모듈에서는 DAQ를 통해 RTK 데이터와 가속도 데이터를 패킷 형태로 허브/스위치에 전송하고, 패킷은 광케이블을 통해 TCP/IP 방식으로 서버의 모니터링 프로그램에 전달됨
- 서버에서는 칼만필터 알고리즘을 거쳐 정밀 가속도, 속도, 변위 정보를 산정하고, 이 값을 서버에 저장함

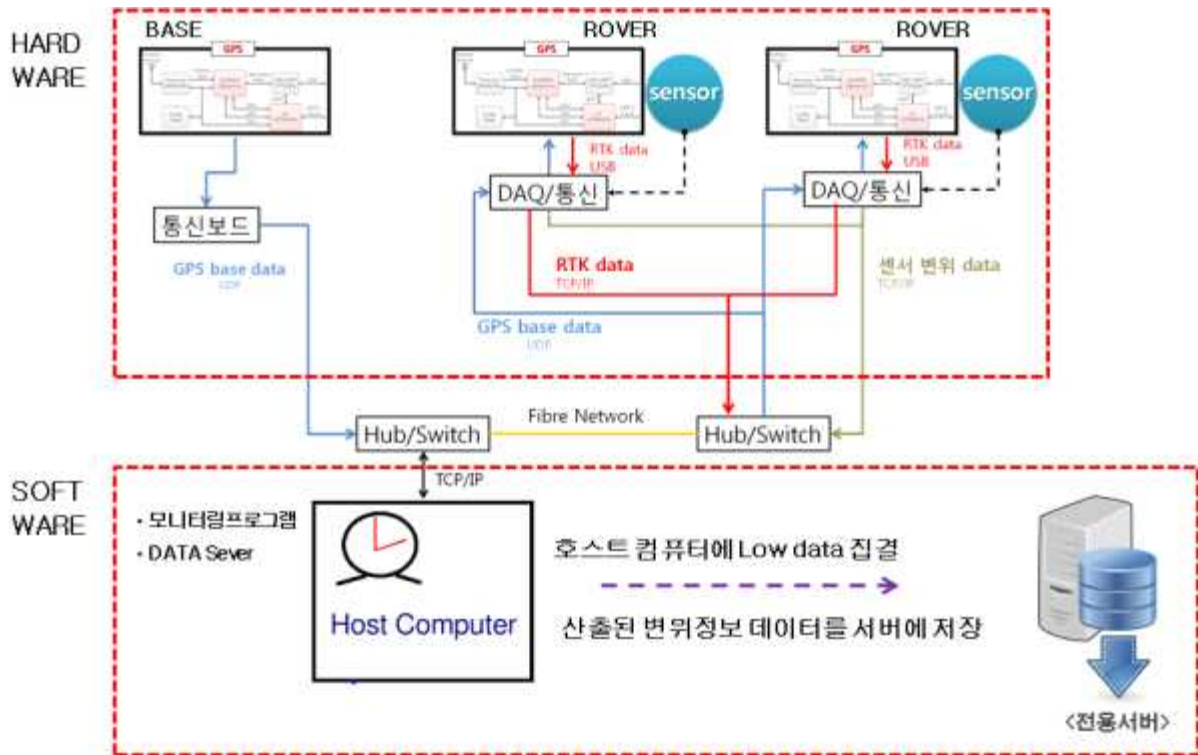


그림 36. 멀티센서 네트워크 환경에서의 데이터 패킷 전송 흐름도. GPS base와 통합모듈에서 생성된 정보는 UDP 방식으로 허브/스위치에 전송되며, 가속도계와 RTK 데이터는 허브/스위치에서 광케이블로 서버에 전송되어 처리, 저장됨

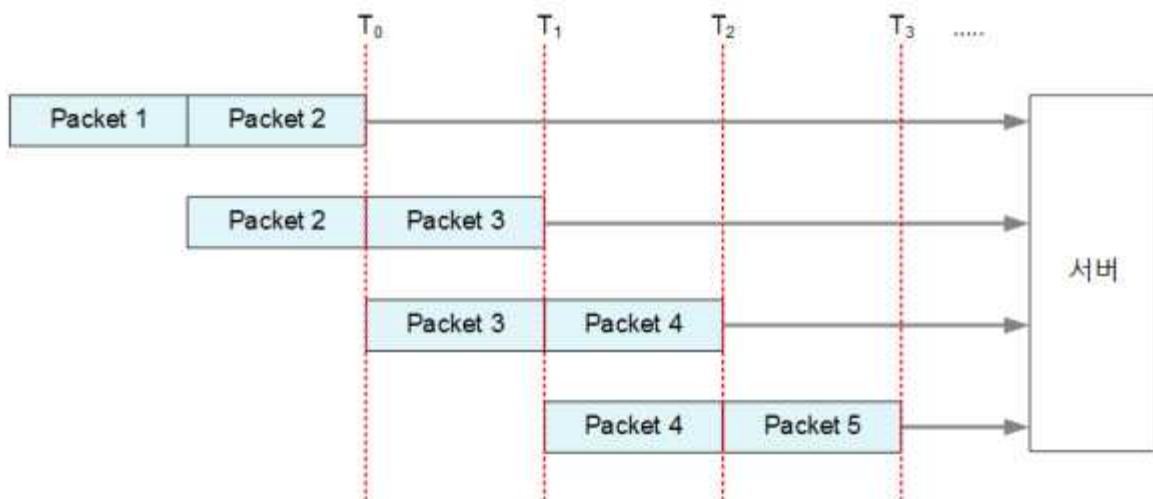


그림 37. UDP의 단점인 패킷 손실 가능성을 차단하기 위한 이중 전송 기법. 한 번에 연속된 2개의 데이터 패킷을 전송하므로 2회 연속 데이터 소실이 일어나지 않는 한 패킷 누락을 막을 수 있음

3. 3차년도

단위성과 3-1: 적용분야별 건전성 모니터링 소프트웨어 플러그인 개발 및 사용자 인터페이스 구현

- 성능목표: (1) GPS-RTK/가속도계 계측 데이터 및 동적거동 산정치의 안정적 출력
- 건전성 모니터링 소프트웨어 플러그인 및 사용자 인터페이스 구현
 - 하드웨어 시제품에서 전송받은 패킷을 바탕으로 6자유도 동적거동 계측치를 추출하고, 이를 사용자의 다양한 조건 및 요구사항에 맞게 분석 및 가공해 전달하는 건전성 모니터링 소프트웨어를 개발
 - 하드웨어 시제품에서 전달된 6자유도 동적응답(3자유도 변위, 속도, 가속도 및 3자유도 각변위)을 그래프 형식으로 실시간 확인할 수 있는 기본 계측 인터페이스와 사용자 지정시 파일에 계측치를 다양한 형식으로 저장할 수 있는 기능을 구현하여 기본 사용자 편의성 및 범용성을 확보
 - 사용자가 GPS 신호와 센서 시스템의 무결성을 쉽게 확인하여 신호의 신뢰도를 파악할 수 있도록 연결 상태, 위성 수, GPS-RTK 상태 및 오류 상황을 실시간 제공하며, 가속도, 속도, 변위 계측 데이터 및 산정 데이터를 텍스트 파일 형태로 저장이 가능함
 - 본 모니터링 소프트웨어의 동적거동 산정부는 dynamic linked library로 모듈화하여 다른 프로그램에 쉽게 이식될 수 있도록 설계함. 따라서 기존에 활용되고 있는 상용 구조물 건전성 모니터링 소프트웨어에서 해당 기능을 간단한 이식 절차만으로 사용할 수 있음

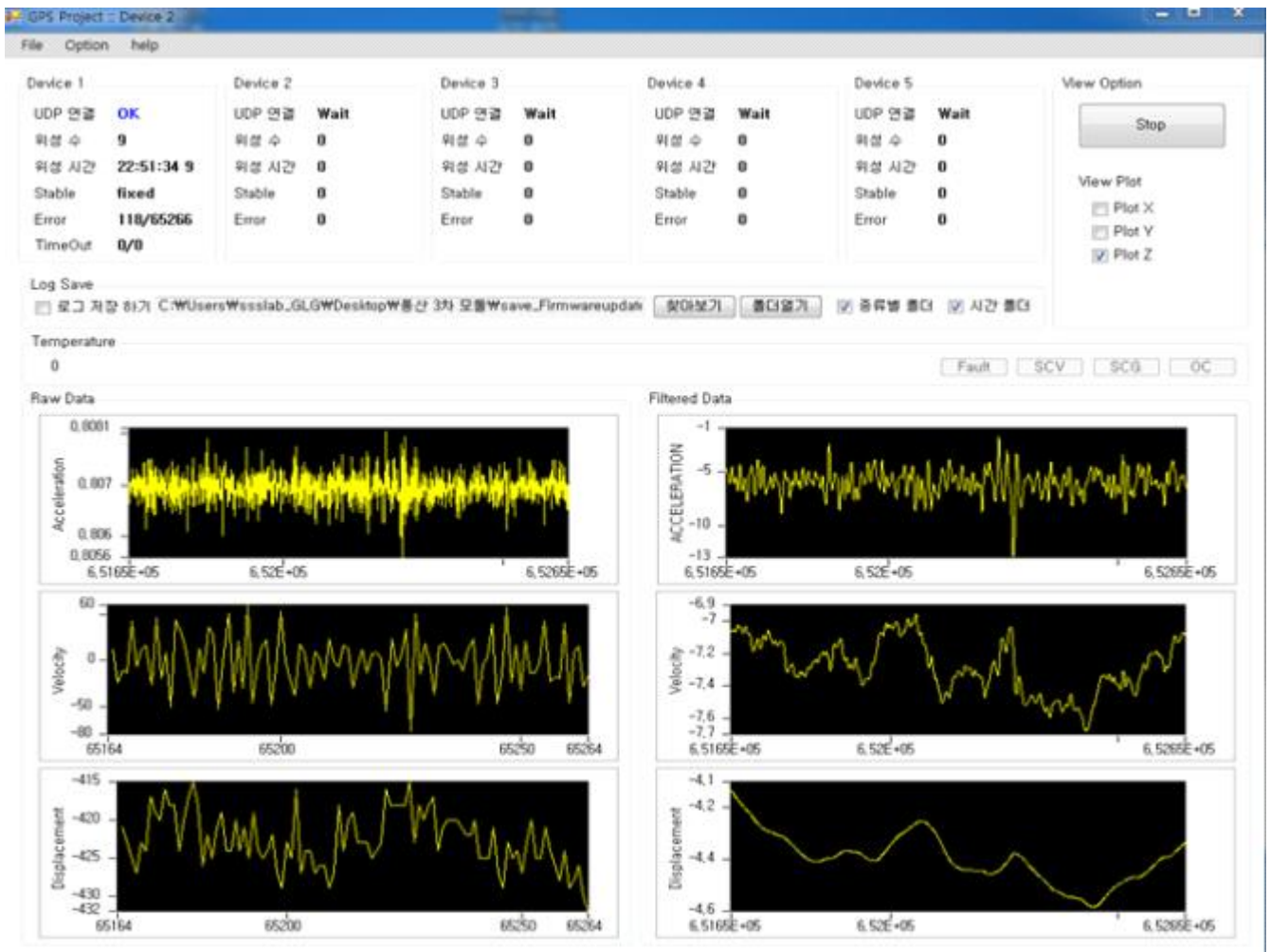


그림 38. 본 과제에서 개발된 구조물 거동 모니터링 소프트웨어. 사용자에게 연결상태, 위성 수, GPS-RTK 상태 및 오류 상황을 실시간 제공하며, 가속도, 속도, 변위 계측 데이터 및 산정 데이터를 텍스트 파일 형태로 저장이 가능함

단위성과 3-2: 시제품 제작 및 현장적용 시험 검증

- GPS 칩셋 교체를 통한 성능 개선
 - 최종 변위 산정 정확도를 높이기 위해서, GPS-RTK 칩셋을 Swift사의 모델명 Piksi v2에서 동일 회사의 모델명 Piksi multi으로 변경
 - Piski multi는 GPS 위성신호 수신 외에 GLONASS 위성신호 수신이 가능하고, 수신 주파수도 기존의 L1(1575.42MHz) 외에 L2(1227.6MHz), G1(1204.7MHz)와 G2(1246MHz)도 수신 가능하여 더 정확하고 안정적으로 변위를 계측함을 검증

표 4. 기존 GPS-RTK칩셋과 변경 GPS-RTK칩셋 비교

구분	기존 GPS-RTK 칩셋	변경 GPS-RTK 칩셋
		
제조사	Swift Navigation	Swift Navigation
제품명	Piksi v2	Piksi Multi
가격	\$500	\$595
정확도	1~3 cm	1~1.5 cm
샘플주파수	10 Hz	Up to 20 Hz (Currently 10 Hz)
크기	53 mm x 53 mm x 7 mm	48 mm x 71 mm x 12 mm
GPS 주파수	GPS L1	GPS L1/L2, GLONASS G1/G2
사용 가능 온도	-	-40 ~ 85

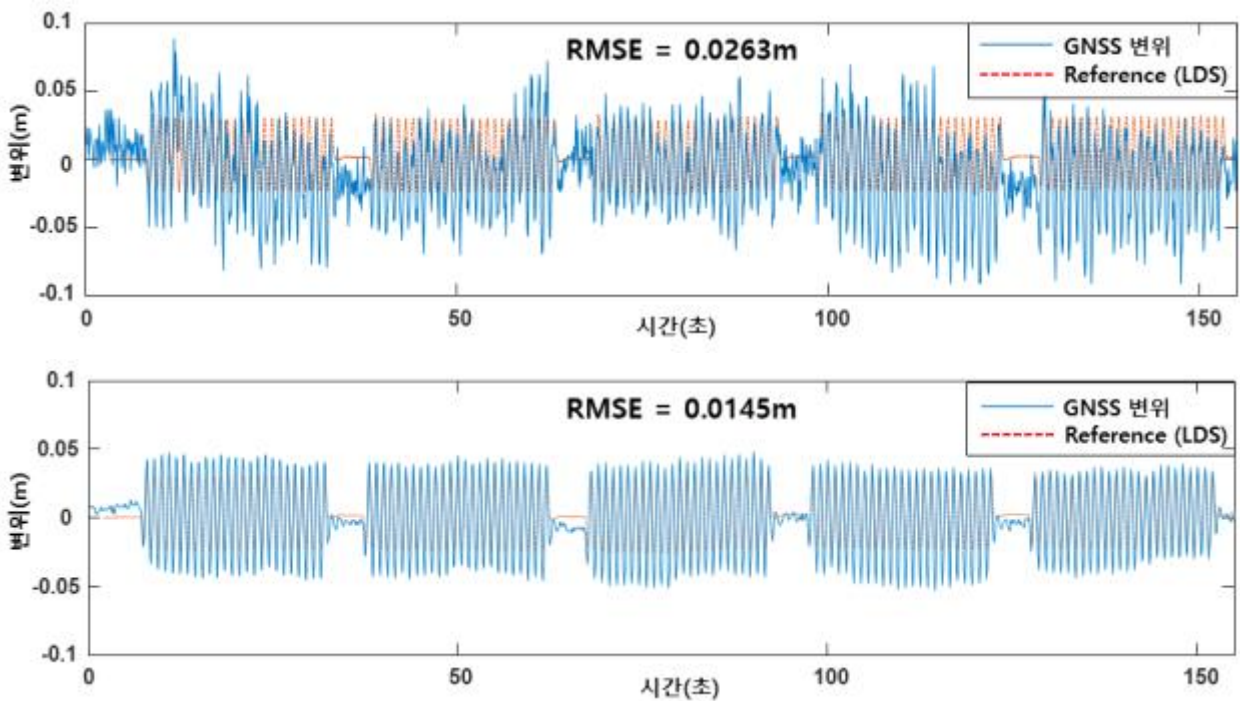


그림 39. 기존 GPS-RTK 칩셋과 변경 GPS-RTK 칩셋 변위 계측 성능

■ GPS 안테나 재선정

- 경제성, 성능(변위 계측 RMS 오차, Fixed 모드까지 걸리는 시간)을 고려하여 GPS500으로 GPS 안테나 재선정

표 5. GPS 안테나 경제성/성능 비교

구분	베이스 모듈	센서 모듈	RMS 오차 /Fixed Time	구분	베이스 모듈	센서 모듈	RMS 오차 /Fixed Time
1	 GPS500 (195 USD)	 GPS500 (195 USD)	0.0146 m / 60초	3	 W3870 (300 USD)	 TW3870 (300 USD)	0.0181 m / 300초
2	 VERAPHASE600 (2,000 USD)	 VERAPHASE600 (195 USD)	0.0145 m / 120초	4	 ERAPHASE600 (2,000 USD)	 VERAPHASE600 (2,000 USD)	0.0160 m / 300초

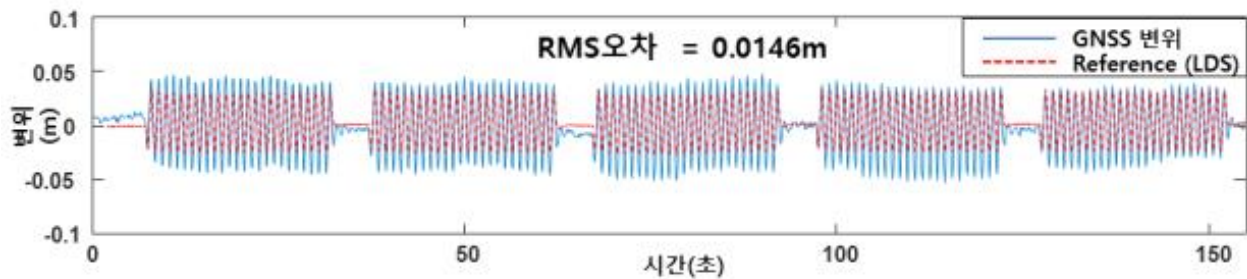


그림 40. 변경 GPS 안테나 변위 계측 성능

■ 실시간 6자유도 변위 모니터링 시스템 케이스 재설계

- GPS-RTK 칩셋과 안테나가 변경됨에 따라, 보드 및 센서를 재배치
- 기존의 175 x 175 x 120 mm 크기에서 115 x 115 x 110 mm 크기로 사이즈를 축소



그림 41. 1차 시제품 케이스(좌)와 최종 시제품 케이스(우)

- 가속도계-GPS 칩셋 시간동기화 기법 개발
 - GPS 에서 100ms 마다 MCU로 GPS 데이터를 전송
 - MCU 에서 GPS 데이터 수신 시, 10ms 마다 CPLD로 Tick을 주어 가속도 데이터 취득하여 가속도계와 GPS간 계측 시간을 동기화함

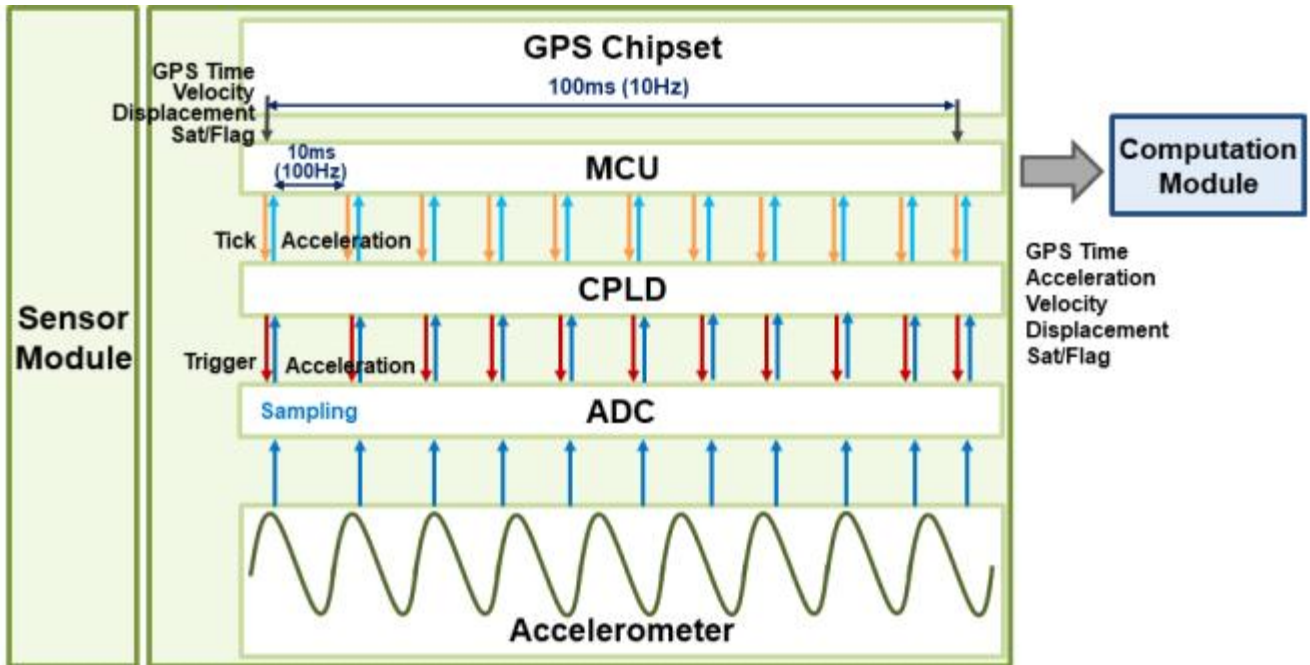


그림 42. 가속도계-GPS 칩셋 시간동기화 기법 개요. GPS에서 100ms 마다 MCU로 GPS 데이터를 전송하면, 전송시점에 맞추어 MCU는 10ms 마다 CPLD로 Tick를 발생시켜 가속도 데이터를 취득

- 영종대교 테스트베드 구축
 - 영종대교에 개발 시스템 현장검증을 위한 테스트베드 구축 (2017.11.27)
 - 테스트베드 구축 후, 2017년 11월 27일 변위 계측 RMS 오차는 1.55 mm, 2018년 2월 1일 변위 계측 RMS 오차는 1.74 mm로 장기 계측 성능 및 안정성 검증

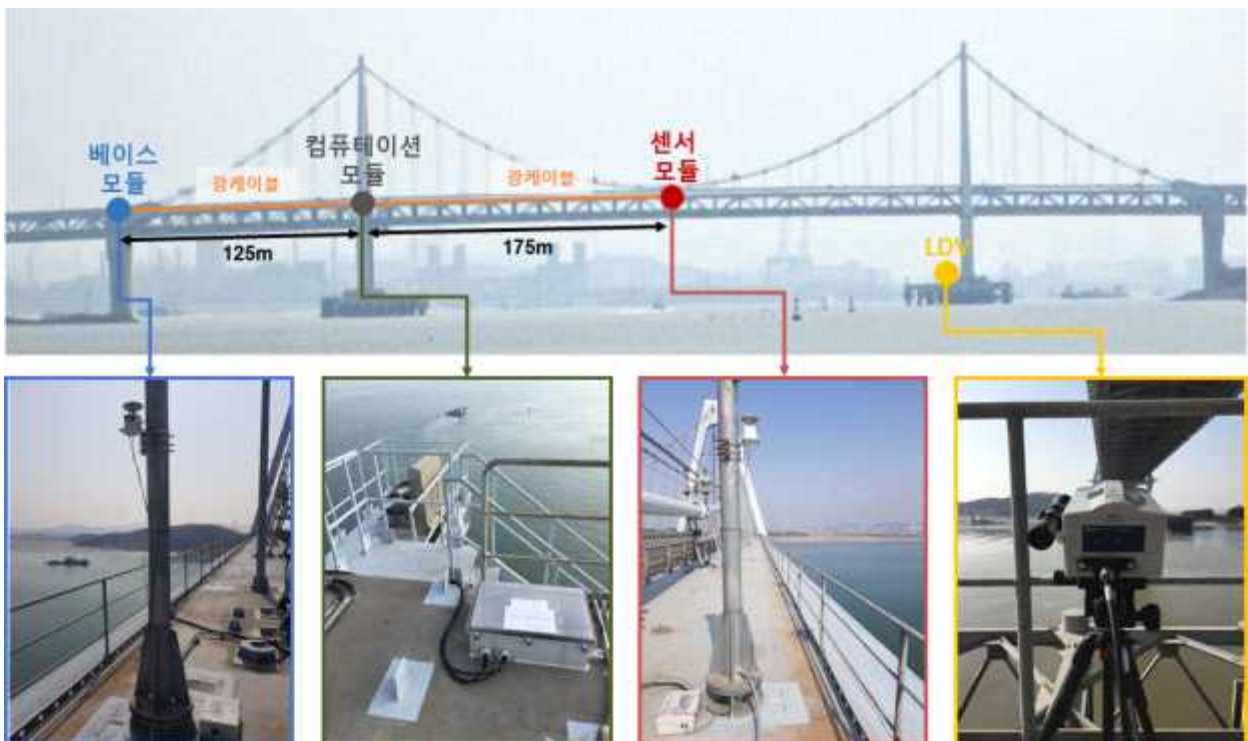


그림 43. 영종대교 테스트베드 구축

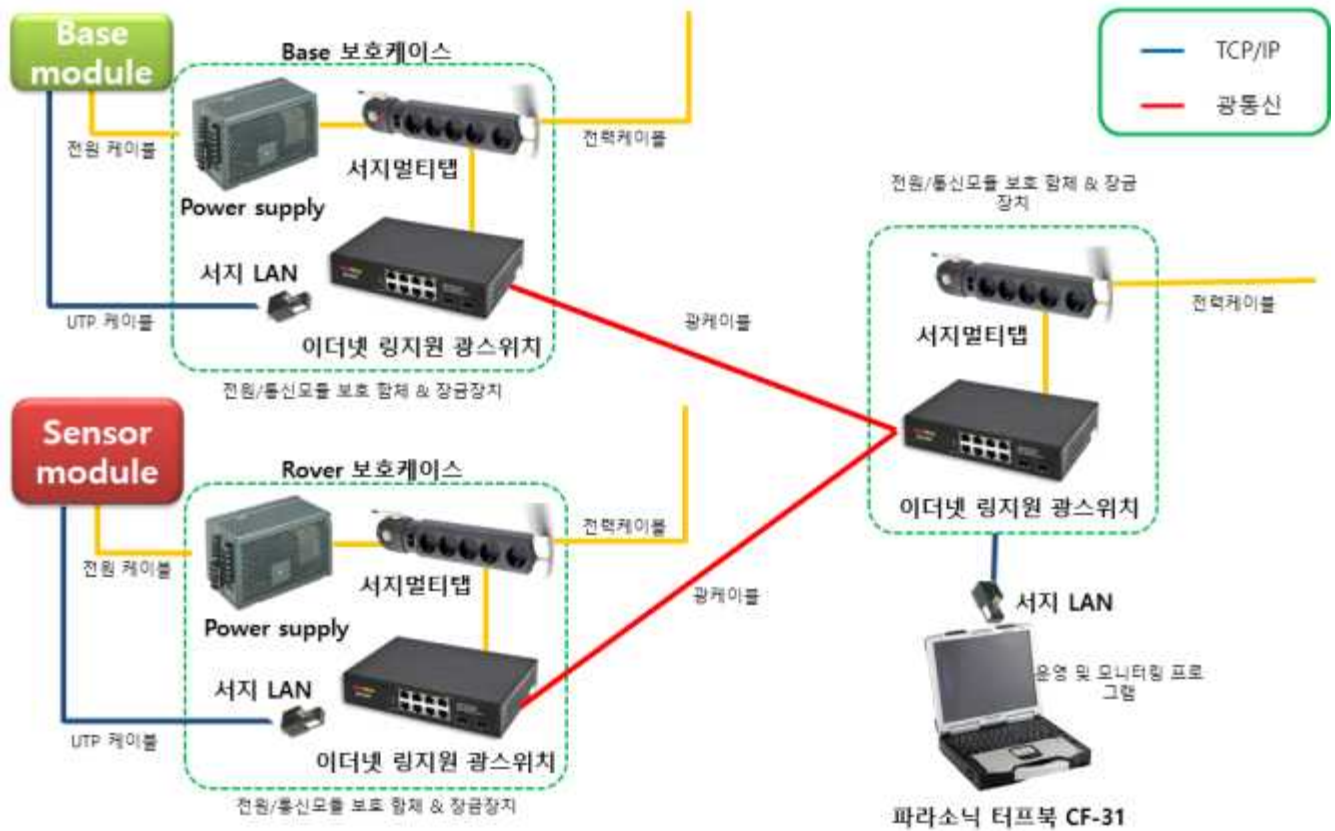


그림 44. 영종대교 센서모듈 설치 구성도

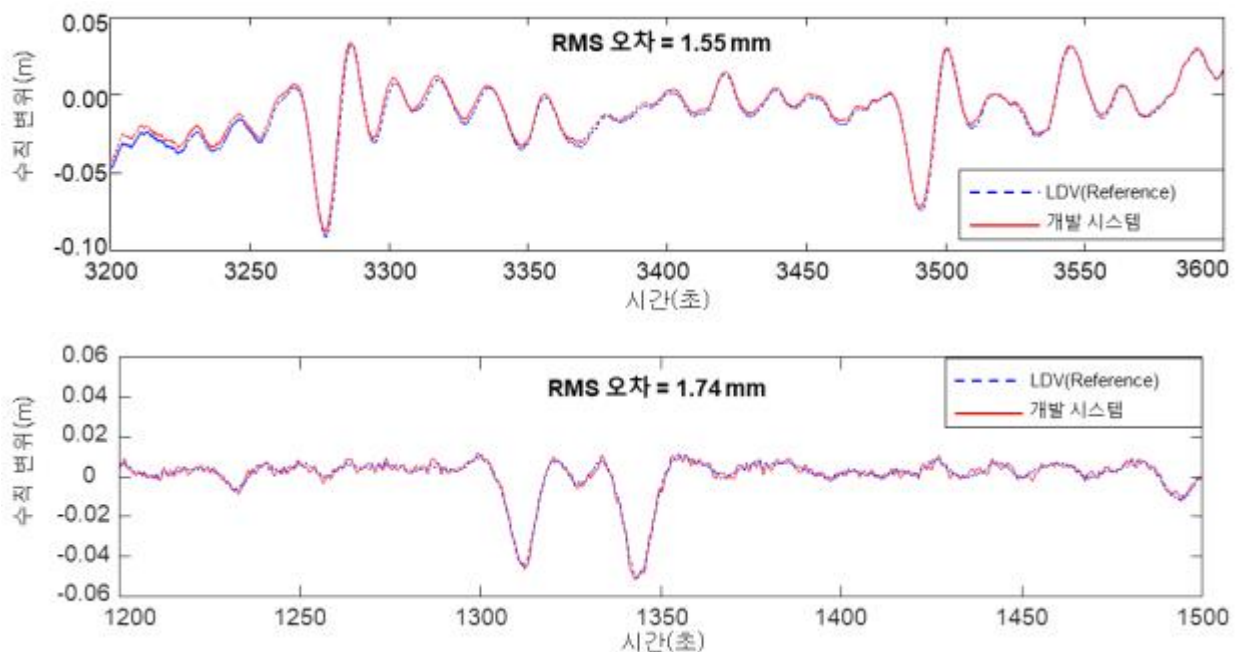


그림 45. 개발 시스템 계측 정확도. 2017년 11월 27일 계측치(위) 및 2018년 2월 1일 계측치(아래)

단위성과 3-3: 건설신기술 신청 및 공인인증 확보

- 성능시험 공인인증 획득 (한국산업기술시험원, KOLAS 인증기관)
- 한국산업기술시험원 (KOLAS 인증 기관)에서 개발 시스템의 변위 계측 성능검증을 진행하였으며, 수평, 수직, 정적 변위 계측을 각각 30분씩 수행하였으며, RMS 오차가 모두 3mm 이내로 산출

표 6. 개발 시스템 성능 시험 세부 내용

구분	내 용
목적	▪ 제작된 시제품(가속도계, GPS-RTK 포함)의 변위 계측값의 정확도 파악
세부 내용	▪ 시험 기관 : 한국산업기술시험원(KOLAS 인증기관) ▪ 시험 항목 및 세부 내용 1. 변위 측정 대상 구조물의 진동을 발생하기 위하여 대상 구조물을 모달 셰이커 위에 고정한다. 2. 대상 구조물의 변위 측정 지점에 센서 모듈을 부착한다. 3. 진동이 없고 위성 신호를 잘 받을 수 있는 장소에 베이스 모듈을 부착한다. 4. 센서 모듈, 베이스 모듈 및 컴퓨테이션 모듈을 랜 케이블로 스위칭 허브에 연결한다. 5. 센서 모듈과 베이스 모듈에 파워 서플라이로 +5V DC전압을 인가한다. 6. 컴퓨테이션 모듈의 변위 모니터링 프로그램(GPS Project_Dev2.exe)을 구동한다. 7. GPS 위성 신호의 안정성과 초기 변위 수렴을 위해 프로그램 구동 후, 약 20분 정도 대기한다. 8. 모달 셰이커로 변위 측정 대상 구조물에 수평, 수직, 정적 진동을 가한다. 9. 레이저 변위계(KAIS, KLS-W400)를 사용하여 변위 측정 대상 구조물의 Reference 변위를 측정한다. 10. 센서 모듈로 변위 측정 대상 구조물의 변위를 측정한다. 11. 레이저 변위 측정기를 사용하여 계측한 참조 변위와 센서 모듈을 통하여 계측된 변위를 비교한다.



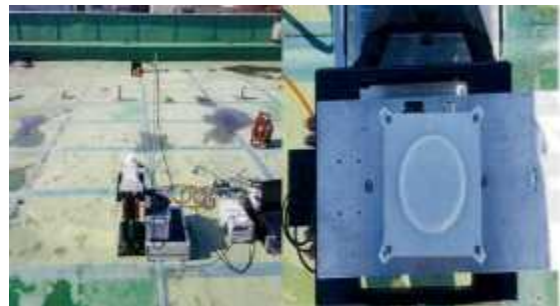
변위 계측 실험 관련한 기기 배치



레이저 변위계 장비 및 교정 필증



수평변위 측정 지점



수직 및 수평변위 측정 지점

그림 46. 개발 시스템의 변위 계측 성능시험

표 7. 변위 측정 대상 구조물에 가한 진동 조건

구분	진동 형태	진폭	주파수	시간
수평	Sine wave	50mm	1Hz	30분
	Random wave	50mm	1 ~ 10Hz	30분
수직	Sine wave	50mm	1Hz	30분
	Random wave	50mm	1 ~ 10Hz	30분
정적	—	0mm	—	30분

표 8. 레이저 변위계와 변위센서 모듈 계측값의 RMS 오차

구분	진동 형태	RMS 오차 (mm)
수평	Sine wave	0.882
	Random wave	0.460
수직	Sine wave	1.535
	Random wave	1.347
정적	—	0.251

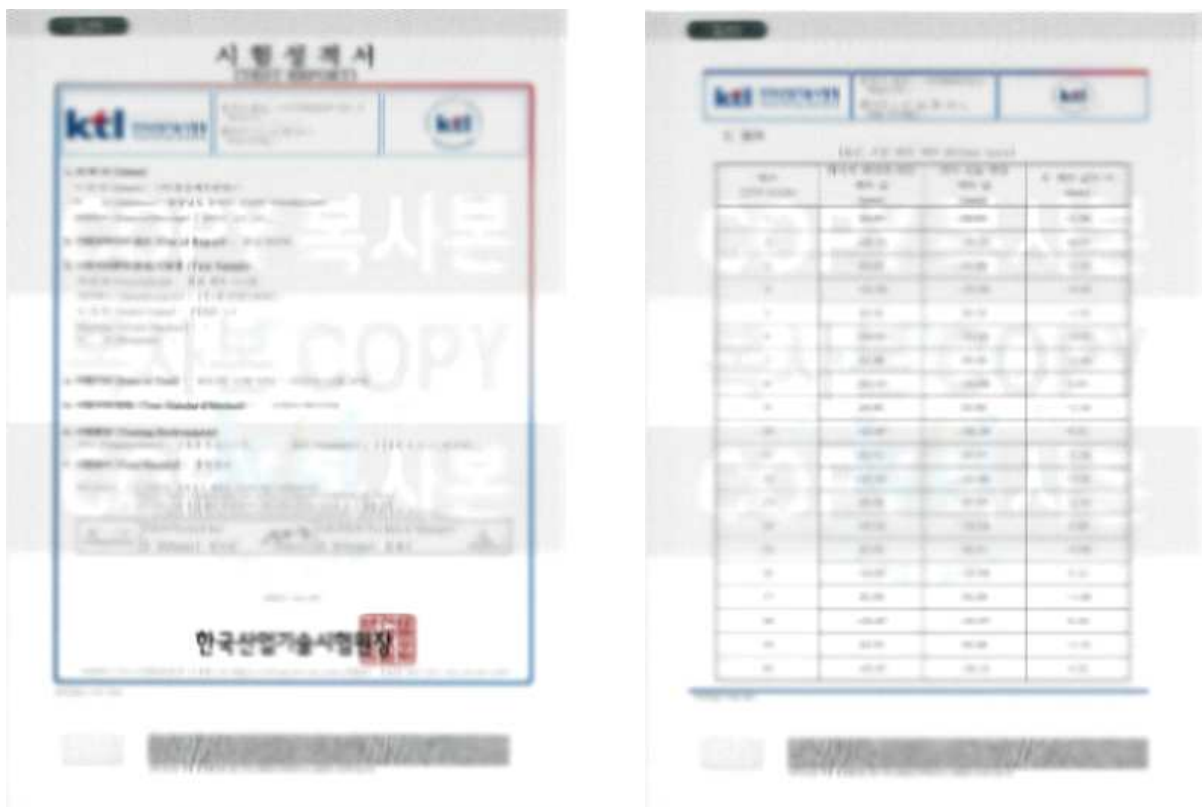


그림 47. 한국산업기술시험원 성능시험 성적서

- 환경 적응력 공인인증 획득 (충남테크노파크 자동차부품센터, KOLAS 인증기관)
- 충남테크노파크 자동차부품센터 (KOLAS 인증기관)에서 환경시험을 진행한 후 개발 시스템의 작동 여부를 확인한 결과, 6가지 경우에서 모두 정상 동작하는 것으로 확인
- 또한, 시험 후 개발 시스템을 육안으로 검사한 결과, 외관상 균열 및 파손 미발생

표 9. 개발 시스템 환경 시험 세부 내용

구분	내 용		
목적	■ 악조건(고온, 저온, 진동, 충격)의 환경 변화에 따른 작동 여부 평가		
세부 내용	■ 시험 기관 : 충남테크노파크 자동차부품센터(KOLAS 인증기관) ■ 시험 항목 및 세부 내용		
	시험 항목	시험 규격	시험 장비
	고온 저장	+63℃, 1주기 24시간, 총 7주기 수행	온도챔버
	고온 운용	+63℃, 1주기 24시간, 총 3주기 수행	온도챔버
	저온 저장	-40℃, 24시간 저장	온도챔버
	저온 운용	-32℃에서 4시간 노출 중 1회 동작 여부 확인	온도챔버
	진동 시험	6.3Grms, 3축, 축당 60분	진동장비
	충격 시험	20g 11msec, 3축 양방향으로 최소 3회씩 수행	충격장비



그림 48. 충남테크노파크 자동차센터 환경적응력 공인인증 시험성적서

- 방진/방수 보호 공인인증 획득 ((주)원텍, KOLAS 인증기관)
 - (주)원텍 (KOLAS 인증기관)에서 KS C IEC 60529 기준으로 방진/방수 시험을 수행하여, 방진시험에 서는 약간의 먼지도 통과하지 않는 가장 높은 등급(IP6X) 판정
 - 방수시험에서는 15 cm ~ 1 m 깊이의 물속에서 30분간 보호할 수 있는 등급(IPX7) 판정

표 10. 개발 시스템 방진/방수 보호 시험 세부 내용

구분	내 용					
목적	·KS C IEC 60529 규격에 준하는 시험을 통해 방진·방수에 대한 신뢰성 확보					
세부 내용	·시험 기관 : (주)원텍(KOLAS 인증업체)					
	·시험 항목 및 세부 내용					
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>구분</th><th>시험 조건</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>방진시험 (외부 고체 물체의 침투에 대한 보호)</td><td> ·시험용 활석분진의 표준체 와이어 공칭지름 : $50\mu\text{m}$ ·시험용 활석분진의 표준체 와이어 간격 : $70\mu\text{m}$ ·단위부피당 활석분진의 양 : $2\text{kg}/\text{m}^3$ </td></tr> <tr> <td>방수시험 (위험한 영향을 주는 물의 침투에 대한 보호)</td><td> ·물속에 잠긴 시료의 가장 낮은 지점의 수위 : $1,000\text{mm}$ ·물속에 잠긴 시료의 가장 높은 지점의 수위 : 890mm ·수온과 시료의 온도차(5K 이내) : 2.0K </td></tr> </tbody> </table>	구분	시험 조건	방진시험 (외부 고체 물체의 침투에 대한 보호)	·시험용 활석분진의 표준체 와이어 공칭지름 : $50\mu\text{m}$ ·시험용 활석분진의 표준체 와이어 간격 : $70\mu\text{m}$ ·단위부피당 활석분진의 양 : $2\text{kg}/\text{m}^3$	방수시험 (위험한 영향을 주는 물의 침투에 대한 보호)
구분	시험 조건					
방진시험 (외부 고체 물체의 침투에 대한 보호)	·시험용 활석분진의 표준체 와이어 공칭지름 : $50\mu\text{m}$ ·시험용 활석분진의 표준체 와이어 간격 : $70\mu\text{m}$ ·단위부피당 활석분진의 양 : $2\text{kg}/\text{m}^3$					
방수시험 (위험한 영향을 주는 물의 침투에 대한 보호)	·물속에 잠긴 시료의 가장 낮은 지점의 수위 : $1,000\text{mm}$ ·물속에 잠긴 시료의 가장 높은 지점의 수위 : 890mm ·수온과 시료의 온도차(5K 이내) : 2.0K					

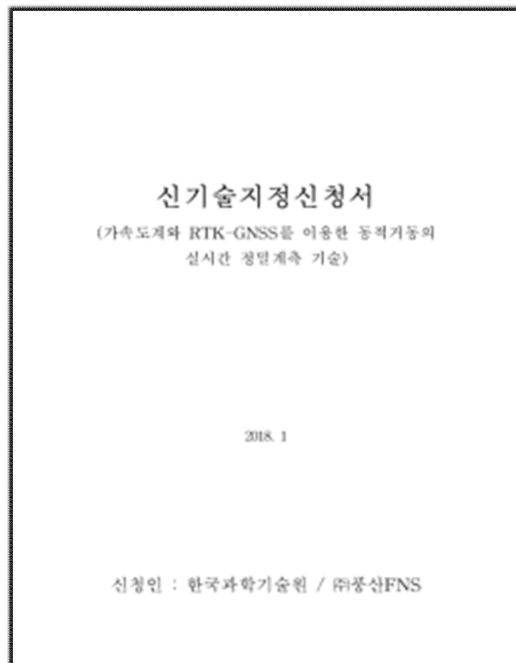


그림 49. (주)원텍 방진 및 방수 공인인증 시험성적서

- 건설신기술 신청
 - 국토교통과학기술진흥원 주관 건설신기술 인증 신청 (2018.01.18)
 - 1차 심사 (신규성, 진보성, 경제성) 통과 (2018.04.20)
 - 현장 실사 및 2차 심사 (적용성, 보급성) 예정 (2018.05-06)

표 11. 건설신기술 신청 내용

신기술 명칭	가속도계와 GPS-RTK를 이용한 동적거동의 실시간 정밀계측 기술
신기술 내용	본 신청기술은 구조물의 동적거동을 3축 가속도계와 GPS-RTK를 통해 각각 측정 한 후 이단계 칼만필터를 통해 해석함으로써, 실시간, 상시적, 고정확도, 고해상도로 계측이 가능하다. 따라서 정확한 변위계측이 요구되는 구조물의 안전진단 및 방재분야 등 다방면으로 활용될 것으로 기대되고, 진동까지 계측할 수 있어 지진 등과 같은 국가적 재난 사태 발생 시 구조물의 균열 및 붕괴로부터 국민의 안전을 확보할 수 있다.
신기술의 범위	구조물의 동적거동(변위, 속도, 가속도)을 3축 가속도계와 GPS-RTK를 통해 각각 측정 한 후 이단계 칼만필터로 해석함으로써, 실시간, 상시적, 고정확도, 고해상도로 측정이 가능한 계측기술



신기술 지정신청서			
신청번호	신청일	발행처	제출기간
신기술 명칭	가속도계와 RTK-GNSS를 이용한 동적거동의 실시간 정밀계측 기술		
기술을 개발 또는 개량한 자	발명명	한국과학기술원	사업자등록번호(법인등록번호)
	발명(대표)자	최성철	314-82-21983114471-0000000
	전화번호	042-352-3623	생년월일
	주소	대전시 유성구 대덕로 201 한국과학기술원 제1-2동 4201호	
신기술 내용	발명명	제 풍산 FNS	사업자등록번호(법인등록번호)
	발명(대표)자	최상우	107-81-380331110111-0138033
	전화번호	041-742-5208	생년월일
	주소	충청남도 논산시 공진면 복암리길 893	
신기술의 범위	본 신청기술은 구조물의 동적거동을 3축 가속도계와 RTK-GNSS를 통해 각각 측정 한 후 이단계 칼만필터를 통해 해석함으로써, 실시간, 상시적, 고정확도, 고해상도로 계측이 가능하다. 따라서 정밀한 변위계측이 요구되는 구조물의 안전진단 및 방재분야 등 다방면으로 활용될 것으로 기대되고, 진동까지 계측할 수 있어 지진 등과 같은 국가적 재난 사태 발생 시 구조물의 균열 및 붕괴로부터 국민의 안전을 확보할 수 있다.		
	구조물의 동적거동(변위, 속도, 가속도)을 3축 가속도계와 RTK-GNSS를 통해 각각 측정 한 후 이단계 칼만필터로 해석함으로써, 실시간, 상시적, 고정확도, 고해상도로 측정이 가능한 계측기술		
[신기술을 인증함], 제14호, 같은 법 시행령 제31조 및 같은 법 시행규칙 제72조에 따라 신기술 지정신청서-42			
신청인		한국과학기술원	2018. 05. 04
		제 풍산 FNS	(인)
국토교통부장관 귀하			

그림 50. 신기술지정신청서

단위성과 3-4: 연구성과 홍보 및 국내외 판로 모색/확장

- San Francisco-Oakland Bay Bridge 현장실험을 통한 개발 시스템 검증
 - 2017년 3월 미국 San Francisco-Oakland Bay Bridge에서 개발 시스템의 현장검증을 수행
 - 변위 계측 정확도 검증 (RMS 오차: 1.68mm)



그림 51. San Francisco-Oakland Bay Bridge 성능검증 실험 개요

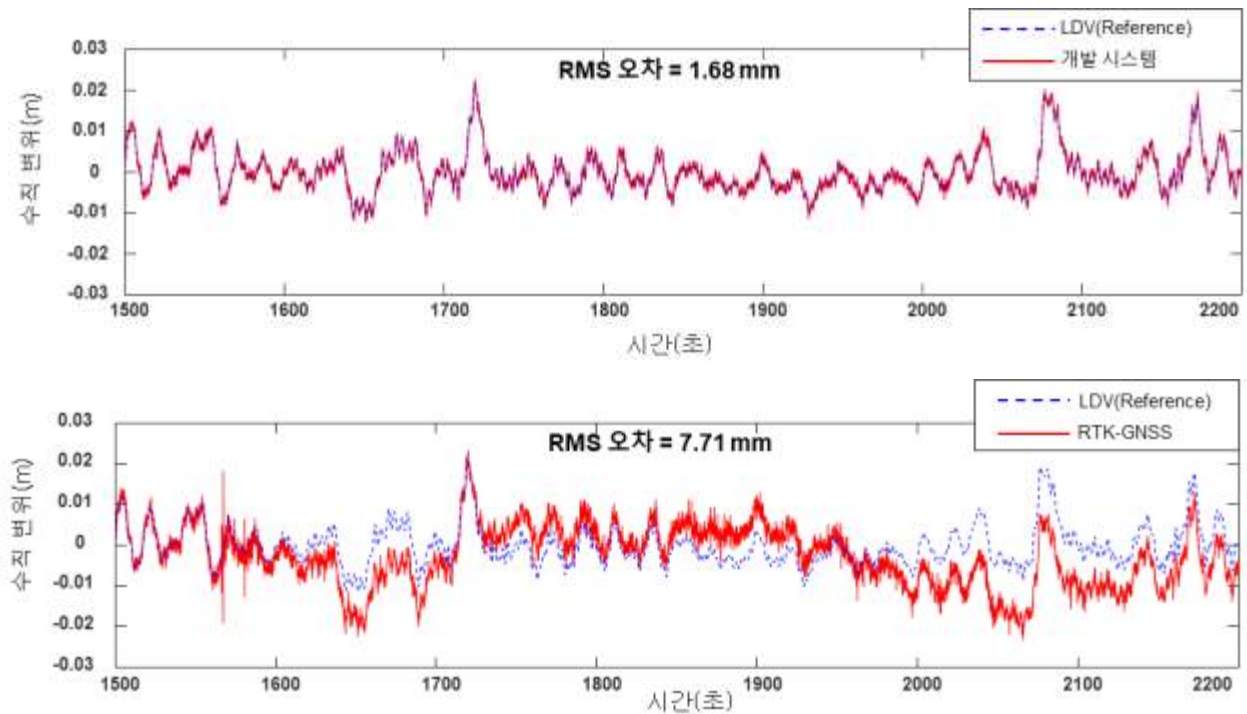


그림 52. 개발 시스템 및 RTK-GNSS 변위 계측 정확도 비교 (San Francisco-Oakland Bay Bridge)

- Qingfeng Bridge 현장실험을 통한 개발 시스템 검증
 - 2017년 4월 중국 Qingfeng Bridge에서 개발 시스템의 현장검증을 수행
 - 변위 계측 정확도 검증 (RMS 오차: 1.91mm)

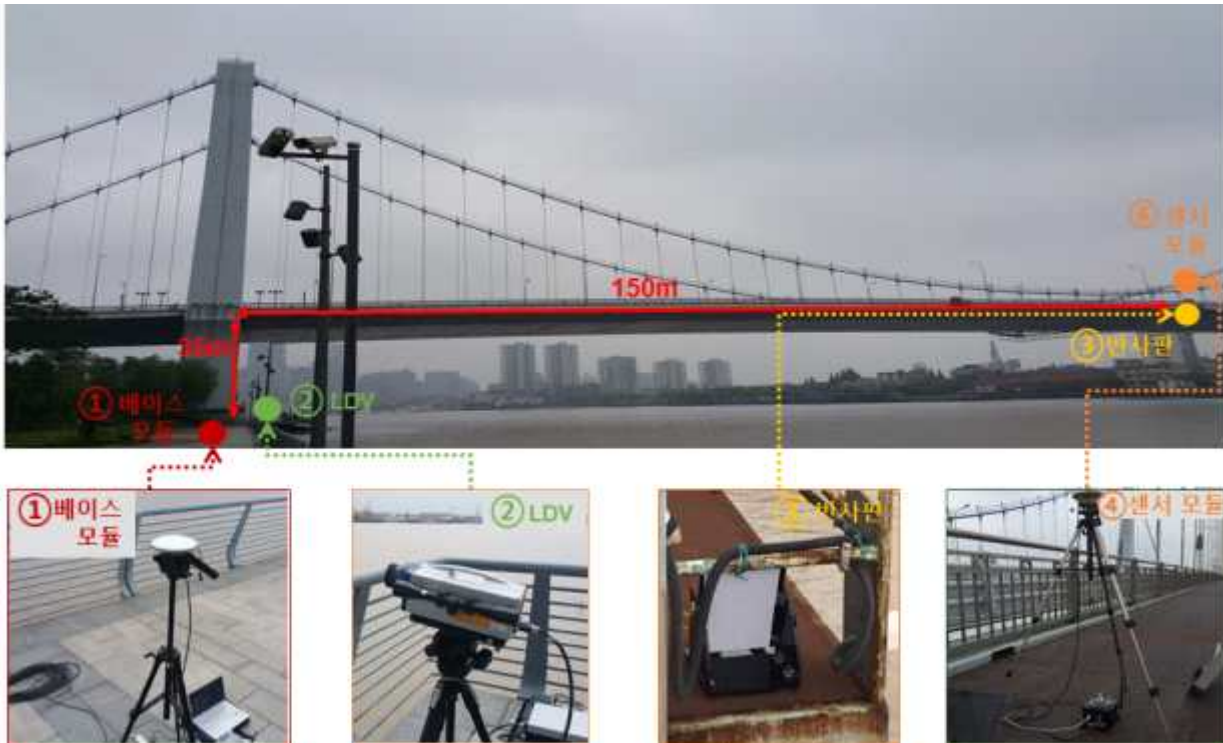


그림 53. Qingfeng Bridge 성능검증 실험 개요

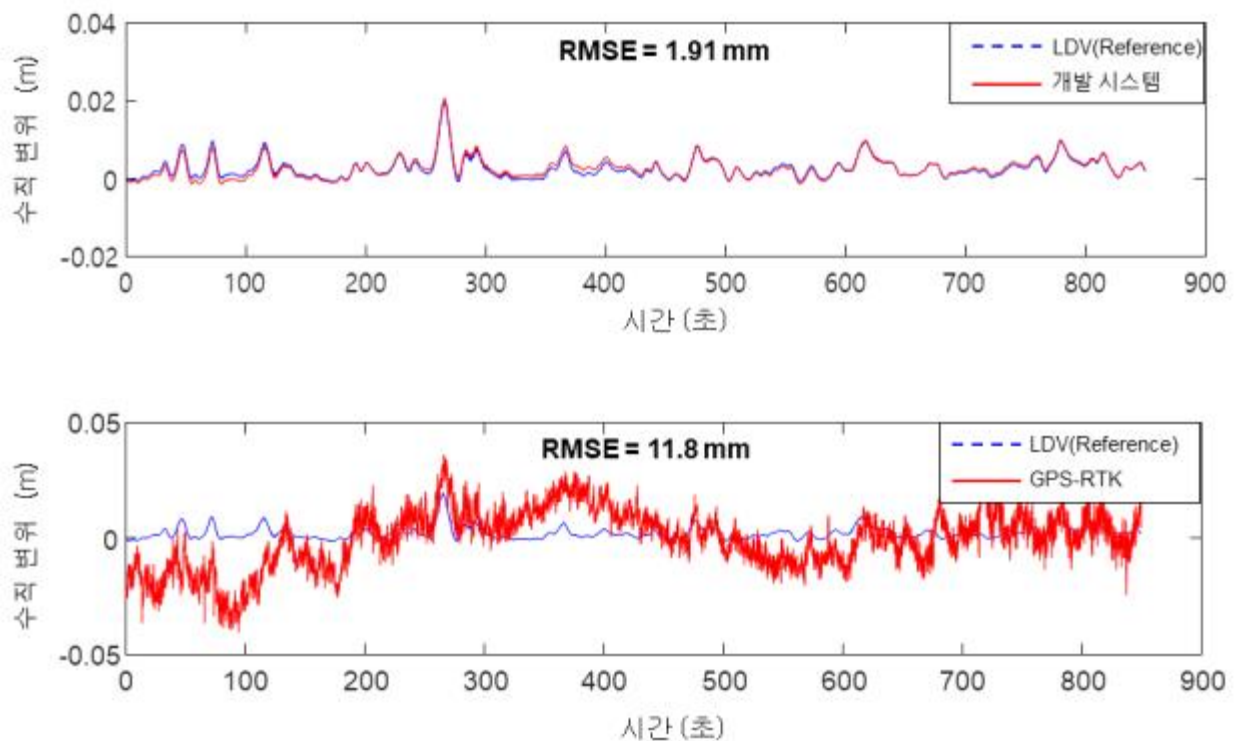


그림 54. 개발 시스템 및 RTK-GNSS 변위 계측 정확도 비교 (Qingfeng Bridge)

■ 관련 국제학회 기조연설

- 미국, 샌디에고에서 2017년 7월 12일에 열린 7th International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures 학회에서 “Development of a high accuracy and high sampling rate displacement sensor for civil engineering structures monitoring” 주제로 기조 연설 및 개발 시스템 홍보
- 일본, 동경대에서 2017년 7월 22일에서 열린 The 13th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology 학회에서 “Structural displacement, velocity and acceleration measurement system based on accelerometer and GPS-RTK for large-scale civil structures” 주제로 기조 연설 및 개발 시스템 홍보

표 12. 관련 국제학회 기조연설

학회명	주제	장소	일시
7th International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures	Development of a high accuracy and high sampling rate displacement sensor for civil engineering structures monitoring	San Diego, California, USA	2017.07.12 .-14
The 13th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology	Structural displacement, velocity and acceleration measurement system based on accelerometer and GPS-RTK for large-scale civil structures	Tokyo, Japan	2017.07.22 .-23



그림 55. 관련 국제학회 기조연설

■ 기술 홍보

- 2017 국토교통과학기술대전에서 개발 시스템 전시 및 우수성 홍보 (2017.05.24)
- 발명의 날의 기념식 우수 발명품 선정 및 전시 (2018.05.16)
- The 7th World Conference on Structural Control and Monitoring(Qingdao, China) 에서 개발 시스템 전시 및 우수성 홍보 (2018.07.22-25)



그림 56. 2017 국토교통과학기술대전



그림 57. 발명의 날 기념식 및 7WCSCM

- 국내외 판로모색 및 확장
 - 2018년 하반기에 대전시와 협업을 통한 유등교, 신상교, 죽동천교 중에 1개 교량에 개발 시스템 설치 예정
 - 미국 캘리포니아 교통국, Caltrans 와의 개발 시스템 성능 시연 및 검증 실험을 바탕으로 미국 시장 진출 모색
 - 중국 건설/교통 업체인 CCCC 와의 개발 시스템 성능 시연 및 검증 실험을 바탕으로 중국 시장 진출 모색



그림 58. Caltrans 및 CCCC 대상 개발 시스템 성능 시연

제4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

1.1. 정성적 연구목표 달성도

	핵심성과	단위성과	평가목표 및 착안점	결과물	달성도 (%)
1차년도 (2015.06~2016.06)	사회기반시설 및 구조물 장기거동 모니터링용 3축 가속도계 개발	포스피드백 방식 3축 가속도계 모듈 개발	대역폭 0-100Hz 최대측정가속도 $\pm 4g$ 및 분해능 $1\mu g$	대역폭 0-100Hz 최대측정가속도 $\pm 4g$ 및 분해능 $1\mu g$	100
		가속도계 장기 계측특성 분석			
	GPS-RTK 변위계측기법 개발	GPS-RTK 변위계측 시스템 구축 계측변위 잡음소거기법 개발 및 실험검증	계측 정밀도 1-2cm (수평방향), 2-4cm (수직방향)	계측 정밀도 0.5cm (수평방향), 1cm (수직방향)	200
2차년도 (2016.06~2017.06)	GPS-RTK 및 3축 가속도계 데이터 융합을 통한 6자유도 동적거동 실시간 산정기법	구조물 6자유도 동적거동 (변위, 속도, 가속도, 기울기) 산정을 위한 칼만필터 알고리즘 개발	정확도 2mm, 샘플주파수 100Hz	정확도 2mm, 샘플주파수 100Hz	100
		정밀도 평가를 위한 국내외 현장실험			
	실시간 6자유도 동적거동 모니터링 시스템 시제품(H/W)	GPS-RTK / 3축 가속도계를 통합한 6자유도 동적거동 모니터링 시스템 하드웨어 설계 및 제작 멀티 센서 네트워크 설계 및 구현	정확도 2mm, 제품단가 1,000만원 이내의 시작품	정확도 2mm, 제품단가 1,000만원 이내의 시작품	100
3차년도 (2017.06~2018.06)	실시간 6자유도 동적거동 모니터링 시스템 시제품(S/W)	적용분야별 건전성 모니터링 소프트웨어 플러그인 개발 및 사용자 인터페이스 구현	GPS-RTK/가속도계 계측 데이터 및 동적거동 산정치의 2시간 이상 안정적 출력	GPS-RTK/가속도계 계측 데이터 및 동적거동 산정치의 2시간 이상 안정적 출력	100
	공인인증 및 신기술 획득을 통한 상용화	시제품 제작 및 현장적용 시험 검증	정확도 2mm, 샘플주파수 100Hz	정확도 2mm, 샘플주파수 100Hz	100
		건설신기술 및 공인인증 확보	건설신기술 출원 및 KOLAS 공인인증	건설신기술 출원 및 KOLAS 공인인증	100
		연구성과 홍보 및 국내외 판로 모색/확장	기술이전(정액기술료 1억, 경상기술료 3%)	기술이전(정액기술료 1억, 경상기술료 3%)	200

1.2. 정량적 연구목표 달성도

성과지표		목표	달성(달성률)	비고
논문	SCI급	4	3(75%)	- Smart Structures and System 1건 (Published) - Sensors 1건 (Published) - Measurement 1건 (Accepted)
	국내논문	1	1(100%)	전산구조공학회 논문집 1건 (Published)
	학술발표	3	4(133%)	- KKHTCNN 2016 2016년 한국구조물진단유지관리공학회 학술발표대회 2017년 한국지진공학회 학술발표대회 - EVACES 2017
특허(출원/등록)		3/2	3/3(120%)	“동적 변위 계산 장치 및 동적 변위 계산 방법” (출원번호: 10-2015-0099537 / 등록번호: 10-1736133) “구조물의 정밀 계측 시스템 및 그 방법” (출원번호: 10-2017-0016270 / 등록번호: 10-1803503) “동적 변위 계산 장치 및 동적 변위 계산 방법” (출원번호: 10-2017-0061811 / 등록결정서 수신 완료)
소프트웨어 등록		2	2(100%)	“위성항법시스템(GPS)-가속도계 멀티 샘플링 실시간 데이터 획득 프로그램” (C-2016-011341) “6자유도 동적응답 계측 센서 모듈용 실시간 모니터링 프로그램” (C-2018-011358)
건설신기술 출원		1	1(100%)	가속도계와 RTK-GNSS를 이용한 동적거동의 실시간 정밀계측 기술 (1차 심사 통과, 현장실사 완료 / 2차심사 예정)
KOLAS 인증		—	5(추가달성)	- 개발 가속도계: KOLAS 인증 2건 - 구조물 6자유도 모니터링 센서 모듈: KOLAS 인증 3건
시제품		2	2(100)	- 가속도계 모듈 1개 - 가속도계 RTK-GNSS 통합 변위 계측 모듈 1개
국내외 현장검증		—	6(추가달성)	- 국내 (2): 영종 대교, 이순신 대교 - 국외 (4): Xihoumen Bridge, Qingfeng Bridge (중국) 2nd Penang Bridge (말레이시아) - San Francisco-Oakland Bay Bridge (미국)
기술이전		1	3(300%)	(주)풍산FNS 기술이전: 정액기술료 2억원 (주)이제이텍 기술이전: 정액기술료 4천만원 (주)티엠이앤씨 기술이전: 정액기술료 6천만원

2. 관련 분야 기여도

2.1. 개발기술 독창성

- 6자유도 동적 거동 계측: 하나의 센서로 구조물의 6자유도 변위, 속도, 가속도 및 각변위를 동시에 계측할 수 있는 시스템은 현재 전세계적으로 상용화된 사례가 없다 (세계 최고/최초).
- 고정밀도 및 고해상도 변위 계측: 제안 시스템은 가속도계/GPS-RTK의 융합을 통해 기존 변위계측 기술보다 높은 정밀도 (2mm 이내)와 샘플주파수 (100Hz)로 변위를 계측한다.
- 높은 가격 경쟁력: 높은 정밀도 및 샘플주파수 해상도에도 불구하고 기존 GPS-RTK (3,500만원), LDV 및 LiDAR (1억 이상) 장비와 비교해 월등히 저렴한 가격으로 상용화 가능할 것으로 예상된다 (1,000만원 이내).
- 다양한 적용 분야: 제안된 6자유도 동적거동 계측장비의 경우 일체형으로서 교량, 건물, 원전 시설물, 풍력 발전기, 댐 등 다양한 대상 구조물에 설치하여 시공중 및 상시 동적거동 계측이 가능하며, 휴대용 장비로 내하력 검사 및 현장실험 장비로도 활용 가능하다.
- 해외시장 개척 용이성: 일반적으로 건설분야에서 개발되는 신기술을 해외에 적용하기 위해서는 적용 현지의 설계/시방서 규정 및 관련 건설 분야 법규 심의를 통과하고 준의해야 하므로 상대적으로 해외 영업 및 사업화가 어렵고 현장 적용까지의 기간이 오래 소요된다. 반면 제안 기술은 이미 전세계적으로 상용화되어 널리 보급된 GPS 및 가속도계 계측장비 관련 규정만 준수하면 곧바로 적용이 가능하므로 해외시장 개척이 상대적으로 용이하다.

2.2. 타산업 연계 및 국제협력 가능성

- 타산업 연계: 본 과제는 일차적으로 제안된 6자유도 구조물 거동 모니터링 기술의 사회기반 시설물 및 건설 구조물 적용을 목표로 하나, 추후 다음과 같은 타산업계로 적용 확대 및 시장 개척이 가능하다.
 - (1) 지진계측 분야: 현재 국내 지진관측소에서는 대부분 해외에서 생산된 가속도계와 지진계(속도계)를 통해 지진을 관측하고 있으나, 변위의 경우 지반진동으로 인해 고정점 확보가 힘들어 계측이 어렵다. 본 제안 시스템은 지진 계측 뿐 아니라 지진으로 유발되는 영구변위까지 계측 가능하므로 지진계측 시스템의 효용성 및 정밀도를 제고할 수 있다.
 - (2) 국방분야: 제안 시스템은 미사일 및 군용 무인비행체에 탑재가 가능하므로, 비행체의 정밀위치추적을 통해 군 무기체계의 정밀타격 성능을 제고할 수 있으며, 국가 미사일 방어망 국산화 및 국산 무기체계 개발에 활용가능성이 충분하다.
 - (3) 신재생에너지 분야: 풍력발전기 주요 구조부재 및 블레이드의 변형 및 장기처짐을 실시간 계측함으로써 풍력발전기 구조 건전성 모니터링에 활용가능하다.
 - (4) 무인자동화 분야: 자동차, 로봇 등 무인자동화 분야에 필수적인 위치인식 및 제어기술에 적용할 수 있으며, 나아가 로켓, 자율주행 자동차, 국토지리정보 데이터베이스 구축 등의 분야에도 활용가능하다.
- 국제협력 가능성: 제안기술과 관련해서는 기술개발을 위한 국제협력 보다는 제안기술의 해외현장 적용 실험 및 시장개척을 위한 국제협력 가능성이 높다. 특히 최근 사회기반시설 건설이 급격히 증가하고 있는 중국, 인도, 베트남 등과 같은 신흥국과의 국제 협력을 통해 신설 구조물 시공중 또는 상시 구조물 건전성 모니터링 시스템 구축사업에 참여할 수 있다. 또한 사회기반시설물의 노후화가 급속히 진행되고 있는 선진국들과는 기존 교량의 노후도 및 건전성 평가를 위해 실시되는 동적거동 기반 내하력 평가실험에 제안기술을 활용하는 국제협력 및 사업화를 추진을 고려할 수 있다.

제5장 연구개발성과의 활용계획

1. 기술적 측면

- 6자유도 변위, 속도, 가속도, 각변위를 동시 계측할 수 있어, 기존 구조물에 번거롭게 설치해야 했던 가속도계, 경사계, GPS를 하나의 시스템으로 대체가능하므로 계측의 편의성과 적용범위가 증대된다.
- 기존기술로 계측하기 힘든 정적/동적 변위를 3축에 대해 동시/실시간 계측이 가능한 기술을 세계최초로 개발함으로써 변위계측분야의 핵심 원천기술 확보가 가능하며 기술 선점효과를 얻을 수 있다.
- 기존 건설구조물에 적용된 변위 센서(GPS, 레이저 변위계 등)보다 계측성능(정확도 및 샘플주파수)이 월등히 우수하므로, 구조물 안전관리 및 건전성 모니터링 기법의 정확도가 향상되어 검사의 신뢰성을 높일 수 있으며 구조물의 안전도를 제고할 수 있다.
- 기존 변위센서보다 적용성이 뛰어나 시공중 구조물, 고속철도, 고층빌딩, 노후 구조물, 원자력 발전소, 댐 등 다양한 구조물의 건전도 모니터링에 적용가능하다.

2. 경제적·사회적 측면

- 전 세계적으로 사회기반시설물 및 건설 분야 유지관리 및 건전성 모니터링 시장에서 가속도 및 변위센서는 연간 약 8억 달러 규모의 시장을 형성하고 있는 것으로 추산되며, 향후 연 17%의 성장세를 보일 것으로 예상된다. 따라서 향후 해외시장에 성공적으로 진입해 시장의 1%를 점유할 경우 연간 8백만 달러 규모의 매출을 기대할 수 있다.
- 현재 국내 공공시설물 설치 센서의 국산장비 점유율은 1.6%에 불과하며, 특히 건설용 가속도계 및 변위센서를 자체 생산하는 국내기업은 전무한 상황에서, 제안기술을 상용화할 경우 해외업체가 주도하고 있는 센서제품의 국산화 및 해외시장 진출이 가능하다.
- 해외에서 수입되는 고가의 가속도계 (3축 가속도계: 750만원) 및 변위센서 (LDV: 1억6천만원, LiDAR: 2억 4천만원 수준) 보다 성능이 우수하고, 판매단가 1천만원 이내로 경제성이 우수하므로, 상용화시 국가 안전관리 비용을 절감할 수 있으며 국내 건설업체의 시공원가도 절감이 가능하다.
- 구조물 변위는 구조물 안전성 평가에 가장 중요한 지표임에도 불구하고 실제 계측의 어려움으로 인해 변위기반 안전성 평가기준이 확립되지 않고 있으나, 변위기반 구조물 안전기준 수립이 가능해짐으로써 더욱 효과적인 안전관련 규정 및 법령 제정이 가능하다.
- 구조물 동적거동 계측의 정확도 제고를 통해 손상 구조물의 조기진단이 가능하며, 국가 주요 구조물의 안전성을 향상시켜 대형사고 방지, 국가이미지 쇄신, 국민 신뢰확보 등의 효과를 기대할 수 있다.

3. 일자리 창출 측면

- 국내에서 유일하게 군사용 센서를 개발, 생산하는 전문 중견기업인 풍산 FNS와의 산학 협력연구를 통해 국내 건설 IT 분야에서 국산화 및 기술격차가 가장 취약한 센서분야의 전문인력 양성이 가능하며, 센서 및 구조물 건전성 모니터링 분야의 세계 일류 국가와 기술격차를 해소하고, 기존시장 확대 및 신시장 개척을 통해 신규 일자리를 창출하는 데 기여할 수 있다.
- 모니터링 시스템 구축 일변도로 굳어진 국내 건설구조물 모니터링 시장에서 센서, 센서융합, 구동 소프트웨어 개발의 비중을 늘리고 업계의 투자의욕을 고양함으로써 시장 전체적인 산업구조 개선이 가능하며, 시장의 다양화, 다각화를 도모하여 시장규모를 확대하고 신규 진입장벽을 낮출 수 있다.
- 효과적, 효율적인 구조물 건전성 모니터링이 가능하므로, 국가 사회기반시설 및 고층빌딩의 안전성 확보와 동시에 구조물의 생애주기를 연장하여 탄소발생 저감 및 국가 이미지 제고에 큰 역할을 할 것으로 기대되며, 더불어 국내 기술의 해외 이미지 제고에 기여하여 첨단기술 및 국내 기술진의 해외 진출 폭이 넓어질 것으로 기대된다.

제6장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

해당없음

제7장 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유		

제8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
한국과 학기술 원	다이오드 펌프 Q-Switch 펄스 레이저	Centurion	1	2016-07-01	44000	한국과학기술 원 W1-2 4216	NFEC-2016 -03-208088
한국과 학기술 원	고출력레이저 다이오드시스 템	TMA-532-15 T	1	2015-01-15	54989	한국과학기술 원 W1-2 4216	NFEC-2015 -03-200832
한국과 학기술 원	지상라이다 VZ-400	VZ-400	1	2014-11-14	240000	한국과학기술 원 W1-2 4216	NFEC-2014 -12-194127
한국과 학기술 원	광섬유 간섭계	OFV-551	1	2012-05-25	41052	한국과학기술 원 W1-2 4216	NFEC-2012 -07-166490
한국과 학기술 원	3차원 레이저 스캐너	Laser Scanner Focus 3D	1	2011-12-08	41252	한국과학기술 원 W1-2 4216	NFEC-2012 -03-157554
한국과 학기술 원	Nd:Yag 레이저	Brilliant B	1	2011-09-09	34500	한국과학기술 원 W1-2 4216	NFEC-2011 -12-151564
한국과 학기술 원	열화상 시스템	VarioCAM hr Head	1	2011-03-25	50160	한국과학기술 원 W1-2 4216	NFEC-2011 -07-146504
한국과 학기술 원	Nd:Yag 펄스 레이저	U0532E055R0 20LN	1	2010-10-25	34000	한국과학기술 원 W1-2 4216	NFEC-2010 -12-086329
한국과 학기술 원	스캐닝바이브 로메터 하드웨어	PSV-400-M4	1	2009-10-30	165000	한국과학기술 원 W1-2 4216	NFEC-2010 -01-077939
한국과 학기술 원	정밀 임피던스 계측장비	4294A	1	2004-08-16	41887	한국과학기술 원 W1-2 4216	NFEC-2007 -07-051887

제9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

- **실험실 내 유해·위험 예방조치:** 본 연구에서는 제안기술 검증을 위해 레이저 도플러 변위계 등 레이저 장비를 활용하므로 안구와 시신경 등이 위험에 노출되어 있어 특히 유의할 필요가 있다. 이에 따라 참여 연구원의 안전을 확보하기 위해 다음과 같은 다양한 안전장비와 안전표시가 부착되어 있다. 이는 산업안전보건법 23조에서 명시한 바에 따른 것으로, 레이저 장비를 비롯한 실험시설에 경고, 안내, 비상시 조치사항 등을 게시·부착하여 참여연구원의 안전의식을 환기하고 사고발생시 신속하게 대응하기 위함이다.
 - 레이저 실험실 출입문에 주의 표지 부착
 - 실험 중임을 용이하게 식별할 수 있도록 경고등 설치
 - 안전지침 숙지를 위한 실험수칙(경고등, 보안경, 사고시 행동요령 등) 게시
- **안전교육 및 안전점검:** 참여연구원에게 매월 1시간의 정기교육을 실시함으로써 연구실 내 위험요인과 예방대책을 숙지할 수 있도록 할 계획이며, 또한 지정된 안전관리자에 의한 일상점검을 매일 1회 수행, 외부 전문가가 주관하는 정밀안전진단을 연 2회 실시하여 불필요한 위험요인을 제거하고 사고 발생을 미연에 방지한다.
- **안전관리체계:** 연구기간 동안 연구실 내 안전관리 감독자와 안전관리자를 지정해 안전상 업무를 수행하고 과제 구성원의 안전사항을 점검·확인할 계획이다. 안전관리 감독자 및 안전관리자의 책무는 다음과 같다.
 - 실험 관련 기구 또는 설비의 안전점검 및 이상유무 확인
 - 보호구 구입시 적격품 선정
 - 연구실 정리정돈 및 통로확보의 확인 및 감독
 - 관련 법령에 명시된 규정을 위반하는 연구참여자에 대한 조치 및 교육

제10장 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	논문 게재지/ 특허 등록 국가	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허 등록	구조물 정밀계측 시스템 및 그 방법	한국과학기술 술원/ 풍산FNS	대한민국	2017.11.24	중복	—
2	특허 출원	구조물 정밀계측 시스템 및 그 방법	한국과학기술 술원/ 풍산FNS	PCT	2018.01.29	중복	—
3	소프트웨어 등록	위성항법시스템(GP S)-가속도계 멀티 샘플링 실시간 데이터 획득 프로그램	한국과학기술 술원	대한민국	2016.05.12	중복	—
4	소프트웨어 등록	6자유도 동적응답 계측 센서 모듈용 실시간 모니터링 프로그램	한국과학기술 술원	대한민국	2018.05.03	단독	—
5	논문	사회기반 건설구조물의 단기 동적변위 산정기법	한국과학기술 술원	한국전산구조 공학회 논문집	2017.06	단독	—

제11장 기타 사항

해당없음

제12장 참고 문헌

- [1] 진화하는 재난안전기술 - 구조물 붕괴 감지기술 관련 특허출원 증가세, 특허청 보도자료, 2014.
- [2] 2013년 국토교통 R&D 동향조사, 국토교통과학기술진흥원, 2013.
- [3] 지능형 교량진단시스템 개발 및 건전성 평가기술연구, 한국도로공사, 2012.
- [4] 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침해설서(교량), 한국시설안전공단, 2013.
- [5] 김정태, 박재형, 스마트 무선센서를 이용한 대형구조물의 구조건전성 모니터링, 소음진동, 20(1) 7-13, 2010.
- [6] 최병규, 이상정, 박종욱, 백정호, 단기선 측지 성능 향상을 위한 GPS-RTK 알고리즘 개발, 한국측량학회지 27(4), 311-321, 2009.
- [7] 박기환, 진동 3D 가시화를 위한 레이저 진동측정기 국산화, 소음진동 23(3), 48-51, 2013.
- [8] 홍정범, 이홍민, 박효선, TLS 3차원 좌표정보를 이용한 보 부재의 3차원 변형 형상 추정, 대한건축학회 2010년도 학술발표대회 논문집, 113-114, 2010.
- [9] S.W. Kim, N.S. Kim, Multi-point Displacement Response Measurement of Civil Infrastructures using Digital Image Processing, Procedia Engineering 14(2011) 195-203.
- [10] J.J. Lee, M. Shinozuka, A vision based system for remote sensing of bridge displacement, NDT&E International 39 (2006), 425-431.
- [11] P. Castellini, P. Martarelli, E.P. Tomasini, Laser Doppler Vibrometry: Development of advanced solutions answering to technology's needs, Mechanical Systems and Signal Processing, 20 (2006) 1265-1285.
- [12] M. Johansmann, G. Siegmund, M. Pineda, Targeting the limits of laser Doppler vibrometry, http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Applications/Data_Storage/Documents/LM_TP_Idema_JP_2005_E.pdf, 2005.
- [13] R. Staiger, Terrestrial laser scanning-Technology, systems and applications, 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco, December 2-5, 2003.
- [14] G. Teza, A. Galgaro, N. Zaltron, R. Genevois, Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach, International Journal of Remote Sensing, 28(2007), 3425-3446.
- [15] A. Abellan, J.M. Vilaplana, J. Martinez, Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Noria (Eastern Pyrenees, Spain), Engineering Geology, 88(2006) 136-148.
- [16] W.J. Merkle, J.J. Myers, Use of the total station for loading test of retrofitted bridges with limited access, Proceeding of SPIE, Smart Structures and Materials 2004: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems, 5391(2004), 687-694.
- [17] H. Yang, T. Takaki, I. Ishii, Real-time multidirectional modal parameter estimation of beam-shaped objects using high-speed stereo vision, Proceedings of IEEE, Sensors, Taipei, Taiwan, 2012.
- [18] 최병길, 조광희, 나영우, 장대교량의 거동분석을 위한 GPS 모니터링 시스템 개발에 관한 연구, 한국지형공간정보학회지 16(3), 2008.
- [19] 최선영, 홍석범, GPS를 이용한 고층건물의 수평변위 측정, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 393-394, 2012.
- [20] 노태호, 이종출, GPS를 이용한 구조물 변위관리 시스템 개발, 한국지형공간정보학회지 11(2) 53-59, 2003.

- [21] 김형태, 서주원, DGPS 기법을 이용한 자정식 현수교의 정동적 변위응답 측정 및 분석, 한국소음진동공학회 논문집 19(11), 1126-1132, 2009.
- [22] RTK GPS를 이용한 자정식 현수교의 구조건전도 모니터링, 2009년도 대한토목학회 학술대회 351-354, 2009.
- [23] 정현준, 양태환, 장봉수, 문대중, 사장교의 구조물 관리를 위한 교량모니터링시스템 개발, 대한토목학회 정기학술대회, 1321-1324, 2010.
- [24] Y. Tamura, Y. M. Matsui, L.C. Pagnini, R. Ishibashi, A. Yoshida, Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90 (2002) 1783-1793.
- [25] M.S. Grewal, L.R. Weill, A.P. Andrews, *Global positioning systems, inertial navigation, and integration*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2007.
- [26] Y.H. Hong, S.G. Lee, H.S. Lee, Design of the FEM-FIR filter for displacement reconstruction using accelerations and displacements measured at different sampling rates, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 38 (2013) 460-481.
- [27] J. Park, S. Sim, H. Jung, Displacement estimation using multimetric data fusion, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, doi: 10.1109/TMECH.2013.2275187 (2013).
- [28] J.Kim, K.Kim, H.Sohn, Autonomous dynamic displacement estimation from data fusion of acceleration and intermittent displacement measurements, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(2014) 194-205.
- [29] H. Jeon, Y. Bang, H.Myung, A paired visual servoing system for 6-DOF displacement measurement of structures, *Smart Materials and Structures* 20(2013) 045019.
- [30] A. Smyth, M. Wu, Multi-rate Kalman filtering for the data fusion of displacement and acceleration response measurement in dynamic system monitoring, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(2007) 706-723.
- [31] M. Kogan, W.Y.Kim, Y.Bock, A.Smyth, Load Response on a Large Suspension Bridge during the NYC Marathon Revealed by GPS and Accelerometers, *Seismological Research Letters* 79(2009) 12-19.
- [32] 김인수, 위치센서의 미래시장 전망, 월간 계장기술 2011년 5월호.
- [33] Global GPS Market: Products (Marine, Aviation, Automotive, Outdoor/fitness & GPS Enabled Smart Phones), Applications (Navigation, Machine Control, & Logistics Tracking) & Geography (2011 - 2016), MarketsandMarkets report.
- [34] Mid and High Level Precision GPS Market by Type (Differential Grade and Survey Grade), Application (Precision Farming, Mining, Construction, Oil & Gas) and Geography - Global Forecast to 2020, MarketsandMarkets report.
- [35] Military Laser Systems Market by Application (Laser designator, Laser Range Finder, LIDAR, 3D scanner, Laser Weapon, Dazzlers, Laser sights, Proximity Fuze, Ring laser Gyro, Laser Doppler Vibrometer, Laser Altimeter) by Domain (Aerospace, Defense and Homeland Security) - Forecast and Analysis to 2014 - 2020, MarketsandMarkets report.
- [36] 최윤섭, 센서 시장동향, IT-SoC 매거진.
- [37] 스마트 교량 내하력 평가 시스템 개발에 따른 수입증대, 공직사회 모범선행사례 모음 제 15집, 감사원.
- [38] 제3차 시설물의 안전 및 유지관리 기본계획, 국토해양부 고시 제 2012-945호, 2012.
- [39] 한승헌, 구본상, 해외건설과 CEM, 한국건설관리학회 정기학술대회, 2011.
- [40] ADB & ADBI, *Financing Urban Infrastructure and City Development in Asia*.

- [41] 이영환, 시설물의 안전성 제고 관련 향후 건설시장 전망 - 정부의 국민안전대진단과 안전산업육성방안 정책과 연계, 2015년 건설부동산 경기전망 세미나, 한국건설산업연구원, 2014.11.4.
- [42] V. Gkaras, H. Gupta, H. Banon, P. Spanos, L.B. Ryon, A methodology for determining offshore floating facilities kinematics from accelerometers and GPS field measurements, Offshore Technology Conference, Texas, U.S.A, 5-8 May 2008.
- [43] R.E. Kalman, A new approach to linear filtering and prediction problems, Journal of Basic Engineering, 82(1960), 35-45.
- [44] D. Haessig, B. Friedland, Separate-bias estimation with reduced-order Kalman filters, IEEE Transactions of Automatic Control, 43(1998), 983-987.
- [45] J.B. Moore, Discrete-time fixed-lag smoothing algorithms, Automatica, 9(1973) 163-173.
- [46] H.E. Rauch, Solutions to the linear smoothing problem, IEEE Transactions of Automatic Control, AC-8(1963), 371-372.
- [47] 박효덕, 첨단센서 산업동향 및 육성방향, 전자부품연구원 스마트센서 사업단, 2014.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.