

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 "구조물의 동적거동 정밀계측을 위한 LADAR와 LDV의 통합형 비접촉식 레이저시스템 개발" 과제의 보고서로 제출합니다.

2014 . 6. 15

주관연구기관명 : 한국과학기술원

주관연구책임자 : 손 훈

연구원 : 김 기 영

보고서 요약서

과제고유번호	12CCTI-C063754-01	해 당 단 계 연구 기 간	2012.11.19. - 2014.5.18	단 계 구 분	1/1
연구사업명	건설기술혁신사업				
연구과제명	최 상 위 과 제 명	구조물의 동적거동 정밀계측을 위한 LADAR와 LDV의 통합형 비접촉식 레이저시스템 개발			
	단위과제명				
연구책임자	손 훈	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 2 명 내부 : 2 명 외부 : 0 명	총연구비	정부:50,000천원 기업: 0 천원 계: 50,000천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	한국과학기술원 건설및환경공 학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서면수	79
본 과제에서는 변위를 직접 계측하나 잡음수준이 높은 LADAR(laser detection and ranging)와, 속도를 계측함으로 인해 적분과정과 적분오차가 불가피하나 정확도가 높은 LDV(laser Doppler vibrometer)를 동시 구동하여 대상 구조물의 동적거동을 원거리(최대 300m) 비접촉 방식으로 계측한 후, 칼만 필터링(Kalman filtering)을 통해 두 데이터를 융합, 고해상도/고정밀도/고밀도의 동적응답을 실시간으로 산정하는 시스템을 개발했다. 본 과제의 연구결과는 다음과 같이 구성된다. • LDV/LADAR 시스템 연속 스캐닝 기법 개발: 비접촉 스캐닝이 가능한 LDV 및 LADAR를 이용하여 원거리에서 대상구조물의 동적응답을 연속적으로 측정하는 계측 시스템을 구축하였다. 특히 LADAR를 이용해 변위를 계측하고 그 신호품질을 개선하여 직접 변위계측에 활용될 수 있게 하였으며, LDV와 LADAR가 대상구조물의 동일지점을 동일시간에 레이저 광선으로 조준하는 동기화 기법을 개발하였다. • 이종 및 멀티샘플주파수 데이터 융합을 위한 칼만필터링 알고리즘 개발: LDV에서 획득한 속도 데이터와 LADAR에서 획득한 변위 데이터를 융합, 고해상도/고정밀도의 동적응답을 산정하는 효율적 알고리즘을 개발하였으며, 새로운 상태공간 모델을 제안하고 칼만필터 스무딩 기법 및 이단계 칼만필터를 적용하여 기존 칼만필터 기반 변위계측기법의 정확도를 월등히 향상시켰다. • 실시간 동적응답 획득을 위한 소프트웨어 구축 및 시스템 검증: 개발된 연속스캐닝 기법과 칼만필터링 알고리즘을 통합하여 실시간으로 대상 구조물의 동적응답 및 동적좌표를 정밀계측할 수 있는 통합 시스템을 구축하였다. 이를 위해 구조물의 계측지점에 동시 조준을 설정하는 모듈과 계측동기화 모듈을 개발하여 두 장비를 통합하였다. 개발된 시스템을 중부고속도로 내 시험교량인 연대교에 검증해 적용성을 평가하였다.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	레이저도플러속도계, 라이다시스템, 칼만필터링, 데이터융합, 변위산정			
	영 어	LDV, LADAR, Kalman filter, data fusion, displacement estimation			

요 약 문

I. 제 목

구조물의 동적거동 정밀계측을 위한 LADAR와 LDV의 통합형 비접촉식 레이저시스템 개발

II. 연구개발과제 개요

본 과제에서는 저해상도/고정확도로 변위와 공간좌표를 계측하는 LADAR(laser detection and ranging)와 고해상도/저정확도로 속도를 계측하는 LDV(laser Doppler vibrometer)를 동시 구동하여 대상 구조물의 동적거동을 원거리 비접촉 방식으로 계측한 후, 칼만 필터링(Kalman filtering)을 통해 두 데이터를 융합, 고해상도/고정밀도/고밀도의 동적응답을 실시간으로 산정하는 시스템을 개발한다. 기존의 변위계측은 주로 접촉식 센서를 통해 이루어지고 있으나, 대형 가설물의 설치가 필요해 일상계측이 불가능하고 작업시간 및 비용이 과다하다. 또 가속도계의 이중적분과 그 결과의 신호처리를 통해서도 정확한 변위를 산정하지 못한다. 이 문제를 해결하고자 최근 개발된 변위센서들은 높은 잡음수준, 낮은 샘플주파수 등의 한계가 있어 적용성이 낮다. 따라서 이를 보완하기 위해 편의성과 정확성을 갖춘 변위산정 시스템의 필요성이 요구되고 있다.

III. 연구개발 수행내용 및 결과

▷ LDV/LADAR 시스템 연속 스캐닝 기법 개발

- 비접촉 스캐닝이 가능한 LDV 및 LADAR를 이용하여 원거리에서 대상구조물의 동적응답을 연속적으로 측정하는 계측 시스템을 구축
- LDV와 LADAR가 대상구조물의 동일지점을 동일시간에 레이저 광선으로 조준하는 동기화 기법 개발

▷ 이중 및 멀티샘플주파수 데이터 융합을 위한 칼만필터링 알고리즘 개발

- LDV에서 획득한 고해상도/저정밀도 속도 데이터와 LADAR에서 획득한 저해상도/고정밀도의 변위 데이터를 융합, 고해상도/고정밀도의 동적응답을 산정하는 효율적 알고리즘을 개발
- 개발된 칼만필터링 알고리즘에 스무딩 기법 및 이단계 칼만필터를 적용해 산정된 동적응답의 불확실성을 최소화하고 정밀도를 제고

▷ 실시간 동적응답 획득을 위한 소프트웨어 구축 및 시스템 검증

- 개발된 연속스캐닝 기법과 칼만필터링 알고리즘을 통합하여 실시간으로 대상 구조물의 동적응답 및 동적좌표를 정밀계측할 수 있는 통합 시스템 구축
- 개발된 시스템을 실구조물에 검증해 적용성 평가

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

▷ LDV/LADAR 시스템 연속 스캐닝 기법 개발

- 대형구조물의 변위를 LDV로 계측함에 있어 사용성을 검증하고 변위계측이 부적합함을 검증
- 대형구조물 속도계측용으로 적합한 LDV 기종을 조사 및 선정하고, 속도 계측데이터의 적분 시 바이어스 오차가 임의적이고 비선형적임을 검증함

- LADAR의 라인스캔 모드를 활용하여 계측지점을 120Hz의 샘플링주파수로 반복 스캔하는 기법을 개발
- LADAR로 계측된 변위의 과도한 잡음을 효과적으로 소거하는 크리깅(Kriging) 기반 잡음소거기법을 개발
- LDV와 LADAR의 레이저 광선 경로가 계측지점에서 교차할 수 있도록 센서 내부명령어 수준에서 광선 위치를 제어하는 계측동기화 모듈 (measurement synchronization module) 개발
- LDV와 LADAR에 계측시작 및 종료 명령을 동시에 전송하고 데이터를 취득한 뒤, 소프트웨어에서 신호처리에 직접 이용될 수 있도록 데이터를 이진형태로 변환하는 실시간 데이터 취득 및 처리모듈 (real-time data collection and compensation module) 개발

▷ 이종 및 멀티샘플주파수 데이터 융합을 위한 칼만필터링 알고리즘 개발

- 기존 데이터 융합 연구사례 조사를 통해 사례별 장단점 분석
- 칼만필터 적용을 위한 새로운 상대공간 모델 개발
- 이종 데이터 융합을 통한 동적변위산정을 위한 칼만필터 알고리즘 제안
- GPS 연동시 동적좌표 산정 가능성을 검토하였으나 GPS
- 실시간 변위산정을 위한 고정지점 스무딩, 고정지연 스무딩 기법의 적용
- 이단계 칼만필터를 적용함으로써 스무딩의 단점을 보완
- 변위와 바이어스 오차를 동시 산정함으로써 외부 잡음에 대한 민감도를 낮추고 변위산정의 정확도를 제고

▷ 실시간 동적응답 획득을 위한 소프트웨어 구축 및 시스템 검증

- 센서 위치에 관한 사용자의 입력을 받고 개발된 모듈을 통해 계측을 실시하고 데이터를 취득한 뒤 변위를 자동산정하는 소프트웨어 개발
- 현장적용 및 실내시험을 통한 시스템 검증
- 중부내륙 고속도로 시험교량 (연대교, 금당교) 현장적용

V. 연구목표 달성 및 효과

본 연구에의 기술적 달성도는 기존 연구목표를 대부분 달성하였으며, 특히 칼만필터 알고리즘 개발 연구에서는 기존에 적용되지 않은 스무딩 기법 뿐 아니라 이단계 칼만필터를 활용하여 기존 연구결과보다 최대 93% 이상의 정밀도 향상효과를 가져왔다. 그 결과 본 연구결과를 발표한 Mechanical Systems and Signal Processing 지에서 2014년 1월부터 4개월 동안 다운로드 회수 1위를 차지하였다.

개발된 기술은 기존 접촉식 유·무선 센서로 번거롭게 계측해야 했던 사회기반시설 구조물의 동적응답을 비접촉식으로 원거리에서 빠르고 정확하게 계측할 수 있는 획기적/실용적 기법으로, 거의 모든 부류의 사회기반시설의 시공중 계측이나 유지관리에 활용할 수 있으며, 이에 따른 경제적/사회적 효과가 지대할 것으로 기대된다.

VI. 연구성과 활용계획

본 연구에서 개발한 시스템은 향후 터널, 교량 등 다양한 구조물에서 활용할 수 있으며, 센서의 종류에 관계없이 정확한 변위를 산정하므로 국내 센서제작업체와 다각도의 협력을 통한 상용화 및 기술이전을 검토하고 있다. 나아가 본 과제에서 개발한 기법을 토대로 적용 센서를 광

범위하게 확장하여 적용가능성을 높이고, 장대교량 케이블 장력측정, 유한요소 모델 업데이트 등 기타 기술에 접목함으로써 노후 구조물의 손상탐지 및 안전관리 분야에도 적용할 수 있는 방안을 적극적으로 타진할 계획이다.

SUMMARY

In this study, a new dynamic displacement estimation system integrating two noncontact sensors, LDV and LiDAR, is developed. The uniqueness of the proposed system are that (1) unlike other previous data fusion systems, it is fully noncontact devices which consists of two laser based noncontact sensors, (2) it removes the drawbacks of the two sensors by estimating high sampling rate low noise level dynamic displacement from the fusion of the two measurands using Kalman filter, and (3) it can estimate dynamic displacement in real-time by adopting Kalman filter based fixed-lag smoothing algorithm and two-stage Kalman estimator. To maximize the performance of the proposed system, two sensor hardwares are integrated in built-in command level so that they can be simultaneously controlled, and the data is collected, processed and fused by a software installed in a client computer. The performance of the system is verified via a series of dynamic loading test.

The developed system can be applied to almost social infrastructures such as dams, bridges, tunnels and buildings to name a few. Also, the developed system has wide compatibility to other type of sensors, for example, accelerometers, GPS, vision-based sensors and RADAR sensors. This implies that the system can be customized to any needs of research and industry. Therefore, the technique developed and built in the system can be easily applied to other research topics such as FE model updating, cable tension evaluation and sensor registration and calibration.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	9
1. Objective of the research	9
2. Necessity	10
3. The State-of-the-art of the related technology	11
4. Technological level of the study in related field	15
 Chapter 2. Progress of the research	 17
1. Strategy and methodology of the research	17
2. Reserch progress	18
3. Research results and verification methods	21
 Chapter 3. Achievements and applications	 22
1. LDV/LADAR continuous scanning technique	22
2. Kalman filter algorithm for heterogeneous and multi-rate data fusion	31
3. Hardware control module for sensor system integration	44
4. Applications	47
5. Publication on Journals and conference proceedings	61
 Chapter 4. Achievement of initial research objective	 63
1. Achievement of objective	63
2. Technical advantages	64
3. Economical advantages	65
4. Political advantages	65
 Chapter 5. Expected applications and application plan	 66
1. Application plan	66
 References	 67
 Appendix	 70

목 차

제1장 연구개발과제 개요	9
1. 연구개발의 목적	9
2. 연구개발의 필요성	10
3. 관련분야의 국내외 기술개발 현황	11
4. 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치	15
 제2장 연구개발 수행 내용 및 결과	 17
1. 연구수행 전략 및 방법론	17
2. 연구수행과정 및 내용	18
3. 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 등	21
 제3장 최종 연구성과 및 적용실적	 22
1. LDV/LADAR 연속 스캐닝 기법 개발	22
2. 이중 및 멀티샘플주파수 데이터 융합을 위한 칼만필터링 알고리즘 개발	31
3. 시스템 통합을 위한 하드웨어 제어모듈 개발	44
4. 개발 시스템의 적용	47
5. 국내외 학술지 게재 및 학술발표 실적	61
 제4장 연구목표 달성 및 효과	 63
1. 연구개발 최종목표 달성도	63
2. 연구개발 성과의 기술적 효과분석	64
3. 연구개발 성과의 경제적 효과분석(시장창출, 고용창출 등)	65
4. 연구개발 성과의 정책적 효과분석	65
 제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	 66
1. 연구성과 향후 활용방안	66
 참고문헌	 67
 부록	 70

제1장 연구개발과제 개요

제1절 연구개발의 목적

본 과제에서는 저해상도/고정확도로 변위와 공간좌표를 계측하는 LADAR(laser detection and ranging)와 고해상도/저정확도로 속도를 계측하는 LDV(laser Doppler vibrometer)를 동시 구동하여 대상 구조물의 동적거동을 원거리(최대 300m) 비접촉 방식으로 계측한 후, 칼만 필터링(Kalman filtering)을 통해 두 데이터를 융합, 고해상도/고정밀도/고밀도의 동적응답을 실시간으로 산정하고, 이 응답을 LADAR의 공간좌표와 융합해 동적좌표를 산정하는 시스템을 개발하였다.

개발된 비접촉식 레이저기반 동적응답 계측시스템은 목표 지점의 공간좌표를 정밀하게 측정(1mm 내외)하나 샘플주파수에 한계가 있는(수십Hz) LADAR의 데이터와, 지점의 속도를 매우 높은 샘플주파수(최대 MHz)로 계측하나 장거리 현장 계측시 잡음오차가 유발되는 LDV의 데이터 융합을 위해, 적분 및 보정에 관한 칼만 필터링을 도입하여 매우 정밀한(1mm내외) 동적(샘플주파수 MHz대) 변위, 속도, 가속도 및 계측위치의 동적좌표를 실시간으로 계측하는 시스템이다 (그림 1).



그림 1. 연구개발 개요

제2절 연구개발의 필요성

■ **폭넓은 적용성을 가진 범용 계측기법:** 시공중 및 공용중 거동 계측은 교량, 건물, 터널 댐 등 거의 대부분의 구조물에서 정밀시공, 안전관리 및 유지관리를 위해 필수적이다. 따라서 구조물의 동적거동 계측을 위한 많은 기법이 현재 적용, 연구되고 있으나 이들 기법은 모두 그 특성상 적용성에 한계가 있다. 일례로 GPS 기반 변위측정의 경우 터널에 적용이 불가하며 [1], 비전기반 계측기법은 면외변위 계측이 정밀하지 못하고 대형 표적판을 부착해야 하므로 댐 등의 대형구조물에 적용이 힘들다 [2]. 따라서 시공 및 유지관리의 효율성과 경제성을 고려한다면 적용성이 넓은 범용 계측기법의 개발이 시급하다.

■ **비접촉식 고밀도 동적응답계측:** 공용중 구조물의 거동계측을 위해 접촉식센서가 활발히 적용되고 있으며, 특히 중요 건설구조물(케이블 교량, 고층빌딩, 원자력발전소, 댐 등)에 대해서는 시공시에 계획된 접촉식 센서들이 매립되고 있다. 따라서 대상 구조물에 대한 유지관리 뿐만 아니라 매립센서와 센서케이블에 대한 추가적인 유지관리가 필요하다. 더불어 매립센서의 특성상 한정된 예산으로 설치할 수 있는 센서의 개수와 설치밀도에 한계가 있으나, 비접촉식 센서는 하나의 장비로 스캐닝을 통해 사실상 무한대의 지점에서 계측이 가능하므로, 계측 시행비용과 유지관리비용이 현저히 감소할 뿐더러 계측결과의 정밀도 및 활용성 역시 향상된다. 따라서 시공중 혹은 공용중 구조물의 정밀 계측을 위해 비접촉식 정밀 동적변위 시스템이 절실히 요구된다.

■ **변위, 속도, 가속도, 동적 위치좌표 등 다양한 동적응답 계측 :** 공용중 구조물에 대해서는 접촉식 가속도계가 구조물의 동적거동 계측에 전통적으로 가장 활발히 이용되고 있다. 이는 변위 및 속도와는 달리 가속도 응답의 계측이 매우 용이하기 때문이나, 계측된 가속도응답의 구조공학적 활용도는 모드해석에 한정된다. 따라서 주행차량에 의한 교량 주형의 처짐(deflection)이나 준정적(pseudo-static) 변위와 같은 구조공학적으로 의미있는 응답은 가속도 계측만으로는 파악하는데 한계가 있다. 따라서 구조물의 가속도 응답보다 구조공학적으로 활용도 높은 변위 및 속도의 계측 필요성이 크게 대두되며, 특히 구조물의 변위 응답은 구조물의 변형(deformation) 혹은 변형율(strain)과 직접 연관되어 있어 공용중 구조물의 구조물 상태평가 및 거동분석에 직결된다 [3]. 또 동적 위치좌표는 구조물의 진동형상을 손쉽게 파악할 수 있어 향후 구조물 거동해석에 많은 도움이 될 뿐 아니라, 구조물의 손상유무 평가 및 손상위치 추적에도 유용하게 활용될 수 있다 [4, 5].

■ **고해상도, 고정밀도 계측기법 :** 구조물의 동적계측에서 샘플주파수가 낮으면 구조물의 고차모드 거동해석이 불가능하며, 더욱이 시간영역 해석의 경우 샘플주파수는 원하는 모드 주파수의 10배 정도가 되어야 하므로 고해상도 계측이 추후 해석 및 평가에 유리함은 자명하다. 더불어 동적계측의 정밀도는 계측오차와 직접적으로 관련되므로 해석결과에 큰 영향을 미친다. 그러나 기존의 기법들은 고해상도와 고정밀도를 동시에 보장하지 못하고 있는데, GPS의 경우 시공 구조물의 정적 위치좌표(static position)와 변위 계측에 활용되고 있으나, 계측장비의 특성상 정적위치계측(낮은 샘플주파수의 데이터)에 한정되고 정밀도가 떨어져 동적거동 계측(높은 샘플주파수의 데이터)에는 적용이 불가능하다 [6, 7]. 또 비전기반 변위계측기법은 면외변위를 정밀하게 산정할 수 없다는 단점이 있다 [8, 9 10].

제3절 관련 분야의 국내외 기술개발 현황

1. 국내외 기술 및 산업 동향

가. LDV를 이용한 동적응답 측정기술

국내 관련기술 동향	
기업/기관	보유기술/수행연구
Em4Sys (박기환)	LDV/변위센서 개발·상용화
KAIST (손훈)	LDV의 속도 측정을 통한 초음파 영역의 파동 전파 및 이를 이용한 구조물 국부 손상 모니터링 연구
성균관대학교 (박승희)	초음파 가진과 LDV 속도 측정을 통한 구조물 국부 손상 모니터링 연구
전북대학교 (이정률)	LDV를 이용한 구조물 국부 손상 모니터링 연구

국내 업계에서는 Em4sys가 유일하게 LDV와 변위센서의 상용화에 성공한 바 있다. 그러나 LDV의 특성상 변위계측의 정확도에 한계가 있어 이를 활용한 연구는 속도 계측에 국한되어 있으며, 변위 계측에는 널리 사용되지 않고 있다.

국외 관련기술 동향		
기업/기관	국가	보유 기술 / 수행 연구
Polytec	독일	장거리 / 고분해능 스캐닝 LDV 등 다양한 제품 개발
OptoMet	독일	고분해능 LDV 개발
MetroLaser	미국	동시에 16개 지점의 측정이 가능한 LDV 개발
Bossa Nova Technologies	미국	다중 광 검출기를 활용한 스펙클 잡음 저감 LDV 개발
Air Force Institute of Technology	미국	LDV를 통한 Lamb파 계측을 통해 알루미늄 판의 손상 탐지
Univ. of Wisconsin-Madison	미국	스캐닝 LDV의 자유진동 응답을 이용한 비선형 구조의 모달 특성 산정
Imperial College	영국	스캐닝 LDV의 속도측정을 통한 모달 특성 연구
도쿄대학교	일본	상시진동 하에서 LDV를 이용한 교량 손상평가

해외에서는 독일, 미국기업을 중심으로 고성능 기기가 상용화되어 널리 활용되고 있으나, 국내와 마찬가지로 LDV는 주로 속도 계측에 활용되고 있다.

전망 및 한계

LDV는 센서를 부착할 필요가 없는 비접촉식 센서로, 시간/공간영역에서 고해상도로 대상 구조물의 속도를 계측할 수 있다. 따라서 변위의 간접적 계측이 현실적으로 불가능한 가속도계의 대안으로 부각되고 있으나, 변위를 산정하는 내부 신호처리방법이 낮은 신호잡음비에 취약하므로 오차의 가능성이 항상 내재한다. 또 대부분의 토목구조물은 LDV를 이용한 변위 계측에 있어 실험실 수준보다 그 환경이 극히 열악하므로, LDV 특유의 스펙클 잡음(speckle noise)이 많이 발생한다. 속도계측의 경우 이 잡음은 일시적이고 향후 신호 계측에 영향을 미치지 않지만, 이를 적분하는 변위계측에 있어 이 잡음이 누적되면 간혹 그 신호가 크게 왜곡되는 경향을 보인다(그림 3).

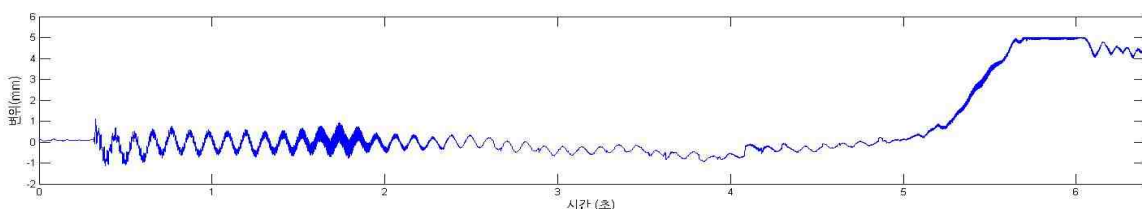


그림 3. 변위 계측시 스펙클 잡음은 누적되므로 열악한 환경에서는 신호가 크게 왜곡된다.

나. LADAR를 이용한 변위계측 기술

국내 관련기술 동향	
기업/기관	보유기술/수행연구
연세대학교 (박효선)	지상 LADAR를 이용한 구조물의 건전성 진단방법 개발
현재 기상관측용, 지형측량용을 모두 포함해 국내에서 LADAR 시스템을 독자 개발한 업체는 없으며, 라이다 시스템의 활용 연구 역시 대부분 지형지물 측량기법 개발에 머물러 있다. 2003년부터 연세대학교에서 지상 LADAR 시스템을 이용해 구조물의 변위를 계측하는 연구를 수행했으나, 낮은 샘플주파수의 한계 때문에 후속 연구가 이뤄지지 않고 있다.	

국외 관련기술 동향		
기업/기관	국가	보유 기술 / 수행 연구
Riegl	오스트리아	3차원 지형지물 계측용 장거리 고분해능 레이저 스캐너 상용화
Faro	독일	100m 급 고속 3차원 레이저 스캐너 상용화
Leica	스웨덴	지형지물 계측용 레이저 스캐너 상용화
The Univ. of North Carolina at Charlotte	미국	LADAR 기반 교량 검사 알고리즘 개발
Universita degli studi di Parma	이탈리아	LADAR 기법을 동적변위 측정에 활용
Riegl, Faro, Leica를 필두로 다수의 해외업체에서는 다년간의 광파기 연구개발성과를 토대로 고성능의 3차원 지형지물 측량용 LADAR 시스템을 출시, 판매 중이다. 또 미국 등지의 유수 연구기관에서는 구조물 변위 측정 및 검사 분야에 LADAR 시스템 적용 가능성 여부를 활발히 연구 중이며, 향후 그 응용범위가 더욱 확장될 것으로 예상된다.		

전망 및 한계
레이저 기반 지상 라이다 시스템은 지형 및 구조물의 3차원 형상 데이터를 취득하는 용도로 개발됐기 때문에 3차원 상의 각 지점에서 구조물의 동적응답을 계측하기 어렵다. 대부분의 라이다 시스템은 레이저 광선을 수직방향으로 조정할 때 내장된 회전거울을 이용하므로 스캔 속도가 상대적으로 빠르나, 수평방향 조정시에는 장비의 몸체가 회전하므로 스캔 속도가 느리다(그림 4). 이런 이유로 일부 지상 라이다 장비는 거울만 회전하는 라인스캔 모드(line scan mode)를 지원하나 대개 샘플주파수는 수십 Hz 미만이어서 구조물 동적계측 적용에는 한계가 있다.



그림 4. 대부분의 지상 라이다 시스템은 레이저 광선 수직방향 제어시 내장된 회전거울을 이용하나, 수평 방향 제어시 장비 자체가 회전하므로 속도가 느리다 (왼쪽: FARO Focus3D, 오른쪽: RIEGL VZ-400).

다. 비전 기반 변위계측기술

국내 관련기술 동향	
기업/기관	보유기술/수행연구
부산대학교 (김남식)	동영상 카메라를 이용한 변위 계측 시스템
세종대학교 (이종재)	2대의 카메라로 구조물의 각변위를 계측
대상 구조물의 변위를 측정하고자 하는 지점에 표적판(target plane)을 부착하여 이를 원거리에서 비디오카메라를 이용하여 촬영한 후 영상 속의 표적판의 움직임을 영상처리(image processing)를 통해 동적 변위를 산정하는 기술이다. 1대의 고해상도 비디오 카메라를 사용한 면내(in-plane) 변위를 계측하는 연구가 국내에서 처음으로 부산대학교에서 연구되었으며, 면외(out-of-plane) 변위를 포함한 3차원 변위 계측이 다수의 표적판과 비디오 카메라 2대를 이용하여 세종대학교에서 시도되었다.	

국외 관련기술 동향		
기업/기관	국가	보유 기술 / 수행 연구
The state univ. of New Jersey	미국	교량 상판의 균열 탐지를 위한 컴퓨터-비전 기술
Hiroshima Univ.	일본	초당 10,000 프레임의 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
GOM mbH	독일	2대의 카메라로 스포츠 장비의 3차원 좌표 및 변형을 측정
정지화상 카메라를 이용해 3차원 공간좌표 및 변형을 소규모로 계측하는 장비가 이미 상용화되었으며, 그 영역을 대형 구조물로 확장하려는 시도가 계속되고 있다. 또 동영상 카메라를 이용해 구조물의 동적응답이나 동특성을 획득하려는 연구 역시 꾸준히 지속되고 있다.		

전망 및 한계
비전 기반으로 구조물의 변위를 계측하는 기술은 아직 상용화되지 않았으며, 국내외 대학 및 관련업체에서 관련연구를 수행 중이다. 최근 2대의 동영상 카메라로 면외 변위를 계측하는 기법이 개발됐으나, 각각의 카메라에서 픽셀 단위로 면내 변위를 계산하고 그 차이를 이용해 면외변위를 산정하므로 정밀도가 면내변위에 비해 현저히 떨어진다. 또 변위계측을 위해 계측지점에 표적판을 부착해야 하므로 비접촉식 계측이라고 말하기 어렵고, 표적판을 붙인 특정 지점만의 응답을 계측할 수 있다. 더불어 카메라 촬영이 불가능한 어두운 곳 및 야간에는 적용에 한계가 있다.

라. 계측가속도 이중 적분을 통한 변위 산정

국내 관련기술 동향	
기업/기관	보유기술/수행연구
서울대학교 (이해성, 김호경)	가속도계로 측정한 구조물의 가속도를 이용한 동적변위 및 속도이력 추정기법 개발
서울대학교에서는 오직 가속도계에서 계측한 데이터를 이중적분하여 변위를 산정하는 기법을 개발하였다. 다만 이 기법은 대상구조물의 동특성이 요구되며, 그 적용성이 구조물의 진동에 의한 동적변위 추정에 국한되고 구조물 거동이 정적 거동에 근접하는 경우 변위 산출이 불가능하다.	

전망 및 한계
대상 구조물의 동적 거동 특성을 알아야 변위 산정이 가능하므로 변위 측정의 자동화가 힘들 수 있다. 또한 진동(oscillation)과 같은 시간상에 반복되는 동적 거동만이 변위 추정이 가능하다. 더불어 대상 구조물에 접촉식 가속도계를 설치해야 하기 때문에 접촉식 센서의 단점들인 케이블 설치, 내구성 문제, 전력공급, 센서 이동불가 등이 대두된다.

마. GPS 기반 변위계측기술

국내 관련기술 동향	
기업/기관	보유기술/수행연구
인천대학교 (최병길)	가속도계와 RTK-GPS의 통합에 의한 구조물 변위 정밀 측정
서울시립대학교 (권재현)	Network RTK를 이용한 건축물 변위 연구
GPS의 최대 단점인 공간상 해상도(10 미터) 문제를 대폭 개선한 RTK-GPS의 도입을 계기로 국내에서도 GPS 기반 변위측정에 관한 연구가 활성화되고 있다. 서울시립대에서는 서울시에 설치된 4곳의 RTK-GPS 기지를 활용, 네트워크 RTK를 구성해 건축물의 변위를 측정하는 연구를 실시했고, 인천대에서는 RTK-GPS와 가속도계 데이터를 융합, 구조물의 변위를 더욱 정밀히 측정하는 연구 했다.	

국외 관련기술 동향		
기업/기관	국가	보유 기술 / 수행 연구
시미즈 건설	일본	RTK-GPS를 이용한 건물의 풍하중 응답 계측
Univ. of Nottingham	영국	통합 RTK-GPS 시스템으로 타워의 지진응답 계측
RTK-GPS의 경우 낮은 샘플주파수 때문에 동적거동 계측보다는 지반 등의 장기간 거동 계측에 많이 활용되고 있다. 시미즈 건설에서는 RTK-GPS를 이용한 구조물 계측연구에서 진동 주파수 2Hz 이하, 변위 2cm 이상일 경우 RTK-GPS가 실제 변위를 큰 오차 없이 계측할 수 있음을 보였다.		

전망 및 한계	
GPS 기반 변위계측 기술은 RTK-GPS(Real-Time Kinematics GPS) 기법이 도입되면서 정확도가 향상되어 한 때 각광받았으나, 아직 데이터의 품질은 정확도 2cm, 샘플주파수 10Hz 정도에 불과하여 현재 많은 연구가 이뤄지지 않고 있다. 또 통신거리가 10km에 불과하고, 장애물이 있거나 지형이 평탄치 않을 경우 데이터의 품질은 더욱 저하된다. 특히 도심지의 경우 위성신호수신이 용이하지 않아 RTK 매핑의 신뢰도가 현저히 떨어진다.	

바. 이중 데이터 융합을 통한 변위 산정

국내 관련기술 동향	
기업/기관	보유기술/수행연구
성균관대학교 (박선규, 윤홍식)	RTK-GPS와 가속도계 데이터를 융합한 변위 산정
국내에서는 서로 다른 샘플주파수의 이중 데이터를 융합해 정확한 동적응답을 산정하는 연구가 활발하지 못하다. 성균관대학교에서 가속도계 이중적분치의 선형성분을 수동적으로 제거하고 RTK-GPS 계측치와 비교해 변위를 산정한 바 있다.	

국외 관련기술 동향		
기업/기관	국가	보유 기술 / 수행 연구
Columbia Univ.	미국	칼만필터를 이용한 가속도와 변위 융합 기법의 이론적 제시
해외에서도 역시 이중 데이터 융합을 구조물의 동적응답 계측에 적용한 사례는 많지 않다. 국내 연구 동향과는 달리 칼만필터 등 시스템 관측기를 이용한 데이터 융합이 연구된 바 있으나 아직 이론적 수준에 그치고 있다. 칼만필터에 기초한 데이터 융합기법은 상기의 국내 성균관대학교에서 개발한 기법과 달리 이중 데이터 융합의 완전 자동화가 가능하여 융합 기법의 실용화가 가능하다.		

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 보인다. 현재 여러 센서가 동시에 작동하는 항공우주, 로봇 분야에서 연구가 활발하나, 대형구조물 적용 연구는 아직 미비하다. 현재 연구결과들도 주로 가속도계, GPS 등 접촉식 센서를 주로 하고 있어 이를 비접촉식 센서로 확장할 경우 사회기반시설 계측분야에 중요한 전환점이 될 것이라 전망된다.	

제4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

본 연구에서 개발한 LDV/LADAR 융합시스템은 기존에 시도되지 않은 것으로, 하드웨어와 소프트웨어 분야 모두에서 기존 기술보다 우위에 있다. 기존의 기술 및 연구결과의 단점은 다음과 같다.

- 기존 변위 산정 기법 중 기준선 보정기법(baseline correction method)은 가속도계에서 취득한 가속도 신호만을 이용해 속도와 변위 데이터를 얻어내지만, 가속도 데이터의 적분시 누적되는 바이어스 오차를 효과적으로 예측, 제거할 수 없다 [11,12]. 이는 바이어스 오차가 일정하지 않고 비선형적이기 때문이다 [13].
- 데이터 융합을 통한 동적변위 산정 기법에 있어, 기존 기술은 가속도계와 여타 접촉식/비접촉식 변위 센서를 융합하고 있다[14-18]. 그러나 이러한 접근법은 그저 가속도계 데이터의 보정만을 위한 것으로, 비접촉식 변위 센서를 적용했다 하더라도 비접촉식이라는 센서 고유의 장점을 소실케 함은 물론, 실제로 현장에 적용했을 때의 작업 편의성과 적용성을 고려하지 않은 것이다.
- 기존의 데이터 융합 방식 가운데 가장 안정성과 신뢰성이 뛰어나다고 평가받고 있는 칼만 필터 기반 알고리즘의 경우 오차보정을 위해 스무딩(smoothing) 기법을 적용해야 하나, 데이터를 끝까지 계측한 후 알고리즘을 실행해야 하므로 실시간 변위산정이라는 장점이 사라질 뿐 아니라, 알고리즘 실행을 위한 계산량이 방대해 많은 시간을 요한다 [19].

요약하자면, 본 연구와 활용도가 중복되는 기존기술은 적용성 및 기능면에서 제한이 많으며, 현재 진행 중이거나 기 완료된 연구 역시 한계를 극복하지 못하고 있다. 본 연구는 LDV 및 LADAR 시스템에서 획득한 데이터의 융합을 통해 이러한 단점을 보완하였다. 본 연구에서 제안하는 기술이 기존기술 대비 차지하는 위치는 다음과 같다.

■ **비접촉식 LDV/LADAR 시스템의 동기화:** 비접촉식 레이저 스캐닝 기술 가운데 사회기반 시설 계측에 가장 적합한 두 센서는 그 장점이 명확하나, 각자 실제 변위 계측에는 직접 적용하기 힘든 취약점을 갖고 있다. 두 센서의 융합을 통해 단점을 제거하면, 접촉식 센서와는 달리 공간상 조밀한 계측이 가능하므로 실제 접촉식 센서를 설치 또는 매설하기 불가능했던 거의 모든 시설물에 활용이 가능해진다. 이를 위해 본 연구에서는 두 센서 각각의 레이저 광선을 동지점 조준하고 동시 계측할 수 있도록 동기화기법을 개발, 구조물 동적응답의 정밀도와 해상도를 제고하였다.

■ **이종 데이터 융합을 통한 고해상도/고정밀도 동적응답 획득:** LDV는 스펙클 잡음이 미량 포함된 정밀한 속도 데이터를 높은 샘플주파수로 획득할 수 있으나 일정하지 않은 바이어스 오차 때문에 적분시 정확한 변위를 얻을 수 없다. 또 LADAR은 변위를 직접 계측할 수 있으나 샘플링 주파수가 낮고 계측신호에 잡음이 많아 독자적으로 쓰이기 힘들다. 본 제안과제에서는 오차 동역학에 기초한 상태공간모델(state-space model)을 바탕으로, 속도 데이터를 변위 데이터로 보정해 높은 샘플주파수의 정밀한 동적응답을 산정함으로써 기존기술보다 우위를 점하였다. 더불어 스무딩 기법을 도입해 산정된 동적응답의 불확실성을 최소화하고, 나아가 이단계 칼만필터를 적용함으로써 스무딩이 야기할 수 있는 계산시간의 막대한 증가를 방지할 뿐

아니라 계측신호의 정밀도 향상을 도모하였다.

■ **실시간 동적응답 계측 시스템 구축:** 본 연구 결과의 시제품화 또는 상용화를 위해서는 두 장비에서 동시 조준/계측을 수행하고 계측결과를 사용자에게 실시간으로 제공하는 유저 인터페이스 소프트웨어가 필수적이다. 따라서 본 과제에서는 두 장비와 소프트웨어 간 통신모듈을 개발하고, 데이터 패킷에서 동적응답을 추출한 뒤 융합 알고리즘을 통해 고품질/고해상도 동적응답 데이터를 산정하는 데이터 변환/처리 모듈을 구현하였다. 사용자는 기존의 센서와 동일한 방식으로 간편하게 동적변위를 취득 가능하고, 더불어 자신의 시스템에 맞는 최적의 알고리즘을 취사선택할 수 있다.

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 연구수행 전략 및 방법론

본 연구의 시작단계에서, 연구진은 LADAR와 LDV를 융합한 시스템을 구축하여 구조물의 동적응답(변위, 속도, 가속도 등)과 동적좌표를 실시간으로 정밀 계측할 수 있는 계측시스템의 시제품개발을 본 연구의 최종목표로 설정하였으며, 다음과 같은 세부목표를 수립하였다.

세부목표 1: LDV/LADAR 시스템 연속 스캐닝 기법 개발

- 비접촉 스캐닝이 가능한 LDV 및 LADAR를 이용하여 원거리(최대 600m)에서 대상구조물의 동적응답과 동적좌표를 연속적으로 측정하는 계측 시스템을 구축한다.
- LDV와 LADAR가 대상구조물의 동일지점을 동일시간에 레이저 광선으로 조준하는 동기화 기법을 개발한다.

세부목표 2: 이중 및 멀티샘플주파수 데이터 융합을 위한 칼만필터링 알고리즘 개발

- LDV에서 획득한 고해상도/저정밀도 속도 데이터와 LADAR에서 획득한 저해상도/고정밀도의 변위 데이터를 융합, 고해상도/고정밀도의 동적응답(변위, 속도, 가속도)과 계측지점의 동적좌표를 산정하는 효율적 알고리즘을 개발한다.
- 개발된 칼만필터링 알고리즘에 스무딩 기법 및 무향칼만필터/파티클 필터를 적용해 산정된 동적응답의 불확실성을 최소화하고 정밀도를 제고한다.

세부목표 3: 실시간 동적응답 획득을 위한 소프트웨어 구축 및 시스템 검증

- 개발된 연속스캐닝 기법과 칼만필터링 알고리즘을 통합하여 실시간으로 대상 구조물의 동적응답 및 동적좌표를 정밀계측할 수 있는 통합 시스템을 구축한다.
- 개발된 시스템을 다양한 실구조물에 검증해 적용성을 평가한다.

제2절 연구수행과정 및 내용

본 과제는 앞서 기술한 세부목표에 따라 1년 6개월 간 수행되었다. 각 세부목표의 주요 연구내용은 표 1과 같다.

표 1. 본 과제의 주요 연구내용

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도 (12개월)	LDV / LADAR 시스템 연속 스캐닝 기법 개발	■ 대형구조물용 LDV 속도계측기법 개발 ■ LADAR 연속 스캐닝 기법 개발 ■ LDV/LADAR 동시제어기법 개발 ■ LDV/LADAR 동시계측기법 개발
	이종 및 멀티샘플주파수 데이터의 융합을 위한 필터링 알고리즘 개발	■ 기존 데이터 융합 연구사례 조사/분석 ■ 칼만 필터링 알고리즘 개발 ■ 다양한 응용 칼만 필터링/스무딩 기법 적용 ■ 데이터 융합 알고리즘 보완 수정
1차년도 (6개월)	실시간 동적응답 획득을 위한 소프트웨어 구축 및 통합시스템 검증	■ 유저 인터페이스 소프트웨어 제작 ■ 시스템 검증 및 매뉴얼 작성 ■ 현장적용

가. LDV/LADAR 시스템 연속 스캐닝 기법 개발

LDV와 LADAR는 비접촉식 계측센서의 일종으로, 레이저로 대상구조물을 조준하는 것은 같지만 앞서 기술한 대로 레이저의 종류와 측정원리, 취득되는 데이터의 특성은 상이하다. 따라서 본 세부목표에서는 두 시스템에서 취득한 데이터가 일관성을 갖게끔 보정하는 기법에 초점을 맞추었다.

두 장비는 이미 본 연구진이 보유하고 있으며 이를 활용한 다수의 연구를 수행한 바 있다 [4, 5, 20]. 본 연구진은 LDV를 이용해 다양한 구조물에서 초음파 센싱에 의한 손상탐지를 연구해왔으며, 이를 통해 본 장비의 이론적 원리와 발생할 수 있는 오차에 관한 충분한 정보를 확보하였다. 또 LADAR의 경우 빌딩정보 모델링(Building Information Modeling, BIM)에의 적용성 연구를 수행하면서 장비의 작동원리와 내부명령 수준 제어법을 숙지한 바 있다. 따라서 두 장비를 연계/동기화하는 연구에 있어 당초 연구계획에 맞춰 차질없이 연구가 진행되었다.

두 계측장비는 본 연구진이 보유하고 있는 상용제품이므로, 두 장비를 일체화해 완제품을 개발하는 것은 재설계와 제작이 불가피해 본 과제의 연구기간과 연구비를 고려했을 때 타당하지 않다고 판단됐으며, 따라서 앞서 기술한대로 두 장비의 기능을 보완하고 계측을 동기화하는 연구에 중점을 두어 연구를 진행하였다.

기능 측면에서는 LDV의 경우 ▶원거리 계측시 반사광선의 소실로 인해 오류가 발생하는 문제와 ▶스펙클 잡음 발생 문제가 있었으나 반사테이프의 부착만으로 입사광선의 강도를 조정함이 가능하였고, ▶LADAR의 경우 라인스캔 기법구현을 위해 장비의 수평방향 회전을 제한해야 하는 문제가 있었으나 이는 내부 명령어 수준에서 구현가능 하였고, 계측한 데이터로부터 변위를 추출하고 잡음을 감소하는 기법을 개발하여 본 연구의 목적에 맞는 충분한 품질의 변

위를 획득할 수 있었다.

데이터 동기화 측면에서는 ▶동일위치를 계측하기 위해 두 장비의 레이저광선을 동시에 제어하는 문제, ▶두 장비의 계측신호를 시간축에서 동기화하는 문제가 있었으나 각 장비에서 지원하는 내부명령어 수준에서 제어가 가능하였고, ▶획득한 계측 데이터에서 원하는 지점의 응답을 추출한 뒤 샘플링 시간을 동기화하는 문제와 ▶광선 입사각에 따른 레이저 도플러 속도 계 데이터 보정문제는 내삽 등 몇가지 신호처리 기법과 통계기법을 이용해 해결가능 하였다.

나. 이중 및 멀티샘플주파수 데이터의 융합을 위한 칼만필터링 알고리즘 개발

근래 전자공학 및 광학분야의 눈부신 발전으로 다양한 센서가 광범위하게 개발/상용화되고 있다. 따라서 건설분야에서도 이들 센서를 활용해 시공중/공용중 구조물의 거동을 정밀계측하려는 시도가 활발하다. 그러나 다른 센서 간에는 센서 고유의 특성상 다른 샘플주파수의 데이터가 획득되므로, 이중 및 다른 샘플주파수(multi-rate)의 데이터 융합을 위한 신호처리기법이 요구된다. 구조물의 정밀한 동적계측이 관건인 구조건전성 모니터링 분야에서 이중 데이터 융합에 관한 광범위한 연구가 미국을 중심으로 최근 활발히 수행되고, 각종 문헌에 성공적인 연구결과가 보고되고 있다 [19].

본 연구에서는 기 개발된 알고리즘을 수정해서 LADAR 및 LDV로부터 획득된 데이터를 융합할 수 있는 최적화된 칼만필터[21] 알고리즘을 개발하였다(그림 6). 기존의 칼만필터 알고리즘을 조사 분석한 결과, 기존 기술은 단순히 변위만을 직접 산정하고 있음을 확인하였고, 다양한 조건에서 컴퓨터 시뮬레이션을 거친 결과 이러한 접근법으로는 바이어스 오차가 완전히 제거되지 않아 적분오차의 일부분이 최종 산정된 변위에 남는다는 사실을 확인하였다 [19]. 따라서 연구진은 바이어스를 직접 산정하는 방식을 제안하였고, 여러 실험과 수치해석을 통해 그 효과를 검증하였다. 더불어 칼만필터의 정확도 향상을 위해 칼만필터 스무딩(smoothing) 기법을 도입하였는데, 기존에 적용된 스무딩 기법은 실시간 변위산정이 불가하므로 고정지연 스무딩(fixed lag smoothing) [22]과 고정지점 스무딩(fixed point smoothing) [23, 24]을 도입하였다. 더불어 정확도 향상을 위해 무향칼만필터(unscented Kalman filter) 및 파티클필터(particle filter)와 같은 최신 변종 칼만필터링 기법이 조사 연구되었으며, 이 가운데 바이어스 산정에 효과가 높은 이단계 칼만필터 (two-stage Kalman filter) [24-27] 를 채택하여 변위산정의 정확도와 계산시간 면에서 큰 성과를 거두었다.

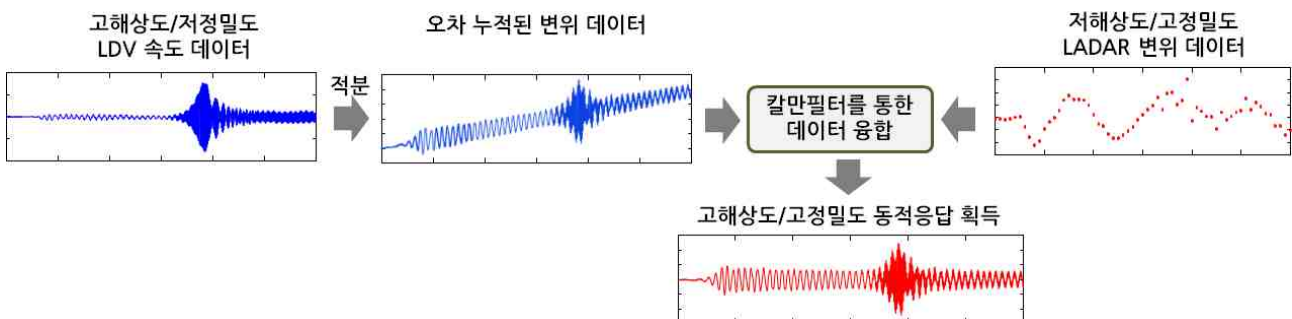


그림 6. 계측 속도와 변위데이터 융합을 위한 칼만필터링 개요도

다. 실시간 동적응답 획득을 위한 소프트웨어 구축

본 연구과제의 최종목표는 사용자에게 실시간으로 고해상도/고정밀도의 동적응답 데이터를

제공하는 것으로, 이를 위해서는 LDV/LADAR 시스템 연속 스캐닝 기법으로 취득한 속도/변위 데이터에 칼만필터링 알고리즘을 적용, 고해상도/고정밀도 동적응답과 동적좌표를 생성하고 사용자에게 접근성을 부여해야 한다.

이 과정은 오로지 프로그래밍 요소로만 이뤄졌다. 각 장비에서 지원하는 프로그래밍 언어 인터페이스(일반적으로는 라이브러리 형태로 제공됨)를 이용, 동적링크 라이브러리(Dynamic Linked Library, DLL)를 생성하고 이를 메인 소프트웨어에 포함해 데이터패킷 전송 및 처리를 수행하였는데, 연구진은 다수의 공학용 프로그램 개발 및 프로그래밍언어 관련 출판 경험이 있어 일정 및 결과도출에 있어 원활한 연구를 진행하였다. 개발 소프트웨어의 주요 개발기능은 ▶각도에 기반한 레이저광선 위치 및 스캔경로 설정, ▶계측 데이터 패킷에서 응답 데이터 추출 ▶속도/변위 융합 알고리즘의 구현 ▶데이터 저장기능 및 그래프 시각화로 요약할 수 있다.

제3절 연구수행결과 및 결과의 검증 방법

2절에서 언급한 대로, 본 연구는 당초 계획에 맞추어 순조롭게 진행되었다. 각 세부목표별 주요 연구수행결과는 다음과 같다.

세부목표	연구수행결과	내용	결과의 검증방법
LDV/LADAR 시스템 연속 스캐닝 기법 개발	대형구조물용 LDV 속도계측기법 개발	LDV 계측원리 분석 LDV 변위계측시 단점 규명 장거리 속도계측용 LDV 선정	현장시험
	LADAR 연속 스캐닝 기법 개발	라인스캔 기능을 이용한 LADAR 변위계측 기법 개발 잡음감소기법 개발	실내시험/현장시험
	LDV/LADAR 동시제어기법 개발	계측동기화 모듈(measurement synchronization module, MSM) 개발	실내시험/현장시험
	LDV/LADAR 동시계측기법 개발	실시간 데이터 취득 및 처리 모듈(Real-time data collection and compensation module, CCM) 개발	실내시험, 현장시험
이중 및 멀티샘플주파수 데이터의 융합을 위한 필터링 알고리즘 개발	기존 데이터 융합 연구사례 조사/분석	기존 칼만필터 기반 데이터 융합기법 (Smyth와 Woo, 1997)의 장단점 분석	실내시험, 현장시험을 통한 성능 분석
	칼만 필터링 알고리즘 개발	기존 기법의 단점을 보완하는 상태공간 모델 개발	실내시험 및 컴퓨터 시물레이션
	다양한 응용 칼만 필터링/스무딩 기법 적용	스무딩 기법과 이단계 칼만필터를 동적변위산정에 적용	실내시험, 현장시험
실시간 동적응답 획득을 위한 소프트웨어 구축 및 통합시스템 검증	유저 인터페이스 소프트웨어 개발	이단계 칼만필터 및 스무딩 기법을 통한 데이터 융합 소프트웨어 개발 MSM, CCM과의 연동성 확보	실내시험, 현장시험

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

3장에서는 2.3절에서 제시한 연구내용, 성과, 검증방법에 관해 자세히 기술한다.

제1절 LDV / LADAR 시스템 연속 스캐닝 기법 개발

본 세부목표를 위해 LDV의 경우 세계적으로 가장 많은 인지도와 신뢰도를 확보한 Polytec사의 PSV-400 시스템이 선정되었다. 본 시스템의 경우 헤드 교체시 300 m의 거리까지 계측이 가능하고, 직관적인 사용자 인터페이스를 갖춰 LADAR 시스템과의 통합이 용이하며, 레이저 광선의 조준을 원거리에서 가능케하는 비디오 카메라가 내장됐으며, 적용도가 높은 BNC 단자를 인터페이스로 하여 외부 데이터와 호환 및 연동성이 뛰어난 데이터 취득 시스템을 갖추어 본 연구에 가장 적합한 장비로 판단되었다.

LADAR의 경우 RIEGL사의 VZ-400 지상 라이다 스캔 시스템이 선정되었는데, 이 장비는 동적 변위 계측에 필수 불가결한 라인스캔 (line scan) 기능을 지원하는 유일한 상용 시스템이다. 측정 가능 거리는 600m에 달해 원거리 계측에 알맞으며, 본래 지상 라이다 시스템은 내장된 거울이 수직 방향으로 회전하고 동체가 수평방향으로 회전하면서 공간 내 좌표와 거울 간의 거리를 측정, 공간의 삼차원 모델을 구축하는 장비이나, 라인스캔 기능을 이용하면 동체의 수평방향 회전을 구속하여 내장된 거울만이 회전한다. 이 경우 스캔은 공간이 아니라 공간 상의 직선으로 바뀌므로 원하는 지점을 연속적으로 계측할 수 있다.

본 기술은 보다 정확하고 잡음이 없는 동적 변위를 산정하는 새로운 시스템을 위해, LADAR와 LDV의 하드웨어를 통합하여 동시 구동하는 기술이다. 본 시스템의 특징은, 우선 다른 데이터 융합 시스템과 달리 두 가지 레이저 기반 비접촉식 센서를 융합함으로써 완전한 비접촉식 시스템이 가능하다는 점이다. LDV와 LADAR는 내부 명령어 수준에서 통합됨으로써 동시에 제어되고, 데이터를 전송받고, 후처리를 위해 클라이언트 컴퓨터의 소프트웨어로 전달한다. 본 기술을 통해 구축된 통합 시스템의 개략적인 구조는 그림 1과 같다.

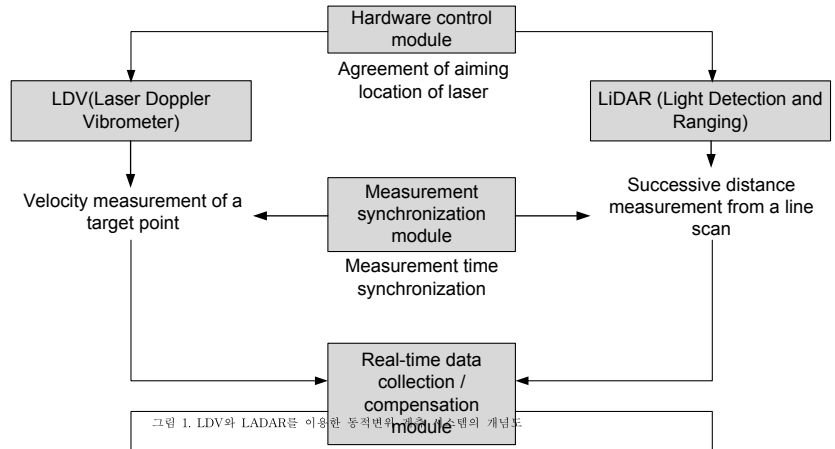


그림 1. LDV와 LiDAR를 이용한 동적변위 측정 시스템의 개념도

가. LDV와 LiDAR의 작동원리

Scaling up the velocity measurement using incidence angle information

이것이 속도를 매우 정밀하게 높은 샘플 주파수로 계측한다 [27, 28]이다. LDV는 계속 지점에 레이저 광선을 주사하고, 반사되어 들어오는 광선과 주사한 광선을 중첩시키는데, 이 중첩된 광선은 LDV의 스캐닝헤드에 내장된 광검출기(photodetector)에서 전압신호로 변환된다. 변환되는 전압신호는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$u_c = u_{DC} + A \cos(\omega_c t + \phi_m)$$

여기서 u_c 는 광검출기에서 검출한 빛의 세기이고, u_{DC} 는 광검출기 전압신호의 DC 성분이다. ω_c 는 브래그셀(Bragg cell)을 통해 변조된 구동신호의 주파수이고, ϕ_m 은 반사광선과 주사광선이 중첩되면서 발생하는 위상각이다. u_{DC} 가 작기만 하, 이 신호에 각각 $\cos \omega_c t$ 와 $\sin \omega_c t$ 를 곱하고 저역통과필터 (low pass filter)에 통과시키면 다음 식으로 u_x 와 u_y 를 얻을 수 있다.

$$u_x = \frac{A}{2} \cos \phi_m(t) \quad u_y = \frac{A}{2} \sin \phi_m(t)$$

Displacement of high sampling rate, low noise and no integration error

계측 구조물의 변위 변위 (out-of-plane displacement)는 위상각 ϕ_m 과 $x(t) = (\lambda/4\pi)\phi_m(t)$ 의 관계로 비례하기 때문에, 변위를 산정하는 문제는 arctan 함수를 적용, ϕ_m 을 구하는 것으로 단순

화된다.

$$\phi_m(t) = \arctan\left(\frac{u_q(t)}{u_i(t)}\right) \quad (3)$$

식 (3)을 통해 위상각 ϕ_m 의 계산이 끝나면 변위변위와 속도는 LDV 디지털 디코더에서 각각 다른 과정을 통해 계산된다. $\arctan$ 함수의 값은 $(-2\pi, 2\pi)$ 로 제한되므로 계산된 위상각 ϕ_m 은 불연속의 왜곡된 값을 갖는다. 따라서 결렬침 과정(unwrapping process)을 통해 위상각을 연속된 함수로 보정해야만 올바른 변위를 구할 수 있다. 반면 속도 계산과정에서는 결렬침 과정이 필요하지 않은데, 이는 물리적으로 속도가 단순히 변위의 미분값이므로 결렬침 과정이 없어도 계산이 가능하기 때문이다. 위상각에서의 불연속점은 미분과정에서 스파이크(spike) 형태로 변환되나, 이는 신호처리를 통해 쉽게 제거되므로, LDV가 측정한 속도는 결렬침 과정이 요구되는 변위 측정값에 비해 신뢰도와 정확성이 높다. LDV의 속도, 변위 측정과정은 그림 2에 요약돼 있다.

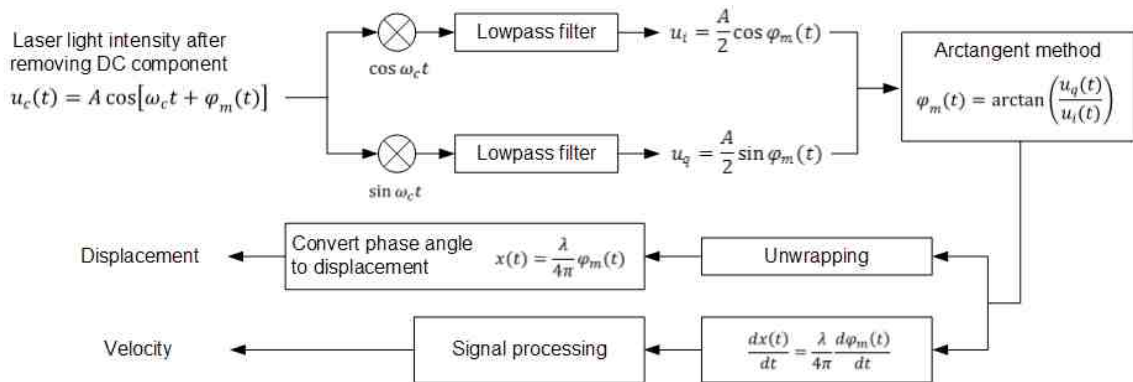


그림 2. LDV의 속도 및 변위 측정 원리

LADAR는 내장된 거울을 통해 주사되는 레이저 펄스나 레이저 광선이 목표지점에 반사되어 되돌아오는 전체 이동시간을 측정함으로써 목표지점과 거울 사이의 거리를 측정한다[29-32]. 이동시간은 빛의 속도를 곱하면 쉽게 거리값으로 변환이 가능하다. LADAR는 크게 두가지 방식이 있는데, 하나는 이동시간 직접측정(time-of-flight) 방식이고 다른 하나는 위상변환(phase shift) 방식이다. 이동시간 직접측정 방식의 경우 3 km 이상의 장거리를 측정할 수 있는 반면 정확도가 3 - 5 mm로 제한돼있는 반면, 위상변환 방식은 1 mm 이내의 높은 정확도를 보장하나 측정거리가 100 m 이내로 제한되어 있다.

이동시간 직접측정 방식의 LADAR에는 이동시간 Δt 를 직접 측정할 수 있도록 장비에 타이머가 내장되어 있다. 타이머는 복수의 레이저 펄스의 이동시간을 측정하여 그 평균을 취하는 방식으로 이동시간을 계산하는데, 타이머는 레이저 펄스가 주사되는 순간 시작되어 포토다이오드(photodiode)에 반사된 레이저 펄스가 감지되는 순간 멈춘다 [Pfeifer and Riese, 2007]. 따라서 센서와 목표지점간의 거리 d 는 다음과 같은 간단한 식에 의해 계산될 수 있다 (그림 3 (a)).

$$d = \frac{c\Delta t}{2} \quad (4)$$

여기서 c 는 빛의 속도이다. 이동시간 직접계측 방식 LADAR에서 내장 타이머는 센서 성능에 가장 중요한 역할을 한다. 현재 타이머의 시간 분해능은 3.3 피코초까지 발전해있는데, 이는 거리로 환산할 경우 1 mm에 해당한다.

위상변환 방식의 경우 주파수 f_d 의 사인과 형태로 변조된 광출력을 갖는 레이저 광선이 주사되며, 주사광선의 위상과 반사된 광선의 위상을 비교하여 그 위상변환 φ 를 측정한다. 이 경우 광선의 이동시간 Δt 는 다음과 같이 계산될 수 있다 (그림 3 (b)).

$$\Delta t = \frac{\varphi}{2\pi f_d} \quad (5)$$

식 (5)를 (4)에 대입하면 센서와 목표지점간의 거리를 쉽게 구할 수 있다.

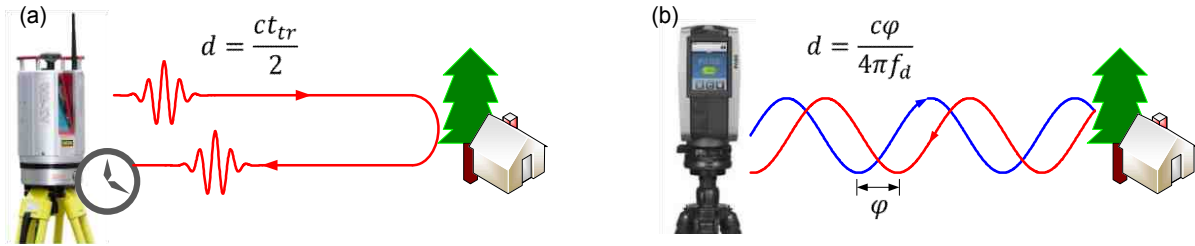


그림 3. 이동시간 직접계측 방식과 위상변환 방식 LADAR의 계측원리

나. LADAR의 변위계측방법 개발

본 연구에서는 LADAR로 동적변위를 계측하는 방법을 새롭게 개발하였다. LADAR의 라인스캔 모드에서는 LADAR의 거울만 회전함으로써 레이저 펄스가 하나의 선을 연속적으로 스캔하게 된다. 선정된 LADAR 센서의 경우 거울은 초당 최대 40 번을 회전하며, 거울은 3개의 면을 갖고 있으므로 (그림 4 (a)), 최대 스캔 속도는 120 Hz가 된다. 그림에서 레이저 펄스가 센서 밖으로 주사될 수 있는 각도는 $30^\circ - 130^\circ$ 로 제한되며, 이때 거울의 각도는 $15^\circ - 65^\circ$ 에 해당한다. 이는 거울 한 면이 노출되는 회전각도 120° 가운데 50° 영역에서만 계측이 이뤄진다는 것을 의미한다. 따라서 실제 라인스캔이 이뤄지는 시간이 t_{scan} 이라면, 각 스캔 사이에는 $1.4t_{scan}$ 의 유휴시간이 존재하게 된다 (그림 4 (b)).

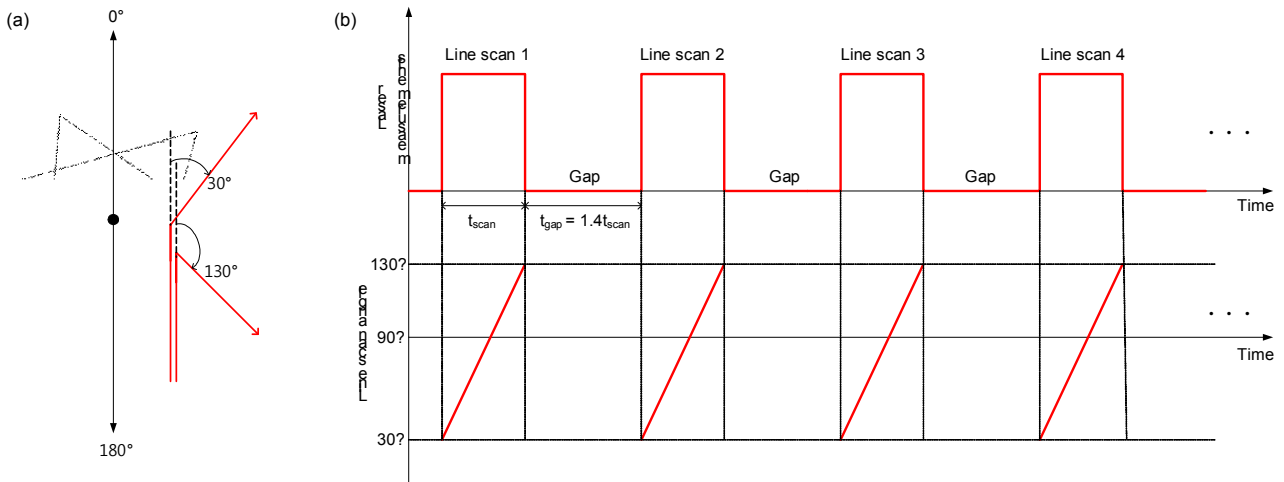


그림 4. LADAR 라인스캔 모드의 작동 메커니즘

다시 말해 라인스캔 모드에서는 30 - 130°의 각 범위에 있는 복수의 점들이 샘플 주파수 120 Hz로 연속적으로 계측되며, 한 번의 스캔에 소요되는 시간은 3.472 msec이다. 선정된 각 분해능은 0.098° 이므로, 한 번의 스캔으로 1,020의 점이 동시에 계측된다. 대상 구간의 LADAR가 30 m 떨어진 경우 인접한 두 점의 거리는 약 5 cm이며, 두 점 사이의 계측 시간차는 3.4 μ sec에 불과하다. 라인스캔 모드에서 LADAR 센서는 다음과 같은 데이터를 출력한다.

- 계측시간 t
- 레이저 펄스가 주사된 각도 φ
- 거울과 목표지점간의 거리 L

이들 데이터에서 동적변위를 추출하는 과정은 그림 5에 잘 나타나 있다. 먼저 LADAR의 스캔라인에 있는 모든 점의 데이터를 120 Hz의 샘플 주파수로 획득한다 (그림 5 (a)). 여기서 거울과 목표지점 간의 거리 L 은 스캔라인과 수직이 아니므로 곧바로 변위를 추출할 수 없다. 따라서 다음 식을 이용해 수평거리 H 를 추출해야 한다 (그림 5 (b)).

$$H = L \sin \varphi$$

수평거리 H 를 계산하고 나면, 그림 5 (c)와 같이 동일한 주사각 φ 을 갖는 데이터만 선별한다. 이 과정을 거친 뒤, 구조물이 진동하지 않는 상태에서의 정적 수평거리 H_0 를 H 에서 뺀다. H_0 는 동적 변위 계측 시험을 실시하기 전 예비시험을 통해 결정하거나, 신호 초반부 발생하지 않는 구간의 거리를 평균하여 구할 수 있다.

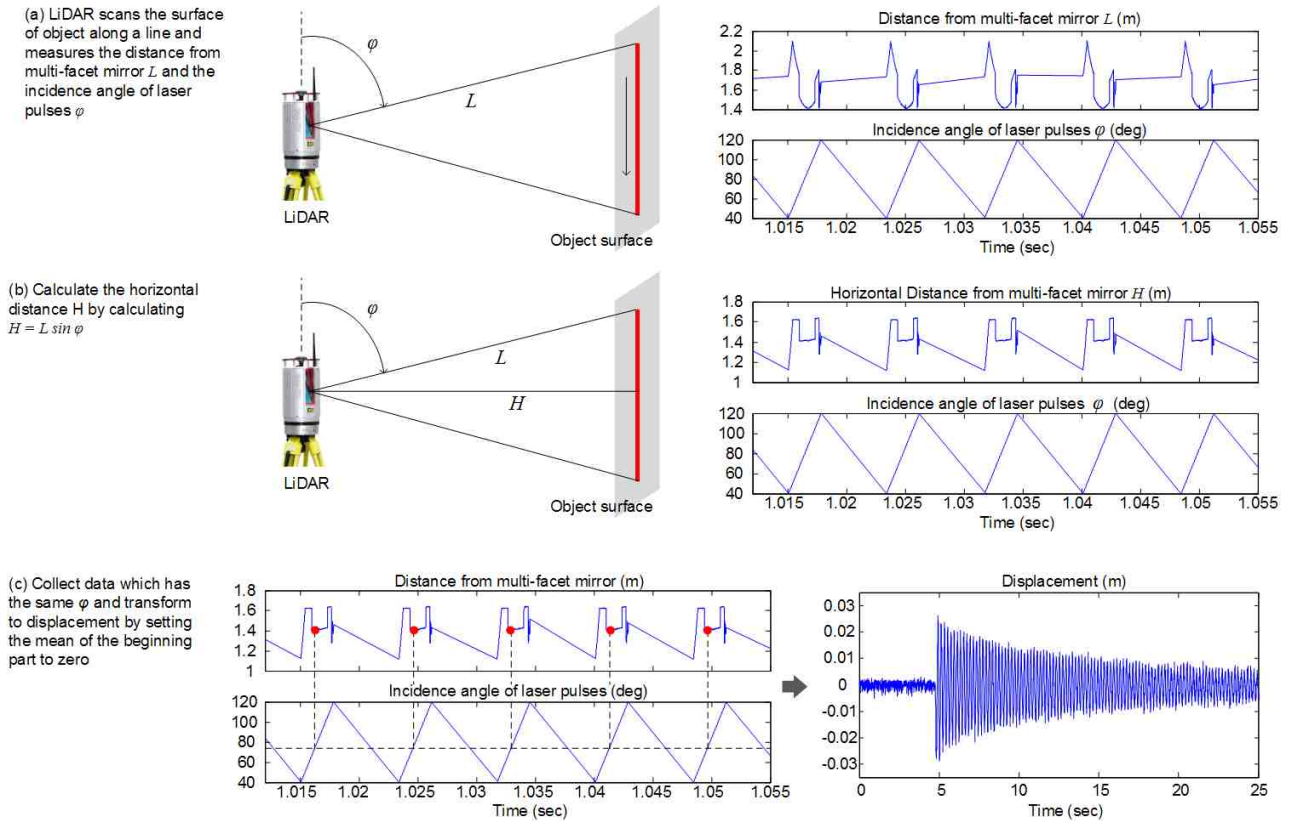


그림 5. LADAR를 이용한 변위계측 과정

LADAR를 이용한 동적 변위 계측에 있어서 가장 큰 단점은, 그림 5 (c)에서 확인할 수 있듯이 계측된 변위신호에 잡음(noise)이 많다는 것이다. 시판되는 LADAR의 일반적인 정밀도 (precision)은 3-5 mm 수준이므로, LADAR를 이용해 1 cm 이하의 변위를 계측하는 경우 잡음에 의해 실질적인 문제점이 있다. 따라서 계측 후 이러한 잡음을 소거하는 방법이 강구되어야 한다.

잡음소거에 있어 LADAR의 장점은, 다른 센서와는 달리 목표지점 주위의 점들도 동시에 계측이 가능하므로 이를 잡음소거에 활용할 수 있다는 것이다. 다른 센서는 한 점만을 계측 가능하므로 시간 영역에서 이동평균필터나 위너필터(Wiener filter) 등을 이용해야 하는 한계가 있으나, LADAR의 경우 시간 영역, 공간 영역을 통해 잡음 소거에 보다 많은 데이터 샘플을 활용할 수 있다. 그림 6은 LADAR로 계측한 변위신호의 잡음소거에 활용할 수 있는 데이터 샘플의 일례를 보여준다. 시간 t_0 에서 목표지점 φ_0 의 변위 $x(\varphi_0, t_0)$ 를 산정할 경우, 시간영역의 데이터만 활용할 경우 7개의 데이터 샘플을 활용하려면 $x(\varphi_0, t_0 - 3\Delta t), x(\varphi_0, t_0 - 2\Delta t), \dots, x(\varphi_0, t_0 + \Delta t), x(\varphi_0, t_0 + 3\Delta t)$, 다시 말해 시간영역에서 3 시간단계의 데이터까지 활용해야 하나, 시간, 공간 영역의 데이터를 동시에 활용할 경우 1 단계의 데이터만을 활용하면 되고, 같은 3 단계의 데이터까지 활용할 경우 49개의 데이터를 잡음 소거에 이용할 수 있다.

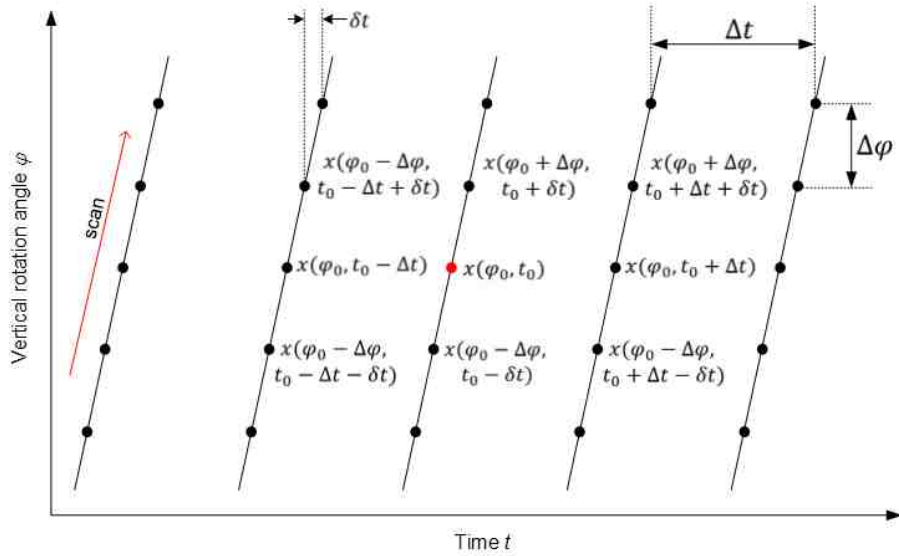


그림 6. LADAR에서 측정되는 지점과 이를 이용한 잡음 소거 기법

본 연구에서는 시간, 공간 상의 데이터를 동시에 활용함과 동시에 소거되고 남은 잡음이 영평균 가우시안 분포의 특성을 유지하게끔 하기 위해 크리깅 방법 (Kriging method) [33]를 도입하였다. 본디 크리깅 방법은 이차원 내삽(interpolation) 기법으로 관심 영역 내의 광물 매장량을 추정하기 위한 방법으로 제안되었으나, 본 연구에서는 이를 시간-공간 영역에 적용하며, 내삽 방정식은 다음 식과 같이 목표 지점과 인접한 점들의 가중평균(weighted average)로 표현된다.

$$\hat{x}(t_0, \varphi_0) = x(t_0, \varphi_0) + \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \lambda_{mn} [x(\varphi_0 + m\Delta\varphi, t_0 + m\delta t + n\Delta t) - x(\varphi_0, t_0)] \quad (7)$$

여기서 $\hat{x}(t_0, \varphi_0)$ 는 목표지점에서 변위의 산정값이며, m 과 n 은 사용자가 결정하는 값으로, 각각 공간과 시간 영역에서 몇 개의 인접한 점의 데이터를 활용할지 지정한다. λ_{mn} 은 크리깅 가중치(kriging weight)라 하며, 다음 행렬식에서 결정된다.

$$\mathbf{K}\lambda = \mathbf{k} \quad (8)$$

여기서 $\mathbf{K}$ 는 데이터 지점 간의 공분산 행렬(covariance matrix)이며, x_i 를 i 번째 인접지점에서 측정된 변위라고 할 때 그 요소는 $K_{ij} = \text{Cov}(x_i, x_j)$ 이다. 또한 $\mathbf{k}$ 는 목표지점과 인접지점 간의 공분산 벡터로, $x_0 = x(\varphi_0, t_0)$ 라고 할 때 $k_i = \text{Cov}(x_0, x_i)$ 이다. 이 접근법은 본 연구에서 다루는 동적변위 산정에 있어 가장 적합하다고 판단되는데, 그 이유는 크리깅 방법을 통해 소거되고 남은 잡음이 가우시안 확률변수(Gaussian random variable)의 특성을 유지하기 때문이다. 이동 평균 필터나 위너 필터의 경우 저역통과필터의 특성을 갖기 때문에 잡음 특성이 저주파 대역에 집중되는 왜곡된 형태를 갖게 되어, 차후 설명할 칼만 필터(Kalman filter)에 적용시 잡음에 대한 기본 가정사항인 가우시안 확률변수에 위배된다.

다. LDV/LADAR의 레이저광선 조준위치 동기화

LADAR가 방출하는 레이저 펄스는 비가시성이므로, 육안으로 LDV와 LADAR의 조준위치를 동기화하는 작업은 사실상 불가능하다. LDV의 레이저 광선의 경우 육안으로 식별 가능하며 한 위치에 고정되므로 목표지점에서의 조준이 용이하다. LADAR의 경우, 레이저 펄스는 앞서 언급한 대로 직선의 형태로 스캐닝하게 되므로, 스캔라인이 LDV의 레이저 광선 조준위치와 교차해야 하며, 이때의 정확한 거울회전각을 알아야 한다.

거울의 회전각은 LDV에서 획득한 정보를 통해 쉽게 알아낼 수 있다. LDV는 자신이 방출하는 레이저 광선의 수직 및 수평각에 관한 정보를 제공하므로, LDV와 LADAR의 거울위치를 동일한 높이로 설정하면 쉽게 계산이 가능하다. 따라서 LDV의 레이저광선의 수평각을 90도로 설정해두고, 두 센서의 위치정보를 사용자로부터 입력받아 LADAR 동체의 회전각을 계산하면 두 레이저 광선이 교차하는 동체 회전각을 계산할 수 있다.

사용자 입력을 받아 LADAR 센서의 수평방향 동체 회전각 θ 를 결정하는 원리는 그림 7에서 확인할 수 있다. LDV의 레이저 광선의 입사각은 수직, 수평 방향 모두 90°로 고정된 채 목표지점에 맞추고, 지면에서 LDV와 LADAR의 거울의 높이를 동일하게 조정한다. 이렇게 센서를 배치하고 나면 θ 를 결정하는 문제는 그림 8과 같이 2차원 상의 기하 문제로 단순화된다. 두 센서 간의 거리 D 는 사용자가 직접 계측하여 입력하는데, 대개는 1 - 2 m 수준에서 설치되므로 계측에 무리가 없다. 또 대상 목표와 센서 간의 거리 L 은 LADAR를 이용한 사전 정적변위 계측시험에서 결정될 수 있다.

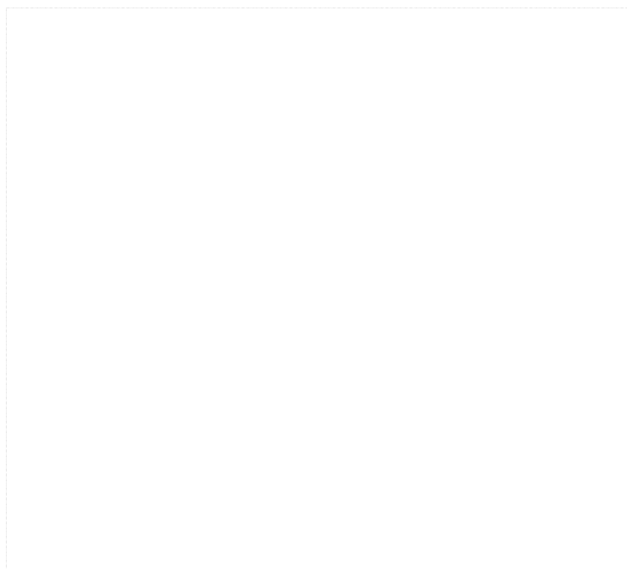


그림 7. LADAR의 회전각 결정

표 1은 실험실 환경에서 그림 7과 동일한 설정을 하고 LDV와 LADAR의 조준위치의 오차를 테스트한 결과다. LDV와 계측지점간 거리 L 과 LDV와 LADAR 간의 거리 D 를 다양하게 조합하면서 프로그램을 통해 동체회전각을 계산해 자동으로 회전시키고, 이 때의 조준지점간 수평거리를 측정하였다. 이 때 LADAR의 레이저 펄스는 보이지 않으므로 LADAR 상부에 별도의 레이저 포인터를 부착, 고정하였다. 실험결과, 두 센서는 매우 정밀한 수준에서 목표지점을 조준하고 있음을 알 수 있다. LDV와 계측지점의

거리가 멀어질수록 오차가 약간씩 증가하고 있는 추세를 보이나, 최종목표로 설정한 1 cm를 충분히 충족하는 평균 0.204 cm의 오차를 보이고 있다. 대형구조물 계측시 센서와 계측지점의 거리가 30 m 이상 이더라도, 본 연구에서 제안한 기법을 통해 조준오차를 0.5 cm 이하로 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

표 1. 레이저 광선 조준오차

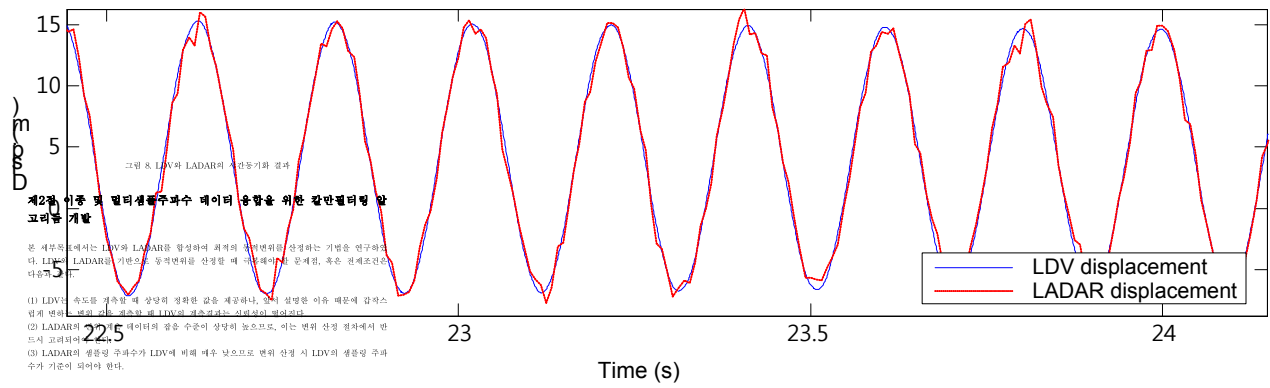
LDV-계측지점간 거리 L (m)	LDV-LADAR간 거리 D (cm)	계산된 동체 회전각 θ (°)	LDV-LADAR 조준지점간 수평거리 (10회 평균) (cm)
1.5	60	21.8	0.18
	120	45.7	0.17
	180	50.2	0.19
3	60	11.3	0.19
	120	21.8	0.19
	180	31.0	0.20
4.5	60	7.59	0.21
	120	14.9	0.21
	180	21.8	0.24
6	60	5.71	0.24
	120	11.31	0.21
	180	16.7	0.22
평균			0.204

라. LDV/LADAR의 계측시간 동기화

LDV와 LADAR는 개별적인 시스템이며, 두 시스템을 하나의 하드웨어로 통합하는 것은 본 연구의 범위를 벗어나므로, 두 시스템이 시간적으로 동기화되는 것이 매우 중요하다. LDV의 경우 본디 동적응답을 계측하는 목적으로 개발된 바, 계측 데이터에 시간값과 그 때의 동적변위 값을 사용자에게 ASCII 파일 형태로 제공한다. 그러나 LADAR의 경우는 스캔 목적으로 개발되었기 때문에 앞서 설명한 대로 시간값과 동적변위를 직접적으로 제공하지 않는다.

그러나 본 연구에서 활용한 LADAR 센서의 경우, 레이저 펄스가 방출된 시간, 거울의 각도, LADAR 동체의 각도, 거울과 반사지점 간의 거리를 제공하며, 이를 통해 본 절에서 설명했듯이 변위를 계산할 수 있다. 따라서 두 센서의 계측시간 동기화 문제는 프로그래밍 상에서 두 센서에 동시에 계측시작명령을 내리는 것으로 귀결된다.

두 센서에 계측시작명령은 두 센서에서 지원하는 내부명령어 수준에서 처리된다. 다시 말해 프로그래밍 상에서 두 센서에 계측시작명령을 동시에 전달할 수 있다는 의미다. 그림 8은 이와 같은 과정을 통해 LDV에서 계측한 변위와 LADAR에서 계측한 변위를 비교한 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 공학적 측면에서 두 신호 간의 시간 동기화는 충분한 수준에서 이뤄지고 있다. 보다 정확한 분석을 위해, 강철 외팔보에 다양한 변위를 적용하여 LDV와 LADAR에서 변위를 계측하였다. 그리고 두 신호의 RMS 오차가 최소가 되는 경우에 가장 시간동기화가 적절히 이루어졌다고 가정하고, 이 신호와 실제 시스템에서 계측한 신호를 비교하였다. 비교 결과 샘플링 오차는 거의 대부분의 실험치에서 평균 24μsec으로 평가되었다. 이는 40kHz의 샘플 주파수로 샘플링한 데이터에서 하나의 시간간격에 해당되는 것으로, 두 센서의 계측시간 동기화는 당초 목표수준인 100μsec보다 매우 낮은 수준이다.



$$\dot{x}(k) = \dot{x}_L(k) + w(k) \quad (9)$$

변위의 참 값은 속도의 참 값을 순차적으로 수치적분한 결과로, 테일러 확장 (Taylor's expansion)을 이용해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x(k+1) = x(k) + \dot{x}(k)\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{x}(k)\Delta t^2 + \frac{1}{6}x^{(3)}(k)\Delta t^3 + \dots \quad (10)$$

이차 항 이하의 고차 항을 단순화하면, 식 (10)은 다음과 같이 간소화된다.

$$x(k+1) = x(k) + \dot{x}(k)\Delta t + e(k)\Delta t \quad (11)$$

여기서 Δt 는 하나의 시간 구간의 간격(interval)이고, $e(k)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$e(k) = \frac{1}{2}\ddot{x}(k)\Delta t + \frac{1}{6}x^{(3)}(k)\Delta t^3 + \frac{1}{24}x^{(4)}(k)\Delta t^4 + \dots$$

식 (9)를 식 (11)에 대입하면 다음과 같은 동적변위의 수치적분식을 얻을 수 있다.

$$x(k+1) = x(k) + \dot{x}_m(k)\Delta t + w(k)\Delta t + \epsilon(k)\Delta t \quad (12)$$

여기서 $\epsilon(k) = b(k) + e(k)$ 로 나타내어지며, 바이어스 오류와 수치적분 오류를 망라하는 전체 오류를 뜻한다. 여기서 전체 오류 $\epsilon(k)$ 는 영역상수(piecewise constant)로 가정한다 (Rajbhandary와 Zhang, 2013). 영역상수란 $\epsilon(k)$ 가 시스템의 특성으로 결정되는 것이 아니라, 오로지 계측값에 의해 결정된다는 것을 의미한다. 바이어스 $b(k)$ 는 센서의 고유한 특징이고, 수치적분 오류 $e(k)$ 는 속도 계측신호의 주파수와 같은 특성에 따라 달라진다는 점을 고려하면 당연한 가정이다. 영역상수의 정의에 따라 $\epsilon(k)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon(k+1) = \epsilon(k) \quad (13)$$

한편 LADAR로 계측한 변위 $x_m(k)$ 는 변위의 참값 $x(k)$ 와 영평균 가우시안 계측잡음 $v(k)$ 의 합으로 표현된다고 가정할 수 있다.

$$x_m(k) = x(k) + v(k) \quad (14)$$

칼만필터의 상태공간 모델은 식 (12), (13), (14)에서 얻을 수 있다. 먼저 상태 벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{x}(k) = \begin{pmatrix} x(k) \\ \epsilon(k) \end{pmatrix} \quad (15)$$

정의한 상태벡터를 바탕으로 식 (12), (13)을 행렬식으로 표현하면 상태 공간 모델의 시스템 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d (\dot{x}_m(k) + w(k)) \quad (16)$$

여기서 행렬 $\mathbf{A}_d$ 와 $\mathbf{B}_d$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{A}_d = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} \Delta t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

또 상태 공간 모델의 관측 방정식은 식 (14)로부터 얻어진다.

$$x_m(k) = \mathbf{C}_d \mathbf{x}(k) + v(k) \quad (18)$$

여기서 관측 행렬 $\mathbf{C}_d$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{C}_d = [1 \ 0] \quad (19)$$

본 연구에서 유도한 상태공간 모델은 이전의 칼만필터 기반 변위산정 기법에서 활용된 모델과 다르다 [19]. 이전 모델에서는 상태벡터에 오로지 물리적 수치 (변위, 속도) 만이 포함되어 있어 바이어스 오차를 직접 산정할 수 없었다. 따라서 바이어스를 무시하고 동적 변위를 산정하게 되며, 이는 바이어스 오차의 일부분이 최종 산정된 변위에 남아있게 되는 부작용을 초래했다. 그러나 본 연구에서는 동적 변위 뿐 아니라 바이어스 오차까지 산정함으로써, 산정된 변위 내에 남겨진 바이어스를 효과적으로 제거하여 보다 정확한 동적변위의 산정이 가능하다.

유도된 상태공간 모델을 기반으로 일반적인 칼만필터를 이용한 동적변위 산정 절차는 다음과 같다. 앞서 설명했듯 칼만필터는 크게 두 개의 단계로 이뤄지는데, 바로 사전예측단계(prior prediction step)와 사후교정단계(posterior correction step)이다. 사전예측단계에서 칼만필터는 식 (16)을 바탕으로 현 시간단계 $k+1$ 의 상태 $\mathbf{x}(k+1)$ 을 예측한다. 이때 전 시간단계의 사후교정단계에서 산정된 값만이 이용된다. 여기서 계측잡음 $w(k)$ 은 평균이 0인 확률과정(random process)이므로, $\mathbf{x}(k+1)$ 의 최적 예측치는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|x) = \mathbf{A}_d \hat{\mathbf{x}}(k|k) + \mathbf{B}_d \dot{x}_m(k) \quad (20)$$

이때 산정 오차의 기대값은 다음과 같이 오차 공분산 행렬로 나타내어진다.

$$\mathbf{P}(k+1|k) = \mathbf{A}_d \mathbf{P}(k|k) \mathbf{A}_d^T + \mathbf{Q}(k) \quad (21)$$

여기서 $\mathbf{P}(k|k)$ 와 $\mathbf{Q}(k)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{P}(k|k) = E[(\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k))(\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k))^T] \quad (22)$$

$$\mathbf{Q}(k) = E[\mathbf{B}_d w(k)(\mathbf{B}_d w(k))^T] = \mathbf{B}_d \sigma_w^2 \mathbf{b}_d^T \quad (23)$$

사후교정단계에서는, $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k+1)$ 이 사전예측단계의 $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)$ 과 LADAR의 변위 계측값 $x_m(k+1)$ 의 선형 조합으로 결정된다.

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k+1) = \hat{\mathbf{x}}(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1)(x_m(k+1) - \mathbf{C}_d \hat{\mathbf{x}}(k+1|k)) \quad (24)$$

여기서 칼만이득(Kalman gain) $\mathbf{K}(k+1)$ 은 사전예측값과 변위 계측값의 불확실성이 최소평균자승(least mean square)의 측면에서 최소화되도록 결정되며, 다음과 같이 나타내어진다.

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k) \mathbf{C}_d^T (\mathbf{C}_d \mathbf{P}(k+1|k) \mathbf{C}_d^T + r)^{-1} \quad (25)$$

여기서 r 은 LADAR 계측신호의 잡음의 공분산이다. $v(k)$ 가 영평균이고 광의의 정상과정(wide-sense stationary)이라면 r 은 $v(k)$ 의 분산과 같다. 여기서 $\mathbf{K}(k+1)$ 은 선형 조합의 가중치 역할을 하며, 1x2 행렬이다. 사후교정단계에서 오차 공분산 행렬은 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$\mathbf{P}(k+1|k+1) = \mathbf{P}(k+1|k) - \mathbf{K}(k+1) \mathbf{C}_d \mathbf{P}(k+1|k) \quad (26)$$

이중 데이터 융합 알고리즘에서, LADAR가 변위를 계측하지 않은 시간 구간에서는 오로지 사전예측단계만 실행되므로, 이 시간구간에서는 바이어스에 의해 적분오차가 계속 누적된다. 이 누적된 오차는 LADAR가 변위 데이터를 획득하는 시간 구간에서 사후교정단계가 실행되어 보정된다.

일반 칼만필터는 이와 같이 각 계측데이터의 불확실성을 근거로 칼만이득을 결정하기 때문에, 계측 잡음에 대한 민감도가 다른 기법에 비해 상대적으로 낮으며 변위계측의 정확도도 높다. 그러나 변위산정의 정확도 측면에서는 여전히 두 가지 정도의 단점이 있다.

- (1) 칼만필터를 통한 동적변위 산정에서는, LDV의 속도 데이터만이 활용가능한 시간구간에서 적분오차가 누적되다 LADAR가 변위를 계측하는 시간구간에서 일시에 이 오차가 보정되므로, 이 현상이 반복되면서 산정된 변위의 형상이 톱니모양의 불연속성을 갖게 된다. 이 현상은 센서의 바이어스가 클 때 더 심화되며, 칼만필터 기반 변위산정기법의 공통적인 문제점이다.
- (2) 변위 산정 초반부에는 충분한 양의 데이터가 확보되지 않아 필연적으로 산정된 동적변위의 오차가 클 수 밖에 없다. 칼만이득은 매 시간구간마다 활용가능한 데이터를 동원하여 반복적으로 산정되는데, 이 반복 알고리즘의 초반부에서는 칼만이득이 부족한 데이터의 개수 때문에 비정상상태를 보이다가 어느 정도 시간이 경과된 후 정상상태로 수렴하게 된다. 기존 칼만필터의 주요 적용대상이었던 인공위성, 로켓 등의 위치추적에서는 현재의 위치만이 필요하므로 이 문제가 중요하지 않으나, 변위 산정에서는 모든 시간구간에서의 값이 요구될 뿐 아니라 이전의 산정값에 기반하여 이후 값이 결정되므로 산정된 변위가 실제값과 많이 벗어날 소지도 다분하다.

이러한 단점을 보완하기 위해, 본 세부목표에서는 두가지 칼만필터 스무딩 알고리즘을 적용하였다. 지금까지 개발된 스무딩 알고리즘으로는 고정 구간 스무딩(fixed interval smoothing) [34-36], 고정 지점 스무딩(fixed point smoothing) [23], 고정 지연 스무딩(fixed lag

smoothing) [22]이 있으나, 이 가운데 고정 구간 스무딩 기법은 계측이 완전히 끝난 이후에야 스무딩 알고리즘을 실행할 수 있어 본 연구에서 지향하는 실시간 변위 산정의 개념과는 맞지 않는다. 고정 지점 스무딩 기법의 경우, 본디 정해진 한 시간구간의 값만을 산정하는 기법으로 본 연구의 목표와는 동떨어지는 측면이 있으나, 본 연구에서는 지정된 시간구간을 순차적으로 이동시키는 기법을 추가개발하여 동적변위 산정에 적용이 가능하게끔 하였다.

따라서 사용자는 고정 지점 스무딩과 고정 지연 스무딩 기법 중에서 자신의 컴퓨터 및 센서 환경에 맞는 기법을 취사선택할 수 있으며, 취사선택에 대한 지침 역시 본 연구를 통해 개발되었다. 이 두 기법은 고정 구간 스무딩과는 달리, 현재 시간 구간 이후의 일부 계측 데이터만 활용함으로써 실시간 변위산정이라는 틀을 유지한다. 다시 말해 이들 알고리즘은 $x(k)$ 를 산정하는데 있어 현재까지의 데이터 k 개와 미래의 계측 데이터 N 개를 포함해 전체 $k+N$ 개의 데이터를 활용한다. 따라서 $(k+N)\Delta t$ 의 시점에서 $k\Delta t$ 의 변위를 산정하게 되므로, $N\Delta t$ 의 시간지연이 발생하게 된다. 그러나 실제로 충분한 품질의 동적변위를 산정하는데 필요한 N 의 값이 그다지 크지 않고, 대부분의 경우 0.5초 정도의 시간지연만을 요구하므로 사실상 실시간 동적변위 산정의 틀을 벗어나지 않는다.

스무딩 알고리즘의 기본 개념은 특정 시간구간의 산정값이 미래 계측값의 영향을 받지 않아야 한다는 가정 하에서 출발한다. 다시 말해 다음과 같은 가정이 성립한다는 것이다.

$$\hat{\mathbf{x}}(k-N|k-N) = \hat{\mathbf{x}}(k-N|k-N+1) = \hat{\mathbf{x}}(k-N|k-N+2) = \dots = \hat{\mathbf{x}}(k-N|k) \quad (27)$$

스무딩 알고리즘에서는 이 가정을 구현하기 위해 별도의 상태벡터 $\mathbf{x}_j(k)$ 를 도입한다. $\mathbf{x}_j(k)$ 는 $j \leq k$ 일 때, $\mathbf{x}(j)$ 가 값의 변화 없이 시간 구간 k 까지 전파된 것을 의미한다. 따라서 $\mathbf{x}_j(k)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{x}(j) = \mathbf{x}_j(j) = \mathbf{x}_j(j+1) = \dots = \mathbf{x}_j(k) \quad (28)$$

고정 지점 스무딩 알고리즘 [23]은 본래 지정된 하나의 시간 구간에서의 상태의 값을 산정하는 용도로 개발됐다. 그러나 LDV가 속도를 계측할 때마다 지정된 시간 구간을 순차적으로 이동시킴으로써 동적 변위 산정에 적용할 수 있다. 고정 지점 스무딩 알고리즘의 기본 개념은 다음 상태벡터를 도입하는 것이다.

$$\mathbf{x}_{aug}(k) = \begin{pmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{x}_{k-N}(k) \end{pmatrix} \quad (29)$$

식 (16), (18)에서 정의된 상태공간 모델과 식 (28)의 가정, 식 (29)의 상태벡터를 하나의 상태공간 모델로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{x}_{k-N}(k) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}(k-1) \\ \mathbf{x}_{k-N}(k-1) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_d \\ 0 \end{bmatrix} (\dot{x}_m(k-1) + w(k-1)) \quad (30)$$

$$x_m(k) = [\mathbf{C}_d \ 0] \begin{pmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{x}_{k-N}(k) \end{pmatrix} + v_k \quad (31)$$

여기서 $\mathbf{I}$ 는 2x2의 단위행렬이다. 식 (30)과 (31)을 일반 칼만필터 알고리즘에 적용하면 동적변위의 최적 산정치를 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}}(k|k) \\ \hat{\mathbf{x}}(k-N|k) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) \end{pmatrix} + \mathbf{K}_{aug} \left(x_m(k) - [\mathbf{C}_d \ 0] \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k-N|k-1) \end{pmatrix} \right) \quad (32)$$

여기서 $\mathbf{K}_{aug}$ 는 4x1의 칼만이득 행렬이다.

이 알고리즘에서 $\hat{\mathbf{x}}(k-N|k)$ 는 반복과정을 통해 산정된다. 먼저 일반 칼만필터를 이용해 $\hat{\mathbf{x}}(k-N|k-N)$ 를 구하고, 상태벡터의 초기값을 $(\hat{\mathbf{x}}(k-N|k-N) \ \hat{\mathbf{x}}(k-N|k-N))^T$ 로 설정한 뒤, 식 (32)를 순차적으로 반복하면 N 번의 반복과정을 거친 뒤에 $\hat{\mathbf{x}}(k-N|k)$ 이 얻어진다. 그 다음 시간구간에서 LDV의 속도 데이터 $\dot{x}(k+1)$ 이 계측되면 이제 초기 상태벡터는 $(\hat{\mathbf{x}}(k-N+1|k-N+1) \ \hat{\mathbf{x}}(k-N+1|k-N+1))^T$ 이 되어 다시 N 번의 반복과정을 거쳐 $\hat{\mathbf{x}}(k-N+1|k+1)$ 을 얻는다.

이중 데이터 융합에서는 LADAR가 변위를 계측한 시간구간에서만 식 (32)가 실행된다. 오직 LDV만이 속도를 계측한 시간구간에서는 사전예측단계만이 실행되며, 이 때의 최적 변위산정값은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}}(k|k) \\ \hat{\mathbf{x}}(k-N|k) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) \end{pmatrix} \quad (33)$$

고정 지점 스무딩 기법과는 달리, 고정 지연 스무딩[22]의 기본 개념은 행렬의 크기가 더 큰 행렬식을 이용해 고정 지점 스무딩의 반복과정을 제거한다는 데 있다. 고정 지연 스무딩의 경우 상태 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{x}_{aug} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{x}_{k-1}(k) \\ \mathbf{x}_{k-2}(k) \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{k-N}(k) \end{pmatrix} \quad (34)$$

여기서는 상태벡터의 크기가 $2(N+1)$ 으로 증가하므로, 고정 지점 스무딩보다 상태공간 모델이 훨씬 복잡해진다. 고정 지연 스무딩의 경우 역시 식 (28)의 가정을 토대로 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k-1}(k) &= \mathbf{x}_{k-1}(k-1) = \mathbf{x}(k-1) \\ \mathbf{x}_{k-2}(k) &= \mathbf{x}_{k-2}(k-1) \\ &\vdots \\ \mathbf{x}_{k-N}(k) &= \mathbf{x}_{k-N}(k-1) \end{aligned} \quad (35)$$

식 (34)와 (35)를 일반 칼만필터 모델에 적용하면, 다음과 같은 상태공간모델을 얻을 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{x}_{k-1}(k) \\ \mathbf{x}_{k-2}(k) \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{k-N}(k) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \mathbf{I} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{I} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}(k-1) \\ \mathbf{x}_{k-2}(k-1) \\ \mathbf{x}_{k-3}(k-1) \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{k-N-1}(k-1) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_d \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} (x_m(k-1) + w(k-1)) \quad (36)$$

$$x_m(k) = [\mathbf{C}_d \ 0 \ \cdots \ 0] \begin{pmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{x}_{k-1}(k) \\ \mathbf{x}_{k-2}(k) \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{k-N}(k) \end{pmatrix} + v_k$$

이 모델을 일반 칼만필터에 적용하면 변위의 최적 산정값을 다음과 같은 식을 통해 반복과정으로부터 구한다.

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}}(k|k) \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-1}(k|k) \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-2}(k|k) \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-N}(k|k) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \mathbf{I} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{I} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k-2|k-1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k-3|k-1) \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}(k-N-1|k-1) \end{pmatrix} + \mathbf{K}_{aug} \left(x_m - [\mathbf{C}_d \ 0 \ \cdots \ 0] \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k-2|k-1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k-3|k-1) \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}(k-N-1|k-1) \end{pmatrix} \right) \quad (37)$$

이 알고리즘에서는 $\hat{\mathbf{x}}(k-N|k)$ 가 별도의 반복과정 없이 직접 산정되나, 행렬의 크기가 커짐으로 인한 컴퓨터 메모리와 계산량의 과다사용은 피할 수 없다. 이중 데이터 융합 알고리즘에서는, LDV만 계측된 시간영역에서 고정 지연 스무딩 기법의 최적 동적변위 산정식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}}(k|k) \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-1}(k|k) \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-2}(k|k) \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-N}(k|k) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \mathbf{I} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{I} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k-2|k-1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k-3|k-1) \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}(k-N-1|k-1) \end{pmatrix} \quad (38)$$

나. 이단계 칼만필터를 이용한 동적변위 산정

지금까지 언급한 칼만필터 스무딩 알고리즘을 통해 기존 칼만필터 기반 동적변위 산정기법의 단점을 상당부분 제거할 수 있다. 그러나 칼만필터 스무딩 알고리즘은 두가지의 단점을 갖고 있다. 우선 칼만필터 스무딩 알고리즘은 일반 칼만필터 대비 막대한 양의 컴퓨터 메모리와 계산과정을 필요로 한다. 고정 지연 스무딩 기법의 경우 지연된 시간구간 N 번 만큼 추가적인 반복과정이 요구되며, 고정 지연 스무딩 기법은 $(2N+1) \times (2N+1)$ 크기의 시스템 행렬이 필요하다. 또 다른 단점은, 좋은 품질의 동적변위를 얻기 위해 필요한 시간지연 구간 N 이 실제적으로 그다지 크지 않더라도, 실시간 변위산정이라는 연구목표를 일부 훼손한다는 점이다. 실제로 N 은 LADAR 변위 계측값에 포함된 잡음 정도에 비례하여 늘어나는데, 이는 계측값의 불확실성이 커질수록 스무딩 알고리즘의 효과가 떨어진다는 기존 연구결과와 일치하는 것이다 [Simon, 2007]. 따라서 LADAR의 정밀도가 떨어지는 본 연구의 전제조건에 비교해볼 때, 칼만필터 스무딩 알고리즘의 적용은 어느 정도 효율성이 떨어지는 태생적 단점을 갖고 있다.

이러한 단점을 극복하기 위해, 본 연구에서는 이단계 칼만 필터(two-stage Kalman filter)

[24-26]를 이용한 새로운 변위산정 기법을 개발하였다. 개발된 기법은 일반 칼만필터를 기반으로 한 상태공간 모델에서 1단계로 변위를 산정하면, 바이어스 오차를 상태벡터로 하는 또다른 상태공간 모델에서 2단계로 바이어스를 보다 빠르고 정확하게 산정한다. 이단계 칼만필터를 적용함으로써 기존 칼만필터 기반 변위산정 기법의 단점을 획기적으로 개선할 수 있다. 다시 말해 칼만필터 스무딩 알고리즘의 적용이 없이도, 칼만이득의 비정상 상태 때문에 야기되는 초기 산정 오차를 줄이고, LADAR의 변위계측이 이루어지는 시간구간에서 생기는 톱니 모양의 불연속 형태를 줄일 수 있다. 그림 7은 본 연구에서 제안하는 기법의 간략한 개념도를 나타낸다.

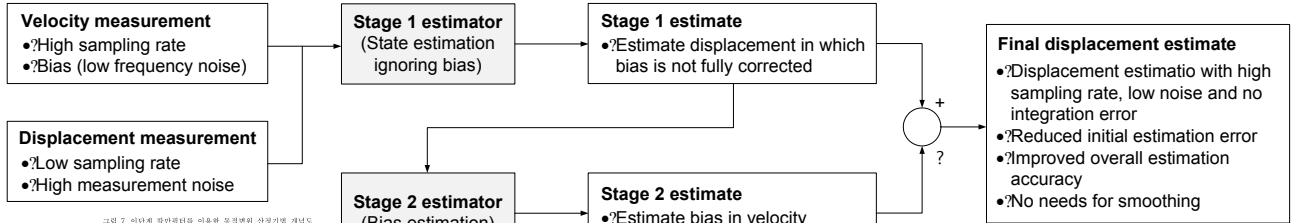


그림 7. 이단계 칼만필터를 이용한 변위 산정기법 개념도

k 번째 시간 구간에서의 속도의 평균 $\bar{v}(k)$ 가 LDV에서 계속된 값 $\bar{v}_{LDV}(k)$, 정해진 가중치 $w(k)$ 를 곱한 $w(k)$ 와 센서의 바이어스(bias) $b(k)$ 로 이뤄졌다고 가정하자.

$$\bar{v}(k) = \bar{v}_{LDV}(k) + b(k) + w(k) \quad (39)$$

식 (39)에서 $k+1$ 번째 시간 구간의 변위의 평균 $\bar{x}(k+1)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{x}(k+1) = \bar{x}(k) + \bar{v}_{LDV}(k) \Delta t + b(k) \Delta t + w(k) \Delta t \quad (40)$$

여기서 Δt 는 LADAR에서 계속된 변위는 변위의 평균 $\bar{v}(k)$ 와 정해진 가중치 $w(k)$ 로 이루어져 있다고 가정한다.

$$\bar{x}_{LDV}(k) = \bar{x}(k) + w(k) \quad (41)$$

상태벡터를 $\bar{x}(k)$ 과 두번, 상태공간 모델은 다음과 같이 (40), (41)로 구성된다.

1단계 필터에서는 바이어스 $b(k)$ 를 무시하고 일반 칼만필터 알고리즘을 실행한다. 다시 말해 식 (40)은 다음과 같이 재편다.

$$\bar{x}(k+1) = \bar{x}(k) + \bar{v}_{LDV}(k) \Delta t + w(k) \Delta t \quad (42)$$

일반 칼만필터를 적용하면, 차분계측단계의 추정값 $\hat{x}(k|k-1)$ 과 차분계측단계의 추정값 $\hat{x}(k|k)$ 은 다음과 같은 식의 관계를 갖게 된다.

$$\tilde{x}(k|k-1) = \tilde{x}(k-1|k-1) + \dot{x}_m(k-1)\Delta t \quad (43)$$

$$\tilde{P}(k|k-1) = \tilde{P}(k-1|k-1) + \sigma_w^2 \Delta t^2 \quad (44)$$

$$K(k) = \tilde{P}(k|k-1)(\tilde{P}(k|k-1) + \sigma_v^2)^{-1} \quad (45)$$

$$\tilde{x}(k|k) = \tilde{x}(k|k-1) + K(k)(x_m(k) - \tilde{x}(k|k-1)) \quad (46)$$

$$\tilde{P}(k|k) = \tilde{P}(k|k-1) - K(k)\tilde{P}(k|k-1) \quad (47)$$

여기서 σ_w^2 과 σ_v^2 은 각각 LDV, LADAR의 잡음의 분산으로, 두 확률과정의 평균이 0이기 때문에 이와 같은 값으로 단순화된다.

그러나 식 (43)-(47)의 일반 칼만필터로는 바이어스 b 가 생략되었기 때문에 정확한 동적변위의 산정이 불가능하다. 바이어스 b 를 포함한 일반 칼만필터 알고리즘은 다음과 같다.

$$\hat{x}(k|k-1) = \hat{x}(k-1|k-1) + \dot{x}_m(k-1)\Delta t \quad (48)$$

$$\hat{P}(k|k-1) = \hat{P}(k-1|k-1) + \sigma_w^2 \Delta t^2 \quad (49)$$

$$K(k) = \hat{P}(k|k-1)(\hat{P}(k|k-1) + \sigma_v^2)^{-1} \quad (50)$$

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k)(x_m(k) - \hat{x}(k|k-1) - b(k)) \quad (51)$$

$$\hat{P}(k|k) = \hat{P}(k|k-1) - K(k)\hat{P}(k|k-1) \quad (52)$$

식 (48)-(52)를 식 (43)-(47)과 비교할 때 달라진 식은 식 (46)과 (51)에 불과하다. 다시 말해 두 알고리즘의 초기값이 같다면, $K(k)$, $\hat{P}(k|k-1)$, $\hat{P}(k|k)$ 의 값은 변하지 않는다. 따라서 바이어스를 무시하고 실행한 일반 칼만필터에서 얻은 $K(k)$ 의 값은 바이어스를 고려한 상태의 칼만필터 알고리즘에도 그대로 적용할 수 있다.

$\tilde{x}(k)$ 로부터 $\hat{x}(k)$ 를 유도하기 위해서는 두 값의 관계식이 필요하다. $\tilde{x}(k)$ 은 바이어스를 무시한 값이므로 칼만필터를 이용한 산정시 어느 정도의 바이어스 성분이 포함된다. 따라서 $\hat{x}(k)$ 은 이 값에서 해당 바이어스 성분을 빼주면 된다. 따라서 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$\hat{x}(k|k-1) = \tilde{x}(k|k-1) + U(k)b(k) \quad (53)$$

$$\hat{x}(k|k) = \tilde{x}(k|k) + V(k)b(k) \quad (54)$$

$U(k)$ 와 $V(k)$ 는 간단한 반복과정을 통해 결정된다. 식 (43)과 (48)을 식 (53)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$U(k) = V(k-1) \quad (55)$$

또한 식 (46)과 (51)을 (54)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$V(k) = U(k) - K(k)S(k) \quad (56)$$

여기서 $S(k) = U(k) + 1$ 이다.

바이어스 $b(k)$ 역시 식 (53), (54)의 가정에 의해 결정된다. 먼저 계측 잔여량을

$$r(k) = x_m(k) - \tilde{x}(k|k-1) \quad (57)$$

이라 정의하고, 이를 식 (53)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$r(k) = S(k)b(k) + z(k) \quad (58)$$

여기서 $z(k)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$z(k) = x_m(k) - \hat{x}(k|k-1) - b(k) \quad (59)$$

이때 $z(k)$ 는 또다른 영평균 가우시안 확률과정이며, 그 공분산 행렬은 $\tilde{P}(k|k-1) + \sigma_v^2$ 로 계산된다. 따라서 식 (58)은 또다른 상태공간 모델의 관측 방정식으로 취급할 수 있고, 바이어스 $b(k)$ 가 영역상수임을 가정하면

$$b(k) = b(k-1) \quad (60)$$

이라는 새로운 시스템 방정식이 만들어진다. 따라서 식 (59)와 (60)의 새로운 상태공간 모델을 이용해 2단계 칼만필터가 완성된다.

$$b(k|k-1) = b(k-1|k-1) \quad (61)$$

$$P_b(k|k-1) = P_b(k-1|k-1) \quad (62)$$

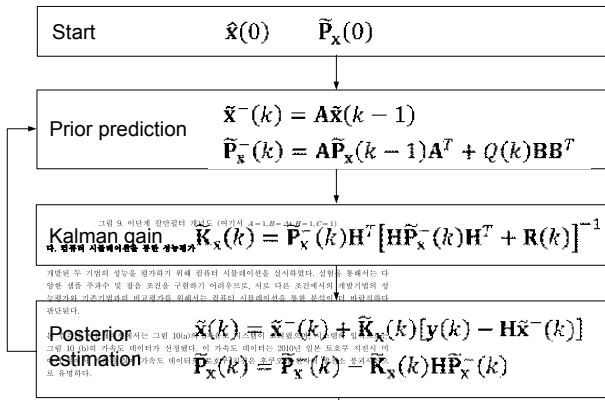
$$K_b(k) = P_b(k|k-1)S(k)^T [\tilde{P}(k|k-1) + S(k)P_b(k|k-1)S(k) + \sigma_v^2]^{-1} \quad (63)$$

$$b(k|k) = b(k|k-1) + K_b(k)[r(k) - S(k)b(k|k-1)] \quad (64)$$

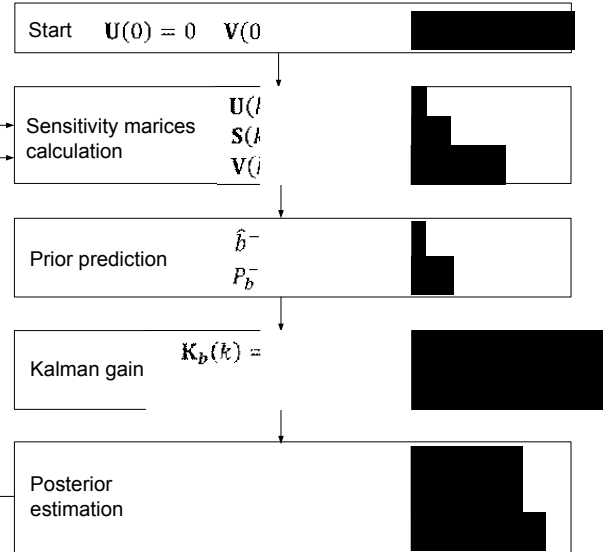
$$P_b(k|k) = P_b(k|k-1) - P_b(k|k-1)K_b(k)S(k) \quad (65)$$

정리하면, 동적변위는 1단계와 2단계 칼만필터를 병렬실행하고, 그 과정에서 $U(k)$ 와 $V(k)$ 를 계산함으로써 간단히 구할 수 있다. 이런 절차를 거치면, 식 (54)를 통해 동적변위의 최적 산정치인 $\hat{x}(k)$ 가 계산된다. 동적변위 산정을 위한 이단계 칼만필터 알고리즘의 개념도는 그림 9에 나타나 있다.

Stage 1 : State estimator without bias



Stage 2 : Bias estimator



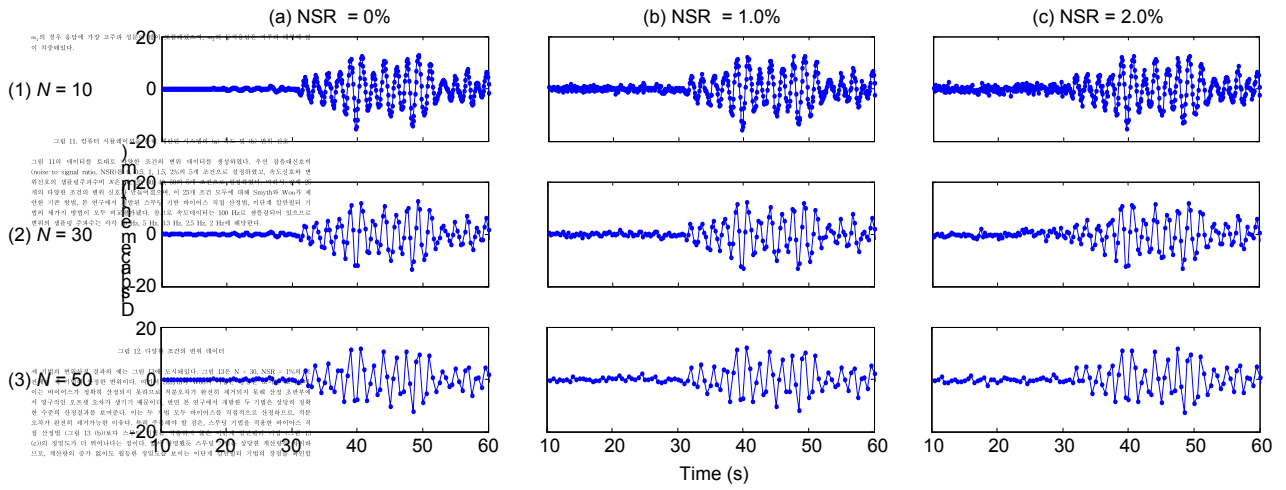
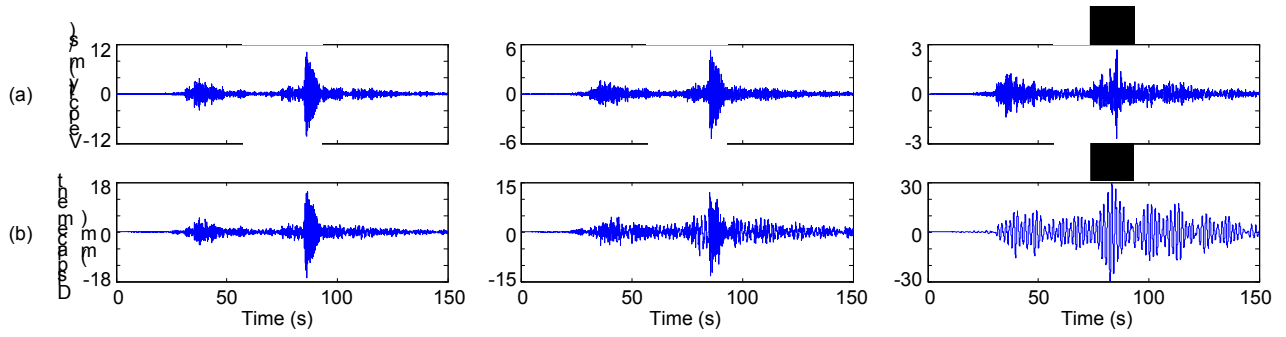
State estimation with bias

State estimate
 Kalman gain
 Error covariance

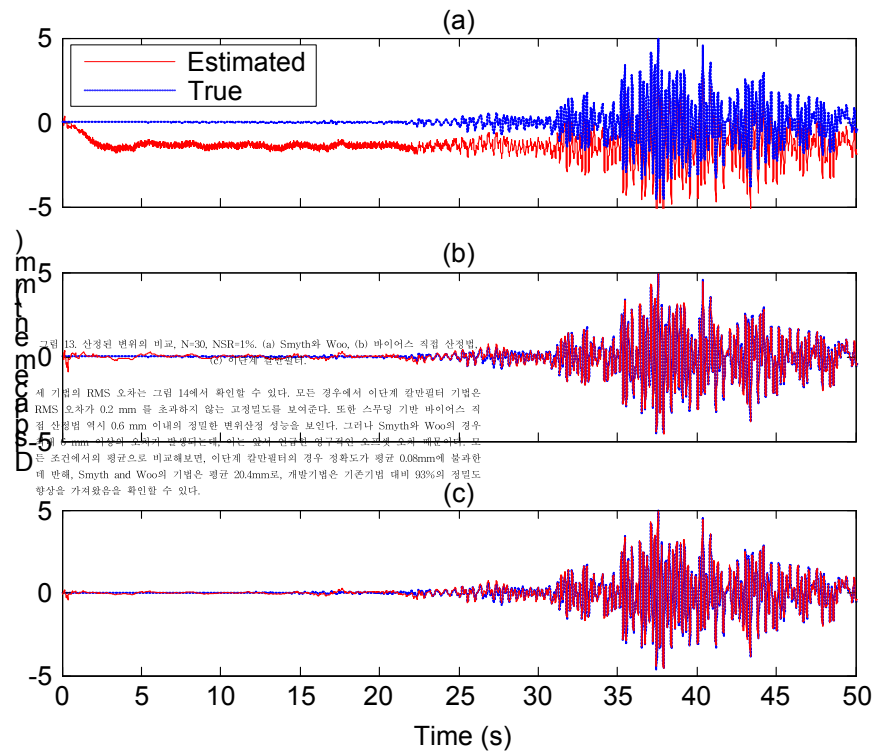


그림 10. (a) 정류회 시뮬레이션에서 고려된 3 자유도 시스템. (b) 시스템에 가한 입력 가속도.

컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻어진 각 정량의 추도를 변위는 그림 11에 한다. 각각의 정량과 감
 제, 탄성계수는 m_{11} , m_{22} , m_{33} 의 고유진동수가 가능한 많은 차이를 보이게끔 설계했다. 따라서



수 있다.



환된 뒤 정선박스의 데이터 취득 보드에서 디지털화되어 통합 서버에 최종 전달된다. LADAR의 경우에는 서버에 직접 TCP/IP 프로토콜 또는 Wi-Fi를 통해 연결된다.

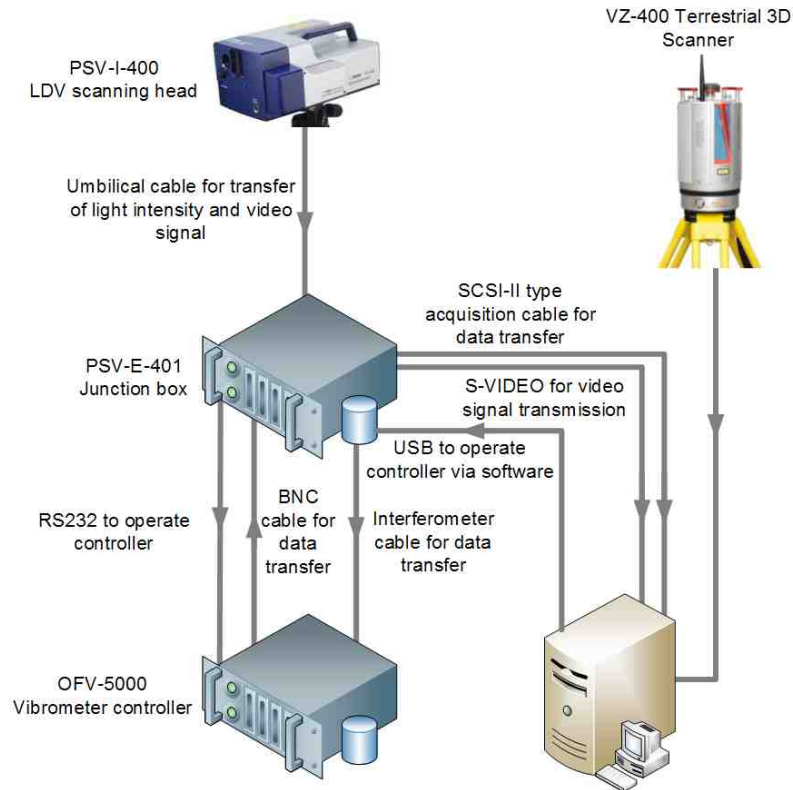


그림 15. LDV-LADAR 통합시스템의 기본 구성

LDV-LADAR 통합서버에서는 센서의 내부명령어 수준에서 개발된 두 개의 소프트웨어 모듈이 설치되어 두 센서를 제어한다. 첫째, 계측동기화 모듈(measurement synchronization module, MSM)은 센서의 간단한 위치정보를 사용자로부터 입력받아 LDV의 레이저 광선과 LADAR의 레이저 펄스의 스캔 경로가 목표 지점에서 교차하도록 한다. 실시간 데이터 취득 및 처리 모듈(Real-time data collection and compensation module, CCM)은 두 센서에 계측 시작 및 종료 명령을 동시에 전송하고, 데이터를 취득한 뒤, 이후 소프트웨어에서 신호처리에 직접 이용될 수 있도록 데이터를 이진(binary) 형태로 변환한다.

MSM은 LADAR의 레이저 펄스와 LDV의 레이저 광선의 방향을 제어하여 두 센서가 같은 목표지점에 주사할 수 있게끔 한다. LADAR에서 주사되는 레이저 펄스는 눈으로 식별되지 않으므로, LADAR의 상대적 위치와 동체의 수직 회전각에 대한 정보를 사용자에게 입력받아야 한다. MSM은 사용자 입력값을 사용하여 LADAR 동체의 수평 회전각을 계산하고, LDV가 조준하고 있는 목표지점이 스캔되는 레이저 펄스 수직 주사각을 계산한다. 레이저 펄스의 방향을 제어하기 위해, MSM은 LADAR 센서의 자체 라이브러리 함수를 이용해 LADAR의 통신포트를 설정하고 회전각을 계산한다.

LADAR를 LDV의 서버에 통합하려면 데이터 포트와 전송 데이터형을 알맞게 지정해야 한다. 선정된 LADAR 센서는 2개의 LAN 인터페이스와 1개의 WLAN 인터페이스를 제공하는데, 이 인터페이스는 TCP/IP 포트 20001, 20002번, 텔넷 포트 23번을 이용할 수 있다. 본 통합 시스템

에서는 TCP/IP 포트 20002번을 이용하는데, 이 포트는 LADAR의 지원되는 프로그래밍 라이브러리를 통해 내부 프로퍼티(property)와 명령어에 접근할 수 있도록 설계되었다. TCP/IP 포트를 통해 센서의 기능 대부분을 설정하고 제어할 수 있으므로, 이 모듈은 라이브러리의 명령어를 활용해 이를 수행하고 프로그램에 그 결과를 전송한다. LADAR로 전송되는 명령어는 ASCII 형식이며, LADAR는 명령을 처리 후 값, 작동 결과 등을 다시 ASCII 형식으로 반환한다. LAN 인터페이스의 IP 주소는 세가지 방식으로 할당된다. 모두 사용자가 지정할 수 있으나, 같은 LAN 망내에서 실행되는 DHCP(dynamic host configuration protocol) 서버에서 자동으로 설정할 수 있고, DHCP 서버 기능을 하는 다른 LADAR 장비에서 설정될 수도 있다. 본 시스템에서는 IP 주소, 서브넷 마스크와 게이트웨이는 모듈을 통해 고정된 값으로 자동 설정된다.

LDV의 하드웨어 설정은 MSM에서 자동으로 조정된다. 그림 10에서와 같이, 모듈이 전송하는 명령은 RS232 포트를 통해 OFV-5000 진동계 제어기로 전달되며, 다시 광케이블을 통해 PSV-I-400 스캐닝 헤드로 전달되어 스캐닝 헤드의 거울 각도를 조정하게 된다. 또 목표지점의 비디오 이미지는 스캐닝 헤드에 장착된 카메라를 통해 얻어져 S-VIDEO 인터페이스를 통해 서버의 소프트웨어에 전달된다. LDV의 레이저 광선은 눈으로 식별 가능하므로 LADAR에 비해 목표지점 설정이 용이하나, 반사된 광선의 세기가 계측 품질에 많은 영향을 미치므로 목표지점 표면에 정확히 초점이 맞도록 해야 한다. 사용자가 레이저 광선의 초점 자동설정을 선택하면, LDV 내부 명령어인 StartFocus 명령어가 실행되어 초점을 맞추게 되며, GetEvalFocus 명령을 통해 반사된 광선의 신호 세기가 최대치가 되는 초점 위치를 획득하게 된다. 이 명령어 집합은 폴리텍(Polytec)사의 File Access Object Model에 포함되는데, 이 모델은 표준 컴포넌트 객체 모델(Component Object Model, COM)의 형식으로 작성된 객체의 컬렉션으로, 여러 프로그래밍 언어에 이식될 수 있다.

CCM은 포트 데이터 전송 자료형을 결정하고, 이를 통해 데이터 전송 포트를 확보한 뒤, 계측 시작/종료 명령을 두 센서에 동시 전송하고, 데이터를 수집해 이진 형태로 바꿔 소프트웨어에서 직접 사용될 수 있게끔 한다.

LADAR의 데이터 전송에는 TCP/IP 포트 20001번이 사용되는데, 연결된 스트림의 유형에 따라 계측 데이터가 전송되기도 하고, 시스템 관리 데이터가 전송되기도 한다. 데이터 포트는 RIEGL Data Transfer Protocol(RDTP)을 이용해 서버와 통신하는데, RDTP는 TCP 기반 프로토콜로, 서버는 이 프로토콜을 이용해 연결을 초기화하고 필요한 명령을 센서로 전달한다. 명령어는 개행문자(new-line character)로 끝나는 ASCII 문자열이며, LADAR는 서버에 다시 이진 데이터나 ASCII 데이터 블록을 반환함으로써 서버에 응답한다. 적절한 RDTP 요청 옵션을 이용하면 센서가 생성하는 데이터 스트림에 실시간으로 연결할 수 있다. 예를 들어 현재 데이터 스트림을 ASCII 형식으로 읽어들이려면 CURRENT type=measurement; format=ascii, encoding=chunked;라는 명령어를 쓰면 된다. 데이터는 지속적으로 전송될 수도 있고, 일련의 데이터 집합의 형태로 간헐적으로 전송하는 것도 가능하다. 그러나 지속적으로 데이터를 인코딩할 경우 센서는 다른 명령을 받거나 상태 메시지를 전송하는 것이 불가능하므로, 서버 측에서 데이터 전송상태나 연결 종료 등에 관한 정보를 얻어올 수 없다는 단점이 있다.

나. 소프트웨어 구현

앞 절에서 언급한 하드웨어 제어기법을 토대로 두 센서를 동시에 조작하여 데이터를 전송받아 이를 융합하는 배치 형태의 소프트웨어가 개발되었다. 본 소프트웨어는 본래 그래픽 유저 인터페이스를 기반으로 개발하려 하였으나, LDV의 경우 Visual Basic, LADAR의 경우 C++를 기반으로 개발되어야 할 뿐 아니라, 스무딩 기반 바이어스 직접 산정법과 이단계 칼만필터 기법의 경우 MATLAB으로 코딩돼있어, 연구기간 내 그래픽 인터페이스의 적용이 일정상 어려웠다. 따라서 연구진은 사용자 명령어 형태로 프로그램을 실행하면서, 명령행 내에서 센서 거리 정보를 인자(argument) 형태로 입력하고, 이를 바탕으로 변위를 산정하여 사용자에게 아스키 파일 형태로 제공한다. 소프트웨어의 전체 구조는 그림 16과 같으며, 핵심 모듈의 소프트웨어 코드는 부록에 수록하였다.

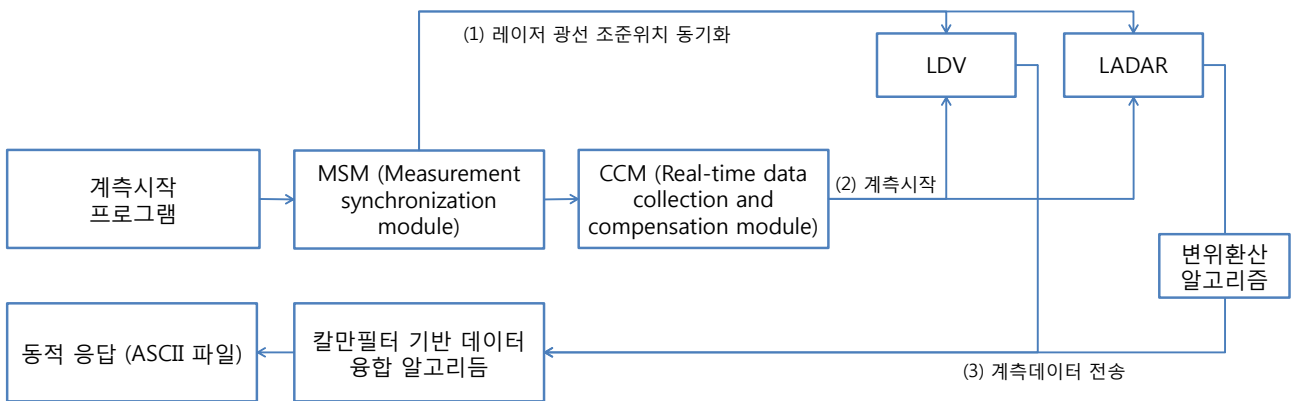


그림 16. 개발 소프트웨어의 실행흐름도

제4절 개발 시스템의 적용

가. 실내실험

본 연구에서 제안된 동적변위 산정기법을 검증하기 위해 일련의 실내 실험이 수행되었다. 그림 17에서와 같이, 동적변위 측정대상 구조물로서 강철로 제작된 외팔보가 선정되었다. 구조물의 밀도는 $7,850 \text{ kg/m}^3$ 이며, 탄성계수는 210 GPa 이다. 외팔보의 크기는 높이 1 m , 폭 10 cm , 두께 6 mm 이고, 1차 고유진동수는 5.12 Hz 로 분석되었다. 본 실험에 사용된 LDV는 Polytec PSV-400 시스템으로, 본 실험에서는 1280 Hz 의 샘플링 주파수로 면외(out-of-plane) 변위와 속도를 측정한다. LDV는 외팔보와 1.5 m 의 거리를 두고 설치되었으며, 외팔보의 최상단을 측정한다. 이때 LDV의 레이저 광선의 입사각은 수평 90° , 수직 68.5° 로 설정됐다. LADAR 장비로는 RIEGL VZ-400 3차원 스캐너가 선정됐는데, 그 이유는 이 장비가 라인스캔 모드를 지원하여 동체의 회전을 구축한 채로 거울의 회전만으로 외팔보의 전 영역을 선 형태로 스캔할 수 있기 때문이다. 거울의 회전속도는 최대로 설정됐으며, 이때 샘플링 주파수는 120 Hz 이다. LADAR는 LDV와 1 m 의 거리를 두고 설치됐고, LADAR에서 주사되는 레이저 펄스의 입사각은 외팔보, LDV, LADAR의 거리 정보를 입력하면 시스템에서 자동으로 계산된다. 또한 제안된 시스템으로 산정한 변위의 정확도를 평가하기 위해 Optex FA CD4-350 레이저 변위계가

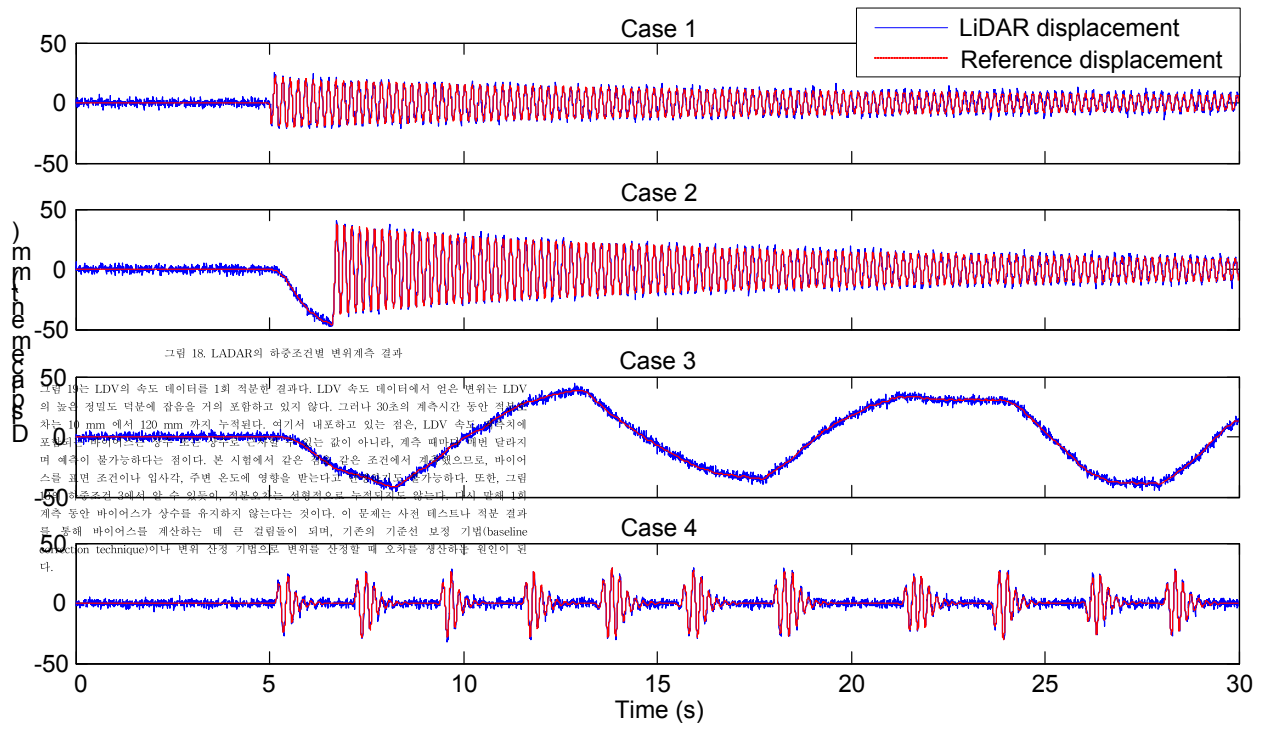
외팔보 후면 30 cm 거리를 두고 설치됐다. 레이저 변위계는 외부 진동을 차단하기 위해 외팔보의 지지점과 떨어진 또다른 지지대에 거치됐다. 레이저 변위계의 샘플링 주파수는 LDV와 같은 1,280 Hz 이다.

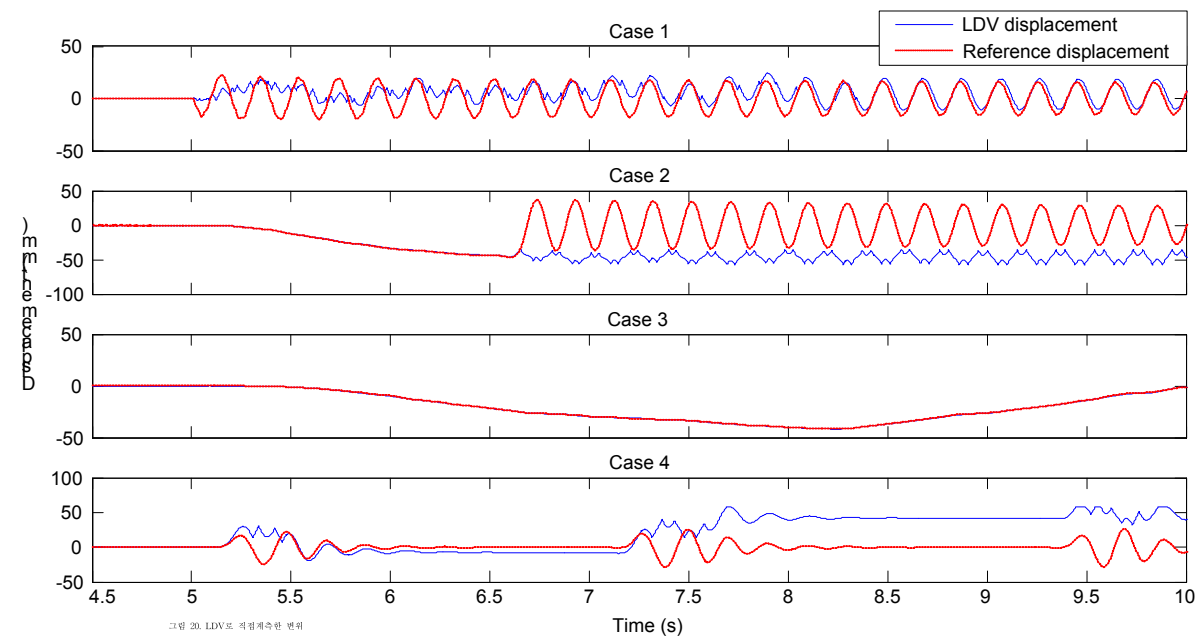
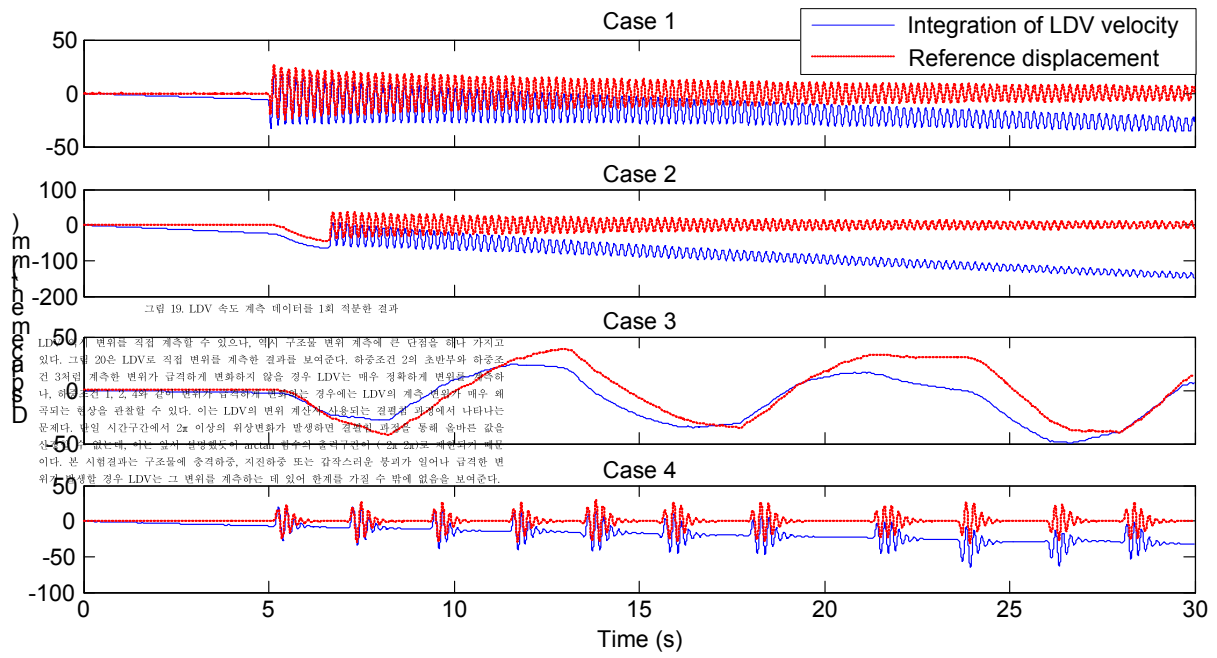


그림 17. 실내실험 개요

본 실험에서는 외팔보가 네 가지의 하중조건으로 가졌다. 첫째 하중조건은 충격하중으로, PCB Piezotronics 08C03 임팩트 해머를 이용해 가졌다. 이 하중조건 시험의 목적은 LDV로 측정한 변위의 한계를 규명하고, 제안 시스템이 이를 극복할 수 있는지 확인하고자 함이다. 두 번째 하중조건은 외팔보의 자유단부를 당겼다 놓는 자유진동 실험이다. 이 실험은 단부를 잡아 당길 때 생기는 의사정적(pseudo-static) 변위와 동적변위 측에서의 정확도를 동시에 평가할 수 있다. 셋째 하중조건은 외팔보를 서서히 밀었다 당겼다 반복함으로써 의사정적 변위를 일으키는 시험이며, 넷째 하중조건은 감쇄비가 높은 구조물의 진동패턴을 모사코자 외팔보에 추가 진동저감 장치를 부착하고 간헐적으로 충격하중을 주었다.

그림 18은 LADAR의 변위계측치를 보여준다. LADAR로 측정한 변위 데이터에 잡음감소 기법을 적용하였음에도 불구하고, 기존 변위센서인 레이저 변위계보다 더 많은 수준의 잡음이 여전히 섞여 있음을 알 수 있다. 이는 LADAR가 밀리미터 수준의 진동을 계측하는데 있어 그 적용성이 상당히 떨어짐을 극단적으로 보여준다. 그러나 전체적인 계측 데이터는 잡음을 제거하면 레이저 변위계와 상당히 합치하는데, 이는 변위를 직접 계측하면서 적분의 필요성이 없는 까닭이다.





제안한 상태공간 모델의 효용성을 입증하기 위해, 기존 모델과의 비교 평가를 실시하였다. 그림 21과 같이 Smyth와 Woo가 제안한 상태공간 모델은 변위를 정확히 산정하지 못하고 있으나, 본 연구에서 제안한 두 기법은 같은 조건에서 변위를 정확히 산정하고 있다. 제안기법의 상태공간 모델은 상태벡터에 바이어스를 직접 포함하고 있기 때문에, LADAR 계측치의 높은 잡음수준에 의해 칼만이득이 교란되더라도, 바이어스를 예측해 이를 변위산정에 반영함으로써 기존 기법보다 훨씬 정확한 변위산정이 가능하다. 그 결과 그림 22에서와 같이, 모든 하중조건에서 제안기법은 정확한 변위산정이 가능하다. 특히 Smyth와 Woo가 제안한 기법과 비교할 때, 이단계 칼만필터를 이용한 변위산정 기법은 잡음이 심할 경우 최대 93 %의 RMS 오차를 줄일 수 있는 것으로 계산되었다.

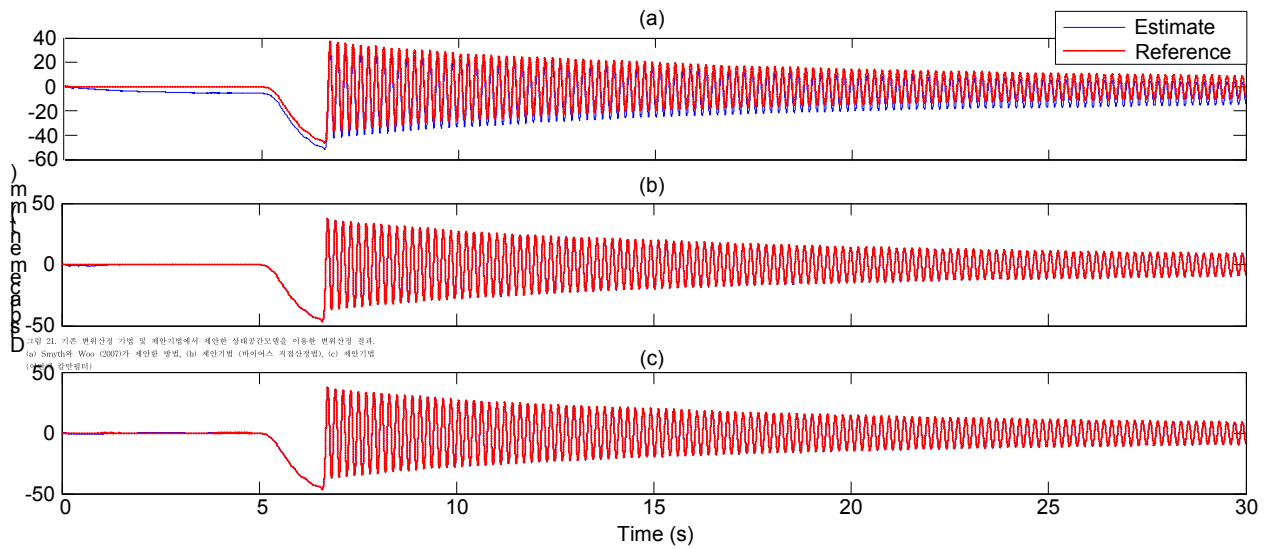


그림 21. 기존 변위산정 기법 및 제안기법에서 제안한 상태공간모델을 이용한 변위산정 결과.
(a) Smyth와 Woo (2007)가 제안한 방법, (b) 제안기법 (바이어스 직접산정법), (c) 제안기법 (칼만필터)

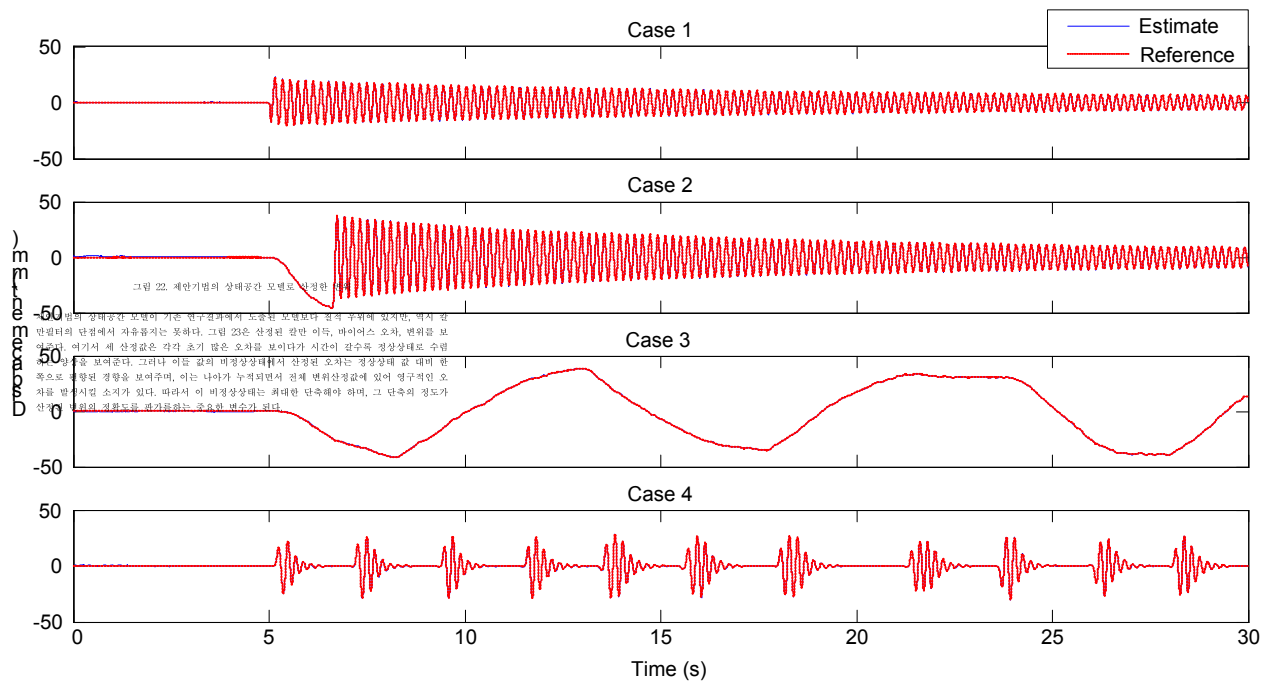


Figure 22. Estimated state-space model using the estimated (a) position, (b) velocity, and (c) acceleration.

Figure 23. Estimated state-space model using the estimated (a) position, (b) velocity, and (c) acceleration.

Figure 24. Estimated state-space model using the estimated (a) position, (b) velocity, and (c) acceleration.

그림 23. 제단된 상태공간 모델을 이용해 산정된 (a) 위치, (b) 속도, (c) 가속도를 0 - 5s 구간에서 획득한 그래프.

또 다른 단점으로는, 짧은에 포함된 LADAR 계측값 하나하나가 칼만필터를 통해 산정된 변위 에 매우 큰 영향을 미친다는 것이다. 그림 24에서, LADAR 계측치에 포함된 잡음의 정도가 산

정된 변위의 값 하나하나에 많은 영향을 미친다는 점을 확인할 수 있다. 특히 20.6 초경 일방으로 크게 치우친 잡음의 값 때문에 산정된 변위가 급격히 변화하는 것이 관찰되나, 이 지점에서 실제 변위는 0으로, 단순히 이 변화는 잡음의 영향이라는 것이 자명하다.

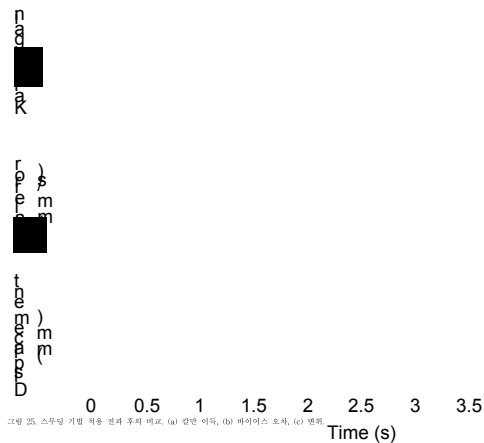
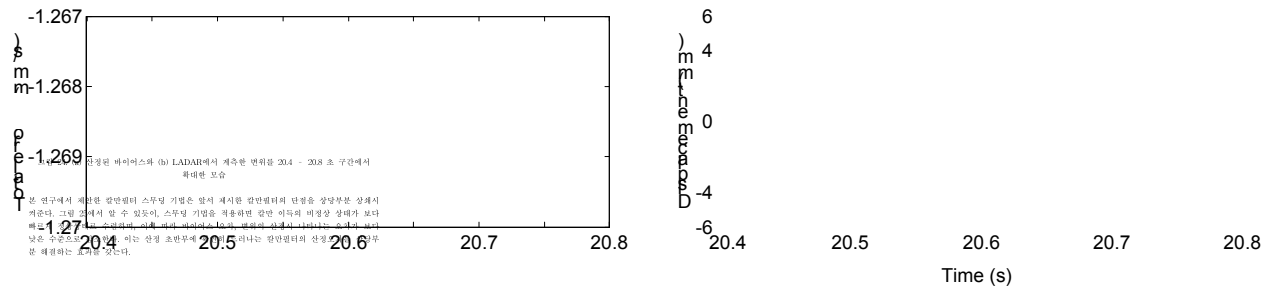


그림 25. 스루잉 기법 적용 전과 후의 비교. (a) 일반 이득, (b) 바이어스 보정, (c) 변위.

또한 그림 26에서 나타난 LADAR 변위 측정치의 잡음에 의한 변위산정값의 부정확성을 개선하는 데에도 스루잉 기법은 큰 효과를 보인다. 그림 26에서 확인할 수 있듯이, LADAR 측정값의 잡음에 많은 영향을 받은 변위 산정값이 잡음에 대한 민감도를 상당 수준 낮춤으로써 보다 실제 값에 근접하게 산정된다. 따라서 전체 측정값의 정확도를 스루잉 전 상태보다 획기적으로 개선하는 효과를 보인다. 결론적으로 일반 일차 스루잉 기법의 적용은, 앞서 기술한 산정 오류와 노이즈의 개선과 함께 변위 산정 결과의 산정 기법의 최대 단점을 한 번에 개선할 수 있다.

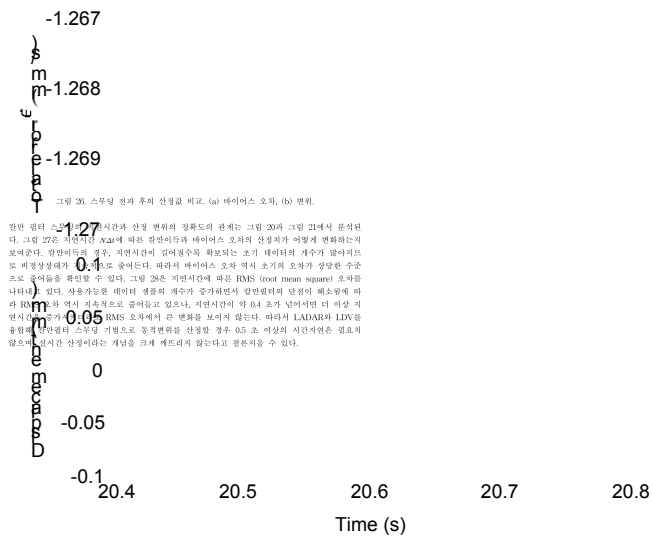
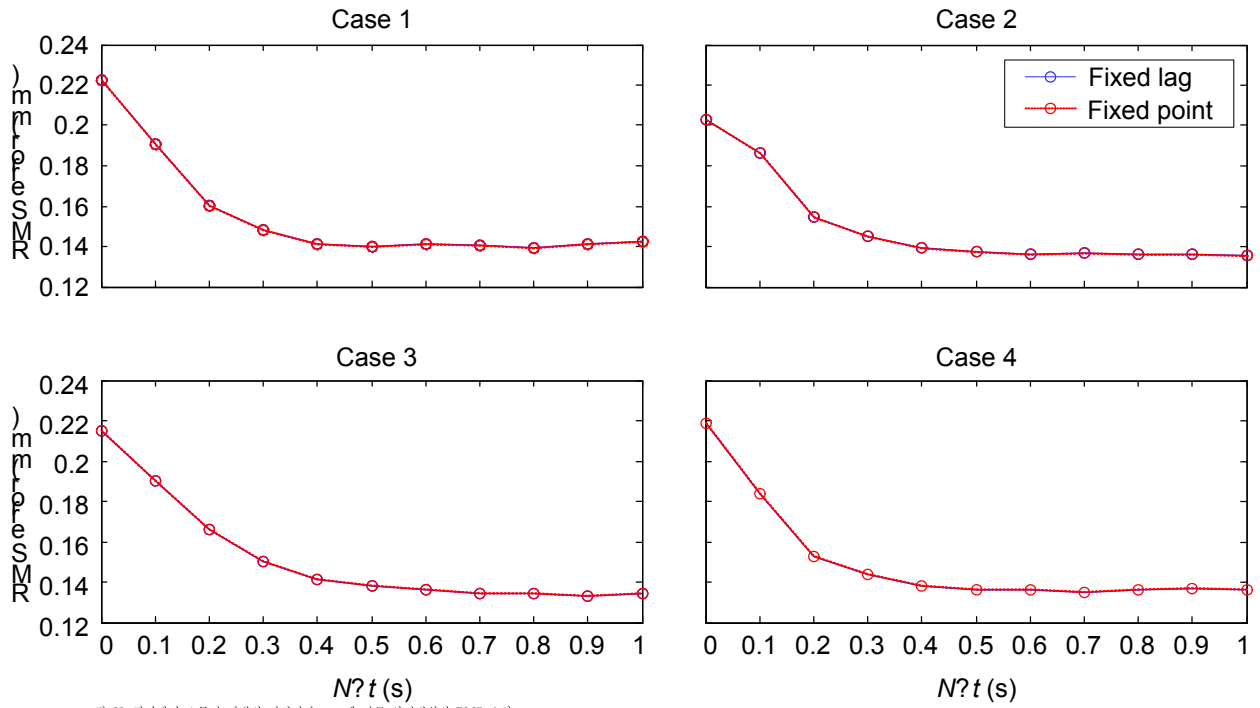
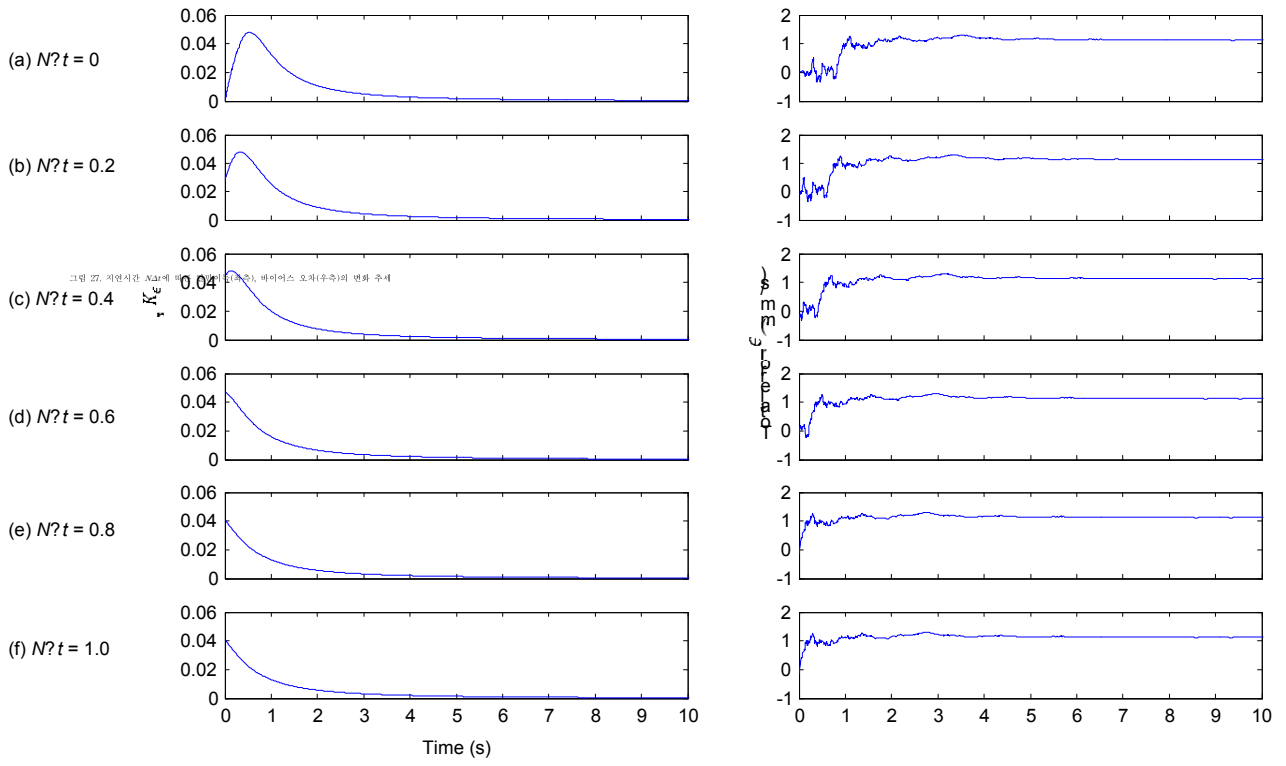
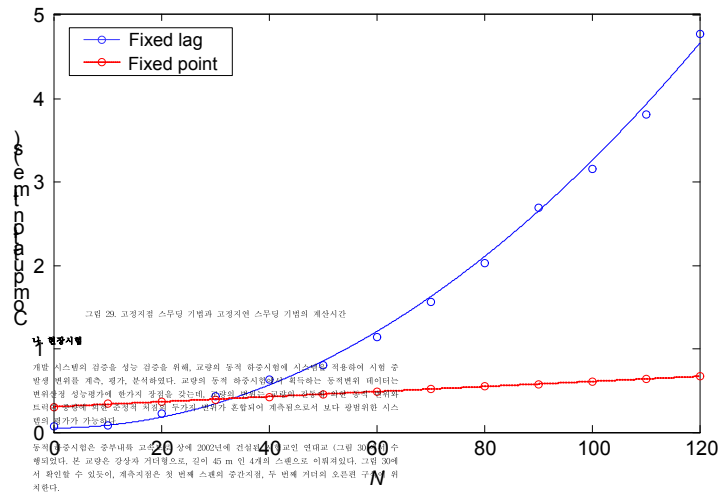


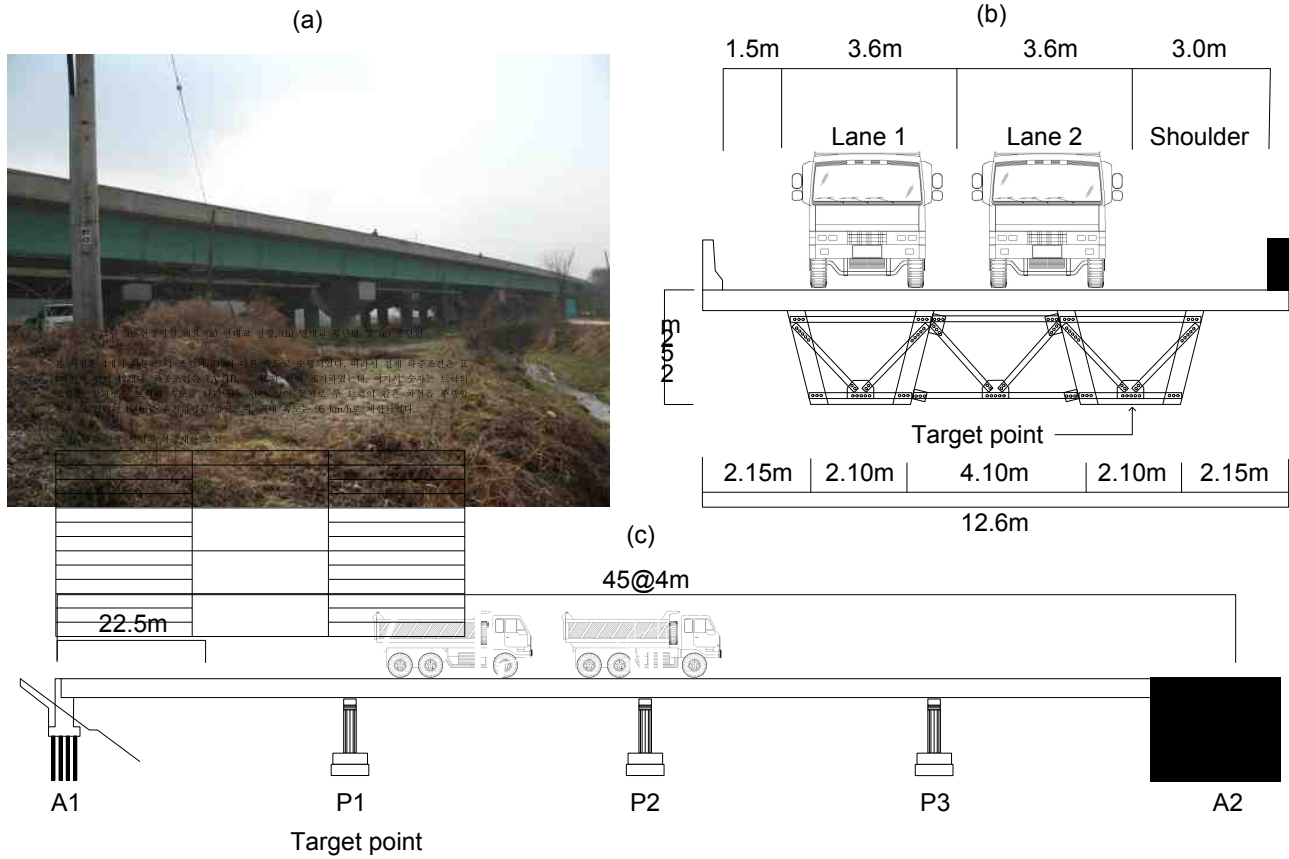
Figure 26. Sensor data and LIDAR data comparison. (a) Difference between sensor data and LIDAR data. (b) Difference between sensor data and LIDAR data. (c) Difference between sensor data and LIDAR data.



본 실험 데이터의 분석결과, 칼만 필터 스무딩 기법으로 고려한 고정지연 스무딩 기법과 고정지점 스무딩 기법 간 산정결과와 정확도는 전혀 차이가 없었다. 비록 상태공간 모델은 다르나 스무딩 기법의 기본원리가 같기 때문이다. 그러나 두 기법 간의 계산시간에는 상당한 차이가 보였다. 그림 29는 두 스무딩 기법의 계산에 걸리는 시간을 지연시간 $N\Delta t$ 에 따라 도식화한 것이다. 고정지연 스무딩 기법의 경우, 지연시간에 비례해 상태공간모델을 구성하는 행렬의 크기가

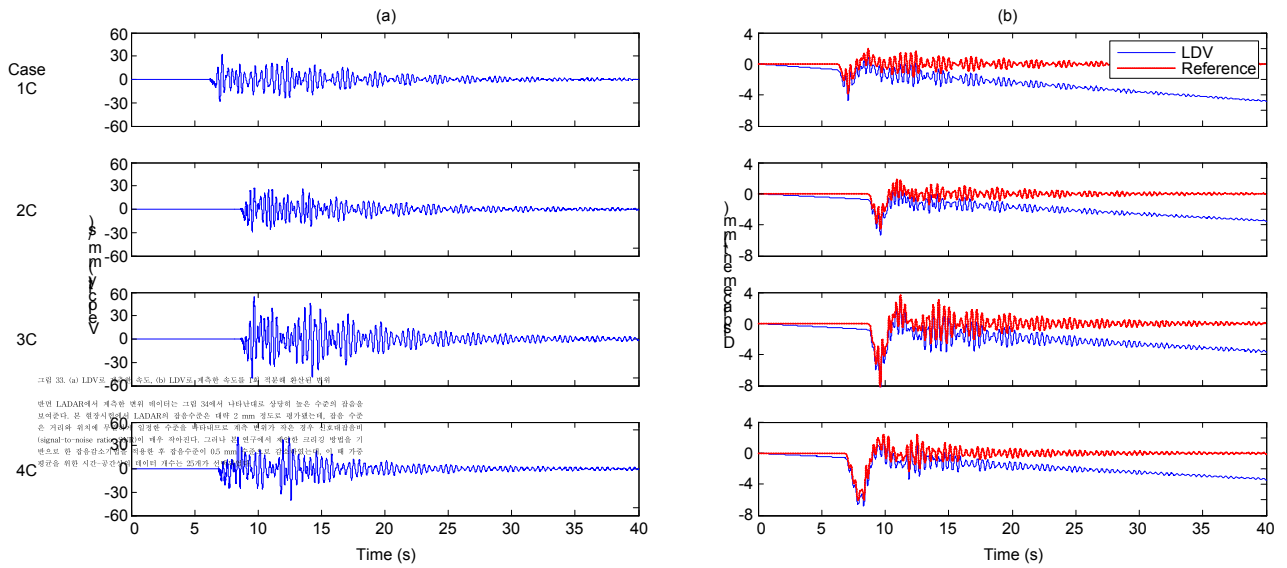
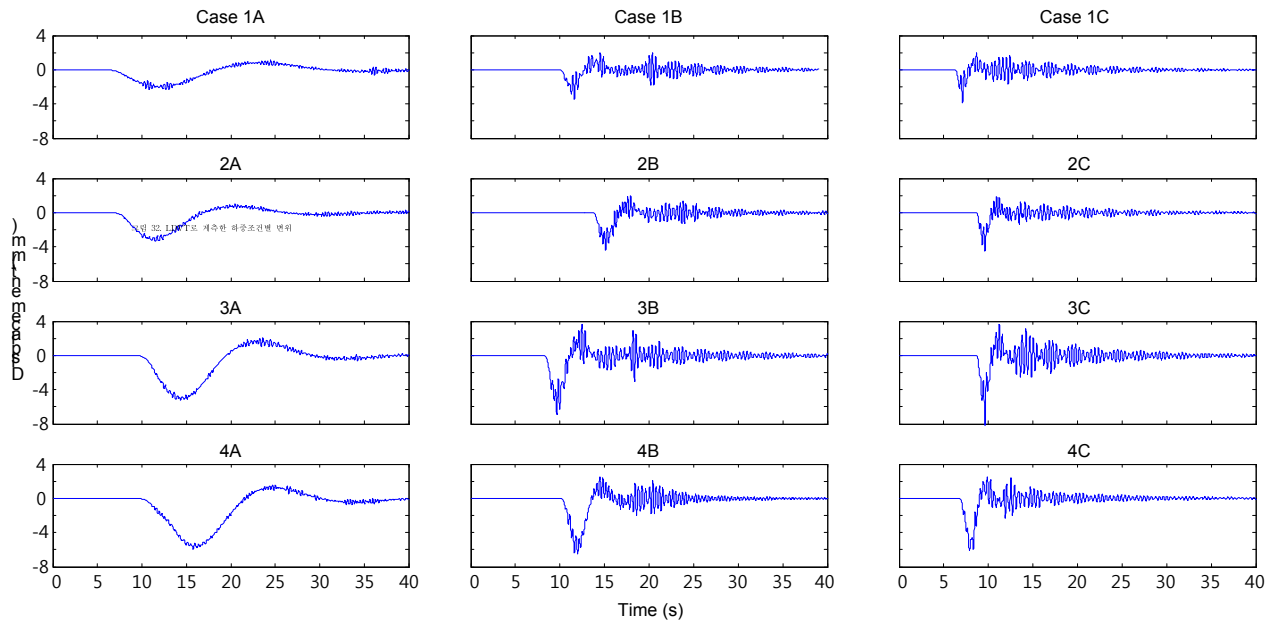
커지므로 계산시간이 지연시간구간 개수의 제곱에 비례하는 반면, 고정지점 스무딩의 경우에는 반복과정의 수가 커지므로 계산시간이 지연시간구간 개수에 비례한다. 따라서 그림에서 확인할 수 있듯이, 지연시간구간의 개수 N 이 32 이하인 경우 고정지연 스무딩 기법이 컴퓨터 실행 시간 측면에서 유리하며, 그 외의 경우에는 고정지점 스무딩 기법이 유리하다. 또한 사용자의 컴퓨터 환경 역시 기법의 선택에 영향을 미치는데, 임베디드나 모바일과 같이 메모리 용량이 충분히 확보되지 않은 컴퓨팅 환경에서 LADAR의 잡음수준이 높은 경우에는 고정지점 스무딩 기법이 더 유리하지만, LADAR의 하드웨어 성능이 뛰어나거나, 잡음 수준을 크게 낮추고 큰 행렬 연산이 가능한 고성능 컴퓨팅 환경에서는 고정지연 스무딩 기법이 더 나은 선택이다.

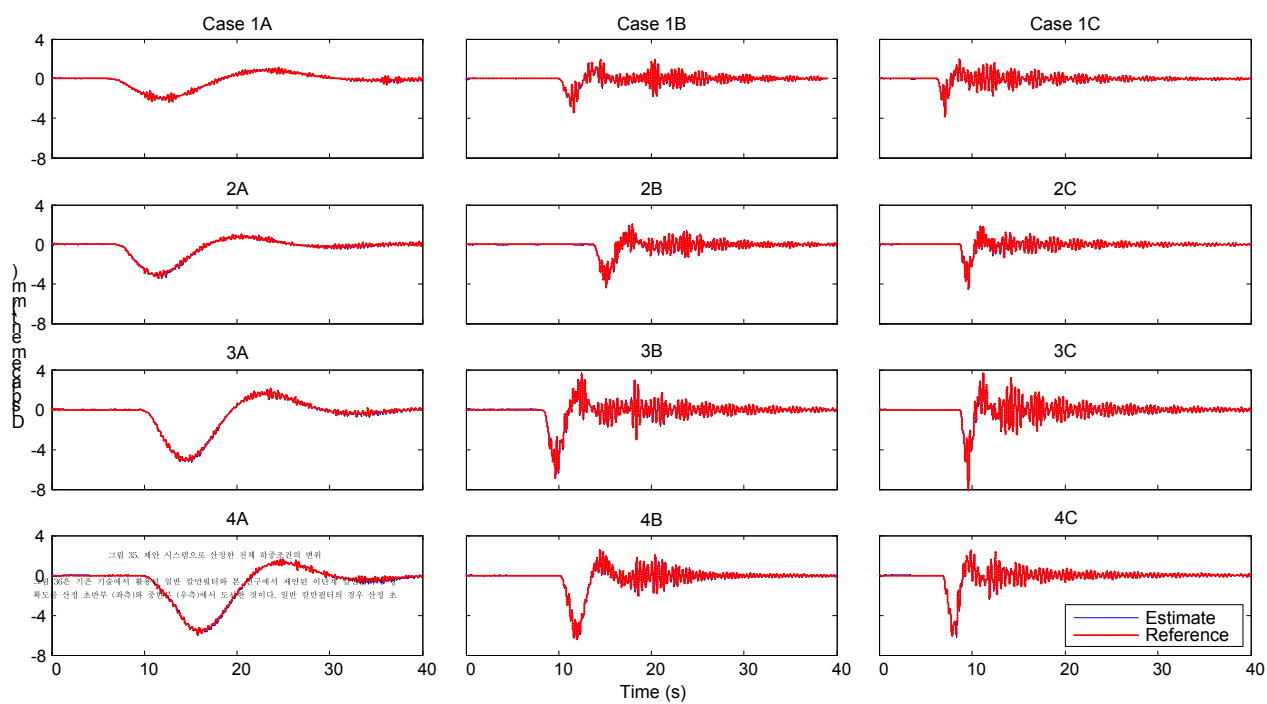
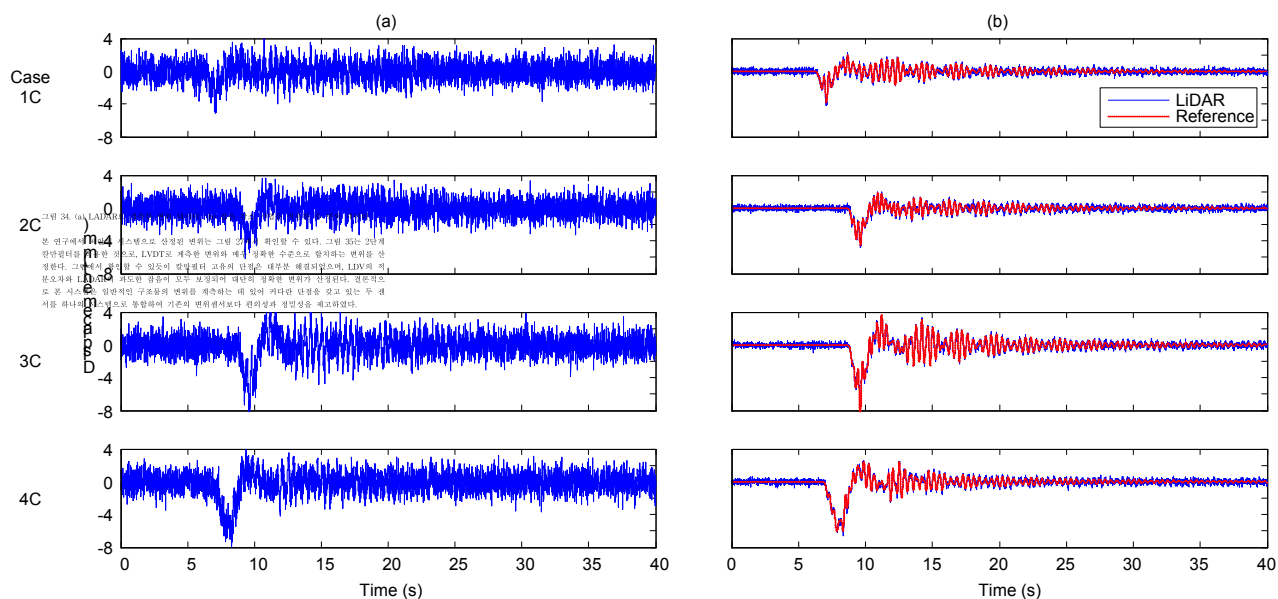




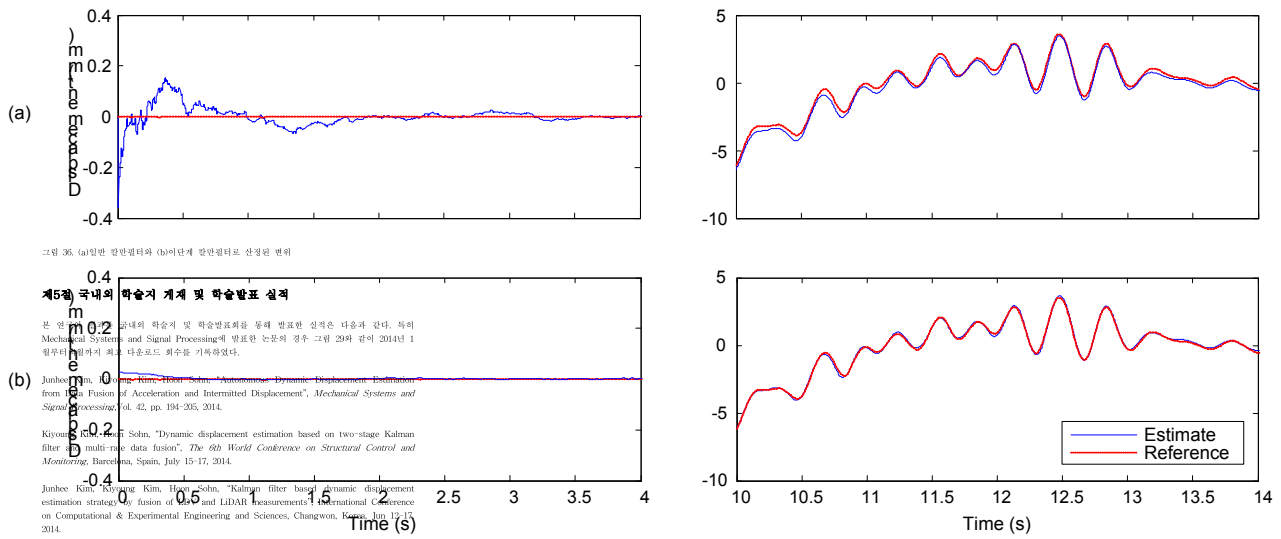
제안된 동적변위 시스템은 그림 31(a)와 같이 계측 지점의 수직 변위와 속도를 계측하였다. LDV와 LADAR는 교량 테크 아래 설치됐으며, 테크의 하면을 60°의 입사각으로 계측한다. LDV 레이저 광선과 테크 표면의 수평각도는 90°로 설정됐고, LDV와 LADAR 간의 거리는 60 cm이다. 사전 시험을 통해 LADAR의 거울과 계측지점 간의 거리는 3.74m로 계측되었다. 또한 제안된 시스템에서 산정한 변위를 비교 검증하기 위해 계측지점에 LVDT (linear variable differential transformer)가 그림 31(b)와 같이 설치되었다. LDV의 샘플링 주파수는 1280 Hz, LADAR는 120 Hz로 설정됐고, LVDT는 100 Hz의 샘플링 주파수로 변위를 계측한다.







반부에서 상당한 크기의 오차를 보였으나, 본 연구의 이단계 칼만필터에서는 오차가 매우 감소 하였으며, LADAR의 잡음에 의한 중반부의 오차 역시 눈에 띄는 수준으로 감소했다.



Junhee Kim, Kiyoun Kim, Hoon Sohn, “Dynamic displacement estimation system by LDV-LiDAR integration and Kalman filter based multi-rate data fusion”, *9th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology*, Ulsan, Korea, July 18–21.

Kiyoun Kim, Junhee Kim, Hoon Sohn, “Kalman filter based data fusion for dynamic displacement estimation using LDV and LiDAR”, *World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics*, Jeju, Korea, September 8–12.

Junhee Kim, Kiyoun Kim, Hoon Sohn, “A new formulation of multi-rate Kalman filtering for heterogenous acceleration and displacement data fusion”, *2nd International Conference on Computational Design in Engineering*, Jeju, Korea, November 13–16, 2012.

The screenshot displays the Elsevier website interface. At the top, there is a search bar and navigation links. The main content area is titled "Most Downloaded Mechanical Systems and Signal Processing Articles". It lists three articles with their titles, dates, authors, and brief descriptions. The first article is "Autonomous dynamic displacement estimation from data fusion of acceleration and intermittent displacement measurements" by Junhee Kim, Kiyoun Kim, and Hoon Sohn, published in January 2014. The second article is "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance" by Andrew K.S. Jardine, Daming Lin, and Dragan Banjevic, published in October 2006. The third article is "Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications" by Jay Lee, Fangji Wu, Wenyu Zhao, Masoud Ghaffari, Linxia Liao, and David Siegel, published in January 2014. The sidebar on the left contains links for "Mechanical Systems and Signal Processing", "Guide for Authors", "Submit Your Paper", "Track Your Paper", "Order Journal", "View Articles", "Open Access Options", "Recent Open Access Articles", and "Most Downloaded Articles".

그림 29. 최고 다운로드 회수를 기록한 본 연구실적을 게재한 논문

제4장 연구목표 달성 및 효과

제1절 연구개발 최종목표 달성도

연구목표	연구목표별 Activity	성과물 (산출물)	성과내용	달성도 (%)
LDV/LADAR 시스템 연속 스캐닝 기법 개발	대형구조물용 LDV 속도계측기법 개발	원거리 LDV	- 대형구조물의 변위를 LDV로 계측함에 있어 사용성을 검증하고 변위계측이 부적합함을 밝힘 - 대형구조물 속도계측용으로 적합한 LDV 기종을 조사 및 선정하고, 속도 계측데이터의 적분시 바이어스 오차가 임의적이고 비선형적임을 검증함	100
	LADAR 연속 스캐닝 기법 개발	스캐닝 LADAR	- LADAR의 라인스캔 모드를 활용하여 계측지점을 120Hz의 샘플링주파수로 반복 스캔하는 기법을 개발 - LADAR로 계측된 변위의 과도한 잡음을 효과적으로 소거하는 크리깅(Kriging) 기반 잡음소거기법을 개발	100
	LDV/LADAR 동시제어기법 개발	동기화된 LDV/LADAR	LDV와 LADAR의 레이저 광선 경로가 계측지점에서 교차할 수 있도록 센서 내부명령어 수준에서 광선 위치를 제어하는 계측동기화 모듈 (measurement synchronization module) 개발	100
	LDV/LADAR 동시계측기법 개발	일체화된 LDV/LADAR	LDV와 LADAR에 계측시작 및 종료 명령을 동시에 전송하고 데이터를 취득한 뒤, 소프트웨어에서 신호처리에 직접 이용될 수 있도록 데이터를 이진형태로 변환하는 실시간 데이터 취득 및 처리모듈 (real-time data collection and compensation module) 개발	100
이종 및 멀티샘플주파수 데이터의 융합을 위한 필터링 알고리즘 개발	기존 데이터 융합 연구사례 조사/분석		기존 데이터 융합 연구사례 조사를 통해 사례별 장단점 분석	100
	칼만 필터링 알고리즘 개발	데이터 융합	- 칼만필터 적용을 위한 새로운 상태공간 모델 개발 - 이종 데이터 융합을 통한 동적변위산정을 위한 칼만필터 알고리즘 제안	100
	계측지점 동적좌표 산정기법 개발	좌표 산정	GPS 연동시 동적좌표 산정 가능성을 검토하였으나 GPS의 정밀도 한계로 인해 활용가능성 없음을 확인	0
	다양한 응용 칼만 필터링/스무딩 기법 적용	고성능 융합기법	- 실시간 변위산정을 위한 고정지점 스무딩, 고정지연 스무딩 기법의 적용 - 이단계 칼만필터를 적용함으로써 스무딩의 단점을 보완	150
	데이터 융합 알고리즘 보완 수정		변위와 바이어스 오차를 동시 산정함으로써 외부 잡음에 대한 민감도를 낮추고 변위산정의 정확도를 제고	100
실시간 동적응답 획득을 위한 소프트웨어 구축 및 통합시스템 검증	유저 인터페이스 소프트웨어 제작	소프트웨어	센서 위치에 관한 사용자의 입력을 받고 개발된 모듈을 통해 계측을 실시하고 데이터를 취득한 뒤 변위를 자동산정하는 소프트웨어 개발	100
	시스템 검증 및 매뉴얼 작성	매뉴얼	현장적용 및 실내시험을 통한 시스템 검증	100
	현장적용	시작품	중부내륙 고속도로 시험교량 (연대교, 금당교) 현장적용	100

제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

개발된 기술은 기존 접촉식 유·무선 센서로 번거롭게 계측해야 했던 사회기반시설 구조물의 동적응답을 비접촉식으로 원거리에서 빠르고 정확하게 계측할 수 있는 획기적/실용적 기법으로, 거의 모든 부류의 사회기반시설의 시공중 계측이나 유지관리에 활용할 수 있다. 특히 기존에 활용됐거나 연구중인 기법보다 상대적으로 우월한 분야는 다음과 같다.

■ **시공중/유지관리용 교량 동적거동 계측** : 교량 시공중 RTK-GPS를 이용한 거동계측이 많이 연구되고 있으나, 이 기술은 접촉식이며, 계측의 정밀도가 최대 2cm로 정확성이 떨어지고, 샘플주파수가 대개 10Hz 수준에 불과해 상대적으로 고유주파수가 높은 중저간 교량에는 적용이 힘들다. 반면 제안기술은 비접촉식이며, 정밀도가 우수하고 샘플주파수가 높을 뿐 아니라 계측구조물의 동적좌표까지 획득가능하므로 RTK-GPS보다 모든 면에서 유리하다.

■ **터널 시공중 막장변위 계측** : 터널 시공은 사전설계가 불가능하므로 발파 또는 굴착시 암반의 연약층이나 파쇄대를 미리 예측하는 것이 매우 중요하다. 그러나 현재 3차원광파기 계측에서는 발파 후 버럭처리, 타겟핀 부착 때문에 일정 시간 후 계측을 실시하므로 초기변위를 계측할 수 없는 문제가 있다. 본 기술 적용시 타겟핀 부착이 필요 없이 곧바로 계측가능하므로 초기변위의 계측이 용이하며, 3차원광파기보다 정밀한 변위취득이 가능하다. 반면 현재 연구되는 RTK-GPS 기술은 원천적으로 터널적용이 불가하며, 비전기반 기술의 경우 매끄럽지 못한 발파면에 표적판을 부착해야 하므로 신뢰성있는 변위 취득이 불가능하다. 더욱이 면외변위 계측에 큰 약점을 보이며 발파시 비산되는 먼지 등으로 인해 정확한 계측에도 어려움이 있다.

■ **댐 유지관리용 변위계측** : 댐의 변위계측에는 RTK-GPS의 적용연구가 활발히 이뤄지고 있으나, 앞서 기술한 대로 RTK-GPS는 정확도가 떨어지므로 구조물의 의미있는 동적거동을 계측하기 힘들다. 또 비전기반 기술의 경우 대형 표적판의 필요성은 물론, 면외거동이 지배적인 댐의 특성상 적용이 불가능하다. 반면 제안기술은 정밀한 면외거동 계측이 가능하므로 상기기술보다 댐 유지관리에 적용이 용이하다.

■ **케이블 교량의 장력산정을 위한 동적응답 계측** : 교량 케이블의 경우 고유주파수를 산정하면 이를 장력으로 변환할 수 있다. RTK-GPS의 경우 정확도 문제로 고유주파수 산정이 어렵고, 비전 기반 변위측정기법은 표적판을, 가속도 측정기법은 가속도계를 부착해야 하므로 계측이 힘들다. 반면 제안기술은 비접촉식 센싱에 기반을 두므로 케이블 어느 위치에서도 정확한 동적응답을 계측할 수 있어 편의성과 정확성을 동시에 도모할 수 있다.

사회기반시설물 생애주기에 걸친 녹색화를 위해서는 사회기반시설물의 구조적 안전성 확보와 장수명화가 필수적이며, 실제로 교량, 터널 등 많은 구조물에 각종 센서가 설치되고 있다. 그러나 현재까지 이들 센서에서 나오는 수많은 데이터들은 서로 별개의 것으로 해석되고 있기 때문에 활용도가 많이 떨어지는 것이 자명한 사실이다.

본 제안과제의 핵심기술인 칼만필터를 통한 이중 데이터 융합은 근본적으로 여러 종류의 센서에서 계측한 데이터를 상호보완하여 보다 정밀한 데이터를 도출해내는 기술이므로, 구조물의

효율적인 녹색 시공/유지관리기술로 자리매김할 것이다. 더불어 항공우주, 자동차, 환경공학 등 여러 미래 산업기술에 적용될 수 있는 미래원천기술로, 신녹색기술과 신녹색산업 창출이 가능할 것이라 판단된다.

또 제안과제의 하드웨어를 구성하는 레이더 도플러 속도계와 지상 라이다 시스템은 비접촉식 레이저 스캐닝 계측장치로, 센서를 설치하거나 유선 장비를 설치/유지관리할 필요가 없어 환경이 열악한 건설현장이나 원자력발전소, 터널, 지하 에너지저장시설 등에도 적용이 용이하다. 따라서 설치와 유지관리에 비용절감을 기대할 수 있고, 무인자동 유지관리 시스템의 구축이 가능해 시설 가동률과 생산성 향상에 기여할 수 있다.

제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석

본 연구는 앞서 기술한 특성상 사회기반시설 뿐 아니라 여러 첨단분야에 광범위한 적용이 가능하므로, 기술적 측면에서 시장성이 높을 것으로 판단된다. 기술적 측면에서 타 기술 대비 개발기술이 갖는 장점은 다음과 같다.

- 원천기술 개발: 칼만필터를 이용, 이중 데이터를 융합함으로써 정밀한 동적응답을 산정하므로 건설분야 뿐 아니라 이중 데이터를 활용하는 모든 분야에 적용이 가능한 원천기술로 성장할 가능성이 높다.
- 광범위한 적용성: 사용성이 제한된 기존의 기술과는 달리 교량, 터널, 빌딩 등 동적응답 계측이 필요한 모든 사회기반시설 구조물에 적용이 가능하므로 상품화시 시장이 크게 확대되리라 전망된다.
- 동적응답 계측 자동화: 사용자의 계측위치 1회 설정만으로 계측 및 동적응답 산정이 자동으로 이뤄지므로 시공중 계측이나 유지관리 계측의 신뢰성과 편의성을 제고할 수 있다.

현재 해외에서도 사회기반시설 구조물의 속도, 변위의 계측에 모두 적용가능한 비접촉식 센서는 없으며, 현재 연구되고 있는 기술 역시 정밀도가 낮거나 용도가 광범위하지 않는 태생적 한계가 있다. 따라서 제안기술을 상용화할 경우 교량, 터널, 케이블 등 다양한 구조물 계측용으로 수출을 타진할 가능성이 충분하며, 나아가 해외업체가 주도하고 있는 레이저 센싱 부문에서 국가경쟁력을 한층 향상시킬 수 있다.

제4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

기반시설물의 붕괴 및 파손방지는 국가경쟁력 강화 및 국민편익 증대와 직결된다. 현재의 유지관리체계인 상시육안조사 및 비상시 정밀검사/진단에는 검사인력과 검사비용에 많은 예산이 투입돼야 하며, 이로 인해 대부분 노후화가 심각한 구조물에 보수·보강이 집중되고 있다. 제안기술은 효율적인 교량 건전성 평가기술을 바탕으로 구조물의 손상을 조속히 감지하여 적은 비용으로 보수·보강하는 유지관리 체계 확립에 지대한 역할을 할 것으로 기대된다.

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

제1절 연구성과 향후 활용방안

본 연구에서 개발한 레이저 장비를 융합한 계측시스템은 실용화나 제품화가 이뤄질 경우 계측 분야 시장에 지대한 영향을 미칠 것으로 예상되므로, 과제종료 직후 시장수요조사 및 시장성장 가능성 검토를 거쳐 실용화를 적극 추진할 예정이다.

기술실시를 위해 본 연구진은 현재 개발기술을 적용함으로써 시공 및 설계, 유지관리 또는 기존기술의 획기적 개선이나 부가 신기술 창출이 될 수 있는 적용처를 적극 모색하고 있다. 본 과제에서 개발된 기술은 비단 LDV와 LADAR 뿐 아니라 가속도계, GPS 등 여러 센서에도 공통으로 적용할 수 있다는 점에 착안, 국내외 센서제작 업체와 다각도의 협력을 모색하고 있다. 일례로 본 연구진은 현재 교량 및 건축물에 가장 많이 매립되어 있는 가속도계로 변위를 추산 하기가 사실상 불가능하다는 점을 해결하고자, 가속도계에서 얻은 가속도계 데이터와 LDV, LADAR 또는 GPS에서 얻은 불완전한 변위데이터를 융합하여 고품질의 변위 데이터를 산정하고자 하는 연구를 진행 중이다.

본 연구과제에서 개발한 기술과 시스템은 이와 같이 여러 센서에 그대로 적용이 가능하다. 따라서 연구진은 본 과제에서 얻은 산출물을 예와 같이 광범위하게 확장하여 사업화 가능성을 넓히고, 나아가 실용화 가능성이 충분하고 업계의 호응을 이끌어 낼 수 있는 센서 조합을 선정, 신기술 신청 및 판매루트 확보를 적극 모색할 것이다.

또한 연구진은 본 기술을 기존의 적응필터(adaptive filter)와 같은 고급 잡음감소기법에 적용하여 보다 고품질의 결과를 산출할 수 있음을 확인하였으며, 칼만필터보다 용도의 구애를 받지 않는 H-infinity 필터를 활용하여 본 기술의 정확도 및 활용도를 개선하는 연구 역시 진행 중이다. 나아가 본 기술을 장대교량 케이블 장력측정, 유한요소 모델 업데이트 등 기타 기술에 접목함으로써 노후 구조물의 손상탐지 및 안전관리 분야에도 적용할 수 있는 방안을 적극적으로 타진할 계획이다.

제2절 향후 연구방향

본 연구의 상용화를 위해 연구진은 다음과 같은 추후 연구방향을 수립, 추진하고 있다.

▷ 하드웨어 일체화: 본 연구의 실용화를 위해서는 LDV와 LADAR의 일체화가 요구되므로, 국내에서 유일하게 LDV를 상용화한 Em4Sys와 협력 하에 기술이전을 적극 활용하여 본 연구에서 개발할 기술의 상용화/기업화를 추진하고 특허권을 활용한 로열티 창출을 도모할 계획이다.

▷ 다양한 조건에서의 검증연구 수행: 장대교량의 주탑 및 상판, 고층빌딩, 터널, 댐 등 다양한 분야에서 개발 시스템의 성능을 검증하고, 나아가 계측거리, 날씨, 광원여부, 계측표면 상태 등 다양한 환경 및 조건 하에서 검증연구를 수행함으로써 시스템의 신뢰도를 평가할 예정이다. 또 이 결과를 토대로 시스템을 보완, 개선하여 향후 상용화

▷ 성능에 대한 공인인증서 확보: 본 연구에서 개발한 시스템의 국내 공인 시험기관에 본 시스템의 성능 검증을 의뢰, 공인인증서를 확보할 계획이다. 하드웨어 일체화와 성능의 인증을 통해 실용화의 근거를 마련하고, 이를 토대로 상용화를 추진하여 최대한 신속한 시장진입을 도모할 것이다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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, 2012, Taipei, Taiwan.
- [3] G. Di Massa, R. Russo, S. Strano, M. Terzo, System structure identification and adaptive control of a seismic isolation test rig, Mechanical Systems and Signal Processing, 40(2013) 736-753.
- [4] J. Kim, K. Kim, H. Sohn, Data-driven physical parameter estimation for lumped mass structures from a single point actuation test, Journal of Sound and Vibration 332(2013) 4390-4402.
- [5] J. Kim, K. Kim, H. Sohn, In situ measurement of structural mass, stiffness, and damping using a reaction force actuator and a laser Doppler vibrometer, Smart Materials and Structures 22(2013) doi:10.1088/0964-1726/22/8/085004.
- [6] 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.
- [7] M.S. Grewal, L.R. Weill, A.P. Andrews, Global positioning systems, inertial navigation, and integration, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2007.
- [8] S.W. Kim, N.S. Kim, Multi-point Displacement Response Measurement of Civil Infrastructures using Digital Image Processing, Procedia Engineering 14 (2011) 195-203.
- [9] J.J. Lee, M. Shinozuka, A vision based system for remote sensing of bridge displacement, NDT&E International 39 (2006) 425-431.
- [10] J.W. Park, J.J. Lee, H.J. Jung, H. Myung, Vision-based displacement measurement method for high-rise building structures using partitioning approach, NDT&E International 43 (2010) 642-647.
- [11] D.M. Moore, Effect of baseline corrections ofn displacement and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America 91(2001), 1199-1211.
- [12] W.D. Iwan, M.A. Moser, C. Peng, Some observations on strong motion earthquake measurement using a digital accelerograph, Bulletin of the Seismological Society of America 75(1985) 1225-1246.
- [13] Y.K. Thong, M.S. Woolfson, J.A. Crowe, B.R. Hayes-Gill, D.A. Jones, Numerical double integration of acceleration measurement in noise, Measurement 36 (2004) 73-92.
- [14] Y.H. Hong, H. Kim, H.S. Lee, Reconstruction of dynamic displacement and velocity from measured accelerations using the variational statement of an inverse problem, Journal of Sound and Vibration 329(2010), 4980-5003.
- [15] J. Park, S. Sim, H. Jung, Displacement estimation using multimetric data fusion,

IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, doi: 10.1109/TMECH.2013.2275187 (2013).

[16] F. Moschas, S. Stiros, Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer, *Engineering structures*, 33 (2011) 10–17.

[17] W.S. Chan, Y.L. Xu, X.L. Ding, W.J. Dai, An integrated GPS–accelerometer data processing technique for structural deformation monitoring. *Journal of Geodesy*, 80 (2006) 705–719.

[18] 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.

[19] 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.

[20] M.K. Kim, H. Sohn, C.-C. Chang, Active dimensional quality assessment of precast concrete using 3D laser scanner, *ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering*, Los Angeles, CA, USA, 23–25 June, 2013.

[21] R.E. Kalman, A new approach to linear filtering and prediction problems, *Journal of Basic Engineering*, 82 (1960), 35–45.

[22] J.B. Moore, Discrete-time fixed-lag smoothing algorithms, *Automatica*, 9 (1973) 163–173.

[23] H.E. Rauch, Solutions to the linear smoothing problem, *IEEE Transactions of Automatic Control*, AC-8 (1963), 371–372.

[24] D. Haessig, B. Friedland (1998), Separate-bias estimation with reduced-order Kalman filters, *IEEE Transactions of Automatic Control*, 43 (7), 983–987.

[25] Alouani, A.T., Xia, P., Rice, T.R. & Blair, W.D. (1993), On the optimality of two-stage state estimation in the presence of random bias, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38(8), 1279–1282.

[26] M.B. Ignagni, (1981), An alternate derivation and extension of Friedland's two-stage Kalman estimator, *IEEE Transactions of Automatic Control*, 26(3), 746–750.

[27] 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.

[28] 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.

[29] R. Staiger, Terrestrial laser scanning–Technology, systems and applications, 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco, December 2–5, 2003.

[30] 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.

- [31] A. Abellan, J.M. Vilaplana, J. Martinez, Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de N?ria (Eastern Pyrenees, Spain), *Engineering Geology*, 88(2006) 136-148.
- [32] 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, 687-694.
- [33] G. Matheron, Principles of geostatistics, *Economic Geology*, 58 (1963) 1246-1266.
- [34] U. Desai, H. Weinert, G. Yusypchuk (1983), Discrete-time complementary models and smoothing algorithms, *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-28, 536-539.
- [35] D. C. Fraser (1967), A new technique for the optimal smoothing of data, Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- [36] D. Q. Mayne (1966), A solution of the smoothing problem for linear dynamic systems, *Automatica*, 4, 73-92.

부록 1. 소프트웨어 코드

A. LADAR 레이저 광선 조준위치 동기화 및 계측데이터 수집 모듈

```
//pointcloudcpp.exe
#include <include/riegl/scanlib.hpp>
#include <iostream>
#include <exception>
#include <cmath>
#include <limits>
#if defined(_MSC_VER)
#   include <memory>
#else
#   include <tr1/memory>
#endif
using namespace scanlib;
using namespace std;
using namespace std::tr1;
FILE *pfile = NULL;
class importer
    : public pointcloud
{
    ostream& o;
    unsigned long line;
public:
    importer(ostream& o_)
        : pointcloud(false)
        , o(o_)
        , line(0)
    {
        o.precision(10);
    }
protected:
    void on_echo_transformed(echo_type echo)
    {
        if ( pointcloud::first == echo || pointcloud::single == echo ) {
            target& t(targets[target_count-1]);
            double range = std::sqrt(
                t.vertex[0]*t.vertex[0]
                + t.vertex[1]*t.vertex[1]
                + t.vertex[2]*t.vertex[2]
            );
        }
    }
};
```

```

    );
    if (range > numeric_limits<double>::epsilon()) {
        double phi = atan2(t.vertex[1],t.vertex[0]);
        phi = ((phi<0.0)?(phi+2.0*pi):phi);
        double theta = std::acos(t.vertex[2]/range);
        t.vertex[0] = static_cast<float>(range);
        t.vertex[1] = static_cast<float>((360.0/(2.0*pi))*theta);
        t.vertex[2] = static_cast<float>((360.0/(2.0*pi))*phi);
    }
    else
        t.vertex[0] = t.vertex[1] = t.vertex[2] = 0.0;
        fprintf(pfile,"%f\t%f\t%f\t%f\n", t.vertex[0], t.vertex[1], t.vertex[2],
t.time);
    }
}

void on_unsolicited_message(const unsolicited_message<iterator_type>& arg) {
    pointcloud::on_unsolicited_message(arg);
    cerr << "MESSAGE: " << arg.message << endl;
}

void on_line_start_up(const line_start_up<iterator_type>& arg) {
    pointcloud::on_line_start_up(arg);
    o << "line: " << ++line << endl;
}

void on_line_start_dn(const line_start_dn<iterator_type>& arg) {
    pointcloud::on_line_start_dn(arg);
    o << "line: " << ++line << endl;
}

};

int main(int argc, char* argv[])
{
    try {
        if (argc == 2) {
            pfile = fopen("result2.txt", "wt");
            rc = basic_rconnection::create(argv[1]);
            rc->open();
            decoder_rxpmarker dec(rc);
            importer imp(cout);
            buffer buf;
            for ( dec.get(buf); !dec.eoi(); dec.get(buf) ) {
                imp.dispatch(buf.begin(), buf.end());
            }
            rc->close();

```

```

        return 0;
    }
    cerr << "Usage: " << argv[0] << "<input-uri>" << endl;
    return 1;
}
catch(exception& e) {
    cerr << e.what() << endl;
    return 1;
}
catch(...) {
    cerr << "unknown exception" << endl;
    return 1;
}
fclose(pfile);

return 0;
}

```

B. LDV 계측 시작 및 계측데이터 전송 모듈

Option Explicit

Const C_Directory = Environ("Temp")

Sub Main

```

Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim k As Integer
k = 0

Dim xvalue As Integer
Dim yvalue As Integer
Dim x_grid As Integer
Dim y_grid As Integer
Dim x_num As Integer
Dim y_num As Integer
    Dim sFile As String
Dim oNumberPoints As Long

x_grid=19
y_grid=35
oNumberPoints=x_grid*y_grid

```

```

For i = 1 To x_grid
  For j = 1 To y_grid
    k = k + 1

    Open "C:\control\point.txt" For Output As #2
    Write #2, i-1
    Write #2, j-1
    Close #2
    Wait(1)

    Open "C:\control\status.txt" For Output As #2
    Write #2, k
    Write #2, oNumberPoints
    Close #2

    ' Start scan
    Acquisition.ScanFileName = "C:\control\Scan.svd"
    Acquisition.Start(pteAcqStartSingle)

    ' Wait until scan finished
    While Acquisition.State <> pteAcqStateStopped
      Wait(0.1)
    Wend

    If Acquisition.Document.Windows.Count() < 1 Then
      Acquisition.Document.Windows.Add()
    End If

    Dim WndAnalyzer As AnalyzerWindow
    Set WndAnalyzer = Acquisition.Document.Windows(1)
    WndAnalyzer.AnalyzerView.Export("C:\control\result\" & (i) & "_" & (j) & ".txt",
pteFileFormatText)

    ' Set WndAnalyzer = Acquisition.Document.Windows(2)
    ' WndAnalyzer.AnalyzerView.Export("C:\control\result\CH2\" & (i) & "_" & (j) &
".txt", pteFileFormatText)

  Next j%

```

```

Next i%

Open "C:\control\status.txt" For Output As #2
Write #2, oNumberPoints+1
Write #2, oNumberPoints
Close #2

End Sub

```

C. 변위환산 알고리즘

```

function [disp, dispAvg, tTarget] = LADARdataProc(lddata, tTheta, numAvg)

t = lddata(:,4);
t = t - t(1);

dist = lddata(:,1);
theta = lddata(:,2);

figure();
subplot(2,1,1), plot(t,dist), title('DIST FROM MIRROR TO TARGET (m)');
subplot(2,1,2), plot(t, theta), title ('THETA(DEG)');

figure();
subplot(2,1,1), plot(t,dist.*sind(theta)), title('HORIZONTAL DIST TO TARGET (m)');
subplot(2,1,2), plot(t, theta), title ('THETA(DEG)');

disp = [];
dispAvg = [];
tTarget = [];

index = 1;
for i=1:length(t)-1
    if theta(i)<=tTheta && theta(i+1)>=tTheta
        disp(index) = dist(i);
        dispAvg(index) = mean(dist(i-numAvg:i+numAvg));
        tTarget(index) = t(i);
        index = index+1;
    end
end
end

```

```
length(displacement)
displacement = displacement - mean(displacement(1:100));
displacementAvg = displacementAvg - mean(displacementAvg(1:100));
```

D. 스무딩 기반 바이어스 직접 산정법

```
function [xhat Khat] = NewModelFixedLag(tV, vel, tD, displacement, L, dt, q, r)

xInit = [0 ; 0];
PInit = [1 0; 0 1];

A = [1 dt; 0 1];
B = [dt; 0];
Q = [dt^2 0; 0 0];
H = [1 0];
R = r%/dt;
K = 0;

xhat = xInit;
n = length(A); % order of the system

% Augmented model construction
Aaug = [A zeros(n, n*L); diag(ones(1, n*L)), zeros(n*L,n)];
Baug = [B; zeros(n*L,1)];
Qaug = [Q; zeros(n*L,n)];
Haug = [H zeros(1, n*L)];
xhat = zeros(n, length(vel)); % initialize the estimation array using the order and
length of the data
KL = zeros(1, length(vel));

x = [xInit; zeros(n*L,1)];
P = [PInit zeros(n, n*L); diag(ones(1, n*L)), zeros(n*L,n)];

updtIndex = 1;
for i=1:length(vel)-1

    x = Aaug*x + Baug*vel(i);
    P = Aaug*P*Aaug'+q*Qaug*Qaug';

    if updtIndex <= length(tD) && tV(i)<= tD(updtIndex) && tV(i+1) >= tD(updtIndex)
        K = P*Haug'*inv(Haug*P*Haug'+r);
        x = x + K*(displacement(updtIndex)-Haug*x);
```

```

        P = P-K*Haug*P;
        updtIndex = updtIndex+1;
    end

    xhat(:,i+1) = x(n*L+1:n*(L+1));
end

xhat = xhat(:,L+1:length(xhat));
tL = tV(1:length(xhat));

subplot(2,1,1), plot(tL, xhat(1,:)), title('Estimated Displ. ');
subplot(2,1,2), plot(tL, xhat(2,:)), title('Velocity bias error');

```

E. 이단계 칼만필터 기법

```

function [xSEstr xBFstr Vstr bBEstr] = TwoStgAccNew(tA, acc, disp, q, r, rate)

% x(k+1)=Ax(k)+Bb(k)+Gw(k)
% y(k)=Hx(k)+Cb(k)+v(k)

dt = tA(2) - tA(1);
A = [1 dt 0.5*dt^2; 0 1 dt; 0 0 1];
B = 0;
G = [0.5*dt^2; dt; 1];
H = [1 0 0; 0 0 1];
Hr = [0 0 1];
Cr = 1;
C = [0; 1];
[n col] = size(A);
R = [r 0; 0 q];
Rr = q;

xBF = zeros(n,1);
PBF = eye(n);
xBFstr = [];
KBFstr = [];

bBE = 0;
PBE = 1;
bBEstr = [];

xSE = zeros(n,1);

```

```

PSE = eye(n);
xSEstr = [];

U = zeros(n,1);
V = zeros(n,1);
S = zeros(n,1);
Ustr = [];
Vstr = [];
Sstr = [];

for k=1:length(acc)

%PRIOR ESTIMATION
% Bias free estimator (prior)
    xBF = A*xBF;
    PBF = A*PBF*A' + G*G';

% Sensitivity matrix calculation (prior)
    U = A*V + B;

% Bias estimator (prior)
    % No prior

%POSTERIOR ESTIMATION

    if mod(k,rate)==1
        % Bias free estimator (Kalman gain)
        y = [disp(k); acc(k)];
        KBF = PBF*H'*inv(H*PBF*H'+R);
        % Sensitivity estimator
        S = H*U + C;
        r = y - H*xBF;
        V = U - KBF*S;
        % Bias estimator
        KBE = PBE*S'*inv(H*PBF*H' + S*PBE*S' + R);
        bBE = bBE + KBE*(r - S*bBE);
        PBE = PBE - KBE*S*PBE;
        % Bias free estimator
        xBF = xBF+KBF*(y-H*xBF);
        PBF = PBF-KBF*H*PBF;
    end
end

```

```

else
% Bias free estimator (Kalman gain)
    y = acc(k);
    KBF = PBF*Hr'*inv(Hr*PBF*Hr'+Rr);
% Sensitivity estimator
    S = Hr*U + Cr;
    r = y - Hr*xBF;
    V = U - KBF*S;
% Bias estimator
    KBE = PBE*S'*inv(Hr*PBF*Hr' + S*PBE*S' + Rr);
    bBE = bBE + KBE*(r - S*bBE);
    PBE = PBE - KBE*S*PBE;
% Bias free estimator
    xBF = xBF+KBF*(y-Hr*xBF);
    PBF = PBF-KBF*Hr*PBF;

end

xBFstr = [xBFstr xBF];
bBEstr = [bBEstr bBE];
Vstr = [Vstr V];
Ustr = [Ustr U];

xSE = xBF + V*bBE;
xSEstr = [xSEstr xSE];

end

subplot(5,1,1), plot(tA, xBFstr(1,:), 'b', tA, Vstr(1,:).*bBEstr, 'r'), ylabel('BF');
subplot(5,1,2), plot(tA, Vstr(1,:)), ylabel('V');
subplot(5,1,3), plot(tA, bBEstr), ylabel('BIAS');
subplot(5,1,4), plot(tA, Vstr(1,:).*bBEstr), ylabel('Vb');
subplot(5,1,5), plot(tA, xSEstr(1,:)), ylabel('SE');

```

부록 2. 통합시스템(S/W) 사용매뉴얼

특징

- Polytec사의 레이저 속도계 PSV-400과 RIEGL사의 지상라이다시스템(LADAR) VZ-400에 특화된 소프트웨어로, 두 시스템에서 계측한 데이터로 보다 정확한 동적 변위를 산정하는 소프트웨어임
- 현재 높은 샘플주파수, 높은 정확도로 변위를 계측하는 비접촉식 변위센서가 전무한 상황이며, 이를 해결하기 위한 가장 효율적인 방법 중 하나는 두 센서를 융합하여 고품질의 변위데이터를 산정해내는 것임. 본 소프트웨어는 PSV-400과 VZ-400의 속도 및 변위 데이터를 계측하여 칼만필터 기반 데이터 융합을 통해 고품질의 동적변위를 사용자에게 제공함.

주요기능

- 본 소프트웨어는 레이저도플러 속도계의 속도 데이터와 라이다 스캐너의 거리 데이터를 장치로부터 전송받은 뒤, 거리 데이터에서 변위를 환산하고, 변위와 속도를 융합하여 고해상도, 고정밀도의 변위 데이터를 생성해 텍스트 파일 형태로 사용자에게 제공함.
- VZ-400은 본래 공간상의 3차원 좌표를 계측하여 지반, 건축물, 문화재 등을 3차원 모델링하는 용도로 사용되나, 본 소프트웨어는 VZ-400으로 공간상의 하나의 직선을 반복적으로 계측하도록 하고, 이 계측값을 토대로 직선상에 있는 모든 계측지점의 변위를 계산함. 이때 VZ-400 시스템에서 계측되는 거리 데이터를 원점 추출을 통해 변위로 변환하는 과정과, 변위데이터의 높은 잡음수준을 시간-공간상의 잡음소거 과정을 통해 80% 이상 제거하는 과정을 거침
- 본 소프트웨어는 PSV-400과 VZ-400의 위치정보를 사용자로부터 입력받아 레이저 광선 위치를 자동 제어하여 광선의 위치를 동기화할 뿐 아니라, 두 시스템을 동시 구동하여 두 계측치의 시간 동기화를 이루게 함
- PSV-400과 VZ-400에서 데이터를 ASCII 형식으로 획득한 데이터를 Fixed lag smoothing, fixed point smoothing, two-stage Kalman filter 등의 칼만필터 기반 이중/멀티샘플주파수 데이터 융합기법을 적용하여 고해상도/고정밀도의 변위 데이터를 산정함
- 데이터 융합기법을 통해 획득한 변위데이터를 사용자에게 ASCII 기반 텍스트파일

형태로 제공

사용방법

사용자 인터페이스를 제공하지 않는 명령행 기반 소프트웨어로, 본 소프트웨어를 사용하려면 공학용 프로그래밍 툴인 MATLAB이 필요하다. 시작 프로그램은 MATLAB 함수 형태로 되어있으며, MATLAB 명령어 창에 매개변수와 함께 명령어를 입력하면 자동 실행된다. 자세한 사용방법은 다음과 같다.

(하드웨어 설치)

- (1) LDV의 레이저빔의 각도는 수평, 수직 방향 모두 90도로 설정한 상태에서 계측지점에 맞춘다.
- (2) LADAR 시스템은 그림 1과 같이 LDV 측면에 위치시키고, LDV와 LiDAR의 회전거울간 거리를 측정해 기록해둔다.



그림 1. 하드웨어 설정방법

(소프트웨어 설치 및 준비)

- (1) PSV-400 시스템의 PC에 프로그램을 복사한다.
- (2) 필요한 경우 LADAR 변위계측 프로그램을 컴파일한다. 본 프로그램은 RIEGL사의 RiVLib 라이브러리를 사용하므로 PC에 맞는 RiVLib 라이브러리를 RIEGL 홈페이지(www.riegl.com)에서 다운로드하고, CMAKE 프로그램을 이용해 컴파일한다.
- (3) PSV-400 시스템의 PC에 MATLAB을 설치한다.

(사용방법)

- (1) PSV-400 시스템의 PC에서 VZ-400 시스템을 Wifi로 연결한다.
- (2) PC에서 MATLAB을 실행한다.
- (3) MATLAB에서 다음 명령어를 이용해 LiDAR 시스템을 구동하여 계측거리를 구한

다.

```
>> FindDist;
```

(4) MATLAB 명령어 창에 다음 명령어를 입력한다.

```
>> DispDataFusion(dist_LDV_LADAR, dist_LDV_Target);
```

여기서 dist_LDV_LADAR는 PSV-400과 VZ-400 시스템의 회전거울 간 거리(미터 단위)이며, dist_LDV_Target은 (3)번의 명령어 실행시 결과값으로 나오는 VZ-400의 회전거울과 목표 계측지점 간의 거리이다.

(5) 산정된 변위가 MATLAB 데이터 형식으로 저장되며, 외부 활용을 위해 별도의 텍스트파일이 생성된다.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.