제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 "구조물의 지진감지를 위한 3축 지진계 및 프로그램 개발에 관한 연구"의 보고서로 제출합니다.

2015. 05. .

주관연구기관명 : (주)이제이텍
주관연구책임자 : 문 대 중
연 구 원 : 김 원
" : 권 형 석
" : 이 정 희
" : 김 성 진
" : 임 관 혁
" : 이 철 규
" : 정 지 원
" : 정 진 우
" : 박 희 정
" : 정 지 애
" : 김 은 선
" : 신 호 열
" : 박 신 걸
" : 이 종 복
공동연구기관명 : (주)부품디비
공동연구책임자 : 정 기 철
공동연구기관명 : 한국기술교육대학교 산학협력단
공동연구책임자 : 이 병 렬

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>12
첨단도시
C11</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2012.04.10
~
2015.02.09</td><td>단 계 구 분</td><td>1/1</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="3">연 구 과 제 명</td><td>최상위
과제명</td><td colspan="4">구조물의 지진감지를 위한 3축 지진계 및 프로그램 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">단위
과제명</td><td>(주)이제이텍</td><td colspan="2">(주)부품디비</td><td>한국기술교육대학교</td></tr>
<tr><td>MEMS 기반 3축
지진 가속도계
모니터링 시스템
개발</td><td colspan="2">AR 기반 계측정보의
통합 가시화 기술
개발</td><td>MEMS 기반 3축
지진가속도계 센서
모듈 개발</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>문 대 중</td><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 48명
내부 : 43명
외부 : 5명</td><td>총연구비</td><td>정부: 960,000천원
기업: 339,400천원
계: 1,299,400천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">(주)이제이텍
(주)부품디비
한국기술교육대학교</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="3">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td colspan="2">보고서면수</td><td>185</td></tr>
<tr><td colspan="6">■ MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기반 소형 지진가속도 센서 모듈 개발
- MEMS 센서 부품을 이용한 소형 지진 가속도 감지 센싱 모듈의 개발
■ 지진계측 잡음저감 알고리즘 개발
- 지진 계측 시스템의 출력잡음을 분석하여 잡음을 저감할 수 있는 디지털 필터 알고리즘
■ 지진 모니터링 분석 알고리즘 개발
- 건축물에서 관측된 지진가속도 자료의 분석 및 가공이 가능한 알고리즘의 개발
■ 지진·진동 관리 모니터링 시스템
- 지진가속도 데이터의 상시 감시 및 분석을 위한 모니터링 시스템의 개발
■ 증강현실(Augmented reality, AR)기반 계측정보의 통합 가시화 기술 개발
- 실제 계측정보를 AR기술을 이용하여 정보를 병합하는 가시화 모듈 및 통합 소프트웨어의 개발
■ Test Bed 구축
- 개발한 요소기술에 대한 최종 Test Bed 구축</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">미세전자기계시스템 센서, 3축 지진계, 증강현실,
지진파 분석, 지진 모니터링 시스템</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">MEMS sensor, 3-axis seismometer, Augmented reality, Seismic analysis, Earthquake monitoring system</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

"구조물의 지진감지를 위한 3축 지진계 및 프로그램 개발" 최종보고서

Ⅱ. 연구개발과제 개요

▪ 최종목표

- 저전력 MEMS 기반 구조물의 지진감지를 위한 3축 지진계 및 프로그램 개발

▪ 연구개발의 내용 및 범위

- MEMS 기반 3축 지진가속도계 센서 시스템 개발
- 증강현실 기반 계측정보의 통합 가시화 기술 개발
- MEMS 기반 3축 지진가속도계 센서 모듈 개발

Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과(연구수행과정, 연구수행결과 등을 기술)

▪ 실내 시험을 통한 MEMS 지진감지 모듈 개발 및 검증

▪ 지진 모니터링 분석 알고리즘 개발

▪ 증강현실 기반 건축 형상정보 가시화 기술 개발

Ⅳ. 최종 연구성과 및 적용실적

▪ 연구개발 핵심 성과

- 지진 모니터링 분석 알고리즘 개발
- 지진·진동 관리 모니터링 시스템
- Test Bed 구축
- 증강현실 기반 계측정보의 통합 가시화 기술 개발
- MEMS 기반 소형 지진가속도 센서 모듈
- 지진계측 잡음저감 알고리즘
- MEMS 지진 가속도센서 readout ASIC

▪ 기술 적용 실적

- 3층 및 18층 철근콘크리트조 건물

Ⅴ. 연구목표 달성 효과

▪ 구조물의 지진과 관련된 재난관리시스템의 신뢰성 확보

▪ 안전사고와 관련된 막대한 사회적 비용의 절감

Ⅵ. 연구성과 활용계획

▪ 기술실시계약의 체결

▪ 지진계 및 건물 진동 모니터링 시스템의 판매 및 시장점유율 확대

SUMMARY

Ⅰ. Title

"A 3-axis Seismometer and The Program Development for Earthquake Sensing of Structures" Final Report

Ⅱ. The Outline of the R&D Projects Overview

- The final goal
  - 3-axis seismometer and program development for earthquake detection of low power MEMS-based structures
- R&D contents and scope
  - MEMS-based development of accelerometer, three-axis seismic sensor system
  - Integrated visualization technology development of augmented reality-based instrumentation information
  - MEMS-based development of three-axis earthquake acceleration sensor module

Ⅲ. R&D perform contents and result(course of research, result of research Etc.)

- MEMS earthquake detection module developed and validated through laboratory tests
- Development of earthquake Monitoring Analysis Algorithm
- Augmented Reality-based architectural shape information visualization technology development

Ⅳ. The final results of research and application performance

- R&D core performance
  - Development of earthquake Monitoring Analysis Algorithm
  - Earthquake and Vibration management monitoring system
  - Construction of Test Bed
  - Integrated visualization technology development of augmented reality-based instrumentation information
  - MEMS-based small earthquake acceleration sensor module
  - Earthquake measuring noise reduction algorithm
  - MEMS earthquake acceleration sensor readout ASIC
- Performance of Technology Application
  - 3-story and 18-story RC structure building

Ⅴ. Effects of Research goal

- The reliability ensure of the earthquake related disaster management system of the structure
- Reduce the enormous social costs associated with accidents

Ⅵ. Utilization plan of research results

- Sign of the technical implementation agreement
- Sales and market share of seismograph and building vibration monitoring system

CONTENTS

Presentation letter ····· 1
Report Summary ····· 2
Summary ····· 3
English Summary ····· 4
English Contents ····· 6
Contents ····· 7

Chapter 1 Preface ····· 8
1. Necessity and Objectives of the research ····· 8
2. Scope and Characteristics of the research ····· 11
3. Recent technology developments of the related field ····· 12
4. Proportion by research developments results of the related field ····· 19

Chapter 2 Research contents and results ····· 20
1. Research methodology ····· 20
2. Research process and results ····· 21

Chapter 3 The final research achievements and performance ····· 154
1. The final research results ····· 154
2. Technical applications and performance ····· 162

Chapter 4 Research objectives and analysis ····· 173
1. The final objectives and achievements ····· 173
2. Analysis of the technical effects of rsearch results ····· 174

Chapter 5 Utilization of research outputs and necessity of additional research 175
1. Study on methods for utilization of research outputs ····· 175

References ····· 176
Appendices ····· 178
Performance Check List ····· 182

목 차

제출문 ····· 1
보고서 요약서 ····· 2
요약문 ····· 3
영문 요약문 ····· 4
영문 목차 ····· 6
목차 ····· 7

제1장 연구개발과제 개요 ····· 8
제1절 연구개발의 목표 및 필요성 ····· 8
제2절 연구개발의 범위 및 특징 ····· 11
제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황 ····· 12
제4절 연구개발결과가 관련부야에서 차지하는 위치 ····· 19

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 20
제1절 연구수행 전략 및 방법론 ····· 20
제2절 연구수행 과정 및 내용 ····· 21

제3장 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 154
제1절 최종 연구성과 ····· 154
제2절 기술 적용 사례 및 실적 ····· 162

제4장 연구목표 달성 및 효과 ····· 173
제1절 연구개발 최종목표 달성도 ····· 173
제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석 ····· 174

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ····· 175
제1절 연구성과의 향후 활용방안 ····· 175

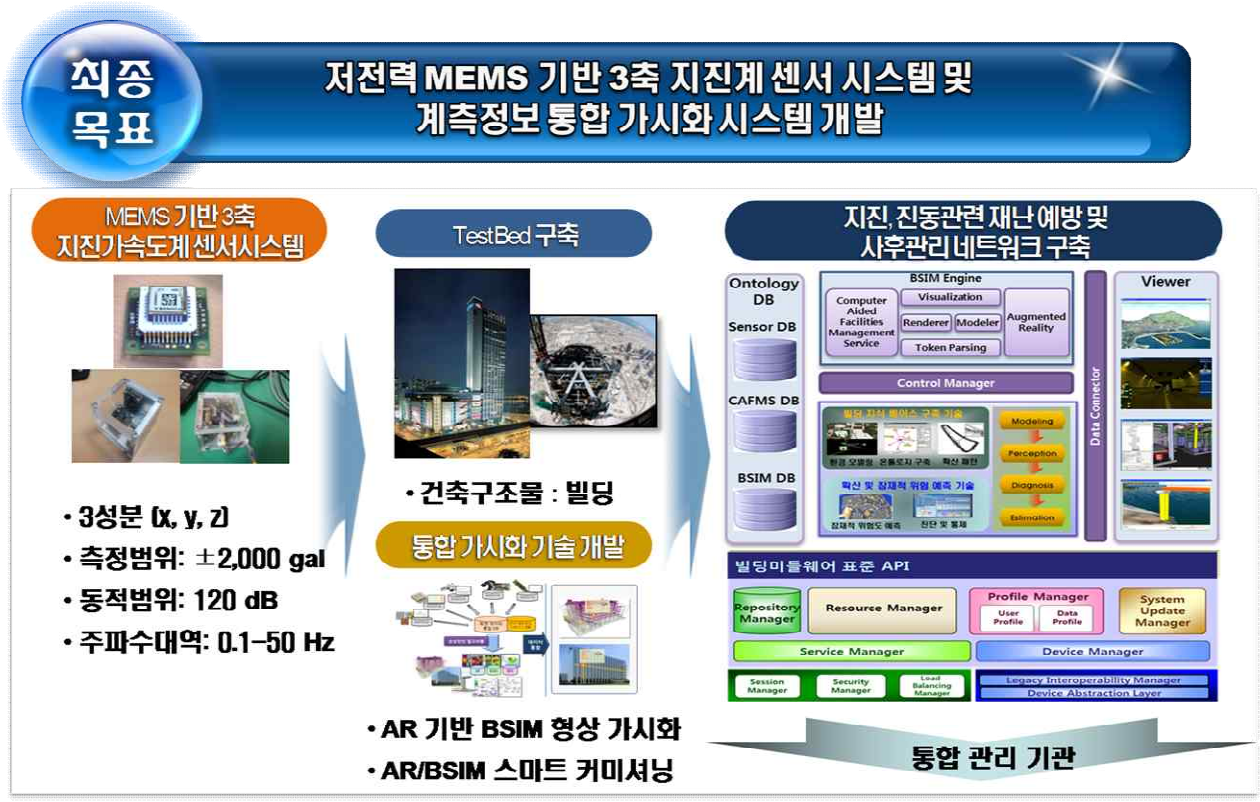
참고문헌 ····· 176
부록 ····· 178
성과점검기준표 ····· 182

제1장 연구개발과제 개요

제1절 연구개발의 목표 및 필요성

1. 연구개발의 목표

본 기술개발의 최종목표는 “저전력 MEMS 기반 구조물의 지진감지를 위한 3축 지진계 및 프로그램 개발” 이며, 최종 성과물의 목표 성능은 다음과 같다.



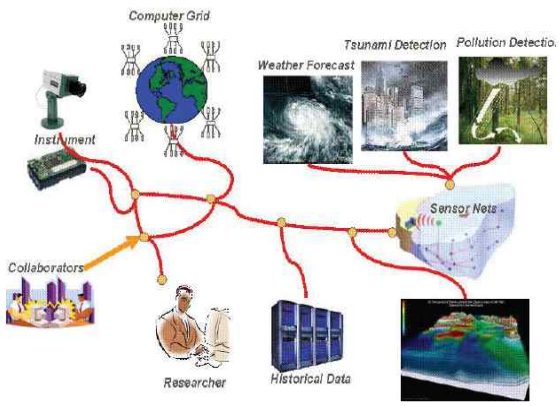
2. 연구개발의 필요성

사회 인프라 구조물에 대한 안정성 확보를 위해 대형 구조물에 대한 유지관리 모니터링에 대한 관심이 급증하고 있으며, 지진재해대책법 등 재난대책관련 법규가 제정되고 있는 실정이다. 최근 들어 건축물의 지진, 태풍 등의 다양한 진동원으로 인한 진동계측의 중요성이 증대되고 있으나, 계측에 사용되고 있는 센서 등은 해외 수입품을 사용하고 있어 국부의 유출 및 기술의 종속 등 다양한 문제가 발생하고 있다.

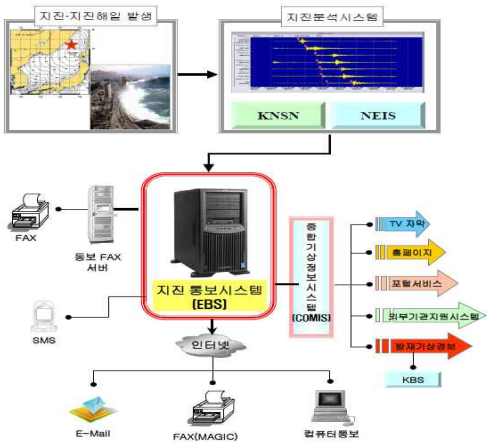
현재 해외 수입품에 의존하고 있는 지진계를 대체할 수 있는 국산 3축 지진가속도계를 개발하고, 계측 데이터를 플랫폼형 BSIM(Building Safety Information Model) 기반의 증강현실(Augmented Reality, AR)을 사용하여 손상진단 알고리즘에 적용하여 계측정보의 통합 가시화 기술개발이 필요한 실정이다. 개발대상인 한국형 지진가속도계는 MEMS 기반 3축 지진가속도계로서 저전력, 고성능, 고내구성을 목표로 하고, 계측신호를 BIM을 이용한 유지관리 기술에 적용시킨 BSIM 기반의 통합관리 시스템을 개발하여 적용하는 것이 연구개발의 목표이다.

최근 들어 친환경 녹색 개발에 대한 관심이 급증하는 실정이고, 개발대상 기술은 상대적으로 소비전력이 적은 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)형 3축 지진계 센서를 활용하는 녹색 건설기술이며 유비쿼터스 네트워크 서비스를 구축/운용함으로써 첨단 건설 IT 기술을 융복합하는 기술이다. 종래의 설계 및 시공에 중점을 둔 BIM(Building Information Modeling) 기술을 계측 유지관리 분야에 도입함으로서 유지관리 업무의 효율성 증대 및 사업비의 절감이 가능한 기술이다.

본 개발 대상 기술은 지진 등과 같은 자연재해 등으로 인한 재해 및 재난의 사전예방 및 사후관리 네트워크 구축으로 체계적 관리가 가능한 기술이며, 따라서 건축물 및 대형 구조물의 재난관리 기술로는 가장 적합한 기술이라 판단된다. 아래 그림은 국토해양 R&D 발전전략에서 나타내는 SOC 관리기술의 예를 나타내며, 국내 기상청의 지진 및 지진해일 정보수집 전달체계는 아래 그림[1]과 같다.



[SOC 시설물 네트워크 관리 기술]

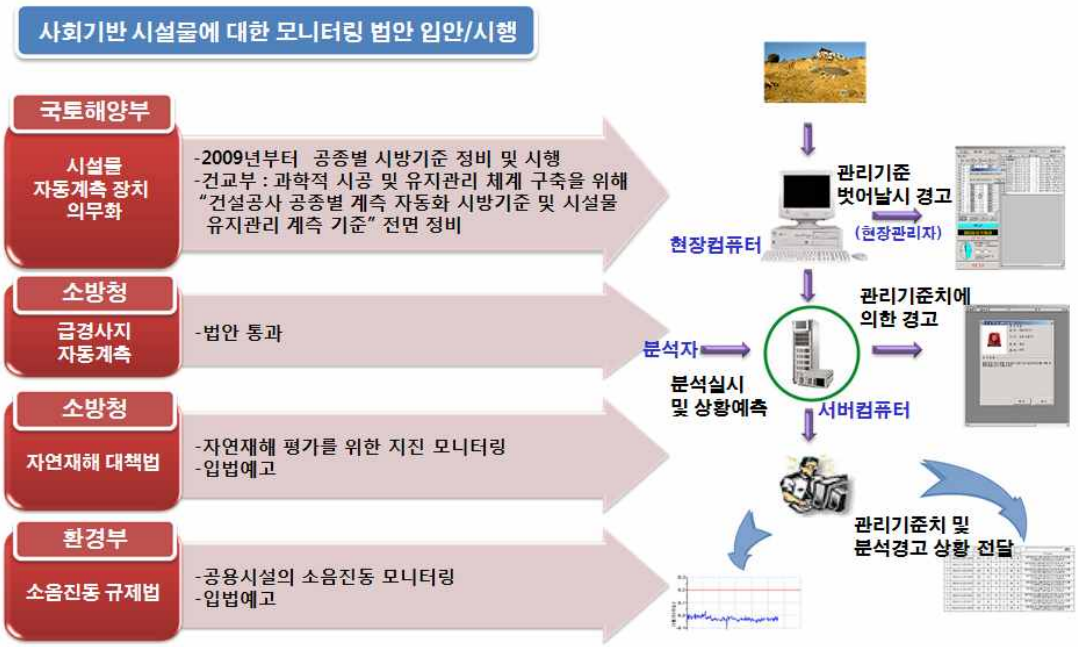


[기상청의 지진통보 체계도]

1) 지진방재, 소방방재청, 2009

국내에서는 지진 혹은 해일이 발생하였을 때 종합기상정보시스템을 사용하여 지진인지 및 특보를 발표하고 있으며, 지진규모 5.0 이상의 내륙지진이 발생하였을 경우 방송국에 긴급방송을 요청하는 프로세스를 따르고 있다. 기상청의 현행규정은 통보시간을 2분 이내로 설정하고 있지만 장비 등의 인프라 관련 문제로 2015년 이후를 목표로 통보시스템을 재정비하고 있으며, 태풍과 달리 단시간에 큰 재해 상황을 초래하는 지진은 지진계센서 및 계측관리 시스템의 역할이 얼마나 중요한 것인가를 역설한다. 예를 들어 현행규정에 따라 2분 이내의 지진통보가 건축물 혹은 시설물 담당자에게 통보가 되었다 하더라도 이미 지진의 진동은 2분 전에 건축물 및 건축물 내부의 주요 장비들에 피해가 발생한 후가 될 것이며, 이는 사후약방문의 결과가 되어 재해발생 시 강력한 힘을 발휘해야 할 건축물 및 건축물 내부의 주요장비(예를 들어, 초고층빌딩, 방송국 등)가 오히려 또 다른 재해의 형태로 국민에게 다가가게 된다.

본 개발대상 기술은 이와 같은 문제점을 타파하기 위해, 적극적으로 저전력·고정밀도·고내구성 MEMS 기반 지진가속도계 센서 및 모니터링 시스템을 개발하여 지진 및 태풍과 같은 재해를 감지하고 재해 상황을 실시간으로 시각화하고자 한다. 비재해시는 상시 감시를 통한 건축물의 건전도 모니터링 및 환경재해 등으로부터 재해를 방지하는 시스템으로 사용할 수 있는 통합 시스템을 개발하고자 한다. 특히 기상이변 등으로 인한 자연재해 발생에 대비하기 위해 정부는 범부처 대응으로서 사회기반 시설물에 대한 모니터링 법안을 아래 그림과 같이 입안하여 시행하고 있으며 국민의 삶의 질과 직결되는 기술 개발이라고 할 수 있다.



[사회기반 시설물에 대한 모니터링 법안 입안/시행]

제2절 연구개발의 범위 및 특징

1. 연구개발의 범위 및 특징

가. MEMS 기반 3축 지진가속도계 센서 시스템 개발((주)이제이텍)

연 차	연구 범위	특징
1차년도	▪ MEMS 기반 1축 지진가속도 센서 모듈 개발	▪ 기술 동향조사 ▪ 100dB급 지진계 prototype 개발 ▪ 지진계급 MEMS 가속도 센서 설계
2차년도	▪ 지진가속도 모니터링 알고리즘 개발	▪ 지진가속도 분석 알고리즘 개발 ▪ 지진가속도 분석 SW 개발
3차년도	▪ Test Bed 구축	▪ 최종 시제품의 Test Bed 구축
	▪ 통합 관리 시스템 개발	▪ 통합 지진·진동 관리 모니터링 시스템

나. AR기반 계측정보의 통합 가시화 기술 개발((주)부품디비)

연 차	연구 범위	특징
1차년도	▪ AR기반 요소 기술 조사 및 기반 정보 기술 정합화 방안 수립	▪ AR기반 요소 기술 조사 ▪ 건축 형상정보와 AR기반 정합화 방안 기본 설계안 제시
2차년도	▪ 건축 형상정보 AR정합 모듈 개발	▪ 건축 형상정보와 AR기반 정합 알고리즘 개발 ▪ 건축 형상정보 AR기반 정합모듈 개발
3차년도	▪ AR기반 계측정보 통합 가시화 시스템 개발	▪ AR기반 계측정보 통합 가시화 시스템 연계 인터페이스 개발 ▪ AR기반 통합 시스템 개발
	▪ MEMS 시스템과의 병합 및 테스트	▪ 통합 시스템과 현장 시스템과의 연계 및 테스트

다. MEMS 기반 3축 지진가속도계 센서 모듈 개발(한국기술교육대학교)

연 차	연구 범위	특징
2차년도	▪ MEMS 기반 3축 지진가속도 센서 모듈 개발	▪ 100dB급 지진계 모듈 개발 ▪ 실내실험을 통한 모듈 검증 ▪ 지진계급 MEMS 가속도 센서 proto type 개발
3차년도	▪ MEMS 기반 3축 지진가속도 센서 시스템 개발	▪ 120dB급 지진계 모듈 개발 ▪ 실내실험을 통한 모듈 검증 ▪ 지진계급 3축 MEMS 가속도센서 개발

제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

1. 국내외 기술개발 현황

가. 기술 동향 조사

(1) 미국: HAZUS(Hazard U. S., 재해피해 추정 프로그램)

HAZUS는 지진 발생 위치와 규모 연구 대상지역의 건물 구조 형태 및 건물의 용도, 인구 밀도, 연구지역의 지질 등 재해손실을 추정하기 위한 다양한 자료를 입력함으로써 연구지역의 지진 재해 피해 정도를 추정하는 프로그램이다. HAZUS의 재해손실을 추정하는 기능을 통해 재해 대응 및 복구단계에서 피해규모를 신속히 추정함으로써 재해대책본분의 대처능력을 향상시키며, 예방 및 훈련단계에서 재해의 규모를 예측함으로써 실제상황과 유사한 재해대응 훈련시나리오를 만들 수 있다.

(2) 일본: DIS(Disaster Information System, 재해정보시스템)

일본의 재해정보시스템은 대규모 지진 발생으로 큰 피해가 발생했을 때, 피해에 대한 각종 정보가 부재한 상태에서 대응조치를 가능한 한 신속하고 효율적으로 수행할 수 있도록 지진피해예측 및 대응방안에 대한 정보를 제공하는 시스템이다. 일본 국토청에서 피해상황의 조기파악과 관계기관에서의 정보의 공유화에 의한 응급복구시의 신속하고 정확한 의사결정을 지원하는 것을 목적으로 DIS의 개발을 수행하였으며, 현재 내각부에서 관리·운영 중에 있다.

나. 상용 지진 감시 시스템 비교

(1) 외산 장비

G社 제품: 지진 이벤트 감시목적으로 설계

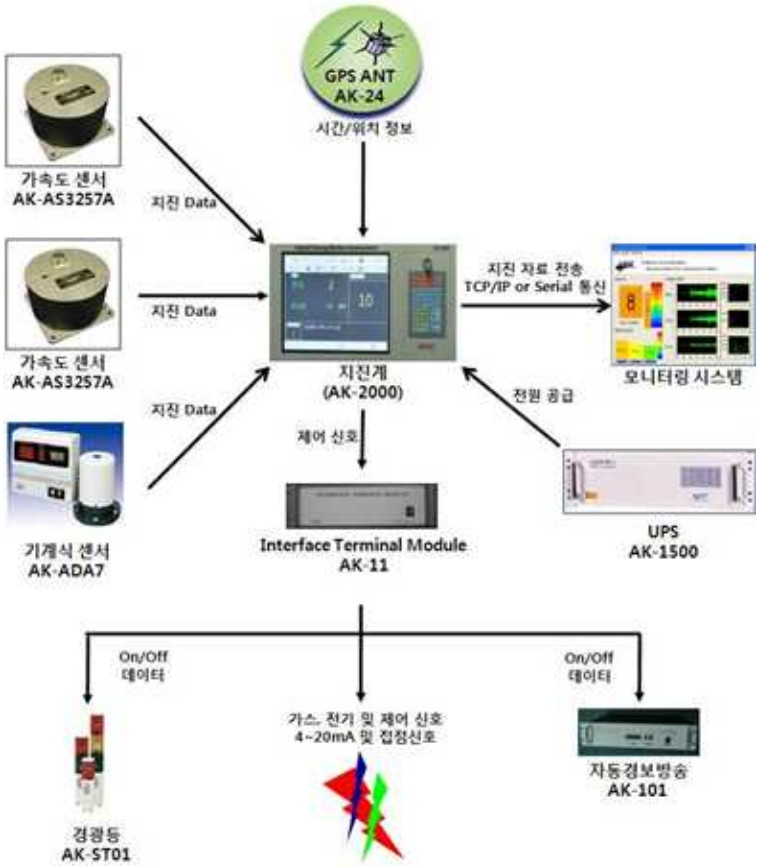
구성: 센서, 디지타이저, 자료전송장치, 모니터링 패널 분리형

(2) 국산 장비

A社 제품: 지진 이벤트 감시 및 방재 목적으로 설계

구성: 센서, 디지타이저, 자료전송장치, 모니터링 패널 일체형

기상청의 국가 통합 지진 네트워크망에 접속이 용이하며, 2013년 긴급 지진속보 접속이 가능한 점 등 확장성 면에서 유리하다.



[지진 계측 시스템 구성도]

(3) 장비 사양 비교

제품명	시스템	사양	비고
	제어 방식 통신 방식 Data format	채널수 data bit 전원	국가 customizing 기능
AK-2000	Direct/Remote TCP/IP, UDP Seed, Win, Ascii	3 ~ 24 채널 24bit 220V/110V	한국 Customizing 가능
Q-330	Telnet/Terminal UDP, TCP/IP (3채널) Seed	3 or 6 채널 24bit 12V	미국 Customizing 불가능
DM24	Telnet/Terminal UDP, TCP/IP (3채널) GCF	3,6,9 or 12 채널 24bit 12 ~ 36V	영국 Customizing 불가능
GeoSig	Telnet/Terminal TCP/IP (1채널) Ascii	9 채널 24bit 12V	스위스 Customizing 불가능

다. 지진 가속도계용 센서 기술 분석

(1) 종래 기술 방식의 지진계용 가속도 센서 제품 조사

상용 지진 모니터링 시스템에 사용하는 센서 제품군은 대부분 종래의 기술을 이용하는 방식이기 때문에 소형화 관점에서 한계가 있다. 특히 일부 제품은 단일 방향만 검출하기 때문에 3축을 측정하기 위해 공간상에 배치한다면 매우 부피가 큰 구성이 된다.

제품명/제조사	외관	사양
AK-AS3257A (Tokyo-Sokushin)		분해능: $100\mu g_s$ 측정범위: $\pm 2.0g$ 외형: $150mm(\phi)\times 68mm$
AK-ADA7 (mitutoyo)		측정범위: $\pm 2.5g$ 외형: $64.8mm(\phi)\times 72.4mm$
393C (seismic ICP)		분해능: $100\mu g_s$ 측정범위: $\pm 2.5g$ 외형: $56mm(\phi)\times 56mm$
KB12 (MMF)		측정범위: $\pm 3.0g$ 외형: $48mm(\phi)\times 50mm$
ICPDAS (GST-63-M)		외형: $102mm\times 123mm\times 28mm$ dynamic range: 63 dB

(2) MEMS 가속도 센서 제품 조사

MEMS sensor maker인 STMicroelectronics, Kionix, PCB, AnalogDevice, Collibrys, Bosch, MEMSIC, Endevco, Sentera Technology, X-bow, Honeywell, Freescale등의 제품을 분석하였다. 이 중에 STMicroelectronics, Collibrys, Kionix, Sentera technology, Analog device, MEMSIC, Bosch가 IC 형태의 MEMS 가속도센서를 판매한다.

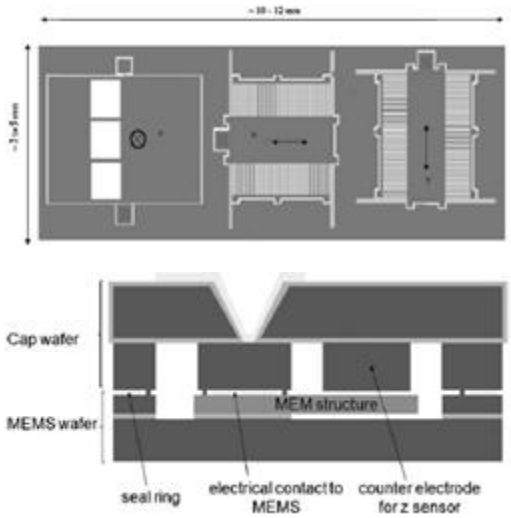
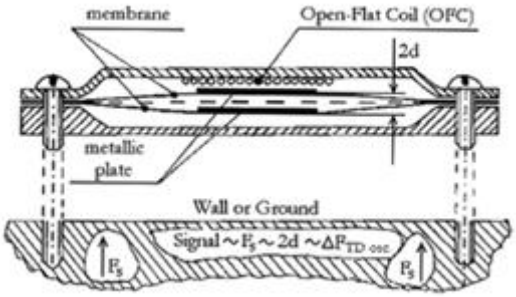
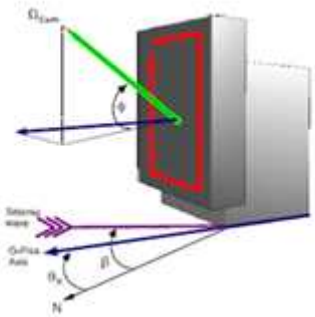
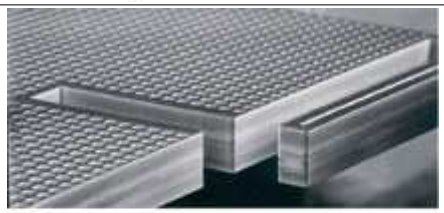
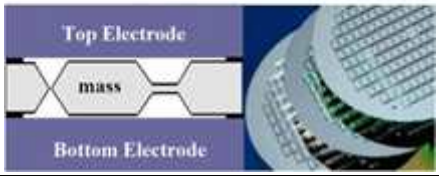
IC 형태의 센서는 소형이긴 하지만 Collibrys 제품을 제외하고 대부분 dynamic range가 60~80dB의 수준이다. mobile 기기용 MEMS 가속도계의 main player는 STMicroelectronics, Bosch, Kionics… 등인데 분해능은 약 1mg, dynamic range는 60dB에 불과해서 지진 모니터링 시스템에 적용 불가능 하다. 산업용 고성능 MEMS 가속도센서는 Tronics, Colibrys, Endevco, MSI, Entran, PCB … 등이 main player인데 dynamic range는 70~100dB 수준이다.

제품명/제조사	분해능	측정 범위	dynamic range
/Sentera Technology	$0.3mg$	±2.0 g	80 dB
/STMicroelectronics	$1 \sim 20mg$	±2~6 g	60 dB
/Bosch	$50mg$	±2~16 g	60 dB
MXR9500/MEMSIC	$9mg$	±1.5 g	60 dB
/Kionix			60 ~ 80 dB
ADIS16301/Analog Device	$12bit$	±1.7 g	60 dB
7290A/Endevco	$0.5mg$	±2.0 g	80 dB
SF1500/Colibrys	$3\mu g$	±3.0 g	117 dB

(3) 고성능 MEMS 가속도센서 최신 기술 흐름 조사

생산성 면에서 가장 안정된 기술인 용량형 가속도 센서를 대체하기 위해 코일 픽업형, 링레이저형 등 다양한 기술이 제안되고 있다. 용량형 센서 방식의 가속도계가 센서 모듈 소형화 측면에서 가장 유리한데 상기 내용 중에서 Switzerland Neuchatel 대학에서 개발한 방식이 Colibrys에서 상용화한 지진계급 단축 가속도 센서 제품의 원형이다. 이러한 구조의 MEMS 기술로 지진계급 가속도 센서가 구현 가능한 것은 기술적 성숙도나 생산성 측면에서 용량형 MEMS 센서 구조가 가장 상용화에 가장 근접했기 때문이라고 볼 수 있다.

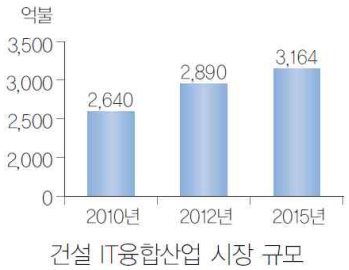
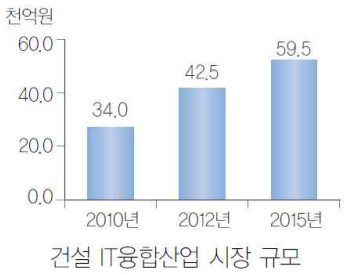
그러나 이 구조로 3축의 가속도를 측정하기 위해선 공간상에 3개의 센서를 배치해야 하기 때문에 소형화 측면에서 불리하다. 따라서 용량형 MEMS 센서 기술로 다축 지진계급 가속도 센서를 개발하는 것이 기술적 진보와 상용화 가능성 측면에서 유리하다고 판단된다.

방식	개념도	비고
용량형		2011/11 웨이퍼 접합 구조 전용 readout 회로 사용
유도형		2007/6 코일 유도 전류 픽업 방식
광학형		2012/1 레이저 반사광 검출 방식
용량형	 	2011/8 단축 감지 Colibrys 상용화

2. 국내외 시장 현황

아래 표[2]에 의하면, 세계적인 건설 IT 융합 세계 시장은 2010년 2640억 달러에서 2015년 3164억 달러로 증가할 전망[3]이며, 글로벌 건설산업의 친환경, 에너지효율화, 지능화 추세로 건설 IT 융합시장은 생산성 향상, 유지관리 및 에너지 절감, 신재생에너지 창출, 기후변화 협약 대응, 친환경 기술이 앞으로 주도할 것으로 예상되고 있다.

[세계 및 국내 건설 IT 융합 시장의 현황 및 전망]

구분	시장 규모	시장 현황 및 전망
세계		• 건설 IT 융합 세계 시장은 2010년 2640억 달러에서 2015년 3164억 달러로 증가할 전망[4] • 글로벌 건설산업의 친환경, 에너지효율화, 지능화, 추세로 건설 IT 융합시장은 생산성 향상, 유지관리 및 에너지 절감, 신재생에너지 창출, 기후변화 협약 대응, 친환경 기술이 앞으로 주도 예상 • 건설 IT 융합 논문/특허 추세는 건설 설계 정보 표준화/공유기술, 건설 자재/환경 모니터링, 구조물계측, 건설현장 무선통신, 에너지관리, 신소재 기술분야가 증가
국내		• 건설 IT 융합 국내시장은 2010년 3.4조원에서 2015년 약 6조원에 도달할 전망[5] • 세종도시, 혁신도시 등 약 40개 지자체(50여개 지구)에서 첨단도시 건설을 추진 중 • 우리나라는 세계적으로 u-City를 선도하고 있으며 건설 IT 융합시장은 향후 가속적인 성장기대 • u-City는 유비쿼터스 IT와 건설융합의 대표적 비즈니스 모델로 산업고도화 및 환경인식 확대에 따른 첨단화, 고급화 및 친환경 측면의 건설수요에 부응 기대 • 건설 IT 융합 산업은 저비용고효율, 에너지절약, 설계/시공/유지관리 자동화, 지능화의 건설 IT 응용시장으로 발전

2) 한국산업기술평가관리원 IT R&D 발전전략(IT융합)
3) 해외건설협회, 2007년 12월
4) 해외건설협회, 2007년 12월
5) 녹색성장을 위한 건설-IT융합 기술 시장 세미나, 2010년

국내의 건설 IT 융합 시장은 2010년 3.4조원에서 2015년 약 6조원에 도달할 전망[6]이며, 우리나라는 세계적으로 u-City를 선도하고 있어 건설 IT 융합시장은 향후 가속적인 성장이 기대된다. u-City는 유비쿼터스 IT와 건설융합의 대표적 비즈니스 모델로 산업고도화 및 환경인식 확대에 따른 첨단화, 고급화 및 친환경 측면의 건설수요를 발생시키고 있으며, 건설 IT 융합 산업은 저비용고효율, 에너지절약, 설계/시공/유지관리 자동화, 지능화의 건설 IT 응용 시장으로 발전 가능성이 크다. 기존의 유지관리 시스템의 국부적인 건물 구조물 검사로 인한 비용증가 및 관리 감독의 사회적 비용이 증가하였으나, 본 개발 대상 기술 적용 시 건축물 및 대형 구조물 전체에 관해 안전관리 체계수립으로 사회적 비용 절감 및 사회적 경제성에 크게 기여할 것으로 기대된다.

3. 국내 관련 법령 동향

1995년 성수대교 붕괴를 계기로 "시설물안전관리에관한특별법" 제정으로 구조물과 사회간접자본을 관리하는 시설안전기술공단이 설립되었으며, 2000년의 서해대교 점검 전산화 구축, 2002년의 영종대교, 광안대교 점검 전산화 구축, FMS[7] 등 교량 유지관리를 위한 진단 및 점검 시스템 사업이 활발하게 수행되고 있다. 또한 유지관리 모니터링시스템이 운영 중인 교량은 영종대교, 광안대교, 남해대교, 서해대교, 삼천포대교, 돌산대교, 진도대교 등이 있으며, 서해대교의 유지관리 시스템은 지진, 풍속, 기타 등을 관리할 수 있는 센서들을 많이 설치하여 실시간 데이터 표출 및 경보발생 기능, 저장된 자료 표출 및 간략 분석도구 제공 등을 수행한다.

지진과 지진해일로 인한 재해로부터 국민의 생명과 재산 및 주요 기간시설을 보호하기 위하여 지진재해대책법이 제정·공포(2008.03.28) 되었으며, 지진과 지진해일의 관측·예방·대비 및 대응, 내진대책과 지진재해를 줄이기 위한 연구 및 기술개발 등에 관한 사항을 규정하고 있다. 해당 법의 제5조(지진가속도계측 대상 시설 등)에서는 중앙행정기관 및 지방자체단체의 청사, 국립대학교, 높이 200미터 또는 50층 이상 공공건축물, 내진 특등급의 댐 및 저수지, 현수교 및 사장교, 발전용 수력설비 및 화력설비 등에 반드시 지진가속도 계측을 하도록 명시하고 있다. 지진재해대책법에 명시된 시설물 모니터링용 지진가속도계 표준 규격(소방방재청 고시)은 아래 표와 같다.

6) 녹색성장을 위한 건설-IT융합 기술 시장 세미나, 2010년
7) 시설물정보통합관리시스템, KISTEC, 2002년

항목	표준 규격	비고
계측 성분	- 3축(연직 1방향, 수평 2방향)	
주파수 특성	- 주파수 범위: 0.1~50[Hz] - 주파수 대역에서 지반운동을 3dB 이내 정확도로 감지	평활한 주파수 응답 반응 유지
동적 범위	- 고시 기준일 이후 신규 구매 지진 가속도계의 표준 규격 > 120dB - 최대 계측 가속도 2.0 g	
출력 오차	- 비선형성 <1% - 타축감도 <2% - 감쇄율: 60 ~ 70%	자유장의 경우 타축감도 오차 <1%
출력 방식	- 기록계와의 거리 > 50m	차동 출력

제4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

1. 연구개발결과의 우수성 및 차별성

본 연구개발에서는 MEMS 기반 소형 지진가속도 센싱 모듈, 지진가속도 감시용 데이터 로거 시스템, 지진 모니터링 알고리즘을 개발하였고, 지진·진동 관리 모니터링 시스템의 현장 적용 2건을 완료하였으며 건축 형상정보 AR 정합 모듈을 개발하였다.

지진가속도 측정을 위해 건물에 부착하는 센서 모듈의 크기를 최소화하는 것이 실제 운용 측면에서 중요하므로 MEMS 센서를 이용하여 기존 방식에 비해 센서 모듈의 가격과 부피를 저감시켰다.

지진계를 이용하여 장기간 동안의 지진 모니터링을 수행하면 측정 데이터의 저장 용량이 지나치게 커지기 때문에 저장 용량을 과도하게 확보해야 하는 문제가 있다. 지진 모니터링은 발생 시점 부근의 데이터 수집이 목적이기 때문에 일정 범위 이상의 진동이 가해질 때의 데이터만 저장함으로써 저장 용량의 한계 문제를 해결하였다.

또한 지진가속도 데이터의 표출, 신호처리 및 통계처리 등이 가능한 지진 모니터링 알고리즘을 개발하여 건축물에서 관측된 지진가속도 자료를 분석하고 가공하여 건축물 관리자들이 편리하게 이용하도록 정보를 제공하고자 하였으며, 지진·진동 관리 모니터링 시스템의 현장 적용 2건을 완료하였다.

건축 형상정보 AR 정합 모듈은 실제 가속도계로부터 측정된 계측정보를 AR(Augmented Reality, 증강현실)기술을 이용하여 계측정보를 AR환경에 병합하는 가시화 모듈이다. 이를 통해 데이터 가시화 방식의 기술적 향상을 도모하고, 최신 모션 디바이스 기술을 적용해 사용자 편의성을 증대시켰다.

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 연구수행 전략 및 방법론

1. 연구수행 전략 및 방법론

핵심성과	연구수행방법 (이론적 · 실험적 접근 방법)
MEMS 기반 3축 지진가속도 센서 모듈 개발	▪ 디지털 출력형 지진계 구현 ▪ MEMS 가속도 센서 3개와 24bit DAQ를 실장 ▪ 3축 가속도 벡터합의 변화를 모니터링 ▪ 장기 모니터링을 통한 동작 검증 ▪ 2축 수평형 MEMS 가속도 센서 구조 설계 ▪ 8 inch SOI 공정으로 센서 wafer 제작 ▪ 센서 readout ASIC 회로 설계 ▪ 0.13um CMOS 공정으로 ASIC wafer 제작
지진가속도 모니터링 알고리즘 제작	▪ 지진 가속도 데이터의 상시 감시 ▪ 지진 가속도 데이터의 분석(신호처리, 통계처리, 응답 스펙트럼 분석) ▪ 지진 감시 기준을 초과하는 이벤트 자료는 원시데이터를 별도의 파일로 관리 ▪ 계측서버 및 데이터베이스에 대한 부하량 최소화
건축 형상정보 AR정합 모듈 개발	▪ 변위 정보 연계를 위한 GNSS DB 스키마 분석 ▪ 가속도 정보 연계를 위한 변위 추정 기법 조사 ▪ GNSS DB 인터페이스 프로토타입 개발 ▪ Vertex Shader를 이용한 형상정보 제어 모듈 개발 ▪ BIM 테스트 형상정보의 AR기반 가시화 실험
Test Bed 구축	▪ 현재 또는 과거에 지진가속도센서가 설치되었거나 설치하고 있는 현장 조사 ▪ 개발한 요소기술에 대한 최종 Test Bed 구축

2. MEMS 기반 3축 지진가속도 센서 모듈 개발 방향

지진계용 감지 모듈의 동적범위 요구사양이 120 dB로 극히 정밀한 부품이기 때문에 통상 정밀 조립 공정이 요구되는 전자기력 방식으로 고가의 대형 센서를 사용해 왔으나 향후 건물 모니터링이 활성화되어 시장이 급속히 성장할 가능성을 고려하여 반도체 일괄 제작 공정을 통해 저가, 소형화가 가능한 MEMS 센서를 적용하는 것으로 개발 방향을 수립하였다.

통상 모바일 기기용으로 사용되는 MEMS 센서에 비해 지진계의 동적 범위가 50~60dB 이상 높기 때문에 센서의 정밀도를 큰 폭으로 개선해야 하는데, 소형 관성질량을 사용하는 MEMS 센서는 감도 개선과 대역폭 내에서의 잡음 최소화에 한계가 있기 때문에 출력 잡음에 대한 성분을 분석하고 이를 최소화시킬 수 있는 알고리즘 개발을 주요 연구 주제로 수행하였다.

MEMS 센서 성능은 외부 진동이 인가될 때 silicon 기계 구조에서 발생하는 미세 변위 및 이를 검출할 수 있는 ROIC(readout ASIC)의 성능에 의해 결정된다. MEMS 구조와 ROIC 개발은 막대한 비용과 시간이 소요되는 일이기 때문에 본 연구과제에서 이에 대한 상세 설계를 통해 성능과 IP를 확보하는 데 주력하고 제작은 외부 전문 제조업체를 활용하는 방식으로 개발을 수행하였다.

특히 ROIC 구성에 따라 MEMS 센서의 전체 성능이 결정되는데, 기존의 Analog 출력 방식의 지진계 모듈은 원격지에 위치한 data logger까지 긴 배선이 필요하고 여기에 외부 잡음이 혼입될 가능성이 있기 때문에 ROIC에 24bit ADC를 내장하여 digital pulse train으로 data를 전송할 수 있다면 잡음에 훨씬 강인한 시스템이 될 수 있다. 이를 위해 ROIC 설계 범위에 24bit sigma delta ADC 기능을 구현을 주요 연구 주제로 수행하였으며 MEMS 기계 구조의 경우도 3축 감지 모듈의 타축 감도를 최소화 하고 전체 모듈의 크기도 최소화 할 수 있도록 2자유도 센서로 개발 방향을 수립하여 설계를 진행하였다.

제2절 연구수행과정 및 내용

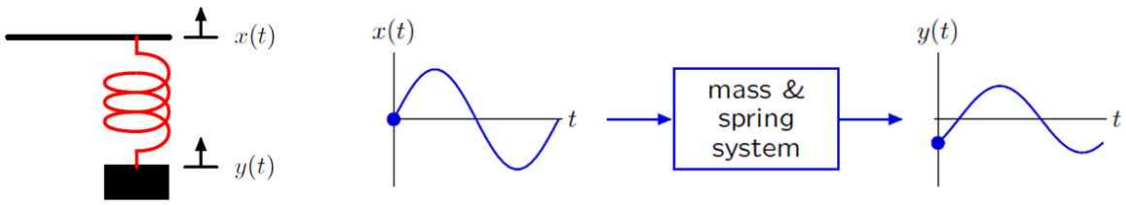
1. 연구 개발 배경

가. 지진계용 가속도 센서 고려사항

지진 모니터링을 위해선 지진 가속도를 검출할 수 있는 가속도 센서가 필요한데 이는 관성력(inertial force, F_a)를 측정하기 위해 관성질량(seismic mass, M), 기계 강성(spring, K_m), 감쇄부(damper, b)로 구성되는 기계식 관성 센서의 한 종류로 관성력에 따라 변하는 질량체의 위치를 검출하는 방식이다.

$$\text{Earthquake} \rightarrow \text{change in motion} \rightarrow \text{change of velocity, } v(t) \rightarrow \text{acceleration, } a(t)$$

$$F_a(t) = M \cdot a(t) = M\frac{d^2y(t)}{dt^2} + b\frac{dy(t)}{dt} + K_m y(t)$$



[관성 센서 개념도]

지진 모니터링용 가속도 센서가 가져야 할 여러 특성 중에서 주요하게 고려해야 할 사항은 배경잡음(noise floor), 측정범위(full scale range), 출력감도(sensitivity, scale factor), 선형동적범위(linear dynamic range), 대역폭(bandwidth)등이다.

[지진계급 가속도 센서 대표 사양]

항목	단위	비고
배경잡음 NF	$g/\sqrt{Hz}$	대역폭에 따라 축별 잡음등가 분해능(NER, noise equivalent resolution) 결정
측정범위 FS	g	비선형 오차 범위를 만족하는 최대 측정 가능 입력 가속도
출력감도 SF	mV/g bits/g	Analog 출력일 경우 ADC(analog to digital converter)의 ENOB(effective number of bit) 고려
선형동적범위 DR	dB	$\mathrm{dB} = 20 \times \log \frac{FS}{NER}$
대역폭 BW	Hz	3dB 감쇄 주파수로 결정 SP(short period), LP(long-period), BB(broadband)로 구분

상기 사양을 만족하는 기존의 지진계용 센서는 현재 전량 수입에 의존하고 있는데, 대부분 부피와 전력소비가 크고, 가격도 높은 편이다. 특히 소형화 관점에서 한계가 있는데 일부 제품의 경우 단일 방향만 검출하기 때문에 3축을 측정하기 위해 공간상에 배치한다면 매우 부피가 큰 구성이 될 수 밖에 없다.

[상용 지진가속도 센서]

제품명/제조사	외관	사양
AK-AS3257A (Tokyo-Sokushin)		분해능: 100 μg_{rms} 측정범위: ±2.0g 외형: 150mm(ϕ) × 68mm
AK-ADA7 (mitutoyo)		측정범위: 2.5g 외형: 64.8mm(ϕ) × 72.4mm
393C (seismic ICP)		분해능: 100 μg_{rms} 측정범위: 2.5g 외형: 56mm(ϕ) × 56mm
KB12 (MMF)		측정범위: ±3.0g 외형: 48mm(ϕ) × 50mm

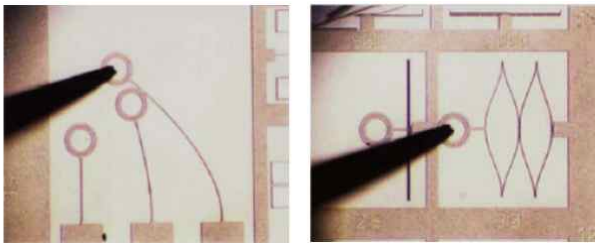
한편 건축물의 지진 모니터링을 위해선 다수의 센서 모듈을 장착해야 하므로 센서 모듈 자체의 크기와 가격이 중요한 이슈로 대두된다. 따라서 추후 지진계 수요가 폭발적으로 늘어날 시기를 대비해서 지진계급 센서 사양을 만족하는 저가의 소형 센서 개발이 매우 중요하다.

소형화와 저가격화 관점에서 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기술을 이용하면 silicon wafer에 반도체 가공을 통해 일괄 공정으로 다수의 센서를 제작할 수 있으므로 소형화와 가격 문제를 해결할 수 있다. 그러나 현재 상용 MEMS 센서는 대부분 모바일 기기용 제품으로 지진계급 사양과는 큰 차이가 있기 때문에 기술적으로 난이도가 매우 높은 개발이 요구된다.

나. MEMS 가속도 센서 고려 사항

MEMS 가속도 센서로 관성력에 의한 관성질량의 변위가 달라지는 것을 검출하기 위해 실리콘 소재를 반도체 공정 기술로 가공하여 제작하는 기계식 진동구조가 필요하다. 아래 그림에 보인 바와 같이 실리콘 재료의 기계적 성질은 철과 유사하기 때문에 질량과 스프링으로 구성되는 기계식 진동 구조를 만드는 것이 가능하다.

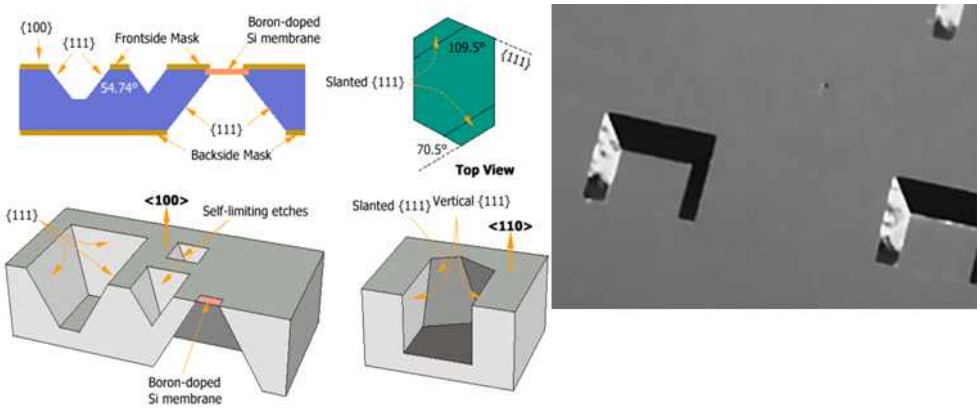
		Si	Steel
Yield strength	GPa	6.9	2.1
Young modulus	GPa	170.0	200.0
Density	t/m^3	2.3	7.9
Thermal conductivity	W/mK	157.0	33.0
Thermal expansion	ppm/K	2.3	17.3



[실리콘의 기계적 특성]

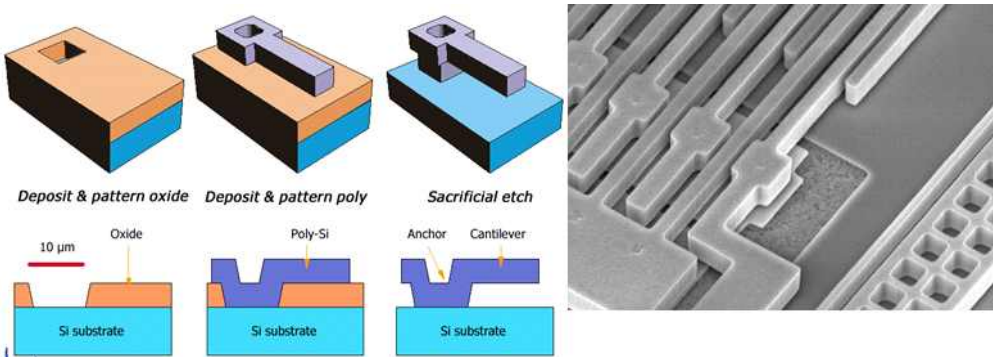
결국 미세가공(micro-machining)으로 소형화가 가능하고 일괄 공정으로 제작하므로 단가를 큰 폭으로 낮출 수 있다. 또한 전자회로와의 집적이 가능하기 때문에 궁극적으로 micro processor가 chip에 내장되는 smart sensor로의 발전도 기대할 수 있다.

실리콘 웨이퍼를 가공하는 기술은 크게 몸체 미세가공(Bulk micro-machining)과 표면 미세가공(surface micro-machining)으로 구분할 수 있는데, 몸체 미세가공은 실리콘의 결정구조를 이용하여 웨이퍼의 일정 영역을 식각하면서 제작하기 때문에 사이즈 감소에 제약이 있고 설계 자유도는 낮지만 단결정 실리콘의 안정적인 물성을 이용할 수 있고 웨이퍼 두께 전체를 관성질량으로 사용할 수 있다는 장점이 있다.



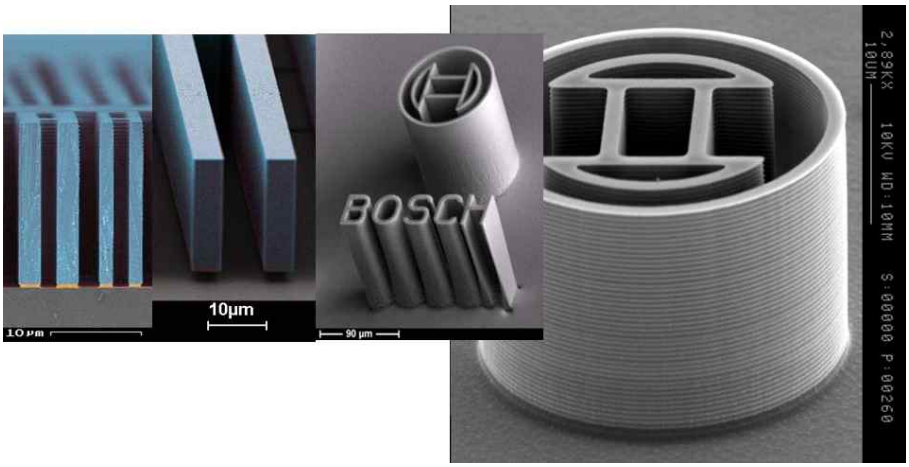
[몸체 미세가공(Bulk micro-machining) 개념도]

반면 표면 미세가공은 다양한 박막 증착과식각을 반복하면서 제작하기 때문에 소형화에 적합하고 설계 자유도는 높지만 박막의 기계적 성질이 안정적이지 않고 관성 질량을 크게 가져가기 어렵다는 단점이 있다.



[표면 미세가공(Surface micro-machining) 개념도]

표면 미세가공과 몸체 미세가공을 섞은 방식을 혼합 미세가공(Mixed micro-machining)이라고 하는데 단결정 실리콘을 고단면비(high aspect ratio)로 가공함으로서 재료의 안정성과 설계 자유도를 높일 수 있다는 장점을 모두 취할 수 있다. 이는 두꺼운 단결정 실리콘을 이방성으로 깊이 식각하는 DRIE(Deep reactive ion etching) 공정과 이를 수행하는 제조장비의 발전에 의해 가능해진 영역이다.



[혼합 미세가공(Mixed micro-machining) 개념도]

본 과제는 전술한 혼합 미세가공(Mixed micro-machining) 기술을 이용하여 지진계급 MEMS 가속도 센서를 제작하고자 하며 개발할 MEMS 가속도 센서의 성능 목표 사양을 정리하면 아래와 같다.

[지진계급 가속도 센서 목표 사양]

항목	단위	사양	비고
측정범위(FS)	g	±2	
축별 잡음 등가분해능(NER)	g	4 μg	DR 120 dB
대역폭(BW)	Hz	0.1 ~ 50	

가속도 센서의 대역폭은 기계식 고유진동수(resonant frequency, f_a)보다 낮은 주파수로 결정되는데 일반적으로 MEMS 가속도 센서는 관성 질량(M)이 작기 때문에 고유 진동수를 높일 수 있어서 대역폭의 제한은 거의 받지 않는다.

$$F_a(t) = M \cdot a(t) = M\frac{d^2y(t)}{dt^2} + b\frac{dy(t)}{dt} + K_m y(t)$$

$$\rightarrow \mathrm{H}(s) = (s) = \frac{Y(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{b}{M}s + \frac{K_m}{M}} = \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_o}{Q}s + \omega_o{}^2}$$

$$\rightarrow \omega_o = \sqrt{\frac{K_m}{M}} = 2\pi f_o;\ resonant\ frequency$$

그러나 센서의 출력 특성을 고려할 때 출력 감도(SF)를 높이는 것이 유리한데 이는 고유진동수의 제곱에 반비례하므로 기계 진동구조 설계 단계에서 trade off가 필요하다. 그러나 MEMS 센서는 기본적으로 관성질량(M)이 작기 때문에 감도의 향상은 제한적이어서 기계적 강성(K_m)을 가능한 줄여야 하는데, 이렇게 되면 스프링 구조의 폭이 줄고 길이가 늘어나야 하므로 가공이 어려워지고 공정 오차가 늘어나는 문제가 존재한다.

$$F_a(t) = M \cdot a = K_m y$$

$$\rightarrow \mathrm{a} = \frac{K_m y}{M}$$

$$\rightarrow \mathrm{SF} = \frac{y}{a} = \frac{M}{K_m} = \frac{1}{{\omega_o}^2};\ mechanical\ sensitivity$$

한편 MEMS 센서에서 가장 문제가 되는 것은 잡음의 크기인데, 크게 기계적 잡음과 전기적 잡음으로 구분할 수 있다. 이 중에서 전기적 잡음은 센서 interface 회로에서 발생하는 잡음과 관성질량의 위치변화를 검출하는 readout 회로에서의 잡음이 주 원인이며 이는 기존방식의 지진계나 MEMS 지진 가속도 센서 모두 동일한 수준이다. 반면 기계식 잡음은 크게 가공 단계에서 발생하는 스프링 구조의 결함에 의한 부분과 Brownian 거동에 의한 잡음으로 구분할 수 있는데, 이는 관성 질량(M)의 크기가 적을수록 크기 때문에 MEMS 지진 가속도 센서가 크게 불리한 부분이다.

$$\mathrm{BNEA} = \sqrt{\frac{8\pi\kappa_B T f_o}{M \cdot Q}};\ Brownian\ Noise\ Equivalent\ Acce$$

$$\kappa_B = 1.38 \times 10^{-23}\ J/K;\ Boltzmann\ constant$$

$$T = 300\ K;\ room\ temperature$$

$$f_o = 50\ Hz;\ Bandwidth$$

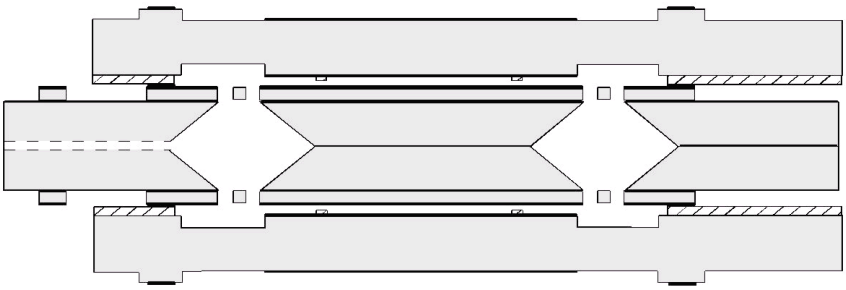
$$Q = 1{,}000;\ Quality\ factor$$

$$M = 1\ mg;\ inertial\ mass$$

[가속도 센서 비교]

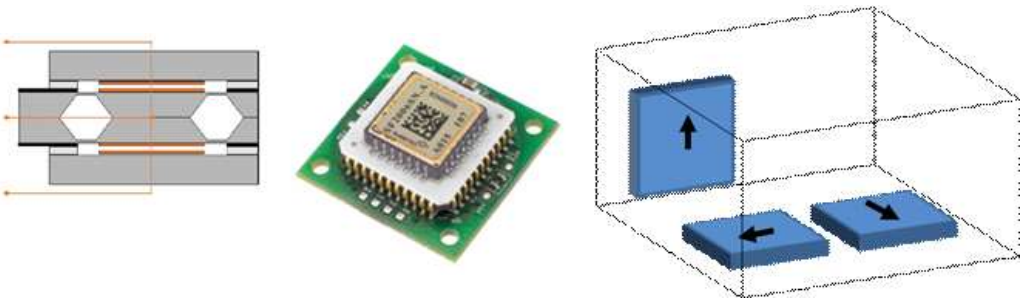
구분	기존 가속도 센서	MEMS 가속도 센서	비고
관성 질량 크기	대형($> 0.1\ kg$)	소형($< 1 \times 10^{-3}$ kg)	
기계적 잡음	매우 적음	주 잡음	
전기적 잡음	주 잡음		동일 수준

결국 MEMS 방식 가속도 센서는 기계적 잡음을 얼마나 줄일 수 있느냐가 관건인데 스프링 구조의 가공오차에 의한 부분은 공정 기술이 발전함에 따라 상당 부분 해결된 상황이기 때문에 적은 질량에 의한 Brownian 거동 잡음을 줄이는 것이 중요하다. 이를 위해 C社의 경우 실리콘 웨이퍼를 전체 두께를 질량 구조로 사용하는 몸체 미세가공(Bulk micro machining) 방식을 사용해서 관성질량을 1×10^{-2} kg 까지 증가시켜서 해결하고 있다.



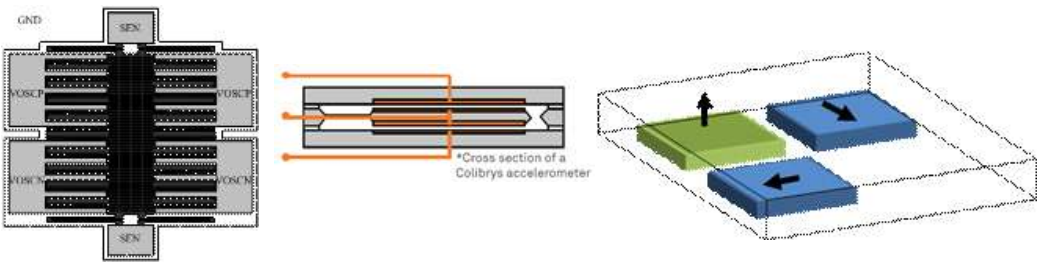
[C 社의 MEMS 가속도 센서 구조 단면도]

그러나 MEMS 가속도 센서를 채용하는 주 목적인 센서 모듈의 소형화 관점에서 살펴보면 단일 센서는 소형이지만 3축을 측정하는 모듈의 부피는 커질 수 밖에 없다. 아래 그림에 보인 것과 같이 C社의 가속도 센서는 기판에 수직한 방향으로만 작동하기 때문에 3축 감지를 위해선 동일한 센서 3개를 공간상에 서로 직교하게 조립해야 한다.



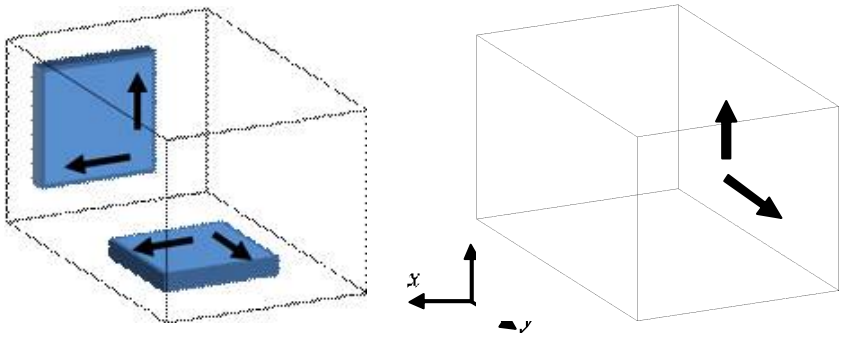
[C社의 수직형 MEMS 가속도 센서를 이용한 3축 지진계 모듈 구성]

따라서 실리콘 웨이퍼에 수평 방향의 가속도를 검출할 수 있는 센서를 추가로 개발해서 2개를 평면상에 직교하게 배치하고 3개의 센서를 평면상에 조립할 수 있으므로 전체form factor가 크게 개선될 수 있다.



[수평형과 수직형 MEMS 가속도계를 이용한 3축 지진계 모듈 구성]

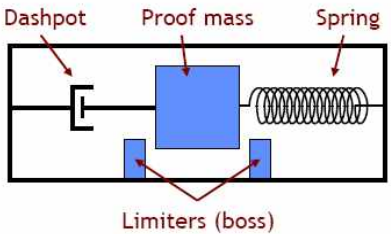
그러나 단기간의 연구과제를 통해 수평형과 수직형 가속도 센서를 모두 개발하는 것은 개발 업무의 과다와 실패의 위험이 높아지는 것이기 때문에 수평 방향 2축 가속도 센서를 개발해서 이를 2개 직교 배치하는 방식으로 개발 방향을 설정하였다.



[2개의 수평형 MEMS 가속도계를 이용한 지진계 모듈 구성]

다. 용량형 MEMS 가속도 센서 선정 배경

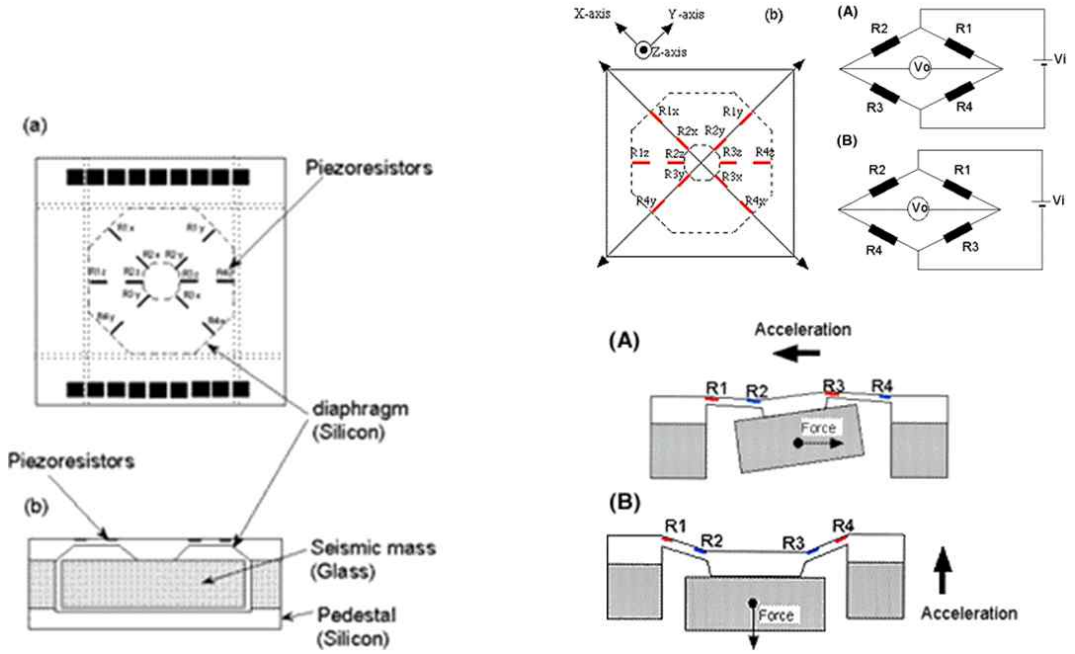
MEMS 가속도 센서란 관성력에 의한 관성질량의 변위가 달라지는 진동 구조로부터 이 변위를 전기적으로 변환하기 위해선 압저항형(piezo resistive), 압전형(piezo electric), 용량형(capacitive), 열대류형(thermal convection), 터널링형(tunneling), 공진형(resonant) 등 다양한 방식이 존재한다.



[가속도 센서용 진동구조 개념도]

압저항형(piezo resistive) MEMS 가속도 센서는 입력 가속도(a)에 의한 관성력(F_a)으로 관성질량의 위치(Δu)가 변할 때 스프링 구조에 발생하는 인장률$(\text{strain}, \Delta\epsilon)$의 변화에 따라 저항변화$(\Delta R)$ 가 발생하도록압저항을 심어놓은 구조이다. 저항의 변화는 휘스톤브릿지(Wheatstone bridge)를 구성하여 전압변화로 출력할 수 있다. 압저항형은 기본적으로 저항 방식이기 때문에 온도 변화에 민감하다는 단점이 있다.

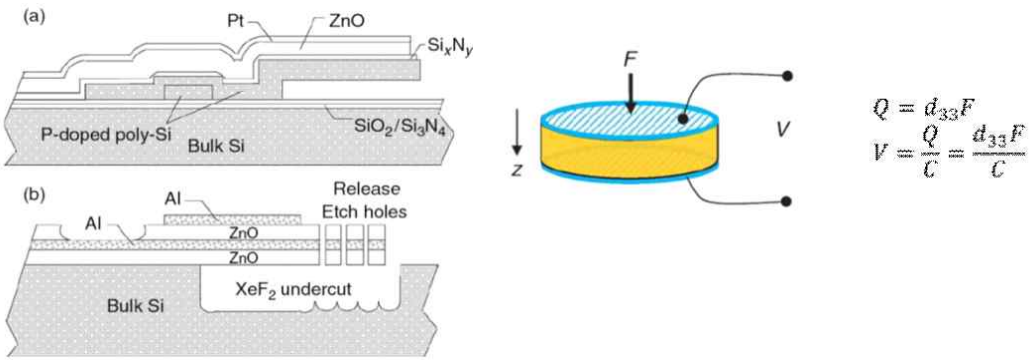
$$acceleration, a \rightarrow F_a \rightarrow \Delta u \rightarrow \Delta\epsilon \rightarrow \Delta R \rightarrow \Delta V$$



[압저항형 MEMS 가속도 센서]

압전형(piezo electric) MEMS 가속도 센서는 압저항형과 동일한데 인장률$(\text{strain}, \Delta\epsilon)$의 변화에 의해 유도되는 전하를 검출하는 방식이다. 이를 위해 진동 구조물에 압전물질을 형성해야 하는데 물질의 안정성 면에서 MEMS 공정의 난이도가 높아진다. 또한 압전체는 누설성분이 있기 때문에 DC 검출이 어렵다는 단점이 있다.

$$acceleration, a \rightarrow F_a \rightarrow \Delta u \rightarrow \Delta\epsilon \rightarrow \Delta Q \rightarrow \Delta V$$



[압전형 MEMS 가속도 센서]

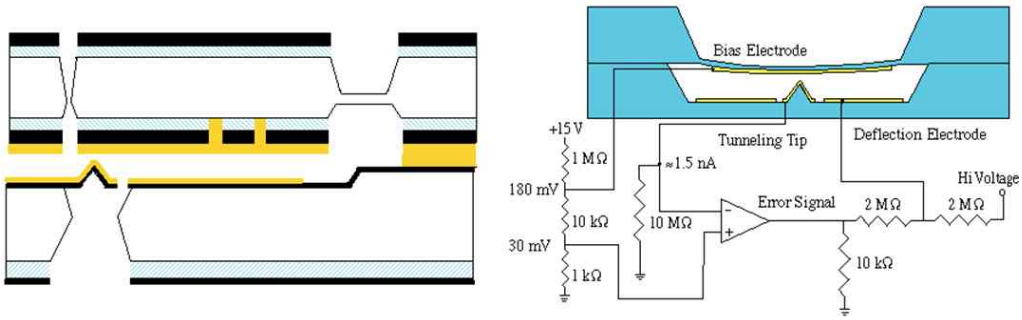
터널링형(tunneling) MEMS 가속도 센서는 극히 좁은 간극을 통해 흐르는 터널링 전류가 간극의 지수함수로 결정되는 원리를 사용한다. 터널링 전류는 매우 콘 폭으로 변하지만 비선형성이 크기 때문에 일정 간극을 유지하도록 force balancing을 적용해야 한다. 따라서 고성능 센서로 사용할 수 있지만 3축 센서 구현이 어렵고 터널링 전류를 형성하는 tip 부분이 내충격에 취약하다. 또한 터널링 특성 자체의 경시 변화가 존재하기 때문에 바이어스 안정도가 크게 떨어지는 단점이 존재한다.

$$acceleration, a \rightarrow F_a \rightarrow \Delta u \rightarrow \Delta I$$

$$I_T = V_B\, exp\left(-\alpha_I \sqrt{\phi} x_{tg}\right); tunneling\ current$$

$$V_B: tunneling\ bias\ across\ electrode\ gap, \alpha_I = 1.025, \phi = height\ of\ tunneling\ barrier$$

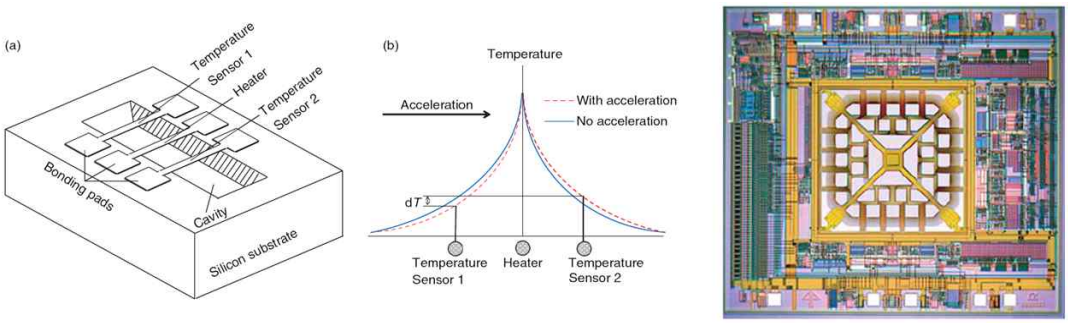
$$x_{tg} = minimum\ tunneling\ gap$$



[터널링형 MEMS 가속도 센서]

열 대류형(thermal convection) MEMS 가속도 센서는 내부 열원에 의해 온도 구배가 일정하게 유지되는 상태에서 외부 가속도(a)가 인가되면 내부 공기의 대류 현상으로 온도 구배가 변하는 것을 측정하는 방식이다. 이는 IC와 MEMS 구조를 집적형으로 형태로 만들수 있고, 기계적으로 움직이는 부분이 공기이기 때문에 구조적으로 매우 튼튼하다. 그러나 온도 변화 특성상 고주파 응답 특성이 나쁘고 구조적으로 3축을 단일 평면상에 제작할 수 없다는 단점이 있다.

$$acceleration, a \rightarrow F_a \rightarrow \Delta T$$

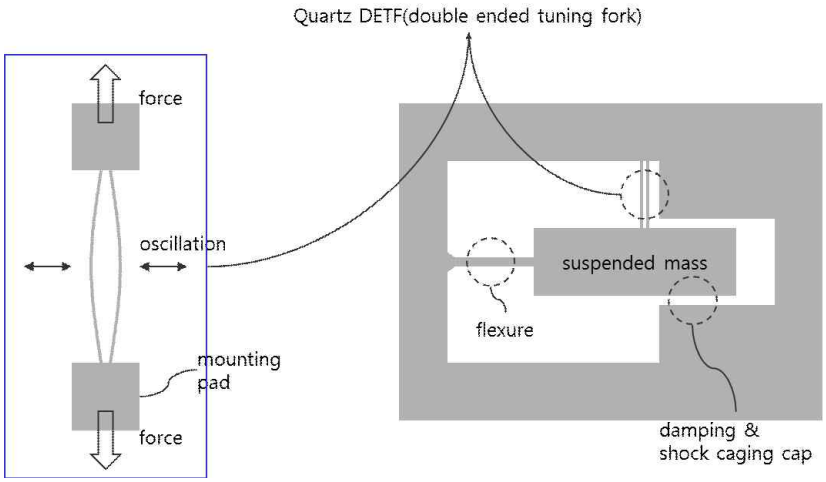


[열대류형 MEMS 가속도 센서]

공진형(resonant) MEMS 가속도 센서는 입력 가속도(a)에 의한 관성력(F_a)으로 관성질량의 위치(Δu)가 변할 때 여기에 연결된 진동 구조에 작용하는 인장률($\Delta\epsilon$) 의 변화로 인해 기계적 강성이 달라져서 고유진동수(f_r)가 변하는 방식이다. 공진형의 경우 출력이 주파수 변화로 나타나기 때문에 그 자체로 디지털 출력이 가능하지만 주파수 카운터를 이용해서 측정해

야 하므로 대역폭을 키우는 데 한계가 있다.

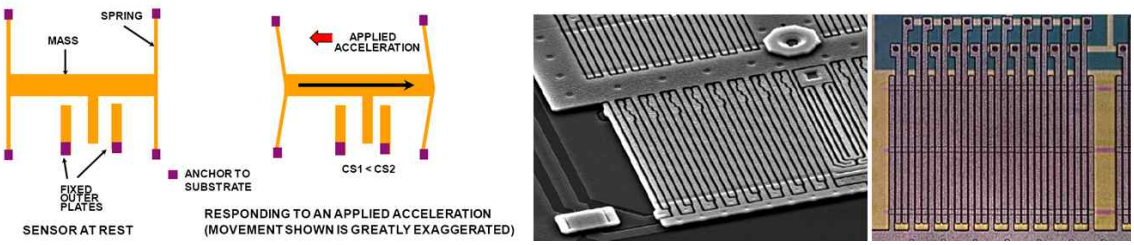
$$acceleration, a \rightarrow F_a \rightarrow \Delta u \rightarrow \Delta \epsilon \rightarrow \Delta K_m \rightarrow \Delta f_r$$



[공진형 MEMS 가속도 센서]

용량형(capacitive) MEMS 가속도 센서는 입력 가속도(a)에 의한 관성력(F_a)으로 관성질량의 위치(Δu)가 변할 때 이 변위에 따라 달라지는 용량 변화(ΔC)를 검출하는 방식이다. 변위에 따른 용량의 변화는 비선형적이지만 범위를 제한하면 선형적으로 작동시킬 수 있고 정전 액튜에이터를 이용하여 force balancing 방식으로 구현이 가능하다. 또한 차동 출력 방식으로 구성할 수 있어서 외부 배경 잡음에 영향을 적게 받는다는 장점도 존재한다. 특히 용량 변화는 온도 변화에 둔감하며 제조 공정도 미세 가공기술에 가장 적합하다. 그러나 미세한 용량 변화로부터 전압 출력을 형성하는 front end readout 회로가 복잡해지는 문제가 있지만 이 부분은 IC 기술의 발전으로 크게 개선되는 상황이다. 이러한 이유로 현재 상용 가속도 센서의 대부분은 용량형 방식을 채용하고 있다.

$$acceleration, a \rightarrow F_a \rightarrow \Delta u \rightarrow \Delta C$$



[용량형 MEMS 가속도 센서]

앞에서 설명한 감지 방식별 MEMS 가속도 센서의 특성을 정리하면 아래와 같다. 센서 개발 측면에서 용량형 MEMS 센서가 가장 가능성이 높은 후보임을 알 수 있다.

[감지 방식별 MEMS 가속도 특성 비교]

구분	압전	압저항	용량 (MEMS)	터널링	공진	열대류
3축 구현		O	O	X		X
미세가공 용이성			O	X	O	O
경시변화				X		
주파수 응답 특성	X	O	O		X	X
온도특성		X	O		O	
Force balancing 구현			O	O		
interface 회로 용이성	O	O				
고감도 센서 구현	O			O		
저전력 센서 구현		X		X		X
회로 일체형 센서 구현						O

2. MEMS 기반 3축 지진가속도계 센서 모듈 개발

가. MEMS 기반 3축 지진가속도 센서 모듈 개발 내용

(1) 120 dB급 3축 지진계 모듈 개발

건물 진동 감지용 지진계의 표준 규격은 아래 표와 같다.

[지진계 표준 규격]

항목	표준규격	비고
주파수 영역	· 최소 주파수는 0.1Hz 이하, 최대 주파수 50Hz 이상 · 주어진 주파수 대역에서 지반운동을 3dB 이내의 정확도로 감지	· 0.1Hz에서 50Hz까지 평활한 주파수 응답 반응 유지해야 함
동적 범위	· 고시 기준일 이후에 신규로 구매하는 지진가속도계의 표준규격은 120dB 이상 · 해당 시설물의 고유주파수(또는 고유주기)를 고려하여 선택해야 함 · 최대 계측 지진가속도 2.0g	· 고시 기준일 이전에 구매한 지진가속도계는 90dB 이상
출력전압선형비 (linearity)	· 1% 이내	· 지반운동 크기의 왜곡 현상 방지
성분간 감도오차	· 2% 이내	· 정확한 벡터 성분을 유추할 수 있어야 함
감쇠율	· 60～70%	
출력전압	· 기록계의 최대 입력 전압 이내	· 계측된 데이터의 왜곡 방지
출력 방식	· 기록계와의 거리가 50m 이상인 경우 차동출력방식 적용	· 노이즈에 따른 신호 왜곡 방지

지진계 모듈에 내장할 MEMS 센서는 120dB급 단축 가속도 센서인 Colibrys SF1600S.A를 사용하였다. 이는 용량형 MEMS 기술로 제작된 가속도 센서 구조에 전용의 mixed signal ASIC chip과 기타 부가회로가 multi chip packaging 형태로 조립된 구조로 특히 switched capacitor 구동을 위한 clock과 정전원이 내장되어 별도의 회로 구성이 요구되지 않는다. 센서간의 정렬은 housing에 설치한 장착 홀을 통해 이루어지며 통상 타축 감도 억제율을 46dB 이상 확보할 수 있다.

아래는 SF1600SA 부품의 사양을 정리한 것으로 지진계에서 가장 중요한 사양은 동적 범위인데 SF 1600SA의 경우 최대 입력범위 ±3g에 잡음 수준이 $0.3\mu G/\sqrt{Hz}$ 수준으로 대역폭을 50 Hz로 제한한다면 동적 범위를 125 dB까지 구현할 수 있다.

$$동적범위 = 20\log_{10}\left(\frac{센서신호의최대값}{배경잡음의표준편차}\right)$$

[SF1600SA 가속도 센서 사양]

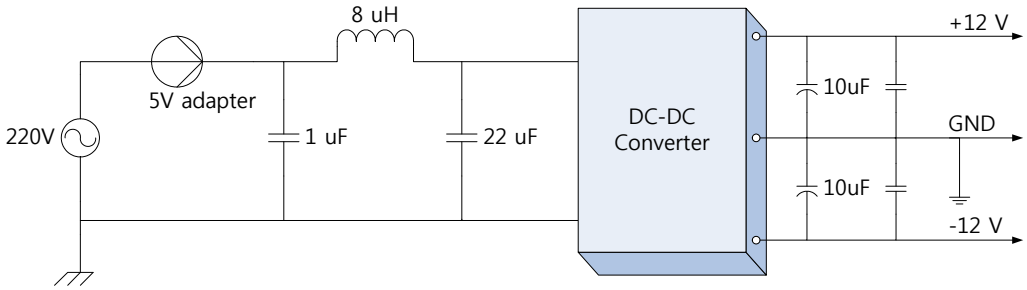
항목	단위	사양	비고
출력 범위	g_{peak}	±3	
출력 감도	V/g	2.4±0.24	차동 출력
동적 범위	dB	117	100 Hz 대역폭 기준
잡음 밀도	$\mu g/\sqrt{Hz}$	0.3	
주파수 응답	Hz	DC～1.500	3dB 감쇄 기준
타축응답 감쇄율	dB	46	
비선형 오차	%	0.2	

한편 지진계 모듈에서 출력되는 analog 신호를 digital로 변환하여 필터링을 거친 후 필요한 data를 logger에 저장하는 과정에서 양자화 잡음을 충분히 낮게 가져가기 위해 24bit ADC가 필요하다. 이를 위해 SDM(sigma delta modulation) 방식의 ADC가 내장된 DAQ H/W인 NI-9239를 선정하였다. NI-9239는 USB platform에서 작동하며 PXI 제품군에 비해 소형이기 때문에 note PC에 연결하면 외부에서도 쉽게 계측이 가능하다는 장점이 있으며 Wireless DAQ를 지원하므로 향후 무선 data logger로 확장이 가능 하다는 장점이 있다.

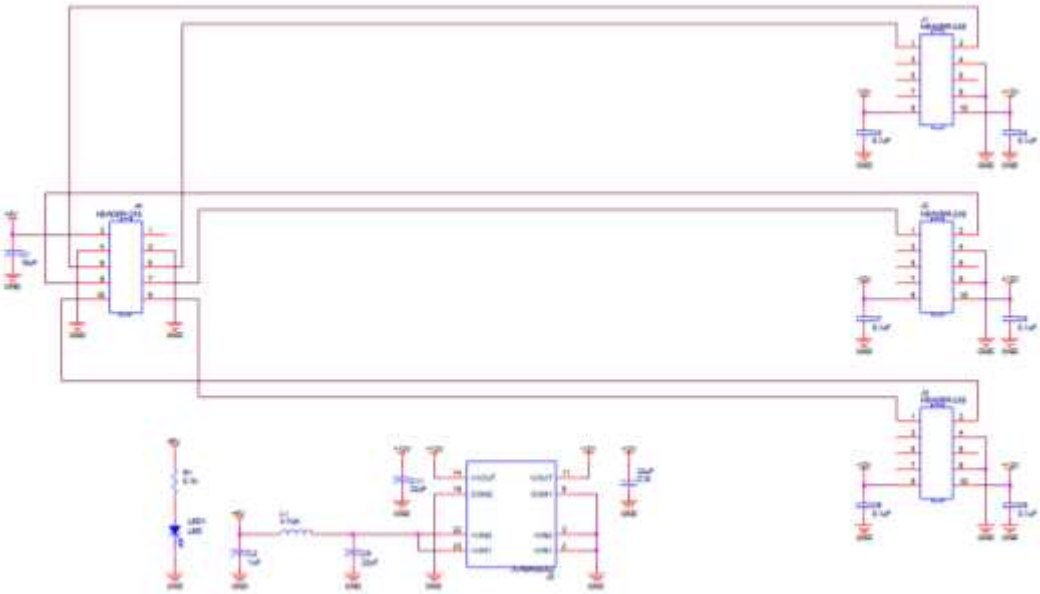
[NI-9239 사양]

항목	단위	사양	비고
입력 채널	channel	4	채널간 절연
ADC 분해능	bit	24	Sigma delta modulation 방식
입력 범위	V	±10.5	AI_+~AI_-
입력 잡음	μV_{rms}	70	
샘플링 속도	kS/s	1.613~50	연속 샘플링
공통잡음 제거비	dB	126	60 Hz 입력 기준

고성능 지진계용 센서는 전원 잡음에 민감하므로 센서 모듈에 최대한 가까운 위치에서 ±12V의 전원을 공급할 수 있도록 상용 전원에서 어댑터로 +5V 전원을 만든 뒤 이를 DC-DC 변환을 통해 안정된 전원을 공급하도록 구성하였다. 특히 DC-DC 컨버터는 스위칭 잡음이 방사될 수 있으므로 입력단에 π 필터를 부가하였다.



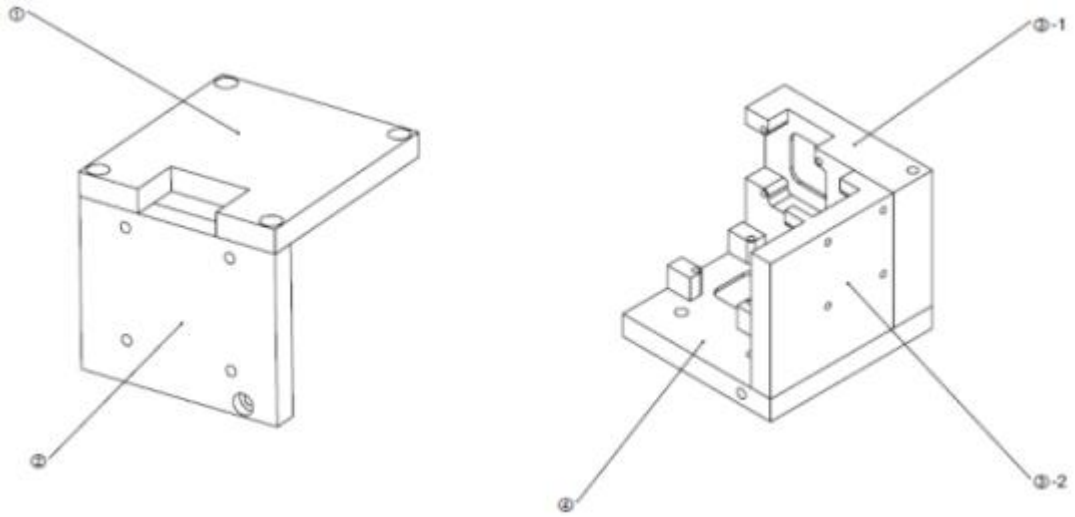
[센서 모듈 전원 공급부]



[전원 및 커넥터 보드]

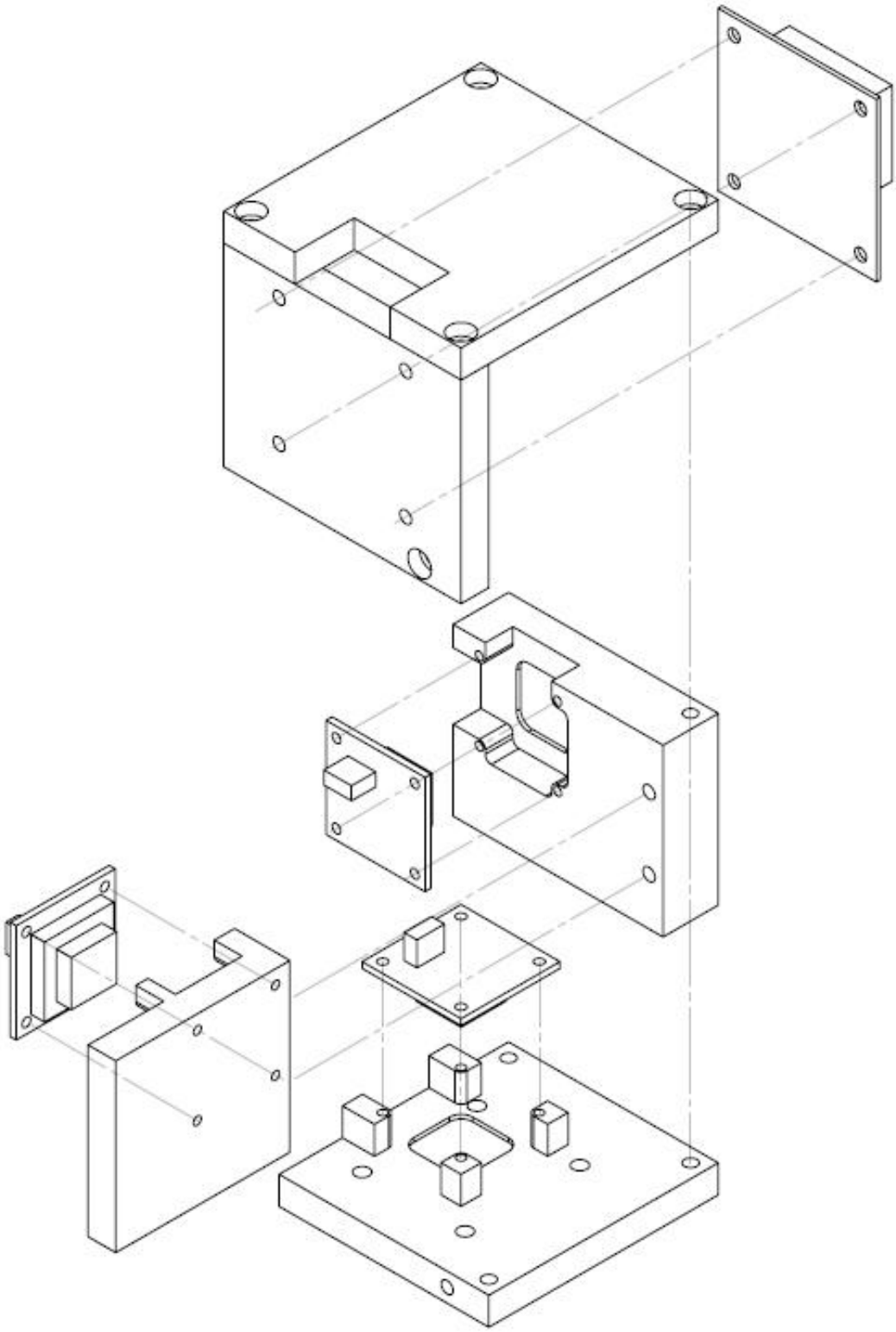
DAQ 소비전력이 최대 780mW이고 단축 MEMS 가속도 센서가 140mW(±6V×11.7mA)를 요하므로 전체 소요 전력은 780mW+140mW×3(3축)=1.12W이다. 여유 전력을 감안하여 5V 어댑터의 용량은 5V×1.5A=7.5W, DC-DC 변환기는 ±12V×170mA=4W 급으로 구성하였다.

한편 SF1600SA는 단축 센서 이므로 3축의 가속도를 계측하기 위해서 공간상에 정확한 직교 상태를 유지하면서 3개의 센서를 장착할 수 있는 기구물을 제작해야 한다. 특히 센서 모듈을 소형화 하기 위해 전원 모듈을 내부에 탑재하기 위한 최소 크기의 장착용 기구물을 설계 제작하였다.



[센서 장착용 기구물]

[전원/커넥터 보드 장착상태]

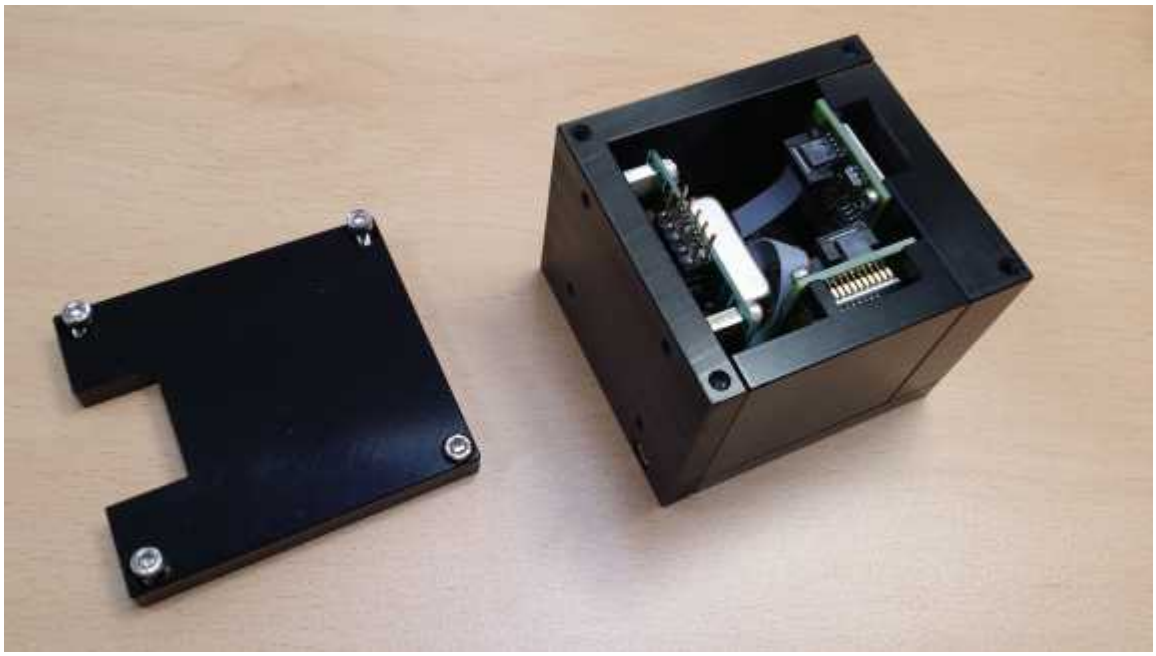


[센서 모듈 조립 겨냥도]

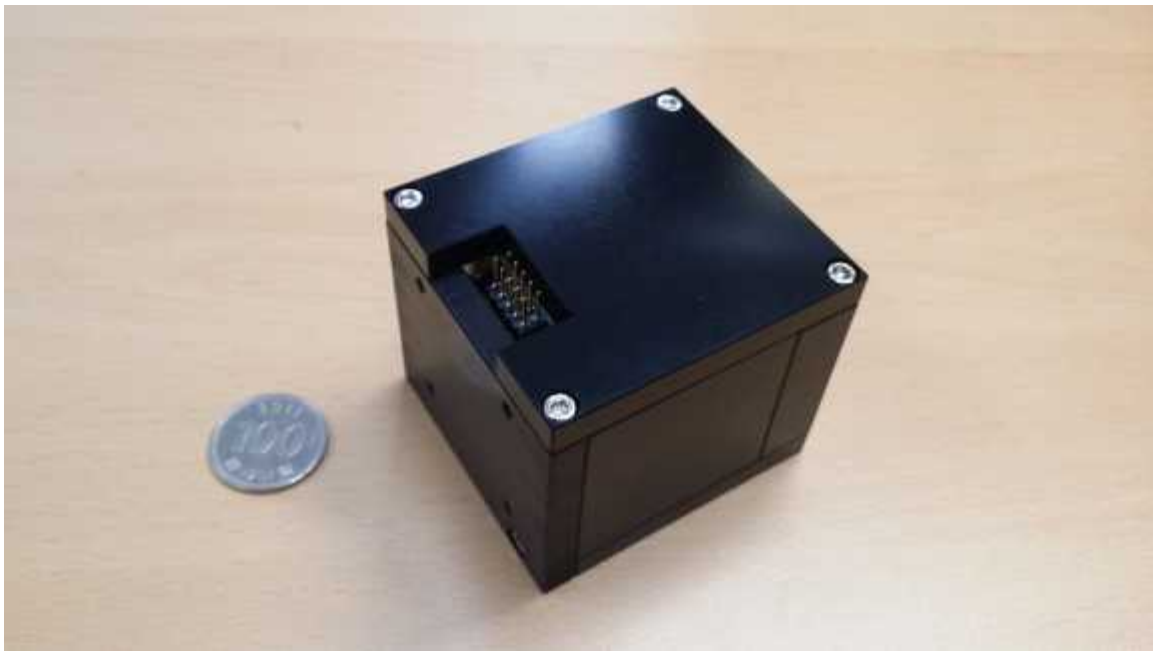
제작 완료된 지진감지 센서 모듈의 크기는 $65 \times 60 \times 56\,mm^3$으로 아래 그림에 보인 바와 같이 기존 센서 모듈에 비해 월등히 작음음 알 수 있다.

[기존 방식의 지진계 센서 모듈 및 data logger]

[기존 방식의 지진계 센서 모듈]



[지진계 모듈 prototype 내부]



[지진계 모듈 prototype 외관]

나. 실내 시험을 통한 모듈 검증

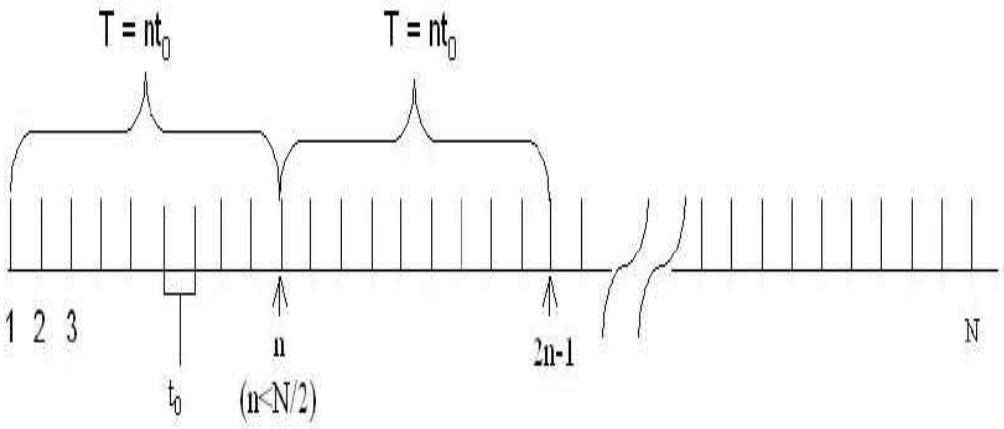
(1) 지진 계측 잡음 저감 필터 알고리즘

(가) Allan 분산 방법에 의한 잡음 분석

불규칙 잡음 식별 방법으로 현재 널리 사용되고 있는 Allan 분산 방법을 이용한다. Allan 분산 방법은 1960년대 세슘 빔 주파수 표준의 오차 확률에 대한 연구를 통해 David Allan에 의해 제시된 방법으로 지금은 주로 정밀한 측정장치의 오차 특성을 분석하는데 적용된다. 센서 오차는 크게 센서의 입출력 모델을 세워 모델의 계수들이 시 불변이라는 가정하에 여러 입력을 가해 모델의 계수를 추정할 수 있는 정규 오차와 오차들의 특성을 식으로 나타내기 곤란하여 통계적 특성으로 표현할 수 있는 불규칙 오차로 구분된다. 불규칙오차로는 백색 잡음, 양자화 잡음, 바이어스 불안정, 랜덤 워크, 회전 램프, 정현파 오차 등을 들 수 있다. Allan 분산 방법은 이러한 오차들을 간단하게 특성화하여 식별할 수 있다는 장점을 가지고 있다[Pines, 1997][Allan, 1966][Tehrani, 1983].

Allan 분산 방법에 대해서 알아보자[Tehrani, 1983][IEEE 1997]. Allan 분산 방법을 통해 오차를 분석하기 위해서 다음과 같은 과정을 수행하여야 한다. 먼저 표본 집단을 의미하는 클러스터(cluster)를 센서 출력들을 이용하여 형성한다. 다음으로 클러스터들 각각의 평균을 구하고 인접한 두 클러스터 평균의 차를 계산하고 이들 평균의 차의 분산을 Allan 분산으로 정의한다. 센서 출력에 포함된 오차 요소들과 PSD와의 관계를 클러스터 시간 T의 함수로 나타내고 이를 오차의 Allan 분산, $\sigma^2(T)$를 T에 대하여 도시한다. 이를 통해 센서 데이터에 포함되어 있는 오차들을 식별하고 오차 계수를 추정할 수 있다.

센서 출력을 Ω, 연속적인 전체 데이터 수를 N이라고 했을 때 다음과 같이 집단 형태의 클러스터를 만들 수 있다.



[데이터 클러스터]

클러스터 내의 데이타 수를 n, t_0는 샘플링 주기, 그리고 T는 한 클러스터 데이터에 해당하는 시간이다. k번째 클러스터 내에 있는 데이터들의 평균 $\overline{\Omega}_k(T)$를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\overline{\Omega}_k(T) = \frac{1}{T}\int_{t_k}^{t_k+T} \Omega(t)dt \qquad (1\text{-}1)$$

인접한 두 클러스터 평균들의 차는 랜덤 변수의 집합을 형성하는데 이의 분산을 Allan 분산이라 하며 식 (1-2)와 같이 계산된다.

$$\sigma^2(T) = E\left\{\left[\overline{\Omega}_{k+1}(T) - \overline{\Omega}_k(T)\right]^2\right\} \qquad (1\text{-}2)$$

식 (1-2)의 Allan분산과 오차 원들의 주파수 특성과의 관계는 식 (1-3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma^2(T) = 4\int_0^{\infty} S_\Omega(f)\frac{\sin^4(\pi f T)}{(\pi f T)^2}df \qquad (1\text{-}3)$$

여기에서 f는 Hz단위의 주파수 그리고 $S_\Omega(f)$는 Ω의 PSD(Power Spectral Density)이다.
이제 각 불규칙 오차별로 PSD를 알아보고 Allan분산을 유도한다.

① 양자화 오차(quantization noise)

속도 센서의 양자화 오차는 PSD가 다음과 같이 주어진다.

$$S_\theta(f) \approx t_0 Q_Z^2 \ \ (f < \frac{1}{2t_0}) \qquad (1\text{-}4)$$

여기에서 Q_Z는 양자화오차 계수이다. 식 (1-4)는 PSD를 표시한 주파수 f가 샘플링 주파수의 1/2크기 보다 작을 때 성립한다. 만약 가속도 PSD를 구하기 위해서는 다음과 같은 속도 PSD와 가속도 PSD의 관계를 이용하면 된다.

$$S_\Omega(f) = (2\pi f)^2 S_\theta(f) \qquad (1\text{-}5)$$

그러므로 속도에 양자화오차가 식 (1-4)인 경우 가속도의 PSD는 다음과 같이 표현된다.

$$S_\Omega(f) \approx (2\pi f)^2 t_0 Q_Z^2 \ \ (f < \frac{1}{2t_0}) \qquad (1\text{-}6)$$

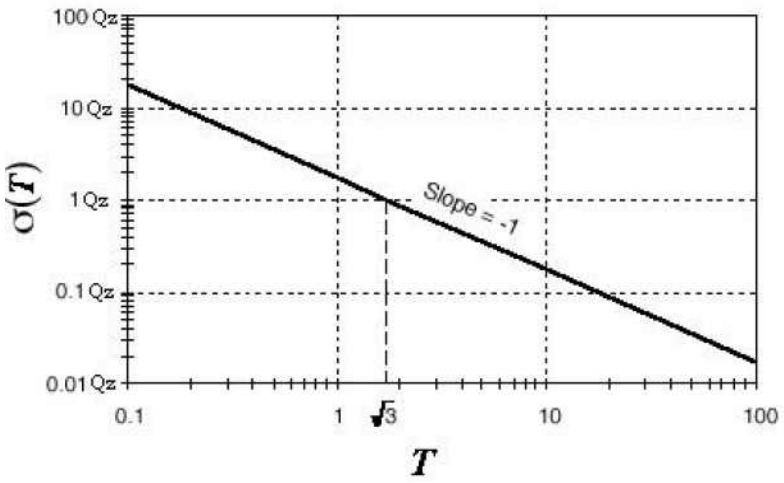
식 (1-6)을 식 (1-3)에 대입하여 Allan 분산을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma^2(T) = \frac{3Q_Z^2}{T^2} \qquad (1\text{-}7)$$

따라서 root Allan 분산은 다음과 같다.

$$\sigma(T) = \frac{\sqrt{3}\,Q_Z}{T} \qquad (1\text{-}8)$$

양자화 오차에 대한 root Allan 분산을 클러스터 주기 T에 대하여 log-log 그림을 그림을 다음과 같다.



[양자화 오차의 root Allan 분산]

그림에서 기울기는 -1이며 $T = \sqrt{3}$에서 root Allan 분산을 읽으면 양자화오차 계수 Q_Z를 구할 수 있다.

② 속도 랜덤 워크(velocity random walk) = 가속도 백색잡음(acceleration white noise)

속도 랜덤 워크는 속도의 미분 즉 가속도에 포함된 백색잡음 성분을 의미한다. 이 오차에 대한 PSD는 다음과 같다.

$$S_\Omega(f) = Q_{wh}^2 \qquad (1\text{-}9)$$

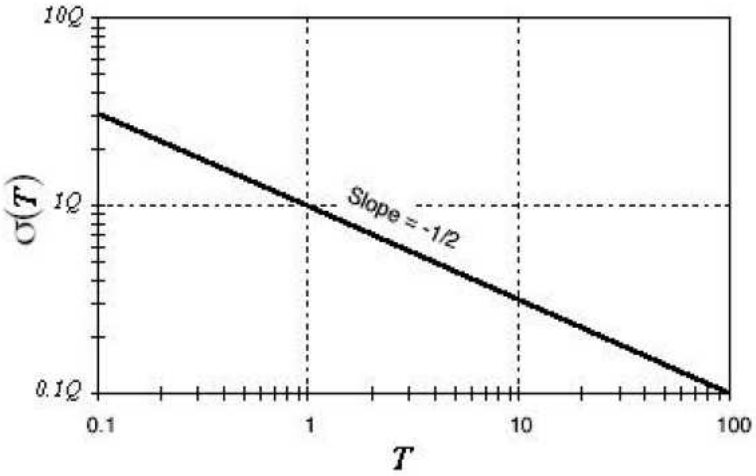
여기에서 Q_{wh}는 속도 랜덤워크 오차 계수이다. 식 (1-9)를 식 (1-3)에 대입하여 Allan 분산을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma^2(T) = \frac{Q_{wh}^2}{T} \qquad (1\text{-}10)$$

따라서 root Allan 분산은 다음과 같다.

$$\sigma(T) = \frac{Q_{wh}}{\sqrt{T}} \qquad (1\text{-}11)$$

속도 랜덤워크에 대한 root Allan 분산을 클러스터 주기 T에 대하여 log-log 그림을 그림을 다음과 같다.



[속도 랜덤 워크 오차의 root Allan 분산]

그림에서 기울기는 -1/2이며 $T=1$에서 root Allan 분산을 읽으면 속도 랜덤워크 오차 계수 Q_{wh}를 구할 수 있다.

③ 바이어스 불안정성(bias instability)

바이어스 불안정성은 저주파에서 바이어스가 섭동(perturbation)이 발생하는 것으로서 이 오차에 대한 PSD는 다음과 같다.

$$S_{\Omega}(f)=\begin{cases}\dfrac{B^2}{2f} & (f \le f_0)\\ 0 & (f > f_0)\end{cases} \qquad (1\text{-}12)$$

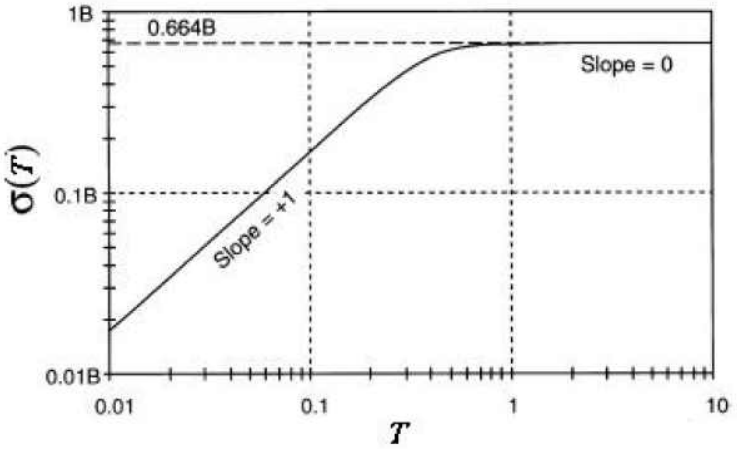
여기에서 B는 바이어스 불안정 오차 계수이며 f_0는 차단 주파수(cutoff frequency)다. 식 (1-12)를 식 (1-3)에 대입하여 Allan 분산을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma^2(T)=\frac{2B^2}{\pi}\left[\ln 2-\frac{\sin^3 x}{2x^2}(\sin x+4x\cos x)+C_i(2x)-C_i(4x)\right] \qquad (1\text{-}13)$$

여기에서 $x=\pi f_0 T$이며 C_i는 x에 대한 특별한 형태의 함수이다. 식 (1-13)을 root Allan 분산을 T의 구간에 따라 구해보면 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\sigma(T)\approx\begin{cases}0 & (T \ll \dfrac{1}{f_0})\\ 0.664B & (T \gg \dfrac{1}{f_0})\end{cases} \qquad (1\text{-}14)$$

바이어스 불안정성에 대한 root Allan 분산을 $f_0=1$로 두고 클러스터 주기 T에 대하여 log-log 그림을 그리면 다음과 같다. $T \ll 1/f_0$에서 root Allan 분산이 기울기 1로 증가하다 기울기 0에 도달함을 알 수 있다.



[바이어스 불안정성 오차의 root Allan 분산]

④ 가속도 랜덤 워크(acceleration random walk)

가속도 랜덤 워크는 가속도의 미분이 백색잡음이 되는 오차를 의미한다. 이 오차에 대한 PSD는 다음과 같다.

$$S_{\Omega}(f) = \left(\frac{K}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{f^2} \qquad (1\text{-}15)$$

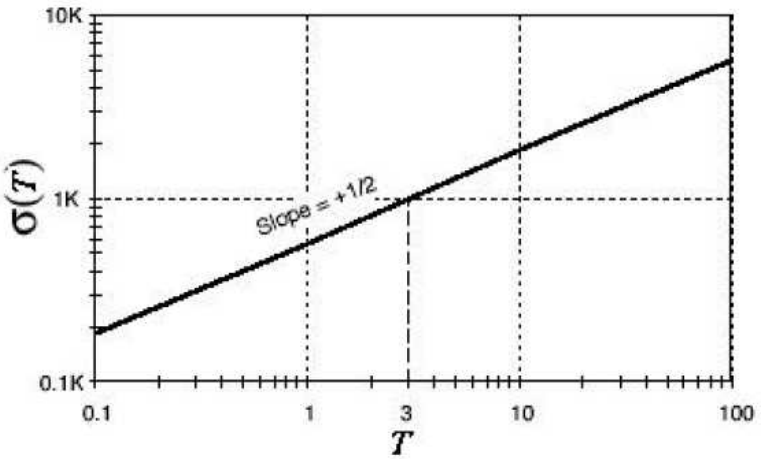
여기에서 K는 가속도 랜덤워크 오차 계수이다. 식 (1-15)를 식 (1-3)에 대입하여 Allan 분산을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma^2(T) = \frac{K^2 T}{3} \qquad (1\text{-}16)$$

따라서 root Allan 분산은 다음과 같다.

$$\sigma(T) = K\sqrt{\frac{T}{3}} \qquad (1\text{-}17)$$

가속도 랜덤워크에 대한 root Allan 분산을 클러스터 주기 T에 대하여 log-log 그림을 그림을 다음과 같다.



[가속도 랜덤 워크 오차의 root Allan 분산]

그림에서 기울기는 1/2이며 $T=3$에서 root Allan 분산을 읽으면 가속도 랜덤워크 오차 계수 K를 구할 수 있다.

⑤ 부유 램프 오차(drift rate ramp)

부유 램프 오차는 가속도가 시간에 따라 일정한 기울기로 증가하는 오차로 다음과같은 식으로 나타낼수 있다.

$$a = Rt \tag{1-18}$$

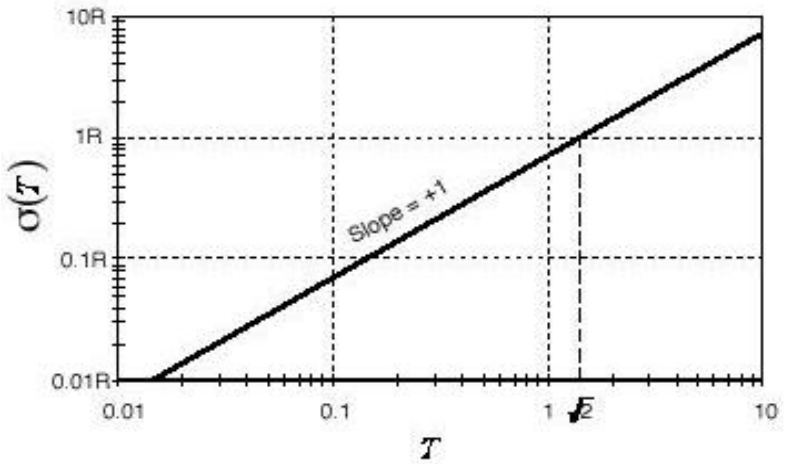
여기에서 t는 시간이며 R은 램프 오차 계수로서 시간에 따라 오차가 증가하는 기울기를 의미한다. 이 오차에 대한 Allan 분산을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma^2(T) = \frac{R^2 T^2}{2} \tag{1-19}$$

따라서 root Allan 분산은 다음과 같다.

$$\sigma(T) = R\frac{T}{\sqrt{2}} \tag{1-20}$$

부유 램프 오차에 대한 root Allan 분산을 클러스터 주기 T에 대하여 log-log 그림을 그림을 다음과 같다.



[부유 램프 오차의 root Allan 분산]

그림에서 기울기는 1이며 $T=\sqrt{2}$에서 root Allan 분산을 읽으면 부유 램프 오차 계수 R를 구할 수 있다.

⑥ 마코프 잡음(Markov noise)

마코프 잡음은 잡음 성분이 시간에 따라 지수적으로 연관된 이 오차에 대한 PSD는 다음과 같다.

$$S_{\Omega}(f) = \frac{(q_c T_c)^2}{1+(2\pi f T_c)^2} \qquad (1\text{-}21)$$

여기에서 q_c는 잡음의 크기이며 T_c는 상관시간(correlation time)을 의미한다. 식 (1-21)를 식 (1-3)에 대입하여 Allan 분산을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma^2(T) = \frac{(q_c T_c)^2}{T}\left[1 - \frac{T_c}{2T}(3 - 4e^{-\frac{T}{T_c}} + e^{-\frac{2T}{T_c}}\right] \qquad (1\text{-}22)$$

만약 T가 상관시간 T_c보다 훨씬 크다면 식 (22)는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\sigma^2(T) \approx \frac{(q_c T_c)^2}{T}, (T \gg T_c) \qquad (1\text{-}23)$$

따라서 root Allan 분산은 다음과 같다.

$$\sigma(T) \approx \frac{q_c T_c}{\sqrt{T}}, (T \gg T_c) \qquad (1\text{-}24)$$

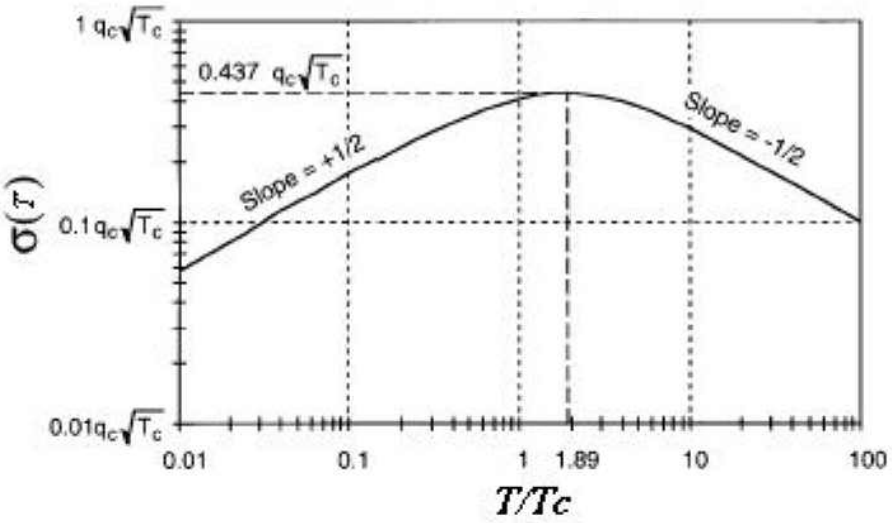
이를 가속도 백색잡음 부분의 식 (1-10)에 $Q_{wh} = q_c T_c$를 대입하면 마코프 잡음은 가속도 백색잡음과 동일하게 표현됨을 알 수 있다. 만약 T가 상관시간 T_c보다 훨씬 작다면 식 (1-22)는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\sigma^2(T) \approx \frac{q_c^2}{3} T, (T << T_c) \qquad (1\text{-}25)$$

따라서 root Allan 분산은 다음과 같다.

$$\sigma(T) \approx \frac{q_c \sqrt{T}}{\sqrt{3}}, (T << T_c) \qquad (1\text{-}26)$$

마코프 잡음에 대한 root Allan 분산을 클러스터 주기 T에 대하여 log-log 그림을 그림을 다음과 같다.



[마코프 잡음의 root Allan 분산]

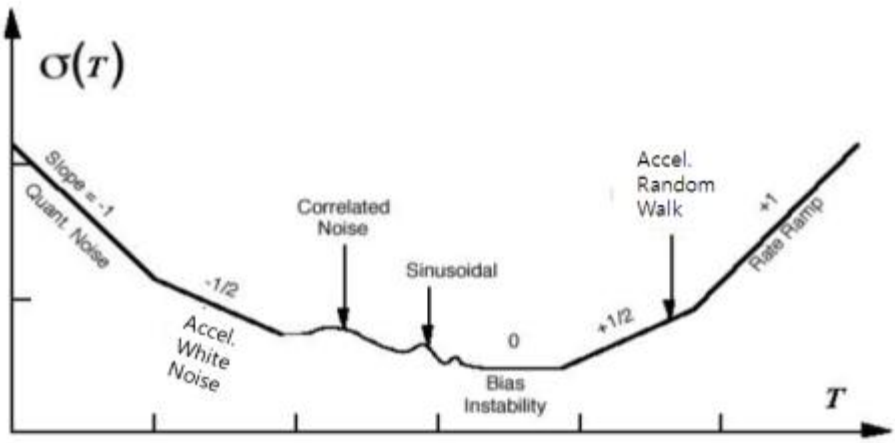
⑦오차들이 합해진 경우 Allan 분산

이상에서 설명한 오차에 따른 Allan 분산을 정리하면 다음 표와 같다.

[각 오차에 따른 Allan 분산 값]

Noise type	Para meter	Units	Root Allan Variance(g)
양자화 잡음	Q_Z	$g.\sec$	$\sigma(T)=\frac{\sqrt{3}\,Q_Z}{T}$
가속도 백색잡음	Q_{wh}	$g.\sqrt{\sec}$	$\sigma(T)=\frac{Q_{wh}}{\sqrt{T}}$
바이어스 불안정성	B	g	$\sigma(T)\approx\begin{cases}0 & (T\ll\frac{1}{f_0})\\ 0.664B & (T\gg\frac{1}{f_0})\end{cases}$
가속도 랜덤 워크	K	$g/\sqrt{\sec}$	$\sigma(T)=K\sqrt{\frac{T}{3}}$
부유 램프 오차	R	$g/\sec$	$\sigma(T)=R\frac{T}{\sqrt{2}}$
마코프 잡음	q_c	$g/\sqrt{\sec}$	$\sigma(T)\approx\frac{q_cT_c}{\sqrt{T}},(T\gg T_c)$ $\sigma(T)\approx\frac{q_c\sqrt{T}}{\sqrt{3}},(T<<T_c)$

이러한 오차들의 혼합되어 있는 경우 Allan 분산을 구해보면 다음과 같이 각 오차들의 Allan 분산의 합으로 표현된다. Allan 분산을 구하면 각각의 오차 요소들은 상관 시간 T에 관한 함수로 나타나는데 이들에 대해 다음 그림과 같이 도시하면 각 오차 요소들을 식별할 수 있다.



[혼합 잡음의 root Allan 분산 그림 예]

예를 들어 백색 잡음의 경우 root Allan 분산은 식 (1-11)과 같이 $1/\sqrt{T}$에 비례한다. 이를 그림으로 나타내면 백색 잡음은 고유의 형태를 갖게 되고 오차의 종류를 식별할 수 있는 기준이 된다. 계수 Q_{wh}은 T값에 따라 최소 자승법을 적용하여 추정할 수 있다.

(나) Allan 분산 방법에 의한 계수 추정

① 계수 추정 방법

계수 추정은 선형 측정식에서 최적의 계수 추정값을 준다고 알려진 최소자승법을 사용한다. 예를 들어 설명하기 위하여 계수 값이 각각 $Q_{wh}[g\cdot\sqrt{\sec}], K[g/\sqrt{\sec}]$인 백색 잡음과 랜덤 워크가 합쳐진 잡음을 고려한다. 먼저 앞에서 설명한 방법으로 Allan 분산을 구한다. 다음으로 아래의 식 (1-27)과 식 (1-28)에 나타낸 최소 자승법을 이용하여 두 오차의 계수를 추정한다.

$$y = Hx + v \tag{1-27}$$

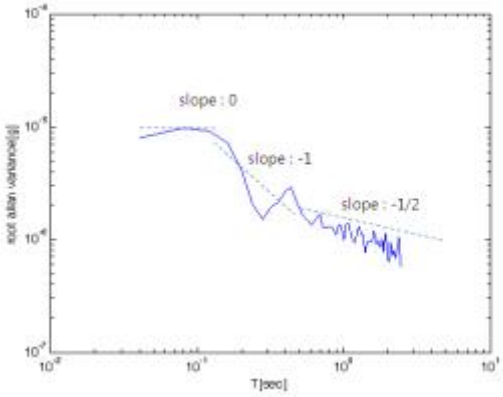
$$\Leftrightarrow [\sigma^2(T)] = [1/T \;\; T/3] \begin{vmatrix} Q_{wh}^2 \\ K^2 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} Q_{wh}^2 \\ K^2 \end{vmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T y \tag{1-28}$$

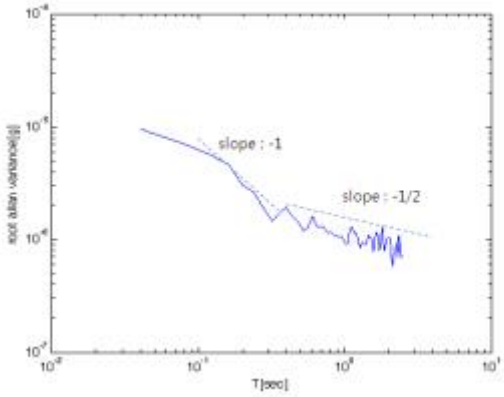
여기서 T는 클러스터 시간이면서 각 클러스터 안에 포함된 데이타 수에 샘플링 주파수를 곱하면 된다.

② 실험 데이터에 의한 오차 종류 판별 및 계수 추정

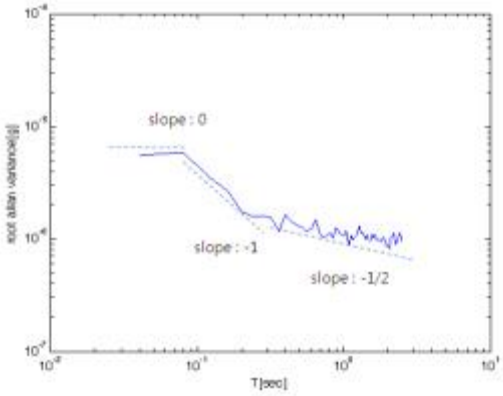
실험 데이터로 오차 종류를 판별하고 계수 추정한 결과를 제시한다. 데이터 획득은 25kHz 샘플링으로 약 30초간 데이터를 획득하는 실험을 총 2회 실시하였다. 실험 1과 실험 2에서 획득한 x, y, z축 데이터를 사용하여 root Allan 분산을 구하고 그 결과를 그림 9와 그림 10에 각각 나타내었다. 그림에서 가로축은 시간으로 sec단위이며 세로축은 가속도 값으로 단위가 g다. 실험 1과 실험 2의 root Allan 분산 큰 차이가 없이 일관성 있는 결과를 보여준다. x, y, z축을 비교하면 x, z축이 root Allan 분산 그림의 기울기가 유사하며 y은 약간의 차이가 있다. x, z축은 기울기 -1, -1/2, 0이 나타나므로 양자화잡음, 백색잡음 및 바이어스 불안정성이 포함되어 있다고 볼 수 있다. y축은 기울기 -1/2, -1이 나타나므로 양자화잡음 및 백색잡음 포함되어 있다고 볼 수 있다.



(a) x축

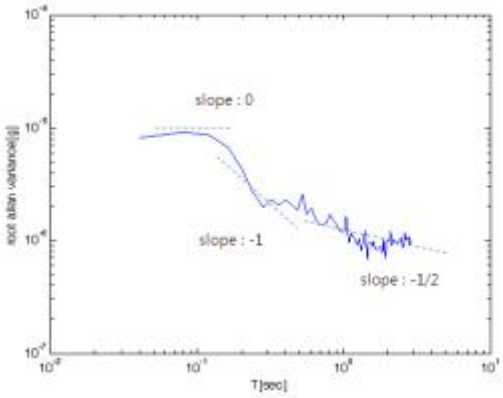


(b) y축

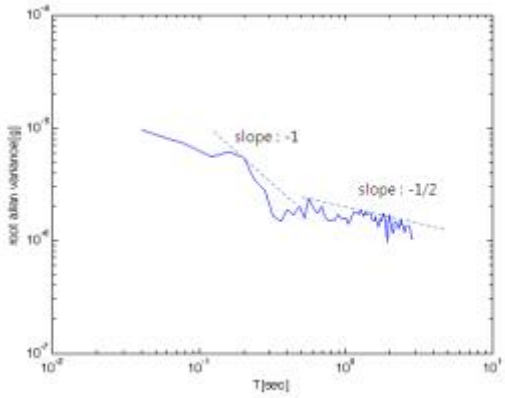


(c) z축

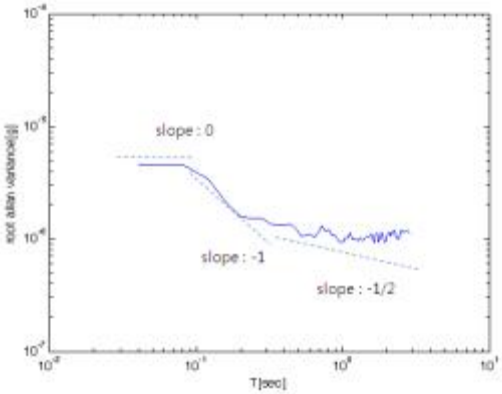
[실험 1 데이터에 의한 root Allan 분산]



(a) x축



(b) y축



(c) z축

[실험 2 데이터에 의한 root Allan 분산]

포함된 잡음의 종류가 파악 되었으므로 최소자승법을 이용하여 잡음의 계수를 추정한다. x, z축은 양자화잡음, 백색잡음 및 바이어스 불안정성이 혼합되어 있다고 가정한다. 그러면 다음과 같은 측정식이 세울 수 있다.

$$\sigma^2(T) = \begin{bmatrix} 3/T^2 & 1/T & 0.664^2 \end{bmatrix} \begin{vmatrix} Q_Z^2 \\ Q_{wh}^2 \\ B^2 \end{vmatrix} \qquad (1\text{-}29)$$

y축은 양자화 잡음 및 백색잡음이 혼합되어 있으므로 다음과 같은 측정식이 세울 수 있다.

$$\sigma^2(T) = \begin{bmatrix} 3/T^2 & 1/T \end{bmatrix} \begin{vmatrix} Q_Z^2 \\ Q_{wh}^2 \end{vmatrix} \qquad (1\text{-}30)$$

실험 1 및 실험 2 데이터로 식 (1-29) 및 (1-30)의 측정식과 최소자승법을 이용하여 Allan 분산으로부터 구한 각 잡음의 계수는 표 2 및 표 3과 같다. 실험2 데이터에 의한 결과는 유사하므로 여기서는 생략한다.

[실험 1 데이터에 의한 잡음 계수 추정 결과]

축	Q_Z	Q_{wh}	B
x	1.0e-004*0.0049	1.0e-004*0.0136	1.0e-004*0.1194
y	1.0e-005*0.0389	1.0e-005*0.1065	-
z	1.0e-005*0.0266	1.0e-005*0.0924	1.0e-005*0.8269

[실험 2 데이터에 의한 잡음 계수 추정 결과]

축	Q_Z	Q_{wh}	B
x	1.0e-004*0.0046	1.0e-004*0.0136	1.0e-004*0.1215
y	1.0e-005*0.0453	1.0e-005*0.1430	-
z	1.0e-005*0.0216	1.0e-005*0.0890	1.0e-005*0.6916

(다) Post processing에 의한 동적 범위 향상

지진계용 가속도 센서가 가져야 할 성능 중에서 가장 중요한 것은 동적 범위로 다음과 같이 정해진 최대 입력에 대한 센서 신호의 최대값과 배경잡음의 표준편차 비율로 표시한다.

$$\text{동적범위} = 20\log_{10}\left(\frac{\text{센서신호의 최대값}}{\text{배경잡음의 표준편차}}\right)$$

본 연구에서는 최대 입력으로서 국내 지진계 규격에 정해진 2g를 사용한다. 센서의 배경

잡음에 대한 이론적 한계는 다음식과 같이 스프링에 연결된 관성 질량의 열역학적 거동으로 설명할 수 있다.

$$v = \sqrt{\frac{4\kappa_B T\omega_o}{QM}}$$

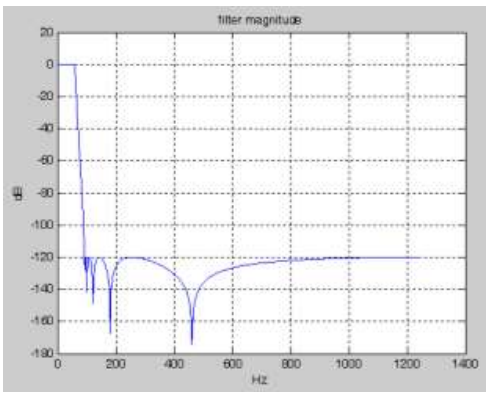
여기에서 v는 $1/\sqrt{Hz}$ 단위의 배경잡음 밀도, k_B는 Boltzmann 상수, T는 온도, ω_o는 2차 진동계의 고유진동수, Q는 quality factor, M은 관성 질량을 의미한다. 이와 같이 MEMS 가속도 센서의 배경잡음은 센서의 구조 개선 및 온도 보상 등의 방법으로 개선은 가능하나 기본적으로 한계가 있다. 그러므로 센서 출력에 대한 후처리 과정을 통하여 배경잡음에 의한 영향을 억제하는 필터가 필요하다.

지진계 출력에는 지진파 신호와 이를 측정하는 과정에서 입력되는 잡음을 모두 포함하고 있다. 잡음의 종류로는 백색잡음, $1/f$잡음, 랜덤워크, 양자화잡음, 마코프 프로세서 등이 있다(Naser et al., 2008). 이는 Allan 분산 방법에 의한 계수 추정 결과에서도 확인할 수 있다.

주파수 영역에서는 지진파 신호에 더해지는 저주파수 잡음과 이 영역을 벗어난 고주파수 잡음으로 구분할 수 있다. 고주파의 잡음은 LPF(Low Pass Filter)로 충분히 억제할 수 있다. 다만 이 과정에서 주의해야할 사항은 신호가 포함된 저주파에 왜곡이 최소화되도록 하는 것이다. 저주파의 잡음은 신호와 같은 주파수 대역에 존재하므로 일반적인 LPF로는 억제가 불가능하다. 본 연구에서는 저주파의 잡음에 대하여 ARMA (Auto Regressive Moving Average)모델로 모델링 한 후 칼만필터 방법을 사용하여 저주파 잡음을 억제하고 지진파 신호를 추정하는 방법을 제안한다.

① LPF 방법

LPF는 통과대역에서 지진파 입력이 가해지는 경우에도 신호의 왜곡이 발생하지 않도록 리플(ripple)을 최소화하도록 해야 한다. 이와 같은 필터 중의 하나로 타원형 필터(elliptic filter)를 사용한다. 통과 대역은 국내 지진계 주파수 규격인 인 0Hz ~ 50Hz로 정하고 통과대역 리플은 0.14dB, 저지대역 이득은 －120dB로 설계하였다. 다음 그림에 설계된 필터의 주파수 응답을 도시하였는데 통과대역에서 왜곡이 허용범위 내이며 고주파 잡음을 충분히 제거할 수 있음을 알 수 있다.



[LPF의 주파수 응답]

② 저주파 잡음 ARMA 모델 및 칼만필터에 의한 동적범위 향상

LPF를 통과한 저주파 대역 잡음을 ARMA 모델로 표현한다. ARMA 모델은 일반적인 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_t + a_1 y_{t-1} + \cdots + a_{na} y_{t-na} \\ = e_t + c_1 e_{t-1} + \cdots + c_{nc} e_{t-nc} \end{aligned} \tag{2-1}$$

여기에서 y_t는 센서 출력, e_t는 백색 가우시안 잡음, a_i는 AR 부분의 계수, 그리고 c_i는 MA 부분의 계수이다. 또한 $t-1$은 현재시간 t로부터 한 샘플 이전 시간을 의미한다. 식 (2-1)을 간략화된 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$A(z) y_t = C(z) e_t \tag{2-2}$$

여기에서 $A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_{na} z^{-na}$, $C(z) = 1 + c_1 z^{-1} + \cdots + c_{nc} z^{-nc}$, 그리고 z^{-1}은 지연 연산자로 예를 들어 $z^{-1} y_t = y_{t-1}$을 의미한다. 이 식을 출력에 대해 다시 정리하면 다음과 같다.

$$y_t = \frac{C(z)}{A(z)} e_t \tag{2-3}$$

$A(z)$ 및 $C(z)$의 계수를 추정하여야 하는데 시스템 식별 방법 중 잡음 백색화(whitening)에 최적방법으로 알려진 예측오차법(prediction error method)를 사용한다(Ljung, 1999). 대상 센서의 시험 데이터로부터 추정한 결과 $A(z)$의 차수 $na = 5$ 그리고 $C(z)$의 차수 $nc = 0$를 사용하면 충분히 잡음이 백색화가 됨을 확인하였다.

이제 칼만필터에 의한 지진파 입력 추정에 대해 설명한다. 칼만필터는 선형시불변시스템에 상태변수를 추정하는 최적필터로 알려져 있으며 여러 분야에 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 ARMA 모델로 표현된 저주파 잡음을 상태변수 방정식에 포함시켜 칼만필터에 의해 지진파 입력 신호를 추정한다. 식 (2-3)은 $C(z) = 1$로 추정되었으므로 다음과 같이 변경된다.

$$y_t = \frac{1}{A(z)} e_t \tag{2-4}$$

식 (2-4)의 우변을 새로운 변수를 사용하여 $b_t = \frac{1}{A(z)} e_t$로 정의하자. 그러면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$b_t = -a_1 b_{t-1} - \cdots - a_{na} b_{t-na} + e_t \tag{2-5}$$

지진파 입력이 가해졌을 경우에 그 입력은 출력에 그대로 더해진다. 따라서 지진파 입력을 u_t로 정의하고 식 (2-4를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$y_t = u_t + b_t \tag{2-6}$$

입력 u_t는 다음과 같이 1차 마코프 프로세스로 가정한다.

$$u_t = \alpha u_{t-1} + f_t \tag{2-7}$$

여기에서 f_t는 백색잡음이며 α는 상수로서 필터 구성 시 적절하게 튜닝이 필요하다. 식 (2-5) 및 (2-7)을 결합하면 다음과 같은 시스템 식을 얻을 수 있다.

$$x_{t+1} = Fx_t + Gw_t \tag{2-8}$$

x_t는 상태변수로 $x_t = \left[b_{t-na} \cdots b_{t-2}\, b_{t-1}\, u_t\right]^T$이며 w_t는 공정잡음으로 $w_t = \left[e_{t-1}\, f_t\right]^T$이다. 행렬 F와 G는 다음과 같다.

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & & 0 & 0 \\ 0 & & 1 & & \vdots \\ \vdots & 0 & & \ddots & \\ -a_{na} & \cdots & a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2-9}$$

출력 식은 식 (2-6)으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$y_{t-1} = Hx_t + v_{t-1} \tag{2-10}$$

여기에서 v_t는 측정 잡음이며 행렬 H는 다음과 같다.

$$H = [0 \cdots 0\, 1\, 1] \tag{2-11}$$

칼만필터는 출력과 출력의 예측값과의 차이를 이득행렬을 곱하여 상태변수 값을 보정하는 필터로 간단하게 나타내면 다음과 같이 표현된다.

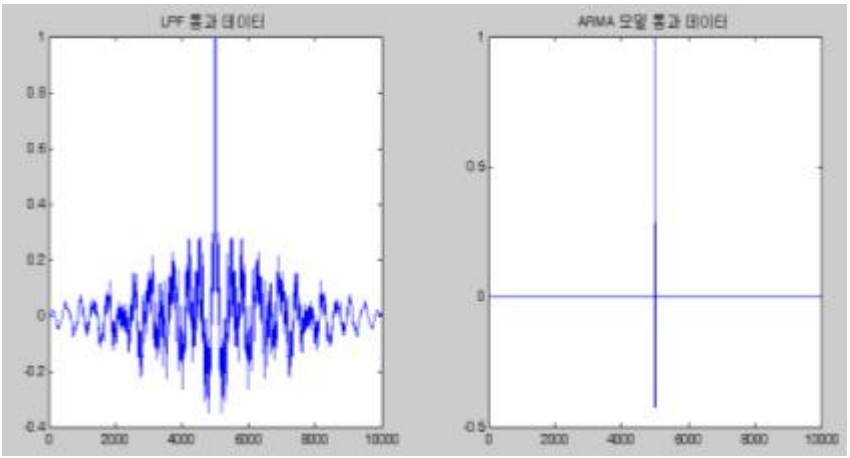
$$\hat{x}_{t+1} = F\hat{x}_t + K(y^f_{t-1} - \hat{y}^f_{t-1}) \tag{2-12}$$

여기에서 $\hat{x}_t$는 상태변수 추정값, $\hat{y}^f_{t-1}$은 y^f_{t-1}의 추정값으로 $\hat{y}^f_{t-1} = H\hat{x}_t$로 계산되는 값이다. K는 칼만이득 행렬로 시스템 및 측정 행렬과 잡음의 분산으로부터 계산된다(Lewis, 1986).

③ 실험에 의한 후처리 방법 비교

제안한 방법을 실제 시험 데이터로 검증하였다. 시험은 배경잡음의 표준편차를 구할 때는 가진기 동작을 멈춘 정적 상태에서 데이터를 수집하였다. 입력을 인가하는 경우에는 국내 지진계 규격에서 정한 최대입력인 2g의 크기로 정현파 입력을 가하였다. 정현파의 주파수는 지진계 규격에서 정한 주파수 범위의 중간 정도인 27Hz를 사용하였다. 데이터 수집을 위하여 NI사의 는 24bit ADC가 내장된 NI-9239 DAQ 장치를 사용하였다. NI-9239 DAQ에서 PC로 데이터를 전송하고 PC에서 제안된 알고리즘을 수행하였다.

정적 상태에서 시험한 데이터로 고주파수 잡음을 제거한 후 예측오차법을 이용하여 ARMA 모델의 계수를 추정하였다. 추정된 모델은 AR 5차, MA 0차로 나타났다. 추정된 모델로 충분히 백색화가 가능한지 확인하기 위하여 그림 4와 같이 자기상관함수(auto correlation function)을 비교하였다.



[자기상관함수 비교]

그림에서 알 수 있듯이 LPF만 통과한 데이터에 비해 ARMA 모델을 통과한 데이터는 백색화에 매우 근접하므로 추정된 ARMA 모델이 타당하다고 판단된다.

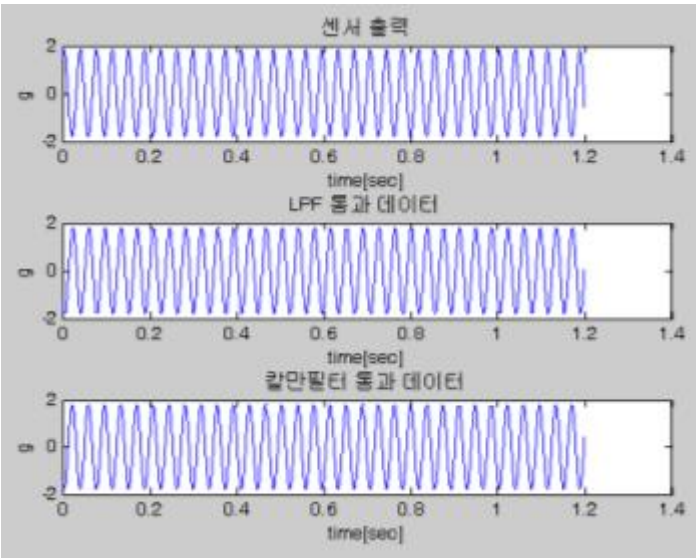
추정된 ARMA 모델의 계수로 칼만필터를 구성하고 지진파 입력을 추정하였다. 먼저 지진파 입력이 없는 동적 상태에서 추정한 결과이다. 이 경우에는 추정되는 값이 배경잡음으로 그 표준편차를 표 2-1에 나타내었다.

[배경잡음의 표준편차]

	표준편차(g)
센서 출력	2.04e-5
LPF 통과 후	1.02e-5
칼만필터 통과 후	7.72e-6

결과를 보면 센서 출력에 비해 LPF 통과 후 배경잡음이 약 0.5배 감소하며 칼만필터 통과 후에는 약 0.35배로 감소함을 알 수 있다.

다음으로 지진파 입력이 가해진 경우 추정 결과이다. 27Hz 정현파로 2g 입력을 가하여 LPF 통과 후 결과와 칼만필터 추정 후 결과를 그림에서 비교하였다. 그림 2-3에 센서 출력 데이터, LPF 통과 데이터, 칼만필터 통과 데이터를 도시하였다.



[정현파 입력의 경우 필터링 결과 비교]

결과를 보면 칼만필터 추정값은 센서 출력 및 LPF 통과 데이터와 잘 일치함을 보여준다. 동적범위를 구하기 위해 최대값을 구해보면 세 가지 데이터 모두 2g에 거의 근접한 1.8g 정도의 값을 나타낸다. 그러므로 동적범위는 다음과 같다.

[동적 범위]

	동적범위(dB)
센서 출력	99
LPF 통과 후	105
칼만필터 통과 후	108

표에서 알 수 있듯이 센서 출력에 비해 LPF 통과 후 6dB정도 개선되었으며 칼만필터 통과 후는 9dB 정도 개선됨을 알 수 있다. 그러므로 제안된 ARMA 모델링 및 칼만필터 방법은 흔히 사용하는 LPF 방법보다 동적범위를 더 개선 시킬 수 있는 방법임을 알 수 있다.

(나) MEMS 지진감지 모듈 성능 평가

지진 감지용 센서의 대표적인 요구사양과 시험 기준은 아래 표와 같다.

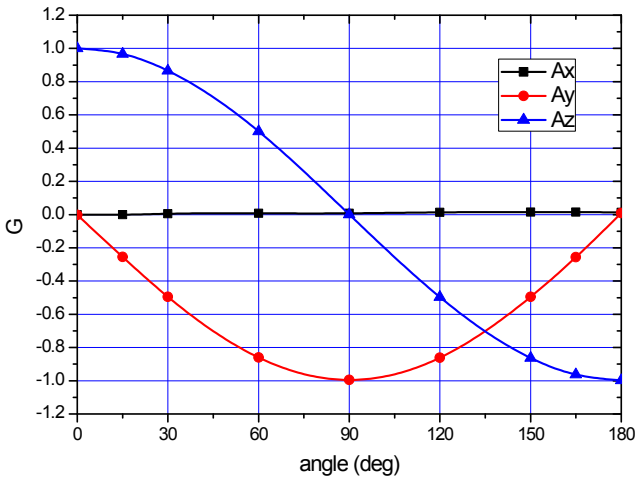
[지진계용 센서 모듈의 주요 사양 및 평가 방법]

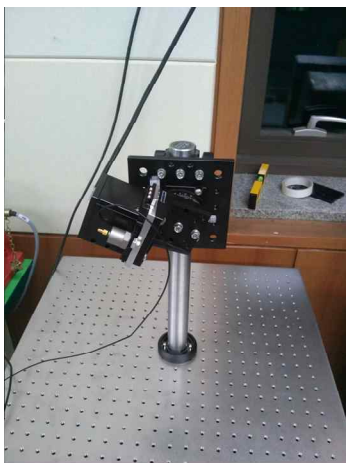
시험 항목	측정방법	목표 사양
비선형 오차	경사대를 통해 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 가진기 진동 입력을 가변하면서 출력 변화 관측	1% @2 G_{pk}
타측 감도	가진기 진동방향에 직교하는 2개 센서 출력의 상대적 비율	1%
주파수 응답	가진기 입력 0.1 ~ 50 Hz에 대한 출력 평활도	3dB 이내
동적 범위	입력을 가하지 않은 상태에서 배경 잡음 측정	120 dB

① 비선형 오차

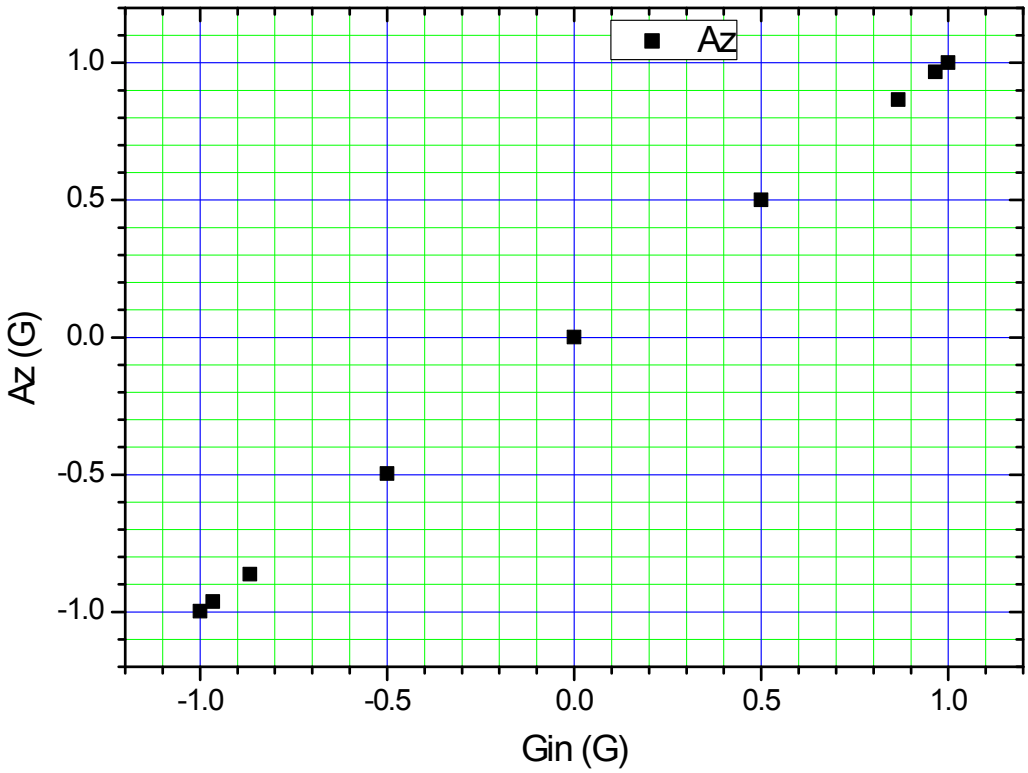
지진계에서 요구하는 비선형 오차는 측정 범위 $\pm 2G$에 대해 출력 오차 1% 이내여야 한다. 이를 평가하기 위해선 정확한 기준 가속도를 인가한 상태에서 센서의 출력을 측정해야 하는데 크게 지구 중력 가속도를 인가하고 측정하는 정적 응답과 가진기에 기준 센서를 연결한 상태에서 측정하는 동적 응답으로 구분할 수 있다.

정적 응답은 지구 중력 가속도에 대해 일정 각도로 기울어진 상태에서 출력을 측정하면 되므로 측정 범위가 $\pm 1G$ 이내만 가능하다. 아래는 경사각을 인가하면서 3축의 가속도 변화를 나타낸 결과이다.



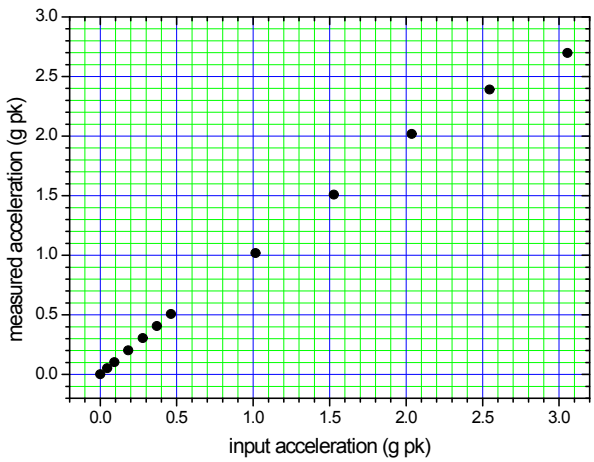


[경사각 시험 장치 및 3축 가속도 응답 특성]



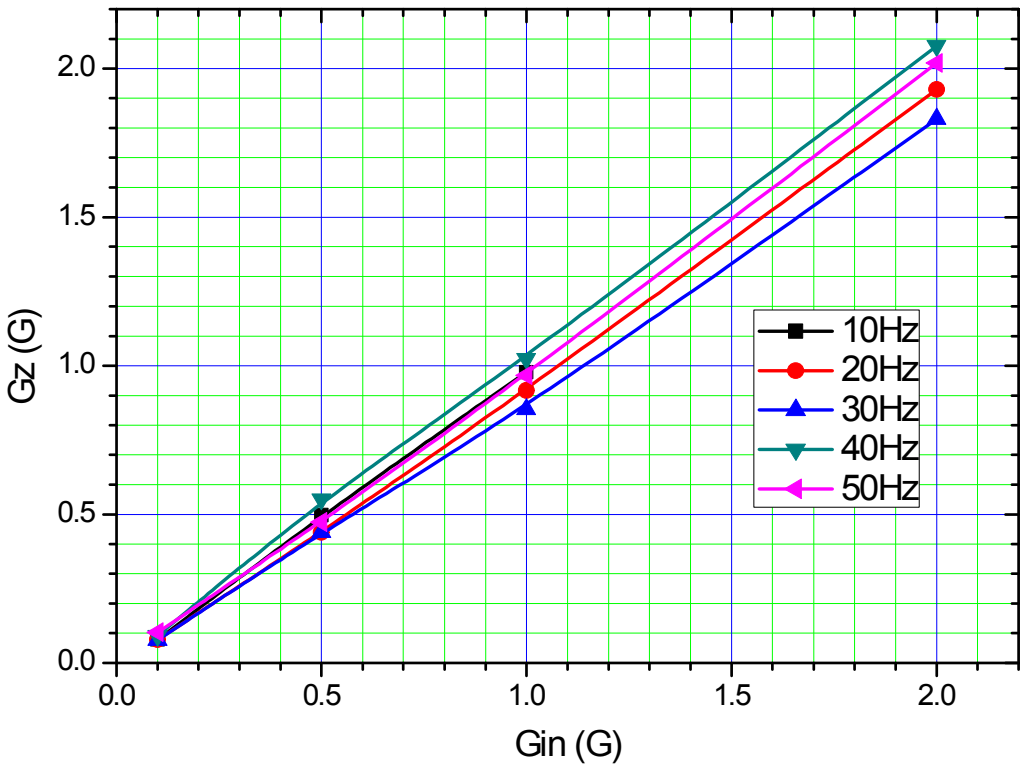
[경사각 입력에 대한 가속도계 선형성 시험 결과]

중력 가속도는 $\pm 1G$ 이상의 입력을 가할 수 없기 때문에 가진기에 센서 모듈과 기준 센서를 동시에 장착하고 일정 주파수(30Hz)에서 입력 가속도 크기를 달리하면서 계측하면 된다. 아래 결과에서 볼 수 있듯이 $\pm 2G$ 측정 범위에 대해 비선형 오차는 1% 이내임을 확인할 수 있다..



[고정 주파수 가진기 입력에 대한 가속도계 출력 선형성 시험 결과]

한편 가진기 입력을 통한 선형성 평가는 센서의 대역폭 내에서 모두 만족해야 한다. 이를 확인하기 위해 입력 가속도의 주파수를 10 ~ 50Hz로 달리 하면서 선형성 시험을 반복하였다. 아래는 그 결과를 보인 것으로 주파수 대역 범위 내에서 1% 이내의 비선형 오차만을 보이고 있다. 입력 주파수에 따른 출력 감도의 미세한 변화는 주파수 응답에서 요구하는 3dB 이내 임이 확인되었다.



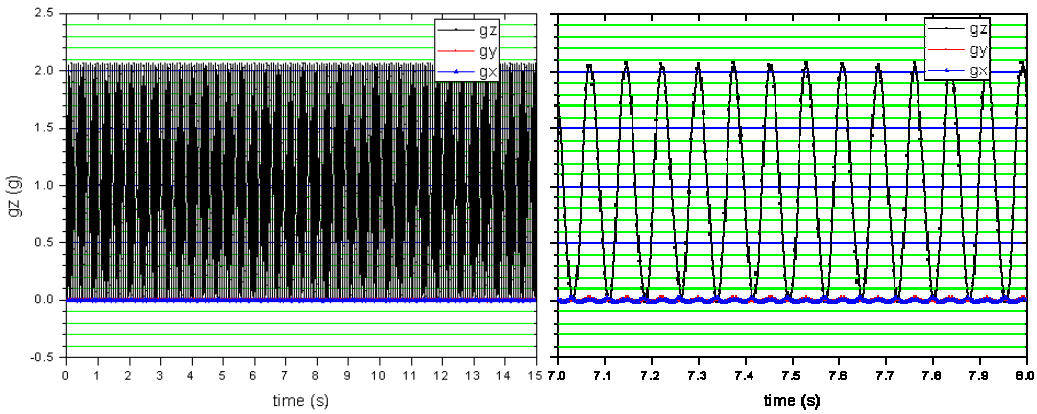
[가진기 입력주파수를 달리 할 때 가속도계 출력 선형성 시험 결과]

② 타축 감도

타축 감도는 가진기를 통해 일정 방향으로 가속도를 인가한 상태에서 이와 직교한 방향 센서 출력과의 상대적인 비율로 측정할 수 있다. 이 경우 센서 모듈의 장착 오차에 의해서도 타축 감도가 관측될 수 있기 때문에 가진기에 장착한 상태에서 수평계를 이용하여 확인해야 한다.

$$\text{타축감도} = \frac{\text{직교방향가속도출력}}{\text{측정방향가속도출력}} \times 100\%$$

아래 측정 결과에서 보인 바와 같이 수직 방향으로 가진기에 장착했기 때문에 $1G$가 가해진 상태에서 최대 가진 입력을 $1G_{pk}$을 가했기 때문에 정상 출력은 0 ~ 2G 범위의 출력이 발생하는 한편 이와 직교하는 2축 방향의 센서는 $0G$ 부근의 출력을 나타내고 있다. 상대적인 출력의 비율은 약 1%로 계측되었다.

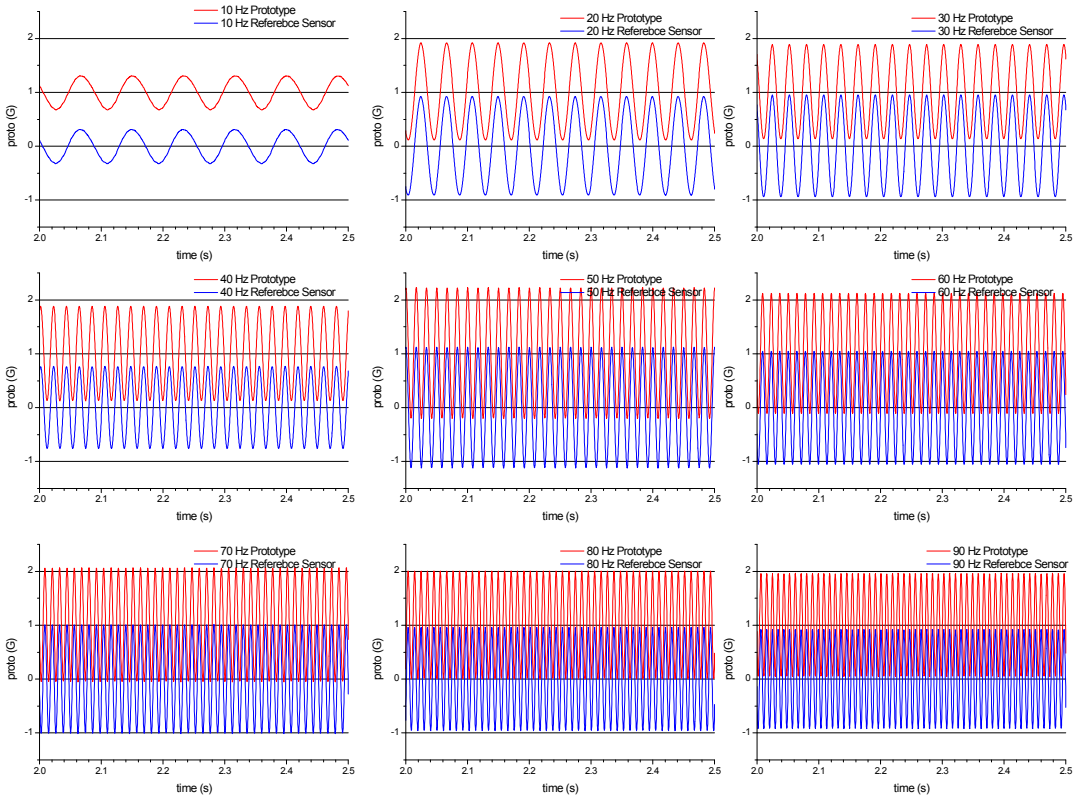


[타축 감도 시험 결과]

③ 주파수 응답

주파수 응답 특성을 확인하기 위해 가진기에 기준 센서와 prototype를 동시에 장착한 상태에서 주파수를 0 ~ 100Hz로 달리하면서 두 센서의 출력 진폭을 측정하였다. 기준 센서는 압전형이기 때문에 DC 응답을 얻을 수 없으므로 0G를 기준으로 출력이 관측되는 반면, prototype는 1G 크기의 중력 가속도를 중심으로 변동하는 결과로 관측된다. 이때 출력 진폭을 비교하기 위해 DC 성분은 제거해야 하는데 측정 데이터의 표준편차를 구하면 실효값과 같아지므로 여기에 $\sqrt{2}$를 곱하면 출력 진폭을 구할 수 있다.

$$\text{가속도출력진폭} = \text{측정데이터표준편차} \times \sqrt{2}$$

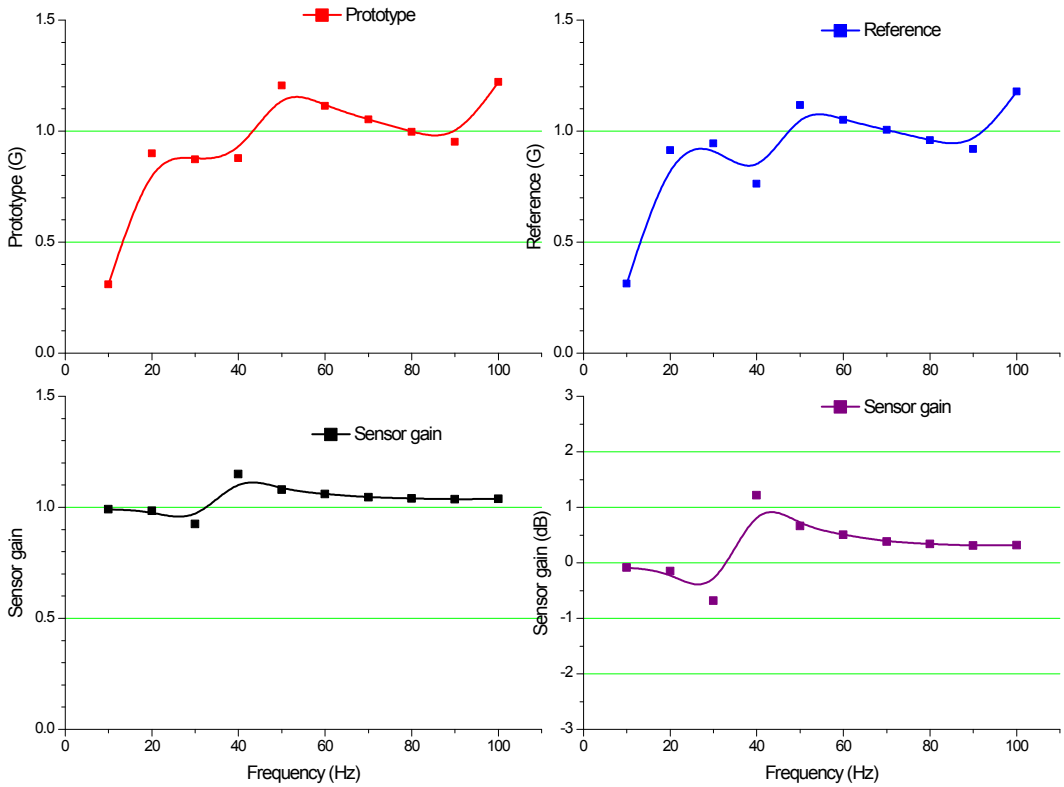


[가속도 입력 주파수 변화에 따른 기준 센서와 prototype의 출력 특성]

이 때 가진기의 입력은 인가 가속도가 정현 파형에서 왜곡되지 않는 범위에서 임의의 가했기 때문에 두 센서의 출력 비율을 비교하여 이득을 구해야 한다. 이상적인 경우 센서 출력이 동일해야 하므로 이득은 1이다. 요구 범위 내에서 주파수 응답의 평활도를 계산하면 1.89dB로 목표 사양을 만족하고 있음이 확인된다.

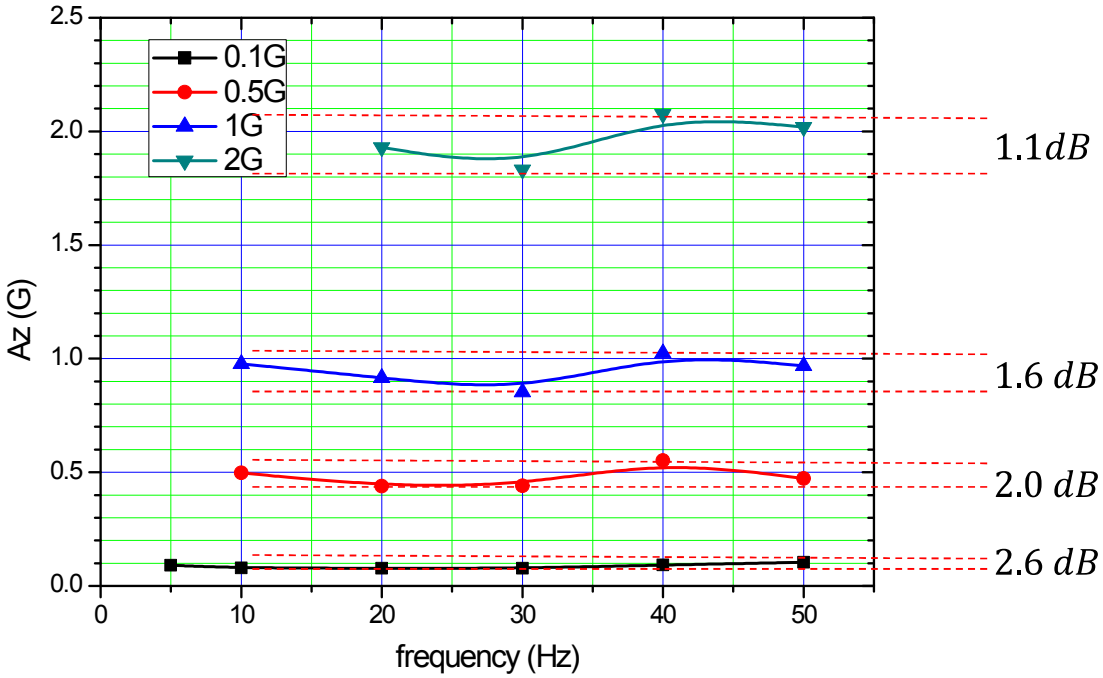
$$\text{센서이득} = \frac{prototype\ \text{출력진폭}}{\text{기준센서출력진폭}}$$

$$\text{출력평활도} = 20 \times \left[\log(\text{센서이득})_{\max} - \log(\text{센서이득})_{\min}\right] = 20 \times \log\left(\frac{\text{센서이득}_{\max}}{\text{센서이득}_{\min}}\right)$$



[가속도 입력 주파수 변화에 따른 기준 센서와 prototype의 출력 특성]

한편 지진계의 주파수 응답 요구 사양은 0.1 ~ 50 Hz 이내에서 출력 평활도 3dB 이내인데 입력 가속도의 크기에 따라 특성의 변화가 있는 지 확인하기 위해 입력 가속도의 크기를 0.1G, 0.5G, 1G, 2G로 달리 하면서 측정을 반복하였다. 가진기의 특성상 낮은 주파수에서 큰 가속도를 인가할 수 없기 때문에 저주파 영역에서 계측 신뢰성이 떨어지는 면이 있지만 전체적으로 3dB 이내의 평활도를 확인할 수 있다.



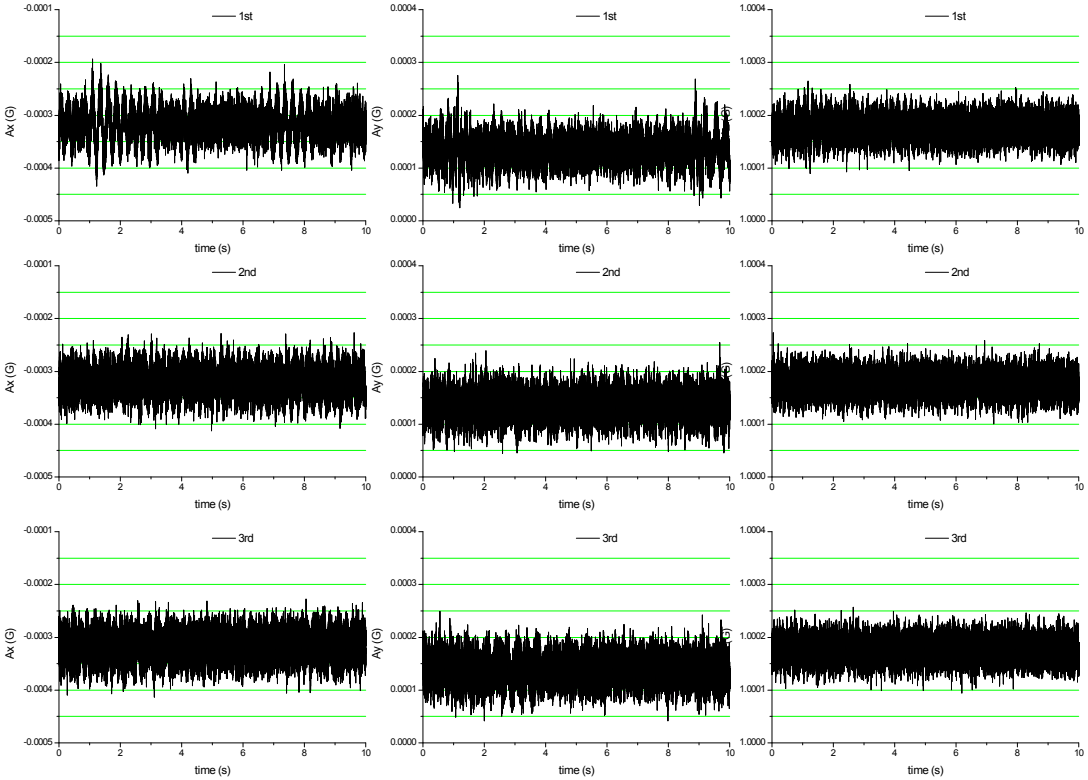
[가속도 입력 크기에 따른 주파수 응답 특성]

④ 동적 범위

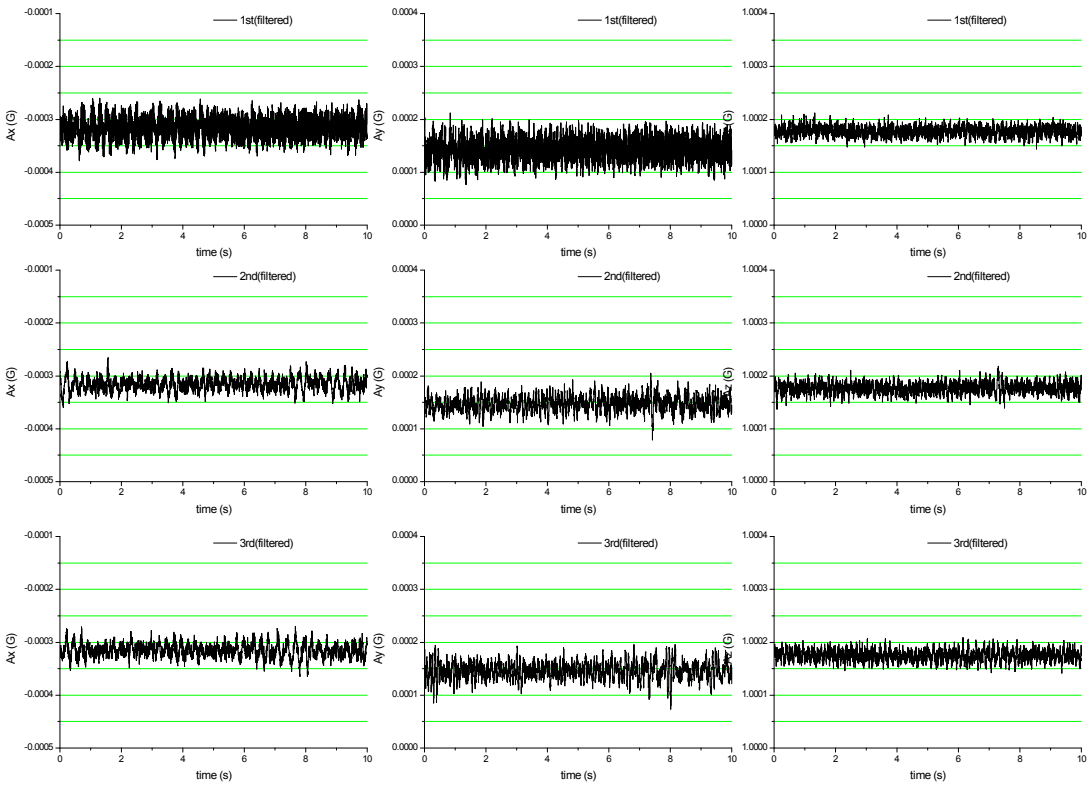
센서의 동적 범위는 최대 측정 범위와 최소 측정 입력의 비율을 데시벨로 나타내는 값으로 센서의 분해능을 나타내는 지표이다. 지진계의 측정범위는 $\pm 2G$ 이고, 최소 측정 입력이란 가속도가 인가되지 않았을 때 센서의 잡음과 등가인 신호이므로 결국 배경 잡음을 측정하면 동적 범위를 구할 수 있다. 배경 잡음의 RMS 값은 잡음 신호의 표준 편차와 동일하다.

$$\text{동적범위} = 20\log_{10}\left(\frac{\text{센서신호의최대값}}{\text{배경잡음의표준편차}}\right)$$

동적 범위 확인을 위한 배경 잡음은 외란이 거의 없는 무진, 무소음 환경에서 진행해야 하기 때문에 실험실에서 야간에 방진대 위에 센서모듈을 거치한 상태에서 측정을 진행하였다. 이 경우 미세한 진동도 배경 잡음에 반영되기 때문에 정확한 계측이라고 할 수는 없지만 경향을 파악하는 데는 충분하다고 판단된다. 다음 그래프는 필터가 있는 경우와 없는 경우에 대해 정지 상태에서 3축 센서의 잡음을 3회에 걸쳐 반복 측정한 결과를 보인 것이다.

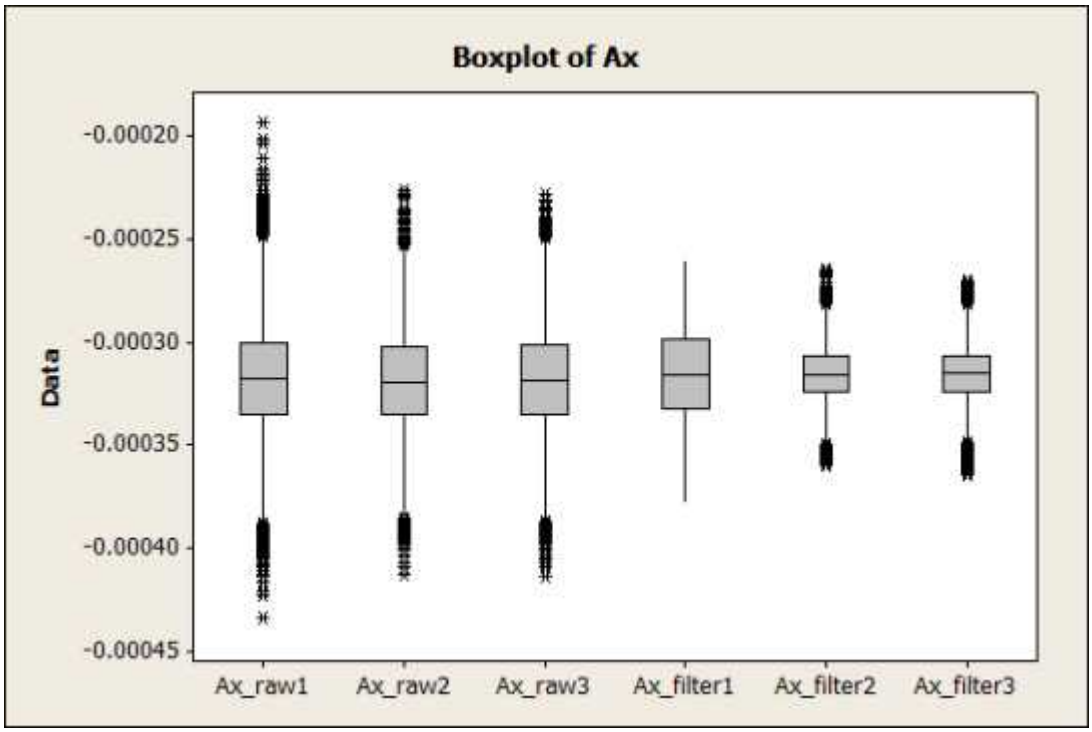


[필터가 없는 경우 3축 정지 잡음 반복 측정 결과]

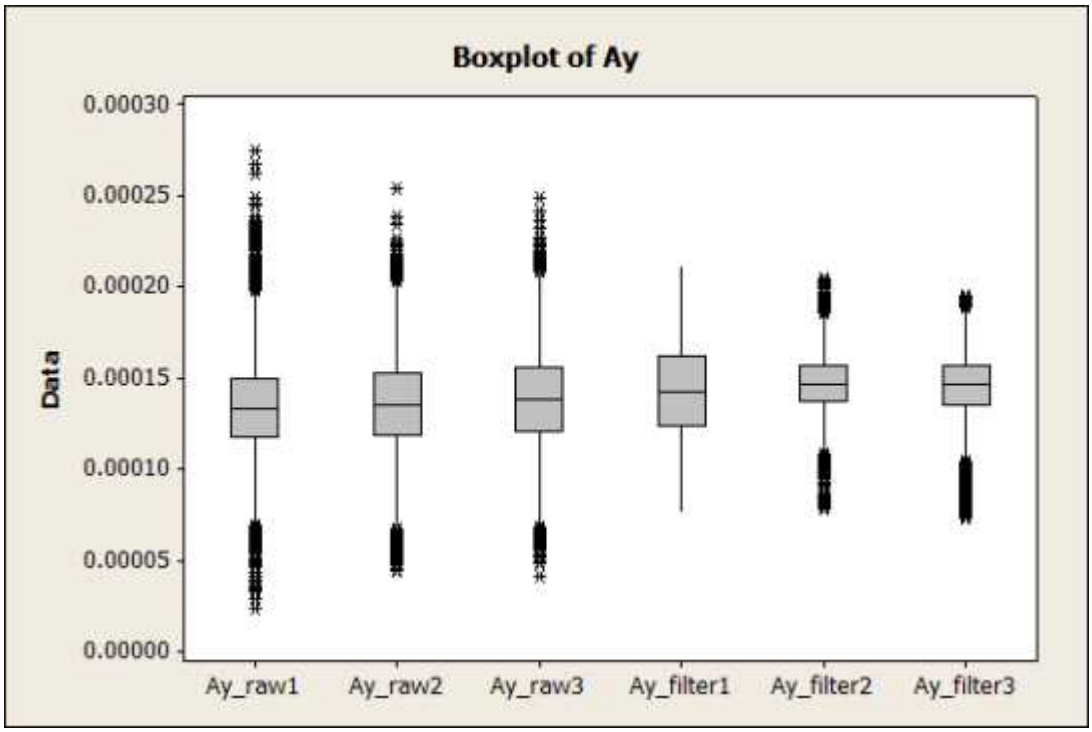


[필터 통과 후 3축 정지 잡음 반복 측정 결과]

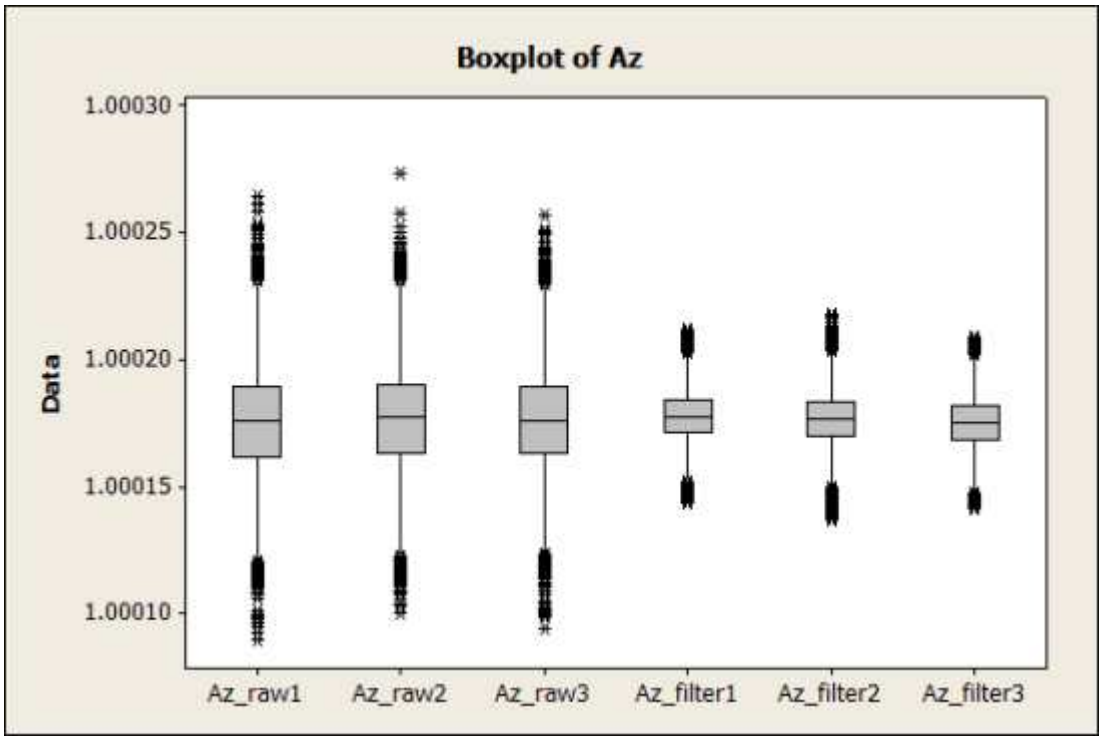
전체적으로 필터 통과 유무에 따라 잡음 수준의 변화를 명확히 확인할 수 있다.



[필터 통과 전후 x축 배경 잡음 데이터]



[필터 통과 전후 y축 배경 잡음 데이터]



[필터 통과 전후 z축 배경 잡음 데이터]

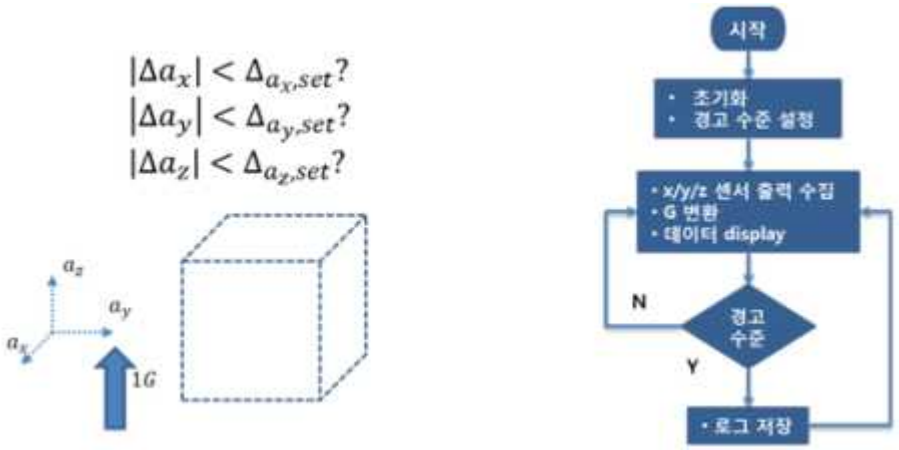
이 결과로부터 정지 잡음의 RMS 값을 구하고 동적 범위를 계산한 결과는 아래와 같다. 실험 환경에 따라 감지 축별로 동적범위의 차이가 있는 것으로 판단된다.

[정지잡음과 동적범위]

구분		정지 잡음	동적 범위
필터 통과전	X 축	$27\mu G$	103.4 dB
		$24\mu G$	104.4 dB
		$25\mu G$	104.1 dB
	Y 축	$25\mu G$	104.1 dB
		$25\mu G$	104.1 dB
		$25\mu G$	104.1 dB
	Z 축	$21\mu G$	105.6 dB
		$20\mu G$	106.0 dB
		$20\mu G$	106.0 dB
필터 통과후	X 축	$22\mu G$	105.2 dB
		$12\mu G$	110.5 dB
		$13\mu G$	109.8 dB
	Y 축	$24\mu G$	104.4 dB
		$14\mu G$	109.1 dB
		$16\mu G$	108.0 dB
	Z 축	$9\mu G$	113.0 dB
		$10\mu G$	112.0 dB
		$10\mu G$	112.0 dB

(다) 지진 모니터링 시스템 구축

일반적으로 3축 가속도 센서가 건물의 x/y/z 축에 정확히 장착된 경우 외부 진동이 없다면 기준 출력은 $a_x = a_y = 0\,G, a_z = 1\,G$이며, 외부 진동에 의해 가속도 성분의 미소 변화량 $\triangle G$가 발생한다면 $a_x = 0 \pm \Delta a_x, a_y = 0 \pm \Delta a_y, a_z = 0 \pm \Delta a_z$가 되므로 각각의 변화량 $\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z$, 의 크기가 임계치를 초과하는 지를 판단하면 지진 발생 여부를 파악할 수 있다.

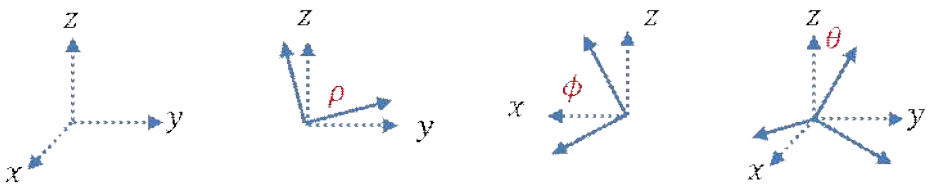


[기존의 지진 모니터링 방식]

그러나 실제 건물에 센서 모듈을 장착할 때 x/y/z 축에 정확히 정렬하는 것은 매우 어려운 작업이므로 미세한 정렬 오차각 ϕ, θ, ρ 가 존재한다면 3축 방향의 가속도 크기가 변하기 때문에 기준값 자체가 달라져야 한다.

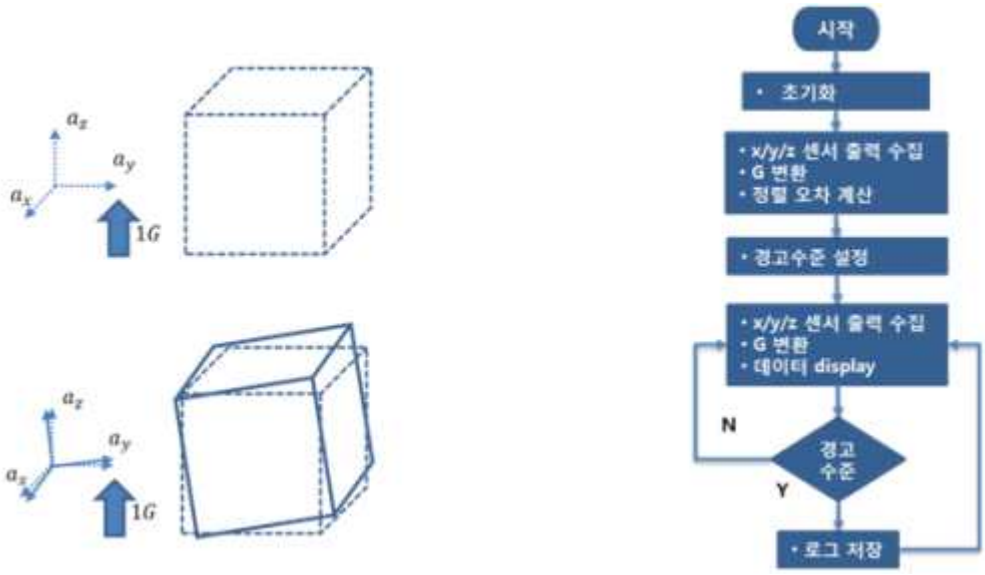
$$a_x = \sin\phi,\ a_y = \sin\rho,\ a_z = \sin\theta$$

$$\tan\phi = \frac{\sin\phi}{\cos\phi} = \frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}},\ \tan\rho = \frac{\sin\rho}{\cos\rho} = \frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}$$



[건축물 장착시 정렬 오차 영향]

따라서 정렬 상태에 따라 기준치와 경고 수준을 변경해야 하지만 동작 중에 여러 가지 이유로 정렬상태가 변할 경우 영향을 받기 때문에 실제 적용이 어렵다는 문제가 발생한다.



[기존 지진 모니터링 방식의 문제점]

이 문제점을 해결하기 위해 지표에 수직 방향으로 항상 1G의 중력 가속도가 작용함을 이용하였다. 즉 정상 상태에서 수직 방향의 가속도 성분 자체는 항상 1G이기 때문에 장착 오차가 있는 경우에도 3축 방향 가속도 a_x, a_y, a_z의 벡터 합은 항상 1G로 동일하다.

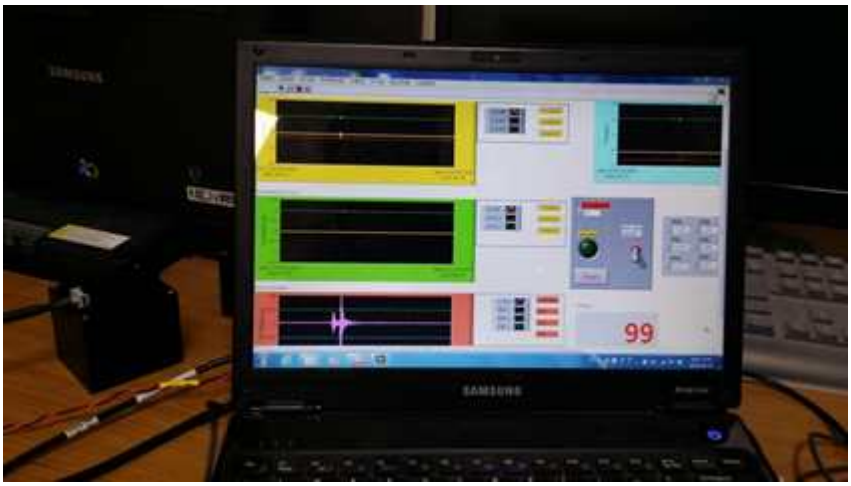
$$G_{total} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = 1G$$
$$G_{total} = \sqrt{(\sin\phi)^2 + (\sin\rho)^2 + (\cos\theta)^2} = 1G$$

따라서 지진 발생에 의해 미소 가속도 변화 $\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z$가 발생하면 3축 가속도의 벡터 합이 1G에서 벗어나므로 벡터합의 변화를 모니터링하면 장착 오차에 무관하게 지진 발생 여부를 파악할 수 있다.

아래는 지진 발생 여부를 모니터링 하기 위한 S/W 흐름도를 보인 것이다. 3축 가속도 센서의 출력을 고속으로 순차적으로 받아들인 다음 이들의 벡터 합을 매 순간 계산하고 이 값이 초기에 설정한 경고수준을 벗어나는지를 확인하는 방식이다. 이 때 경고 수준 이상의 외란이 들어오면 이를 의미있는 진동이라고 판단하고 이를 알리는 신호를 발생시키고 그 순간의 각 축의 가속도 크기와 발생 시간을 로그 파일에 저장하도록 구성하였다.

[장착 오차에 무관한 지진 모니터링 방식]

장기 모니터링 시험은 현장 시범 적용 전에 실내에 장시간 방치시 작동의 이상 유무와 데이터 로거 기능의 신뢰성을 확인하기 위해 실시한다. 이를 위해 약 장시간에 걸쳐 진동 신호에 대한 연속 모니터링을 실시하였고 데이터 로거에 저장된 신호를 복원하여 건물 진동 상황을 파악할 수 있다.



[진동 모니터링 화면]

5일간(2014.4.20.~4.24)에 걸쳐 실내에서 장기 시험을 수행했다. 진동 모니터링은 앞에서 설명한 알고리즘을 구현했기 때문에 정확히 수평이 아닌 위치에 방치해도 작동하며 정상 상태에서 $\pm 10\,gal$ 이상이 작용할 때만 진동 데이터를 저장하기 때문에 실제로 유용함을 확인할 수 있다.

[5일간 실내 연속 모니터링 시험 결과]

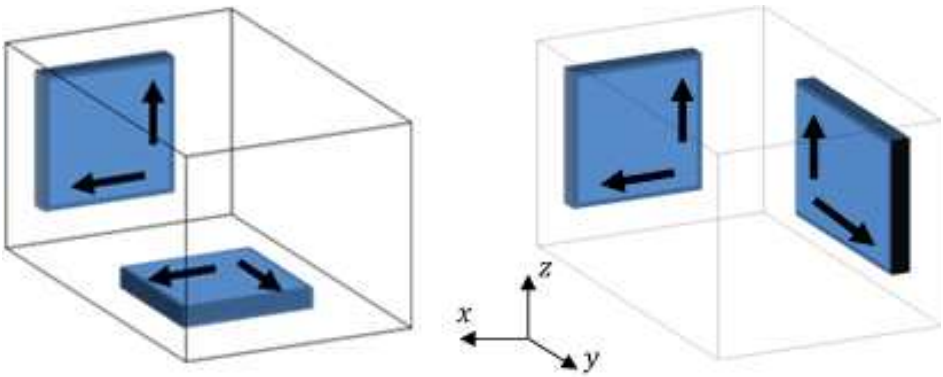
(3) 지진계급 3축 가속도 센서 개발

(가) MEMS 가속도 센서 구조 개발

① 지진계급 MEMS 가속도 센서 구조 설계

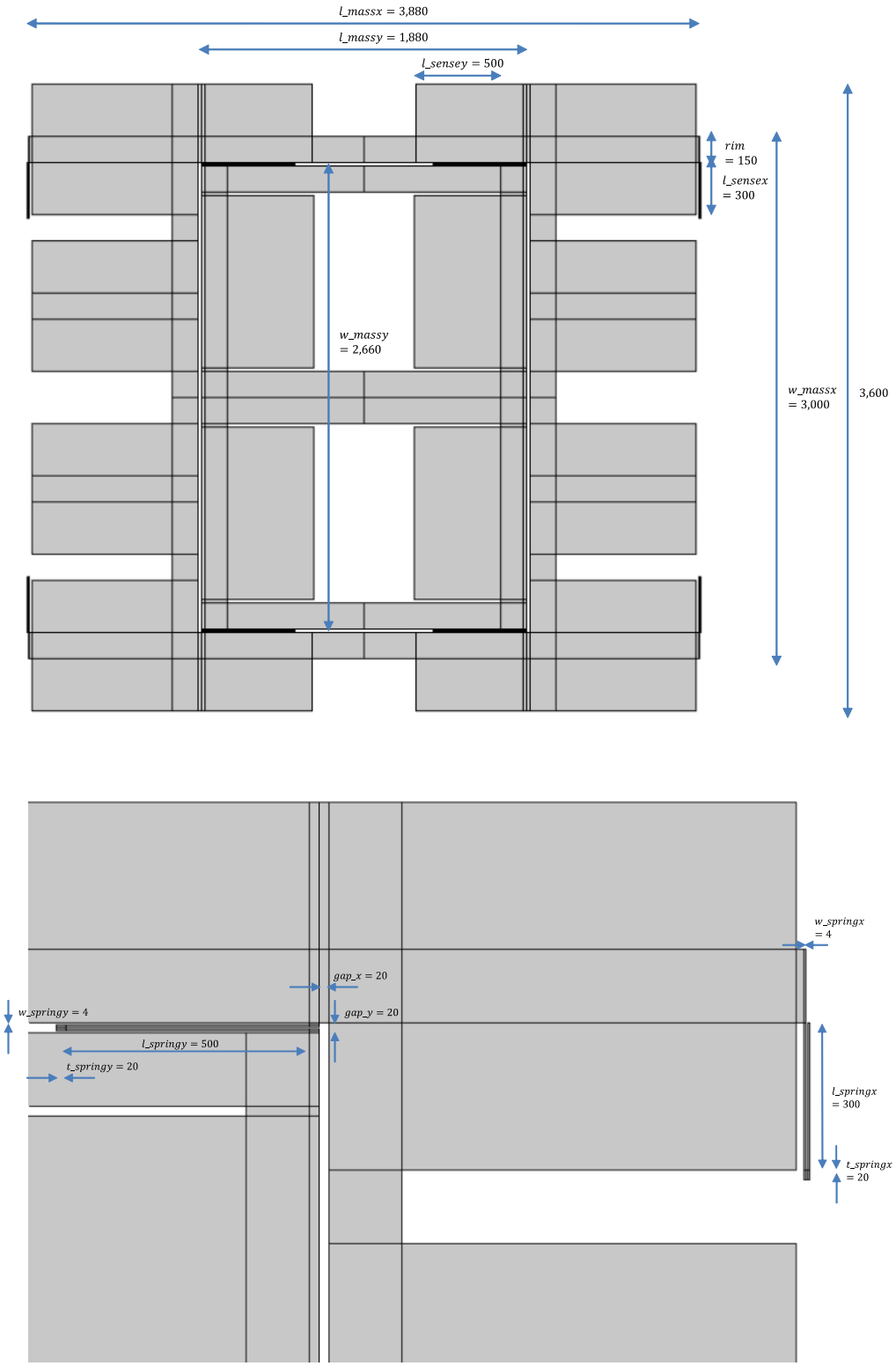
과제 초기 기술 동향 조사를 통해 파악한 바와 같이 생산성과 기술적 안정성을 고려하여 인가되는 진동에 의해 발생하는 관성질량의 변위에 비례하는 정전용량을 검출하는 방식으로 선정했는데, 이는 센서 설계 후 제조 공정과 밀접한 관계가 있다. 특히 전문 제조업체를 통해 제작하기 위해선 제조 공정의 이식성이 매우 중요한 바 양산기술이 검증된 silicon surface micro-machining 가공 기술이 적용 가능하도록 설계해야 한다.

지진 모니터링을 위해서 구조물에 다수의 센서 모듈을 장착해야 하므로 센서 모듈 자체의 소형화가 필요한데 3축 감지를 위해 동일한 센서 3개를 지교 조립하기 보다는 2축 센서 2개를 조립하는 것이 유리하다. 따라서 수평 방향 2축 가속도 센서를 개발해서 이를 2개 직교 배치하는 방식으로 개발 방향을 설정하였다.



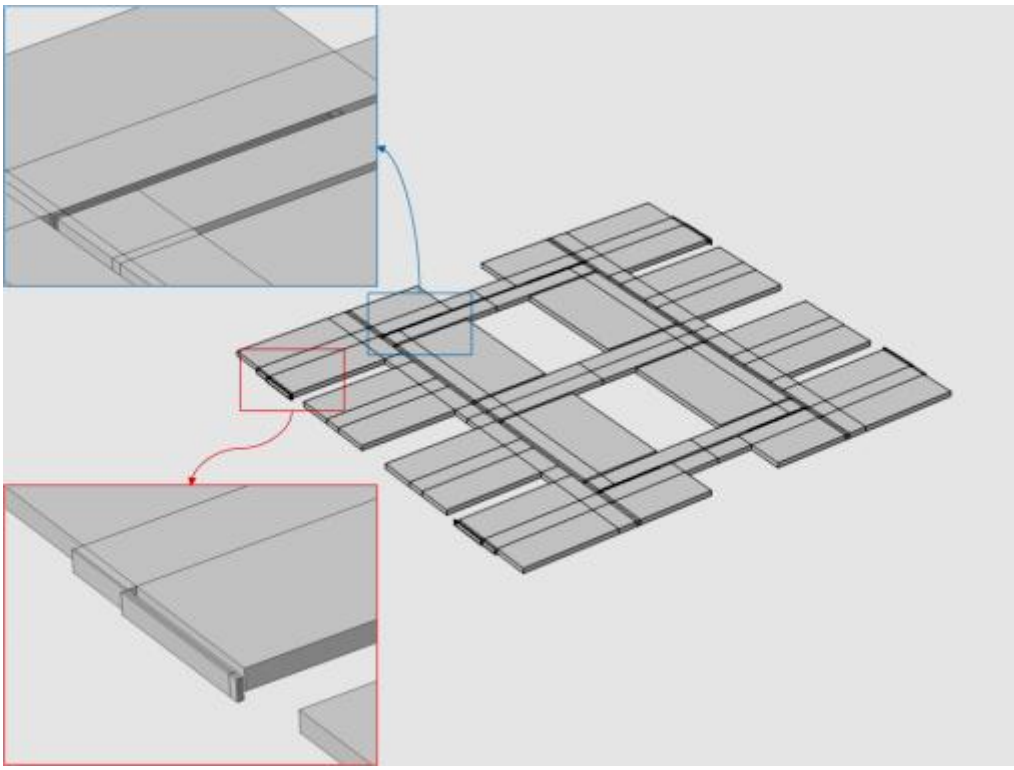
[2개의 수평형과 MEMS 가속도계를 이용한 지진계 모듈 구성]

센서 진동 구조물은 일반적인 comb sensing 구조를 택하고 감지 방향의 1차 고유진동수가 최소 500Hz 이상이며, 정전 용량의 변화량이 최소 100 fF/g 이상이 되는 진동 센서 구조 설계를 목표로 하였다. 이를 위해 두께의 실리콘 표면미세가공 공정을 고려하여 내부 gimbal에 의해 2축 수평 방향의 관성력에 대해 독립적인 진동 구조를 갖도록 구성했으며 전체 구조물의 크기는 $3{,}880 \times 3{,}600 \times 30\,\mu m^3$ 이다.



[지진계용 수평형 2축 가속도 센서 평면도]

이 진동구조는 4개의 고정부를 통해 연결된 외부 스프링에 의해 하부 기판에서 2 현수된 상태이며, 2자유도의 거동을 위한 내부 김벌도(gimbal) 내측 4개의 스프링으로 연결되어 두 개의 독립된 진동이 가능하도록 구성하였다.



[김벌(gimbal) 및 스프링 구조]

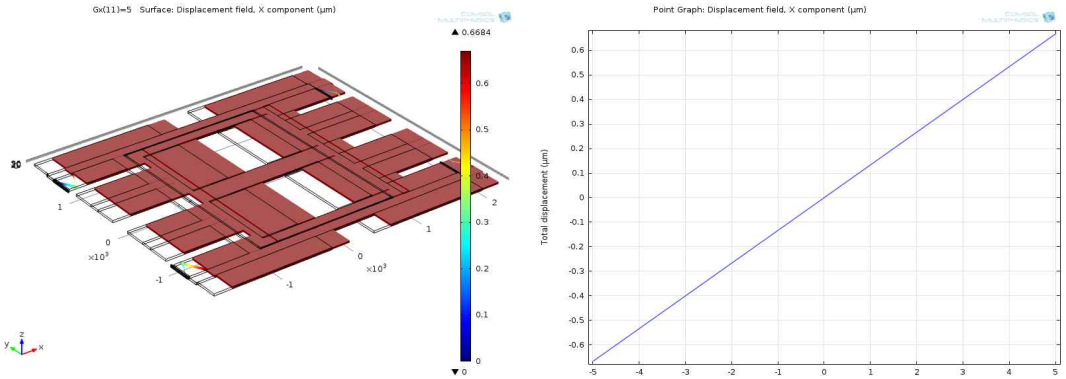
유한 요소 해석을 통해 확인한 결과 수평 방향 2개의 고유진동수는 1[kHz] 부근이고 원치 않는 고차 모드는 4[kHz] 이상에서 발생하므로 요구하는 모드의 진동을 효과적으로 검출할 수 있음을 확인하였다. 특히 z 방향 고차 모드는 타축 감도에 직접적인 영향을 주기 때문에 강성을 높여야 하는데 제작 공정의 난이도를 고려하여 구조물의 두께를 30[μm]로 제한하고 관성 질량을 높이기 위해 면적을 크게 가져갔기 때문에 거의 한계치라고 볼 수 있다.

[진동 모드 해석 결과]

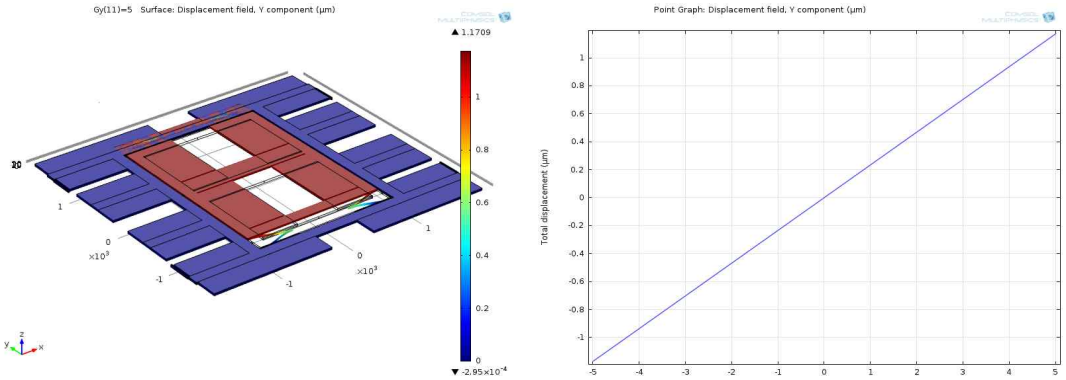
차수	단위	고유 진동수	진동 모드	비고
1 차	Hz	1,031	Trans-Y motion	Y sensing mode
2 차	Hz	1,364	Trans-X motion	X sensing mode
3 차	Hz	3,998	Trans-Z motion	
4 차	Hz	6,450	Tilt-X motion	
5 차	Hz	7,059	Tilt-Y motion	

x/y/z 축방향으로 ±5G의 가속도를 인가할 때 발생하는 변위는 다음과 같다.

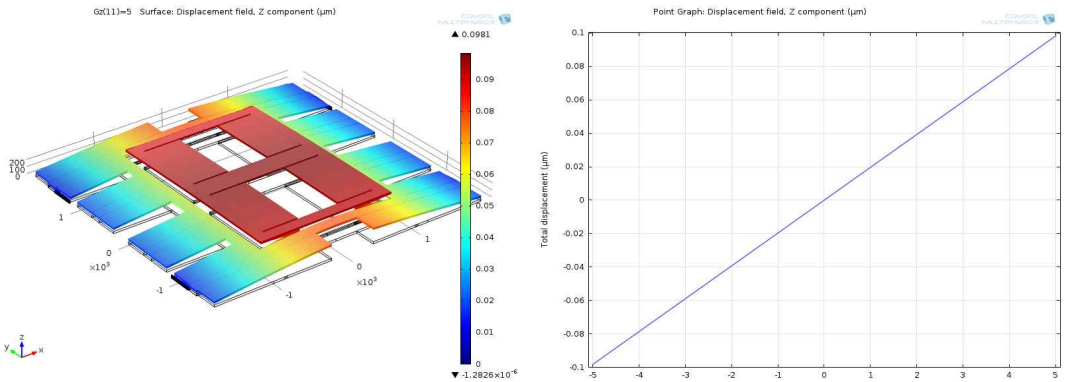
[유한요소 해석 결과]



<x축 가속도 응답>



<y축 가속도 응답>



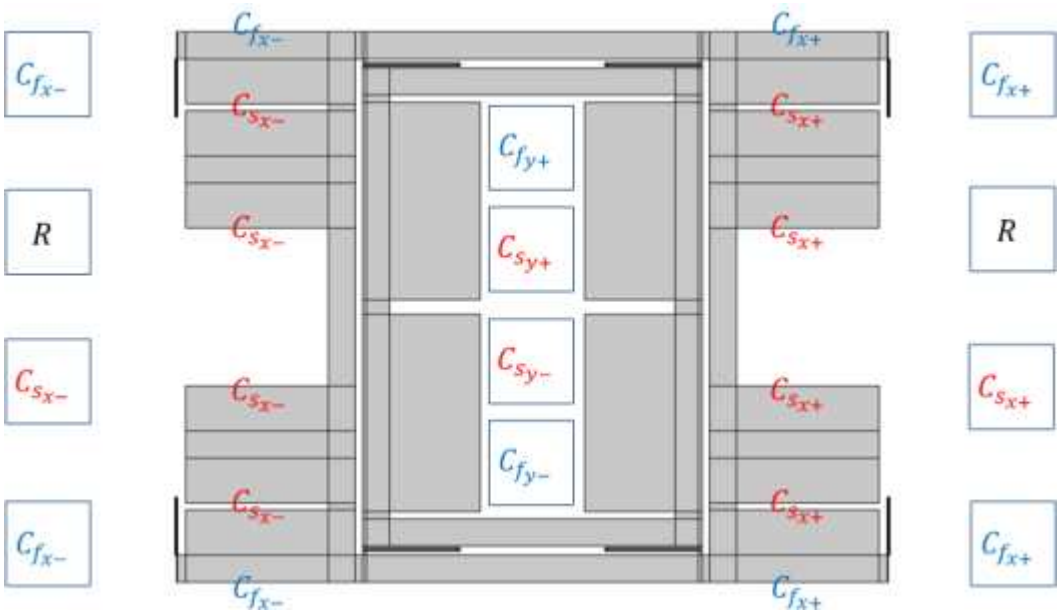
<z축 가속도 응답>

앞에서 보인 정적 응답으로부터 선형성과 변위 감도를 파악할 수 있다. 3축의 응답이 모두 선형 동작 영역에 속하는데, 특히 가속도 감지에 사용할 X와 Y 모드의 감도차가 크기 때문에 동일한 변위에 대해 X축 용량 변화를 키워야 한다. 또한 2축의 가속도계 2개를 사용하면 3축 감지에 대해 1개 여유가 발생하기 때문에 감도가 낮은 X축 센서 2개 신호를 병합하는 방식으로 보완할 수 있다.

[관성 질량의 변위 감도]

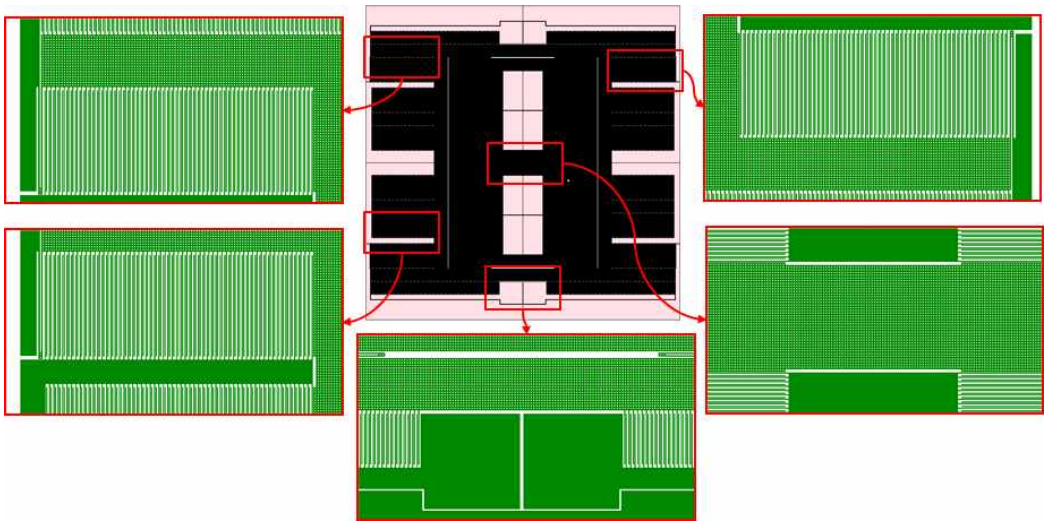
진동 모드	변위 감도	비고
X 축 거동	$133nm/g$	2 차 모드
Y 축 거동	$234nm/g$	1 차 모드
Z 축 거동	$20nm/g$	3 차 모드

여기서 센서의 타축 감도를 개선하기 위해 Z축 감도는 낮을수록 좋다. 그러나 구조적인 한계가 있기 때문에 X/Y축 변위에 대한 용량 변화가 차동으로 발생하도록 감지 전극을 구성하는 것이 필수적이다. 또한 센서 출력의 선형성을 개선하기 위해 출력 신호를 feedback하는 force balancing 전극 구조도 형성해야 한다. 아래는 수평형 2축 가속도 센서의 전극 구조를 표시한 것이다. 여기서 s는 감지 전극, f는 피드백 전극, R은 기준 전위 전극을 의미하며, +와 -는 각각의 차동 성분을 표시한 것이다.



[센서의 전극 배치]

이를 바탕으로 센서 제작을 위해 작성한 layout 도면 작업을 진행하였다. 제조 공정상에 큰 구조물이 바닥 전극에서 현수될 수 있도록 희생층을 제거하는 과정이 필요한데 이 때 희생층 식각을 용이하게 할 수 있도록 관성 질량에 $5\times5\mu m^2$ 의 식각 홀을 25%의 비율로 형성하였다. 또한 comb finger 전극은 finger 폭 $3\mu m$, 전극 간격 $2\mu m$로 구성하였다. Chip layout 과정에서 구조 해석시 사용한 치수에 비해 가능한 변화가 없도록 설계하였다.



[센서 구조 chip layout]

Layout 단계에서 결정된 전극 치수를 이용하여 변위에 따른 감지 전극의 용량 변화와 감도를 계산할 수 있다.

$$C_{sx1} = C_{sx2} = \frac{8.854p \times 302\mu \times 20\mu}{2\mu} \times 62 \times 6 = 14.92pF$$

$$\Delta C_{sx1} = -\Delta C_{sx2} \cong \frac{C_{sx1}}{2\mu} \times S_x = \frac{14.92p}{2\mu} \times S_x = 7.46 \times 10^{-6} \times S_x$$

$$\frac{\Delta C_{sx}}{g} = \frac{\Delta C_{sx1} - \Delta C_{sx2}}{g} = 2 \times \frac{\Delta C_{sx1}}{g} = 2 \times 7.46 \times 10^{-6} \times \frac{S_x}{g} = 2 \times 7.46 \times 10^{-6} \times \frac{133n}{g}$$

$$= 1.984pF/g$$

$$C_{sy1} = C_{ssy2} = 8.854p \times \frac{526\mu \times 30\mu}{2\mu} \times 39 \times 2 = 5.45pF$$

$$\Delta C_{sy1} = -\Delta C_{sy2} \cong \frac{C_{sy1}}{2\mu} \times S_y = \frac{5.45p}{2\mu} \times S_y = 2.73 \times 10^{-6} \times S_y$$

$$\frac{\Delta C_{sy}}{g} = \frac{\Delta C_{sy1} - \Delta C_{sy2}}{g} = 2 \times \frac{\Delta C_{sy1}}{g} = 2 \times 2.73 \times 10^{-6} \times \frac{S_y}{g} = 2 \times 2.73 \times 10^{-6} \times \frac{234n}{g}$$

$$= 1.277pF/g$$

또한 피드백 전극의 크기로부터 피드백 커패시터와 정전력을 계산하면 아래와 같다.

$$C_{Fx1} = C_{Fx2} = 8.854p \times \frac{151\mu \times 30\mu}{2\mu} \times 126 \times 2 = 5.05pF$$

$$\Delta C_{Fx1} = -\Delta C_{Fx2} \cong \frac{C_{Fx1}}{2\mu} \times S_x = \frac{5.05p}{2\mu} \times S_x = 2.53 \times 10^{-6} \times S_x$$

$$F_{x1} = -F_{x2} \cong \frac{V_{Fx}^2}{2} \times \frac{C_{Fx1}}{\partial x} = \frac{2.53 \times 10^{-6}}{2} \times V_{Fx}^2 = 1.26 \times 10^{-6} \times V_{Fx}^2 N$$

$$C_{Fy1} = C_{Fy2} = 8.854p \times \frac{526\mu \times 30\mu}{2\mu} \times 39 \times 2 = 5.45pF$$

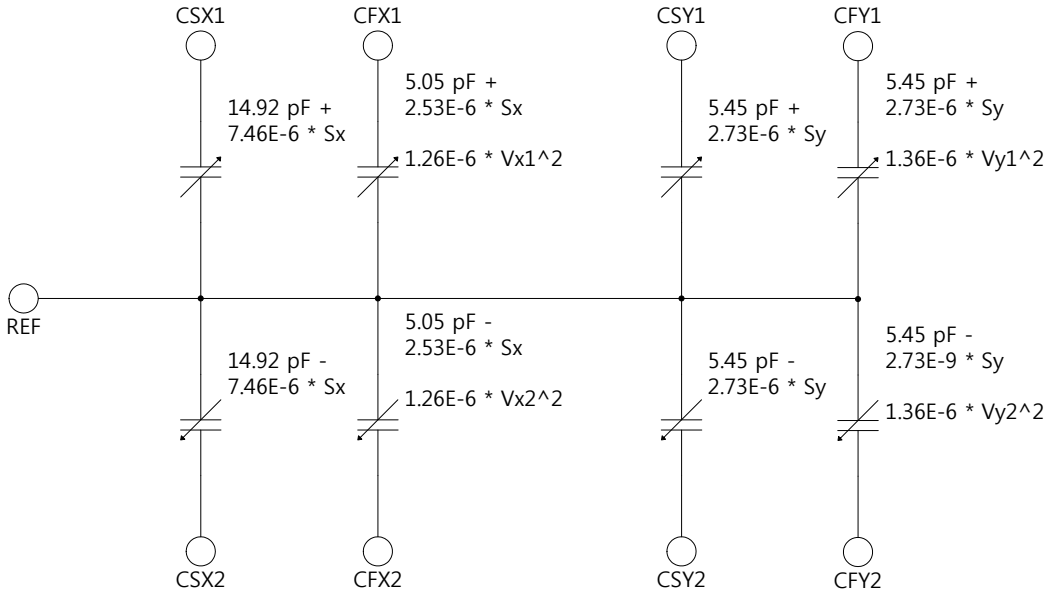
$$\Delta C_{Fy1} = -\Delta C_{Fy2} \cong \frac{C_{Fy1}}{2\mu} \times S_y = \frac{5.45p}{2\mu} \times S_y = 2.73 \times 10^{-6} \times S_y$$

$$F_{y1} = -F_{y2} \cong \frac{V_{Fy}^2}{2} \times \frac{C_{Fy1}}{\partial x} = \frac{2.73 \times 10^{-6}}{2} \times V_{Fy}^2 = 1.36 \times 10^{-6} \times V_{Fy}^2 N$$

[feedback 전압 크기에 따른 구동력의 변화]

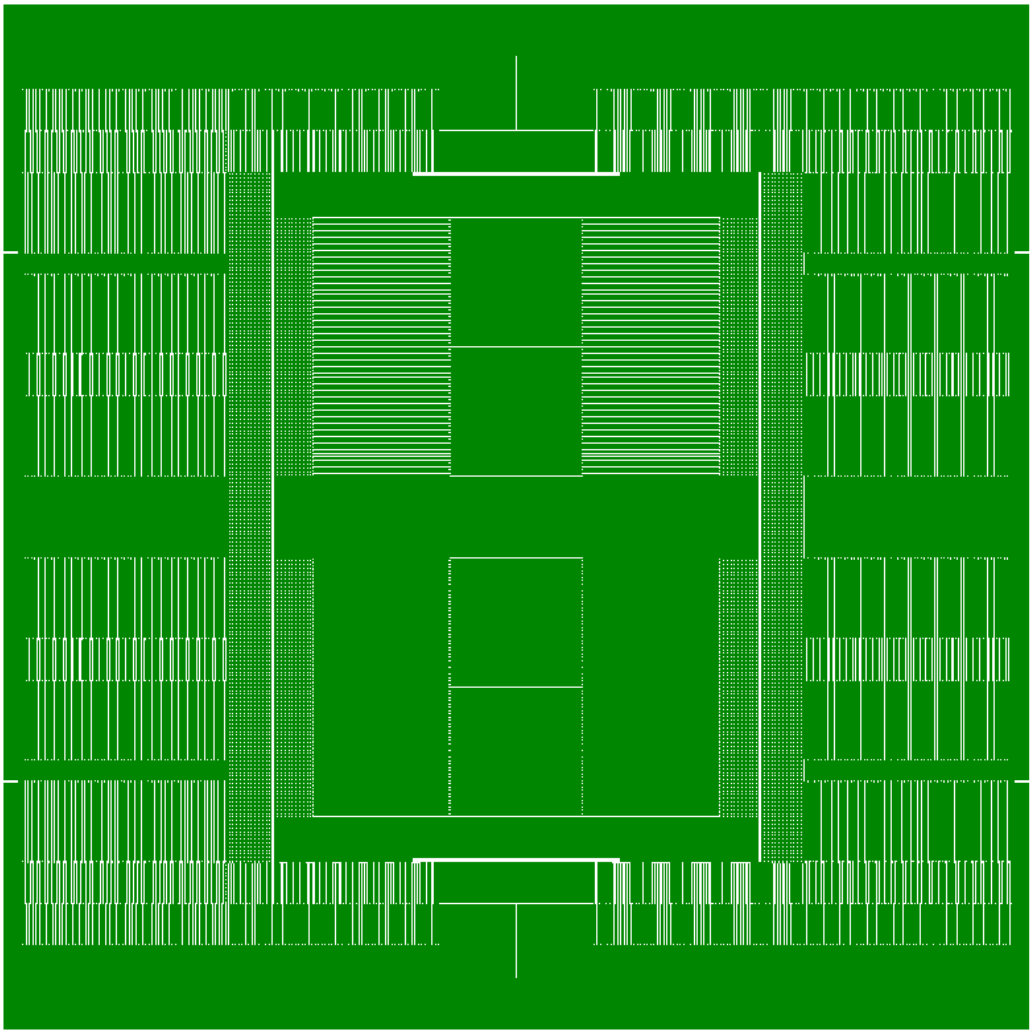
구동전압[V]	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
X 축 구동력[N]	12.6n	50.4n	201.6n	453.6n	806.9n	1.26μ	1.81μ
Y 축 구동력[N]	1.81μ	1.81μ	1.81μ	1.81μ	1.81μ	1.81μ	1.81μ

2축 가속도 센서는 전기적으로는 아래에서 보인 바와 같이 하나의 R 전극을 공유하는 8개의 커패시터로 모델링 할 수 있다.



[2축 가속도 센서의 전기적 모델]

센서 die 하나의 점유 면적은 $4{,}000 \times 4{,}000\,\mu m^2$4,000×4,00 이며, 다음은 센서 die 전체 외관을 나타낸 것이다.



[센서 구조 chip 전체 외관]

세부 layout 결과로부터 유한요소 해석을 통해 센서의 기계적 파라미터를 정리한 결과는 아래와 같으며 또한 이로부터 분해능과 기계적 잡음 등의 사양을 아래와 같이 정리할 수 있다. 통상 BNEA(Brownian noise equivalent acceleration)은 CNEA(Ciicuit noise equivalent acceleration)에 비해 월등히 크기 때문에 TNEA(Total noise equivalent acceleration)에서 회로 잡음은 무시할 수 있다.

$$BNER = \sqrt{\frac{8\pi K_B T f_o}{mQ}}$$

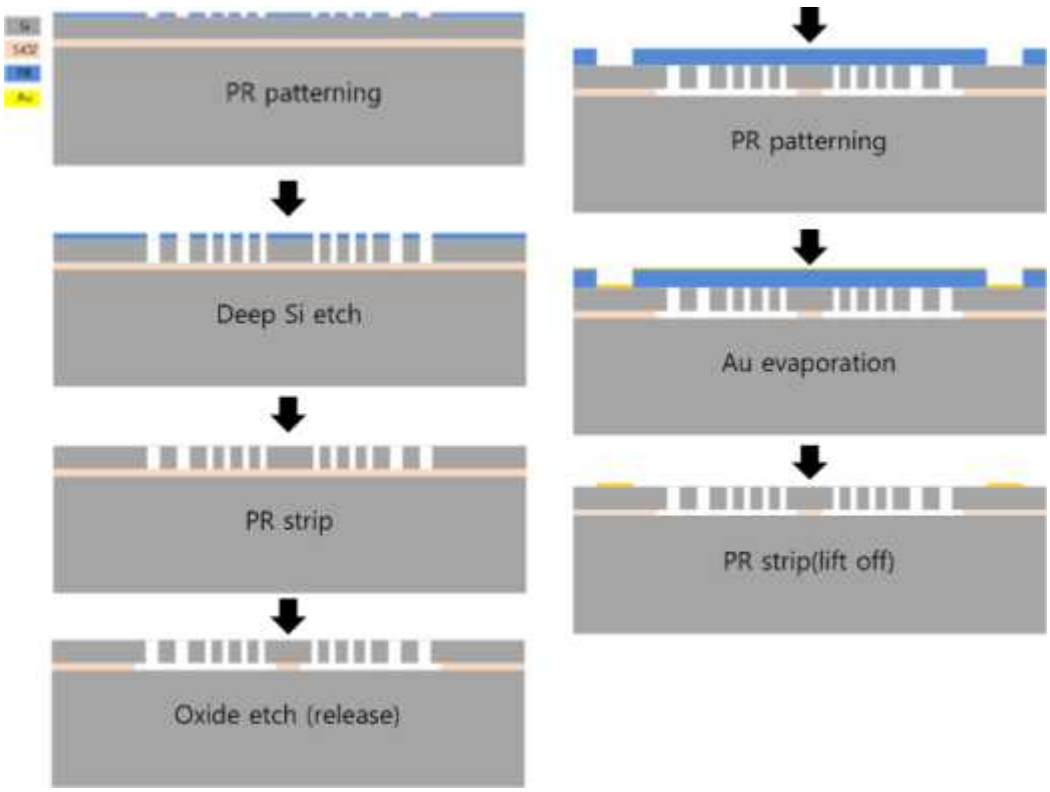
$$TNEA = \sqrt{BNEA^2 + CNEA^2} \cong BNEA$$

[2축 가속도 센서 파라미터]

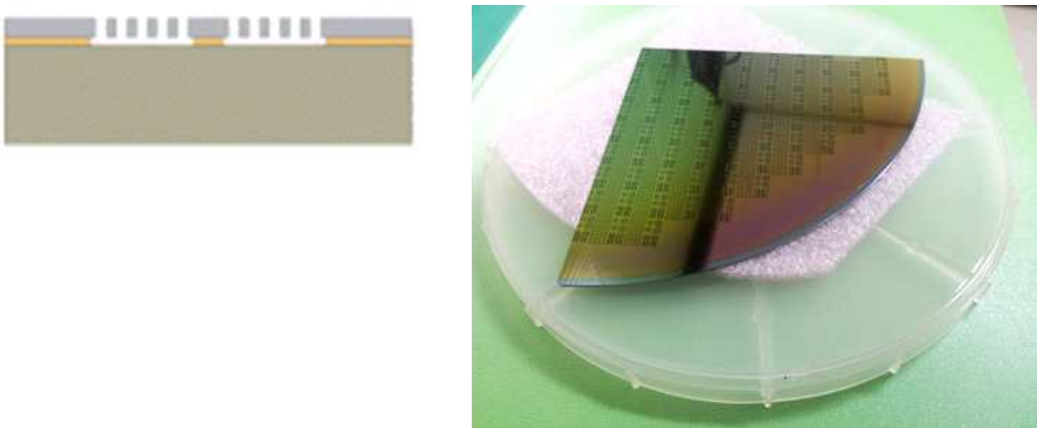
항목	단위	X 축 거동	Y 축 거동	비고
M	kg	320.9×10^{-9}	120.2×10^{-9}	관성 질량
f_r	Hz	1,364	1,031	고유 진동수
K	N/m	23.57	5.04	기계적 강성
c	$N/m/s$	6.74×10^{-3}	1.91×10^{-3}	Q = 0.408
f_g	μN	6.3	2.4	관성력 @ 2g
S	nm	266.9	476.2	정적 변위 @ 2g
ΔC	pF	3.98	2.60	차동 용량변화 @ 2g
BNEA	$g/\sqrt{Hz}$	3.81×10^{-6}	5.51×10^{-6}	Brownian noise
CNEA	$g/\sqrt{Hz}$	6.49×10^{-8}	6.40×10^{-8}	Circuit noise
TNEA	$g/\sqrt{Hz}$	3.81×10^{-6}	5.51×10^{-6}	Total noise

② MEMS 센서 구조물 제작

센서 구조물 제작을 위해 (111) SOI(silicon on insulator) 웨이퍼를 이용하는 표면미세 가공 공정 설계를 마쳤으며, 국내 MEMS 전문 제조 업체인 GMEMS를 통해 8" SOI wafer로 제조 공정 test run을 수행하였다. 아래는 SOI 웨이퍼를 사용하는 공정 흐름도와 제작 완료된 웨이퍼 일부를 보인 것이다.



[SOI 웨이퍼를 이용하는 센서 구조물 제작 공정 흐름도]

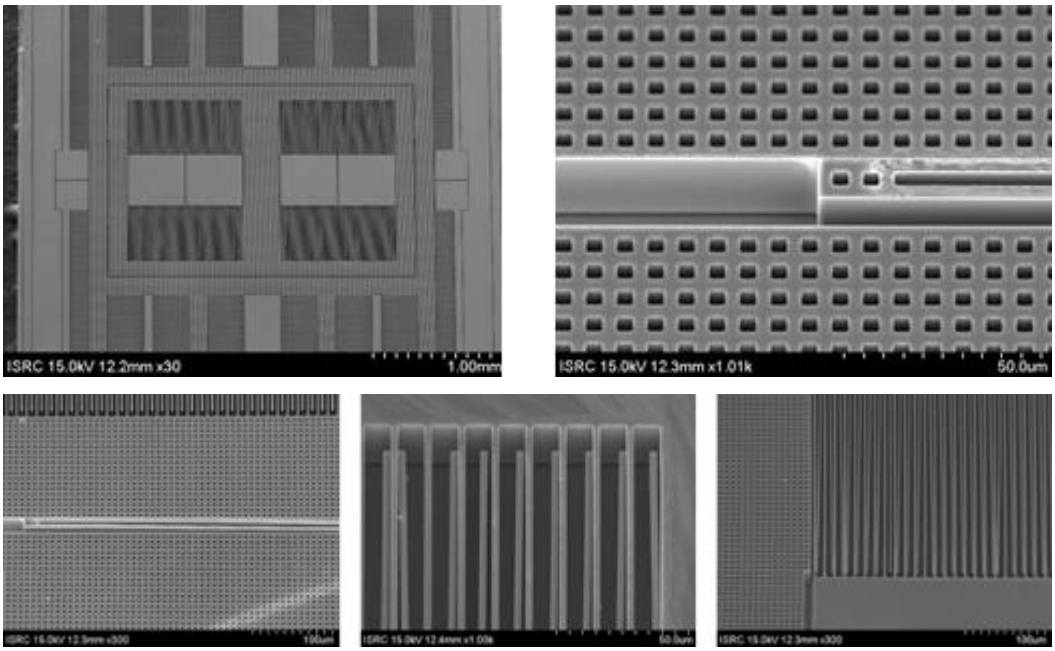


[MEMS 센서 웨이퍼 단면도 및 가공된 웨이퍼 외관]

제조 공정이 완료된 SOI wafer는 각 die별로 sawing을 통해 singulation이 이루어지는데 현재 die 크기가 $4 \times 4mm^2$이기 때문에 8" wafer 1매에 약 4,000개의 MEMS die를 얻을 수 있으며, 제작된 MEMS chip die의 외관과 주요부위 확대사진은 다음과 같다.

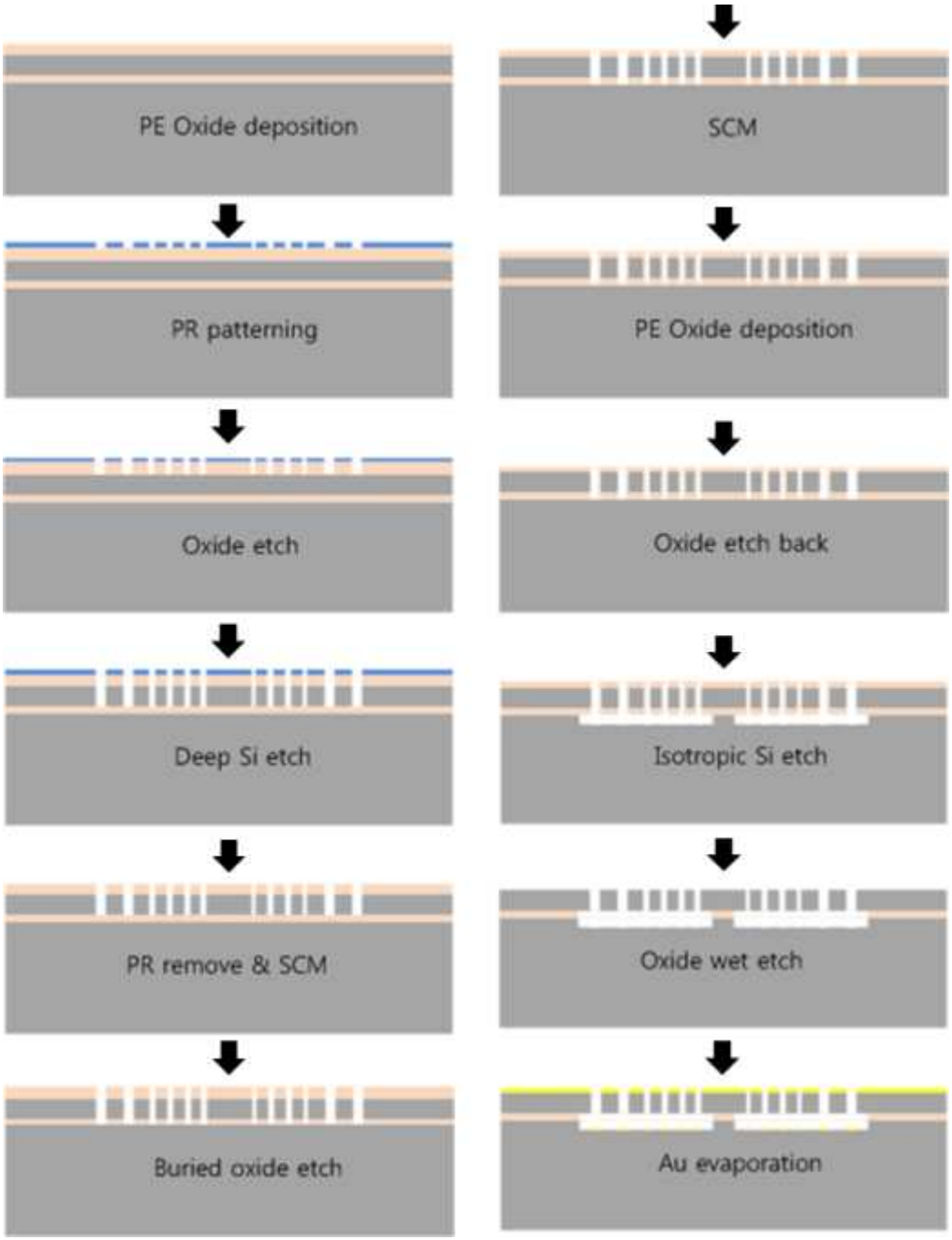
[MEMS 센서 구조물 die 외관]

제작된 구조물을 SEM(scanning electron microsope)으로 관측한 결과 많은 부분에서 stiction에 의한 불량 발생을 확인할 수 있었다. 이는 공정 개발 단계에서 어느 정도 예상한 결과이지만 궁극적으로 저가형 MEMS 센서가 되기 위해선 제조 단계에서의 수율을 확보하는 것이 중요하기 때문에 설계 보완이 필요하다.



[stiction에 의한 불량 현상]

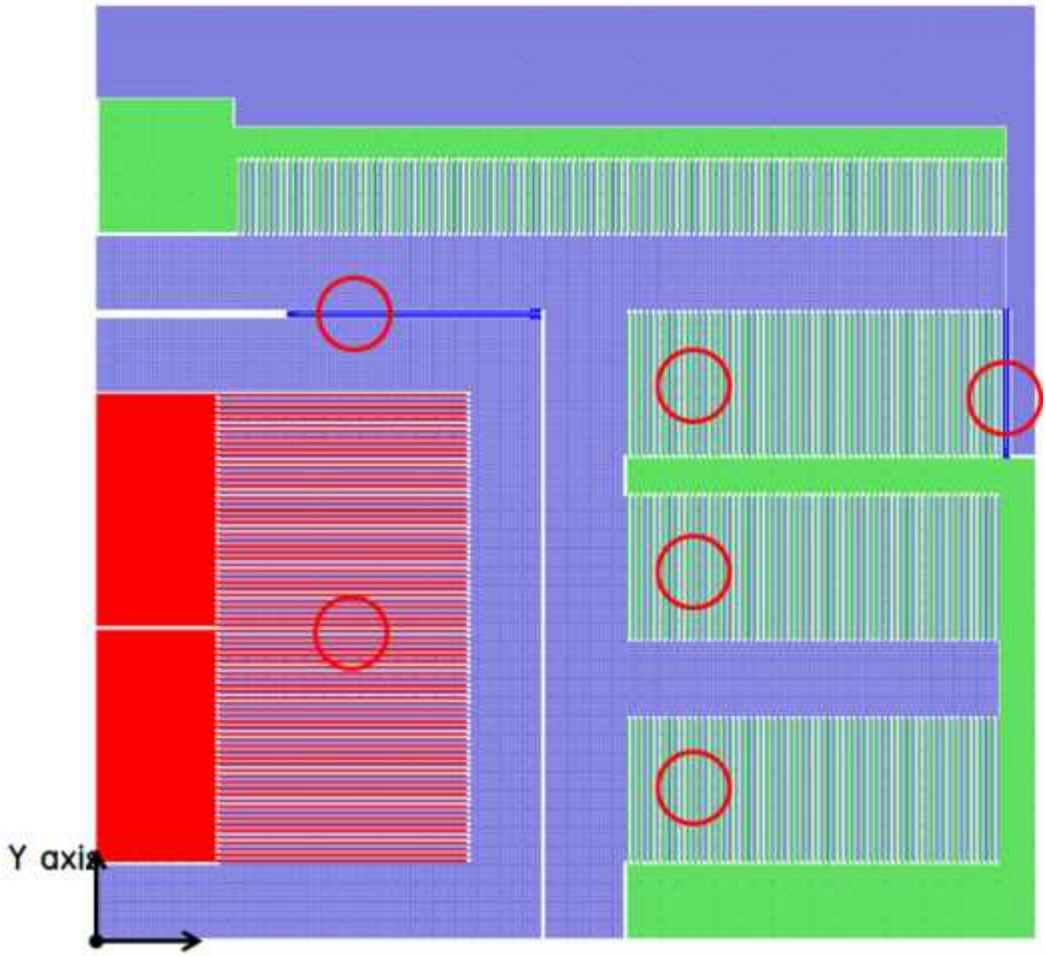
이처럼 stiction이 발생하는 이유는 여러 가지가 있겠지만 크게 구조설계에서 보완할 부분 외에도 공정 설계의 보완을 통해 개선가능하다. 특히 진동 구조물과 하부 기판과의 간극이 $2\mu m$에 불과한 공정으로는 거대한 관성 질량을 불량 없이 현수시키는 것이 어렵다고 판단되어 구조물 하부의 간극을 넓힐 수 있도록 공정 설계를 변경하였다. 아래는 변경된 공정 흐름도를 보인 것이다.



[하부 간극을 넓히기 위해 변경된 공정 흐름도]

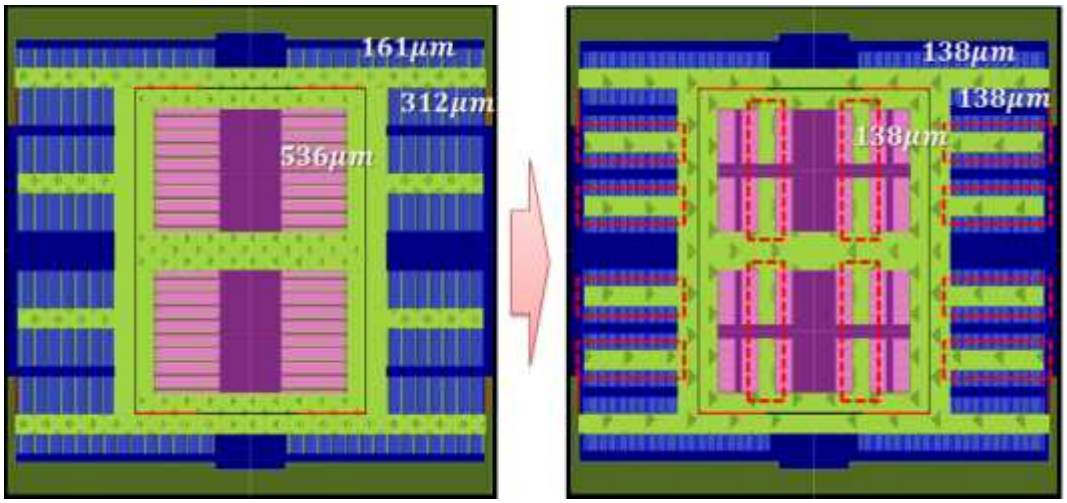
③ MEMS 센서 구조물 수정 설계

앞에서 기술한 제조 수율 개선을 위한 공정 설계 변경과 함께 구조 설계에도 개선의 여지가 존재한다. 개발된 MEMS 구조물은 거대한 관성질량이 4개의 스프링에 연결되어 현수되어 있는 구조에 가늘고 긴 comb 전극이 배치되어 있는 상태이다. 이들 부위에서 stiction 현상이 주로 발생하는 것으로 파악된다

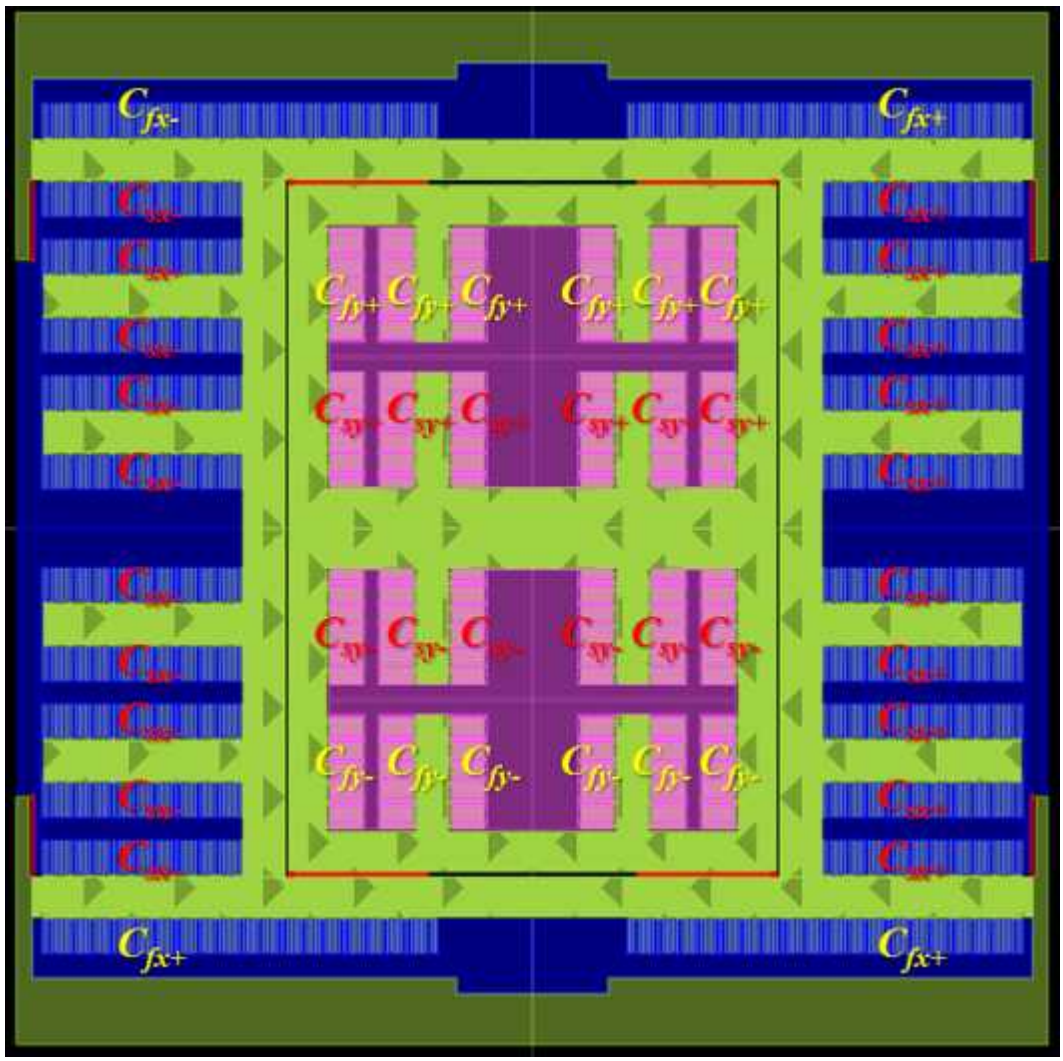


[stiction 취약 영역]

stiction 저감을 위해선 comb 전극의 길이를 줄여야 하는데 단순히 전극 길이만 줄이면 기존 설계치에 비해 감지 용량이 크게 줄어들기 때문에 지진계 용도로 사용할 수 없다. 따라서 아래에 도시한 바와 같이 backbone 구조를 통해 짧은 comb 전극을 배치할 수 있도록 변경하였다.

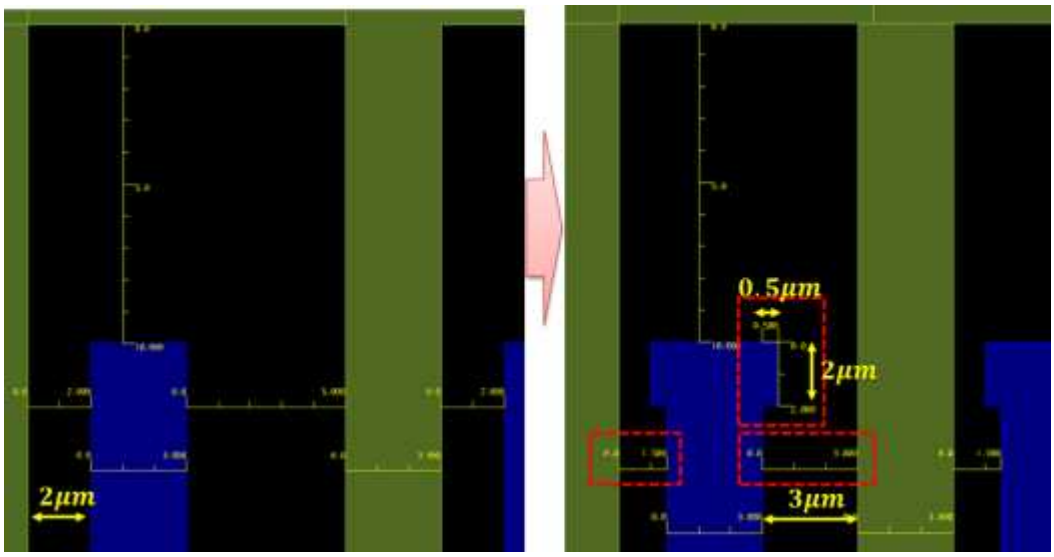


[comb 전극 길이 축소를 위한 backbone 구조]

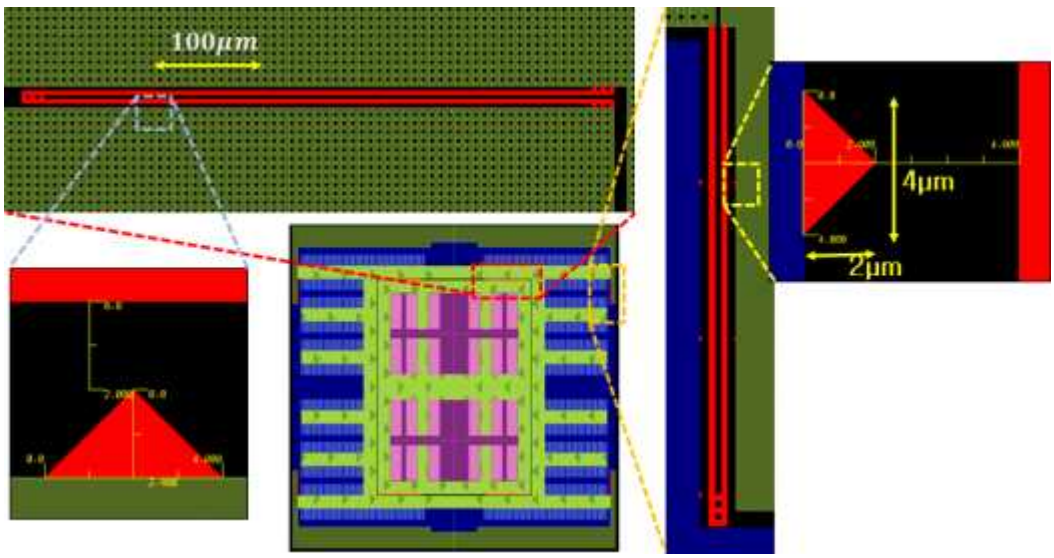


[설계 변경된 2자유도 지진 감지용 MEMS 구조물 개략도]

또한 취약한 구조 부위에 stiction이 발생하더라도 극히 적은 면적에서만 접촉되도록 dimple을 적용하면 정상으로 복귀할 수 있다. 이를 위해 comb 전극과 spring에 dimple을 추가하였다.

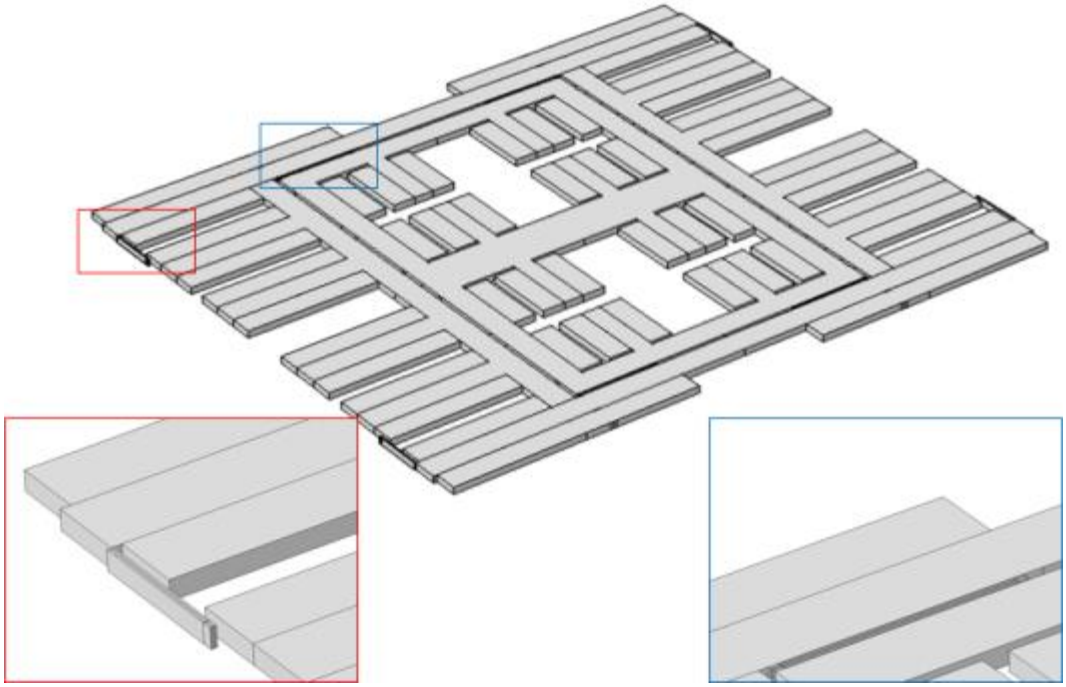


[comb 전극 dimple 추가 변경 내용]



[dimple을 채용한 spring 구조 변경 내용]

다음 그림은 backbone 구조 채용 후 전체 진동 구조에 대한 유한요소 해석을 하기 위해 3D로 구현한 결과이다. 이로부터 관성 질량과 기계적 강성, 감지 용량과 같은 파라미터를 추출할 수 있다. 여기서 dimple은 진동 구조에 미치는 영향이 미약하기 때문에 무시하였다.



[backbone 구조 채용으로 변경된 MEMS 센서 구조]

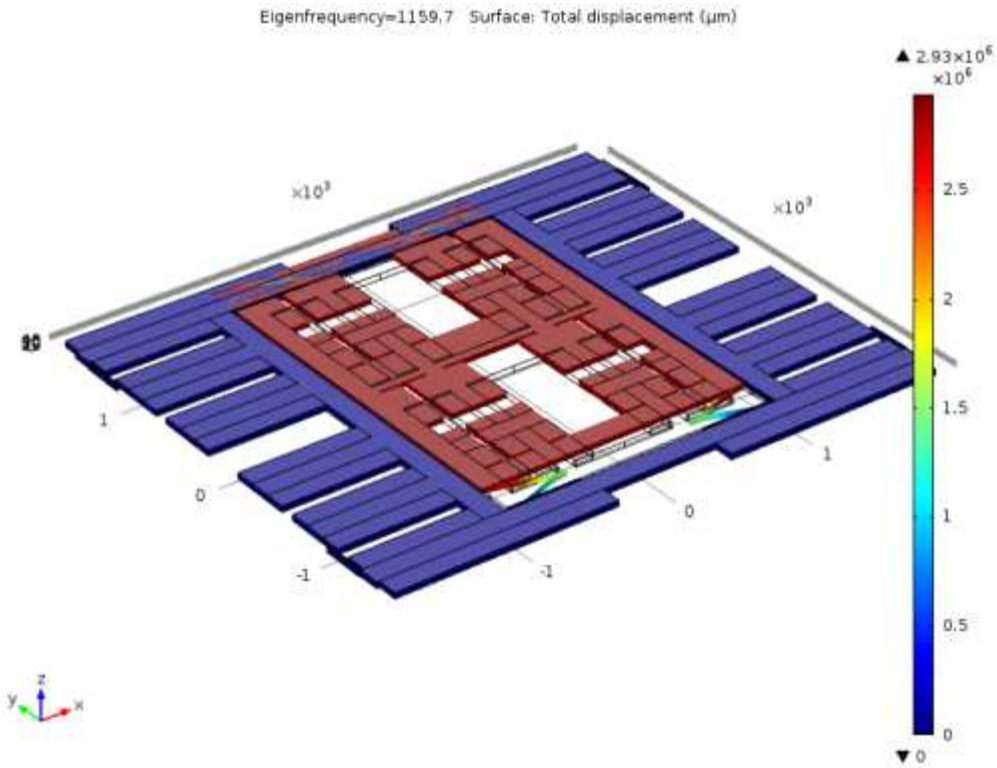
[변경된 MEMS 센서 구조물의 설계 파라미터]

설계 파라미터		결과치
X 축 센서	관성질량	$4.11\times10^{-7}kg$
	감지 커패시턴스	$14.41pF$
	1G당 커패시턴스 감도	$0.792pF$
	피드백 커패시턴스	$5.76pF$
Y 축 센서	관성질량	$1.87\times10^{-7}kg$
	감지 커패시턴스	$4.98pF$
	1G당 커패시턴스 감도	$0.473pF$
	피드백 커패시턴스	$4.98pF$

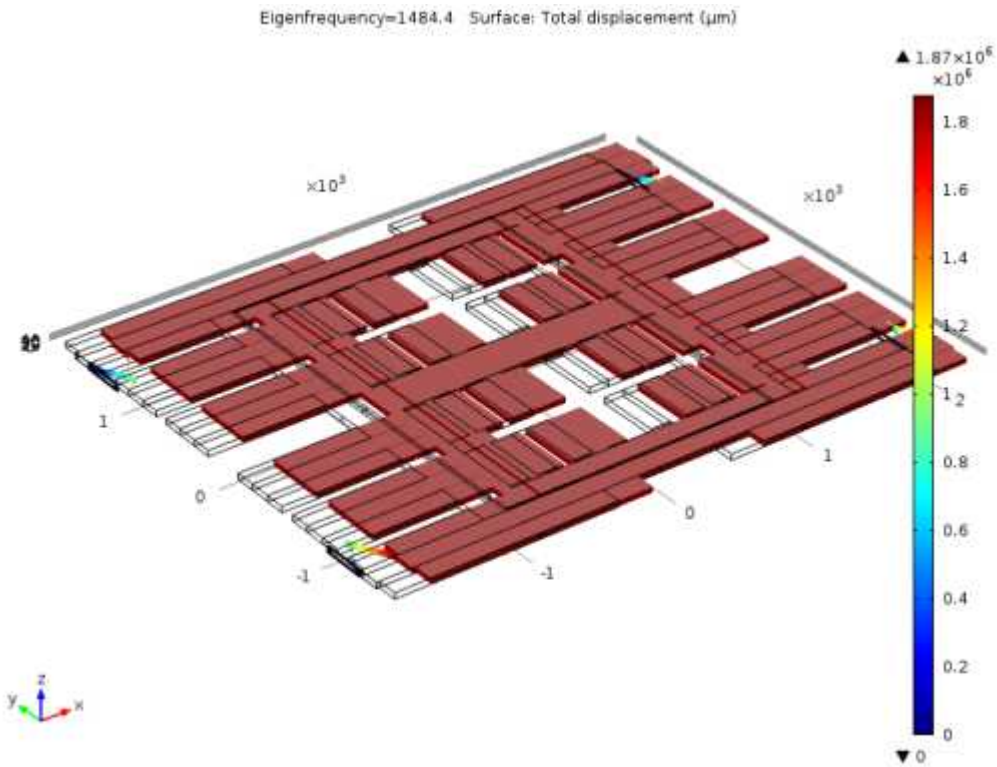
유한 요소 해석을 통해 확인한 결과 수평 방향 2개의 고유진동수는 1[kHz] 부근이고 원치 않는 고차 모드는 5kHz] 부근에서 발생하므로 요구하는 모드의 진동을 효과적으로 검출할 수 있음을 확인하였다. 전체적으로 backbone 구조에 의해 구조적 안정성이 증가하였다.

[진동 모드 해석 결과]

차수	단위	고유 진동수	진동 모드	비고
1 차	Hz	1,160	Trans-Y motion	Y sensing mode
2 차	Hz	1,484	Trans-X motion	X sensing mode
3 차	Hz	4,927	Trans-Z motion	
4 차	Hz	8,650	Tilt-X motion	
5 차	Hz	10,233	Tilt-Y motion	

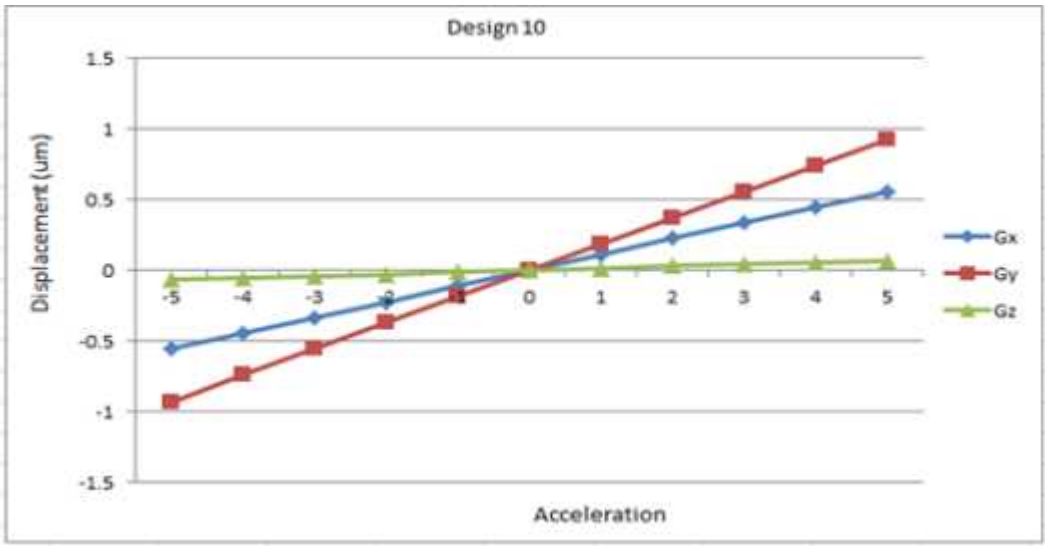


[y축 가속도 검출용 1차 공진 모드]



[x축 가속도 검출용 2차 공진 모드]

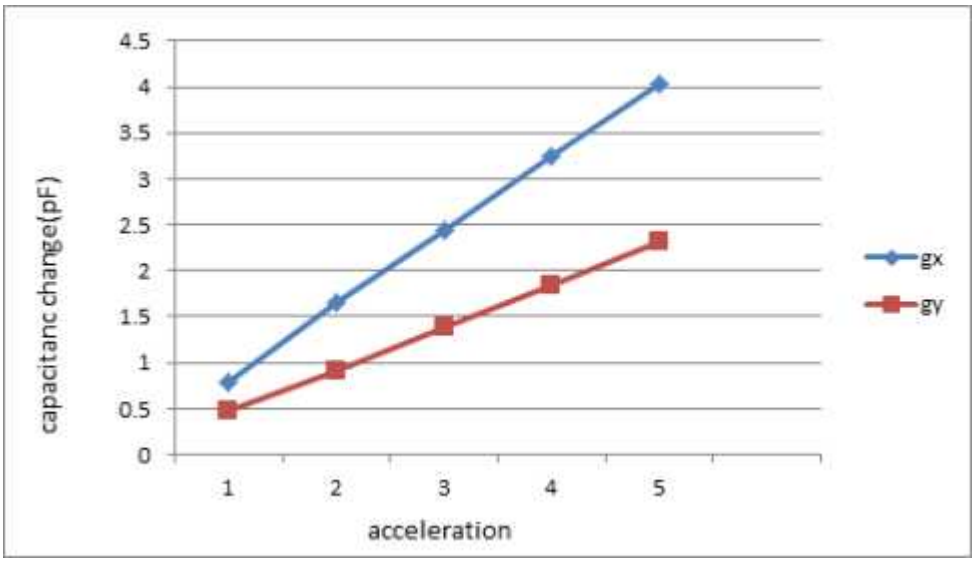
가속도가 인가될 때 발생하는 관성 질량의 변위를 해석하고 이로부터 변위 감도를 구한 결과는 아래와 같다. 예측한 바와 같이 2축 측정 방향 대비 원치 않는 방향으로의 변위는 10% 미만으로 유지된다. 같은 방법으로 가속도가 인가될 때 커패시턴스의 변화량도 구할 수 있다.



[가속도 입력에 따른 변위 출력]

[변위 감도와 고유진동수]

변위 감도		고유 진동수	
$S_x\,[\mu m/G]$	0.112	2차 모드(X)	1,160 Hz
$S_y\,[\mu m/G]$	0.186	1차 모드(Y)	1,484 Hz
$S_z\,[\mu m/G]$	0.012	3차 모드(Z)	4,925 Hz



[가속도 입력에 따른 커패시턴스 변화량]

설계 파라미터를 이용하여 BNEA(Brownian noise equivalent noise)를 계산할 수 있다. 제안된 방식의 경우 2축 방향 모두 동적범위가 지진계 요구 사양을 충분히 만족함을 확인할 수 있다.

$$BNER = \sqrt{\frac{8\pi\kappa_B T f_o}{mQ}}$$

[변경된 MEMS 센서 구조물의 설계 파라미터]

설계 파라미터		설계 파라미터
X 축 센서	관성질량	$4.11\times10^{-7}kg$
	고유 진동수	$1,484\,Hz$
	BNER	$1.93\times10^{-6}m/s^2/\sqrt{Hz} = 0.19\mu G/\sqrt{Hz}$
	잡음 수준	$1.34\mu G$
	동적 범위	129 dB
Y 축 센서	관성질량	$1.82\times10^{-7}kg$
	고유 진동수	$1,160\,Hz$
	BNER	$2.58\times10^{-6}m/s^2/\sqrt{Hz} = 0.26\mu G/\sqrt{Hz}$
	잡음 수준	$1.84\mu G$
	동적 범위	127 dB

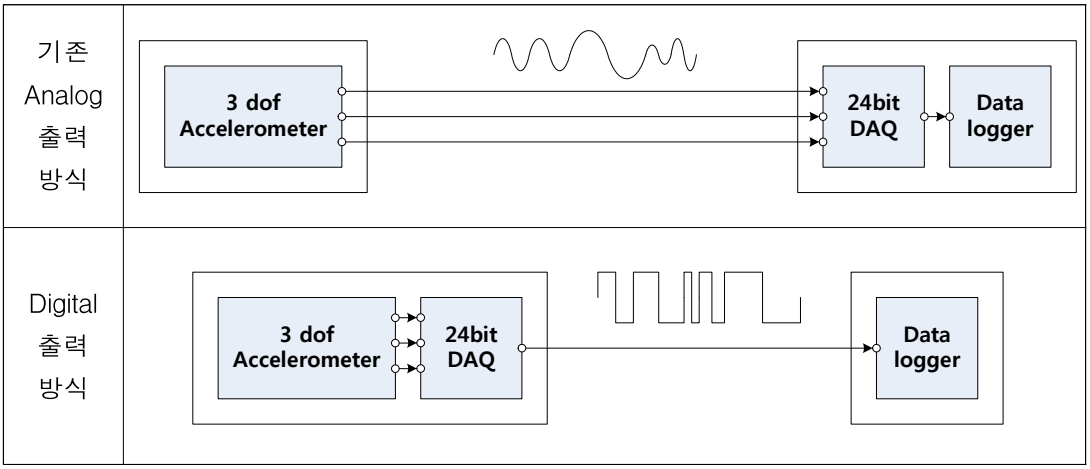
(나) MEMS ROIC 개발

① MEMS ROIC 구성

현재의 analog 출력 방식의 센서 모듈로 시스템을 구성하면 원격지에 있는 data logger까지 긴 배선이 필요하고 여기에 잡음이 혼입될 가능성이 많다. 물론 차동 출력 방식으로 구현하면 공통잡음에 대한 영향은 줄겠지만 사용 환경에 따라 내잡음성이 부

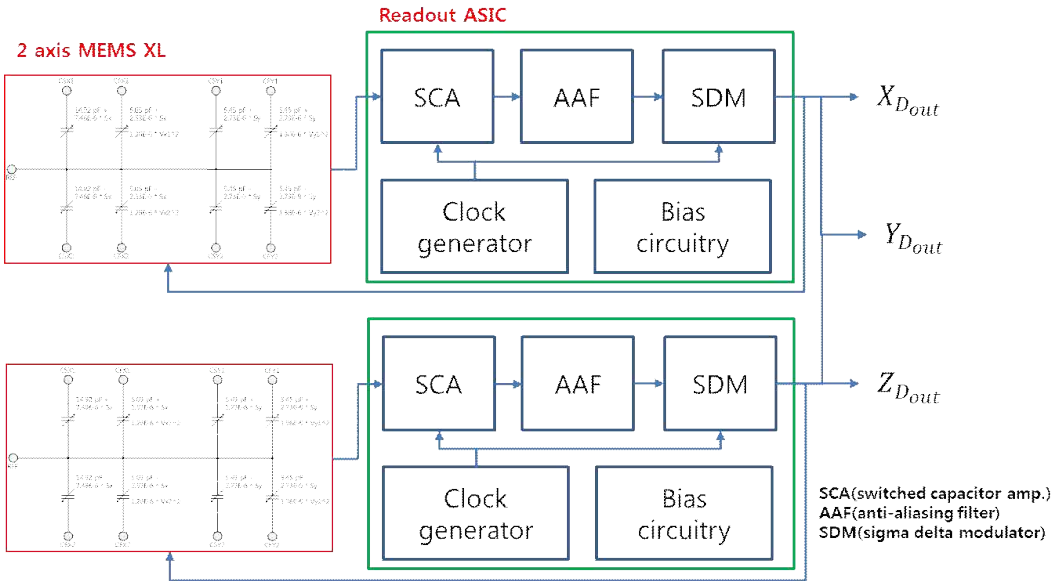
족할 수 있다. 따라서 센서 모듈 내에 24bit ADC를 내장시켜서 digital pulse train으로 data를 전송한다면 잡음에 훨씬 강인한 시스템이 될 수 있다.

[출력 방식에 따른 센서 모듈 구성]



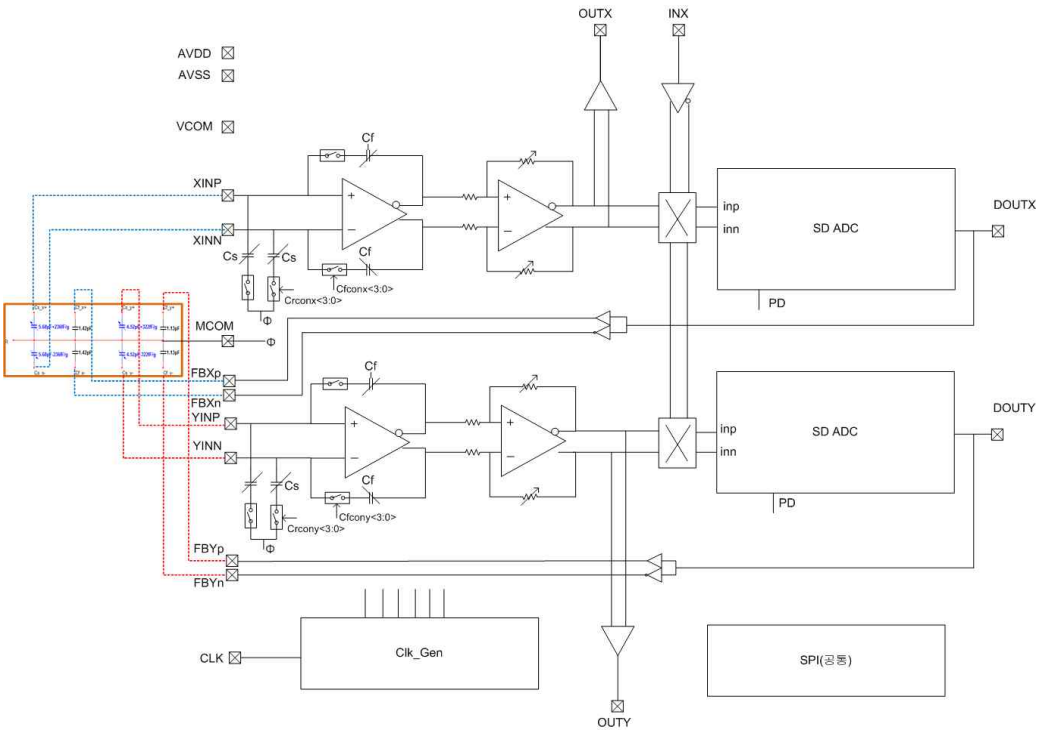
그러나 24bit ADC를 개발하는 것 자체만으로도 매우 난이도가 높고 큰 개발 과제이기 때문에 전문 ASIC 설계 업체의 참여가 필요하고 단기간의 연구 기간 내에 센서 모듈 개발에 실패할 수 있다. 이 경우는 별도의 DAQ board만 센서 모듈에 가까이 붙여서 data logger까지는 digital 신호가 전송되도록 구성해야 한다. 이런 사항을 감안하여 가속도 센서 구조로부터 출력 신호를 생성하는 sensor interface chip에 AFE(analog front end) 회로에 24bit ADC를 부가하는 방식으로 개발이 이루어져야 한다.

한편 MEMS 센서 구조를 잘 설계하더라도 가속도 신호를 검출하는 readout 회로에 의해서 성능이 좌우된다. Readout 회로는 센서 시스템 구성에 따라 크게 달라지는데 앞에서 기술한 바와 같이 본 연구에서는 24bit ADC를 내장하는 방식으로 설계 방향을 선정 하였다.



[전체 센서 interface block diagram]

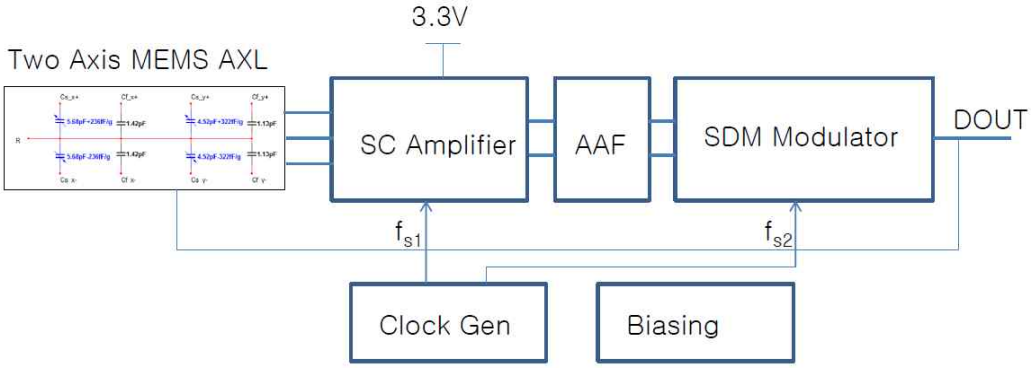
센서 구조에서 발생하는 용량 변화를 직접 검출하는 AFE(anaolg front end)회로는 SC(switched capacitor) Amp.에 CDS(correlated double sampling)방식으로 offset을 제거하고 gain을 제어할 수 있도록 구성한다. 지진계 모듈은 2축 가속도 센서를 2개 탑재하는 방식이므로 다음과 같이 동일한 readout ASIC chip 2개를 센서 후단에 연결하는 방식으로 전체 interface를 구성하였다.



[단일 2축 센서에 대한 readout block 구성]

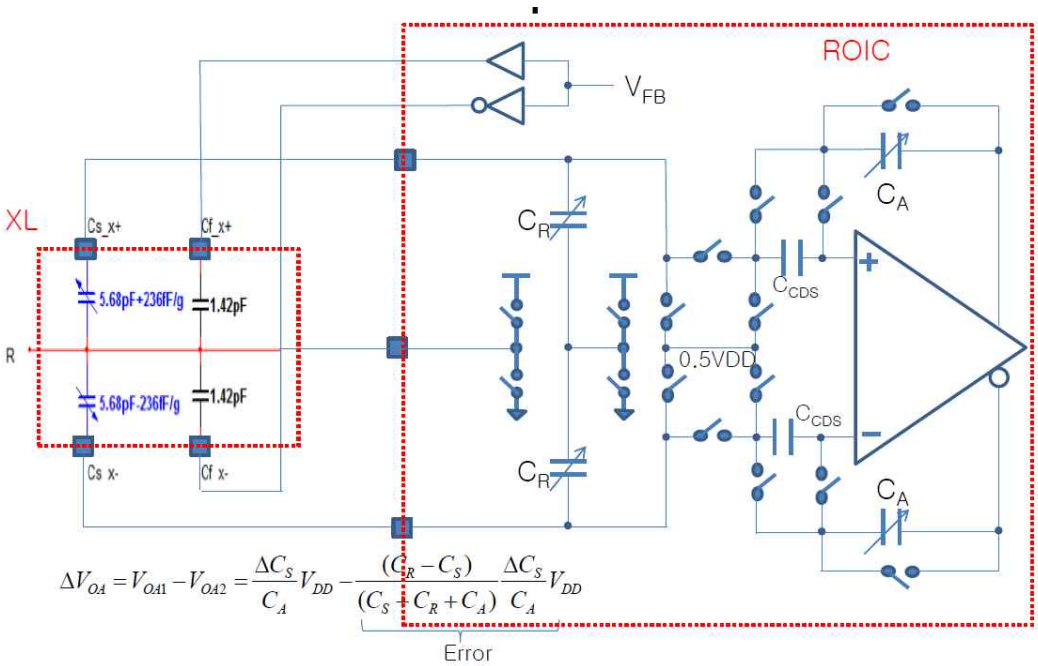
② MEMS ROIC 설계

ROIC를 기능별로 분류하면 아래와 같이 SCA(switched capacitor amplifier), AAF(anti- aliasing filter) SDM(sigma delta modulator) ADC(analog to digital converter) 등의 세부 설계가 필요하다.



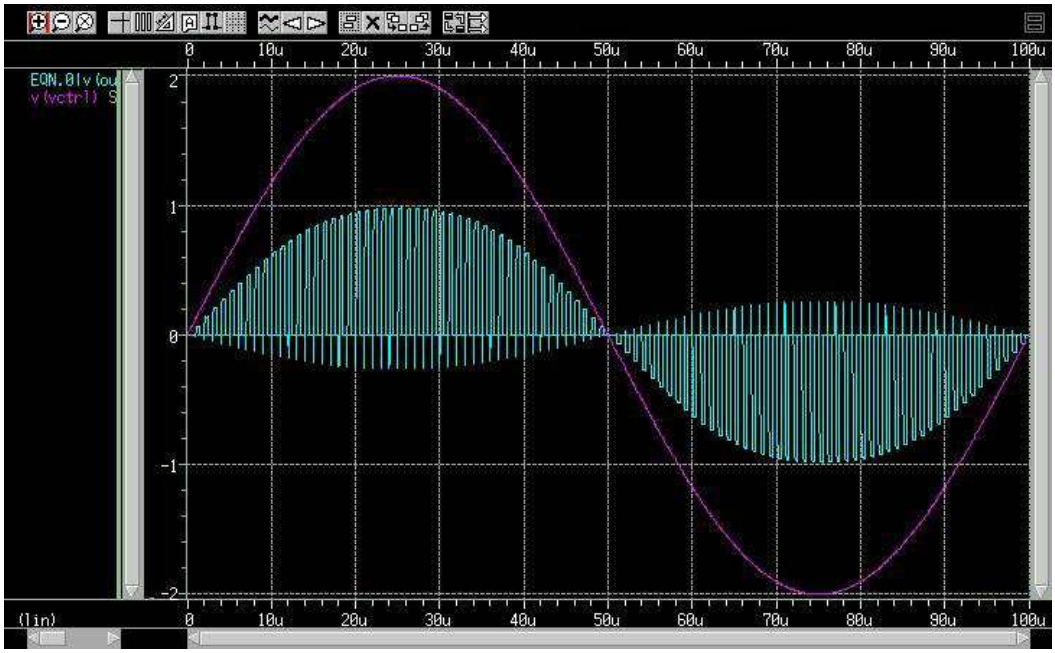
[가속도 센서에 대한 readout architecture]

ROIC에서 가장 중요한 부분은 AFE(analog front end)로 CDS(correlated double sampling)를 통해 offset을 제거하고 gain을 조정하는 기능을 한다. AFE는 SCA(switched capacitor amplifier)방식으로 구현하였다.

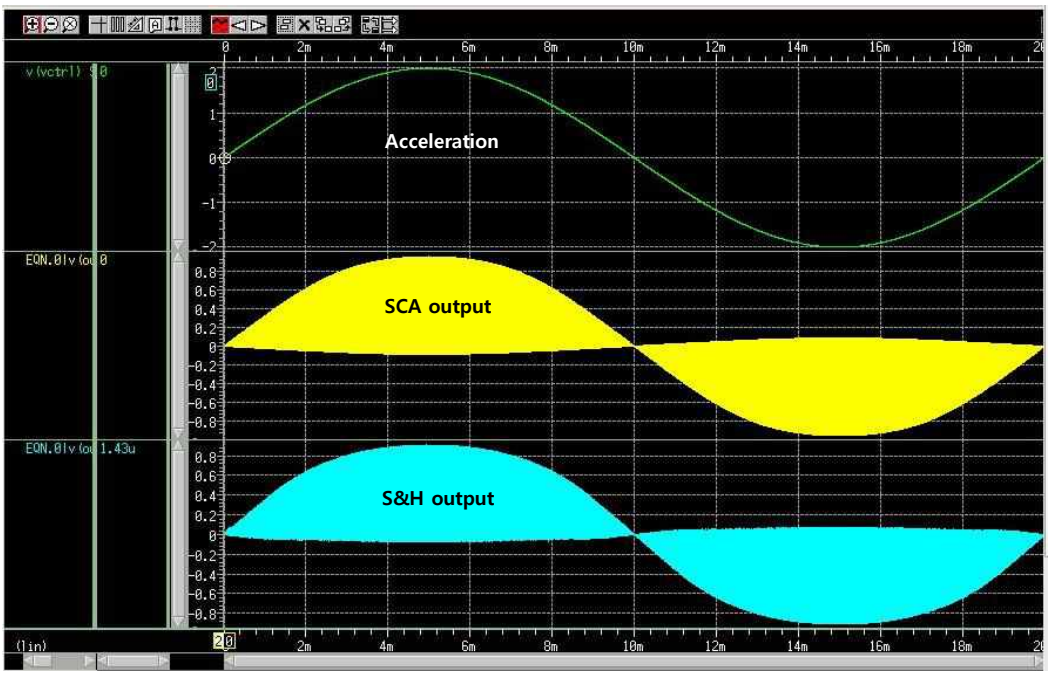


[SCA 구조]

아래는 가속도 입력에 의해 용량이 변할 때 SCA 시뮬레이션 결과를 보인 것이다. SCA 출력은 S&H(sample and holder)를 통해 SDM에 가해지는데 이 때 CDS에 의해 offset 및 저주파 잡음이 제거된다.

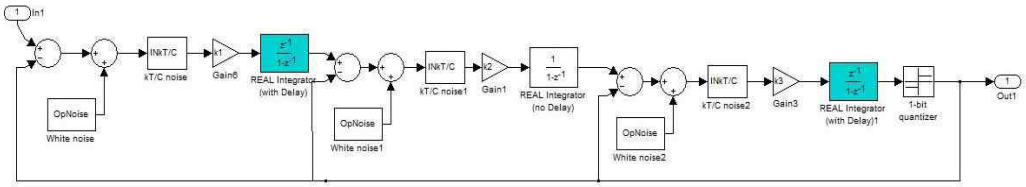


[SCA simulation]

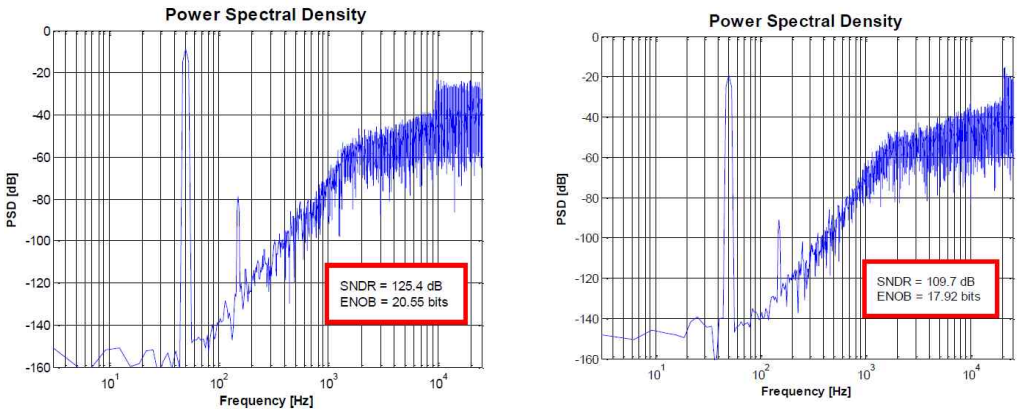


[SCA+CDS+S&H simulation]

6차 SDM(sigma delta modulation) 방식의 ADC를 통해 digital pulse train이 만들어지며 SC와 SDM 사이에는 clock 주파수 차에 의한 alias 성분을 제거할 수 있도록 AAF(anti-aliasing filter)를 삽입한다. ADC는 고차 SDM 방식을 이용하여 구현하며 clock 주파수는 51.2[kHz], OSR(oversampling rate) 256에 BW(bandwidth) 100[Hz]인 조건에서 시스템 레벨의 기본적인 성능은 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

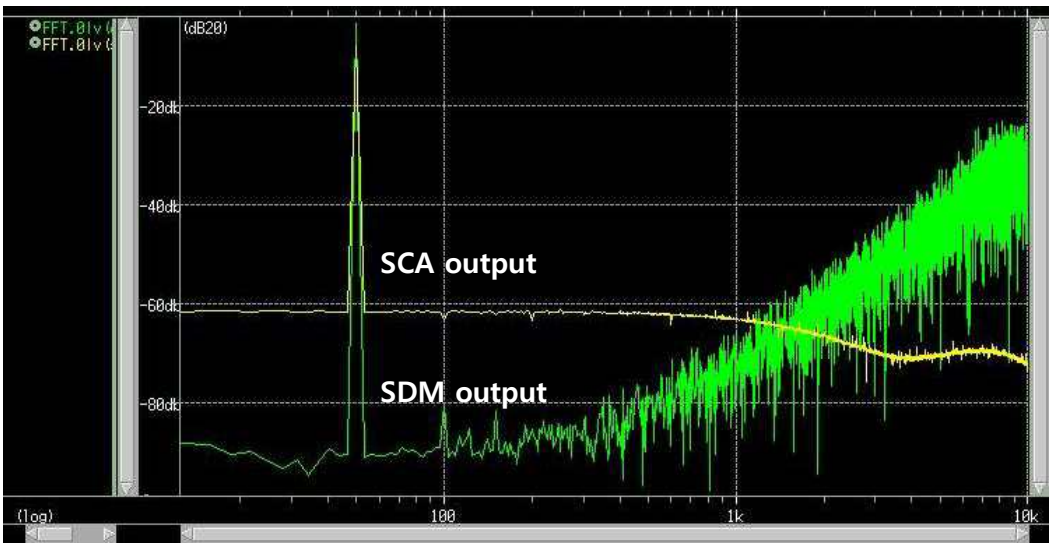


[SDM 구조]



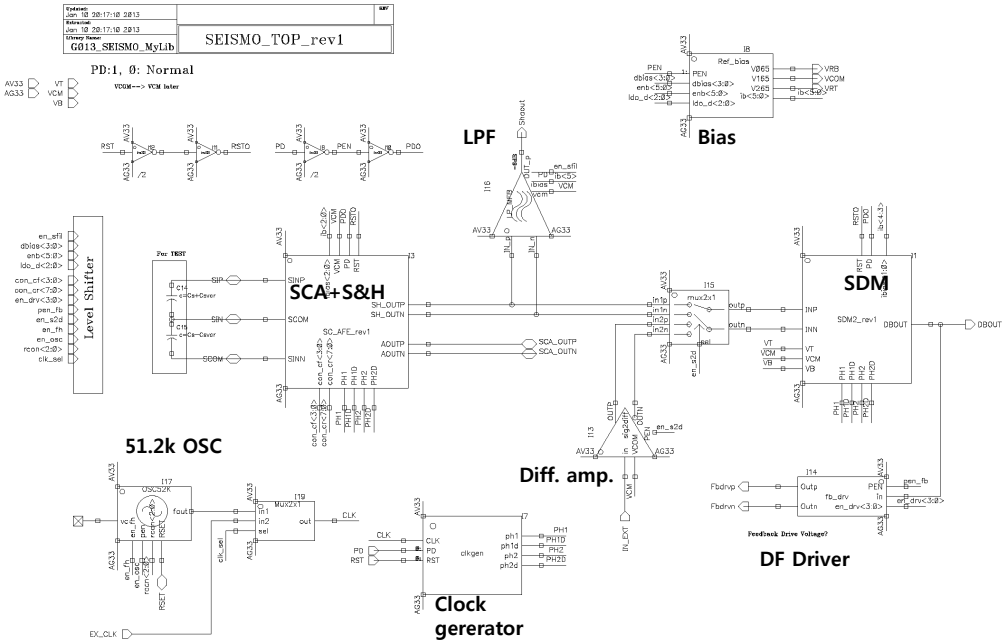
[SDM simulation 결과]

현재 2축 가속도 센서의 용량 변화 감도 차이가 있기 때문에 SDM의 SNR에도 차이가 발생한다. 따라서 추후 센서 커패시턴스를 미세 조정하여 성능의 균일성 확보가 필요하다. SDM의 성능 시뮬레이션 결과는 앞에서 보인 바와 같다. 이렇게 설계된 SDM을 사용하여 전체 시스템의 성능을 해석한 결과는 아래와 같다. 여기서 SDM의 차수가 높을수록 SNR은 개선되지만 안정성의 확보가 담보되지 않기 때문에 100dB 수준으로 설계 및 제작을 해서 결과를 확인 후 수정 설계에 반영하였다.

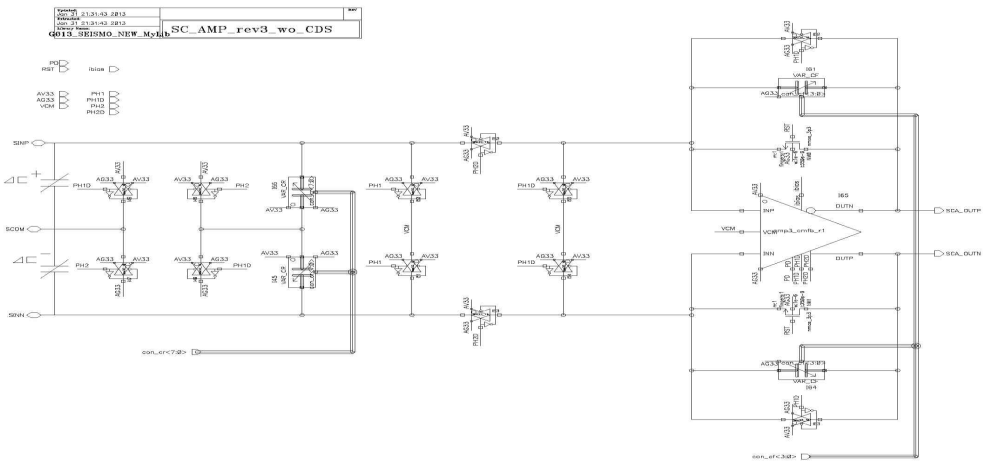


[SDM 전체 시스템 성능 해석 결과]

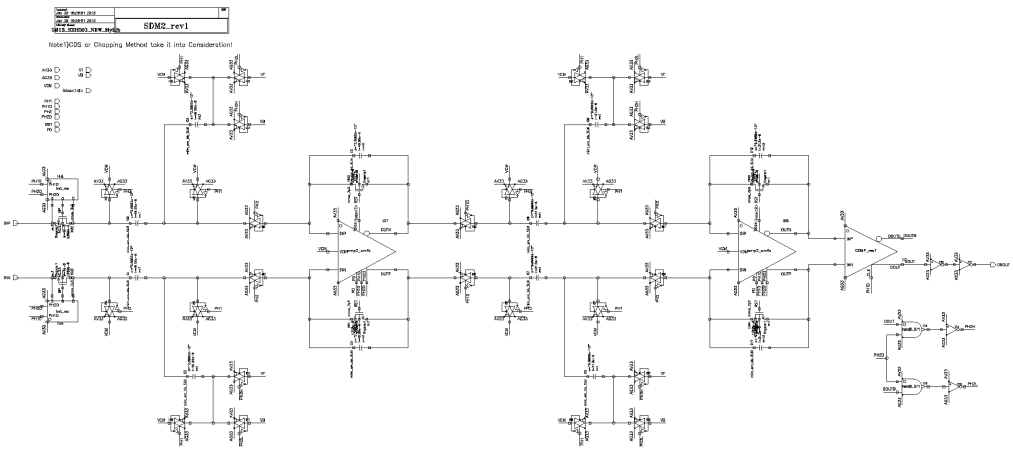
Readout 회로에 대한 시스템 레벨의 설계가 완료되었으며 이를 세부 회로로 구현해야 한다. chip layout이 필요하다. 다음은 schematic 도면을 정리한 것이다.



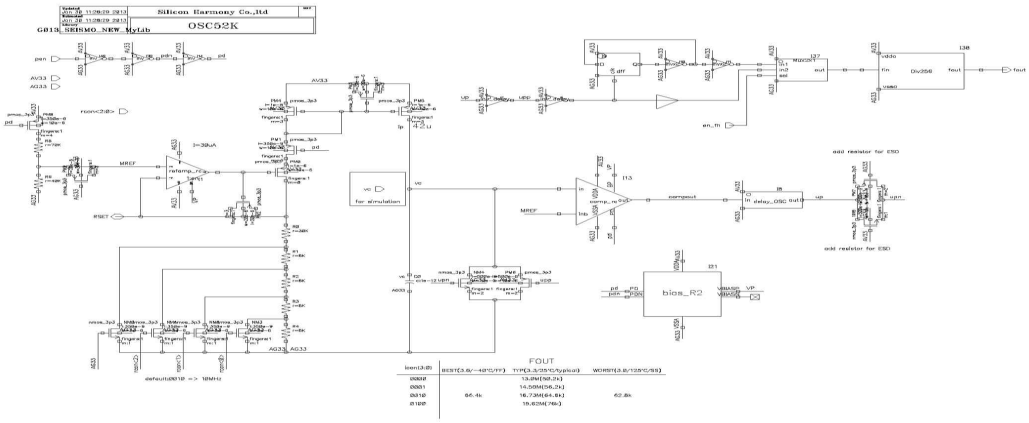
[top schematic]



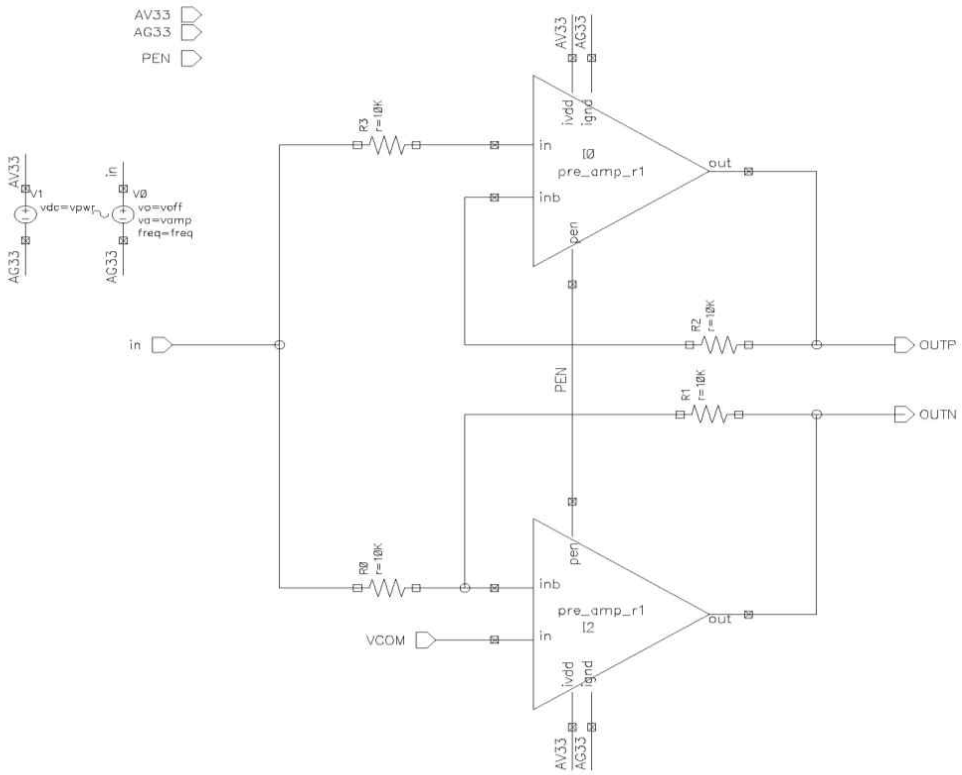
[SCA schematic]



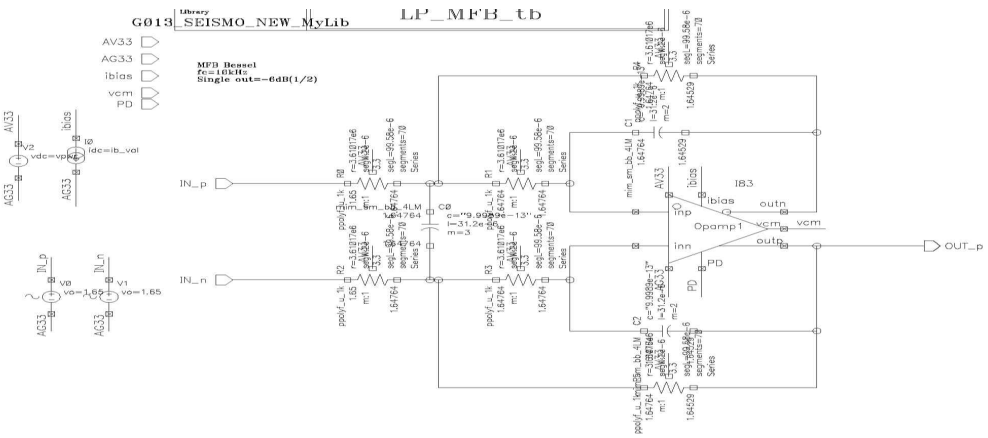
[SDM schematic]



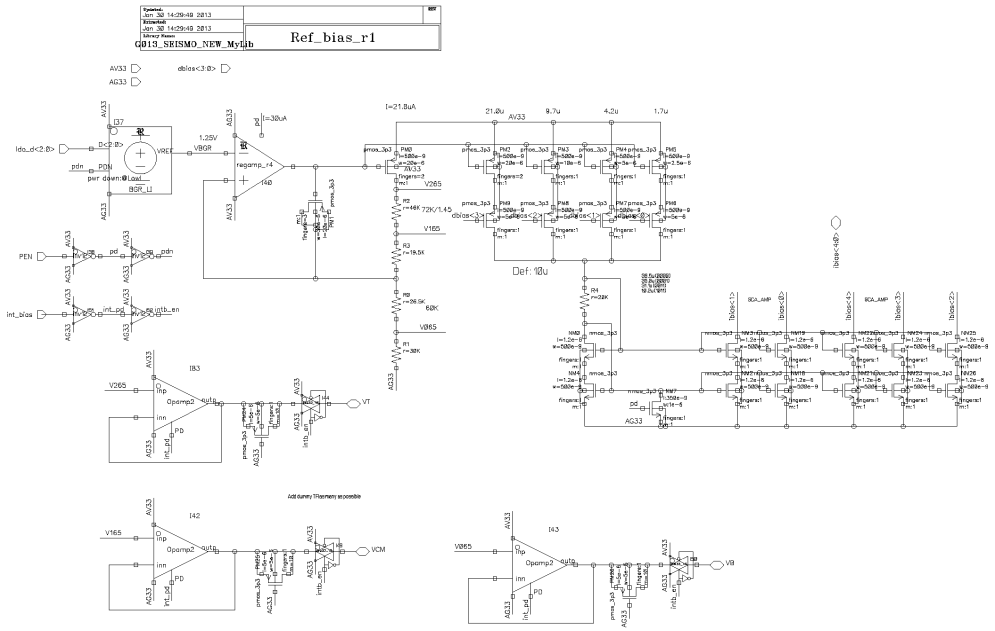
[OSC schematic]



[diff. Amp. schematic]



[LPE schematic]



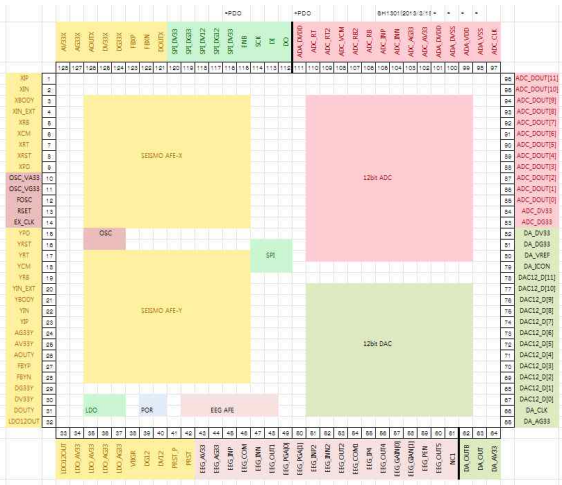
[bias block schematic]

③ ROIC 제작 및 평가

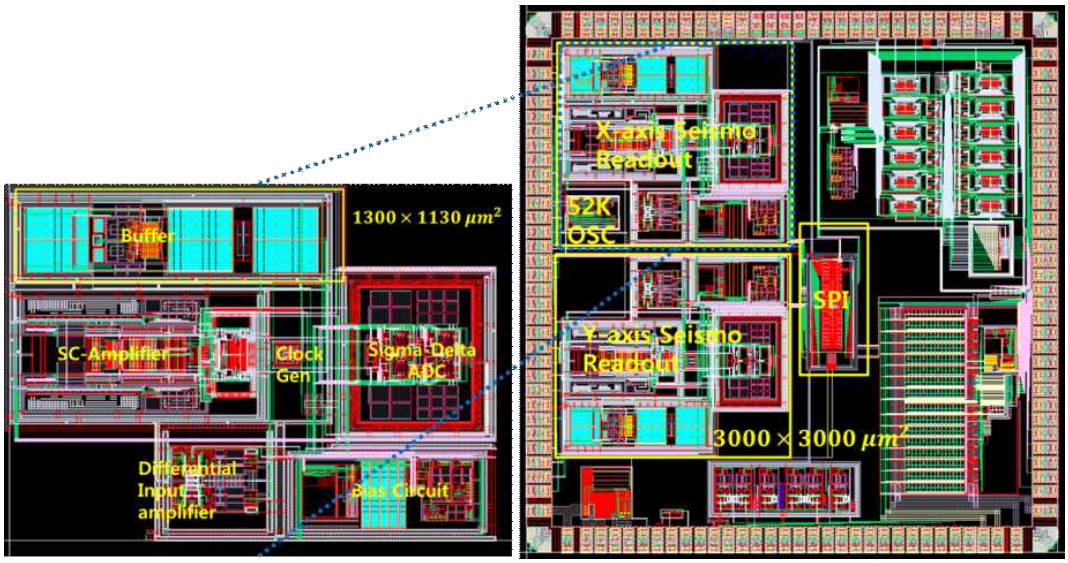
readout IC에 대한 시스템 레벨의 설계가 완료 후 이를 IC 형태로 제작하기 위한 chip layout을 수행하였다. ROIC 제작은 0.13um 1P8M Mixed CMOS 공정이 가능한 Global foundry에서 진행할 수 있도록 공정 규칙에 따라 설계를 진행하였으며, 전체 chip 크기는 $3{,}000 \times 3{,}000\,\mu m^2$ 내에 배치하였다. 아래는 ROIC 전체 chip의 pin 배치와 floor plan을 보인 것이다.

PIN ASSIGNMENT (130201)

Pin No.	Position	Pin Name	I/O	Drive capability	Type	Description
1		AV33	P	X-axis	PAD	3.3v Power supply
2		AG33	P		PAD	3.3v Ground
3		DV33	P		PAD	3.3v Digital supply(for SDM)
4		DG33	P		PAD	3.3v Digital Ground
5		VCM	P		PAD	0.5VDD supply
6		VRT	B		PAD	Top Referncc(2.65V)
7		VRB	B		PAD	Bottom Reference(0.65v)
8		XINP	I		PAD	X-axis sensor positive Input
9		XINN	I		PAD	X-axis sensor negative Input
10		XCOM	I		PAD	Proof mass Connection
11		FBXP	I		PAD	X-axis postivie Feedback Force voltage
12		FBXN	I		PAD	X-axis negative Feedback Force voltage
13		RSET	B		PAD	Oscillator adjusting Resistor
14		SHAOUT	O		PAD	SHA Buffer Output
15		IN_EXT	I		PAD	External SDM Input
16		DOUT	O		PAD	SDM Output
17		PD	I		PAD	Power Enable
18		AV33	P	Y-axis	PAD	3.3v Power supply
19		AG33	P		PAD	3.3v Ground
20		DV33	P		PAD	3.3v Digital supply(for SDM)
21		DG33	P		PAD	3.3v Digital Ground
22		VCM	P		PAD	0.5VDD supply
23		VRT	B		PAD	Top Referncc(2.65V)
24		VRB	B		PAD	Bottom Reference(0.65v)
25		XINP	I		PAD	X-axis sensor positive Input
26		XINN	I		PAD	X-axis sensor negative Input
27		XCOM	I		PAD	Proof mass Connection
28		FBYP	I		PAD	X-axis postivie Feedback Force voltage
29		FYYN	I		PAD	X-axis negative Feedback Force voltage
30		RSET	B		PAD	Oscillator adjusting Resistor
31		SHAOUT	O		PAD	SHA Buffer Output
32		IN_EXT	I		PAD	External SDM Input
33		DOUT	O		PAD	SDM Output
34		PD	I		PAD	Power Down
35		RST	I	Common	PAD	Reset
36		EXT_CLK	I		PAD	Ext clock(51.2k)
37		SPI_CLK	I		PAD	SPI Clock
38		SPI_EN	I		PAD	SPI Enable
39		SPI_DI	I		PAD	SPI Data input
40		SPI_DO	O		PAD	SPI Data Output



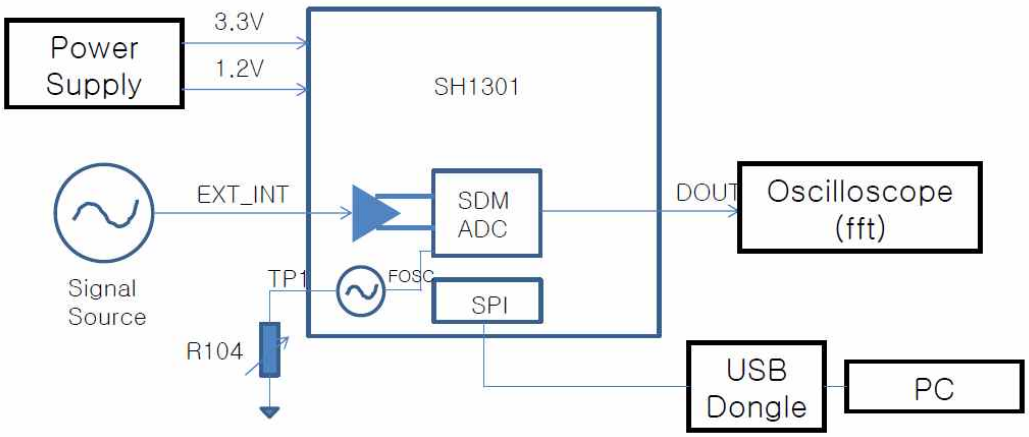
[ROIC pin 배치 및 floor plan]



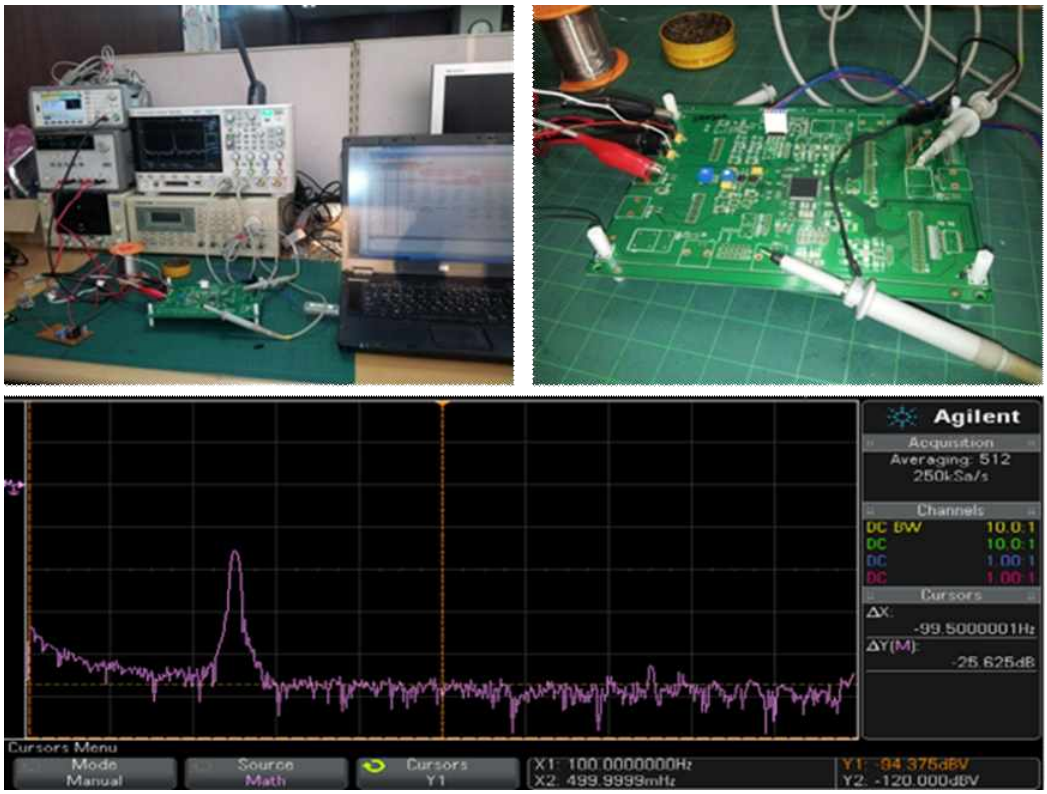
[가속도 센서 ROIC layout]

전문 제조 업체를 통한 ASIC 제작은 매우 큰 비용이 소요되므로 MPW(multi project wafer)로 제작했으며, die 면적 중에 실제 가속도 센서가 사용되는 부분은 축당 약 $1,300 \times 1,300\,\mu m^2$이다.

제작된 readout ASIC는 die 상태에서 수령하고 이를 packaging 작업 후 test를 진행한다. 이렇게 제작된 ROIC에서 가장 중요한 부분은 sigma delta ADC이며, 이를 시험하기 위해 test setup을 구성하여 시험한 결과 약 94dB의 동적 범위를 확인할 수 있었다.



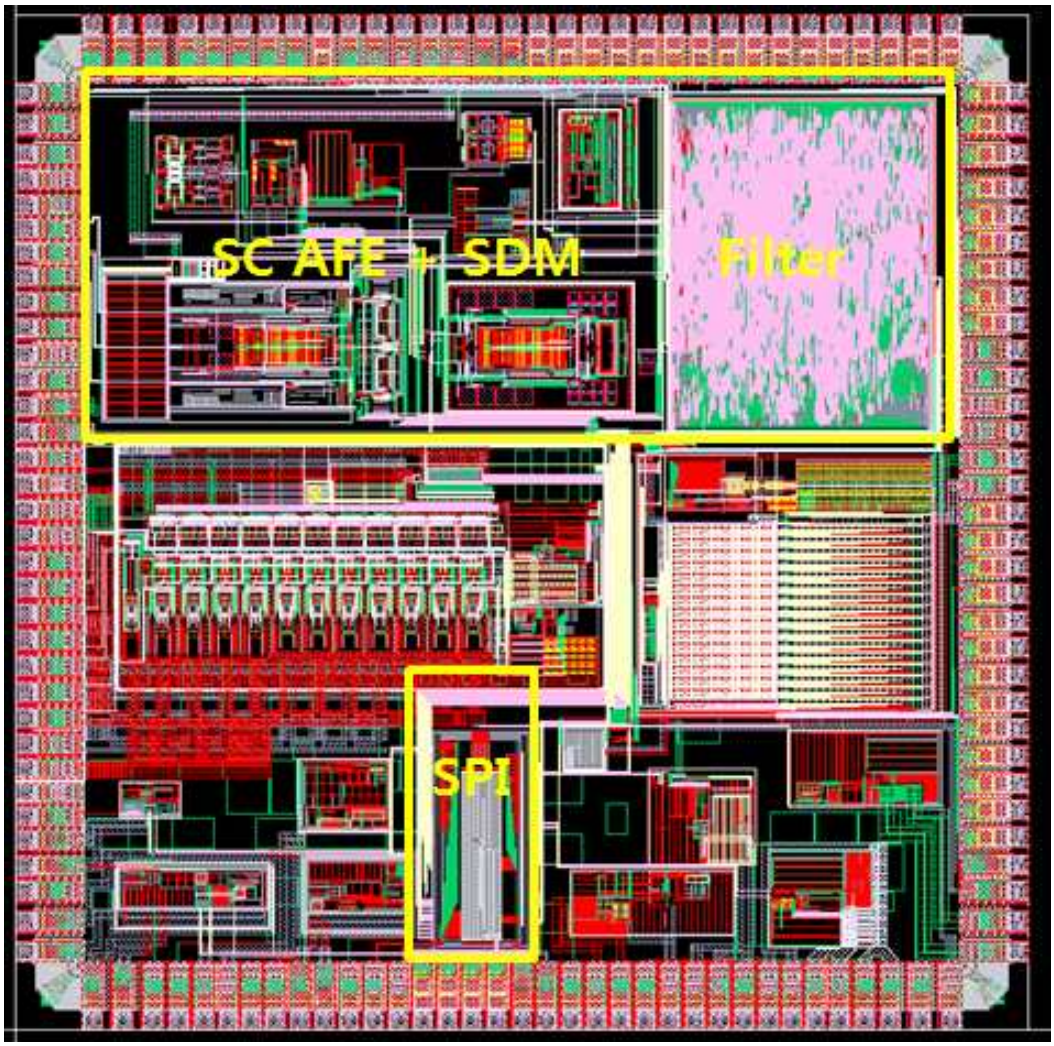
[readout ASIC test setup]



[readout ASIC 성능 시험]

④ ROIC 수정 설계

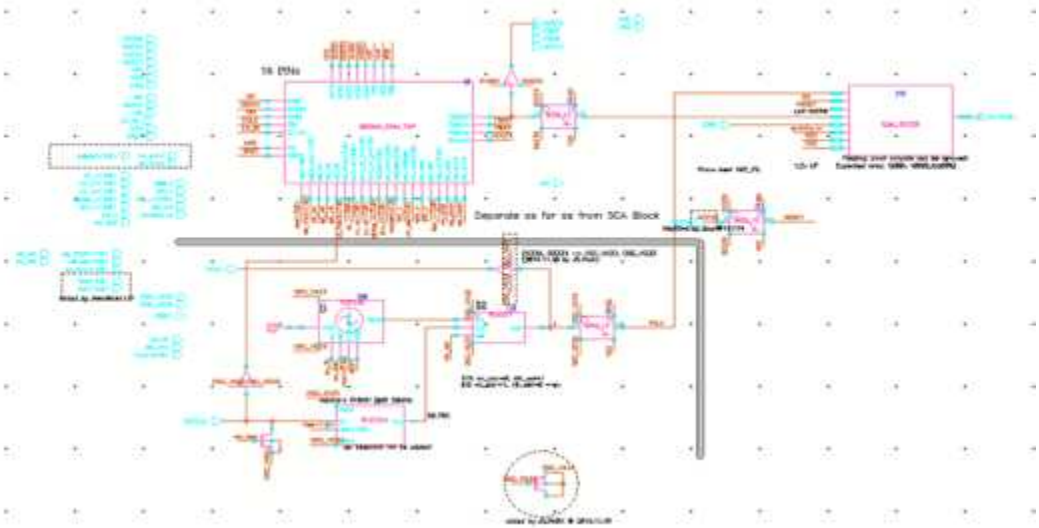
1차 ROIC 제작을 통해 확인된 SDM ADC의 성능을 기반으로 MEMS 지진계용 ROIC full chip을 설계하였다. 공정은 1차와 동일하게 Global foundary사의 0.18um 1P8M CMOS 공정을 이용하였으며 MPW에 할당된 $3{,}000 \times 3{,}000\,\mu m^2$ 면적 내에 2축 센서용 ROIC 구현이 불가했기 때문에 1축용으로 설계하였다. 최종적으로 2축 MEMS 센서 구조와 결합하기 위해선 동일한 ROIC 2개를 사용하면 된다. 단일 축 MEMS용 ROIC를 구현하고 남는 영역에는 test 회로를 배치하였다. 아래는 tape out된 chip layout이다.



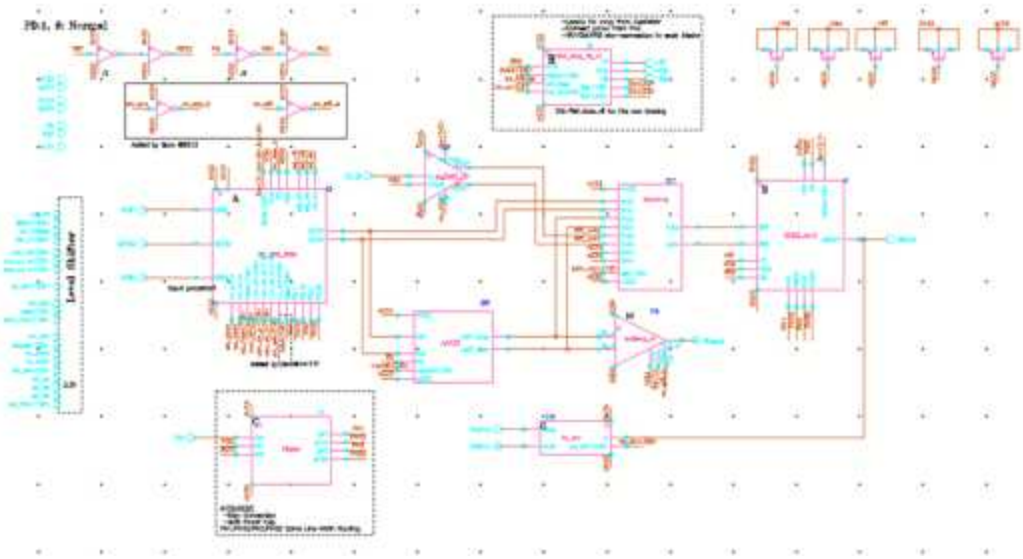
[MEMS 지진계 센서용 ROIC layout]

ROIC 설계 변경의 주요 내용은 크게 capacitive readout AFE, anti-aliasing filter, 20b sigma delta ADC, digital decimation filter, 52kHz internal oscillator, sigma delta offset cancelling circuit, bandgap reference, SPI interface등을 설계 구현하여 집적하였다. 1차 ROIC 제작 이후 크게 달라진 부분은 digital decimation filter logic과 sigma delta offset cancelling circuit을 layout하여 집적한 것이다.

아래는 전체 ROIC와 analog front end를 확대한 회로도를 보인 것이다. sigma delta offset cancelling circuit는 SC Amp 내에 구현하였으며 scheme에 대해 특허 출원을 완료하였다.

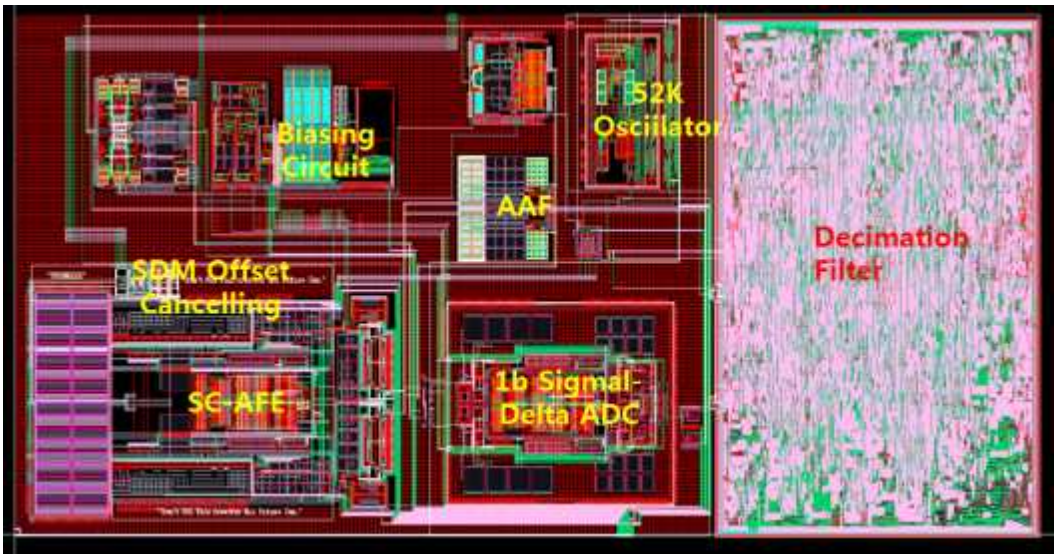


[전체 ROIC 회로도]



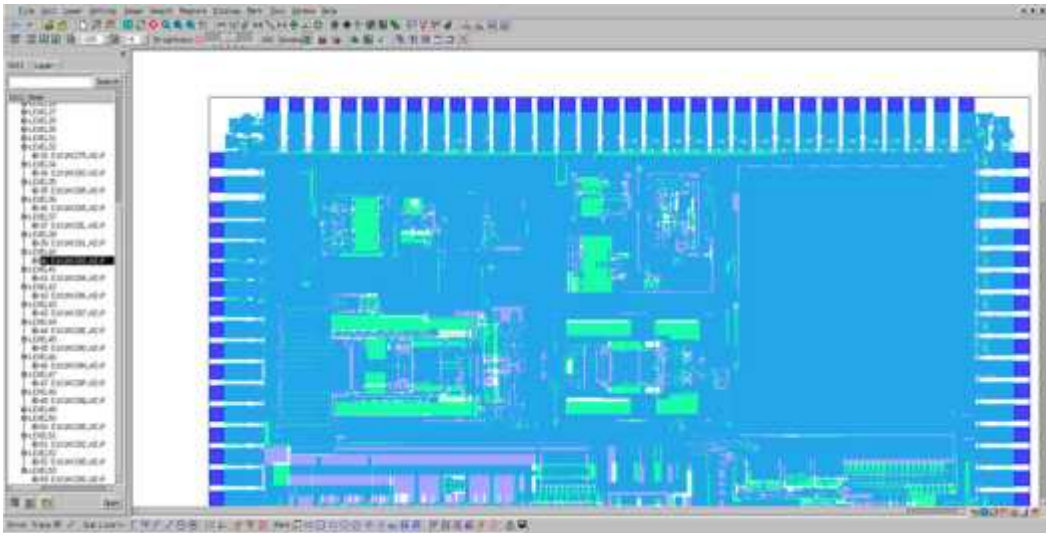
[switched capacitor analog front end 회로도]

아래는 전체 chip layout 중에서 지진계용 ADC 부분만 확대한 것이다. capacitive sensing을 한 후에 출력이 1bit ADC를 거치고 decimation filter로 입력되어 디지털 필터링이 되면 20bit 출력을 얻을 수 있도록 구성되어 있다.



[ROIC 중 20bit ADC 부분 layout]

아래는 layout 완료된 mask data를 보인 것으로 앞에서 기술한 offset canceling circuit와 출력 ripple 저감 회로에 대해선 회로 simualtion 결과를 바탕으로 특허를 출원하였다. ROIC 제작은 현재 global foundry에서 MPW 공정으로 진행 중이다.



[ADC 영역 mask data]

3. MEMS 기반 3축 지진계 실내 실험

가. 시제품 가진 시험

MEMS 기반 3축 가속도센서 시제품을 Test 하기 위하여 한국기술교육대학교에서 진동대를 이용한 가진 시험을 수행하였다. 본 Test에서는 연구과제에서 개발한 가속도계 시제품과 시중에서 유통되는 상용 가속도계의 성능을 비교하는데 목적이 있다.

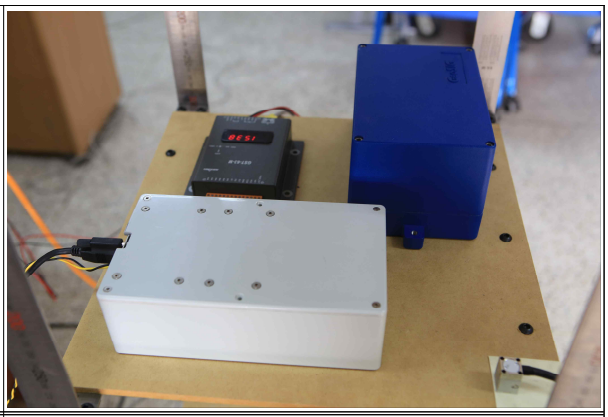
(1) 시제품 가진 시험 방법

① MEMS 기반 3축 가속도센서 시제품을 진동대에 설치
② 시제품 Test에 필요한 비교 대상 가속도센서를 동일한 위치에 설치
③ 3차 시험을 통해 그에 대한 Test 결과 비교

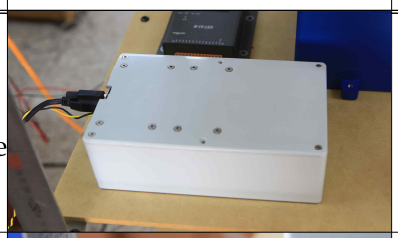
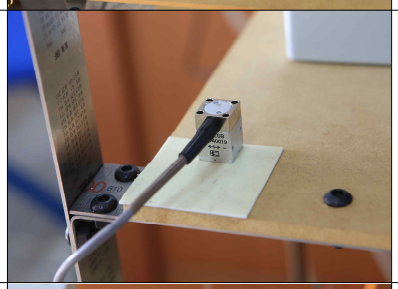
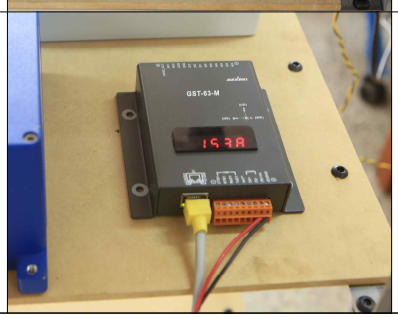
(가) 가속도센서 시험방법

시험방법	1) 가진 후 자유진동	• 1차 시험 : 1Hz, 2gal • 2차 시험 : 10Hz, 4gal • 3차 시험 : 15Hz, 2gal
	2) 측정빈도	• 100Hz 빈도로 5분 측정

(나) 가속도센서 설치사진

	
진동대 사진	설치된 가속도센서 사진

(다) 가속도센서 사양

가속도센서	사 진	사 양
1. MEMS 기반 3축 가속도센서 Prototype		• Type : 3축 MEMS • Range : ±2g • Frequency Response : DC-50Hz
2. KYOWA AS-GB		• Type : 1축 • Range : ±2g • Frequency Response : DC~60Hz
3. GeoSIG AC-23		• Type : 3축 Force Balanced • Range : ±2g • Frequency Response : 0.1~50Hz
4. ICPDAS GST-63-M		• Type : 3축 MEMS • Range : ±2g • Frequency Response : DC~20Hz

나. 시제품 가진 시험 결과

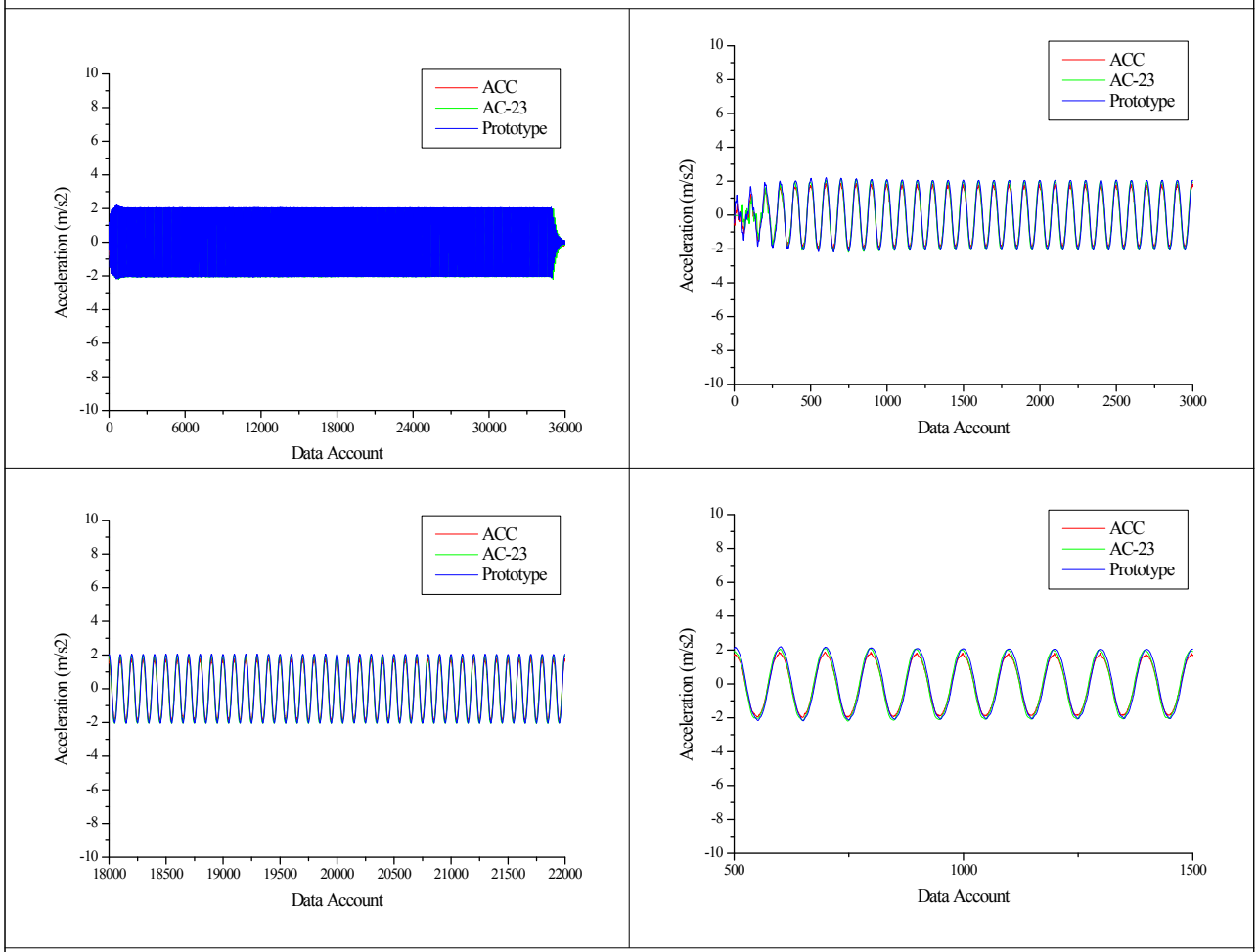
MEMS 기반 3축 가속도센서 시제품 Test를 위해 진동대를 이용한 가진 시험을 수행하였다. 가진 시험은 1Hz, 10Hz, 15Hz의 3차 시험을 수행하였으며, 100Hz 빈도로 5분 동안 저장된 30,000개의 데이터를 이용하여 분석을 수행하였다. 또한, 시제품의 검증을 위해 타 업체의 가속도센서를 추가로 설치하여 비교하였다.

가진시험에 사용된 센서No.는 다음과 같다.

1) ACC - (KYOWA AS-GB)
2) AC-23 - (GeoSIG AC-23)
3) Prototype - (MEMS 기반 3축 가속도센서 Prototype)
4) ICPDAS - (ICPDAS GST-63-M)

(1) 1차 시험 결과 (1Hz, 2gal)

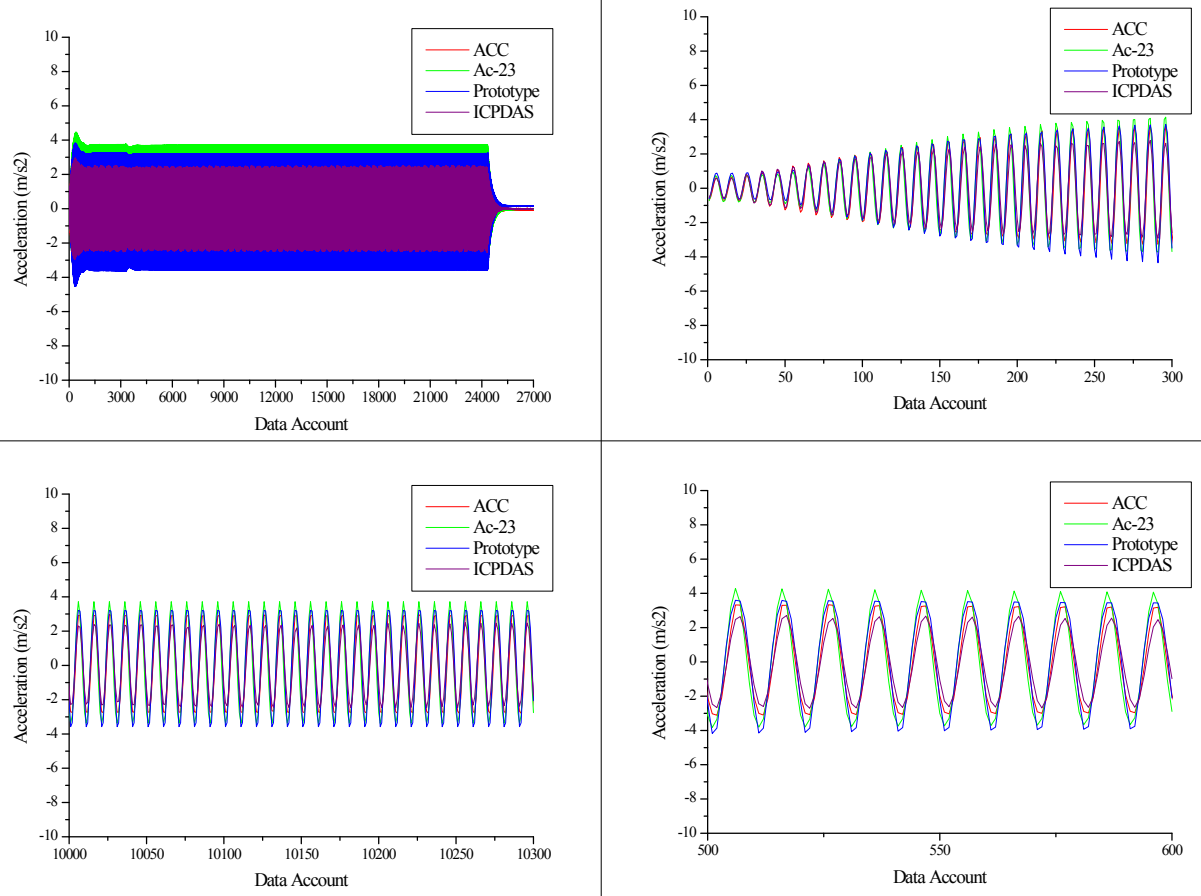
2014년 01월 22일 14:54 ~ 15:00



• Data Account 500 ~ 1500(100Hz 10초)사이에서 Sin curve는 10sample이므로 1Hz가 정상적으로 표출되고 있음

(2) 2차 시험 결과 (10Hz, 4gal)

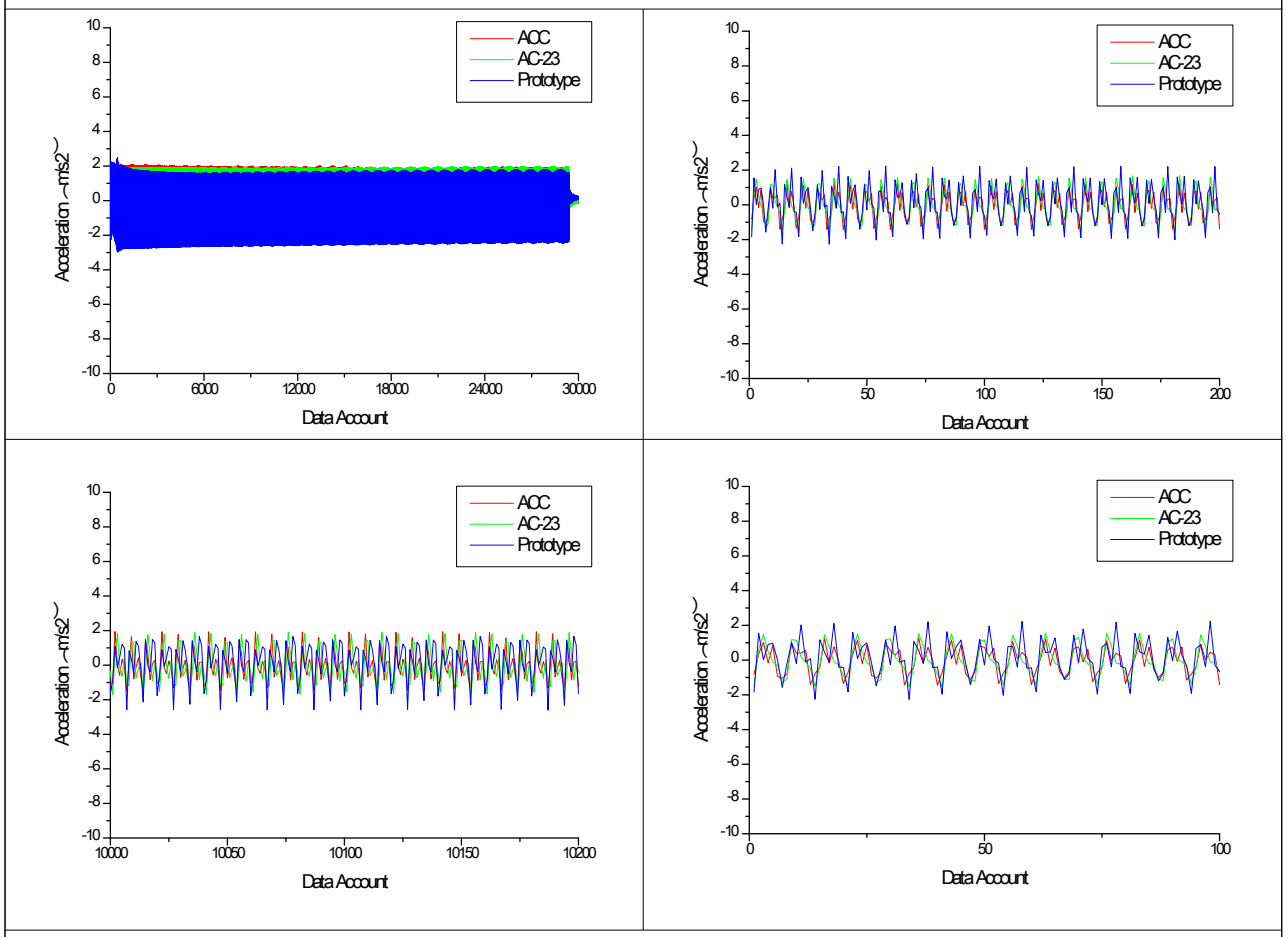
2014년 01월 22일 15:16 ~ 15:22



• Data Account 500 ~ 600(100Hz 1초)사이에서 Sin curve는 10sample이므로 10Hz가 정상적으로 표출되고 있음

(3) 3차 시험 결과 (15Hz, 2gal)

2014년 01월 22일 15:14 ~ 15:29



• Data Account 0 ~ 100(100Hz 1초)사이에서 Sin curve는 15sample이므로 15Hz가 정상적으로 표출되고 있음

(4) 가진 시험 결과 정리

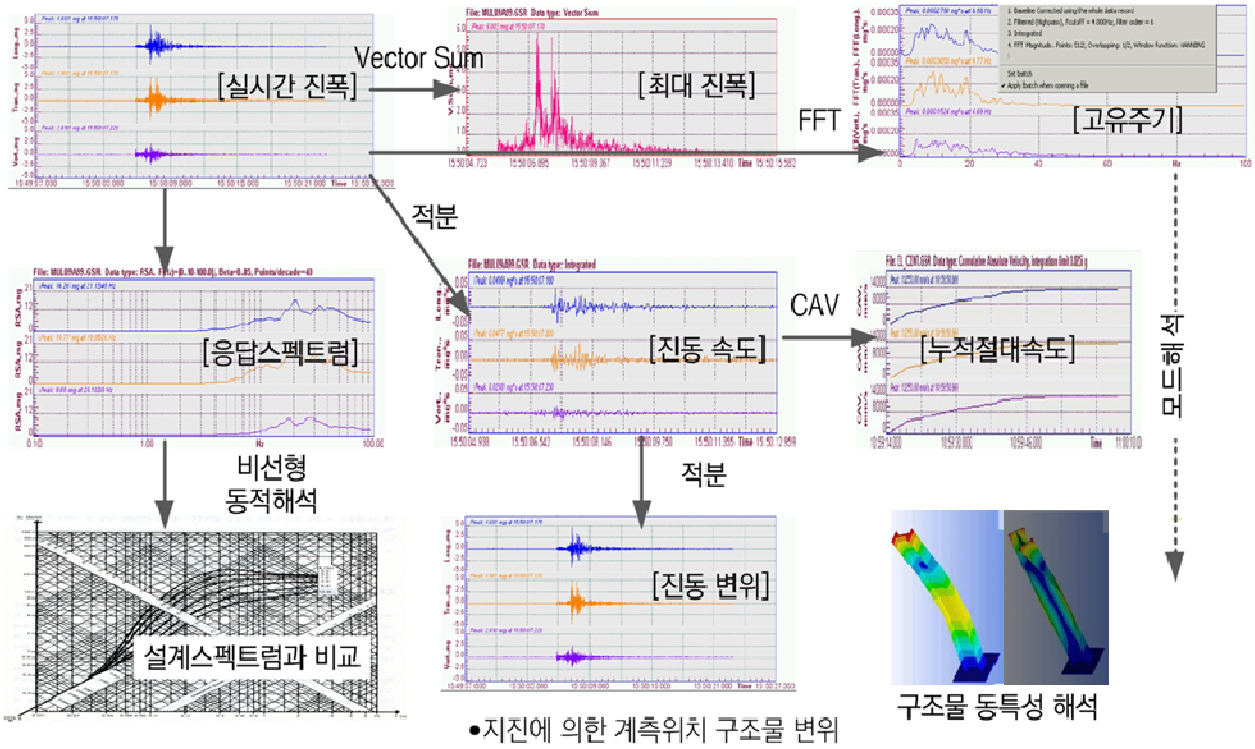
구 분	시험 날짜	가속도센서			
		KYOWA AS-GB	GeoSIG AC-23	MEMS 기반 3축 가속도센서 Prototype	ICPDAS GST-63-M
1차 시험	2013.01.22. 14:54 ~ 15:00	1Hz	1Hz	1Hz	-
2차 시험	2013.01.22. 15:16 ~ 15:22	10Hz	10Hz	10Hz	10Hz
3차 시험	2013.01.22. 15:14 ~ 15:29	15Hz	15Hz	15Hz	-

4. MEMS 기반 3축 지진가속도 모니터링 알고리즘 개발

가. 개발 목적

건축물에서 관측된 지진 가속도 자료를 분석하고 가공하여 건축물 관리자들이 편리하게 이용하도록 정보를 제공하는데 그 목적이 있다.

나. 지진가속도 데이터 분석 흐름

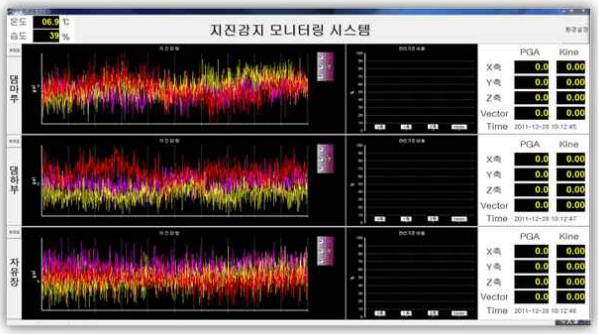


다. 주요 기능

대항목	영역	작업	상세	비고
데이터 취합	디지털 센서 데이터 수집	신호 취득	센서신호 수집	
		신호처리	노이즈 제거 Filtering	
			기준선 보정(영점조절)	
		트리거	STA/LTA	
			Threshold	
		파일저장	mini-SEED 형식	
			ASCII(csv)	
분석 소프트웨어	데이터 표출	실시간 데이터 표출	센서 신호 수신	
		좌표변환		
		단위변환	다양한 단위 선택	
		데이터 개요	대표 통계값 표시	
		이력 데이터 표출	mini-SEED 파일	
			PGA(Peak Ground Acceleration) 표출	
			MMA 데이터 표출	
		진도 표출	Arias 진도	
	FFT 분석	주파수 분석	Amplitude 표시	
	신호 처리	필터링	Butterworth Filter	
			칼만필터, 이동평균	
	데이터 변환	가속도-속도-변위 변환	가속도 변환	
			속도 변환	
			변위 변환	
	응답 스펙트럼	감쇠비에 따른 스펙트럼	감쇠비 등 변수 입력	
			가속도 응답 스펙트럼	
			속도 응답 스펙트럼	
			변위 응답 스펙트럼	
	기타 분석	CAV(누적절대속도)	디지털 적분	
		Phase picking	P-S파 도달 시간	

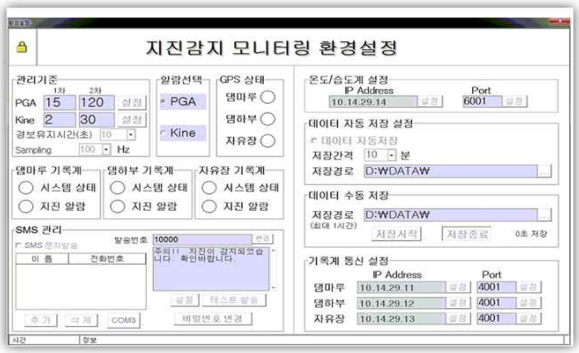
라. 지진가속도 데이터의 표출 방안

지진감지 상시모니터링



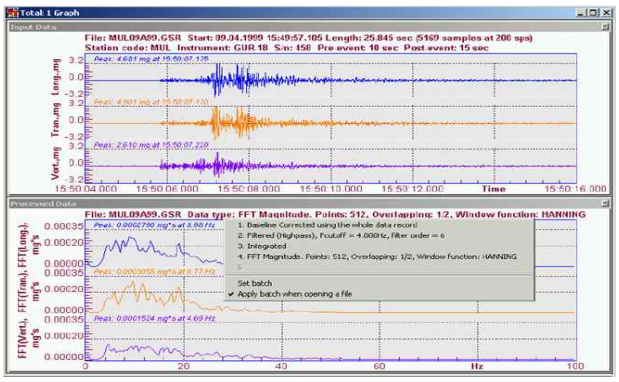
• 각 성분별 지진동 크기 확인, 관리기준 자동 감시

모니터링 환경 설정



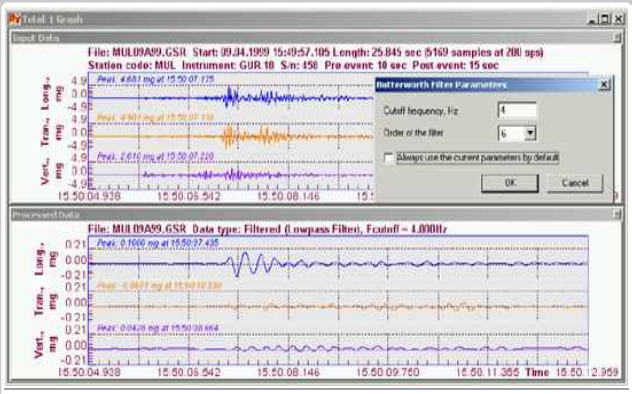
• 관리기준 설정, 데이터 저장 및 전송 경로 설정

시계열 파형 및 스펙트럼 분석



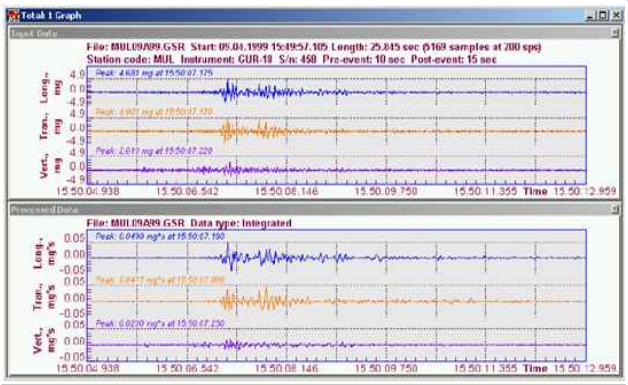
• 성분별 진폭 및 고유진동수 분포 표출

데이터 필터링



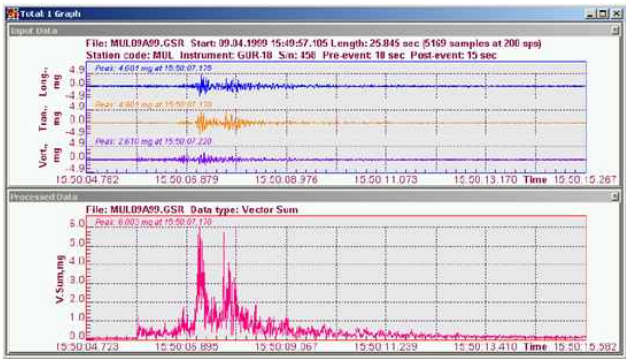
• 필터링에 의한 성분별 데이터 시계열 크기 확인

가속도 데이터 미적분



• 가속도 적분을 통한 속도 및 변위 추출

가속도 벡터합

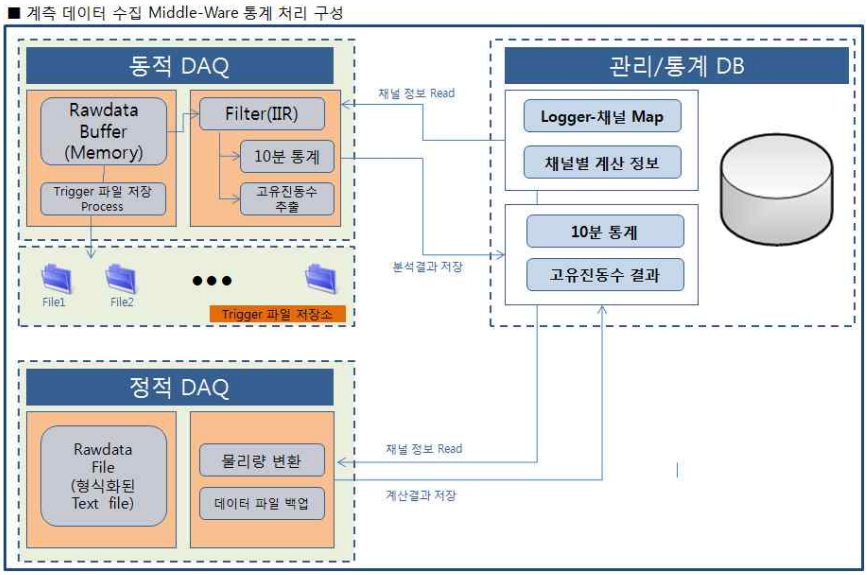


• 3축 방향 지진가속도 성분의 벡터합 연산

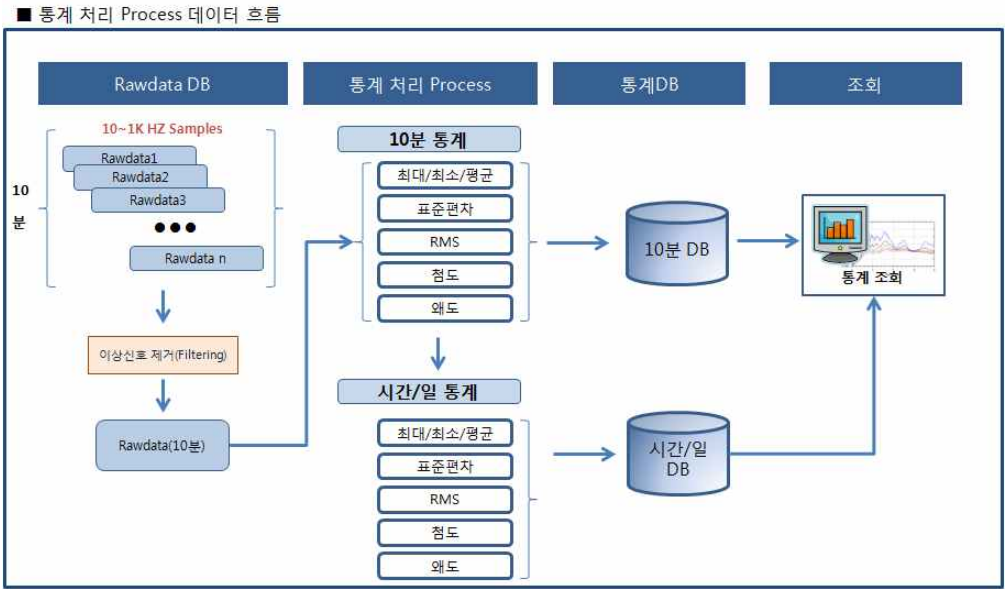
마. 통계처리 알고리즘과 분석 값 표출

(1) 통계처리 구성과 Process

통계처리 모듈은 Rawdata DB에 저장한 데이터를 이용하여 주기적으로 통계 처리를 수행한다. 기본 통계처리 기준은 매 10분으로 매 10분 0초에서 다음 10분 0초 동안 수집한 데이터의 통계를 구하고 통계DB에 업데이트 한다. 통계 처리 전 필요한 경우 필터링 처리를 수행하고 통계를 구한다.



[통계처리 구성]

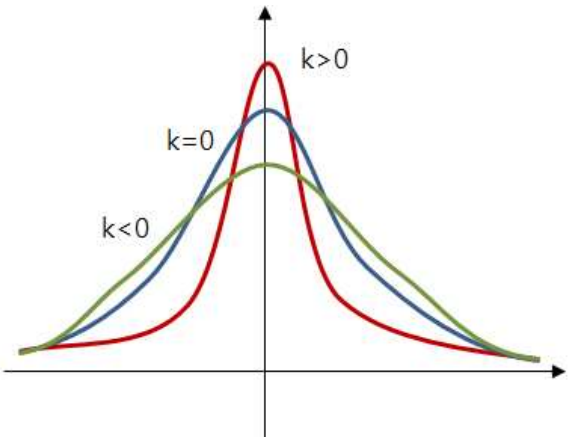


[통계처리 Process]

(2) 통계처리 알고리즘

(가) 첨도(Kurtosis)

동적 센서로부터 10분 동안 수집한 센서 신호값이 산술 평균 주위에 밀집한 정도를 측정하는 첨도를 구하고 그 값을 통계 데이터베이스에 저장한다.



[첨도(Kurtosis)]

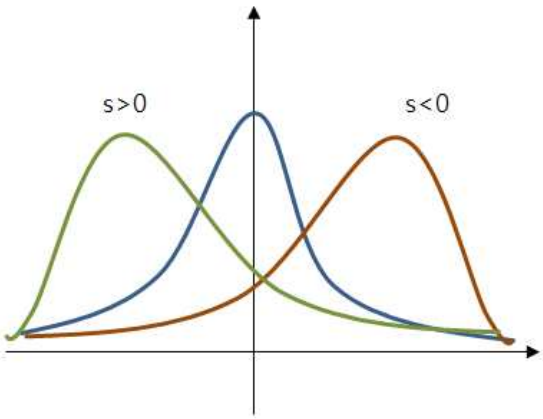
첨도를 구하는 식은 아래와 같다.

$$k = \frac{\sum (X-\mu)^4}{(n-1)\sigma^4} - 3$$

K: 첨도, X: 신호 값, n: 신호 Sample 수, μ: 신호 값의 평균, σ: 신호 값의 표준 편차 (센서별 10분 동안 수집한 전체 Sample 대상)

(나) 왜도(Skewness)

동적 센서로부터 10분 동안 수집한 센서 신호 측정치의 분포의 형태를 대수화한 것으로 분포가 좌우로 치우친 정도(비대칭도)를 나타낸다.



[왜도(Skewness)]

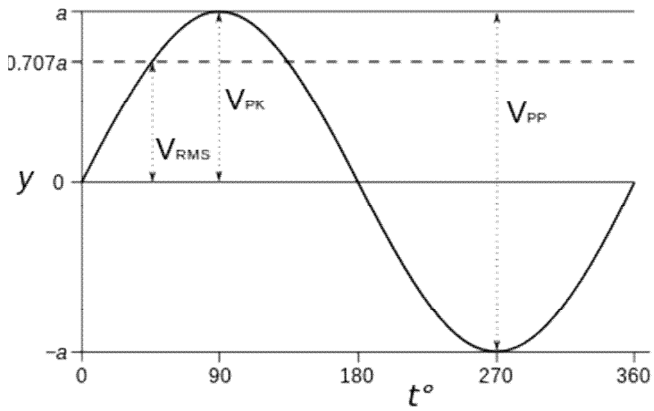
왜도를 구하는 식은 아래와 같다.

$$S = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \frac{\sum (X-\mu)^3}{(n-1)\sigma^3}$$

S: 왜도, X: 신호 값, n: 신호 Sample 수, μ: 신호 값의 평균, σ: 신호 값의 표준 편차 (센서별 10분 동안 수집한 전체 Sample 대상)

(다) 제곱평균제곱근(RMS)

RMS(Root Mean Square)는 동적 센서로부터 10분 동안 수집한 센서 신호값을 제곱하여 평균한 것으로 변화하는 값의 크기에 대한 통계적 척도로 사인함수처럼 변수들이 음과 양을 오고 갈 때에 유용하다.



[제곱평균제곱근(RMS)]

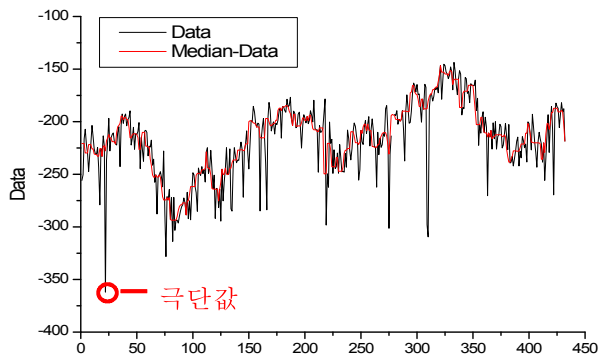
RMS를 구하는 식은 아래와 같다.

$$RMS = \sqrt{\frac{a_1^2 + a_2^2 + \ldots + a_n^2}{n-1}}$$

RMS: 제곱평균제곱근, a: 신호 값, n: 신호 Sample 수(센서별 10분 동안 수집한 전체 Sample 대상)

(라) 중앙값(Median)

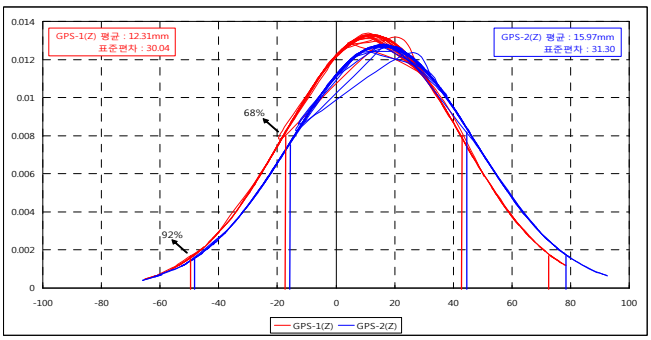
중앙값은 '가장 가운데 위치한 값'으로 n개의 데이터 중 수치상으로 중앙에 위치한 값을 말하여, 평균값(Average)과는 다르게 극단값에 영향을 받지 않는다. 노이즈 발생시 평균값의 경우 이 극단값을 무시할 수 없지만 중앙값은 극단값을 무시하고 데이터의 특징을 요약할 수 있다는 장점이 있다.



[중앙값(Median)]

(마) 표준편차(Standard Deviation)

평균을 이용해서 데이터를 대표하는 수를 찾을 순 있으나 데이터가 얼마나 흩어져 있는지에 대한 산포도는 알기 어렵다. 표준편차는 이러한 분포를 나타내는 수치로 표준편차가 0일 때는 신호값이 모두 동일한 크기이고 표준편차가 클수록 신호값 중에 평균에서 떨어진 값이 많이 존재한다는 의미이다.



[표준편차(Standard Deviation)]

표준편차를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \mu)^2}{N}}$$

σ: 표준편차, X: 신호 값, N: 신호 Sample 수 μ: 평균(센서별 10분 동안 수집한 전체 Sample 대상)

바. 신호처리 알고리즘

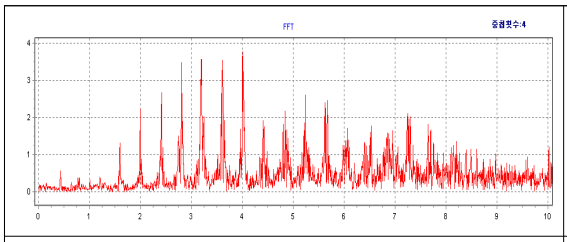
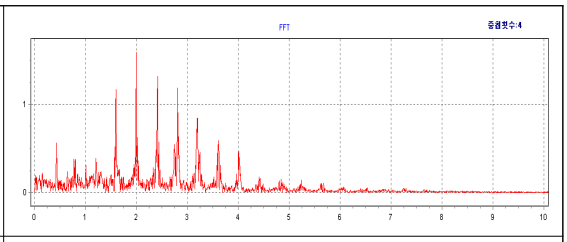
(1) Filtering

디지털 필터는 입력 신호가 들어오면 FFT 분석한 결과를 바탕으로 원하지 않는 주파수 대역을 제거하고 원하는 주파수 대역의 성분만을 통과시켜 주는 것으로 일반적으로 LPF - Low Pas Filtering, HPF - High Pass Filtering, BPF - Band Width Pass Filtering가 있고 Equalizer가 우리가 쉽게 볼 수 있는 대표적인 예이다. 이외에도 신호의 질을 향상시키고 (Noise 제거), 여러 신호가 섞여 있을 경우 원하는 신호만 추출하는 등 데이터 압축, 의료용 신호 처리, 음성 처리, 영상 처리, 데이터 통신, 전화 통신과 같은 디지털 신호 처리에서 아주 중요한 역할을 하고 있다.

디지털 필터링의 종류에는 FIR(Finite Impulse Response)과 IIR(Infinite Impulse Response)가 있으며 차이는 Feedback 유무에 따라 구분을 한다. FIR은 Non Recursive 필터로 Feedback이 없기 때문에 안정하며 Over sampling이나 Sampling rate 변환에 사용되고 IIR은 출력이 입력으로 돌아오는 Feedback이 있기 때문에 안정하지 못할 가능성이 있으며 선형 위상이 보장되지 못한다. Reverb나 Effecter, EQ등에 사용되며 아날로그 필터인 RC 필터와 연계성이 있다. 모니터링 시스템에서는 주로 센서로부터 수집한 데이터 중 전기적인 Noise를 제거하는 방법으로 사용하고 있다.

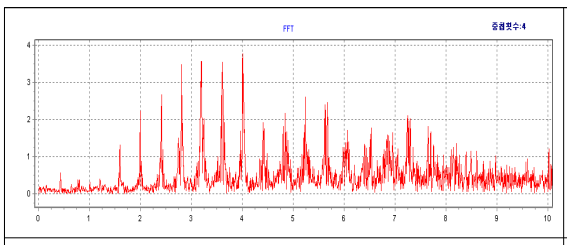
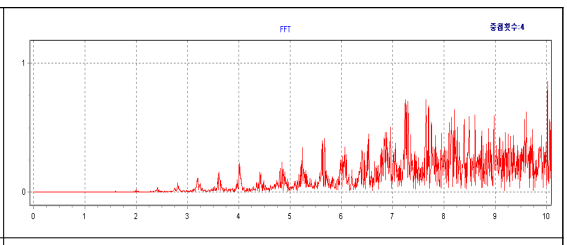
LPF(Low Pass Filter) : 차단 주파수 이하의 신호는 통과하고 이상의 신호는 제거하는 필터

[LPF(Low Pass Filter)]

	
일반적인 주파수 분석	LPF된 주파수 분석 (2Hz)

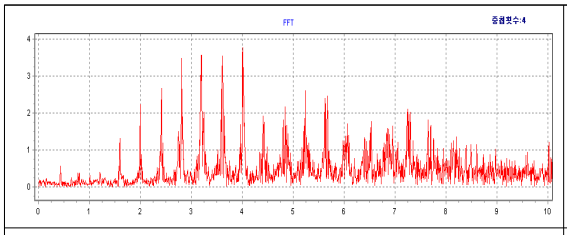
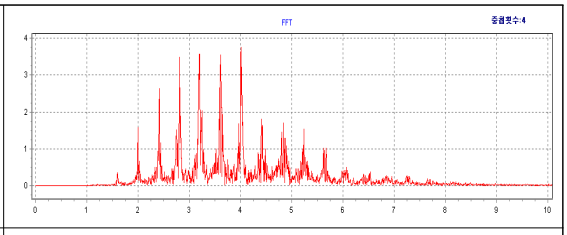
HPF(High Pass Filter) : 차단 주파수 이하의 신호는 제거하고 이상의 신호는 통과시키는 필터

[HPF(High Pass Filter)]

	
일반적인 주파수 분석	HPF된 주파수 분석 (2Hz)

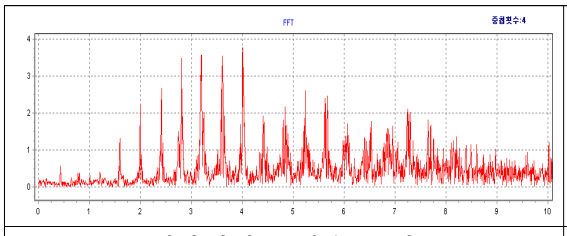
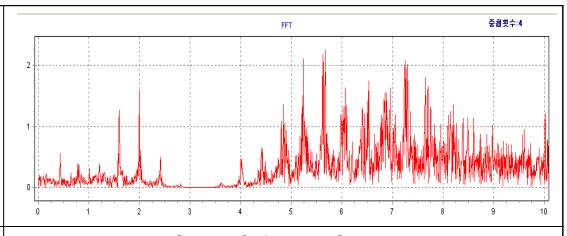
BPF(Band Pass Filter) : 두 주파수 사이의 신호는 통과시키고 그 이외의 신호는 차단하는 필터

[[BPF(Band Pass Filter)]

	
일반적인 주파수 분석	HPF된 주파수 분석 (2~5Hz)

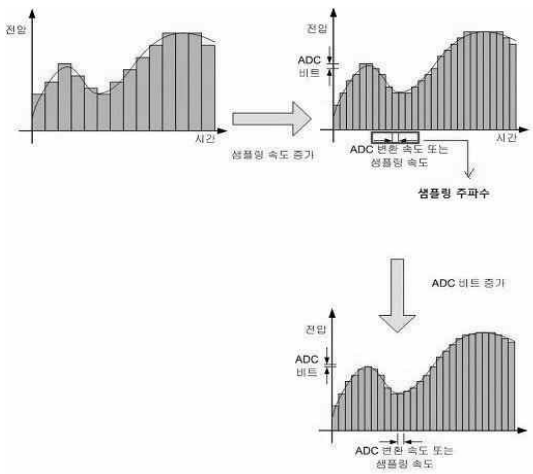
BSF(Band Stop Filter) : 두 주파수 사이의 신호는 감쇄시키고 그 이외의 신호는 통과하는 필터

[BSF(Band Stop Filter)]

	
일반적인 주파수 분석	HSF된 주파수 분석 (2~5Hz)

(2) 샘플링

신호처리에서 샘플링은 아날로그 데이터를 디지털 데이터로 추출하는 것을 의미한다. 여기서 아날로그에서 디지털로 신호처리될 때, 정확한 데이터값을 추출하기 위해서 데이터의 샘플링되는 속도가 중요하게 작용한다. (데이터를 손실없이 저장하기 위해서는 그것의 2배 이상의 주파수로 샘플링해야 한다. bandwidth의 2배)



[샘플링 속도에 따른 데이터]

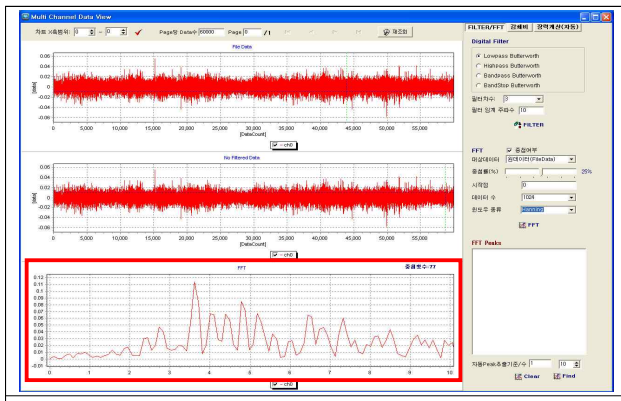
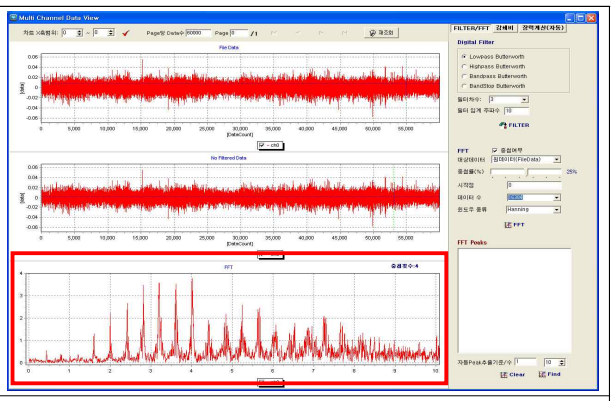
$S = 2f_0$ (나이키스트 샘플링율)

여기서, S: 샘플링율, f_0: 최대 신호 주파수

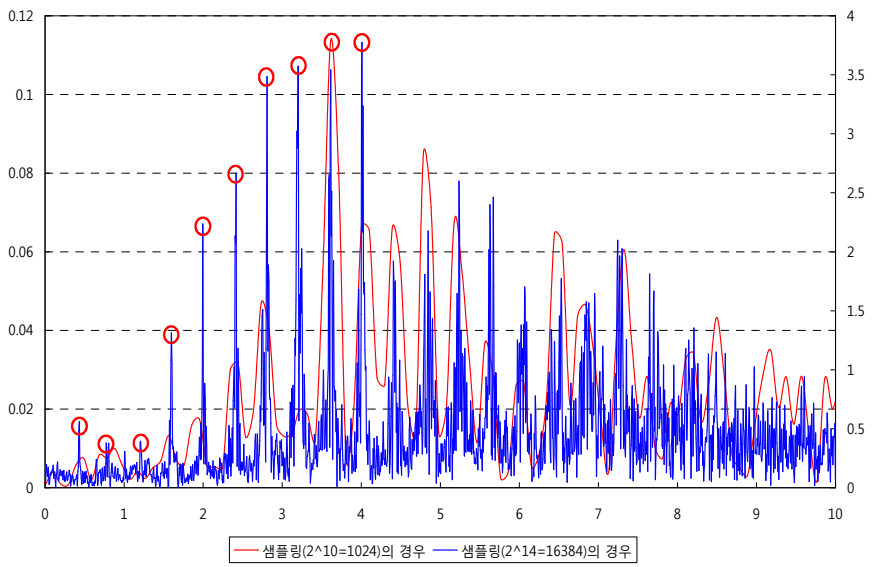
샘플링 속도가 증가하면서 시간축의 샘플의 증가와 더불어 분해능이 좋아지며, 즉 샘플링 속도가 증가하여 취득한 샘플의 개수가 많아질수록 디지털 신호와 센서의 아날로그 신호가 가까워짐을 의미한다.

(가) 샘플링 개수에 따른 주파수 추출

[샘플링 개수에 따른 주파수 추출]

	
$2^{10}=1024$ 데이터를 이용한 주파수 추출	$2^{14}=16384$ 데이터를 이용한 주파수 추출

(나) 샘플링 개수에 따른 주파수 추출 비교



[2^{10}과 2^{14} 데이터를 이용한 주파수 추출 비교]

$2^{14}=16384$개의 데이터를 이용하여 주파수 추출과 장력계산에 활용한다. $2^{10}=1024$개 데이터를 활용한 FFT와 비교할 때 주파수 해상도(분해능)의 증가로 Peak 추출의 정확도를 높일 수 있다.

주파수 영역에서의 노이즈 저감을 위하여 Averaging 기법을 활용한다. Averaging은 총 60,000개 데이터를 4구간(ex:①1~16384, ②10001~26384, ③20001~36384, ④30001~46384)으로 구분하여 FFT로 수행하고, 각 주파수 성분들을 평균한다.

주파수 해상도(분해능)는 100/16384 = 0.0061Hz로 한다.

고유 진동수 6차까지 추출하고 가속도 크기에 대한 통계처리도 실시한다. 진동수는 각 차수의 범위($f_{1\min}, f_{1\max}$,....)와 추출기준(범위에서 y축 최대값이 평균값의 몇 배 이상 일 때 진동수로 인정하며 일반적으로 2를 사용한다.)을 사용하여 진동수를 추출한다.

사. 동특성 추출 알고리즘

구조물의 거동을 분석하고 주파수 영역 데이터를 취득 분석하기 위해 동적센서 신호의 실시간 데이터 전체를 파일로 만들어 저장한다. 실시간 데이터 파일은 초당 10~200Hz Sampling Rate로 저장된다. 이렇게 생성된 데이터 파일은 시스템에서 지정된 위치에 저장되어 분석을 위한 데이터로 보전되는데 이 파일을 읽어 들여 분석 할 수 있게 해주는 동특성 추출 프로그램이다.

(1) FFT(Fast Fourier Transform)

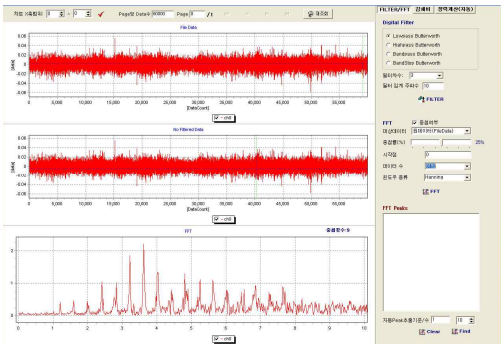
고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)은 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform, DFT)과 그 역 변환을 빠르게 수행하는 효율적인 알고리즘이다.

푸리에 변환이란 시간 성분 신호를 주파수 성분으로 분해하는 조작을 일컫는다. 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform, DFT)은 이산적인 입력 신호에 대한 푸리에 변환으로, 디지털 신호 분석과 같은 분야에 사용된다. FFT는 디지털 신호 처리에서 편미분 방정식의 근을 구하는 알고리즘에 이르기까지 많은 분야에서 사용한다.

$X_0, \ldots, X_{n-1}$이 복소수라고 가정할 때, DFT는 다음과 같이 정의한다.

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-\frac{2\pi i}{n} jk} \qquad j = 0, \ldots, n-1$$

이 식을 정의에 따라 계산하면 O(n2)의 연산이 필요하지만, FFT를 이용하면 O(n log n)의 연산만으로 가능하다. n이 합성수일 경우 그 소인수분해를 이용하여 연산 횟수를 줄일 수는 있지만, FFT를 사용하면 n이 소수일 경우에도 O(n log n)번의 연산 횟수를 보장한다. 이러한 FFT분석을 통해 각 동적 데이터의 주파수 성분에 따른 데이터를 관찰하고자 할 때 이용한다.



[FFT 분석 예]

(2) 감쇠비 추정

감쇠비 추정은 아래와 같은 계산 절차를 통해 이루어진다.

(가) 가속도신호의 필터링을 통하여 n개의 최대 피크(peak)를 추출. (밴드패스 필터를 통해 필터링)

① 가속도 신호 및 주파수 신호를 통해 3차 모드까지 추출

② 1,2,3차 주파수 대역 설정 후 가속도 신호의 3차 ButterWorth BandPass Filter를 설계

③ 가속도 신호 사이클에서 2개 이상의 피크를 추출.

(나) Logarithm Decrement Ratio(대수 감쇠율) 추출

대수 감쇠율은 감쇠 자유 진동의 진폭이 감쇠하는 정도를 나타내며 연속적인 두 진폭의 비에 자연대수를 취한 것으로 정의된다.

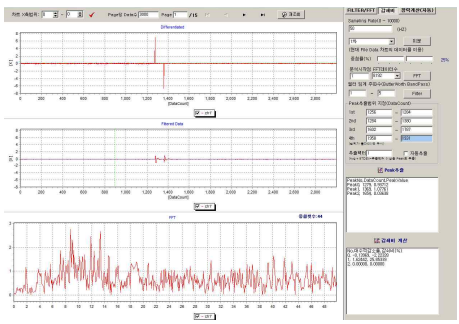
$$\delta = In\frac{x_2}{x_1} = \zeta\omega_n\tau_d$$

δ: 대수 감쇠율, τ_d: 감쇠 자유진동의 주기($(t_2 - t_1)$), ζ: 감쇠비(damping ratio), ω_n: 비감쇠 고유진동수(damped natural frequency)

(다) Damping Ratio(감쇠비) 추출

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{\alpha}{\omega_n}$$

ζ: 감쇠비(damping ratio), k: 강성(stiffness), ω_n: 고유진동수(natural frequency)



[감쇠비 추정 예]

아. 지진 응답 스펙트럼 알고리즘

(1) 지진 응답 스펙트럼

구조물의 응답 x(t), ẋ(t), ẍ(t)+ÿ(t) 등은, t, w(또는 T), h의 함수로서 시간 t에 따라 변한다. 구조물을 설계하는 입장에서는 응답의 시간적 변화 양상보다는 가속도응답과 속도응답이 최대로 어떠한 값이 될 것인지, 또는 최대의 변위응답은 어느 정도인지, 라는 응답의 최대치를 오히려 알고 싶어 한다. 지금 지진 중에, 1자유도계가 받는 최대상대변위, 최대상대속도, 최대절대가속도를 각각 S_d, S_v, S_a라 하면

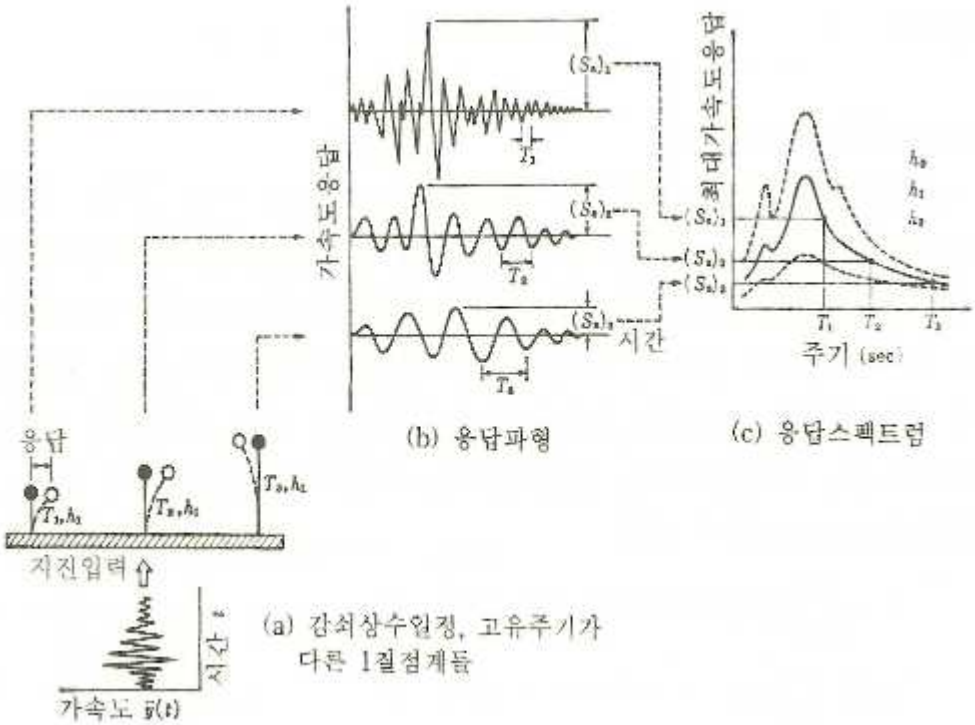
$$\left.\begin{aligned} S_d &= \frac{1}{w_d}\left|\int_0^t \ddot{y}(\tau)e^{-hw(t-\tau)}\sin w_d(t-\tau)d\tau\right|_{\max} \\ S_v &= \left|\int_0^t \ddot{y}(\tau)e^{-hw(t-\tau)}\left[\cos w_d(t-\tau)-\frac{h}{\sqrt{1-h^2}}sin\, w_d(t-\tau)\right]d\tau\right|_{\max} \\ S_a &= w_d\left|\int_0^t \ddot{y}(\tau)e^{-hw(t-\tau)}\left[\left(1-\frac{h^2}{1-h^2}\right)\sin w_d(t-\tau)+\frac{2h}{\sqrt{1-h^2}}cos\, w_d(t-\tau)\right]d\tau\right|_{\max} \end{aligned}\right\}$$

이 된다.

입력으로 지반진동가속도 이력 ÿ(t)가 주어지면 이들은 h와 w의 함수, 또는 감쇠상수 h와 비감쇠고유주기 T의 함수 즉 $S_d(h,T)$, $S_v(h,T)$, $S_a(h,T)$가 된다.

이러한 함수 $S_d(h,T)$, $S_v(h,T)$ 및 $S_a(h,T)$를 감쇠상수 h를 파라메타로 하여 비감쇠 고유주기에 대해 그린 것을 각각, 상대변위응답 스펙트럼, 상대속도응답 스펙트럼 및 상대가속도응답 스펙트럼이라 하고, 이들을 총칭하여 지진응답 스펙트럼(earthquake response spectrum)이라 한다. 또는 간단히 변위응답 스펙트럼, 속도응답 스펙트럼, 가속도응답 스펙트럼이라고도 하며, 총칭하여 간단히 응답 스펙트럼(response spectrum)이라고도 한다.

지진응답 스펙트럼의 개념을 도식적으로 설명하면 아래와 같다. 먼저 그림의 (a)와 같이 하나의 테이블위에 감쇠상수가 모두 h_1으로 일정하고, 고유주기 T가 다른 진자 즉 1질점계를 설치한다. 그림에는 비교적 주기가 짧은 T_1, 중간의 주기 T_2, 긴 주기 T_3를 갖는 3개가 표시되어 있다. 다음에 이 테이블을 어느 지진 가속도로 흔들어 보자, 즉 이들 질점계에 지진가속도를 입력으로 작용시킨다. 그러면 각 질점계는 이와같은 테이블의 움직임에 따라 흔들린다. 즉 입력가속도에 대한 응답을 표시한다. 이제 어떤 방법으로, 각 질점의 응답가속도를 측정하였다면, 그림에 표시한 응답가속도파형이 기록된다. 당연히 고유주기가 짧은 진자는 빨리 흔들리고, 긴 주기의 진자는 천천히 진동하는 파형을 표시한다. 파형의 진폭이 없어지는 길이는 입력 가속도의 파형에 의해 지배되지만, 주기는 입력에는 거의 관계없이, 진자 각각의 고유주기에 거의 가깝다. 앞에 표시한 그림은 이와 같은 응답가속도 파형의 일례이다.



다음에 이러한 파형으로부터, 진폭이 최대인 것을 찾아서, 이 값을 그림에 표시한 바와 같이, 각각 $(S_a)_1, (S_a)_2, (S_a)_3$으로 한다. 그리고 그림 (c)의 주기를 표시하는 횡축상의 주기 T_1, T_2, T_3에서 $(S_a)_1, (S_a)_2, (S_a)_3$와 같은 높이의 점을 구하면, 그림에서 점으로 표시한 3점이 구해진다.

지금은 주기가 다른 3개의 진자에 대해 설명하였지만, 만약 최초의 그림(a)의 테이블 위에 주기가 약간씩 다른 아주 많은 수의 1질점계를 나열하였다면, 그림 (c)에서는 최대가속도 응답의 점들을 연결하는 실선의 곡선을 얻을 수 있을 것이다. 더욱이 지금은 질점계의 감쇠상수는 모두 h_1이었지만, 이 값을 변화시켜 같은 실험을 반복하면, 각각의 감쇠상수에 따라 그림(c)에 점선으로 표시한 곡선이 얻어진다.

그림 (c)에 표시한 곡선 또는 곡선들은 최초에 입력으로 준 지진가속도 응답 스펙트럼이고, 지금의 경우는 질점계의 질점에 작용하는 가속도를 측정하였으므로 가속도응답 스펙트럼이 그려져 있다. 질점의 속도 · 변위를 측정하면, 같은 요령에 의해 각각 속도응답 스펙트럼, 변위응답 스펙트럼이 구해진다. 감쇠상수가 작을수록 응답치는 커진다는 것은 말할 것도 없다.

통상의 구조물에서는 감쇠상수 h는 1에 비해 작은 값이다. 따라서 근사적으로 $\sqrt{1-h^2} \fallingdotseq 1$ 이고 $w_d \fallingdotseq w$ 이다. 더욱이, 1과 비교하여 h의 차수까지 무시하면

$$\left.\begin{aligned} S_d &= w_d \left| \int_0^t \ddot{y}(\tau) e^{-hw(t-\tau)} \sin w_d (t-\tau) d\tau \right|_{\max} \\ S_v &= \left| \int_0^t \ddot{y}(\tau) e^{-hw(t-\tau)} \cos w_d (t-\tau) d\tau \right|_{\max} \\ S_a &= w_d \left| \int_0^t \ddot{y}(\tau) e^{-hw(t-\tau)} \sin w_d (t-\tau) d\tau \right|_{\max} \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{array}{l} S_d \fallingdotseq \dfrac{1}{w} S_v = \dfrac{T}{2\pi} S_v \\ S_v = \qquad\qquad\qquad S_v \\ S_a \fallingdotseq w S_v = \dfrac{2\pi}{T} S_v \end{array}\right\}$$

이 된다. 그리고 지금은 최대치만을 문제로 하고 있으므로 윗식에서 sin과 cos을 동일시하면, S_d, S_v, S_a사이에는 근사적으로 다음과 같은 간단한 관계가 성립한다.

대부분 지진파의 속도 스펙트럼을 보면 평균적으로 그림에 표시한 바와 같이, 매우 짧은 주기성분을 제외하면 횡축의 주기축에 평행한 직선이 된다. 즉

$$S_v \fallingdotseq const.$$

따라서 가속도응답 스펙트럼 및 변위응답 스펙트럼의 개략적인 형은 각각 쌍곡선과 원점을 통과하는 우상(右上)의 직선이 된다. 속도 스펙트럼 S_v를 먼저 계산하고, 이로부터 근사적으로 구한 S_a, S_d를 각각 의사가속도응답 스펙트럼, 의사변위응답 스펙트럼이라고 부른다.

$$\left.\begin{array}{l} S_d = x_{\max} \\ S_a = (\ddot{x}+\ddot{y})_{\max} \end{array}\right\}$$

$$\frac{(\ddot{x}+\ddot{y})_{\max}}{x_{\max}} = w^2 = (\frac{2\pi}{T})^2$$

속도응답 스펙트럼 S_v를, 가속도응답 스펙트럼 S_a 또는 변위응답 스펙트럼 S_d와 동시에 읽을 수 있는 노모그램적인 표현법이 있다. 이와같은 그림을 3중응답 스펙트럼 또는 Tripartite 응답 스펙트럼이라 한다.

(2) 규준화응답 스펙트럼

질량 m, 스프링 상수 k, 감쇠상수 h, 고유주기 T(또는 고유원 진동수 w)의 1질점계의 지반 진동가속도 $\ddot{y}(t)$가 작용한다고 하자. 질점의 지면에 대한 상대변위를 x(t)라 하면 질점에 작용하는 절대가속도는 $\ddot{x}(t)+\ddot{y}(t)$이다.

이제 다음식과 같이 질점에 작용하는 절대 가속도의 최대치, 즉 최대가속도응답과 지반가속도의 최대치의 비를 $\bar{q}_a$라는 무차원양으로 정의한다.

$$\bar{q}_a = \frac{(\ddot{x}+\ddot{y})_{\max}}{\ddot{y}_{\max}}$$

$\bar{q}_a$는 지반진동에 대한 일종의 가속도응답 배율이다.

$$(\ddot{x}+\ddot{y})_{\max} = w^2 \bullet x_{\max}$$

$$w^2 = \frac{k}{m}$$

$$(\ddot{x}+\ddot{y})_{\max} = \frac{k \bullet x_{\max}}{m}$$

$$\bar{q}_a = \frac{k \bullet x_{\max}}{m\ddot{y}_{\max}}$$

이 된다. 이식의 분자는 스프링상수와 질점의 최대변위의 곱이므로 질점계에 작용하는 최

대전단력이 된다.

그리고 위 식의 분모는 질점 m의 강체가 지상에 밀착되어 설치된 경우 이 강체에 작용하는 최대관성력이다. 따라서 $\bar{q}_a$는 1질점계에 작용하는 최대전단력과, 동일 질량의 강체가 지상에 설치된 경우, 이것에 작용하는 최대 힘과의 비를 나타낸다. 그런데 1질점계의 스프링을 극단적으로 단단히 한 극한 상태가 강체이므로 강체의 고유주기는 T=0이 된다.

$\bar{q}_a$는 또한

$$\bar{q}_a = \frac{S_a}{\ddot{y}_{\max}}$$

이 된다. 앞에서도 언급한 바와같이 $S_a$sms 질점계의 감쇠상수 h와 비감쇠 고유주기 T의 함수이므로 $\bar{q}_a$도 h와 T의 함수 즉 $\bar{q}_a(h,T)$가 된다.

여기서 앞의 응답스펙트럼의 경우와 같이, $\bar{q}_a(h,T)$를 감쇠상수 h를 파라메타로 하여 고유주기에 대해 그린 것을 규준화 가속도응답 스펙트럼이라 한다.

T=0은 강체의 고우주기이므로 분명히

$$\bar{q}_a(h,0) = 1$$

이 된다. 따라서 지진파의 종류에 관계없이, 또한 감쇠상수가 어떠한 값이어도 규준화 가속도응답 스펙트럼은 종축의 값이 1인 점에서 시작한다.

$$\left.\begin{aligned} \bar{q}_v(h,T) &= \frac{\dot{x}_{\max}}{\dot{y}_{\max}} = \frac{S_v}{\dot{y}_{\max}} \\ \bar{q}_d(h,T) &= \frac{x_{\max}}{y_{\max}} = \frac{S_d}{y_{\max}} \end{aligned}\right\}$$

각각 규준화 속도응답 스펙트럼, 규준화 변위응답 스펙트럼이라하고, 앞의 규준화 가속도응답 스펙트럼과 함께 이들을 총칭하여 규준화 응답 스펙트럼(normalized response spectrum)이라 한다. 일반적으로 규준화란, 임의 변량을 같은 변량의 일정치로 나누어 무차원양으로 표시한 것을 말한다. 규준화 응답 스펙트럼이란, 응답 스펙트럼을 각각 지반운동의 최대치로 나누어 규준화한 것이다. 따라서 양자는 종축의 값이 다를 뿐 곡선의 형은 같다. 규준화한 응답스펙트럼은, 가속도의 값이 다른 둘 이상의 지진파의 응답특성만을 비교하는 경유에 자주 이용된다.

(3) 응답 스펙트럼의 의의

기록을 보는 것만으로는 분명하지 않은 지진파의 여러 가지 특성, 특히 구조물에 미치는 영향을 명확히 알 수 있다. 앞의 Fourier 스펙트럼은 지진파 자체의 주파수 특성을 나타내는 것이고, 여기에는 구조물의 개념은 전혀 포함되지 않았다. 이에 반해, 응답 스펙트럼은 지진파가 1질점계로 표시되는 구조물에 미치는 최대의 영향을 나타내는 것이다. 따라서 Fourier 스펙트럼 보다 훨씬 공학적이라고 할 수 있다.

자. 가속도-속도-변위 변환 알고리즘

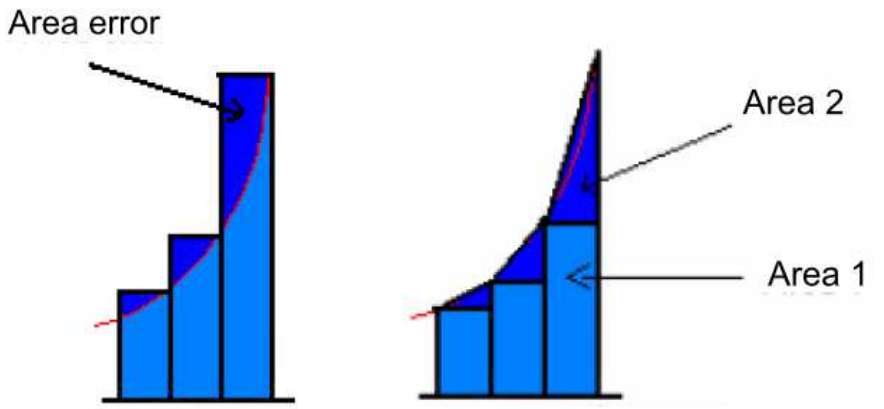
가속도에 포함되어 있는 저주파 성분 등으로 인해 적분과정을 통하여 구한 변위, 속도는 실제 상태변수에 비하여 큰 값을 가지거나 위상차에 의해 왜곡되어 나타나게 된다. 적분과정으로 얻어진 상태변수는 구조물이 실제 나타내는 응답과의 오차를 가지고 있기 때문에 구조물의 성능평가에 오류가 발생하는 원인이 되기도 한다. 또한 가속도응답을 수치적분방법으로 속도응답 및 변위응답을 구할 때 같은 기준선 이동현상(baseline drift)이 나타난다. 따라서 기준선 보정 작업을 수행하지 않고 수치해석을 수행하면 상식적인 물리적 현상을 만족하지 않는 속도와 변위응답을 얻게 된다.

본 연구에서는 가속도응답으로 부터 보다 정확한 변위응답을 구하기 위하여 두 번의 적분변환을 수행할 때 증폭되는 추가오차를 저감할 수 있는 방법(①기준선 이동의 보정 알고리즘, ②필터링을 통한 노이즈 제거 알고리즘)을 제안한다.

(1) 기준선 이동(baseline drift)의 보정 알고리즘

가속도응답을 활용하여 속도 및 변위응답을 구하기 위해서는 각 단계마다 수치적분(Numerical Integration)을 수행하는 것이 필요하다. 일반적인 수치적분은 정적분(Finite Integration)을 수치적인 방법으로 구해주는 함수(즉, 그래프 아래쪽의 넓이는 구하는 함수)를 의미한다.

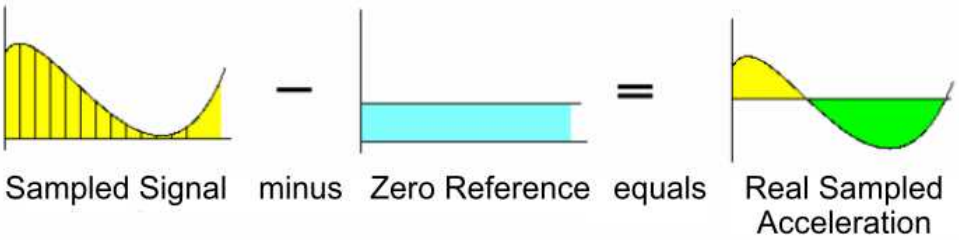
아래 그림과 같이 직사각형 방법으로 수치적분을 수행하기 보다는 사다리꼴 방법으로 면적을 구함으로서 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다.



a) 직사각형 방법 b) 사다리꼴 방법

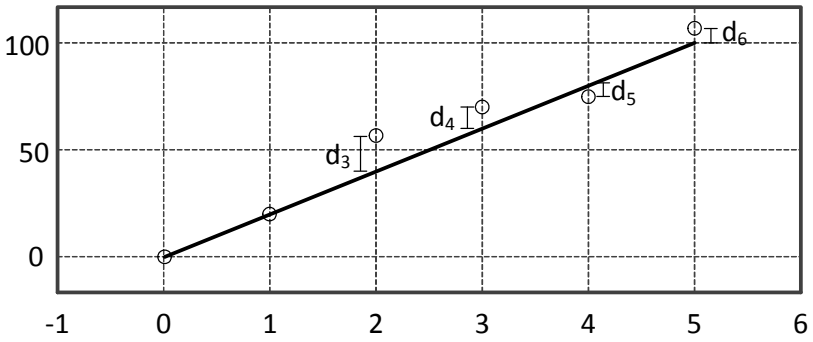
[수치적분 방법]

구조물의 가속도 응답은 양의 값이나 음의 값을 모두 가지게 되지만 일반적으로 가속도계를 이용해서 구한 가속도 데이터는 항상 양의 값을 가질 수 있다. 따라서 각 가속도계별로 발생한 offset에 대하여 아래 그림과 같은 calibration이 필요하다. 여기서 zero reference는 움직임이 없는 가속도계로부터 얻은 출력을 의미한다.



[가속도 응답의 calibration]

계측된 동적응답의 기준선 보정을 하는 방법 중에 가장 널리 알려진 방법은 최소자승 적합방법(least squares fitting method)을 이용하는 것이다. 최소자승 적합방법은 각 time step별 동적응답을 나타내는 각 점에서 직선 혹은 곡선까지의 거리를 점들에서 최소화하여 가장 근접한 직선 또는 곡선을 구하는데 사용하는 방법이다.



[점들과 선형 추정 사이의 거리]

이 데이터 집단에 대해서 최소자승적합은 다음과 같이 구할 수 있다. 즉, N회 측정한 측정값 y1, y2, ..., yN이 어떤 다른 측정값(여기서는 시간) x1, x2, ..., xN의 함수라고 할 때 측정값 yk와 함수값 f(xk)의 차이를 제곱한 것의 합이 최소가 되도록 하는 함수 f(x)를 구하는 것이 최소자승법의 원리이다.

$$\sum_{k=1}^{N}(y_k - f(x_k))^2$$

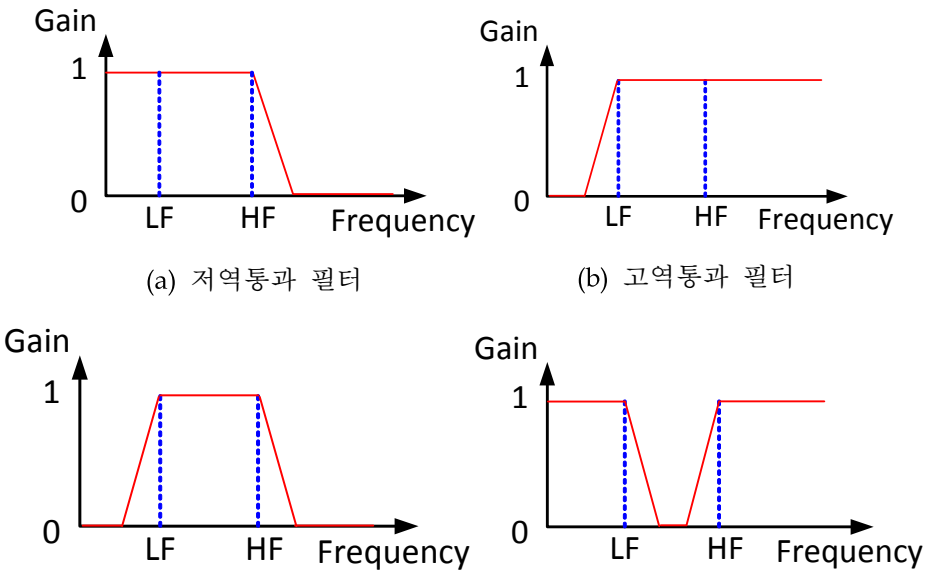
거리 제곱의 합이 가장 작은 직선을 구하기 위해 일반적인 선형 방정식 $y = ax + b$를 사용하여 거리를 계산하는 식을 나타낼 수 있다. 그런 후에 거리 제곱의 합을 나타내는 식을 쓸 수 있다. 이 식은 변수로 a와 b를 가지므로 미적분학의 방법을 사용하면 a와 b에 대해서 이 식의 도함수를 계산할 수 있으며 이 도함수를 '0'으로 놓는다. 이러한 방법으로 구한 a와 b의 값은 거리 제곱의 합이 최소인 직선을 나타낸다.

구조물 동적응답 데이터의 기준선 이동이 직선의 형태로 나타나지 않고 곡선의 형태로 나타날 경우에는 데이터 집단으로부터 다항식의 거리를 최소화함으로써 데이터에 적합한 단일 다항식을 전개할 수 있다. 이렇게 구한 최소자승 다항식 함수를 기준선 이동이 발생한 데이터에서 빼주면 기준선을 보정할 수 있다.

(2) 필터링을 통한 노이즈 제거 알고리즘

실제 구조물의 가속도 계측 시에는 다양한 요인에 의해 잡음이 섞인 가속도 값이 계측된다. 잡음은 결과적으로 추정된 변위의 큰 오차를 유발하는 주요 성분으로 작용하므로 가속도 계측 후 잡음의 효과적인 제거는 매우 중요하다. 본 연구에서는 구조물의 가속도 계측에 있어서 효과적인 필터링 기법에 대해 검토하고 활용하고자 한다.

잡음의 제거를 위해 본 연구에서는 주파수 기반 필터링 기법을 적용한다. 주파수 기반 필터링이란, 교란된 계측 데이터를 먼저 FFT를 통해 주파수 대역 신호로 바꿔주고, 여기서 실제 구조물의 거동에 의한 신호와 잡음에 의한 신호를 주파수대역 기준으로 분리하여 잡음을 제거한 후, 역 고속 푸리에 변환(Inverse FFT, IFFT)을 통해 시간영역 데이터로 변환하여 교정된 신호를 얻는 방법이다. 이는 기본적으로 구조물 거동에 의한 신호와 잡음 신호의 주파수 대역에 명확한 차이가 있을 때 매우 효과적인 방법이다. 주파수 기반 필터링은 그 방법에 따라 저역통과 필터(low-pass filter), 고역통과 필터(high-pass filter), 대역통과 필터(band-pass filter), 대역제거 필터(band-stop filter)로 구분되며 아래 그림은 이 필터들의 형상을 보여 준다.



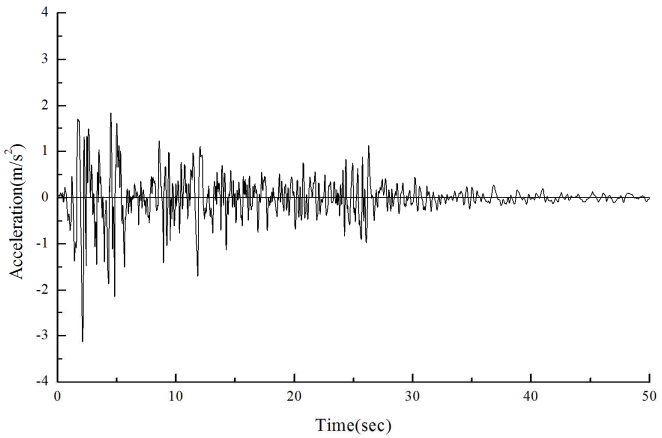
(a) 저역통과 필터 (b) 고역통과 필터

(c) 대역통과 필터 (d) 대역제거 필터

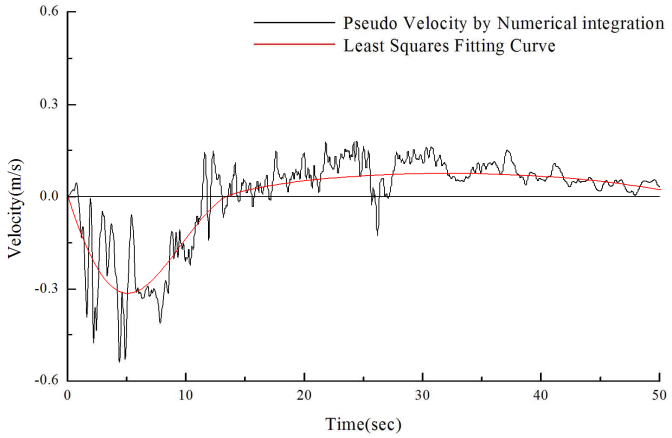
[필터의 형상비교]

본 연구에서는 위의 네 가지 필터 중에서 대역통과 필터를 사용하여 계측 시 발생하는 노이즈를 제거하였다. 지진가속도 계측자료에 포함되어 있는 노이즈를 제거할 때 필터의 차단주파수를 결정하는 것이 매우 중요하며 이를 위해서는 계측자료의 진동수를 파악하는 것이 중요하다.

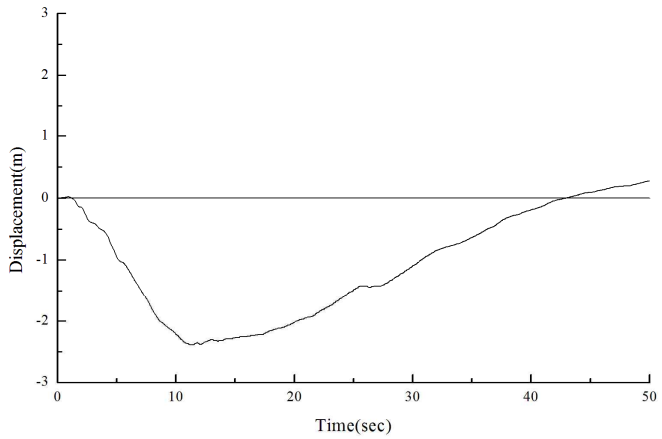
El Centro (1940,NS) 지진하중의 지반가속도 데이터를 활용하여, 속도 및 변위 변환을 수행하였으며, 단순 수치적분, 기준선 보정을 적용한 적분, 대역 통과 필터를 적용한 적분의 결과를 <그림 5~7>에 나타내었다.



(a) El Centro 지진하중 (1940, NS) 가속도 데이터



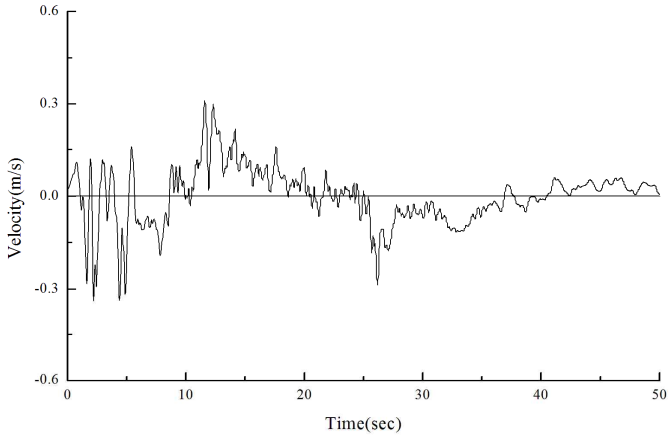
(b) 단순 수치적분을 적용한 속도 데이터 및 최소자승 적합곡선



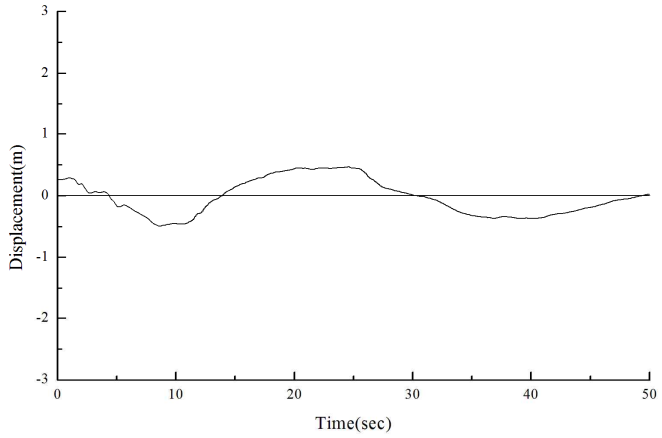
(c) 단순 수치적분을 적용한 변위 데이터

[El Centro 지진하중 (1940, NS) 가속도 데이터 및 수치적분 결과]

위 그림은 El Centro (1940,NS) 지진하중의 지반가속도 데이터를 나타낸다. 이 가속도응답 데이터를 앞서 설명한 사다리꼴 방법의 수치적분을 수행하여 속도를 구하면 위 그림(b)에서 보는 바와 같이 기준선 이동 효과가 심하게 나타난다. 이러한 상태의 속도응답 데이터를 사용하여 수치적분을 수행한 후 변위응답을 계산한다면 물리적 현상을 만족하지 않는 데이터를 얻게 될 것이다. 따라서 이 속도응답에 대한 기준선 보정은 반드시 필요하다.

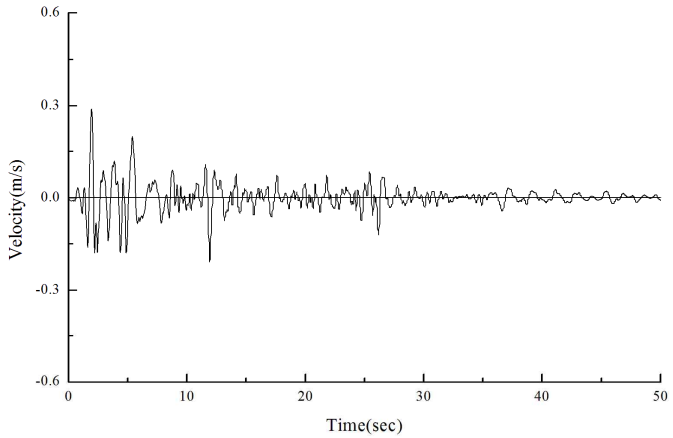


(a) 기준선 보정 알고리즘 적용 후 수치적분을 이용한 속도 데이터

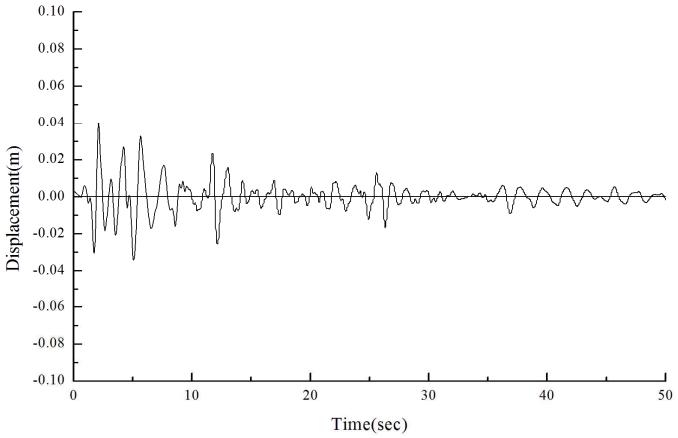


(b) 기준선 보정 알고리즘 적용 후 수치적분을 이용한 변위 데이터

[기준선 보정 알고리즘을 적용한 El Centro 지진하중 (1940, NS) 가속도 데이터의 수치적분 결과]



(a) 대역 통과 필터 적용 후 수치적분을 이용한 속도 데이터



(b) 대역 통과 필터 적용 후 수치적분을 이용한 변위 데이터

[대역 통과 필터를 적용한 El Centro 지진하중 (1940, NS) 가속도 데이터의 수치적분 결과]

대역 통과 필터(0.5Hz~200Hz)를 통과시킨 후 수치적분을 시키면 위 그림과 같은 속도와 변위 응답을 얻을 수 있다. 지진 발생 후 50초 동안의 변위 응답을 살펴보면 위 그림(b)의 변위 응답이 가장 점성감쇠 자유진동(Free vibration with viscos damping)에 가깝다고 판단되므로, 대역 통과 필터를 통과시켜 잡음을 제거시킨 후 수행되는 수치적분은 타당하다고 판단된다.

차. 칼만 필터를 이용한 수치적분 알고리즘

가속도로부터 상태변수를 추정하는 연구는 다양한 분야에서 진행되어 왔다. 칼만필터는 시스템의 일부 응답을 이용하여 시스템 전체의 응답을 추정하는 관측기로 시스템의 동적특성을 아는 경우 매우 근접하게 실제 상태변수를 예측할 수 있다고 알려져 있다.

칼만 필터는 대상 시스템의 확률적인 모델과 측정값을 이용하여 시스템의 상태변수를 찾아내는 최적 추정기법이다. 즉, 상태식에 의한 시간전파와 측정식에 의한 개선을 통하여 상태값을 추정하게 되며, 실제 상태값과 추정된 상태값의 오차 공분산을 최소화하는 알고리즘이다.

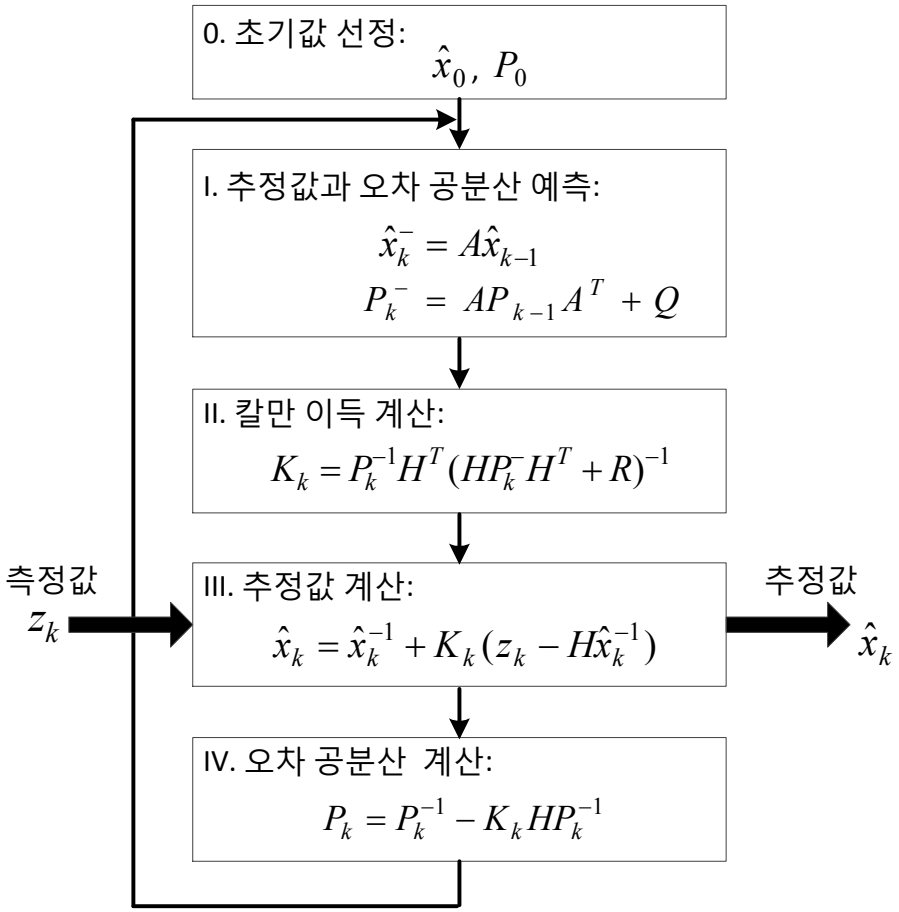
시스템이 선형이고 정규분포를 갖는 백색잡음에 의해 구동되는 칼만 필터는 최소 공분산을 갖는 편향되지 않는 최적의 추정기로 알려져 있다. 칼만 필터는 추정값에 대한 확률분포를 따져서 가장 확률이 높은 값을 추정값으로 선택하는 방법으로 측정값의 예측 오차로 예측값을 적절히 보정해서 최종 추정값을 계산한다. 칼만 이득을 통한 각각의 결과로 나타나는 상태를 위한 가장 최적의 평균 인자를 찾는 것이 칼만 필터의 목표이다

현재 칼만 필터의 응용은 우주공학, 제어공학, 통신공학 뿐만 아니라 토목공학, 경제학, 통계학 등 많은 분야에서 볼 수 있다. 특히 1960년대에 미국의 아폴로 계획을 중심으로 하는 우주개발 계획 등에서 많은 연구자가 칼만 필터의 응용에 노력해 온 것이 칼만 필터 보급의 큰 요인의 하나로 평가받고 있다. 현재 칼만 필터 이론은 단순히 필터의 범주를 넘어서 범용성을 가진 추정이론으로서 시스템 과학의 중요한 하나의 이론이 되어가고 있으며, 최근 고성능의 마이크로 프로세서의 발달로 칼만필터는 매우 복잡한 실시간 처리시스템에서도 점점 더 이용 가치가 높아지고 있다.

아래 그림에 칼만 필터 알고리즘의 프로세스를 나타내었다. 칼만 필터 알고리즘은 본질적으로 입력과 출력이 하나씩인 아주 간단한 구조로서 측정값 (z_k)을 입력받아 내부에서 처리한 다음 추정값($\hat{x}_k$)을 출력하고 내부 계산은 총 네 단계에 걸쳐서 이루어진다. 첫 번째 단계는 예측단계로써 II~IV 단계에서 사용하는 두 변수, $\hat{x}_k^-$와 P_k^-를 계산한다. 여기서 윗 첨자 '-'는 예측값을 의미한다. 예측 단계의 계산식은 시스템 모델과 밀접하게 관련이 되어 있다. II 단계에서는 칼만 이득(K_k)을 계산한다. 변수 P_k^-는 앞 단계에서 계산한 값을 사용하고 H와 R은 칼만 필터 알고리즘 밖에서 미리 결정하는 값이다. III 단계에서는 입력된 측정값으로 추정값을 계산하는데 여기서 사용된 변수 $\hat{x}_k^-$는 I 단계에서 계산한 값이다. 마지막 IV 단계는 오차 공분산을 구하는 단계이다. 오차 공분산은 추정값이 얼마나 정확한지를 알려주는 척도이다. 보통 오차 공분산을 검토해서 앞서 계산한 추정값을 믿고 쓸지 아니면 버릴지를 판단한다. 앞의 프로세스 그림에서 시스템 모델과 관련된 변수 (A, H, Q, R)를 제외한 나머지 변수들은 측정되거나 알고리즘에서 계산하는 값이기 때문에 설계자가 임의로 변경할 수 없다. 따라서 설계한 칼만 필터의 성능이 원하는 만큼 나오지 않을 때, 설계자가 조정할 수 있는 변수는 시스템 모델과 관련된 네 개의 변수 뿐이다. 즉, 시스템 모델의 네 변수가 칼만 필터의 설계 인자가 된다. 이 값을 어떻게 선정하느냐에 따라서 칼만 필터의 성능이 달라지

게 된다.

아래 그림에 나타낸 칼만 필터 알고리즘은 계산과정이 네 단계로 되어 있지만, 의미를 기준으로 나누면 다음과 같이 크게 두 단계로 분류된다.



[칼만 필터 알고리즘의 프로세스]

(1) 예측과정

위 그림의 칼만 필터 알고리즘에서 I 단계가 여기에 해당 되는데 직전 추정값($\hat{x}_{k-1}$)과 오차 공분산(P_{k-1})을 입력으로 받아서, 최종 결과로 예측값($\hat{x}_k^-$, P_k^-)을 계산한다. 이 값들은 추정 과정에서 사용되며 예측과정에서 사용하는 시스템 모델 변수는 A와 Q이다.

(2) 추정과정

칼만 필터 알고리즘에서 II 단계, III 단계, IV 단계가 여기에 속하는데 추정 과정의 결과물은 추정값($\hat{x}_k$)과 오차 공분산(P_k)이다. 입력값으로는 예측 과정의 예측값($\hat{x}_k^-$, P_k^-) 뿐만 아니라 측정값(z_k)을 전달 받아서 사용하며 추정과정에서 사용하는 시스템 모델 변수는 H와 R이다. 여기서 오차 공분산은 칼만 필터의 추정값이 참값에서서 얼마나 차이가 나는지를 나타내는데 즉, 오차 공분산은 추정값의 정확도에 대한 척도가 된다.

본 연구에서는 계측된 가속도응답을 이용하여 속도응답 및 변위응답을 구하기 위해서 필요한 수치적분 알고리즘을 칼만 필터를 이용해서 개발하였다. 이를 위한 칼만 필터의 설계 과정은 다음과 같다.

우선 계측한 물리량은 구조물의 가속도이고 이를 수치적분해서 얻은 물리량은 속도이기 때문에 이 두 변수를 상태변수로 정의하여 칼만 필터를 설계하였다.

$$x = \begin{Bmatrix} \text{속도} \\ \text{가속도} \end{Bmatrix}$$

이 상태 변수에 대하여 수치적분을 수행하기 위한 시스템 모델은 다음과 같이 구성하였다.

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k$$
$$z_k = Hx_k + v_k$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 Δt는 가속도를 측정하는 시간 간격을 의미한다. 이렇게 구성한 시스템 모델이 본 연구에서 의도하는 내용을 제대로 반영하고 있는지 확인하기 위하여 행렬 A를 시스템 모델에 대입해서 상태변수 관계식을 풀어서 써보면 다음과 같다.

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_k + w_k$$

이 식에 상태변수의 정의를 대입해서 정리하면 다음과 같이 더 구체적인 의미를 알 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \text{속도} \\ \text{가속도} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{속도} \\ \text{가속도} \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} 0 \\ w_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{속도} + \text{가속도}\Delta t \\ \text{가속도} + w \end{bmatrix}_k$$

먼저 속도와 관련된 관계식만을 떼어내어 정리하면 다음과 같다.

$$\text{속도}_{k+1} = \text{속도}_k + \text{가속도}_k \Delta t$$

이 식은 '현재 속도 = 직전 속도 + 속도 변화'라는 물리 법칙을 수식으로 표현한 것이다. 시스템 잡음이 이 관계식에 포함되지 않은 것은 이 때문이다. 가속도 관계식에서는 시스템

잡음(w_k)의 영향만을 받는 것을 알 수 있다.

이제 시스템 모델의 측정값 관계식을 살펴보기 위해서 행렬 H를 측정값 관계식에 대입해서 정리하면 다음과 같다.

$$z_k = Hx_k + v_k = [0 \;\; 1]\begin{bmatrix} \text{속도} \\ \text{가속도} \end{bmatrix}_k + v_k = \text{가속도}_k + v_k$$

이 식이 의미하는 바는 측정하는 값은 위치이고 측정값에는 잡음이 섞여 있다는 것이다. 이처럼 행렬 A와 B는 임의로 선정한 것이 아니라 시스템의 물리적 관계를 모델링한 결과이다. 즉, 시스템 모델은 가속도와 속도 사이의 물리적 관계, 가속도에 영향을 주는 오차 요인 등을 수학식으로 표현한 것이다.

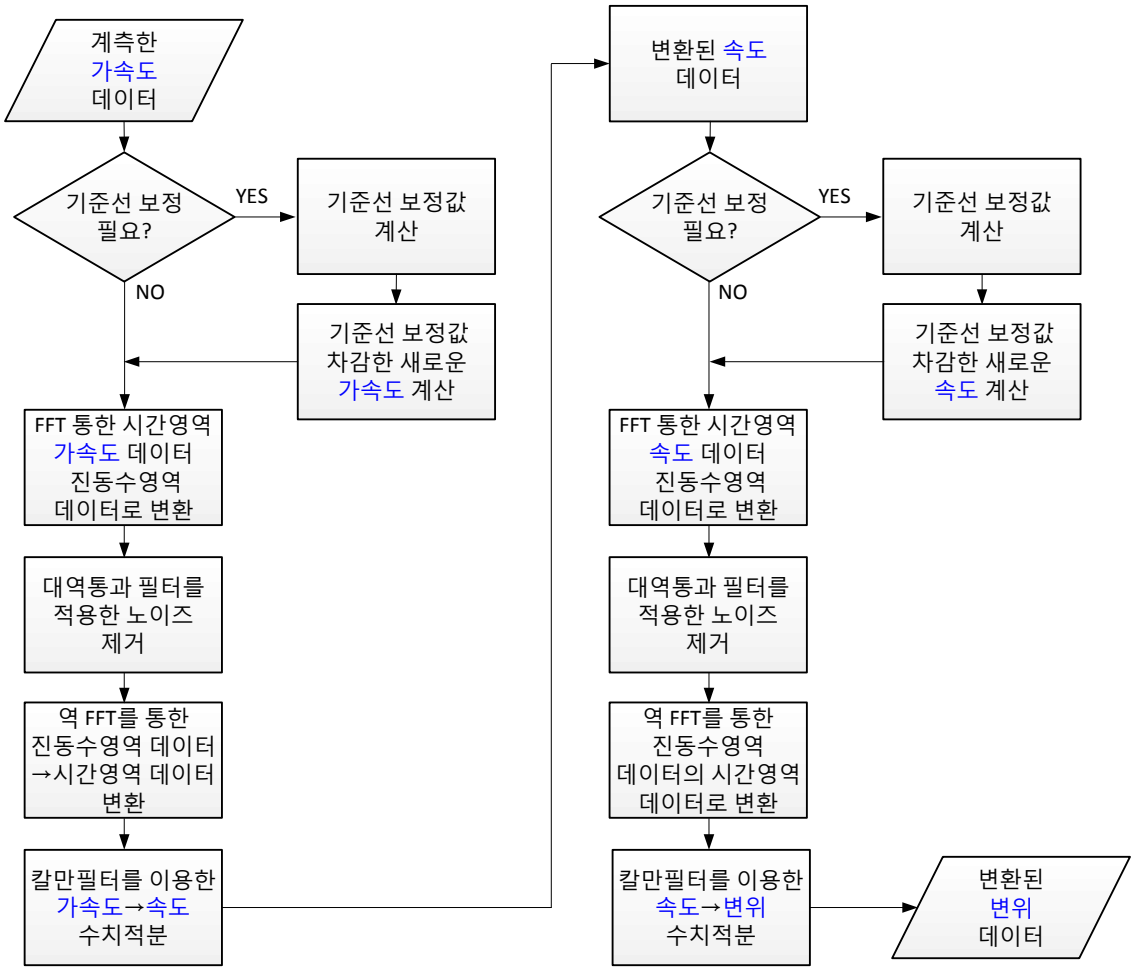
이제 마지막으로 잡음의 공분산 행렬(Q, R)을 결정해야 하는데 측정 잡음(v_k)의 오차 특성은 일반적으로 센서 제작사에서 제공하는 경우가 많다. 만약 그렇지 않다면 시스템에 대한 지식과 경험을 바탕으로 실험 등을 통해 결정해야 하며 두 공분산 행렬을 해석적으로도 구하기 어렵다면 이 행렬을 칼만 필터의 설계 인자로 보고 시행착오를 거쳐 산정한다. 칼만 필터 알고리즘에서 외부 측정값의 영향을 덜 받고 변화가 완만한 추정값을 얻고 싶다면 행렬 R을 크게 하면 된다. 행렬 Q가 커지면 칼만 이득도 커지게 되며 측정값이 더 많이 반영되게 된다. 따라서 측정값의 영향을 덜 받고 변화가 완만한 추정값을 얻고 싶다면 행렬 Q를 줄여야 한다. 이는 행렬 R과는 정 반대의 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 두 행렬을 다음과 같이 결정하였다.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}, \quad R = 10$$

이러한 과정을 거쳐서 개발한 칼만 필터를 이용한 수치적분 알고리즘은 가속도 응답을 속도응답으로 변환할 경우에도 사용되지만 변환된 속도응답을 이용하여 변위응답을 구할 때에도 사용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 개발된 알고리즘을 두 번 적용하여 변위응답을 계산한다.

카. 지진가속도 측정을 통한 건물변위 산정 알고리즘

본 연구에서 개발한 '가속도→속도→변위 변환 알고리즘'의 프로세스를 아래 그림에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 우선 계측한 가속도 데이터에 기존선 이동이 심할 경우에는 기준선 보정을 수행하고 그렇지 않을 경우에는 곧바로 FFT를 통해서 시간영역 가속도 데이터를 진동수영역으로 변환을 시켜준다. 여기서 기준선 보정 여부의 결정은 사용자(엔지니어)가 하게 된다. 진동수 영역으로 변환된 가속도 데이터는 사용자가 정한 차단 주파수(cutoff frequency)를 기준으로 노이즈를 제거하게 되며 이후 다시 역 FFT를 통해서 가속도 데이터를 구하게 된다. 이렇게 구한 가속도 데이터에 앞서 소개한 칼만 필터를 적용시켜 수치적분을 수행하면 속도 데이터를 얻는다. 속도 데이터에 동일한 작업을 반복하게 되면 기준선이 보정되고 노이즈가 제거된 변위응답 데이터를 얻을 수 있다.



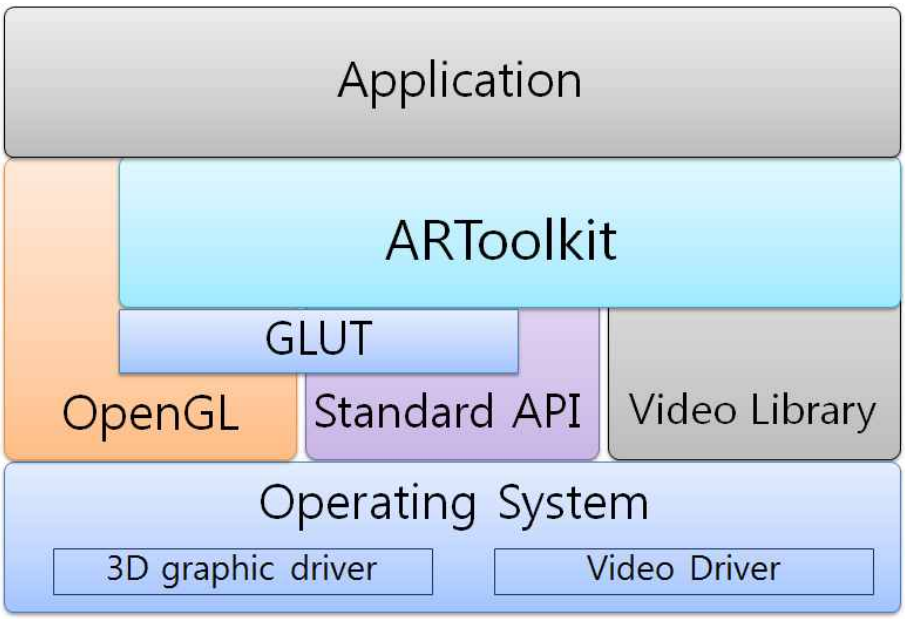
[가속도→속도→변위 변환 알고리즘 프로세스]

5. 건축 형상정보 증강현실(Augmented Reality) 정합 모듈 개발

가. AR기반 요소 기술 조사

(1) AR기반 요소 기술인 ARToolkit의 구조 분석 및 조사
- 8종류 정보 수집 [매뉴얼: 1건, 세미나 자료 1건, 해외논문 3건, 국내논문 26건, 기술동향 21건, 동영상 2건, 기타 3건, 관련 프로그램 3건]: 총 59건
- 정보 기반의 요약 보고서 1건 작성

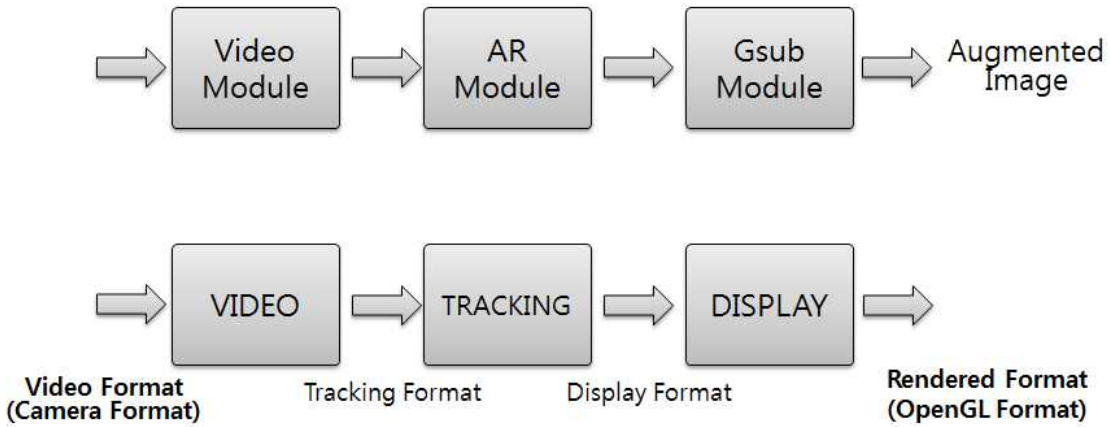
(2) 일반적으로 적용되는 산업/게임/의료 분야에 적용 범위 조사
- 기 선행 AR 논문, 상업적 자료 조사
- AR 도구: AR Toolkit[Open Source 기반] 활용 관점 정보 수집 및 테스팅
- AR 적용 및 사용자 환경 조사
  (대형 구조물의 안전성 정보 가시화 및 기존 구조물의 설계 정보를 최대한 활용하여 정보 재사용성 향상 및 건물, 구조 지진 발생시 가시화 및 상시 모니터링 기술 기반 개발)
- AR 관련 자료 조사 등 58건 정보 수집 및 분석
- 사용자 운영환경 조사(Windows 기반 사용환경, 안드로이드 기반 가시화 환경, 기타 환경)
- Open-source 기반 가시화 및 개발 환경 조사
- 본 연구는 고층건물을 위한 AR 적용 및 실시간 모니터링에 근거한 정보관리 및 활용에 초점을 둠
- BIM(Building Information Model)에 근거한 정보관리 및 가시화에 초점을 둠
- 멀티채널 지원 및 BIM 정보를 활용한 가시화 방안 수립
- 기존 상업적 용도의 안드로이드, 교육 컨텐츠 기반의 정보 활용성 검토



[AR Toolkit 정보처리 구조]

나. 건축 형상정보 수집 및 가시화 기술 조사

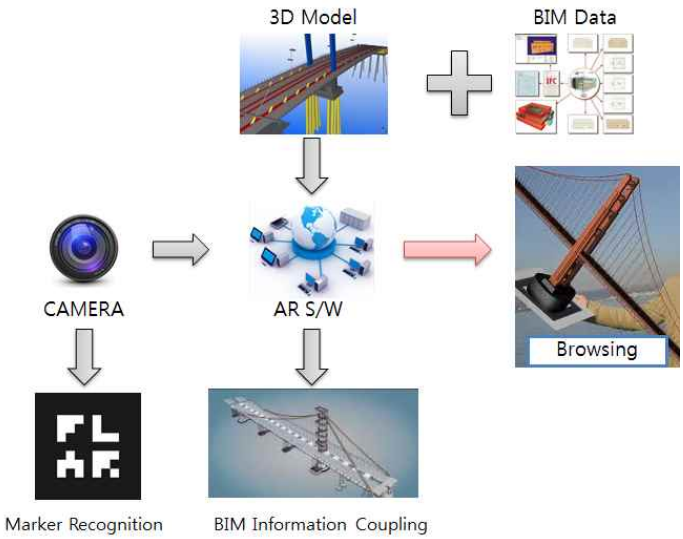
- 마창대교, 부산대교, 기타 건물 등 3건 정보 수집
- 가시화 기술(Xj3D, AutoCAD, CATIA Modeling, 3D MAX 등) 정보 가시화 방안 조사
- 최종 AR 정보 가시화시 3D MAX 기반의 정보 가시화 방안 조사 및 경량화 방안 조사



[AR 정보 병합을 위한 상세 정보 처리 절차]

다. 건축 형상정보와 AR기반 정합화 방안 기본 설계안 제시

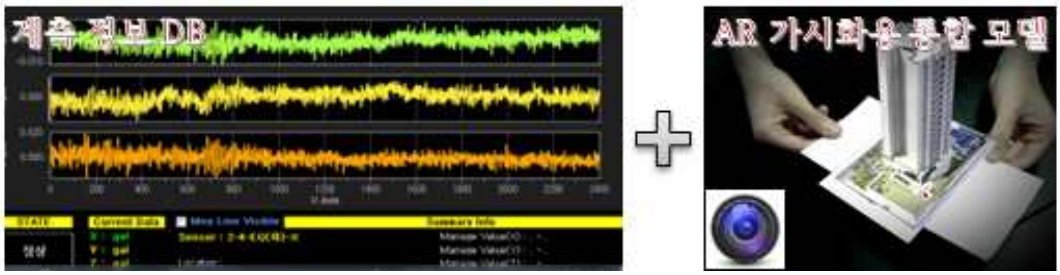
- 1차년도에는 대규모 교각에 대한 설계정보 수집
- AR 정보화 방안 수립
- BIM 정보 모델링 및 데이터 구조 분석
- 대용량 정보의 경량화 방안 수립
- 일반적인 AR Toolkit 가시화 방안 조사 및 테스트
- 고성능, 고품질의 가시화 방안 고려[OGRE 기반 등)
- OGRE 기반 가시화 기본 프레임 설계 및 병합 모듈 일부 개발



[AR 기반 정보 가시화 방안 및 처리 절차]

라. 지진 계측정보 분석 및 형상정보 연계 기준 설정

BIM 형상정보와 계측정보의 최적 정합 기준을 정의하고 이를 위한 계측정보 스키마의 분석을 수행하였고, 대형 건축물에 대한 BIM 형상정보를 추가로 분석하여 이를 기준 모델로 정의하고 AR 가시화용 통합 모델로 규격화하였다. 또한 AR 가시화용 통합 모델 구축을 위해 Autodesk 사에서 제공하고 있는 Revit 프로그램을 이용하여 사전 테스트를 수행하였다.



[AR기반 정합 알고리즘의 개념]

마. AR기반 지진계측 DB 인터페이스 프로토타입 개발

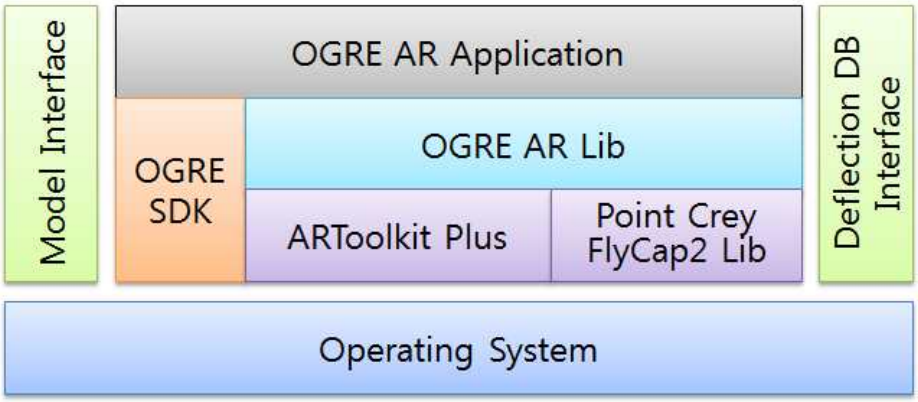
대형 건축물 BIM 형상정보와 계측 정보를 병합하기 위해, 형상 기반 정보 처리에 대한 알고리즘을 연구하였고, 지진계측 데이터베이스로부터 전송된 계측 데이터를 시간 기반 정보를 처리하였으며, 지진계측 데이터베이스 연계를 위해 계측정보의 스키마를 분석하고, 이를 기반으로 인터페이스 프로토타입을 개발하였다.

구분	내용
시작품명	계측 정보 가시화용 인터페이스 모듈 개발: AR기반 가시화 프레임워크와 계측정보DB의 인터페이스 모듈
용도	대형 건축물은 지진 계측 정보 수집 장치(Logger, 소형 PLC) 및 RFID(Active/Passive), Zigbee 등 다양한 계측기로부터 정보를 수집할 수 있다. 본 시제품에서는 정보 추출을 위한 API 및 모듈을 개발하고 각 정보로부터 수집되어온 정보를 각 시스템과 동기화시키는 모듈의 개발이 필수적이다.
기능	계측 정보 가시화용 인터페이스 모듈은 GPS, 가속도계와 같은 계측기로부터 수신되어 저장되는 DB와 인터페이스함. DB에 저장되는 데이터는 변위데이터를 기준으로 인터페이스를 용이하게 하기 위한 UI를 제공한다. 다양한 데이터 조건을 수용하도록, 특정 시점 접속 및 변위 증감 기능을 제공함으로써 본 과제 수행에 유연하게 적용할 수 있는 인터페이스를 개발하였다.
성능	계측 정보 전송률 90% 이상
수행자	실무담당자
수행기간	2013년 10월 ~ 11월

(1) 건축 형상정보 AR기반 가시화 프레임워크 개발

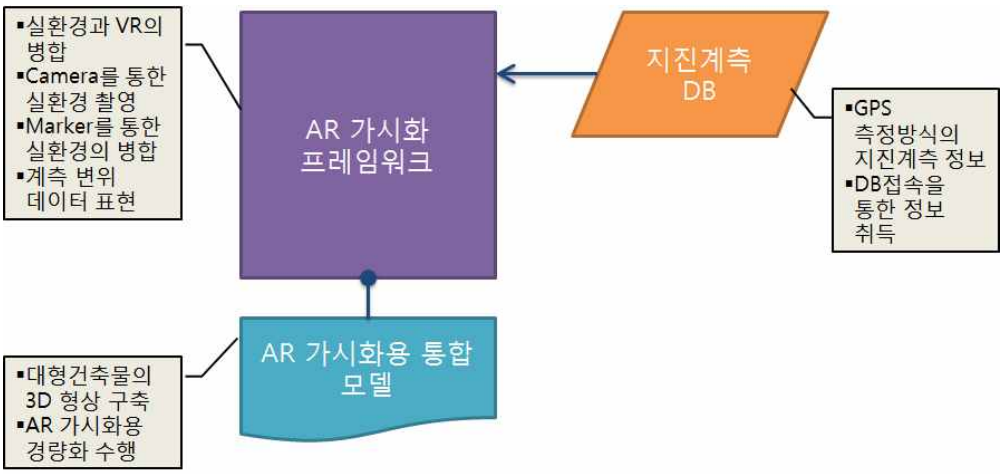
(가) AR기반 가시화 프레임워크 기준 모듈간 기능 정의

AR기반 가시화 프레임워크는 Windows OS 환경 위에, 오픈소스인 Ogre3D SDK 기반 하에 AR 구현을 위한 ARToolkit을 이용하고 Maker Camera 제어를 위한 FlyCap 라이브러리를 이용하였다.



[AR기반 가시화 프레임워크의 개발 구성도]

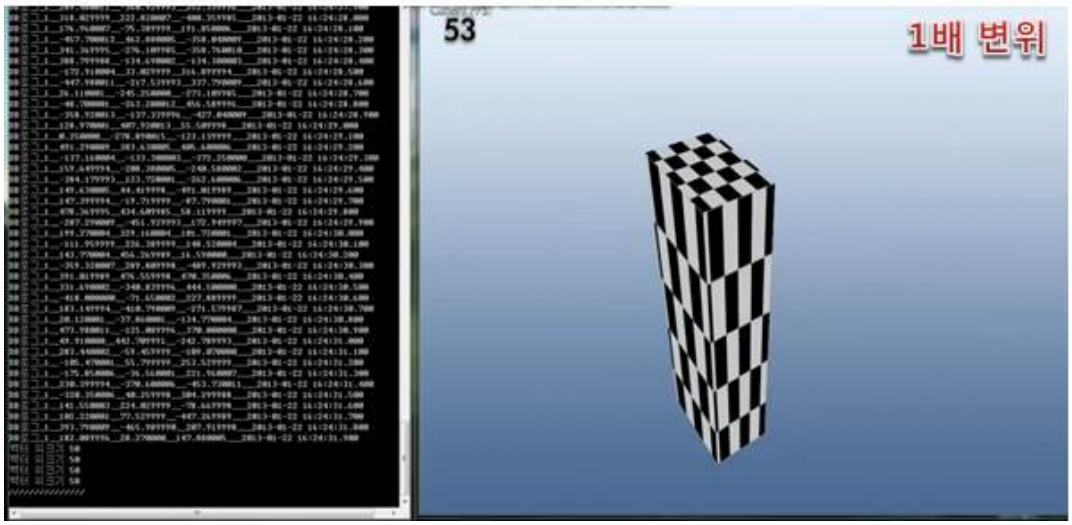
지진계측 데이터베이스는 원격 데이터베이스 접속을 통해 정보를 취득하고, AR 가시화 프레임워크는 실환경과 VR의 병합을 수행하며, Camera를 통한 실환경 촬영하고, Marker를 통한 실환경의 병합을 수행한다. 또한 계측된 변위 데이터를 가시화한다. AR 가시화용 통합 모델은 AR 가시화용 경량화를 통해 대형건축물의 3D 형상정보를 구축한다.



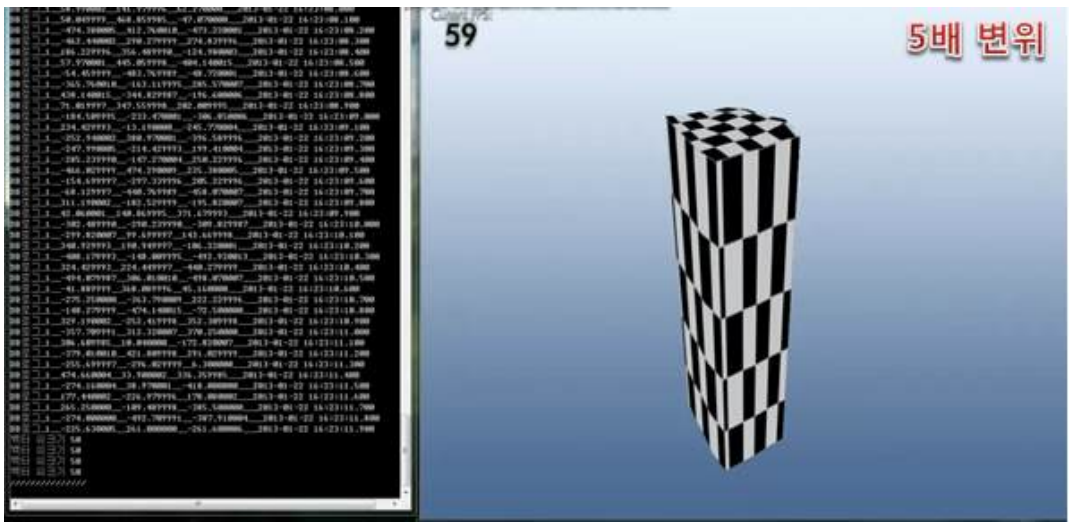
[AR기반 가시화 프레임워크의 역할]

(나) AR기반 형상정보 제어 모듈 개발

대형 건축물 BIM 형상정보와 계측 정보를 병합하기 위한 제어 알고리즘을 연구하였다. 특정 센서로부터의 계측정보를 VR환경에 가시화하기 위해 형상에 기반한 정점 위치별로 보간 하고 진폭에 대한 가변 알고리즘을 구현하였다. 계측정보를 저장하고 있는 원격 서버로부터 데이터 전송 시 발생할 수 있는 조건에 대해 정점 제어를 수행할 수 있는 알고리즘을 구현하였으며, 전송되는 위치정보는 0.1초당 정보를 기록하고 있어 최대 20fps(FPS: Frame Per Second)를 출력할 수 있다. 개발된 가시화 프레임워크의 성능은 60fps를 출력할 수 있기 때문에 Frame 보간 기술을 적용하여 원활한 가시화 환경을 구축하였다.



[형상정보 제어 모듈을 이용한 계측정보 가시화(1배 변위)]



[형상정보 제어 모듈을 이용한 계측정보 가시화(5배 변위)]

(다) 가상 건축물 가시화 성능을 위한 경량화 알고리즘 적용

BIM 모델링 툴로부터 가시화 프레임워크로 형상 정보를 전달하기 위해서 메시를 체계화하고 구조화를 수행하였다. 또한 모델링 툴이 출력하는 최신 데이터 형식을 만족하도록 Model Interface 부분을 개발하였다.

[헤더 파일]
IOSMSceneCallbacks.h
OgreOSMScene.h
OSMAnimSerializer.h
OSMRenderTexListener.h

[코드 파일] 주요 내용
OgreOSMScene.cpp

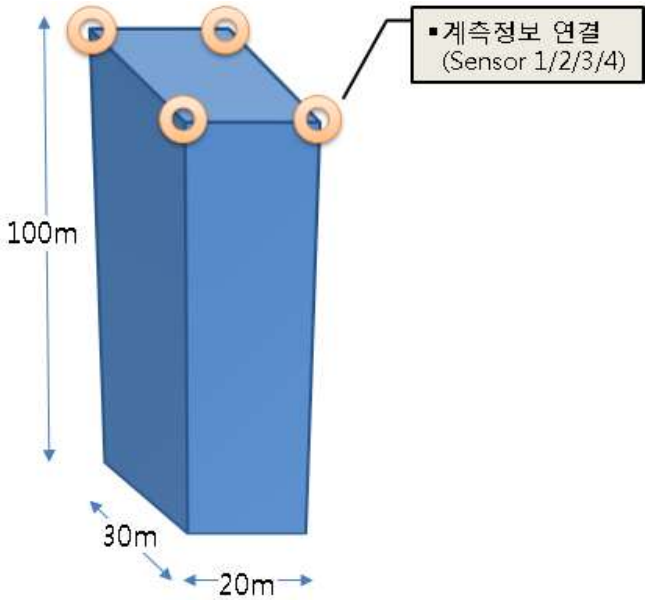
```
/*********************************************************************
        Scene Loader
        FILE: OgreOSMScene.cpp
        DESCRIPTION: Contains the OE_XMLScene reader (oe_scene)
 *********************************************************************/

#include "OgreOSMScene.h"
#include "OgreTagPoint.h"
#include "OSMRenderTexListener.h"

using namespace Ogre;

enum {
        SCENE_SKYPLANE = 1,
        SCENE_SKYBOX,
        SCENE_SKYDOME,
};

#define ENABLE_LOGMANAGER LogManager::getSingleton().setLogDetail(LL_NORMAL);
#define DISABLE_LOGMANAGER
LogManager::getSingleton().setLogDetail(static_cast<LoggingLevel>(0));

unsigned long OSMScene::mNextGeneratedNameExt = 1;

OSMScene::OSMScene(SceneManager* pSceneMgr, RenderWindow* win) {}
bool OSMScene::initialise(const char* pszFilename, OSMSceneCallbacks* pCallbacks) {}
void OSMScene::declareResources(void) {}
```

```
bool OSMScene::createScene(Ogre::SceneNode* pParent) {}
OSMScene::CameraList& OSMScene::getCameraList(void) {}
OSMScene::LightList& OSMScene::getLightList(void) {}
OSMScene::EntityList& OSMScene::getEntityList(void) {}
Ogre::SceneNode* OSMScene::createNode(TiXmlElement* pElem, Ogre::SceneNode*
pSceneRoot) {}
Ogre::SceneNode* OSMScene::initSceneManager(TiXmlElement* sceneProp, bool& bHandled) {}
void OSMScene::setSceneProperties(TiXmlElement* sceneProp) {}
void OSMScene::createEntities(TiXmlElement* pEntityNode, Ogre::SceneNode* pSceneRoot) {}
void OSMScene::createLights(TiXmlElement* pLightNode, Ogre::SceneNode* pSceneRoot) {}
void OSMScene::createCameras(TiXmlElement* pCameraNode, Ogre::SceneNode* pSceneRoot)
{}
void OSMScene::createHelpers(TiXmlElement* pHelperNode, Ogre::SceneNode* pSceneRoot) {}
void OSMScene::createShapes(TiXmlElement* pShapeNode) {}
void OSMScene::createRenderTexture(TiXmlElement* pRenderTexNode) {}
void OSMScene::createStaticGeometry(TiXmlElement* pStaticGeom) {}
void OSMScene::loadAnimations(TiXmlElement* animationsNode, SkeletonHandles& handles) {}
void OSMScene::setRenderTextureNodes(RenderTexture* rTex, const EntityList* showNodes,
const EntityList* hideNodes) {}
void OSMScene::loadMaterialAnimations(TiXmlElement* animationsNode) {}
OSMAnimSerializer::OSMAnimSerializer() {}
void OSMAnimSerializer::addAnimation(Ogre::SkeletonPtr skel, const Ogre::String& filename)
{}
```

구분	내용
시작품명	BIM 형상정보 기반 정점 제어 알고리즘 개발: Autodesk Revit 도구기반 형상정보의 정점을 제어하기 위한 위치 및 시간 별 처리 알고리즘
용도	국제표준 데이터 형상모델을 기반으로 계측정보를 가시화 프레임워크에서 표현하기 위해서는 형상모델의 정점을 제어해야 함. 이를 위해서는 대형 건축물 BIM 형상정보에 원격 서버로부터 전송받은 계측정보를 정합하기 위한 정점 제어 알고리즘의 개발이 필요함.
기능	Autodesk Revit 도구에서 추출된 형상정보를 Ogre3D 오픈소스로 구현된 가시화 프레임워크로 입력한 후에, 특정 센서로부터의 계측정보를 형상정보에 따라 정점 위치별로 보간하고 진폭에 대한 가변 알고리즘을 개발하였다. 전송되는 위치정보의 시간 간격을 가시화 프레임워크의 FPS와 동기화시키기 위한 보간 알고리즘을 개발하였다.
성능	가시화 성능 40fps 이상
수행자	실무담당자
수행기간	2013년 11월

(2) 대형 건축물 BIM 형상정보의 AR기반 가시화 수행

가시화 프레임워크 개발을 위한 단순화한 BIM 형상 테스트 모델을 구상하였고, 각 Edge별 5개 정점을 가진 직사각형 모델을 생성하였다. 최상단 4개 지점 Vertex에 계측정보 Sensor 1, Sensor 2, Sensor 3, Sensor 4의 정보를 연결하였다.



[가시화 프레임워크 개발용 BIM 형상 테스트 모델]

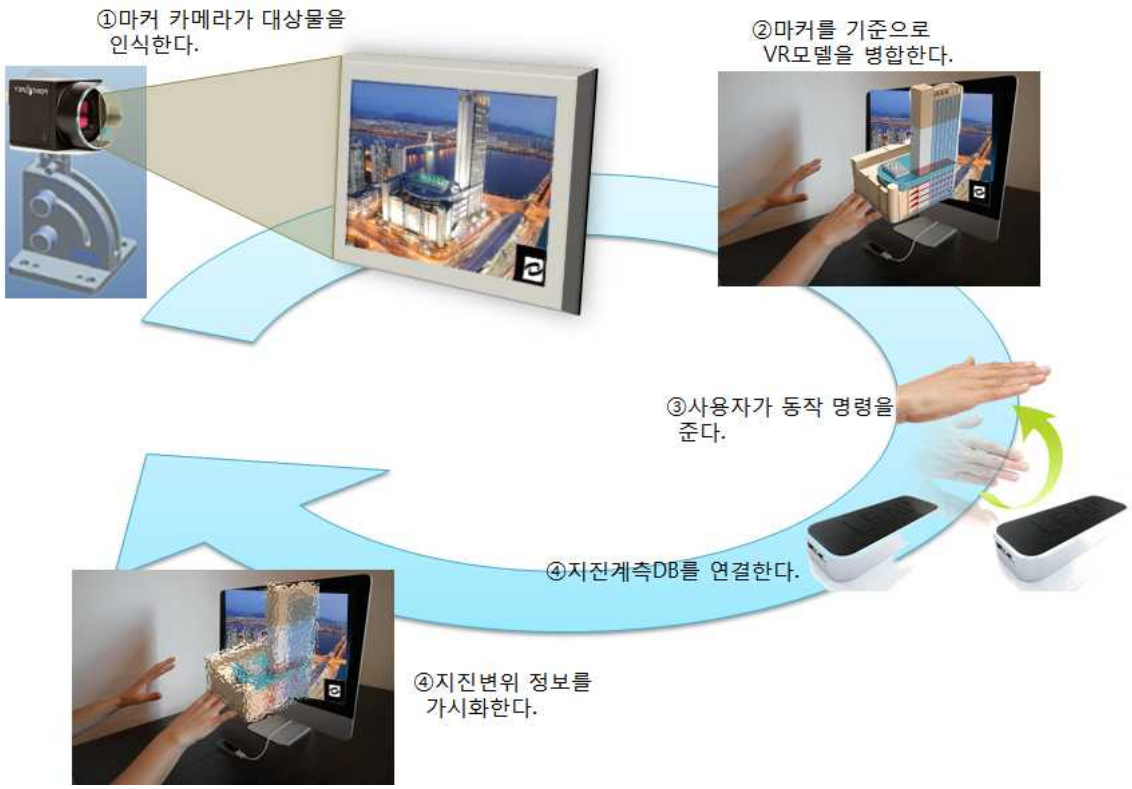
아래와 같은 AR 가시화 환경을 위한 구성품들을 구성하였다.

[AR 가시화 환경 구성품]

[AR 가시화 환경 구성품의 용도]

구성품	사양	용도
CCD Camera /설치 지그	Point Grey FL2G - 13S2C-C	▪ 실환경 및 마커 인식용 ▪ 설치 기구부를 마련하여 안정된 영상 취득
대상건축물 인식체	Image & Maker	▪ 실환경 병합 대상 ▪ 특정 위치 마커 부착
Motion 디바이스	Leap Motion	▪ 사용자 명령 입력 도구

AR 가시화 환경 동작을 위한 시나리오를 구상함. 마커 카메라가 대상물을 인식하면, 마커를 기준으로 VR모델을 병합하고, 사용자가 동작인식 장치에 명령을 입력하면, 지진계측 DB에 연결을 수행하며, 가시화 프레임워크에 지진변위 정보가 병합된 AR 가시화 환경이 동작한다.

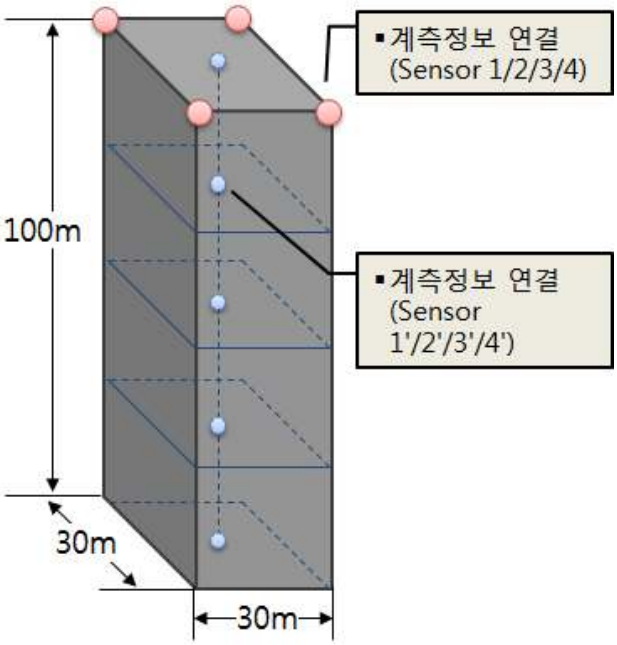


[AR 가시화 동작 시나리오]

바. AR기반 계측정보 통합 가시화 시스템 개발

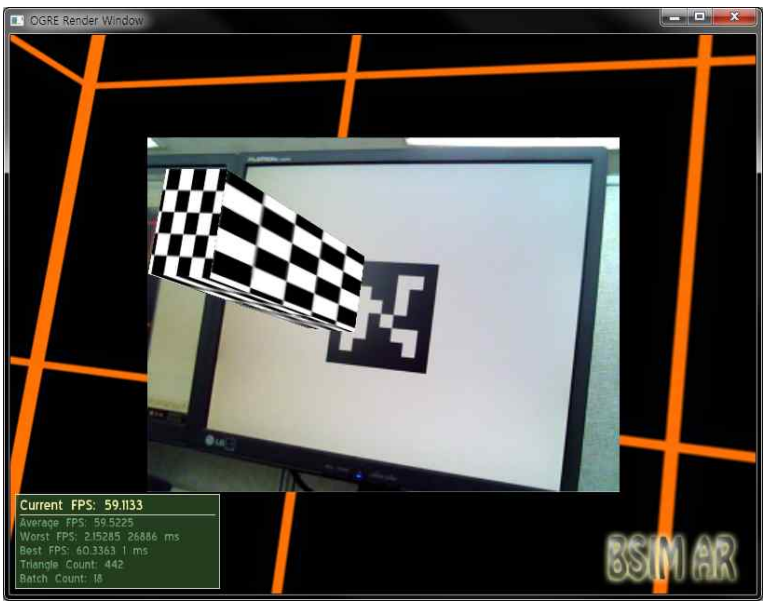
(1) AR기반 계측정보 가시화 시스템 인터페이스 개발

선행 연구의 평면 상태의 계측정보 연결을 3차원적으로 확장하여 개발하였다. 아래 그림은 그 개념을 나타내었다.



[가상모델에서의 계측정보 연결 개념]

아래 그림은 가시화프레임워크에서 증강 병합을 테스트한 것이다(병합 기기는 다음 절 참조).



[가시화프레임워크에서의 병합 테스트]

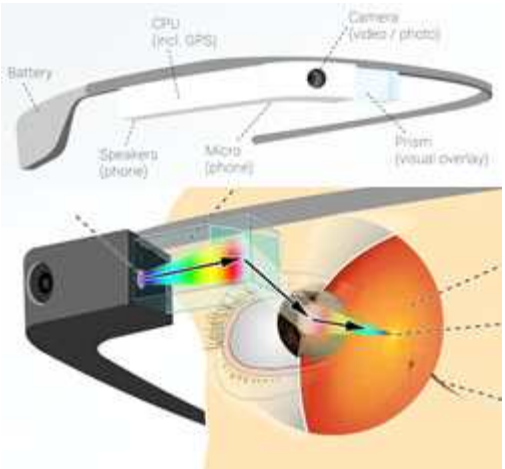
(2) AR기반 통합 시스템 개발

증강현실 가시화 효과 개선 방안으로 Front Display기반의 디스플레이보다 현재 대두되고 있는 Wearable Display기반의 가시화에 대한 요구가 증대되고 있어, 최신의 Wearable Display를 조사하고 연구에 적용할 디바이스를 선정하였다.

(가) Wearable Display 선정

① **Google Glass(미국)**

최근 가장 각광받고 있는 미국의 Google Glass는 Smart Glass 타입이며, 사용자 시야에 별도 디스플레이로 정보를 출력하는 방식이다. 그러나 실대상 건축물의 증강 수행을 위해서는 사용자 시야에 직접 가상모델을 정합하여야 하므로 본 과제 수행에는 부적합하다고 판단된다.



[Google Glass(미국)]

② **GlassUp(이탈리아)**

이탈리아의 GlassUp이라는 Wearable Display는 Smart Glass 타입이며, 실제로는 Wearable Device가 아니라 Smart Device와 연결할 수 있는 인터페이스를 제공한다. Google Glass와는 다르게 가시 렌즈에 직접 정보를 출력하는 방식으로 본 과제의 성격과 유사하나 현재 미출시로 적용이 불가능하다.

[GlassUp(이탈리아)]

③ Wrap 1200DXAR(이스라엘, VUZIX)

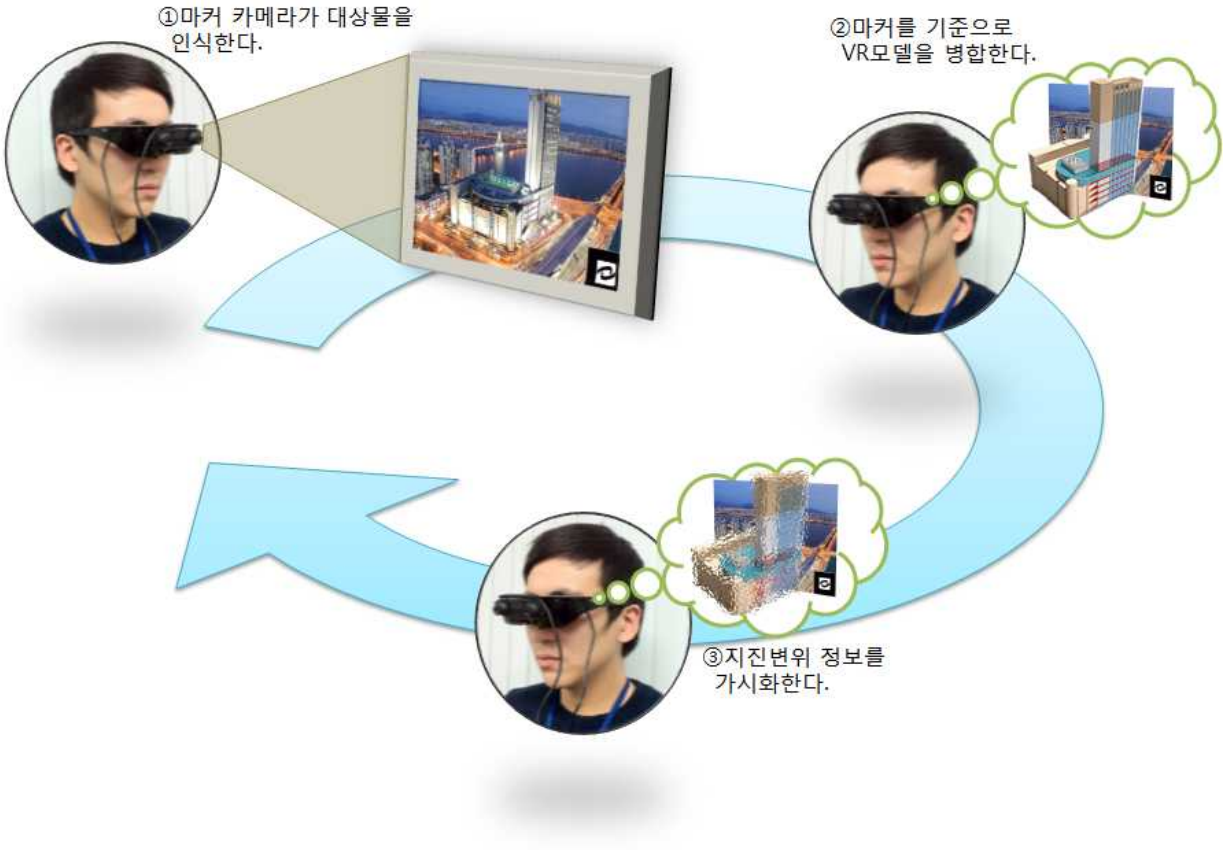
이탈리아 Vuzix사의 Wrap 1200DXAR 디스플레이는 자사의 Wrap 1200DX VR디스플레이를 AR전용으로 확장한 모델이다. Glass타입의 VR디스플레이이며, AR증강용 스테레오 카메라 전방 탑재하였다. AR시스템 환경이 간소화되고 휴대가 용이한 증강환경이 제공 가능하다.

결론적으로 Vuzix사의 Wrap 1200DXAR 디바이스를 선정함으로써, 기존 PC 모니터와 스탠드형 마커 카메라의 불편한 점을 대폭 개선한 병합 과정이 가능해지게 되었다.

[Wrap 1200DXAR(이스라엘, Vuzix)]

[개발자가 Warp 1200DXAR을 착용한 모습]

선행연구에서 사용하였던, Front Display + Stand Marker Camera 조합시스템을 Wearable Display(Marker Camera 일체형)으로 개선하였다. 아래 그림은 간소화된 AR병합 시나리오를 나타내었다.

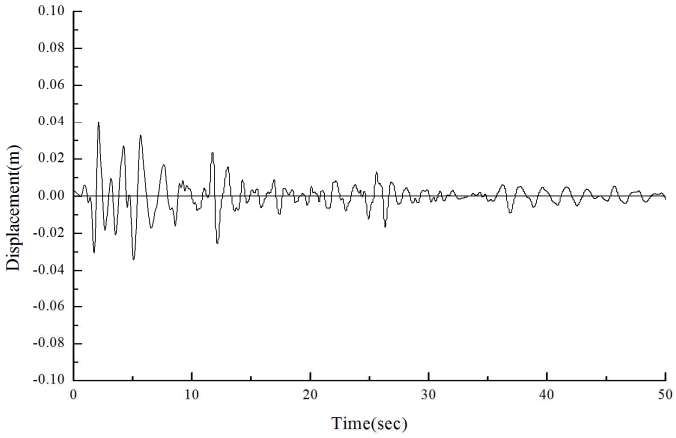


[개선된 AR 정합 과정 시나리오]

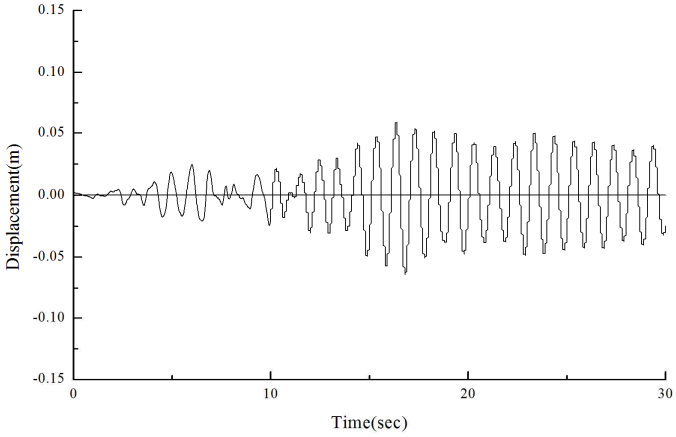
사. MEMS 지진계 센서 시스템 병합 및 테스트

(1) 통합 시스템의 현장 시스템 연계 및 가시화 테스트

주관기관으로부터 제공 받은 변위 추정 데이터를 가시화프레임워크에 연계하였다. 그 데이터 형태는 아래 그림과 같다.



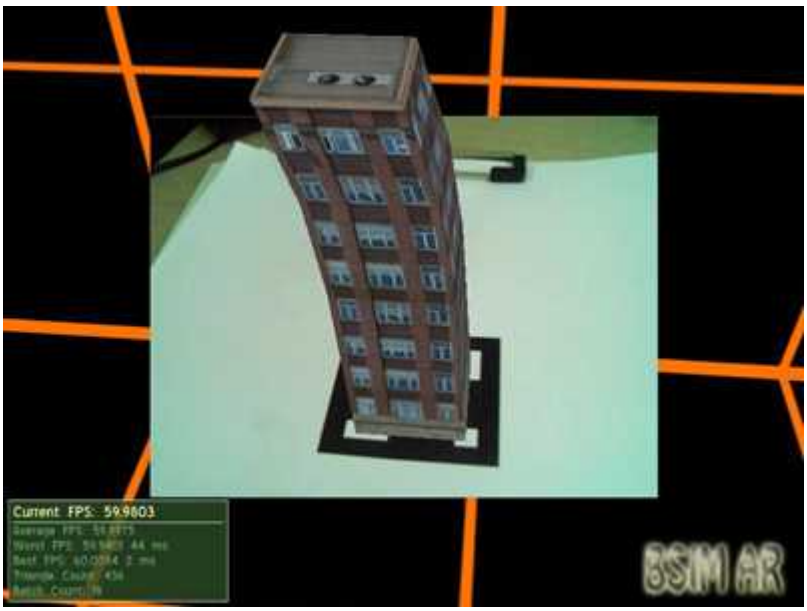
[대역 통과 필터를 적용한 가속도 데이터의 수치적분 변위 데이터(El Centro 지진하중 (1940, NS))]



[대역 통과 필터 적용 후 수치적분을 이용한 변위 데이터(예제 5층 건물)]

계측 데이터를 연결한 이미지는 아래 그림과 같으며, 성공적으로 구조물의 변위 데이터를 증강현실로 구현하였다.

[대상 예제 건축물 증강 이미지]



[대상 예제 건축물 변위데이터 연결 이미지(500배)]

6. 연구수행 결과 및 결과의 검증 방법

본 연구 과제를 통해 개발된 지진계 모듈은 외산 제품에 비해 대등한 성능에 월등히 낮은 제조 단가와 소형화를 달성하였다.

[외산 제품과의 사양 및 가격 비교]

제품명/제조사	사진	사양	단가(천원)
MEMS 기반 3축 Prototype		• Type : 3축 MEMS • Range : ±2g • 외형 : 65mm×60mm×56mm • 무게 : 0.5kg	2,000
AC-23/ GeoSIG		• Type : 3축 Force Balanced • Range : ±2g • 외형 : 195mm×112mm×96mm • 무게 : 3kg	6,000
ES-T/ EpiSensor		• Type : 3축 Force Balanced • Range : ±2g • 외형 : 127mm(Φ)×76mm • 무게 : 1.8kg	6,500
CMG-5T/ Guralp		• Type : 3축 Force Balanced • Range : ±2g • 외형 : 176mm(Φ)×83mm • 무게 : 2.7kg	7,000
AK-AS3257A/ Tokyo-Sokushin		• Type : 3축 • Range : ±2g • 외형 : 150(Φ)mm×68mm • 무게 : 3.5kg	7,000
JEP-8A3/ AKGC		• Type : 3축 • Range : ±2g • 외형 : 101mm×124mm×25mm • 무게 : 1kg	2,000
393C/ seismic ICP		• Type : 3축 • Range : ±2g • 외형 : 56(Φ)mm×56mm • 무게 : 1kg	5,000
da-pa/ 새빛기술		• Type : 3축 • Range : ±2g • 외형 : 48(Φ)mm×50mm • 무게 : 1.5kg	4,000

기존 시장에 출시된 제품과 본 기술개발 결과인 MEMS 기반 지진계의 성능 및 가격을 비교하였다. 개발 시제품은 비선형성 및 성분간 감도 오차 등에서 국제적인 수준과 비교하여 대등한 성능을 보인다. 판매가격은 외산 상용 제품에 비해 400~500만원 가량 저렴하게 책정하였다.

[상용 제품과 개발 시제품의 성능 및 가격 비교]

구분	GeoSig (AC-23)	Guralp (CMG-5T)	ICPDAS (GST-63-M)	EpiSensor (ES-T)	개발 시제품
사진					
동적범위 (감도)	125 dB	127 dB	63 dB	155 dB	113 dB
사용온도 범위	- 20 to 70 °C	- 20 to +70 °C	- 40 ~ +60℃	-20° to +70°C	-
전압	12 V	10 - 36 V	12 V	12 V	12 V
외형치수	195×112×96 mm	176(Φ)×83 mm	101×124×25 mm	48(Φ)×50 mm	65×60×56 mm
무게	2.5 kg	2.7 kg	1kg	2.5kg	0.5kg
Linearity	0.1% (지진계 성능 만족)	0.1% (지진계 성능 만족)	비공개 (지진계 성능 미달)	1% 이내 (지진계 성능 만족)	1% 이내 (지진계 성능 만족)
성분간 감도오차	1% (지진계 성능 만족)	0.1% (지진계 성능 만족)	비공개 (지진계 성능 미달)	1% 이내 (지진계 성능 만족)	1% 이내 (지진계 성능 만족)
대역폭	0.1 Hz ~ 100 Hz	DC - 100 Hz	DC - 400 Hz	DC - 200 Hz	DC - 100 Hz
가격	₩6,000,000	₩7,000,000	₩2,000,000	₩6,500,000	₩2,000,000

MEMS 기반 지진가속도계의 원가계산 결과는 아래 표와 같다.

[MEMS 가속도 센서 원가계산]

항목	표준 단가		비고
	달러($)	원(₩)	
MEMS front end cost	12,000		
ROIC front end cost	2,000		
MEMS ROIC Assembly cost	2,000		
total front end cost	16,000	17,600,000	
Foundry profit	10,667		
total front end price	26,667	29,333,333	
wafer test	2,000		
wafer dicing	200		
wafer cost	28,867	31,753,333	
number of die	1,600		
die yield	10%		
number of good die	160		
Die cost	180	198,458	(wafer cost) / (number of good die)
packaging cost	25	27,500	
sensor final test & calibration	25	27,500	
total sensor cost	461	506,917	
wire harness	5	5,500	
power module	10	11,000	
housing	10	11,000	
assembly & calibration	10	11,000	
total sensor module cost	496	545,417	

MEMS 센서 공정에서는 wafer에서 다수의 센서 모듈을 생산해 낼 수 있는데, 1개의 wsfer 당 1600개의 die를 만들고, 여기에서 수율을 10%로 가정하여 160개의 die를 생산하는 것으로 계산하였다. 여기에서 die는 MEMS 센서의 핵심 부품을 의미한다. 1개의 MEMS 센서 모듈을 제작하는데 약 545,417원의 단가를 산출하였고, 실제 판매 시에는 인건비와 제경비 등을 고려하여 약 2,000,000원으로 판매가를 산정하였다. 이 판매가는 상용 지진계와 비교할 때 400~500만원 가량 저렴한 가격이다.

3축 지진계에 대한 공인 기관의 시험 성적서를 발급받고자 했으나 적합한 평가기관을 찾지 못하였고, 자체적으로 장비와 환경을 구축하여 시험평가를 진행하였다.

[지진계 평가 장치]

아래는 보고서 본문에 기술한 자체 성능 시험 결과를 요약한 것이다. 이 중 동적 범위 성능이 부족한 것은 측정 환경 요인에 의해 건물 진동이나 소음 등이 배경 잡음에 영향을 주는 것으로 판단된다. 이 부분은 잡음 저감 알고리즘의 정밀 계수 추정을 통해 일부 개선의 여지가 남아 있다.

세세부과제(공동과제)명 (연구목표, 분야)		성과목표		성과지표		성과검증 기준			
						목표수준		측정방법	목표대비 달성률
						목표치	달성치		
1	MEMS 기반 3축 지진가속도계 센서 모듈 개발	1-1	MEMS 기반 지진가속도 센서 시스템 개발	①	최대 측정 범위	±2000 gal이상	±2000 gal이상	비선형성 5% 미만 기준	100%
				②	동적범위	120 dB	113 dB	비선형성 5% 미만 기준	94%
				③	대역폭	0.1 ~ 50 Hz	0.1 ~ 100 Hz	vibrator 장착 시험	100%
2	AR기반 계측정보의 통합 가시화 기술 개발	2-1	AR기반 계측정보 통합 시스템	①	알람반응 속도 (계측정보 병합)	3초이내	3초 이내	가상 시나리오 Test	100%
3	MEMS 기반 3축 지진가속도계 센서 시스템 개발	3-1	Test Bed 구축	①	구축건수	1건	2건	구축현황 보고	100%

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

제1절 최종 연구성과

1. 연구개발 핵심성과 리스트

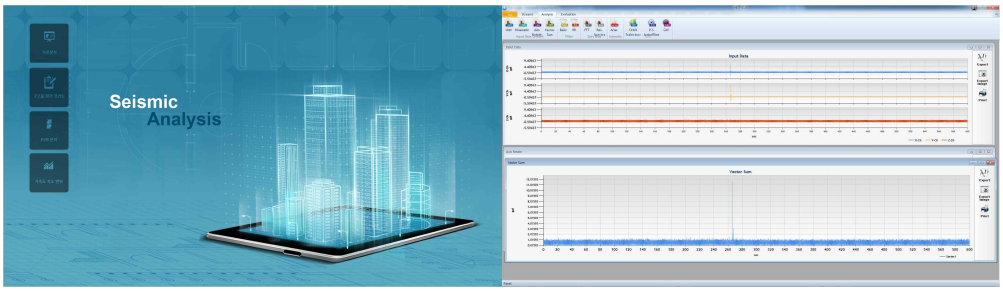
연번	핵심성과명	핵심성과 설명	성과유형	성과달성 기관	해당연차
1	지진 모니터링 분석 알고리즘 개발	건축물에서 관측된 지진가속도 자료의 분석 및 가공이 가능한 알고리즘의 개발	소프트웨어	(주)이제이텍	2012.04~2014.01 (22개월)
2	지진·진동 관리 모니터링 시스템	지진가속도 데이터의 상시 감시 및 분석을 위한 모니터링 시스템의 개발	시스템	(주)이제이텍	2014.02~2015.01 (12개월)
3	Test Bed 구축	개발한 요소기술에 대한 최종 Test Bed 구축	기타	(주)이제이텍	2014.09~2015.01 (4개월)
4	증강현실 (Augmented Reality, AR) 기반 계측정보의 통합 가시화 기술 개발	실제 계측정보를 AR기술을 이용하여 정보를 병합한 가시화 통합 소프트웨어의 개발	소프트웨어	(주)부품디비	2012.04~2015.02 (34개월)
5	MEMS 기반 소형 지진가속도 센서 모듈	MEMS 기반 가속도 센서를 이용한 저가/소형 지진 감지 모듈	장비·장치	한국기술교육대학교	2013.02~2014.12 (23개월)
6	지진계측 잡음저감 필터알고리즘	지진 계측 시스템의 출력잡음을 분석하여 잡음을 저감할 수 있는 디지털 필터 알고리즘	소프트웨어	한국기술교육대학교	2014.05~2014.10 (6개월)
7	MEMS 지진 가속도센서 readout ASIC	MEMS 가속도센서 구조의 커패시턴스 변화로부터 저잡음비 전기 신호로 변환하기 위한 ASIC	장비·장치	한국기술교육대학교	2014.04~2015.01 (10개월)

2. 핵심성과별 세부 설명

가. 지진 모니터링 알고리즘 개발

관련 그림 / 사진	
정 의	건축물에서 관측된 지진가속도 자료의 분석 및 가공이 가능한 알고리즘의 개발
설정사유	지진 가속도 데이터의 분석 기능 및 지진 감시 기능 탑재
목 적	건축물에서 관측된 지진 가속도 자료를 분석하고 가공하여 건축물 관리자들이 편리하게 이용하도록 정보를 제공하는데 그 목적이 있음
핵심 성과 설명	건축물에서 관측된 지진가속도 자료의 분석 및 가공이 가능한 알고리즘의 개발
성능목표	(개발기술 수준) 지진 가속도 데이터의 상시 감시 지진 가속도 데이터의 분석(데이터 표출, 신호처리, 통계처리)
성과달성 책임자 (소속기관)	문 대 중((주)이제이텍)
소요기간	’12.04 ~’14.01 (22개월)

나. 지진·진동 관리 모니터링 시스템(시스템)

관련 그림 / 사진	
정 의	지진 가속도 데이터의 신호처리, 통계처리, 응답스펙트럼 분석 등이 가능한 지진 모니터링 시스템의 개발
설정사유	지진 가속도 데이터의 분석 기능 및 지진 감시 기능의 확장
목 적	건축물에서 관측된 지진 가속도 자료를 분석하고 가공하여 건축물 관리자들이 편리하게 이용하도록 정보를 제공하는데 그 목적이 있음
핵심 성과 설명	지진가속도 데이터의 상시 감시 및 분석을 위한 모니터링 시스템의 개발
성능목표	(개발기술 수준) 지진 가속도의 상시 감시 및 표출 시계열 파형 및 스펙트럼 분석 데이터 필터링 가속도 데이터 미적분 가속도 벡터합 표출 누적절대속도(CAV) 표출 시간이력 감쇠 파워 스펙트럼 응답 스펙트럼 지진 강도 추출 분석 자료 다중 표출 구조물 건전도 평가
성과달성 책임자 (소속기관)	문 대 중((주)이제이텍)
소요기간	’14.02 ~’15.01 (12개월)

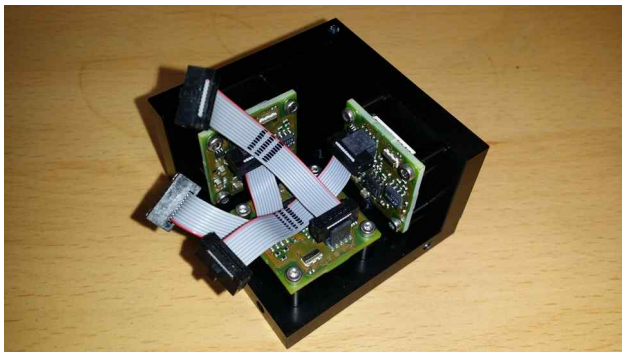
다. Test Bed 구축(기타)

관련 그림 / 사진	
정 의	개발한 요소기술에 대한 최종 Test Bed 구축
설정사유	3축 지진계의 성능 확인 및 실제 현장 적용 가능성 확인
목 적	MEMS 기반 지진계와 지진·진동 관리 모니터링 시스템의 성능 확인
핵심 성과 설명	MEMS 기반 지진계와 지진·진동 관리 모니터링 시스템의 현장 적용 2건을 18층 철근콘크리트조 건물 및 3층 철근콘크리트조 건물을 대상으로 수행함
성과달성 책임자 (소속기관)	문 대 중((주)이제이텍)
소요기간	’14.09 ~’15.01 (4개월)

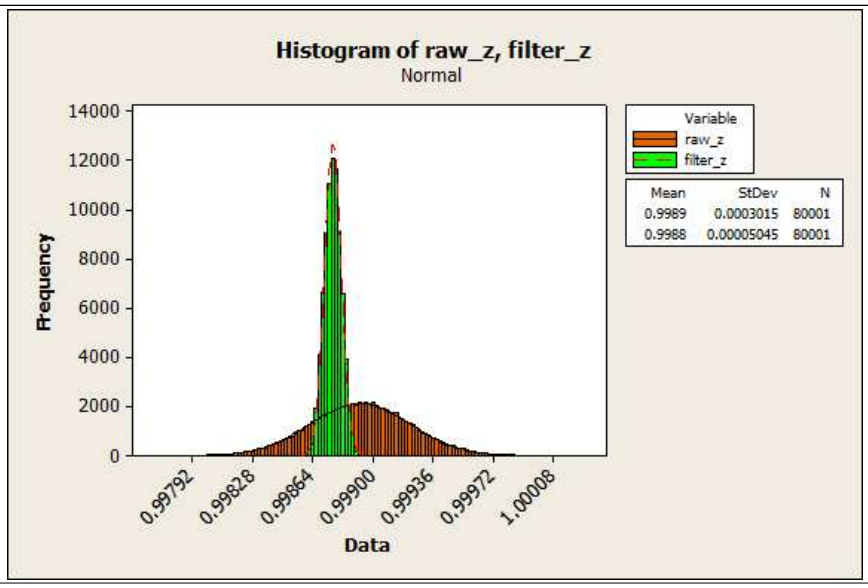
라. 증강현실(Augmented Reality, AR)기반 계측정보의 통합 가시화 SW(소프트웨어)

<table>
<tr><td>관련 그림 / 사진</td><td> </td></tr>
<tr><td>정 의</td><td>AR기반 계측정보 통합 가시화 SW는 실제 가속도계로부터 측정된 계측정보를 AR기술을 이용하여 계측정보를 AR환경에 병합한 가시화 통합 소프트웨어임</td></tr>
<tr><td>설정사유</td><td>계측정보를 VR환경에서 구축하고, AR환경에서 가상모델을 병합한 사례는 있으나, AR환경에서 계측정보를 병합한 연구는 그 사례가 미미함</td></tr>
<tr><td>목 적</td><td>건축 형상정보 AR정합 모듈 개발을 통해, 3D Morphing 기술을 적용한 데이터 가시화 방식으로 기술적 향상을 도모하고, 실제 지진계 정보 취득을 통해 대형건축물 안정성 운용을 위한 데이터 현실성을 확보하며, 최신 모션 디바이스 기술을 적용해 사용자 편의성을 증대시키려고 함</td></tr>
<tr><td>핵심 성과 설명</td><td>실제 계측정보를 AR기술을 이용하여 정보를 병합한 가시화 통합 소프트웨어의 개발</td></tr>
<tr><td>성능목표</td><td>
<table>
<tr><th>항목</th><th>기존 기술</th><th>제안 기술</th><th>설정 근거</th></tr>
<tr><td>병합 가시화 속도</td><td>•10frame/sec</td><td>•실시간 가시화 FPS (15frame/sec)</td><td>•2차년 병합성능 개선</td></tr>
<tr><td>데이터 가시화 방식</td><td>•2D 그래프</td><td>•3D Morphing 적용 Point수(6점 이상)</td><td>•테스트베드 설정 기준</td></tr>
<tr><td>가시화 데이터 종류</td><td>•단순 위치 정보 전송</td><td>•최적 변위 정보 추정 (정보 추정 여부)</td><td>•NTIS 기술정보 검색 기준</td></tr>
<tr><td>데이터 현실성</td><td>•단순 정보 전달</td><td>•실제 지진계 정보 취득 (5,000,000개 이상)</td><td>•테스트베드 설정 기준</td></tr>
<tr><td>사용자 편의성</td><td>•키보드/마우스 입력</td><td>•모션 패턴 인식 수 (4종 이상)</td><td>•2013 Leap Motion 적용 기준</td></tr>
<tr><td>병합 디스플레이</td><td>•PC 모니터</td><td>•최신 AR 출력디바이스 (VR모델 병합 여부)</td><td>•2014 Wearable Display 적용 기준</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>성과달성 책임자 (소속기관)</td><td>정기철((주)부품디비)</td></tr>
<tr><td>소요기간</td><td>’12.04 ~’15.02 (34개월)</td></tr>
</table>

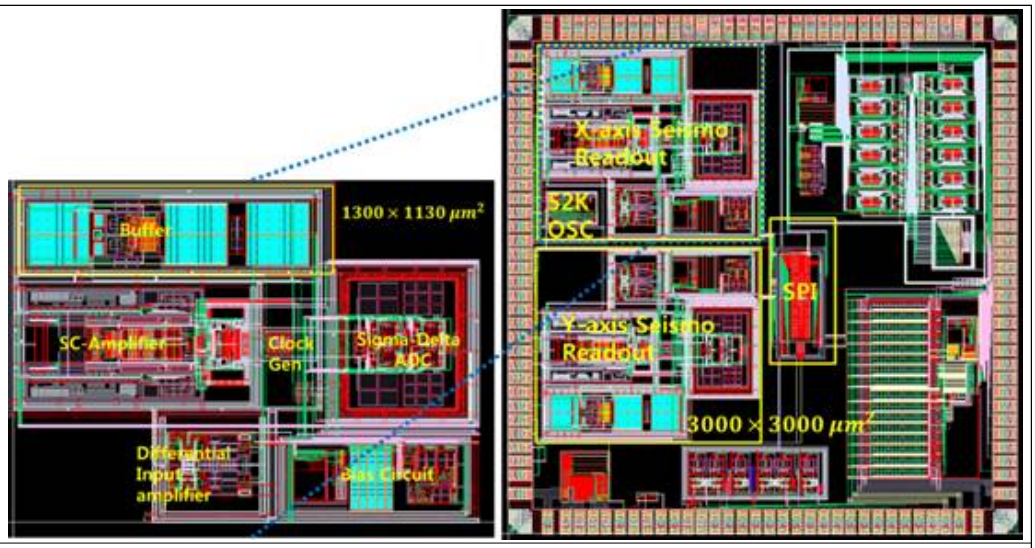
마. MEMS 기반 소형 지진가속도 센서 모듈

관련 그림 / 사진	
정 의	지진 가속도를 검출하기 위한 3축 MEMS 센서 모듈의 소형화
설정사유	지진가속도 측정을 위해 건물에 부착하는 센서 모듈의 크기를 최소화하는 것이 실제 운용 측면에서 중요함
목 적	- MEMS 센서를 이용함으로서 기존 방식에 비해 센서 모듈의 가격과 부피 저감 - 센서 모듈 소형화에 의해 건물 장착이 용이해짐
핵심 성과 설명	MEMS 센서 부품을 이용한 소형 지진 가속도 감지 센싱 모듈
성능목표	(기존기술 수준) 센서모듈 부피 $363\,cm^3 = 85 \times 75 \times 57\,mm^3$ (개발기술 수준) 센서모듈 부피 $94\,cm^3 = 52 \times 53 \times 34\,mm^3$ (개발기술 수준 설정근거) 지진계 센서 모듈의 소형화 관점에서 기존 제품 대비 25% 수준으로 설정
성과달성 책임자 (소속기관)	이병렬(한국기술교육대학교)
소요기간	'13.02 ~'14.12 (23개월)

바. 지진계측 잡음저감 알고리즘(소프트웨어)

관련 그림 / 사진	
정 의	지진계측 잡음을 저감하기 위한 디지털 필터 알고리즘
설정사유	지진계의 목표 사양중 동적 범위 120dB를 만족시키기 위해선 잡음을 최소화하는 것이 필요
목 적	MEMS 가속도 센서의 최대 단점인 배경 잡음을 저감하기 위해 잡음의 분석을 통해 이를 최소화 할 수 있는 디지털 필터링
핵심 성과 설명	지진 계측 시스템의 출력잡음을 분석하여 잡음을 저감할 수 있는 디지털 필터 알고리즘
성능목표	(기존기술 수준) 잡음등가 분해능 $100\mu G$ (개발기술 수준) 잡음등가 분해능 $4\mu G$ (개발기술 수준 설정근거) 지진계의 동적범위 사양이 120dB이므로 대역폭 내의 잡음을 재분포시켜서 신호대 잡음비를 높여야 함
성과달성 책임자 (소속기관)	이병렬(한국기술교육대학교)
소요기간	'14.05 ~'14.10 (6개월)

사. MEMS 지진가속도 센서 readout ASIC(장비· 장치)

관련 그림 / 사진	
정 의	MEMS 가속도 구조로부터 전기적 신호를 출력하는 readout ASIC
설정사유	MEMS 가속도 센서의 개발은 기계식 진동구조를 형성하는 MEMS chip과 이로부터 적절한 전기 신호를 출력하는 전용 readout ASIC chip이 필요하며 이 chip의 성능이 전체 센서의 성능에 밀접하게 연관됨
목 적	개발중인 MEMS 가속도 센서의 전용 readout 회로를 CMOS 공정으로 one chip으로 개발
핵심 성과 설명	MEMS 가속도센서 구조의 커패시턴스 변화로부터 고잡음비 전기 신호로 변환하기 위한 ASIC
성능목표	(기존기술 수준) Analog 출력형 ASIC (개발기술 수준) 24b SDM방식 ADC 내장형 ASIC (개발기술 수준 설정근거) MEMS 가속도 센서 인터페이스 ASIC에서 24b ADC를 하게 되면 별도의 지진계 모듈에 별도의 DAQ를 제거할 수 있음
성과달성 책임자 (소속기관)	이병렬(한국기술교육대학교)
소요기간	’14.4 ~’15.1 (10개월)

제2절 기술 적용 사례 및 실적

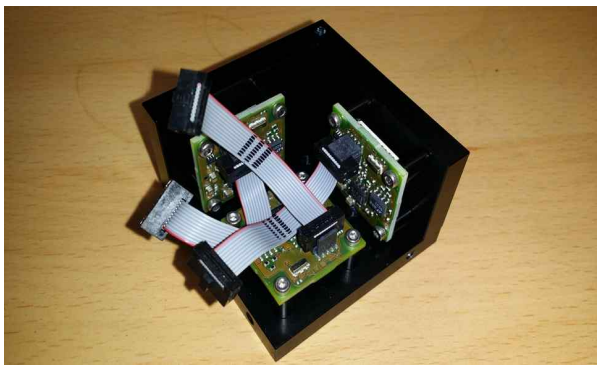
1. 개발 기술 현장 적용

가. 목적 및 범위

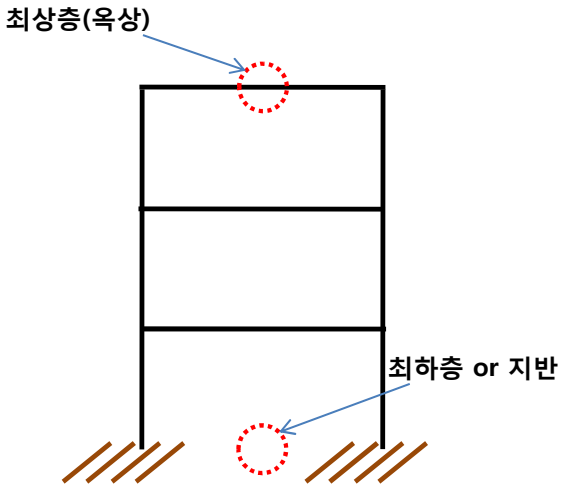
본 연구과제 개발 기술인 저전력 MEMS 기반 3축 지진가속도계의 성능 테스트 및 구조물의 지진감지를 위한 모니터링 프로그램의 성능 테스트를 목표로 한다. 건축구조물에 MEMS 기반 3축 지진가속도계를 설치하여 Data를 수집하고 구조물 건전도 분석을 수행하였다.

나. 지진가속도계 설치 위치 및 방법

부피 52×53×34mm^{3}인 지진가속도계를 최상층(옥상) 및 최하층(또는 지반)에 설치하고, 데이터 수집 장치 및 계측용 노트북을 설치한 후 약 1시간 동안 지진가속도 데이터를 수집한다.



[MEMS 기반 지진가속도계]



[지진가속도계 설치 위치]

다. 구조물 건전도 분석 절차

(1) 최상층과 최하층의 가속도 Data 수집
(2) FFT 분석을 통한 구조물의 고유진동수 계산
(3) 구조물의 1차모드 형상, 각 층의 높이를 이용하여 층간 변위를 예측
(4) 구조물의 최대 층간변위비 평가
(5) FFT 분석을 통한 지반의 고유진동수 계산
(6) 구조물의 지반의 고유진동수비 평가

구조물 각 층의 층간변위비의 허용 기준 만족 여부를 평가한다. 평가 기준으로 사용된 손상도 수준별 층간변위비 기준은 미국연방재난관리청(Federal Emergency Management Agency)의 FEMA 356과 국내 건축구조설계기준(KBC 2009)에서 제시하는 수치를 사용했으며, 아래 표와 같다.

[손상도 수준별 층간변위비 기준 (지진취약도함수, KBC 2009)]

구조시스템		손상도 수준에 따른 최대 층간변위비 (%)				
	4단계 손상도	Slight	Moderate	Extensive	Complete
	EFMA 356	기능수행 (OP)	즉시거주 (IO)	인명안전 (LS)	붕괴방지 (CP)
철골 모멘트 골조		0.44	0.7	2.5	5.0
철골 가새 골조		0.31	0.5	1.5	2.0
콘크리트 골조		0.50	1.0	2.0	4.0
콘크리트 전단벽		0.25	0.5	1.0	2.0
비보강 조적벽	FEMA 356	0.15	0.3	0.6	1.0
	시설안전공단	0.20	0.4	0.67	1.0
목재벽		0.40	1.0	2.0	3.0

자유장(지반)의 고유진동수가 건축물 또는 그 구성부재의 고유진동수 중 어느 것과 일치한다면 공진현상이 발생하여 진동이 크게 진폭되고. 그에 따른 피해도 증가할 수 있다. 본 현장 적용 실험에서는 건축물의 건전성평가를 위해 건축물과 지반의 고유진동수비를 평가하여 공진 위험성을 분석하였다. 지반의 고유진동수(f_g)와 건축물의 고유진동수(f_s)의 비는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{건축물과 지반의 고유진동수비} = \frac{f_s}{f_g} \times 100$$

건축물과 지반의 고유진동수비는 지진발생으로 인한 지반의 흔들림과 건축물의 진동이 일치하여 건축물의 응답이 크게 증폭되는 공진현상을 판단할 수 있는 간접지표가 되고 건축물과 지반의 고유진동수비가 100%가 되면 공진이 발생한다는 것을 의미한다. 그러나 공진 진동수비 부근의 응답도 매우 크게 증폭되기 때문에 공진이 되는 100%만을 안전관리 기준으로 삼기에는 무리가 있으므로 일반적인 건축물과 고유진동수비의 공진가능범위를 100%±10% 이내로 보고 안전한 범위를 100%±10% 이외로 설정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

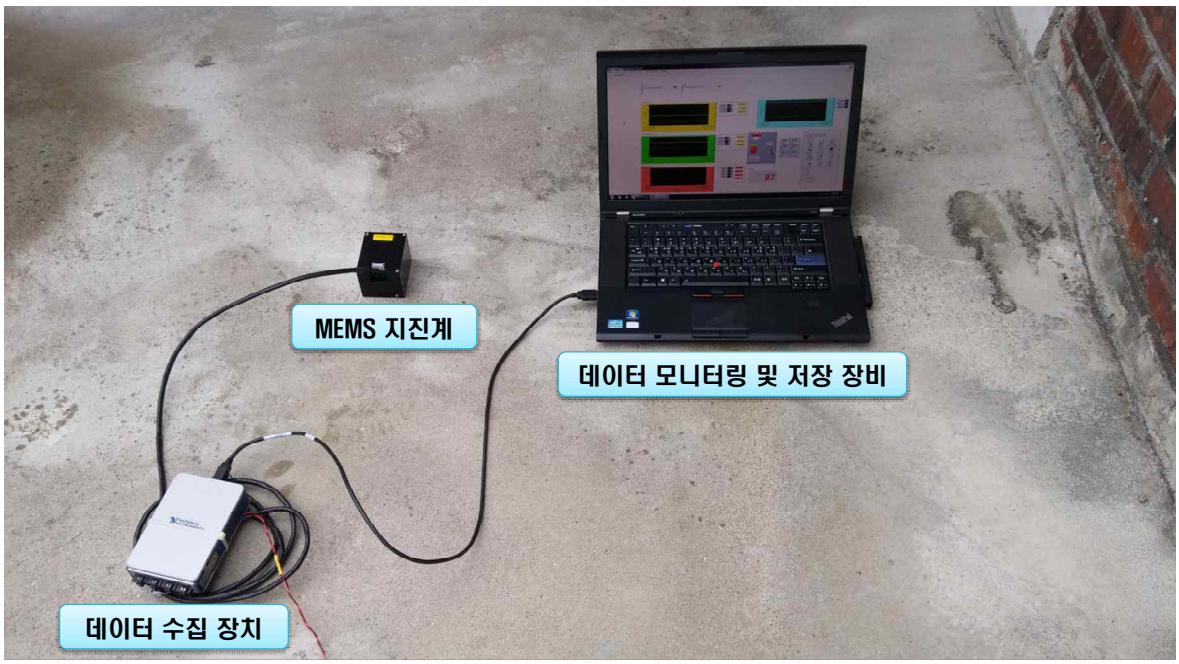
라. Test Bed 구축

(1) 3층 철근콘크리트조 건물

(가) 개요

구조물 사진					
주소	경기도 성남시 분당구 분당동 105-2				
구조형식	철근콘크리트조	**건물층수**	3	**용도**	주거용

(나) 실험 세팅



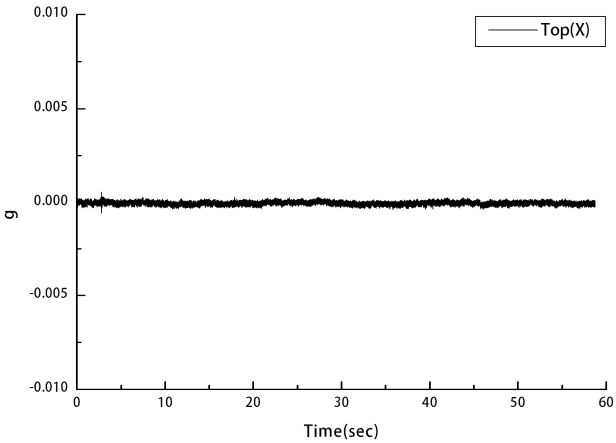
[최상층 가속도 데이터 수집을 위한 실험 세팅]

[MEMS 지진계 설치(최상층)]

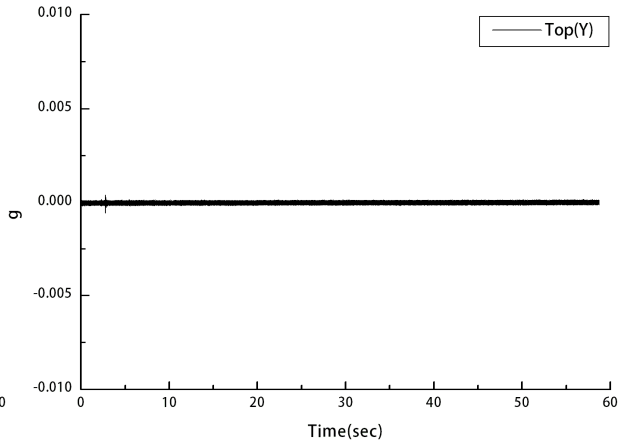
[MEMS 지진계 설치(최하층)]

(다) 실험 결과

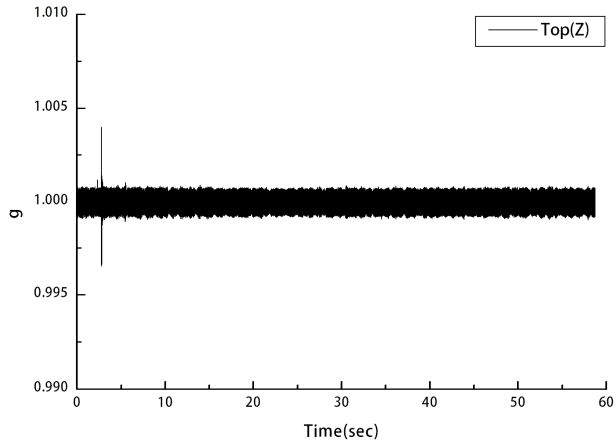
최상층 및 최하층의 가속도 데이터를 수집하기 위하여 최상층(건물 옥상부)과 최하층(지하 1층 레벨)에 개발 시제품인 MEMS 지진계, 데이터 수집 장치 및 노트북을 위 그림과 같이 설치하였다. 계측 데이터의 품질을 높이기 위해 1초당 3000개의 데이터를 수집하였으며, 아래 그림은 계측된 데이터 스트림의 일부이다.



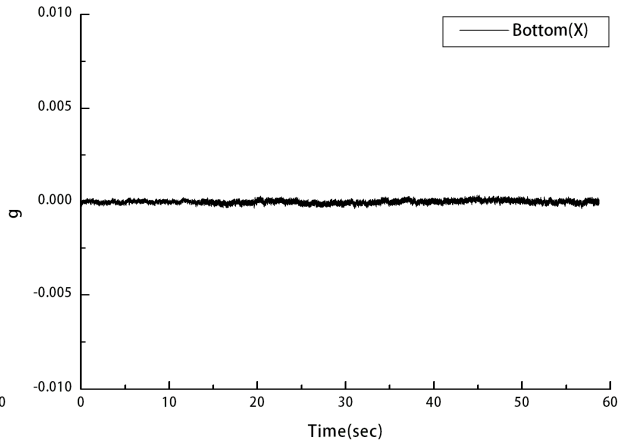
[최상층 X방향 가속도 데이터]



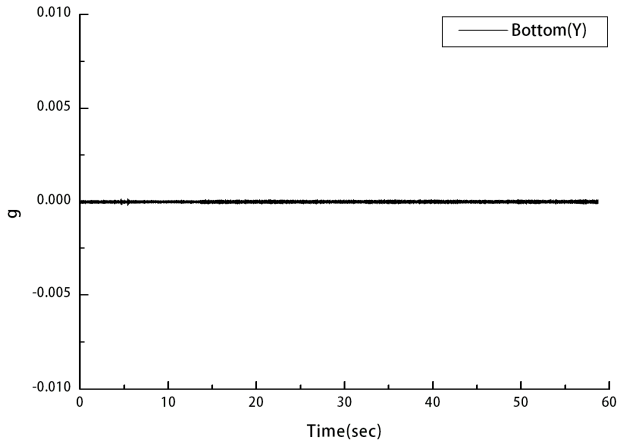
[최상층 Y방향 가속도 데이터]



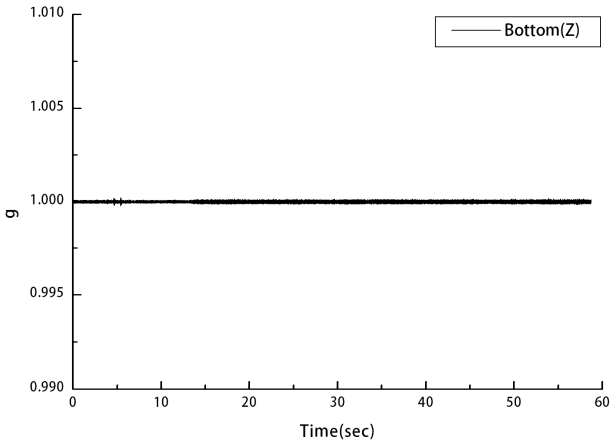
[최상층 연직방향 가속도 데이터]



[최하층 X방향 가속도 데이터]



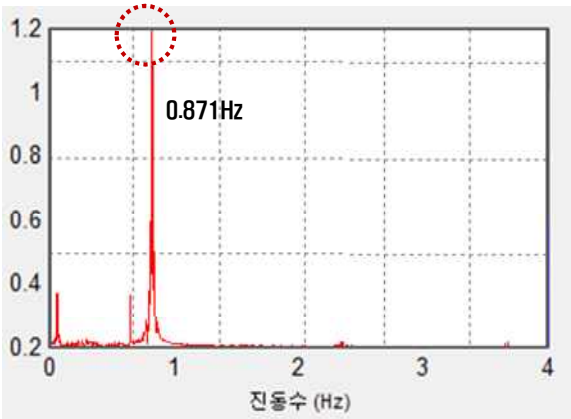
[최하층 Y방향 가속도 데이터]



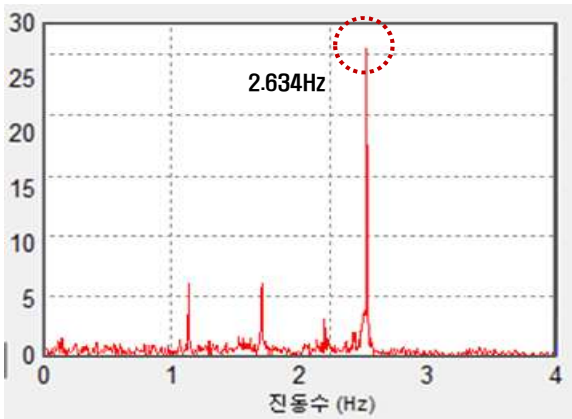
[최하층 연직방향 가속도 데이터]

최상층과 최하층 모두 X, Y방향 가속도 데이터는 0g를 나타내며, 연직방향 가속도는 중력의 영향을 받는 이유로 1g를 나타냄을 확인할 수 있다.

위 가속도 데이터를 활용하여 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 수행하였고, 이를 통해 구조물의 고유진동수 및 지반(최하층)의 고유진동수를 추출하였으며, 노이즈의 간섭을 최소화하기 위해 대역통과필터를 사용하였다. 그 결과 구조물의 고유진동수는 0.871Hz, 지반의 고유진동수는 2.634Hz임을 확인하였다.

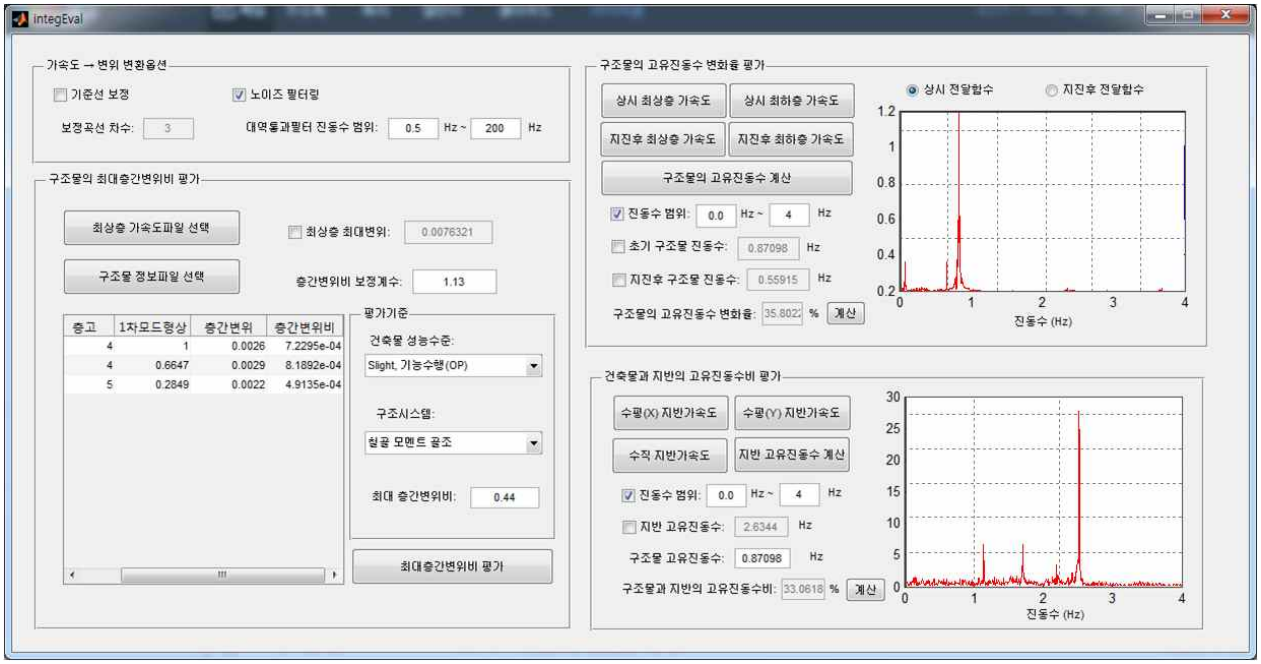


[구조물 고유진동수 추출]



[지반 고유진동수 추출]

자체 개발한 프로그램을 활용하여 구조물의 최대 층간변위비, 및 구조물과 지반의 고유진동수비를 계산하였다.



[구조물 건전도 평가 결과 화면]

[건축물 건전도 평가 지표]

평가지표	분석값	안전기준	평가결과
최대 층간변위비(%)	0.08%	0.44% 미만	OK
구조물과 지반의 고유진동수비(%)	33.06%	100%±10% 이외	OK

(라) 종합 의견

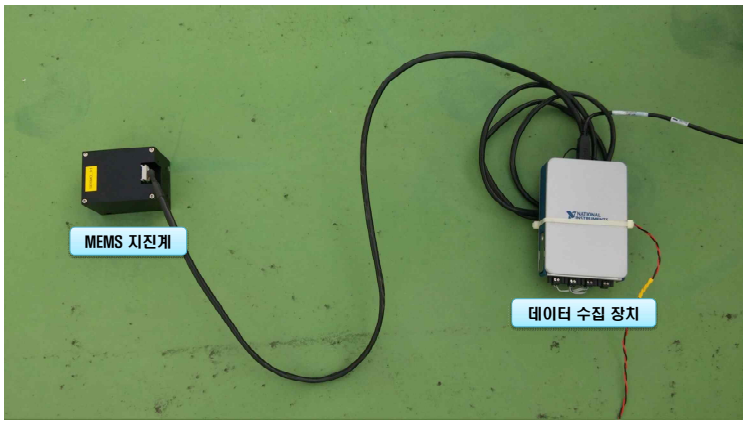
최대 층간변위비가 건축구조설계기준(KBC 2009)에서 제시하는 기능수행(Operation Performance) 등급인 0.44% 미만이고, 구조물/지반 고유진동수비가 100%±10% 범위를 벗어나 공진현상의 위험이 매우 낮으므로 해당 구조물은 구조물 건전도 수준이 매우 높은 것으로 판단된다.

(2) 18층 철근콘크리트조 아파트

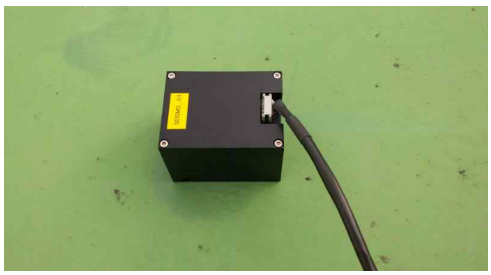
(가) 개요

구조물 사진					
주소	경기도 성남시 분당구 구미동 무지개마을 LG아파트 214동				
구조형식	철근콘크리트조	건물층수	18	용도	주거용

(나) 실험 세팅



[최상층 가속도 데이터 수집을 위한 실험 세팅]



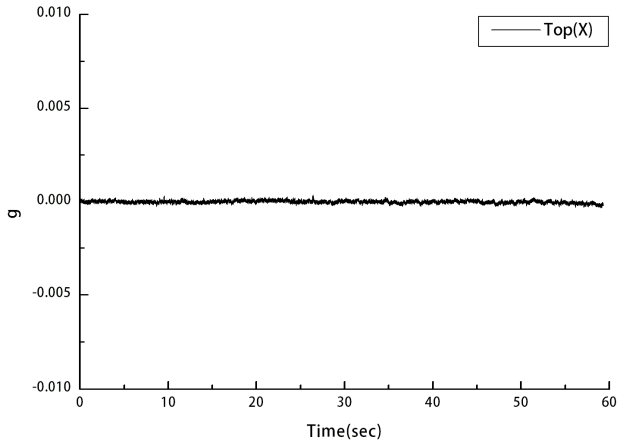
[MEMS 지진계 설치(최상층)]

[MEMS 지진계 설치(최하층)]

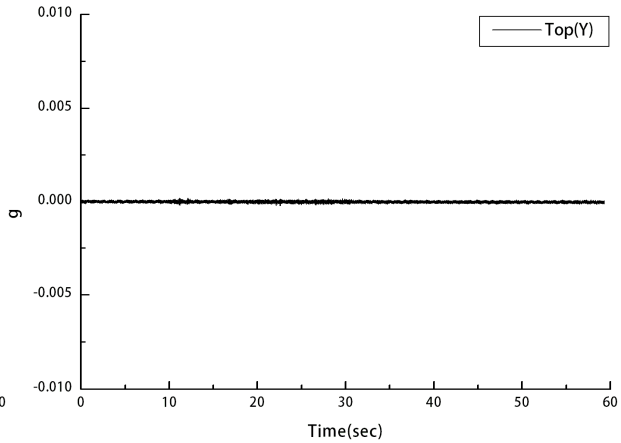
최상층 및 최하층의 가속도 데이터를 수집하기 위하여 최상층(건물 옥상부)과 최하층(지하 1층 레벨의 아파트 방공호)에 개발 시제품인 MEMS 지진계, 데이터 수집 장치 및 노트북을 위 그림과 같이 설치하였다.

(다) 실험 결과

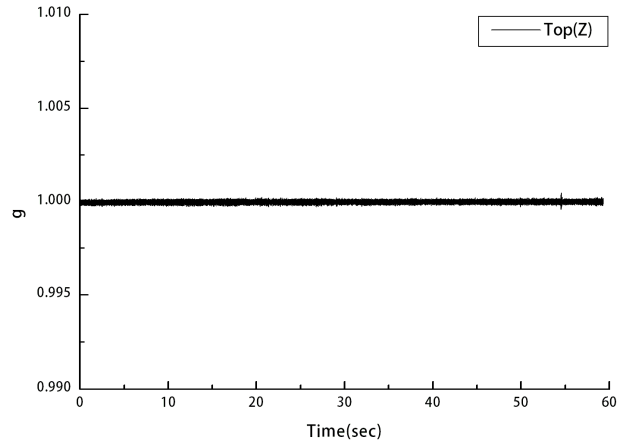
계측 데이터의 품질을 높이기 위해 1초당 3000개의 데이터를 수집하였으며, 아래 그림은 계측된 데이터 스트림의 일부를 보여준다.



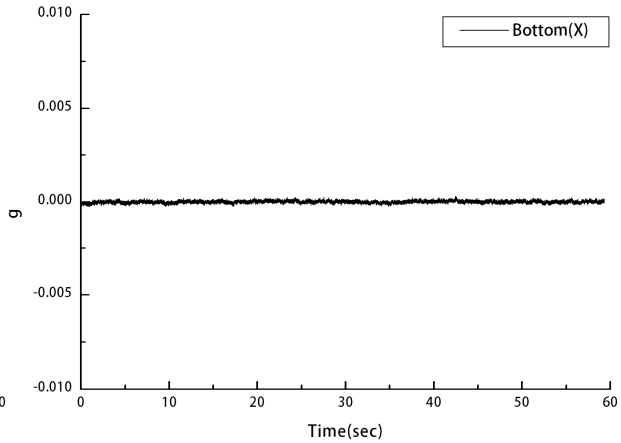
[최상층 X방향 가속도 데이터]



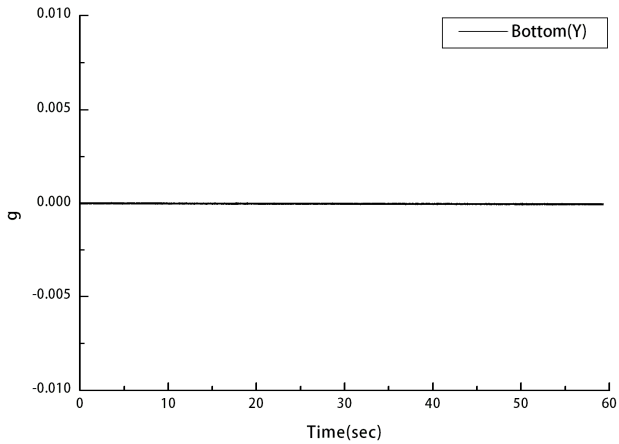
[최상층 Y방향 가속도 데이터]



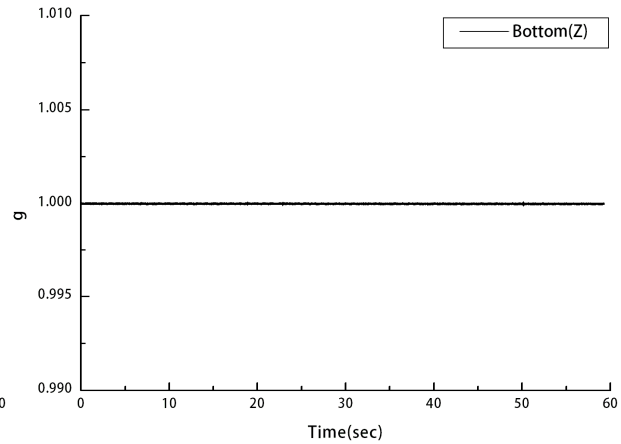
[최상층 연직방향 가속도 데이터]



[최하층 X방향 가속도 데이터]



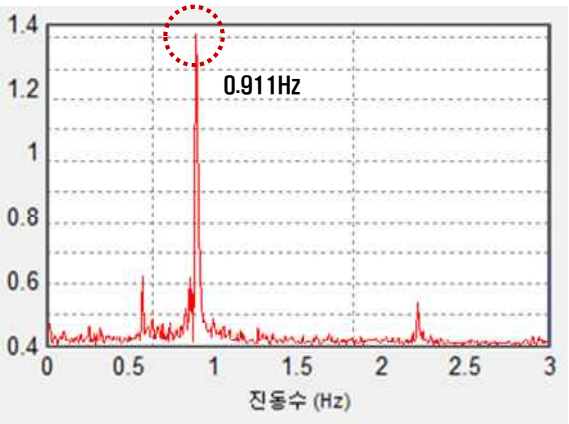
[최하층 Y방향 가속도 데이터]



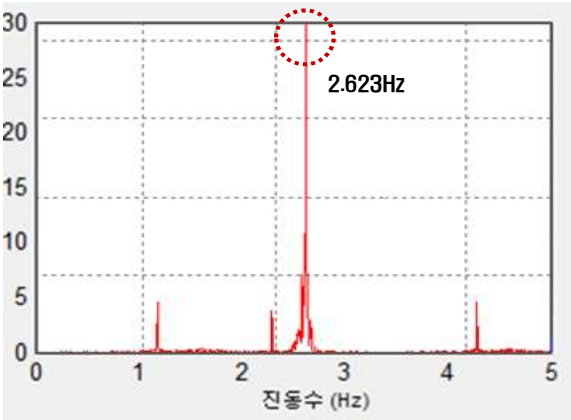
[최하층 연직방향 가속도 데이터]

최상층과 최하층 모두 X, Y방향 가속도 데이터는 0g를 나타내며, 연직방향 가속도는 중력의 영향을 받는 이유로 1g를 나타냄을 확인할 수 있다.

위 가속도 데이터를 활용하여 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 수행하였으며, 이를 통해 구조물의 고유진동수 및 지반(최하층)의 고유진동수를 추출하였으며, 노이즈의 간섭을 최소화하기 위해 대역통과필터를 사용하였다. 그 결과 구조물의 고유진동수는 0.911Hz, 지반의 고유진동수는 2.623Hz임을 확인하였다.

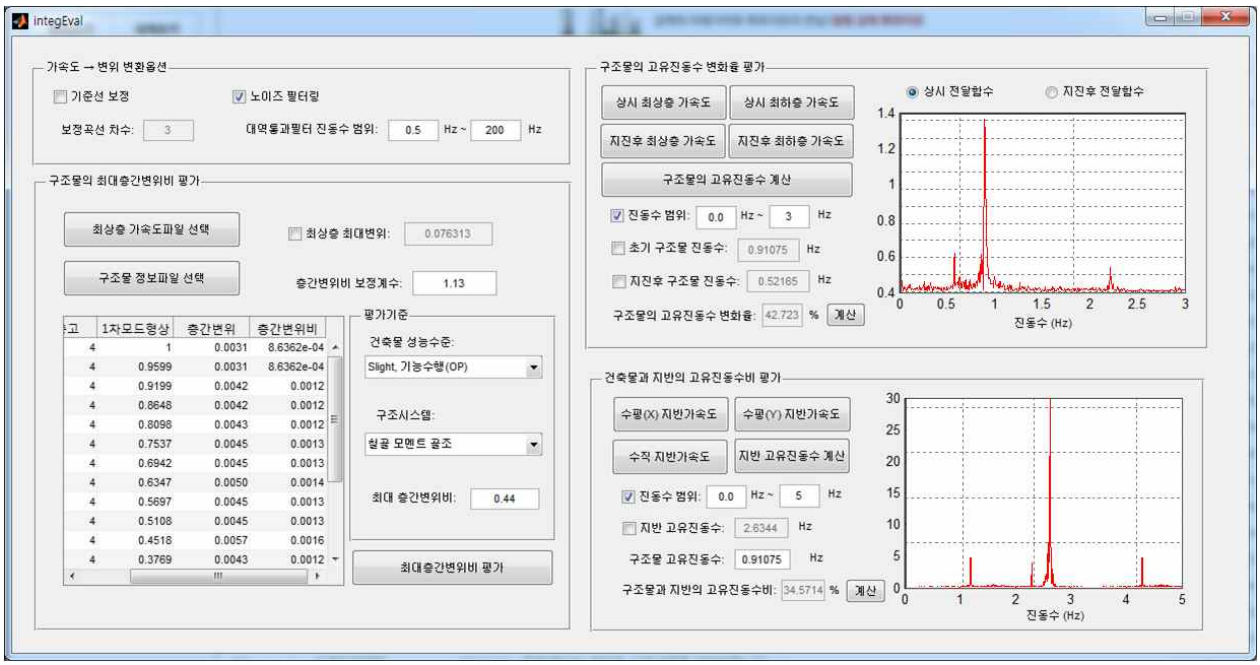


[구조물 고유진동수 추출]



[지반 고유진동수 추출]

자체 개발한 프로그램을 활용하여 구조물의 최대 층간변위비, 및 구조물과 지반의 고유진동수비를 계산하였다.



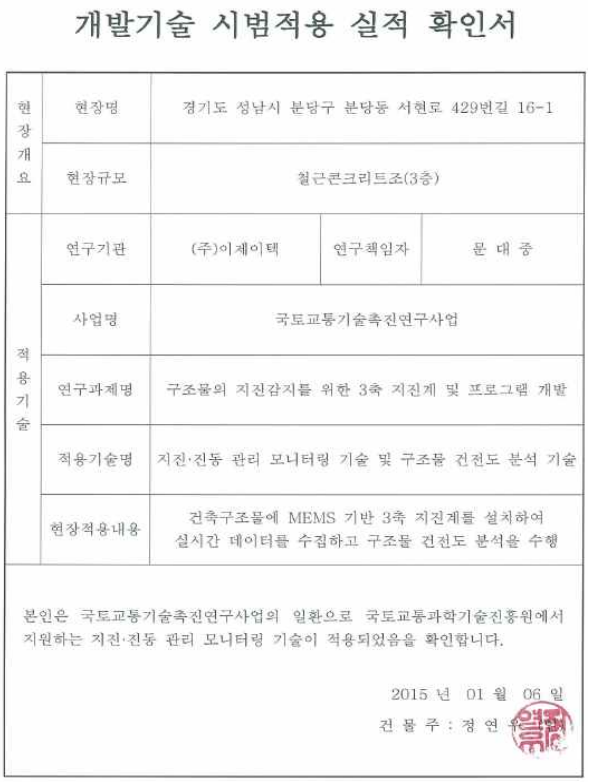
[구조물 건전도 평가 결과 화면]

[건축물 건전도 평가 지표]

평가지표	분석값	안전기준	평가결과
최대 층간변위비(%)	0.16%	0.44% 미만	OK
구조물과 지반의 고유진동수비(%)	34.57%	100%±10% 이외	OK

(라) 종합 의견

최대 층간변위비가 건축구조설계기준(KBC 2009)에서 제시하는 기능수행(Operation Performance) 등급인 0.44% 미만이고, 구조물/지반 고유진동수비가 100%±10% 범위를 벗어나 공진현상의 위험이 매우 낮으므로 해당 구조물은 구조물 건전도 수준이 매우 높은 것으로 판단된다.



개발기술 시범적용 실적 확인서

현장개요	현장명	경기도 성남시 분당구 분당동 서현로 429번길 16-1		
	현장규모	철근콘크리트조(3층)		
적용기술	연구기관	(주)이제이텍	연구책임자	문 대 종
	사업명	국토교통기술촉진연구사업		
	연구과제명	구조물의 지진감지를 위한 3축 지진계 및 프로그램 개발		
	적용기술명	지진·진동 관리 모니터링 기술 및 구조물 건전도 분석 기술		
	현장적용내용	건축구조물에 MEMS 기반 3축 지진계를 설치하여 실시간 데이터를 수집하고 구조물 건전도 분석을 수행		

본인은 국토교통기술촉진연구사업의 일환으로 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 지진·진동 관리 모니터링 기술이 적용되었음을 확인합니다.

2015 년 01 월 06 일

건 물 주 : 정 연 우

[개발기술 시범적용 실적확인서 - 3층 건물]

개발기술 시범적용 실적 확인서

현장개요	현장명	경기도 성남시 분당구 구미동 무지개마을 2단지 LG아파트 214동		
	현장규모	철근콘크리트조(18층)		
적용기술	연구기관	(주)이제이텍	연구책임자	문 대 중
	사업명	국토교통기술촉진연구사업		
	연구과제명	구조물의 지진감지를 위한 3축 지진계 및 프로그램 개발		
	적용기술명	지진·진동 관리 모니터링 기술 및 구조물 건전도 분석 기술		
	현장적용내용	건축구조물에 MEMS 기반 3축 지진계를 설치하여 실시간 데이터를 수집하고 구조물 건전도 분석을 수행		

본 기관은 국토교통기술촉진연구사업의 일환으로 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 지진·진동 관리 모니터링 기술이 적용되었음을 확인합니다.

2015 년 01 월 06 일

기 관 명 : 무지개마을 LG아파트 관리사무소장 (인)

[개발기술 시범적용 실적확인서 - 18층 건물]

제4장 연구목표 달성 및 효과

제1절 연구개발 최종목표 달성도

1. MEMS 기반 3축 지진가속도계 센서 시스템 개발((주)이제이텍)

세부연구목표	달성도(%)	달성 내용
지진 모니터링 분석 알고리즘 개발	100%	▪ 건축물에서 관측된 지진가속도 자료의 분석 및 가공이 가능한 알고리즘의 개발
지진·진동 관리 모니터링 시스템의 개발	100%	▪ 지진가속도 데이터의 상시 감시 및 분석을 위한 모니터링 시스템의 개발
Test Bed 구축	100%	▪ 개발한 요소기술에 대한 최종 Test Bed 구축

2. 증강현실(Augmented Reality, AR)기반 계측정보의 통합 가시화 기술 개발((주)부품디비)

세부연구목표	달성도(%)	달성 내용
증강현실(Augmented Reality, AR)기반 계측정보의 통합 가시화 기술 개발	100%	▪ 계측정보 연계를 위해, 계측정보DB 인터페이스, 형상정보 제어를 포함한 AR기반 변위 가시화 모듈의 개발 ▪ 증강현실 기반 iOGRE(아이오우거) 가시화 모듈 V2.1 프로그램을 개발

3. MEMS 기반 3축 지진가속도계 센서 모듈 개발(한국기술교육대학교)

세부연구목표	달성도(%)	달성 내용
MEMS 기반 소형 지진 가속도 센서 모듈의 개발	100%	▪ MEMS 기반 가속도 센서를 이용한 저가/소형 지진 감지 모듈
지진계측 잡음저감 알고리즘의 개발	100%	▪ 지진 계측 시스템의 출력잡음을 분석하여 잡음을 저감할 수 있는 디지털 필터 알고리즘
MEMS 지진 가속도센서 readout ASIC의 개발	100%	▪ MEMS 가속도센서 구조의 커패시턴스 변화로부터 저잡음비 전기 신호로 변환하기 위한 ASIC

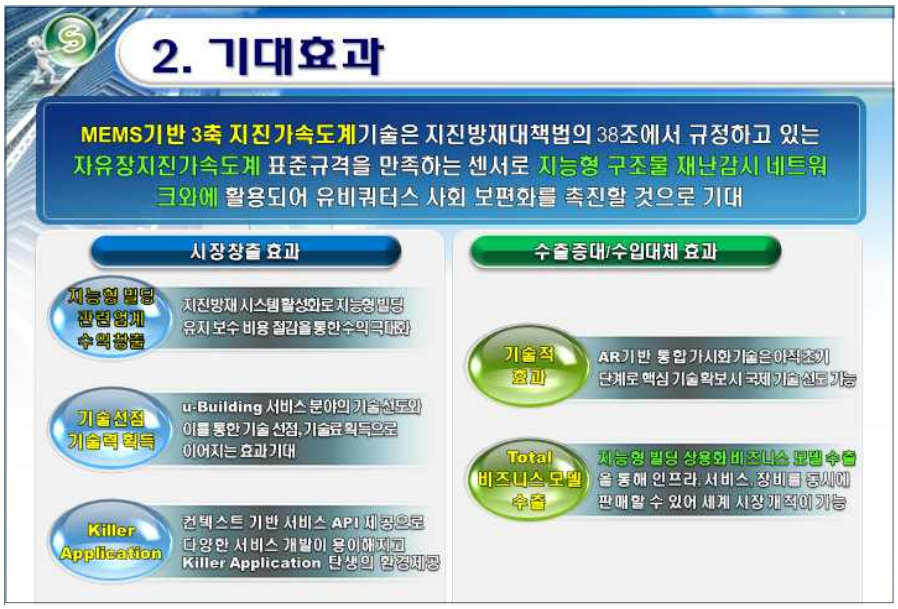
제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

1. 연구개발 성과의 사회·경제·정책적 파급효과

본 기술개발은 정보통신분야, 센서분야, 건설분야의 최첨단 융합기술로서 관련 산업인 센서산업, 전자산업, IT산업, 건설산업 등의 새로운 사업 분야로서 자리매김을 하리라 판단된다. MEMS 기반 3축 지진가속도계의 기술개발 결과는 자연스러운 시장점유율 확대 및 매출액 증대로 이어질 것이며, 장인 수준의 전문 기술진의 기술적 감각 및 경험에 의존하고 있는 센서 제작공정에 필요한 인력의 고용창출 등의 경제적 성과도 기대된다.

구조물의 진동 및 지진계측에 적용이 가능한 본 기술개발 결과는 건축물을 비롯하여 사회간접자본시설물에도 확장 가능하며, 저탄소녹색성장 국가정책에 의거 시장이 확대되리라 판단되고, 구조물의 지진과 관련한 재난관리 및 방지시스템의 신뢰성 확보, 설치 및 사용 편의성 증대, 유지 보수비용 절감에 대한 노력이 결실을 거두면 해외 원전 및 플랜트 건설시장에도 적극적으로 활용할 수 있으며, 이것은 국가의 원전기술 및 플랜트 건설 경쟁력을 높이는 계기를 마련할 것이다.

국민의 재산과 생명을 보호해야 하는 국가의 책무에 대한 재난관리 및 방지시스템을 확립하는 것은 경제적 효과를 떠나 국가의 근간을 이루는 경제활동, 국민의 안전한 삶과 생명보호를 위해 가장 중요한 사항이라고 판단된다. 또한 본 기술의 확보로 안전사고 관련 막대한 사회적 비용을 절감할 수 있을 것이며, 무인 원격관제, 자연 환경 감시, 재해 예방 등과 같은 분야로 확대 적용이 가능하리라 판단된다.



[그림 16] 연구개발 기대효과

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

제1절 연구성과의 향후 활용방안

1. 기술실시 계획 및 판매 계획

본 연구진은 해당과제가 종료된 날부터 6개월 이내에 연구개발 결과의 소유기관과 연구개발결과를 실시하고자 하는 기관 간의 기술실시계약을 체결할 예정이며, 본 기술개발 결과의 활용은 지진재해대책법의 38조에서 규정하고 있는 지진가속도계 표준규격을 만족하는 센서를 개발함으로써 센서의 국산화가 가능할 것으로 판단된다. 또한 국가기관 등에 적극적인 개발기술의 홍보를 실시하고, 국민의 재산과 생명을 보호하는 안전사회 구현이라는 국가의 역할에 일조하는 기술로써 본 개발기술의 우수성 및 실효성에 대한 공격적 마케팅을 실시할 예정이다.

지진과 지진해일로 인한 재해로부터 국민의 생명과 재산 및 주요 기간시설을 보호하기 위하여 지진재해대책법이 제정·공포(2008.03.28) 되었고, 해당 법령에는 지진과 지진해일의 관측·예방·대비 및 대응, 내진대책과 지진재해를 줄이기 위한 연구 및 기술개발 등에 관한 사항을 규정하고 있다. 해당 법의 제5조(지진가속도계측 대상 시설 등)에서는 중앙행정기관 및 지방자체단체의 청사, 국립대학교, 높이 200미터 또는 50층 이상 공공건축물, 내진 특등급의 댐 및 저수지, 현수교 및 사장교, 발전용 수력설비 및 화력설비 등에 반드시 지진가속도 계측을 하도록 명시하고 있으므로, 상기와 같은 지진가속도 계측이 필요한 관리 주체에 판매할 계획이다.

2. 사업화 계획

구분	구체적인 내용
형태/규모	o 상용화 형태 : ① 건물진동 통합 모니터링 시스템 ② 지진가속도계 o 수요처 : 건설업체, SOC 시설물 관리 기관, 빌딩 o 예상 단가 : 60,000,000원
상용화 능력 및 자원보유	o 계측시스템 설치/시공에 관한 독자적 기술 확보 o 토목 계측분야 및 구조물 안전성 평가 분야 선도 기업 (스마트 센싱 기술을 활용한 사회기반 시설물 계측 및 유지관리 전문 업체)
상용화 계획 및 일정	o 개발 종료 후 당해년도부터 생산 판매 o 국내 독자 기술 확보로 지진가속도계 등 현재 수입 판매가의 70% 수준으로 생산 판매

참고문헌

1. 지진방재, 소방방재청, 2009년
2. 한국산업기술평가관리원 IT R&D 발전전략(IT융합)
3. 해외건설협회, 2007년 12월
4. 해외건설협회, 2007년 12월
5. 녹색성장을 위한 건설-IT융합 기술 시장 세미나, 2010년
6. 녹색성장을 위한 건설-IT융합 기술 시장 세미나, 2010년
7. 시설물정보통합관리시스템, KISTEC, 2002년
8. Kim, S.W. and Kim, N.S. (2010) Verification of Multi-point Displacement Response Measurement Algorithm Using Image Processing Technique, Journal of the Korean Society of Civil Engineering, Vol. 30, No. 3A, pp. 297-307.
9. Bruk, H.A., McNeil S.R., Sutton, M.A. and Perter, W.H. (1986) Digital Image Correlation Using Newtom-Raphson Method of Partial Differential Correlation, Experimental Mechanics, Vol. 29, No. 3, pp. 261-268.
10. Vendroux, G. and Knauss, W.G. (1998) Submicron Deformation Field Measurements: Part 2. Improved Digital Image Correlation, Experimental Mechanics, Vol. 38, No. 2, pp. 86-92.
11. Cheng, P., Sutton, M.A., Schreier, H.W. and McNeill, S.R. (2002) Full Field Speckle Pattern Image Correlation with B-spline Deformation Function, Experimental Mechanics, Vol. 42, No. 3, pp. 344-352..
12. Chen, J., Xia, G., Zhou, K., Xia, G. and Qin, Y. (2005) Two-step Digital Image Correlation for Micro-region Measurement, Optics Lasers in Engineering, Vol. 43, No. 8, pp. 836-846.
13. Tsatsanis M.K. and Giannakis G.B. (1995) Pricipal Component Filter banks for Optical Multisolution Analysis, IEEE Trans. Signal Process, Vol. 43, No. 8, pp. 1766-1777.
14. Vetterli M. (1984) Multi-dimensional Sub-band Coding: Some Theory and Algorithms, Signal Processing, Vol. 6, No. 2, pp. 97-112.
15. Daugmann, J.G. (1980) Two-dimensional Spectral Analysis of Cortical Respective Field Profile, Vision Res, Vol. 20, pp. 847-856.
16. Bovik, A.C., Huang, T.S. and Munson, D.C. (1983) A Generalization of Median filtering Using Linear Combinations of Order Statics, IEEE Trans. Acoust, ASSP-31, Vol 6, pp. 1342-1350.
17. Hardie, R.C. and Boncelet, C.G. (1993) LUM Filters: A Class of Order Statictics based Filters for Smoothing and Sharpening, IEEE Trans. Signal Principles, Vol. 41, No. 3, pp. 1061-1076.
18. Peebles, P. (1993) Probability, Random Variables, and Random Signal Principles, McGraw Hill, New York.

19. Huber P.J. Robust Statistics, (1981) J. Wiley & Sons, New York.
20. Oppenheim, A.V. and Schafer, R.W. (1989) Discrete-Time Signal Processing, Prentice-Hall, Upper Saddle.
21. Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. (1993) Digital Image Processing, Addison-Wesley, Boston, MA.
22. Arce, G.R. (1998) A General Weighted Median Filter Structure Admitting Ngative Weights, IEEE Trans. Signal Process, Vol. 46, pp. 3195-3205.

부록

1. 논문, 특허 등 정량적 성과와 정성적 성과

가. 정량적 연구성과 집계 현황(목표치/달성치)

구분	특허				논문				시제품	S/W 등록	현장 적용
	국제		국내		SCI (E)	비SCI		학술 발표			
	출원	등록	출원	등록		국제	국내				
1차년도 (2012.04~2013.02)	/	/	/	/	/	/		0 / 1	0 / 1	0 / 1	/
2차년도 (2013.02~2014.02)	/	/	1 / 3	0 / 1	1 /	/	1 / 1	0 / 4	/	0 / 1	/
3차년도 (2014.03~2015.02)	/	/	1 / 2	/	1 /	/	1 / 1	/	1 / 2	1 / 2	1 / 2
합계	/	/	2 / 5	0 / 1	2 / 0	/	2 / 2	0 / 5	1 / 3	1 / 4	1 / 2

(1) 지식재산권

(가) 특허출원 및 등록

건	출원연도	특허명	출원인	출원국	출원번호
1	2013	비정형면 설치용 가속도계 취부장치	이승재, 이병렬	대한민국	10-2013-0002262
2	2013	지진모니터링 방법 및 이를 이용한 지진계	이병렬	대한민국	10-2013-0132253
3	2013	지진 검출 방법 및 이를 이용한 지진계	이병렬	대한민국	10-2013-0154676
4	2014	용량형 마이크로 가속도 센서의 부정합 용량을 보정하기 위한 시그마 델타 보상회로장치	이병렬, 남철	대한민국	10-2014-0073566
5	2015	용량형 마이크로 가속도 센서를 위한 시그마델타 옵셋 보상회로의 리플 필터링 방법	이병렬, 남철	대한민국	10-2015-0000801

건	등록연도	특허명	등록인	등록국	등록번호
1	2014	비정형면 설치용 가속도계 취부장치	이승재, 이병렬	대한민국	10-1361930

(나) 소프트웨어 등록

건	등록연도	프로그램명	등록번호
1	2012	AR기반 OGRE 가시화모듈	C-2013-001284
2	2013	증강현실 기반 iOGRE(아이오우거) 가시화 모듈 v.2.0	C-2013-027187
3	2014	증강현실 기반 iOGRE(아이오우거) 가시화 모듈 v.2.1	C-2014-031806
4	2014	가속도-속도-변위 변환 프로그램	C-2014-031821

(2) 논문

(가) 학술지 게재

게재연도	논문명	저자			학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분	SCI구분
		주저자	교신저자	공동저자				
2014	저전력 MEMS 기반 3축 가속도계의 성능시험	이병렬	이승재	문대중, 정진우	구조물진단 유지관리 공학회	18(1)	국내	비SCI
2015	AR 환경에서의 지진 정보 가시화 방안 연구	배성훈	김은희	정기철	한국 CAD CAM 학회	20(1)	국내	비SCI

※ '저전력 MEMS 기반 3축 가속도계의 성능시험' 논문은 진동 감지 알고리즘을 각 축의 가속도 값을 별도로 판단하는 방식이 아닌 3축 가속도의 벡터 합을 이용하는 방식을 소개한 논문으로, 구조물에 유의한 진동 여부를 효과적으로 판단이 가능하다는 내용을 담고 있음.

※ 'AR 환경에서의 지진 정보 가시화 방안 연구' 논문은 증강현실 환경에서 지진에 의한 변위 정보를 효과적으로 가시화하는 내용을 포함하고 있으며, 가속도 센서를 기반으로 한 시스템으로 확장할 수 있는 기반을 마련함.

(나) 학술대회 발표

발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
2013.01.31	AR 정보를 활용한 사회 기반 시설정보 가시화 및 안전 정보와의 병합기법	정기철 외	한국 CAD/CAM 학회	국내
2013.02.23	AR 환경에서의 지진 가속도 정보 가시화 방안 연구	정기철 외	한국 CAD/CAM 학회	국내
2013.04.11	교량 건전성 모니터링에서 GNSS의 활용성에 대한 연구	박지수 외	한국구조물진단유지관리 공학회	국내
2013.05.01	FBG Strain Sensors for Creak Measurement Due to Hydration Heat in Massive Concrete	이승재 외	Advanced Materials Research	국외
2013.07.24	Performance Test for Low Electric Power Typed and MEMS Based Seismometer	정진우 외	The 9th Japan-Korea Seminar on Bridge Maintenance	국외

※ 연구 수행 기간 중 학술대회 참가로 개발 기술에 대한 지속적인 기술적·학술적 홍보를 수행함.

(3) 시제품 출시

건	시제품명	시제품 성능	비고
1	MEMS 센서 기반의 지진가속도계 시제품	• 측정범위 : ±2g • 분해능 : 40mgal • 주파수 범위 : 1~50Hz • 타축감도 : 5%	
2	MEMS 센서 기반의 지진가속도계 시제품	• 측정범위 : ±2g • 분해능 : 4mgal • 주파수 범위 : 1~100Hz • 타축감도 : 2%	
3	지진·진동 관리 모니터링 프로그램	• 지진가속도 데이터의 상시 감시 및 분석을 위한 모니터링 시스템	

나. 정성적 연구성과 목록

연번	핵심성과명	핵심성과 설명	성과유형	성과달성 기관	해당연차
1	지진 모니터링 분석 알고리즘 개발	건축물에서 관측된 지진가속도 자료의 분석 및 가공이 가능한 알고리즘의 개발	소프트웨어	(주)이제이텍	2012.04~2014.01 (22개월)
2	지진·진동 관리 모니터링 시스템	지진가속도 데이터의 상시 감시 및 분석을 위한 모니터링 시스템의 개발	시스템	(주)이제이텍	2014.02~2015.01 (12개월)
3	Test Bed 구축	개발한 요소기술에 대한 최종 Test Bed 구축	기타	(주)이제이텍	2014.09~2015.01 (4개월)
4	증강현실 (Augmented Reality, AR) 기반 계측정보의 통합 가시화 기술 개발	실제 계측정보를 AR기술을 이용하여 정보를 병합한 가시화 통합 소프트웨어의 개발	소프트웨어	(주)부품디비	2012.04~2015.02 (34개월)
5	MEMS 기반 소형 지진가속도 센서 모듈	MEMS 기반 가속도 센서를 이용한 저가/소형 지진 감지 모듈	장비·장치	한국기술교육대학교	2013.02~2014.12 (23개월)
6	지진계측 잡음저감 필터알고리즘	지진 계측 시스템의 출력잡음을 분석하여 잡음을 저감할 수 있는 디지털 필터 알고리즘	소프트웨어	한국기술교육대학교	2014.05~2014.10 (6개월)
7	MEMS 지진 가속도센서 readout ASIC	MEMS 가속도센서 구조의 커패시턴스 변화로부터 저잡음비 전기 신호로 변환하기 위한 ASIC	장비·장치	한국기술교육대학교	2014.04~2015.01 (10개월)

2. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 해당사항 없음 -

3. 기타사항(중요 연구 변경사항 등)

구 분	일 시	계 획	변경내역	변경사유
기관 추가	2013.02.10 (2차년도)	지진계 급 3축가속도계 센서 제작을 위한 연구기관 추가	한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 이병렬 교수 연구팀을 공동연구기관으로 신규 추가	이병렬 교수는 MEMS를 활용한 가속도계 센서개발의 국내 최고 전문가이며 본 연구에서 센서와 ASIC 개발 및 성능향상의 연구를 수행할 예정

성과점검기준표(연차별)

● 1차년도

	세세부과제(공동과제)명 (연구목표, 분야)		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	달성평점 (평점1~5)
							목표수준		측정방법	검증 방법		
							목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1	MEMS 기반 3축 지진가속도계 센서 시스템 개발	1-1	MEMS 기반 1축 지진 가속도 센서 모듈 개발	①	최대 측정 범위	±2000 gal 이상	±2200 gal	비선형성 5% 미만 기준	시험 성적서		
					②	분해능	40 mgal 미만	43 mgal	정지상태 잡음등가 분해능	시험 성적서		
	2	AR기반 계측정보의 통합 가시화 기술 개발	2-1	국내외 구축사례 조사	①	조사건수	20건	61건	조사 분석 보고서 제출	보고서		
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)											

		목표	목표건수	달성건수	증빙	인정 건수	달성율 (%)	가중치	달성평점
양적 지표 점검	사업연계지표	국내외 학술지 게재논문 건수 (SCI급)	-	-					
		국내외 학술지 게재논문 건수 (비SCI급)	1	-					
		특허출원/등록	-	-					
		현장적용에 따른 비용절감 건수	-	-					
		시제품제작	-	1					
		S/W 등록건수	-	1					
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)								

● 2차년도

	세세부과제(공동과제)명 (연구목표, 분야)		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	달성평점 (평점1~5)
							목표수준		측정방법	검증 방법		
							목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1	MEMS 기반 3축 지진가속도계 센서 시스템 개발	1-1	MEMS 기반 3축 지진 가속도 센서 모듈 개발	①	최대 측정 범위	±2000 gal이상	±2000 gal	비선형성 5% 미만 기준	시험 성적서		
					②	분해능	40 mgal 미만	40 mgal	정지상태 잡음등가 분해능	시험 성적서		
					③	타축감도	5 %미만	5 %	정적상태 가속도 응답 평가	시험 성적서		
	2	AR기반 계측정보의 통합 가시화 기술 개발	2-1	건축형상 정보 가시화	①	병합 가시화 속도	15 frame/s	10 frame/s	가시화 속도 측정	시험 성적서		
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)											

		목표	목표건수	달성건수	증빙	인정 건수	달성율 (%)	가중치	달성평점
양적 지표 점검	사업연계지표	국내외 학술지 게재논문 건수 (SCI급)	1	-					
		국내외 학술지 게재논문 건수 (비SCI급)	1	1					
		특허출원/등록	1	3					
		현장적용에 따른 비용절감 건수	-	-					
		시제품제작	-	-					
		S/W 등록건수	-	1					
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)								

● 3차년도

	세세부과제(공동과제)명 (연구목표, 분야)		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	달성평점 (평점1~5)
							목표수준		측정방법	검증 방법		
							목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1	MEMS 기반 3축 지진가속도계 센서 시스템 개발	1-1	MEMS 기반 지진가속도 센서 시스템 개발	①	최대 측정 범위	±2000 gal이상	±2000 gal	비선형성 5% 미만 기준	시험 성적서		
					②	분해능	4 mgal 미만	4 mgal	정지상태 잡음등가 분해능	시험 성적서		
					③	대역폭	100 Hz 이상	100 Hz	vibrator 장착 시험	시험 성적서		
			1-2	Test Bed 구축	④	구축건수	1건	2건	구축현황 보고	보고서		
	2	AR기반 계측정보의 통합 가시화 기술 개발	2-1	AR기반 계측정보 통합 시스템	①	알람반응 속도	3초이내	3초 이내	가상 시나리오 Test	동영상		
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)											

		목표	목표건수	달성건수	증빙	인정 건수	달성율 (%)	가중치	달성평점
양적 지표 점검	사업연계지표	국내외 학술지 게재논문 건수 (SCI급)	1	-					
		국내외 학술지 게재논문 건수 (비SCI급)	-	-					
		특허출원/등록	1	2					
		현장적용에 따른 비용절감 건수	10%	50%					
		시제품제작	1	2					
		S/W 등록건수	1	2					
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)								

주 의

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