

센서/신개념을 이용한 힘 측정기술 및 응용

Force Measurement Technology with Sensors/
New Concepts and its Application

한국표준과학연구원

과 학 기 술 부

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “센서/신개념을 이용한 힘 측정기술 및 응용” 과제의 보고서로 제출합니다.

2002. 6. 13.

주관연구기관명 : 한국표준과학연구원

주관연구책임자 : 강 대 임

연 구 원 : 박 연 규

 " : 김 중 호

 " : 최 인 묵

 " : 송 후 근

 " : 이 정 태

 " : 우 삼 용

여 백

보고서 초록

과제관리번호	2000-N-NL-C-141	해당단계 연구기간	2000.6.14-2002.6.13	단계 구분	1 / 2
연구사업명	중 사업명	특정연구개발사업			
	세부사업명	국가지정연구실사업			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	센서/신개념을 이용한 힘 측정기술 및 응용			
연구책임자	강 대 임	해당단계 참여연구원수	총 : 12 명 내부 : 7 명 외부 : 5 명	해당단계 연구비	정부: 673,454 천원 기업: 천원 계: 673,454 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국표준과학연구원/물리표준부		참여기업명	없음	
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면 수	112
<ul style="list-style-type: none"> · 단축/다축 힘센서 최적화 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 힘센서 설계의 해석적, 수치해석적, 실험적 방법 기술 개발 완료 - 다축 힘센서의 동특성 해석 세계 최초로 수행 · 피에조 필름 응용기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 피에조 필름의 특성치와 출력 감도와와의 관계 파악 - 피에조 필름 배열에 따른 측정 가능 힘 성분 분석 - 피에조 필름 온도특성 평가 및 DB 구축 · Built-in 센서 기술 개발 : 원형 기동을 이용한 다축 힘센서 <ul style="list-style-type: none"> - 원형 기동을 이용한 다축 힘센서 설계 기술 개발 - 시제품 제작 및 특성 평가 - 반도체게이지 사용으로 56배의 감도향상 확인 · Built-in 센서 기술 개발 : 스마트 탄성받침 <ul style="list-style-type: none"> - 스마트 탄성받침 시제품 제작 및 특성 평가 - 스마트 탄성받침의 적용 가능성 파악을 위한 교량 진동해석 가능성 확인 · 고정밀 대용량 힘 발생기 오차 보상기법 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 기준 로드셀의 직선성, 히스테리시스, 크립 오차의 보상 기법 개발 - 기준 힘센서의 정밀 특성 평가 - 오차보상기법을 이용한 힘 발생기 성능 개선 · 미세 힘센서 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 미세 다축 힘센서 설계 - 정전기력을 이용한 촉각제시기술 개발 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	힘, 힘센서, 힘측정, 힘평가, 내장형 힘센서, 스트레인 게이지			
	영 어	force, force sensor, force measurement, force evaluation, built-in sensor, strain gage			

여 백

요 약 문

I. 제 목

센서/신개념을 이용한 힘 측정기술 및 응용

II. 연구개발의 목적 및 필요성

힘 측정은 계측기기산업분야, 제품의 품질관리분야, 산업안전분야 및 연구분야, 미래산업분야에 이르기까지 일상생활뿐 아니라, 중화학공업, 방위산업 등 폭 넓게 사용되고 있다. 상기 분야들은 모두 힘을 측정 또는 제시하는 분야들로서, 이들의 관심 물리량인 힘을 정확하게 측정하는 기술은 힘을 다루는 모든 관련 기술의 핵심이라 할 수 있다. 따라서, 힘의 정밀 측정, 평가 및 이의 응용기술을 개발할 필요가 있다.

본 연구의 목표는 다음과 같다.

- 스트레이게이지, 피에조 필름, MEMS 기술을 이용한 힘 측정 기술의 개발 및 응용
- Built-in 센서 기술의 개발 및 응용
- 신개념을 이용한 힘 측정기술의 개발
- 힘센서 동적평가기술 개발 및 시스템 구축

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 단축/다축 힘센서 최적화 기술 개발
 - FEM을 이용한 stiffness 예측 및 실험을 통한 검증
 - 상호간섭, stiffness를 고려한 최적설계기법 개발
 - 단축 힘센서 지름대 길이비를 최소화하고 접촉조건의 영향을 최소화하는 힘센서 감지부 최적 설계 기술 개발
 - 시작품 제작 : 용량 10 MN, 방향성 오차 0.02 %, 재현도 오차 0.01 %
- 피에조 필름 응용기술 개발
 - 피에조 필름의 특성치들과 센서 감도와와의 관계 분석
 - 피에조 필름의 배열에 따른 측정 가능 힘 성분 분석
 - 피에조 필름의 온도 특성 분석
 - Built-in 센서 설계 가능성 검토 및 모델링

- Built-in 센서 기술 개발 : 원형 기둥을 이용한 다축 힘센서
 - 원형 기둥을 감지부로 이용한 built-in 힘센서 개발
 - 상호간섭오차 보상기법 개발
 - 감도향상 연구
- Built-in 센서 기술 개발 : 스마트 탄성받침
 - 탄성받침에 피에조 필름 삽입 설치 기술 개발
 - 교량의 기본 모델링을 통한 스마트 탄성받침 응용성 검토
- 고정밀 대용량 힘 발생기 오차 보상기법 개발
 - 모델제작
 - 오차보상 알고리즘 개발
 - 대용량 정밀 힘발생기 특성평가

IV. 연구개발결과

- 단축/다축 힘센서 최적화 기술 개발
 - 힘센서 설계의 해석적, 수치해석적, 실험적 방법 기술 개발 완료
 - 10 MN 로드셀과 로드셀 지지부의 설계 및 제작
 - 세장비와 접촉조건에 따른 감지부의 출력 해석 : FEM 분석
 - 접촉 조건(로드셀 지지부의 외경)을 최적화 시킴으로써 로드셀 특성 향상
 - 다축 힘센서의 동특성 해석 세계 최초로 수행
 - 다축 힘센서의 stiffness 해석 방안으로 공진주파수 분석 : FEM 분석, 실험 분석
 - 다축 힘센서 감지부의 최적 형상 파악을 위한 구조해석 수행
 - 다축 힘센서 응용의 주요 분야인 동적 환경에서의 센서 특성 평가기술 확보

피에조 필름 응용기술 개발

- 피에조 필름의 특성치와 출력 감도와와의 관계 파악
- 피에조 필름 배열에 따른 측정 가능 힘 성분 분석
- 피에조 필름 온도특성 평가 및 DB 구축

Built-in 센서 기술 개발 : 원형 기둥을 이용한 다축 힘센서

- 원형 기둥을 이용한 다축 힘센서 설계 기술 개발
- 성분별 신호를 얻기 위한 게이지의 부착위치 및 회로구성
- 시제품 제작 및 특성 평가

- 반도체게이지 사용으로 56배의 감도향상 확인

Built-in 센서 기술 개발 : 스마트 탄성받침

- 스마트 탄성받침 시제품 제작 및 특성 평가
- 교량 진동 예측 방법 개발
- 스마트 탄성받침의 적용 가능성 파악을 위한 교량 진동해석 가능성 확인
- 교량 구조물에 필수적으로 삽입되는 탄성받침에 힘 측정 기능을 부여함으로써, 교량의 상시 상태 모니터링 가능
- 기존의 스트레인게이지 어레이 부착 방법, 가속도계 어레이 부착 방법, 광센서 삽입 방법 등이 갖는 별도 센서 부착의 문제점 해결

고정밀 대용량 힘 발생기 오차 보상기법 개발

- 기준 로드셀의 직선성, 히스테리시스, 크립 오차의 보상 기법 개발
- 기준 힘센서의 정밀 특성 평가
- 오차 보상 기법을 500 kN 유압식 힘 발생기에 적용 보완
- 오차보상기법을 이용한 힘 발생기 성능 개선
- 상대 확장 불확도 : 5×10^{-4} 이하

미세 힘센서 개발

- 빔 이론과 FEM을 이용한 3축 미세 힘센서 감지부 형상설계
- 유한요소법을 이용한 3축 힘센서 감지부의 감도 및 강도 평가
- 감도, 상호간섭 오차 그리고 온도보상을 고려한 압전저항 위치 및 완전결선 회로 설계
- MEMS 제작기술을 이용한 미세 힘센서 제작 공정 설계
- 정전기력을 이용한 촉각제시기술 개발

V. 연구개발결과의 활용계획

다축 힘센서 동특성 평가 기술을 바탕으로 동측정에 적합한 다축 힘센서 개발의 기반 기술로 활용한다.

구조물을 힘 측정의 감지부로 활용하는 원기동형 다축 힘센서 기술은, 각종 토목 구조물의 상시 안전 진단에 효과적으로 응용 가능하므로 기업체 기술이전을 추진한다.

스마트 탄성받침은 각종 교량에 기본적으로 장착되어 교량의 상태 모니터링에 사용될 수 있다. 개발된 기술은 국내 최대의 탄성받침 생산업체인 유니슨 주식회사에 기술이전하여 상품화 되도록 한다.

고정밀 유압식 힘발생기의 오차성분 감소로, 힘분야 교정기관의 능력 향상을 이룰 수 있다. 개발된 기술은 유압식 힘발생기 전문 생산업체인 (주)파워 MnC에 기술이전하여 상품화 되도록 한다.

국내외적으로 현재 진행중인 미세 힘센서의 개발은 향후 10년 이내에 개발이 완료되어 첨단 원격 의료용 로봇, 미세 수술용 로봇, 그리고 가상환경 구현 기술에 활용될 수 있을 것으로 전망되고 있다. 또한 정전기력을 이용한 촉각제시 시스템 역시 향후 시각 장애자용 의사 전달 및 가상환경 구현 시스템의 기반기술로 활용한다.

SUMMARY

Development of optimizing technique for single-/multi- component force sensor

- Development of analytical, numerical and experimental method for force sensor design
- Dynamic evaluation of multi-component force sensor

Development of application technique of PVDF film

- Investigation of relation between characteristics of PVDF film and its sensitivity
- Analysis of measurable force components according to film combination
- Characterization of temperature sensitivity

Built-in sensor technique : Multi-component force sensor by using cylindrical column

- Development of design technique of multi-component force sensor having cylindrical type sensing part
- Development of prototype and its evaluation
- Increasement of sensitivity by using semi-conductor gage

Built-in sensor technique : Smart port bearing

- Development of prototype and its evaluation
- Feasibility analysis of bridge vibration by using smart port bearing

Development of error compensation technique for precision large force generator

- Development of error compensation technique due to nonlinearity, hysteresis and creep of master loadcell
- Precision evaluation of master loadcell
- Performance increment of force generator by applying the developed technique

Development of MEMS force sensor

- Development of design technique of multi-component MEMS force sensor
- Development of tactile generating system by using electro static force

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	13
Chapter 2	State of the art	18
Chapter 3	The main subject and results	20
Section 1	Optimizing technique for single-/multi- component force sensor	20
Section 2	application technique of PVDF film	45
Section 3	Built-in sensor technique I : Multi-component force sensor by using cylindrical column	54
Section 4	Built-in sensor technique II : Smart port bearing	67
Section 5	Error compensation technique for precision large force generator	73
Section 6	Development of MEMS force sensor	80
Chapter 4	Research achievement and contribution	89
Chapter 5	Utilizing plan and the results	91
Chapter 6	Foreign technical information	92
Chapter 7	References	94

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	13
제 2 장 국내외 기술개발 현황	18
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	20
제 1 절 단축/다축 힘센서 최적화 기술 개발	20
제 2 절 피에조 필름 응용기술 개발	45
제 3 절 Built-in 센서 기술 개발 I : 원형 기둥을 이용한 다축 힘센서	54
제 4 절 Built-in 센서 기술 개발 II : 스마트 탄성받침	67
제 5 절 고정밀 대용량 힘 발생기 오차 보상기법 개발	73
제 6 절 MEMS를 이용한 미세 힘센서 개발	80
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	89
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	91
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	92
제 7 장 참고문헌	94

여 백

제 1 장 연구개발과제의 개요

1. 개 요

수십 MN(10^6 뉴턴) 이상의 하중을 다루는 각종 중화학 공업 및 플랜트 산업에서부터, 수십 μ g 이하의 질량(나노 뉴턴 수준)을 측정해내는 초정밀 저울 분야에 이르기까지 하중 및 이의 보다 적극적인 개념인 힘의 정밀 측정은 관련 산업의 근간을 이루는 기반 기술이다. 힘의 측정 및 응용이 필요한 분야로는 상업용 저울, 산업용 저울, 재료시험기, 힘 측정기와 같은 계측기기산업분야, 프레스, 공정자동화와 같은 제품의 품질관리분야, 구조물 거동 해석, 항공기 및 선박모형시험, 로봇 정밀제어, 교량관리와 같은 산업안전분야, 가상환경 하에서의 촉각 제시, 마이크로 내시경의 촉각센서, 첨단교통시스템의 교통량 및 차량 무게 감지기술 등 산업 전반 및 우리의 일상생활에 폭 넓게 사용되고 있다.

힘의 측정과 관련된 요소 기술 및 단위 기술을 나타내면 아래 그림과 같다. 요소 기술은 스트레인게이지 기술, 피에조 기술 등과 같이 힘 측정을 위한 기본 기술을 의미하며, 단위 기술은 이들 요소 기술들의 조합으로 구성되며 각종 힘의 측정에 직접적으로 관련되는 기술을 나타낸다. 하나의 단위 기술은 대부분의 요소 기술과 관련을 가지나, 그 중 관련도가 높은 사항만을 화살표로 표시하였다. 단위 기술의 단독 적용 또는 조합으로써 다양한 힘 측정 기술의 응용이 가능하며, 이로부터 산업체 및 연구계에서 요구하는 각종 힘 측정과 관련된 기술을 확보할 수 있다.

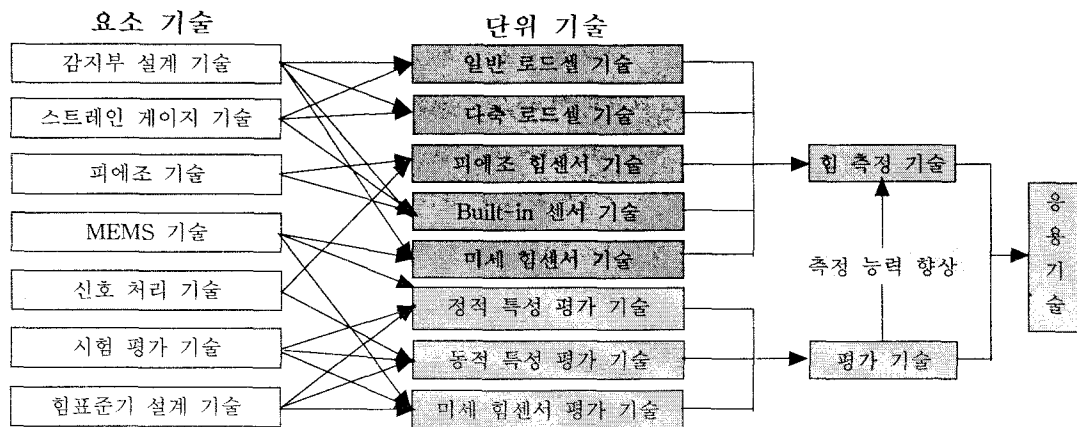


Fig. 1-1-1. 力(힘) 측정 및 응용기술 개념도

산업계와 연구계가 요구하는 다양한 힘의 측정 요구와 첨단 미래 산업의 요구에 부응하기 위해서는 Fig. 1-1-1에 표현된 힘 측정의 요소 기술로부터 시작하여 단위 기술, 그리고 응용

기술의 체계적 완성이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 우선 힘 측정 요소 기술의 확보를 위하여 스트레인게이지, 피에조 필름, MEMS 기술 등의 요소 기술을 확보하고 이를 응용한 각종 힘 센서의 개발 및 응용 기술을 개발하고자 한다. 본 세부 연구의 결과는 단일 제품인 힘 센서가 된다. 많은 힘 측정의 경우 측정을 위해 장착된 힘센서의 존재가 부가적인 문제를 야기시킬 수 있다. 예를 들어, 로봇의 암에 제어를 위한 다축 힘센서를 장착할 경우 센서의 삽입에 의해 로봇 암의 강성이 저하된다는 문제점을 갖는다. 이의 해결을 위하여 측정하고자 하는 대상의 변형을 힘 측정의 도구로 이용하는 built-in 측정 기술을 개발하고자 한다. 다양한 형태의 built-in 측정 기술이 적용될 수 있으나, 본 연구에서는 산업적 파급 효과가 지대할 것이라 사려되는 로봇 암을 이용한 다축 힘센서와 교량 등의 탄성 받침을 힘센서로 활용하는 기술을 개발하고자 한다. 탄성 받침은 철판과 고무판이 샌드위치식으로 연달아 배열된 구조로서, 교량의 진동에 의한 피해를 방지하는 역할을 한다. 이와 같이 교량에 필수적으로 설치되는 탄성 받침에 힘 측정 능력을 부여한다면, 이는 교량에 가해지는 힘을 지속적으로 측정하여 교량 상태 및 이상의 진단에 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 이와 같이 힘 센서 능력을 가진 탄성 받침을 스마트 탄성 받침이라 명명하고 이의 개발을 추진할 것이다. 이는 기존에 존재하는 탄성 받침 격층 내에 피에조 필름을 삽입함으로써 달성될 수 있다.

힘의 정확한 측정은 이를 평가할 수 있는 기술이 존재할 때 가능하게 된다. 힘 센서의 정적 특성 평가와 관련하여 이미 본 연구팀에 의해 선진국과 대등한 수준의 기술이 개발되어 활용되고 있다. 그러나, 동적 힘의 측정을 평가할 수 있는 기술은 현재 미흡한 상황이며, 따라서 본 과제에서는 힘센서의 동적 특성 평가와 관련된 기술을 개발하고자 한다.

전술한 일반적인 힘의 측정 및 평가와 관련된 기술 외에, 미래의 첨단 환경에 능동적으로 대처할 수 있는 신개념의 힘 측정 기술의 개발 또한 필요하다. 이를 위하여 본 과제에서는 우주 환경과 같은 무중력 상태에서 활용 가능한 질량 및 힘 측정 기술을 개발하고자 한다. 또한, 가상 현실 구축, 원격 의료 진단 등의 분야에서 필수적인 촉각의 객관적 측정을 위하여 촉각 측정 기술 역시 개발하고자 한다. 이와 같은 신개념의 힘 측정에 대한 기반 기술을 확보함으로써 미래 산업의 요구에 효율적으로 대응할 수 있을 것이다.

2. 연구개발의 필요성

2.1 기술적 측면

힘의 측정 및 응용과 관련된 본 연구는 4가지 용도로 그 기반성을 살펴볼 수 있다. 첫째, 계측기기산업분야이다. 전자저울, 재료시험기, 산업용저울, 힘 측정기, 힘 표준기, 토크 측정기, 압력 측정기 등의 계측기들은 모두 힘의 측정 및 평가와 관련되어 있으며, 이들의 정확도

는 힘 측정 및 평가 능력에 좌우된다. 둘째, 제품의 품질관리분야이다. 이 분야는 모든 소재 및 원료 생산 산업과 연관된 분야로서 제품 생산 공정관리를 위해서 생산 시스템상에 많은 양의 힘센서가 설치되어 있다. 제품의 품질향상 뿐만 아니라 원가절감, 저가실현을 위해서도 제품의 강도(強度)를 고려해야 하고 이때 힘 측정은 필수적이다. 셋째, 산업안전분야 및 연구 분야이다. 교량 건설 및 관리, 해양구조물과 같은 대형 구조물의 운송, 과적차량 단속용 측중기, 자동차의 충돌시험, 항공기 및 선박모형시험, 타이어 등 각종 제품의 내충격성 시험, 로켓의 추진력 측정, 각종 무기의 화력시험에도 힘 측정은 필수적이다. 넷째, 미래산업분야이다. 미래 사회는 인터넷 등 컴퓨터 관련 기술의 발달로 가상의 사이버 공간에서의 생활이 일반화 될 것이다. 이 때, 시각 및 청각 등의 감각과 더불어 촉각의 가상 제시 역시 중요한 요소 중 하나이다. 촉각의 측정 및 제시는 기본적으로 힘에 바탕을 두고 있다. 촉각을 다시 둘로 나누면 미세 질감(質感)과 역감(力感)이 되는데, 전자는 손가락 끝에서 느끼는 미세한 힘을 나타내며, 후자는 접촉 시 느껴지는 힘을 나타낸다. 미세 힘, 촉각의 측정 기술은 앞으로 보편화 될 원격 진료 및 수술, 자율 내시경 등의 의료분야에도 필수적으로 필요한 기술이다.

각종 교량의 교각위에는 교량 상판을 지탱하는 탄성 받침이 설치된다. 탄성 받침은 철판과 고무판이 샌드위치식으로 연달아 배열된 구조로서, 교량의 진동에 의한 피해를 방지하는 역할을 한다. 이와 같이 교량에 필수적으로 설치되는 탄성 받침에 힘 측정 역할을 부여한 스마트 탄성 받침은 교량에 가해지는 힘을 지속적으로 측정하여 교량 상태 및 이상의 진단에 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 첨단교통시스템을 구축하기 위하여 교통량을 측정하고 운행 중인 차량의 무게를 on-line으로 감지하기 위해서 응답속도가 빠른 힘 측정센서 및 측정기법이 개발되어야 한다. 정밀 로봇을 개발 및 실용화하기 위해서는 힘/토크측정 및 제어기술이 요구되는데, 현재 힘/토크측정용 센서의 가격이 고가로 정밀 로봇 실용화에 장애가 되고 있으며 센서 부착으로 인한 로봇 강성의 저하 또한 문제가 되고 있다. 이를 해결하기 위해서는 다축 힘/모멘트 감지센서의 강성을 높이면서도 감도가 우수한 측정기법 개발이 요구되며 더 나아가 로봇 몸체 자체를 이용하여 힘/모멘트를 감지할 수 있는 새로운 측정기술을 개발할 필요가 있다. 또한 동적인 상태에서 사용되는 힘센서의 내구성 및 정확도를 향상시키기 위해서는 힘센서의 동적 응답특성을 평가해야만 하며 이를 위한 시스템 개발 및 구축이 시급하다. 이와 같이 힘 측정은 일상생활뿐 아니라, 중화학공업, 방위산업 등 폭 넓게 사용되고 있으며 미래산업분야에도 폭 넓게 사용될 것으로 예상된다.

전술한 응용 분야들은 모두 힘을 측정 또는 제시하는 분야들로서, 이들의 관심 물리량인 힘을 정확하게 측정하는 기술은 힘을 다루는 모든 관련 기술의 핵심이라 할 수 있다. 핵심 물리량의 정의가 선행되지 않은 상태에서 개발된 파생 기술의 신뢰성에 문제가 있음은 자명한 사실이다.

2.2 경제·산업적 측면

힘의 측정 및 응용 기술은 철강, 중화학 공업을 위시한 각종 소재 및 원료 생산 산업에서 생산 공정 관리에 사용되어 제품의 품질향상 및 원가절감에 밀접하게 관련되어 있다. 또한, 교량 건설 및 관리, 대형 구조물의 관리, 각종 제품의 충돌 시험, 로켓의 추진력 측정 등 산업의 기반 기술로 활용되고 있다. 일상 생활에서 쉽게 접할 수 있는 다양한 상업용 저울 역시 힘 측정이 직접적으로 사용되고 있는 분야이다. 본 연구 개발과 관련하여 전체 시장을 추정하는 것은 쉽지 않다. 또한, 측정의 목적이 제품의 품질관리, 계측기기산업, 안전관리, 연구 등이므로 힘 측정이 갖는 경제적 효과를 단순하게 돈으로 환산하기는 매우 어렵다. 이 연구와 밀접하게 관련이 있는 힘센서만의 시장규모를 살펴보면 96년 국내시장 규모는 220억이며 세계시장규모는 2억3천만불이며 99년 국내시장 규모는 400억 정도로 추정된다. 또한, 탄성 받침의 국내 시장규모는 약 2,000 억이다. 전술한 현재의 기술 수요는 산업 규모의 증가에 따라 지속적으로 증가할 것이다.

2.3 사회·문화적 측면

힘의 측정은 각종 교량, 도로, 대형 구조물 등의 사회 간접 자본의 유지, 진단에 필수적이다. 각종 힘센서 및 구조물을 이용한 built-in 측정 기술, 스마트 탄성 받침 등은 지속적으로 사회 간접 자본에 가해지는 힘을 측정하여 이의 상태 및 이상을 진단하는 핵심 요소가 된다. 사회 간접 자본의 안전은 이를 이용하는 인간의 안전을 지켜줌으로써 안전 환경의 개선에 기여할 것이다.

힘의 측정은 상거래에 이용되는 저울의 정밀도 향상을 통하여 구매자와 판매자 쌍방간의 신뢰를 높여줌으로써 삶의 질 향상에도 기여할 것이다. 또한, 가상 환경에서 사용되는 촉각 측정 기술을 개발함으로써, 21세기의 신문화로 대두되는 사이버 사회 구축의 기반 기술로 사용할 수 있을 것이다.

3. 연구개발 목표 및 내용

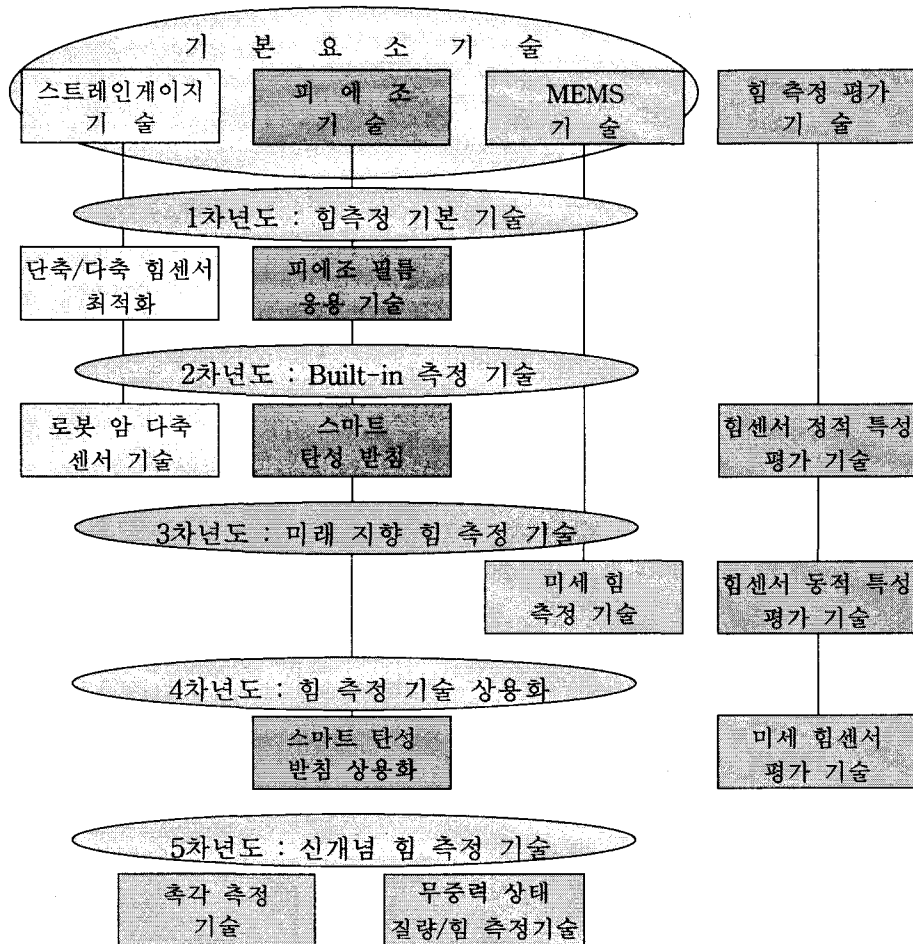


Fig. 1-3-1. 연구개발 추진 체계

본 과제에서 개발하고자 하는 핵심기술은 각종 힘 측정 기술의 개발 및 이의 응용에 있다. Fig. 1-3-1은 본 기술의 완성을 위하여 연구개발 노력이 연차적으로 이루어져 현대 산업 뿐 아니라 미래 산업이 요구하는 힘 측정 기술을 달성해 나가는 과정을 나타내고 있다. 스트레인게이지 기술, 피에조 기술, MEMS 기술 등 힘 측정 관련 기본 단위 기술들에 대하여 연차별 진행 계획에 따른 기술 개발 과정을 나타내고 있다. 힘 측정 평가 기술은 각 단계에서 개발된 측정 기술을 정확하게 평가하여 측정 기술의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

구체적인 연구개발 목표는 다음과 같다.

- 스트레인게이지, 피에조 필름, MEMS 기술을 이용한 힘 측정 기술의 개발 및 응용
- Built-in 센서 기술의 개발 및 응용
- 신개념을 이용한 힘 측정기술의 개발
- 힘센서 동적평가기술 개발 및 시스템 구축

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1. 국외의 연구개발 현황

일본의 Isida, Kubota, Yamato사에서 스트레인게이지식 힘센서를 이용하여 1/10,000 수준의 상업용 저울을 실용화하였으며 스위스의 Mettler-toledo사에서는 특별히 고안된 초정밀 힘측정기법을 이용하여 1/10,000,000의 분해능을 갖는 초정밀 저울을 상용화하였다. 일본의 Kyowa, 미국의 Lebow, 독일의 Spectris에서는 일방향 힘을 측정할 수 있는 산업용 힘센서를 실용화하였으며 일본의 Nissho, 미국의 BL Autotec에서는 다축 힘/모멘트 센서를 개발하여 로봇 정밀제어, 선박 및 비행기의 모형시험, 구조물 안전 진단 시험 등에 응용하고 있으나 정밀도 향상을 위한 연구들이 진행되고 있다. 미국의 MSI사에는 피에조 필름을 이용하여 동특성이 우수한 힘측정기법을 개발하고 traffic sensor, 소나, 가속도계 등의 응용연구를 수행하고 있다. 일본 오오사카 현립대학에서는 우주항공 산업에 응용될 수 있는 무중력 상태에서의 힘/질량 측정기술 개발에 관한 연구가 진행되고 있다. MEMS 기술을 이용한 미세 센서에 대한 연구는 세계 유수의 대학, 연구소 등에서 활발하게 이루어지고 있다. 축각의 측정과 관련하여 미국의 Stanford 대학에서는 반도체 제작에 사용되는 CMOS 기술을 적용하여 3방향의 스트레스를 측정할 수 있는 미세 힘센서를 개발하였다. 미국의 UC Berkeley 대학에서는 의료분야의 복강경 원격 진단에 사용할 목적으로 축각 측정 및 제시장치를 개발하였다. 그 중 축각 측정 센서는 콘덴서 방식을 이용한 8×8 어레이 형태로 구성되었으며, 그 크기는 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 에서 $8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 에 이르기까지 다양하게 제작되었다. 이외에 미국의 Harvard 대학과 일본의 Ibaraki 대학 등에서도 다양한 형태의 축각 측정 센서를 개발하였고 이의 응용 및 축각제시 시스템과의 결합을 수행중에 있다.

미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology), 독일의 PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt) 등 대부분의 국가표준기관에서는 50 N - 20 MN의 범위의 힘 표준 설비를 갖추고 산업체, 연구기관, 학교에서 보유하고 있는 힘 측정기나 힘 센서의 특성을 평가해 주고 있다. 최근에 독일 PTB에서는 힘측정기의 동적특성을 평가할 수 있는 20 kN 용량의 동적 힘발생장치를 개발하여 힘측정기에 적용한 결과 정적인 상태에서의 감도와 동적인 상태에서의 감도가 10% 이상 차이가 있음을 확인하였다. 따라서, 힘측정기들의 동적 특성 평가용 힘발생장치 및 기술 개발에 관한 연구들이 진행중이다.

2. 국내의 연구개발 현황

(주) 카스는 스트레인 게이지를 자체 개발하였고 스트레인 게이지식 힘센서를 이용하여

1/3,000 - 1/10,000 수준의 상업용 저울을 실용화하여 세계적인 저울회사로 성장하였고, 전자력을 이용하여 1/100,000 수준의 저울을 개발중에 있다. (주) 카스, (주) 파워엔지니어링에서는 연구소 및 대학과 공동으로 다축 힘/모멘트 센서를 개발하여 실용화하였으며 상호간섭 오차를 줄이는 연구들을 진행하고 있다. (주) 도로전산에서는 고속도로상에서 주행중인 차량의 과적 및 과속을 동시에 감지할 수 있는 측정기술을 개발하고 있다. 고려대, 경희대, 충북대, 건국대, 영남대, 강원대, 경북대 기계공학과 또는 제어계측공학과에서 힘센서 개발이나 힘측정기법에 관한 연구들을 수행하고 있다.

3. 본 연구팀의 연구개발 현황

- 다양한 용량의 로드셀을 개발하여 상품화하였고, 다축 로드셀(3축, 6축)을 개발하여 기업에 기술이전 하였고,
- 5 kN 실하중 힘표준기와 20 kN 실하중 힘표준기를 개발하여 기술이전하였고(NT 마크, EM 마크 획득), 100 kN 실하중 힘표준기(정확도 : 2×10^{-5})를 개발하여 국가 표준기로 활용중이며,
- 2 MN 유압식 힘표준기(정확도 : 2×10^{-4})와 10 MN 빌드업 힘표준기(정확도 : 5×10^{-4})를 개발하여 국가 표준기로 활용중이고,
- 30 MN 포트 받침 성능 시험기를 개발하여 기업에 기술이전 하였으며,
- 빌드업 시스템을 이용한 실하중 힘표준기의 정확도 평가기술을 개발하였다. 이로부터 힘표준기의 동적 거동을 분석하였고, 이에 의한 불확도를 계산할 수 있었다. 또한, 힘표준기의 옆방향 힘 성분을 측정하였고, 이에 의한 불확도 역시 계산하였다. 앞으로 관련 DB를 구축하여 힘표준기 핵심비교용 transfer standard로 활용할 계획이다.
- 이외에, 국가지정연구실 사업의 1단계 연구를 통하여 기동형 감지부를 갖는 다축힘센서 기술, 스마트 탄성받침과 같은 built-in 측정기술을 개발하였으며,
- 단축/다축 힘센서의 최적화 기술을 개발하였고,
- 다축 힘센서의 동특성 해석을 세계 최초로 수행하였다.
- 또한, 고정밀 대용량 빌드업 힘 측정기술을 개발하였으며,
- 고정밀 대용량 힘 발생기의 오차 보정 기법을 개발하여 힘 평가의 정확도를 높일 수 있었다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 단축/다축 힘센서 최적화 기술 개발

가. 대용량 단축 힘센서 최적화 기술 개발

1. 서 론

스트레인 게이지식 로드셀(이하 로드셀로 칭함)은 정밀도와 내구성이 우수하여 전자저울, 재료시험기, 구조물 해석, 각종 역학시험 등의 감지센서로 많이 사용되고 있다. 로드셀은 감지부(sensing element), 스트레인 게이지, 보상회로, 보호케이스로 구성되어 있다. 감지부는 측정하고자 하는 하중에 대응하여 적절한 기계적 변형률을 발생시키는 일종의 스프링과 같은 것이다. 스트레인 게이지는 감지부에 발생된 기계적 변형률을 전기적인 신호로 변환하는 역할을 한다. 보상회로는 로드셀의 정밀도를 높이기 위하여 사용되는 것으로서 온도 변화에 따른 영점출력 및 온도변화에 따른 감도변화 등을 보상하는 회로로 구성되어 있다. 보호케이스는 로드셀의 내구성과 과부하 특성을 높이는 역할을 한다.

로드셀 감지부의 구조로는 굽힘 변형률을 감지하는 구조로 외팔보형, 쌍안경형, 다이아프램형, S자형 등이 있으며, 전단 변형률을 감지하는 구조로 수레바퀴형, 전단빔(shear beam)형 등이 있고 수직변형률을 감지하는 구조로 기둥형이 있다. 설계자들은 로드셀의 용량, 측정범위, 요구 정밀도 및 사용 대상 등을 고려하여 감지부의 형상을 결정한다. 기둥형 감지부는 설계가 용이하고 대용량 측정에 적합하여 100 kN부터 최대 수십 MN까지의 대용량 로드셀의 감지부로 사용되고 있다.

Bray와 Robinson[1-4]은 기둥형 감지부를 갖는 로드셀의 경우 접촉시 발생하는 접촉하중의 불균일성, 접촉부위에서 발생하는 미세한 변형의 효과, 접촉하고 있는 로드셀의 구조적 강성 차이, 접촉면에서의 마찰계수의 차이가 로드셀의 정밀도에 미치는 영향을 연구하였다. Sundin 등[5]은 유한요소해석을 이용하여 로드셀을 지지하는 바닥의 마찰계수에 따른 스트레인 게이지 부착 부근의 변형률 분포를 조사 및 분석하였다. Mitchell 등[6]은 유한요소해석과 실험을 이용하여 로드셀의 끝 부분에 작용하는 하중조건의 변화에 따른 스트레인 게이지 부착 지점의 변형률 분포를 연구하였다. 강[7]은 유한요소법을 이용하여 세장비에 따른 끝단 효과의 영향을 고찰하였으며, 로드셀의 정밀도에 접촉면의 영향을 배제하기 위해서 감지부의 길이가 최소 감지부 직경의 2.5배가 되도록 설계하는 것을 제안하였다. 그러나 산업현장에서는 설치공간이 협소하여 강등이 제시한 조건으로 제작된 로드셀을 설치하지 못하는 경우가

발생할 수 있다. 따라서 협소한 설치 공간에 적합한 compact형 기둥형 로드셀을 설계할 필요성이 대두된다.

일반적으로 기둥형 로드셀의 정밀도에 영향을 미치는 요인으로는 휘스톤 브리지의 비선형 효과, 감지부 변형의 비선형 효과, 히스테리시스, 스트레인 게이지 부착위치의 오차, 감지부의 가공오차, 감지부 접촉 경계조건 및 끝단 효과 등이 있다. 기둥형 감지부를 compact형으로 설계할 경우 감지부의 끝단 효과와 접촉부위의 경계조건이 제일 큰 오차요인이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 기둥형 감지부의 세장비(길이 대 지름의 비, aspect ratio, L/D)를 변화시키면서 접촉조건에 따른 변형게이지 부착지점에서의 변형률 분포 특성을 분석하였다. 이를 통하여 임의의 세장비에서의 접촉조건을 제시하였다. 여기에서 제시된 결과를 토대로 로드셀 시제품을 제작하여 특성 시험한 결과 로드셀의 정밀도가 매우 향상될 수 있음을 확인하였다.

2. 유한요소해석

기둥형 감지부를 갖는 로드셀의 설계는 끝단 효과를 최소화시키는 것이 매우 중요하다. 끝단 효과를 줄이기 위해서는 세장비를 크게 하는 것이 유리하지만, 너무 커지면 굽힘 변형에 의한 영향이 커질 뿐만 아니라 힘을 측정할 때 로드셀의 축방향의 변위가 커져 측정 시스템의 안정도가 떨어진다. 따라서 로드셀의 이용 측면을 고려할 때 세장비가 작은 로드셀을 설계해야 하며, 정밀 로드셀을 구현하기 위해서는 접촉조건에 영향을 최소화해야 한다. 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 접촉조건에 따른 기둥형 감지부의 스트레인 게이지 부착지점에서의 변형률 거동을 조사하였다.

2.1 유한요소해석 모델

Fig. 3-1-1은 기둥형 감지부의 전형적인 구조로 한국표준과학연구원에서 제작된 바 있으며 설계 용량은 10 MN이다. 전체 높이(H)는 380 mm, 감지부의 지름(D)은 217.2 mm, 접촉부 곡률반경(R)은 200 mm, 감지부 평행부의 길이(L)는 217 mm 로 세장비(L/D)는 1이다.

사용한 유한요소해석 프로그램은 ANSYS Ver. 5.6이고, 재료 상수는 종탄성계수 210 GPa, 푸아송 비는 0.3으로 하였다. 로드셀 감지부가 축대칭임을 고려하여 8절점 2차원 평면요소, 축대칭 조건으로 모델링 하였다. 감지부 평행부의 길이(L), 감지부 바닥면 접촉부의 내경(D_i)과 외경(D_o)을 변수로 하였다. 유한요소 격자의 형상은 Fig. 3-1-2와 같다. 로드셀 감지부 바닥면 접촉부에 있는 절점의 자유도는 x 및 y 방향 모두 구속하였다. 감지부의 곡면부 중앙 절점에 10 MN의 집중하중을 가했다. 또한 게이지 부착 지점 격자의 간격을 0.5 mm로 조밀하게 나누어 변형률의 분포를 세밀하게 분석하였다.

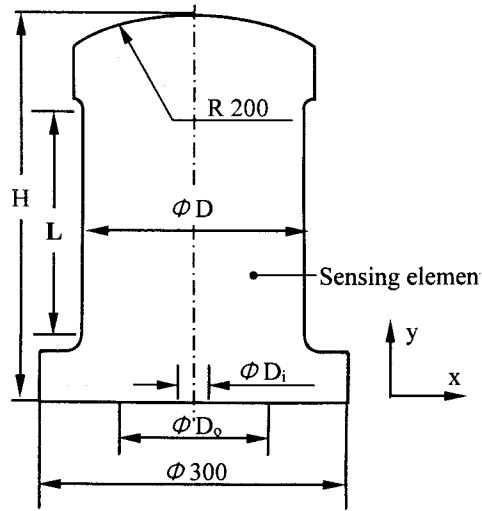


Fig. 3-1-1. Schematic diagram of a column type load cell with the aspect ratio, $L/D=1$ (unit : mm)

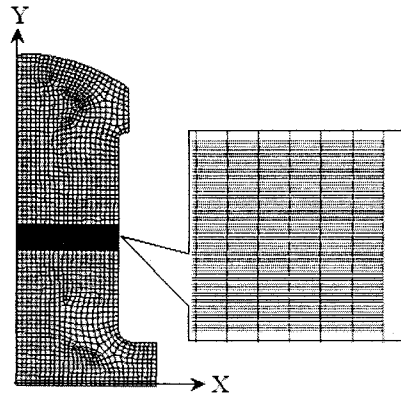


Fig. 3-1-2. Finite element mesh of column type load cell

2.2 접촉조건에 따른 출력 거동 분석

감지부 바닥면의 지름이 클 경우 감지부 바닥면과 접촉 대상체의 평면 가공 정도에 따라 감지부와 접촉 대상체가 전면 접촉을 하지 않고 띠 형태로 접촉할 수 있다. 고정밀 로드셀을 구현하기 위해서는 접촉조건이 달라지더라도 스트레인 게이지 부착지점에서의 변형률 분포가 균일하도록 설계하여야 한다. 본 연구에서는 감지부 접촉면의 외경과 내경의 영향을 조사하였다. 외경의 영향을 알아보기 위해 접촉면 내경 D_i 를 30 mm로 고정하고 외경 D_o 를 100 mm에서 300 mm까지 2 mm씩 증가시키면서 그 사이에 있는 절점의 자유도를 x, y 방향 모두 구속하였으며 각각의 경우에서 축방향 변형률을 계산하였다. 일반적으로 기둥형 로드셀의 출력은 축방향의 스트레인 게이지 2개와 원주방향의 스트레인 게이지 2개로 이루어진 완전

결선 브리지 회로(Full bridge circuit)로 구성된다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석으로부터 얻어진 축방향 변형률(ϵ_{avg})을 식 (3.1.1)에 대입하여 로드셀의 출력으로 변환하였다. 이때 축방향 변형률은 게이지 부착 지점에 있는 7개 절점의 변형률을 평균하였다.

$$\left(\frac{E_o}{E_i}\right) = \frac{(1+\nu)K\epsilon_{avg}}{2 - \{(1-\nu)K\epsilon_{avg}\}} \quad (3.1.1)$$

여기서, E_o 은 출력 전압, E_i 는 입력 전압, ν 는 푸아송 비, K 는 게이지 상수, ϵ_{avg} 는 축방향 변형률이다.

유한요소해석 결과 접촉면 외경이 146 mm일 때의 로드셀 출력이 최대가 되었다. Fig. 3-1-3는 로드셀의 출력거동을 보여주는 것으로서, 이때 편차는 식 (3.1.2)로부터 계산된다.

$$Deviation = \frac{E - E_{max}}{E_{max}} \times 100(\%) \quad (3.1.2)$$

여기서, E 는 감지부 접촉면의 외경 D_o 가 100 mm에서 300 mm까지 2 mm씩 증가할 때 각 경우의 출력이고, E_{max} 는 그중의 최대출력이다. D_o 값이 146 mm 일 때 곡선의 기울기가 0이다. 따라서 D_o 를 146 mm로 설계할 때 로드셀 출력에 대한 접촉면의 영향을 최소화할 수 있다.

감지부 접촉면의 내경의 영향을 조사하기 위해 감지부 접촉면의 외경 D_o 를 146 mm로 고정하고, 접촉면의 내경 D_i 를 30 mm에서 80 mm까지 2 mm씩 증가시키면서 게이지 부착지점에서의 축방향 변형률을 구하였다. 로드셀 출력 및 편차는 식 (3.1.1)과 식 (3.1.3)으로부터 계산하였다.

$$Deviation = \frac{E - E_{D_i=30mm}}{E_{D_i=30mm}} \times 100(\%) \quad (3.1.3)$$

E 는 감지부 접촉면의 내경 D_i 가 30 mm에서 100 mm까지 2 mm씩 증가할 때 각 경우의 출력이고, $E_{D_i=30mm}$ 는 D_i 가 30 mm일 때 출력이다. Fig. 3-1-4는 접촉면 내경 D_i 변화에 따른 로드셀의 출력 편차 거동이다. D_i 가 커질수록 편차 곡선의 기울기가 커진다. 이것은 접촉면 내경을 작게 설계할수록 로드셀 출력에 대한 접촉면의 영향이 작아짐을 보여준다.

따라서 세장비가 1인 기동형 로드셀의 경우 감지부 바닥면의 접촉을 D_i 는 30 mm, D_o 는 146 mm로 설계함으로써 로드셀 출력에 대한 접촉면의 영향을 최소화할 수 있다. 실제의 설계에서는 위의 조건과 감지부 재료의 항복강도를 고려하여 접촉부위의 내·외경을 결정하여야 한다.

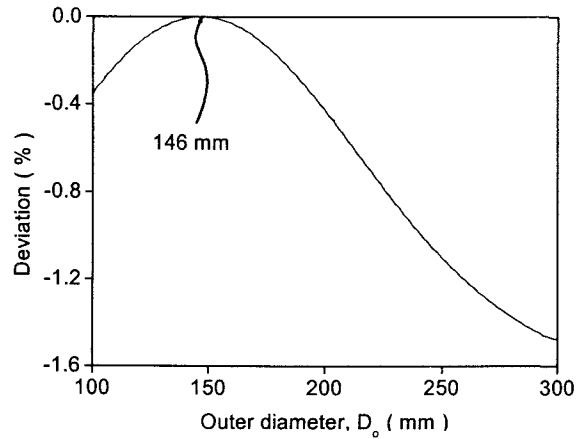


Fig. 3-1-3. The Deviation of output voltage obtained from Eq. (2) with the change of outer diameter, D_o , in case of aspect ratio, $L/D=1$ and $D_i=30$ mm

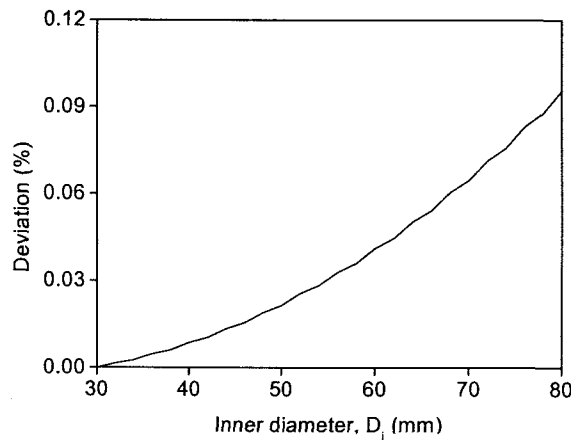


Fig. 3-1-4. The Deviation of output voltage obtained from Eq. (3) with the change of inner diameter, D_i , in case of aspect ratio, $L/D=1$ and $D_o=146$ mm

2.3 세장비에 따른 출력거동 해석

Compact형 로드셀을 구현하기 위하여 세장비 0.3 ~ 1 범위에 대해 접촉조건에 따른 로드셀 출력거동을 해석하였다. 감지부의 지름을 217 mm로 고정하고 감지부의 길이를 변화시키며 세장비를 조정하였다. Fig. 3-1-5는 각각의 세장비에 대한 감지부 접촉면의 외경 D_o 에 따른 로드셀의 출력 거동을 보여준다. 세장비가 작아질수록 출력은 감소하고 출력값의 변화 폭은 커지고 있다. Fig. 3-1-6는 각각의 세장비에 대한 감지부 접촉면의 외경에 따른 로드셀의 출력 편차거동을 보여준다. 편차는 각각의 세장비에서 출력이 최대인 값을 기준으로 식 (3.1.2)로부터 구하였다. 세장비가 1인 경우와 같이 나머지 세장비에서도 출력이 최대인 부분에서 출력 편차가 가장 작은 부분이 나타났다. 세장비가 작아질수록 출력 편차가 완만한 범

위가 축소되고 있다. 이것은 세장비가 작아질수록 곡선의 기울기가 급격히 변하는 것을 의미한다. 따라서 세장비가 작아질수록 로드셀의 출력은 접촉조건에 더욱 민감하다. 최대 출력을 얻는 로드셀 지지부의 외경은 세장비가 1.0인 경우 146.0 mm, 0.8인 경우 178.0 mm, 0.6인 경우 204.0 mm, 0.5인 경우 218.0 mm, 0.3인 경우 244.0 mm로 나타나 세장비가 작아질수록 최대 출력이 나타나는 감지부 접촉면의 외경은 축중심으로부터 멀어지고 있다. 이것은 세장비가 작아질수록 접촉면의 외경을 크게 설계함으로써 로드셀 출력에 대한 접촉면의 영향을 줄일 수 있음을 의미한다.

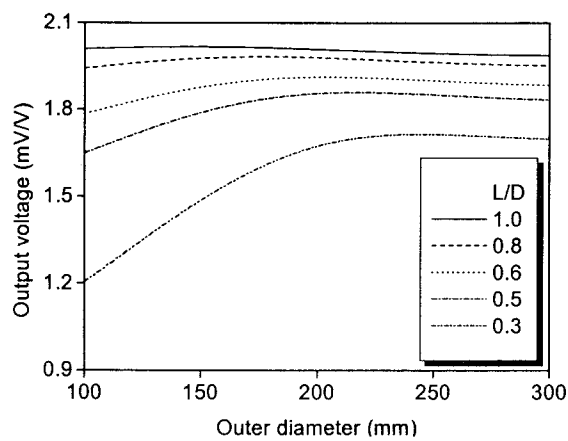


Fig. 3-1-5. The output voltage with the change of outer diameter, D_o , in case of the aspect ratio, L/D , being changed 0.3 to 1.0 and $D_i=30$ mm

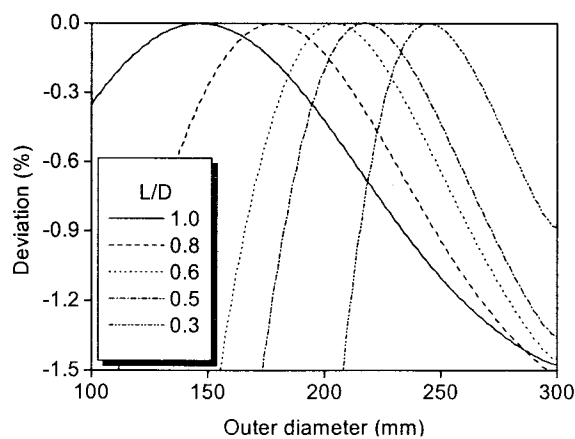


Fig. 3-1-6. The deviation of output voltage with the change of outer diameter, D_o , in case of the aspect ratio, L/D , being changed 0.3 to 1.0 and $D_i=30$ mm

Fig. 3-1-7은 각각의 세장비에 대한 감지부 접촉면의 내경에 따른 로드셀 출력 편차거동을 보여준다. 편차는 D_i 가 30 mm 일때의 출력을 기준으로 식 (3)으로부터 구하였다. 해석에서는 감지부 접촉면의 외경을 각 세장비에서 최대 출력을 얻는 외경으로 고정하였다. 세장비가 1인 경우와 같이 나머지 세장비에서도 내경이 증가할수록 편차 곡선의 기울기가 증가하고 있다. 따라서 감지부 접촉면의 내경을 작게 설계함으로써 로드셀 출력에 대한 접촉면의 영향을 줄일 수 있다.

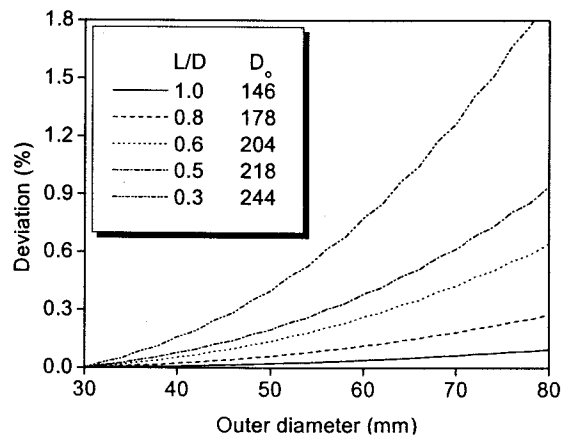


Fig. 3-1-7. The deviation of output voltage with the change of inner diameter, D_i , in case of the aspect ratio, L/D , being changed 0.3 to 1.0

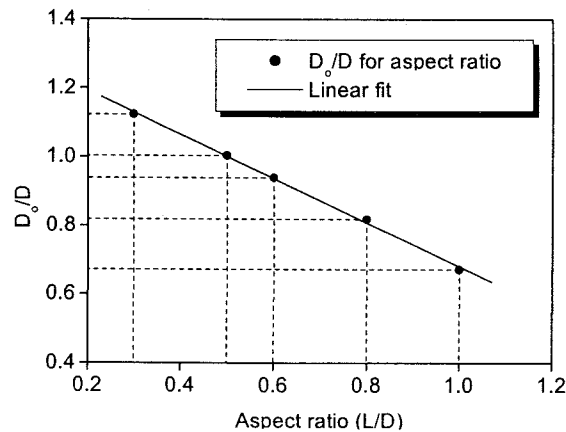


Fig. 3-1-8. The change of D_o/D_i as a function of aspect ratio, L/D , for obtaining the maximum output voltage

2.4 세장비변화에 따른 감지부 접촉조건 설계

Fig. 3-1-8은 각 세장비에 따라 끝단효과의 영향을 줄이기 위한 로드셀 감지부 접촉면의 외경을 보여준다. 세장비가 클수록 감지부 접촉면의 외경이 작아지나, 접촉부의 응력분포를 고려하여 설계하여야 한다. 세장비와 감지부 접촉면의 외경은 선형적으로 반비례하고, 다음 식 (3.1.4)로 세장비과 감지부 접촉면의 외경 비를 나타낼 수 있다.

$$\frac{D_o}{D} = 1.3213 - \left\{ 0.6402 \times \frac{L}{D} \right\} \quad (3.1.4)$$

3. 검 증

3.1 로드셀의 제작 및 실험

로드셀의 감지부의 재질은 고용량 힘센서의 탄성체로 많이 사용되는 니켈-크롬-몰리브덴강인 SNCM 8종을 사용하였다. Fig. 3-1-9과 같이 한국표준과학연구원의 10 MN 유압식 힘표준기로 하중을 가하였으며, 사용된 지시계는 HBM사가 제작한 DK38S6이었다. 시험 절차는 사전부하를 3회 가한 후 5단계로 나누어 증가순 본시험을 2회, 증가·감소순 본시험을 1회 실시하여 비직선도 오차, 왕복도 오차, 반복도 오차 등의 특성을 보기 위한 특성평가를 수행하였다. 유한요소해석을 통해 설계한 접촉조건을 검증하기 위해서는 로드셀의 감지부 바닥면이 임의의 접촉면을 갖도록 가공하여야 한다. 그러나 이러한 방법은 비용과 제작 시간에 있어서 제약을 받는다. 따라서 본 논문에서는 하나의 감지부와 세개의 로드셀 지지부를 제작하여 다양한 접촉조건을 구현하였다. 이렇게 함으로써 로드셀 제작에 따른 오차를 배제하여 접촉상태에 따른 영향만을 분석할 수 있었다. 제작된 로드셀 지지부의 치수는 Table 3-1-1과 같다.

3.2 유한요소해석과 실험 비교

유한요소해석 결과 세장비가 1인 로드셀의 경우 감지부 접촉면 형상의 영향이 작은 접촉조건은 감지부 접촉면의 내경 D_i 가 30 mm, D_o 가 146 mm 이었다. 그러나 감지부의 항복 응력과 안전을 그리고 힘표준기의 안전을 고려하여 D_o 가 168 mm, 176 mm, 209 mm 인 경우에 대해서 실험을 수행하였다. Fig. 3-1-10에서 실선은 유한요소해석에 의한 출력을 접촉면 외경이 168 mm일 때의 출력을 기준으로 구한 편차곡선이다. 접촉면 외경이 168 mm인 지지부를 사용했을 때의 출력을 기준세가지 형태의 지지부를 사용했을 출력을 계산한 편차가 점으로 표시되었다. 이렇게 서로 편차를 비교함으로써 유한요소해석에 의한 출력거동과 실험에 의한 출력거동을 비교하였다.

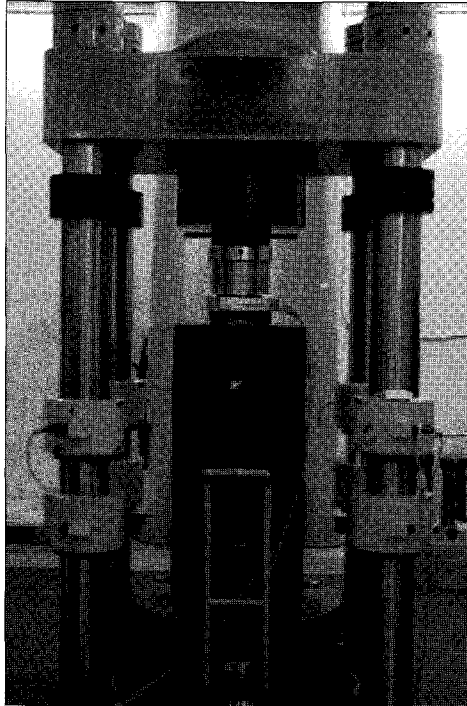


Fig. 3-1-9. The experiment for evaluating of a compact load cell using 10 MN hydraulic force standards machine in KRISS.

Table 3-1-1. Three cases for variation of a compact load cell with change of D_i , D_o , t , unit=mm

Case	D_i (mm)	D_o (mm)	t (mm)
1	30	168	50
2	30	176	50
3	30	209	50

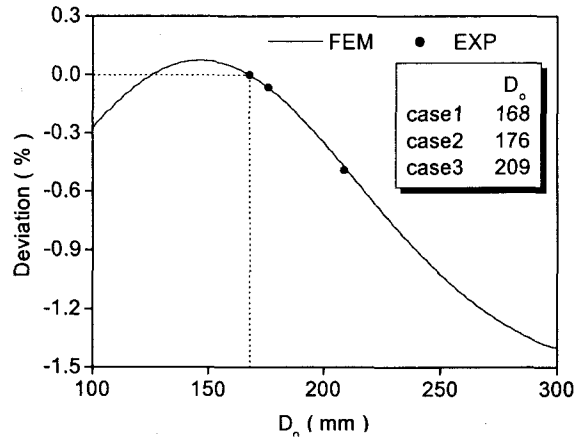


Fig. 3-1-10. The comparison of deviation between experiment and FEM over output voltage of case 1 in case of aspect ratio, $L/D=1$, $D_i=30$ mm

3.3 특성시험

Table 3-1-2는 세장비 1인 로드셀의 특성평가 결과이다. 전면 접촉조건, D_i 가 30 mm이고 D_o 가 300 mm 일 때 출력은 1.54401 mV/V, 비직선도 오차는 0.341 %, 왕복도 오차는 0.013 %, 반복도 오차는 0.004 % 이었다. 이에 비해서 case1의 로드셀 지지부를 사용하여 접촉조건을 개선한 경우 출력은 1.56071 mV/V, 비직선도 오차는 0.058%, 왕복도 오차는 0.006 %, 반복도 오차는 0.003 %로 출력값은 약 1.1 % 증가하고, compact한 로드셀의 특성은 크게 향상되었다.

Table 3-1-2. The characteristics of a compact load cell in case of three cases and whole contact condition($D_i=30$ mm, $D_o=300$ mm)

	whole contact	case1	case2	case3
Output (mV/V)	1.54401	1.56071	1.55897	1.55115
N.E.	0.341	0.058	0.080	0.173
H.E	0.013	0.006	0.005	0.010
R.E.	0.004	0.003	0.002	0.003

where, N.E. : nonlinearity error, H.E. : hysteresis error

R.E. : repeatability error

4. 결 론

본 보고서에서는 대용량 compact 구조의 기동형 로드셀 설계를 위해 유한요소 해석을 수행하였으며, 이로부터 끝단효과의 영향을 줄이는 접촉 조건을 갖는 로드셀 지지부를 설계·제작하여 기존 로드셀보다 로드셀 특성이 현격히 개선되었다. 본 연구는 다음과 같은 결론을 제시하고자 한다.

- (1) 유한요소해석 결과 최대 출력이 나타나는 감지부 접촉면의 외경에서 출력 편차의 기울기가 작으므로 안정한 출력을 얻을 수 있고, 세장비가 작을수록 편차의 변화량이 크다.
- (2) 세장비가 작을수록 최대출력이 나타는 로드셀 지지부의 외경이 축중심에서 멀어졌다.
- (3) 기존의 전면접촉을 하는 compact 구조의 로드셀 성능을 향상시키는 방안으로 로드셀 지지부를 이용하는 방법을 제시하였다.
- (4) 끝단효과의 영향을 줄이기 위해 설계된 로드셀 지지부를 사용한 결과 기존 로드셀에 비해 출력은 1.54401 mV/V에서 1.56071 mV/V로 약 1.1 % 증가하였고, 비직선도 오차는 0.341 %에서 0.058 %로, 반복도 오차는 0.004 %에서 0.003 %로, 왕복도 오차는 0.013 %에서 0.006 %로 그 특성이 개선되었다.

나. 다축 힘센서 동특성 해석

1. 서 론

힘의 물리량은 방향뿐만 아니라 크기를 가지고 있는 벡터이다. 기계 부하는 6개의 성분-3개의 힘 성분과 3개의 모멘트 성분-으로 나눌 수 있다. 그러므로, 완벽하게 힘을 규정하기 위해서는 6-성분의 값을 알아야 한다. 멀티(multi)-성분 힘-모멘트 센서는 힘과 모멘트를 동시에 측정할 수 있는 장치이다.

멀티-성분 힘-모멘트 센서는 로봇, 공구 그리고 자동차 분야에 실제적으로 사용되게 전에 정확한 평가를 필요로 한다. 멀티-성분 센서의 정적 평가는 멀티-성분 힘 교정 기계에서 사용된다. 그러나, 멀티-성분 센서는 동역학 방식에 자주 사용되기 때문에, 멀티 성분 센서의 동역학 평가가 매우 중요하다.

힘 센서의 동역학 특성을 조사 방법은 2가지 종류가 있다. 하나는 고주파 가진(harmonic excitation) 방법[9-12]이고, 다른 방법은 충격 자극(impact excitation) 방법이다[13-15]. 본 보고서에서는 2가지 방법 중에 진동 테이블 시스템과 다 채널을 사용한 동역학 분석 시스템을 이용하는 고주파 가진 방법을 사용하였다. 충격력을 조건으로 하여 6축 힘-모멘트 센서의 동역학 연구가 추론 중이다[16]. 본 보고서에서는 독일의 PTB 설비에서 사용한 3-성분

[17-19]과 6-성분의 힘-모멘트 센서들의 동적 연구를 기술하고자 한다[20, 21].

2. 다축 힘센서

Fig. 3-1-11은 3-요소 힘-모멘트 센서의 구성도를 보여준다. 센서의 용량은 각각의 횡력(횡 방향 힘) 성분들 F_x 와 F_y 가 200N이고, 비틀림 모멘트 M_z 의 성분은 10 Nm이다. 스트레인 게이지들 XC1과 XC2는 횡단한 힘 F_x 의 압축 변형을 검출한다. 그리고 변형 게이지들 XT1 그리고 XT2는 횡단한 힘 F_x 를 위해 인장 변형을 한다. 변형 게이지 YC1, YC2, YT1, 그리고 YT2는 횡력 F_y 를 측정하고 ZC1, ZC2, ZT1, 그리고 ZT2 스트레인 게이지는 비틀림 모멘트 M_z 을 측정한다. 그 감지 요소는 알루미늄 2024-T4을 방전 가공과 커팅 가공하여 제작하였다.

센서의 F_x 감도는 2.515810^{-3} , F_y 감도는 2.538010^{-3} (mV/V)/N 이고 모멘트 M_z 의 감도는 5.140410^{-3} (mV/V)/(Nm)이다. 최대 정적(static) 간섭 오류는 대략 0.99%이다.

Fig. 3-1-12는 대칭 형식의 6-성분 힘-모멘트 센서를 보여준다. 이 센서의 장치(unit)는 위아래 2개의 링으로 되어있는데, 서로 마주보고 있으며 구멍을 뚫어 고정시켰다. 또한 감지 장치는 수평과 수직 부품이 서로 직각으로 되어있는데 교차형으로 되어있다. 교차 보는 여러 개의 수직 수평 부품은 쌍으로 구성되어있고 각각의 쌍이 교차되어 구분된다. 교차 보의 수직 수평 부품은 상하 링으로 간격을 유지한다. 그러나 상하 링은 커넥터(conector)로 연결되어 있어 단일 구조물화 하였다. 교차 보의 수평 부품의 끝은 상위 링에 부착하였고, 수직 부분은 하위 링에 부착하였다. 그 결과 수직하고 수평한 부품의 경계 조건이 달라진다. 그러므로 6-축 힘-모멘트 센서의 교차 보의 감지 요소들이 90° 대칭의 기하학적 형태이지만 수평하고 수직한 방향은 비대칭성을 가지고 있다.

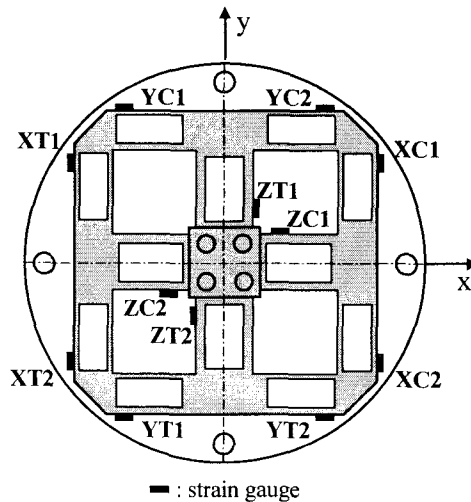


Fig. 3-1-11. Schematic diagram of a 3-component force-moment sensor

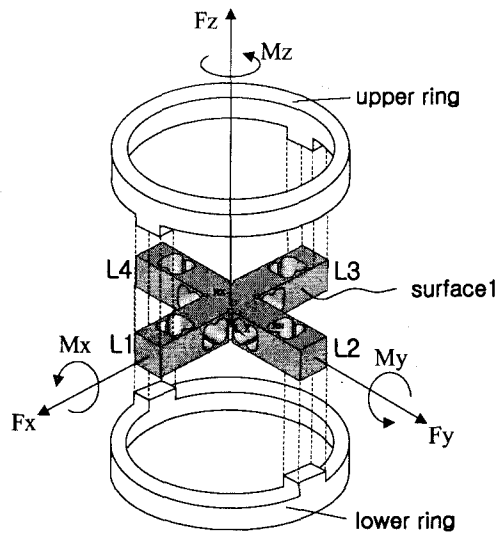


Fig. 3-1-12. Configuration of the binocular type 6-component force-moment sensor

이 센서의 감도는 F_x 가 2.608410^{-3} (mV/V)/N, F_y 는 2.590510^{-3} (mV/V)/N, F_z 는 2.359710^{-3} (mV/V)/N, M_x 는 4.304010^{-3} (mV/V)/(Nm), M_y 는 4.321710^{-3} (mV/V)/(Nm) 이고 M_z 는 2.926510^{-3} (mV/V)/(Nm) 이다. 모든 부품의 결합에 의한 오차는 3% 미만이다.

3. PTB의 동적 힘 평가 장치

힘 변환기로 동역학 측정을 할 때에는 힘 변환기의 불확실한 동력학적 반응으로 인해 몇 퍼센트 정도의 오차가 발생한다. 따라서 동역학은 :

$$S = \frac{U_v}{F} \quad (3.1.5)$$

힘 측정기의 출력 U_v 와 동적 반응력 F 의 비로 정의 할 수 있다. 힘 표준기는 정적인 힘을 측정하기 위해 설계되었기 때문에 동역학적인 힘 연구에는 사용될 수 없다. 그러므로 특별한 설비와 측정 절차들은 힘 측정기의 동특성을 연구하기 위해서 PTB에서 개발한 측정기를 이용하였다. 힘 측정기의 동역학 교정의 원리는 질량 힘은 현실적으로 규정할 수 있도록 하였다. 그래서 힘 변환기는 전기 진동 테이블(electrodynamic shaker) 위에 설치하였다. 그리고 Fig. 3-1-13에서 보여주는 것 같이 나사로 고정된 변환기 위에 설치하였다.

진동 테이블에 의해 가진(excitation)된 힘 변환기 작동한 동역학 힘은 다음과 같다.

$$F = (m_1 + m_e) \cdot \ddot{x}_1 \quad (3.1.6)$$

여기서, \ddot{x}_1 은 부하질량 m_1 과 힘 변환기의 끝점의 질량 m_e 의 가속도이다. 단순 방정식 (3.1.6)는 부하 질량의 상태운동에 대한 영향을 받지 않는다. 또한 힘은 벡터량이기 때문에 측면에 발생하는 힘의 영향은 반드시 고려되어야 한다. 측면에 발생하는 힘은 공기 베어링을 사용하여 감소시킬 수 있다. 상대 운동의 영향을 고려하기 위해 동역학 힘은 가속분포 $a(x, t)$ 와 밀도 ρ 에 따른 분포를 규정해야 한다.

$$F = \int_V \rho \cdot a(x, t) \cdot dV \quad (3.1.7)$$

가속도 데이터 분포의 결정을 위해 멀티-성분 가속도 측정은 Fig. 3-1-13에 보여주는 요소가 필요하다. 참고문헌[10, 11]에 제시된 동역학 힘을 계산하는 법을 사용하였다. 보다 정확하게 식 (3.1.6)와 식 (3.1.7)의 동역학 힘은 Newton의 힘의 정의로부터 증명할 수 있다. 모든 힘 측정기는 동역학 감도는 힘 변환기와 측정 증폭기의 주파수 응답을 포함한다[12].

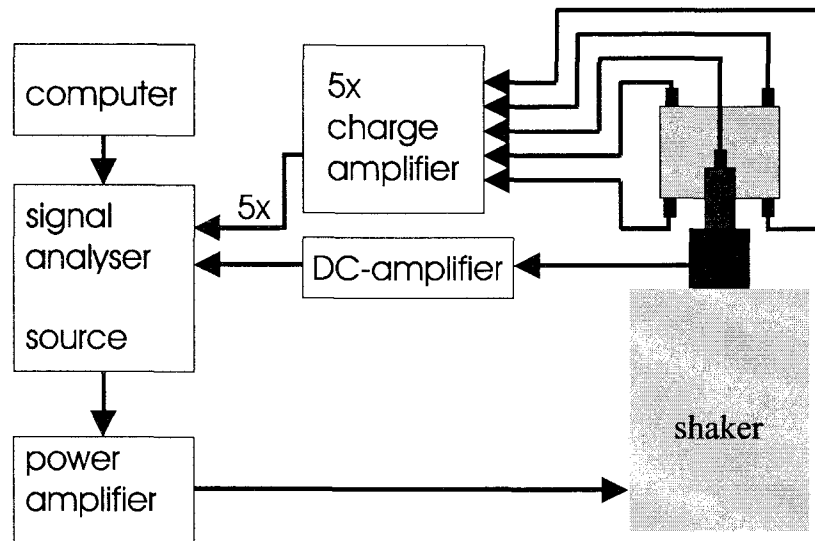


Fig. 3-1-13. Calibration principle for dynamic force measurement

4. 실험 장치

Fig. 3-1-14는 6-축 힘-모멘트 센서의 수직력 성분 F_z 의 동특성을 분석하기 위한 실험 장치의 구성도를 보여준다. 센서는 진동 테이블 시스템(B&K 4802 + B&K 4818)을 위를 향하게 설치하여 센서의 수직력 방향과 진동 테이블 시스템의 수직 방향과 일치하게 설치하였다. 힘 모멘트 센서의 상단부에 0.9Kg의 외부 질량(external mass)을 부착시켰다. 6-축 힘-모멘트 센서에는 디스크 타입 어댑터를 사용하였다. 외부 물질은 수직으로 진동 테이블을 진동시켜 동역학 힘을 활성화하는 역할을 한다. external 질량은 강철로 만들어졌다. 2개의 진동 가

속도는 질량의 가속도를 측정하는 external 질량 위에 설치하였다. 진동 가속도계(a_{m1} 와 a_{m2} , B&K 8305)는 질량의 가속도를 측정하는 external mass 위에 설치하였다. 가속도계(a_b , Kistler 8002K)는 Figure 4에서 보여주는 것과 같이 베이스(base)의 가속도 신호를 측정하는데 사용된다.

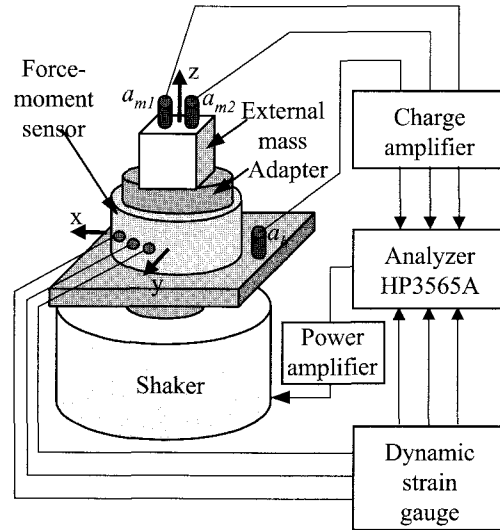


Fig. 3-1-14. Schematic diagram of the experimental setup for the normal force component F_z

항상 6-축 힘-모멘트 센서로부터 F_z 성분을 포함한 3개의 힘/모멘트 신호는 DC증폭기 MC10을 이용한 동역학 증폭기 HBM MGC를 통과한다. 그리고 모든 가속도와 힘/모멘트 신호들은 다 채널 FFT 분석기 HP 3565A에 연결된다. 이 분석기는 전압 증폭기 B&K 2708를 통해 진동 테이블 시스템을 제어한다.

Fig. 3-1-15는 횡력 F_x 와 F_y 의 동특성 해석을 위한 개략도를 보여준다. 힘-모멘트 센서는 수직으로 작동하는 진동 테이블 위에 설치된다. 힘-모멘트 센서는 센서의 횡력 방향과 진동 테이블의 수직 방향이 일치하도록 하도록 수직 어댑터를 설치하였다. 센서는 external mass에 부착하였고 진동 가속도계(a_m , B&K 8305)는 mass에 설치하였다. 두개의 가속도계(a_b 과 a_a , B&K 8002)는 Figure 5에서 보여주는 것처럼 베이스(a_b)와 어댑터(a_a)의 상부에 가속도 신호를 측정하는데 사용하였다. Counter mass는 회전 운동을 감소시키기 위해 어댑터 위에 설치하였다.

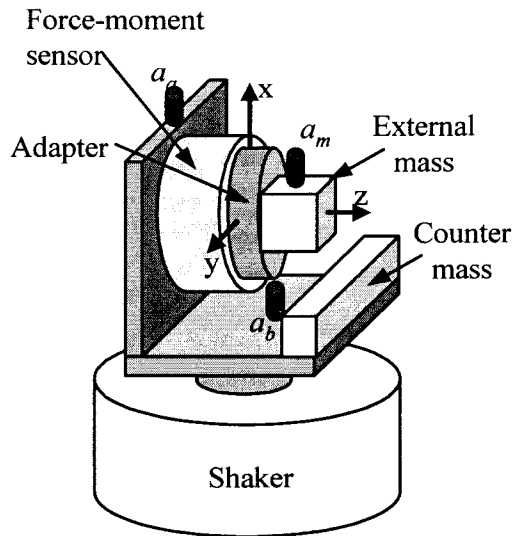


Fig. 3-1-15. Experimental setup to examine the transverse force components F_x and F_y

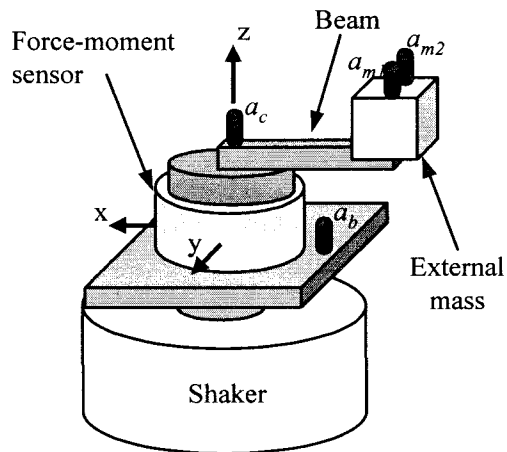


Fig. 3-1-16. Experimental setup to examine the moment components M_x and M_y

Fig. 3-1-16과 3-1-17은 힘-모멘트 센서의 모멘트 성분을 연구하기 위한 실험 장치를 설치한 모습을 보여주고 있다. Fig. 3-1-16은 M_x 와 M_y 를 측정하기 위한 그림이고, Fig. 3-1-17은 M_z 를 측정하기 위한 그림이다. 동역학 모멘트 활성화를 위해 0.1m 길이의 보를 사용하였다. 보는 알루미늄으로 만들어졌고 횡단면 치수는 1818 mm 이다. 센서는 보의 한쪽 끝의 중앙에 부착하였고 다른 보의 끝에는 external mass 위에 센서를 부착하였다. 가속도계는 보(a_c , Kistler 8002K)의 정면에 설치하였고 다른 하나는 external mass(a_m , B&K 8305)에 설치하였다.

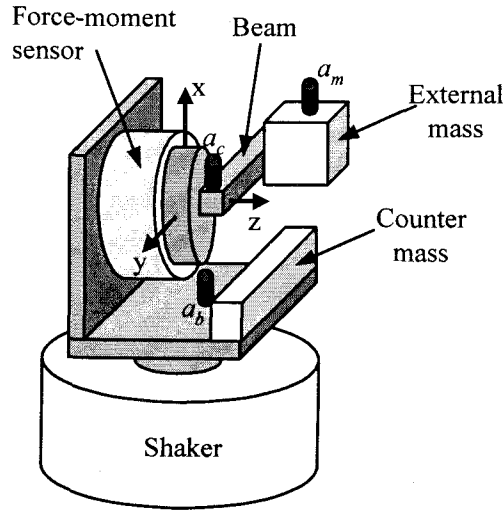


Fig. 3-1-17. Experimental setup to examine the moment component M_z

본 연구에서의 주파수 응답 함수(FRF)는 정현 스위프 방법(sine sweep method)을 이용하여 측정하였다. sine sweep는 일정 비유로 주파수를 증가하는 정현파를 활성화하는 방법으로 활성 주파수를 측정한다. 20Hz에서 100Hz까지 10Hz씩 증가시키면서 측정을 수행하였고 모든 주파수에서 20회씩 실험하였다.

5. 3분력 힘센서의 측정 결과

5.1 사전 연구

힘-모멘트 센서의 감도는 실제 작용한 힘 또는 모멘트의 전기적 출력 비로 정의된다. 감도는 주파수의 함수로써 평가할 수 있다. 실제 적용된 힘은 Newton 제 2법칙에 의해 가속도와 상당 질량의 결과로 평가할 수 있다. 가속도는 외부 물질에 설치된 가속도계에 의하여 측정할 수 있다. 상당 질량은 external mass, 가속도계의 질량, external mass를 조립하기 위한 나사들의 질량과 3축 힘-모멘트 센서의 내부 질량의 합이다.

실제 모멘트는 다음과 같다 :

$$M_a = m_{ext, equ} \cdot a_m \cdot l + m_{beam} \cdot \frac{a_m + a_c}{2} \cdot \frac{l}{2} + I_{iz} \cdot \frac{a_m - a_c}{2} \quad (3.1.8)$$

여기서, M_a 는 실제 모멘트이고 $m_{ext, equ}$ 는 상당 external mass이다. 여기서 질량은 부착된 가속계와 조립에 사용된 나사의 질량이다. 다시 말해 external mass의 합이다. m_{beam} 은 보의 질량, I_{iz} 는 M_z 축의 내부 관성모멘트, a_m 은 external mass의 가속도, a_c 는 보 끝의 정

면에 있는 가속도이고 l 는 보의 길이이다.

센서의 내부 질량은 정적으로 측정하였다. 센서 위를 향하는 x -축으로 내부 질량을 내부 질량 측정을 측정하였다. 그 후 센서는 180° 회전시켜 다시 F_x 신호를 측정하였다. F_x 내부 질량은 다음과 같다. :

$$M_{ix} = \left| \frac{F_{x+} - F_{x-}}{2g_{loc}} \right| \quad (3.1.9)$$

여기서, M_{ix} 는 F_x 축의 내부 질량, g_{loc} 는 국부 중력 가속도이고, F_{x+} , F_{x-} 는 측정된 힘 값이다. F_y 축의 횡력의 내부 질량은 같은 방법으로 측정할 수 있다. 측정된 F_x 와 F_y 축의 내부 질량은 각각 97.6g와 83.8g이다.

내부 관성 모멘트도 이러한 방법으로 측정하였다. 그러나 이 경우에는 부를 부착하고 비틀림 모멘트 M_z 축은 센서가 부착된 외부 질량을 활성화시켰다. 내부 관성 모멘트는 다음과 같다:

$$I_{iz} = \left| \frac{M_{z+} - M_{z-}}{2g_{loc}} \right| \quad (3.1.10)$$

여기서 M_{z+} , M_{z-} 는 측정된 모멘트 값이다. 내부 관성모멘트는 $98.6 \text{ g} \cdot \text{m}$ 이다.

5.2 횡방향 힘의 분석

횡력 힘의 연구는 Figure 5에서 묘사된 실험 장치를 이용하여 수행하였다.

Fig. 3-1-18은 횡력 축 F_x 의 실험에서 베이스(base)의 가속도(a_b)를 고려한 external mass의 가속도(a_m)의 힘과 모멘트의 FRF(F_x , F_y , M_z)를 보여준다. 모든 FRF의 첫번째 공진 주파수는 250 Hz에서 가장 큰 피크(peak)가 발생한다. 다른 피크는 FRF의 힘 신호와 가속 신호는 580 Hz에서 발생한다. 그러나 이 모멘트 신호에서는 FRF의 피크(peak)가 나타나지 않는다.

Fig. 3-1-19(a)는 정적 감도 표준화된 횡력 축 F_x 성분의 동적 감도이다. 그 감도는 센서의 작동 주파수 범위가 550 Hz 가 되기 전까지는 1에 가깝고 감소한다. 다시 말해 센서의 사용범위는 550 Hz 이다. 이들 피크 주파수들은 가속도의 반-공진(anti-resonant) 주파수와 일치한다. 감도는 상당 질량과 가속도의 결과인 센서의 실제 힘인 전기적 출력과의 비이다. 그 결과 가속도의 반-공진 주파수에서 감도의 피크가 발생한다.

Fig. 3-1-19(b)는 F_x 와 F_y 그리고 F_x 와 M_z 사이에서 발생하는 간섭을 보여준다. 이 간섭은 the F_x 성분에 관한 비교 성분(F_y 또는 M_z)의 전기적 출력의 비로 정의한다. 센서의

사용 주파수 내에서 F_x 와 M_z 사이의 간섭은 1보다 작게 나타난다.

센서를 180° 전도시켜 횡력 성분 F_x 의 동역학 측정을 수행하였다. 측정 결과는 Fig. 3-1-19와 유사하였다. 또한 횡력 성분 F_y 에 관한 실험에서도 Fig. 3-1-19와 유사하였다.

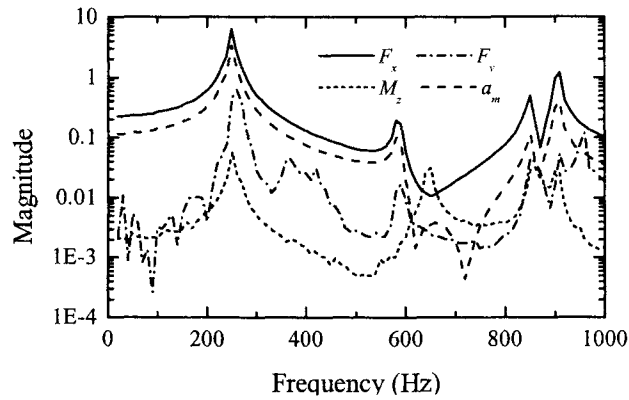


Fig. 3-1-18. Frequency response functions during examination of the transverse force component F_x

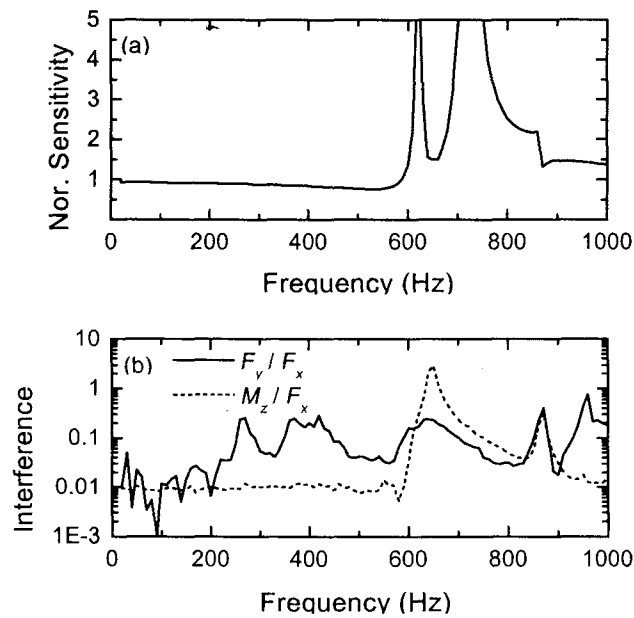


Fig. 3-1-19. Sensitivity and interference of the transverse force component F_x ; (a) sensitivity; (b) interference

5.3 비틀림 모멘트 성분의 분석

비틀림 모멘트의 성분이 연구는 Fig. 3-1-17에서 묘사된 실험 장치를 이용하여 실험을 수행하였다.

Fig. 3-1-20은 FRF의 힘과 모멘트 신호(F_x , M_z), external mass에서의 가속도(a_m)와 비틀림 모멘트 M_z 요소의 실험에 사용된 베이스 가속 신호(a_b)를 고려한 보의 정면의 가속도(a_c)를 보여준다. 여기서 센서의 아래 방향이 +x축이 되도록 설치하였다. 보는 센서의 y축 방향으로 설치하였다. FRF 선도에서 100Hz, 600Hz와 770Hz의 주파수에서 3개의 피크가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 중에서, external mass의 FRF의 가속도는 100Hz에서 가장 높은 피크를 나타낸다. 그러나 보의 정면 FRF는 100Hz에서 피크가 나타나지 않는다. 이것은 100Hz의 주파수에서 external mass와 보의 상호 운동이 센서의 운동을 지배하는 것을 의미한다. 보다 높은 주파수에서 센서의 자체 운동은 보다 커진다.

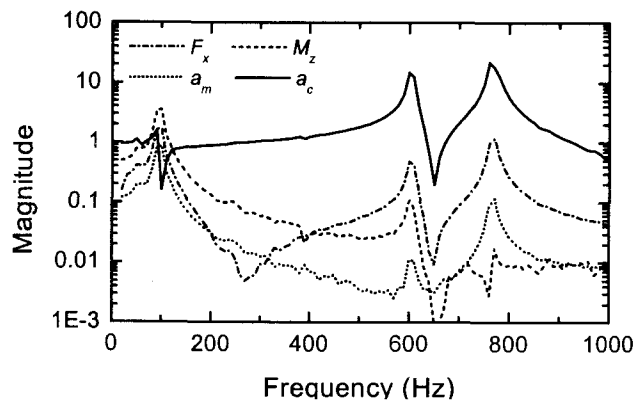


Fig. 3-1-20. Frequency response functions for the component of twisting moment M_z

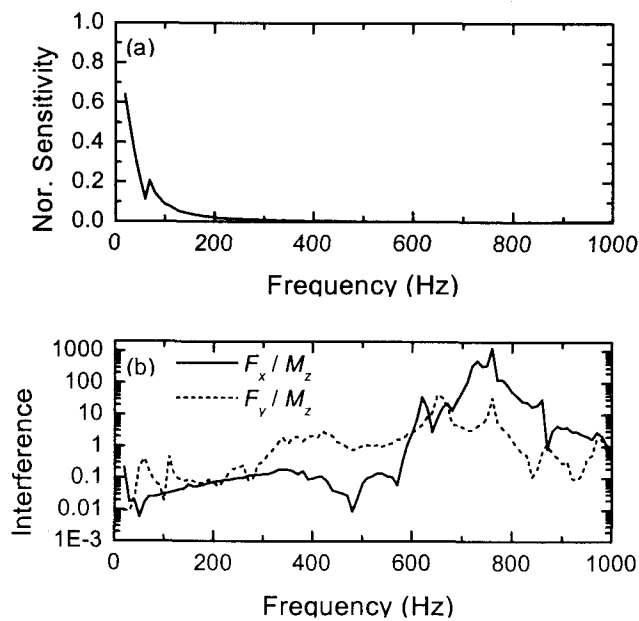


Fig. 3-1-21. Sensitivity and interference of the component of twisting moment M_z ;
(a) sensitivity; (b) interference

Fig. 3-1-21(a)는 정적 감도 상태의 표준화된 비틀림 모멘트 M_z 성분의 동적 감도이다. 그 감도는 저주파에서 1쪽으로 향하는 경향을 보인다. 그리고 주파수가 증가할수록 급격히 감소한다. Figure 11(b)는 M_z 와 F_x 그리고 M_z 와 F_y 사이의 간섭을 나타낸다. 이 간섭은 낮은 주파수 범위에는 1보다 작다. 보와 external mass는 센선의 x-축을 따라 진동하는 센서이기 때문에 원하지 않은 횡력 요소 F_x 가 발생한다. 그러므로 M_z 와 F_x 사이의 간섭을 계산하여 F_x 성분을 보상하여 주어야 한다.

보의 방향을 180° 전도하였을 때에도 유사한 결과를 얻을 수 있다. 그리고 심지어 센서를 아래쪽으로 +y 축으로 90° 돌렸을 때에도 유사한 결과를 보였다.

6. 6분력 힘센서의 측정 결과

6.1 사전 연구

내부 질량과 내부 관성 모멘트는 5.1처럼 계산 할 수 있다. 측정된 내부 질량 F_x , F_y , F_z 는 각각 539.7g, 522.4g, 546.5g 이다. 측정된 내부 관성모멘트 M_x , M_y , M_z 는 각각 149.8gm, 80.1gm, 97.3gm이다.

6.2 힘성분 F_z

수직력 성분은 Fig. 3-1-14에서 묘사된 실험 장치를 이용하여 결정할 수 있다.

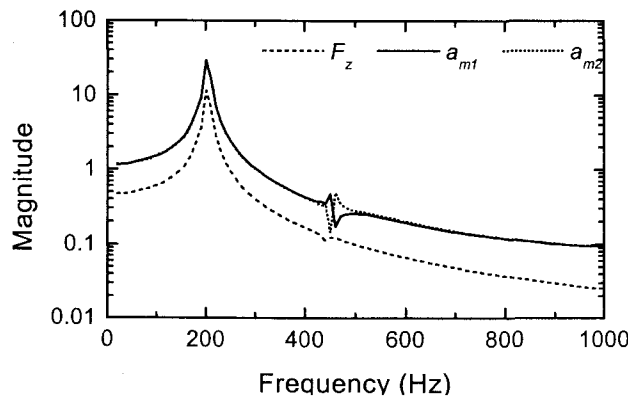


Fig. 3-1-22. Frequency response functions when examining the normal force component F_z

Fig. 3-1-22는 FRF의 힘 신호 F_z 와 베이스 가속도 신호(a_b)를 고려한 external mass (a_{m1} , a_{m2})에서의 가속도 신호를 보여준다. 그림에서의 FRF는 물리량으로 변환하지 않은 전기적 신호를 계산한 것이다. 본 논문의 모든 FRF는 동일한 것이다. 모든 FRF는 200Hz에

서 공진이 명확히 나타난다. 대략 450Hz에서 FRF의 몇몇 가속 신호에서 외란이 발생하였다. 이 주파수에서 2개의 가속도 신호는 상반되는 작용이 나타나는 것을 볼 수 있다. 한곳은 증가하는 반면 다른 한 곳은 감소한다. 2개의 가속도계는 y-축을 따라 설치하였다. 그래서 y-축 방향의 운동이 없는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3-1-23(a)은 정적 상태에서 수직력 성분 F_z 를 표준화한 동적 감도이다. 여기서 감도를 계산하려는 2개의 가속도를 얻을 수 있다. 420Hz까지는 주파수가 증가할수록 1에서 조금씩 감소하지만 처음 감도는 1에 가깝고 420Hz에서 진동이 발생한다. 이 주파수를 이후의 감도 값은 외란을 나타낸다. 그리고 주파수가 증가할수록 빠르게 감소하는 것을 보여준다. 이 외란 값을 지나서는 보다 높은 주파수에서는 주파수가 증가할수록 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있다. F_z 성분의 사용 범위는 대략 420 Hz 정도로 한정한다.

Fig. 3-1-23(b) F_z 와 다른 힘/모멘트 요소들 사이의 간섭을 보여준다. F_z 성분의 전기적 출력비로 정의할 수 있다. 사용주파수 420Hz 범위내에서의 간섭은 1 보다 작고 대략 450Hz에서 진동이 발생하고 간섭이 1보다 높아지는 것을 볼 수 있다.

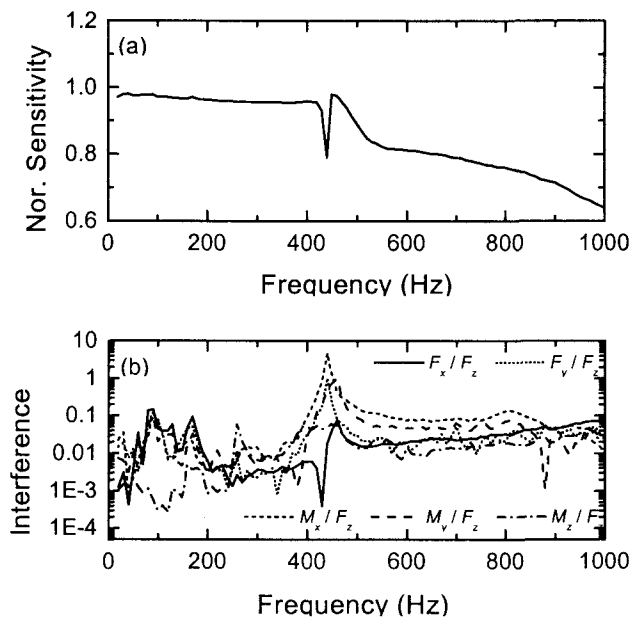


Fig. 3-1-23. Sensitivity and interference of the normal force component F_z ; (a) sensitivity; (b) interference.

6.3 힘성분 F_x , F_y

횡력 성분 F_x 와 F_y 는 Fig. 3-1-15에서 묘사된 실험 장치를 이용하여 측정하였다.

Fig. 3-1-24(a)는 FRF의 힘과 모멘트 신호(F_x , M_y) 그리고 횡력 성분 F_x 의 베이스 가속 신호(a_c)를 고려한 external mass(am)의 가속도를 보여준다. FRF는 110 Hz와 400 Hz에서

피크를 나타낸다. Figure 14(b)는 횡력 F_y 요소의 실험한 FRF를 나타낸다. 110Hz와 410Hz에서 피크가 발생하는 것을 볼 수 있다. 경향성은 Fig. 3-1-24(a)와 유사하다. 그러나 주목할 만한 2가지 차이는 410 Hz에서 2번째 피크 주파수가 Fig. 3-1-24(a)와 다르다. 그리고 모멘트 성분 M_x 의 FRF의 피크가 매우 낮은 값을 나타내고있다.

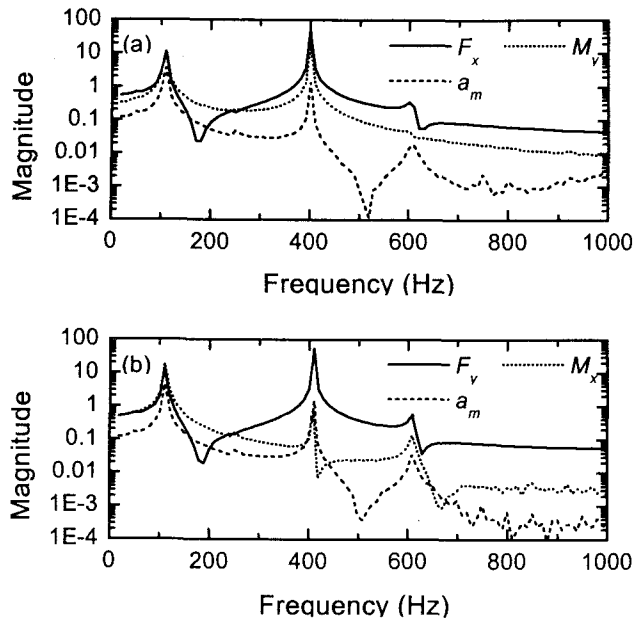


Fig. 3-1-24. Frequency response functions when examining the transverse force components F_x and F_y ; (a) for F_x ; (b) for F_y

힘-모멘트 센서의 기하학적 대칭성은 앞에서 언급한 것처럼 Fig. 3-1-24(a)와 (b)가 불일치하는 원인이 된다. Figure 2에서 쉽게 알 수 있듯이 교차보의 x 방향의 부품의 끝은 위쪽 링에 부착되어 있고 y 방향 부품의 끝은 아래쪽 링에 부착되었다. 교차보의 x, y 방향 부품의 경계 조건이 다르다. F_x 와 M_x 성분은 보의 양쪽 끝이 고정되는 동안 중앙부를 통해 y 방향 부품으로 이동한다. 반대로 F_y 와 M_y 성분은 보의 중앙이 고정되는 동안 양쪽 끝을 통해 x 방향으로 이동한다. 다른 경계 조건으로 인한 기하학적 비대칭성은 서로 다른 동특성의 원인이 된다.

FRF 모멘트 신호는 첫 번째 피크가 두 번째 피크보다 더 높게 나타난다. 반대로 FRF의 힘 신호는 두 번째 피크가 첫 번째 피크 값보다 더 높게 나타난다. 그러므로 주목해야 될 점은 첫 번째 피크는 주로 회전 운동에 의해 증가되고 두 번째 피크는 주로 직선 운동에 의해 증가한다.

Fig. 3-1-25 (a)는 정적 감도 횡력 F_x 와 F_y 를 표준화한 동적 감도이다. 이 감도들은 매우

비슷하다. 감도는 저주파에서는 1에 가깝고 약 170 Hz까지의 주파수에서는 감소한다. 반면 그 이상의 주파수에서는 감도가 증가하고 복잡한 특징을 나타낸다. 비록 그림에는 나타나지 않았지만 520 Hz에서 높은 피크의 감도를 나타냈다. 이 피크 주파수는 가속도의 반-공진 주파수와 일치한다. 그 감도는 상당 질량과 가속도의 결과인 실제 힘의 전기적 출력 비이다. 따라서 가속도의 반-공진 주파수에서 감도의 피크가 발생한다. F_x 와 F_y 의 사용범위는 정적 감도의 약 70%의 감도가 감소한 100Hz로 한정한다. 70%의 감도는 동력의 절반을 의미한다.

Fig. 3-1-25(b)는 F_x 와 F_y 사이의 간섭을 보여준다. 다시 말해 F_x 성분의 실험결과에서 F_x 와 F_y 의 전기적 출력의 비를 의미한다. 그리고 F_y 함수의 역함수이다. 간섭은 1 미만이다.

획력 성분인 $-F_x$ 와 $-F_y$ 의 결정을 위해 센서를 180° 전도하여 동역학 힘을 구하였다. 측정된 결과는 Fig. 3-1-25와 매우 유사하다.

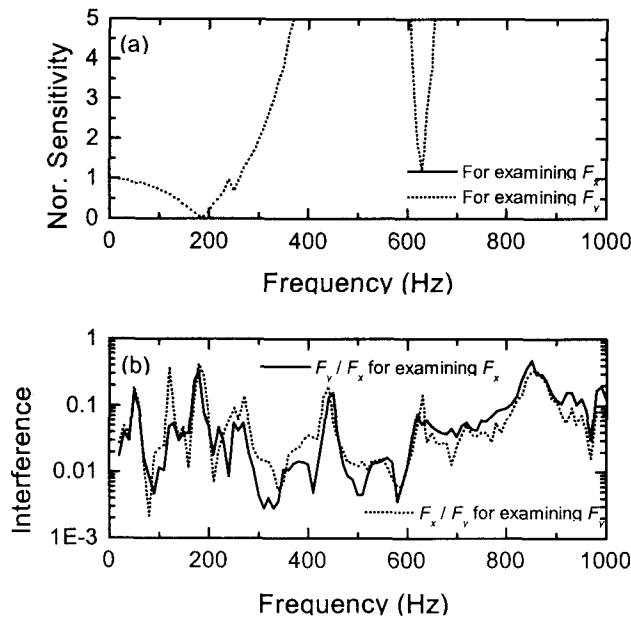


Fig. 3-1-25. Sensitivities and interference of the transverse force components F_x and F_y ; (a) sensitivity; (b) interference

6.4 모멘트 성분

모멘트 성분 M_x 와 M_y 의 연구는 Fig. 3-1-26에서 묘사된 것처럼 장치를 설치하여 실험하였고 모멘트 성분 M_z 의 연구는 Fig. 3-1-27에서 묘사한 것처럼 장치를 설치하여 실험하였다.

모든 모멘트 성분들은 낮은 주파수에서는 1쪽에 있고, 주파수가 증가함에 따라 빠르게 감소하는 경향을 나타내었다. 사용할 수 있는 주파수 범위는 좁은 주파수 범위로 한정된다.

7. 결 론

본 보고서는 3-성분과 6-성분의 힘-모멘트 센서들의 동특성을 연구하였다. 그러기 해서 진동 테이블 시스템과 다 채널 동역학 분석기로 구성된 고주파 가진 시스템을 사용하였다.

동역학 감도는 주파수에 따라 감소한다. 특히, 모멘트 감도가 빠르게 감소하는 센서는 동적 모멘트 측정에 부적합하다. 이러한 현상은 여러 가지 이유로 발생한다. 그 이유 중에서 센서의 기계 구조물에 의해서 발생된 간섭이 중요한 요소이다. 간섭 때문에 입력 에너지의 몇몇 부품은 운동을 다른 형태로 바꾸어야 한다. 주파수의 간섭이 증가함에 따라 주파수의 감도는 감소한다.

3 성분 힘-모멘트 센서는 기하학적 대칭 때문에 90° 의 대칭 동특성을 보인다. 6 성분 힘 센서는 90° 대칭 동특성 뿐만 아니라 x축과 y축의 기하학적 구조 때문에 비대칭 특성을 보인다.

본 보고서의 6 성분 FRF는 힘 모멘트 센서의 동특성을 제시한다. 그러나 본 논문에서 FRF의 상세 해석을 제외 한 이유는 본 논문의 주제가 센서의 동특성에 중점을 두었기 때문이다.

힘-모멘트 센서는 단지 정적인 고려만으로 설계되고 개발되었다. 센서의 강도는 매우 낮다. 그러므로 사용 주파수 범위는 매우 좁은 주파수로 한정된다. 그러므로 넓은 동적 응용에 적합한 광범위한 주파수 범위의 다 성분 힘-모멘트 센서의 개발이 요구된다.

제 2 절 피에조 필름 응용기술 개발

1. 서 론

산업의 발달과 함께 화물차량의 운행이 증가하는 추세에 있으며, 특히 과적차량은 노면의 파손 및 수명단축, 교량 붕괴사고의 원인이 되고 있다.

우리나라의 교통개발연구원이 조사한 바에 의하면 과적차량에 의해 파손되는 도로의 유지 보수비는 연간 약 7,500억원이 소요된다.[22] 기존의 과적차량 단속시스템에 사용되는 스트레인게이지식 축중감지기는 경제성이 떨어지고, 설치면적을 넓게 차지하여 설치가 쉽지 않을 뿐만 아니라, 10 km/h 이상에서는 정확도가 떨어진다는 단점이 있다. 이러한 점을 보완하여 압전재료를 이용한 축중감지기 개발이 진행되고 있다. 축중감지기는 과적차량을 단속하는 자동계중시스템에 적용하는 센서이다.

미국이나 독일 등 선진국에서 사용되는 축중감지기는 피에조 폴리머 원재료를 가공하여 제작되었다. 가늘고 긴 형태의 감지기로서 설치가 용이하며, 피에조 재료의 특성상 동적 물리량 측정에 적합하다.

자동계중시스템의 핵심부품인 피에조 축중감지기는 현재 외국에서 전량 수입되므로 국산화가 필요하다. 축중감지기의 국산화 개발은 피에조 기술의 확보 및 이에 따른 수입대체, 수출 효과를 기대할 수 있을 것이다. 또한, 자동계중시스템에 사용되어 과적차량을 단속함으로써 도로의 파손 및 교량 붕괴사고를 사전에 예방할 수 있어 연간 수천억원의 도로보수비를 절약할 수 있을 것으로 기대된다. 그리고, 무역수지 개선 효과를 기대할 수 있을 뿐만 아니라, 국가 ITS(Intelligent traffic system) 사업에 적용이 가능하리라 본다.

외국 선진국의 제품에서 사용한 폴리머 원재료의 직접가공은 특허가 걸린 문제이기 때문에 본 연구에서는 쉽게 구매가 가능한 PVDF (poly- vinylidene fluoride) 필름을 사용하여 새로운 축중감지기를 개발하고자 하였다.

PVDF 필름과 황동튜브를 이용하여 축중감지기를 제작하고, 각 위치에 따른 출력 전압의 균일도를 측정하였다. 정격 충격량을 발생시킬수 있는 충격 발생 장치를 설계·제작하여 하중 변화에 따른 출력의 선형도를 평가하였다. 그리고, 온도를 변화시킨 후 축중감지기의 온도에 대한 특성 평가를 하였다.

2. 기존 축중감지기

본 연구에서는 현재 선진국에서 제작되어 상용되고 있는 축중감지기를 분석해보았다. Fig. 3-2-1은 피에조 폴리머 원재료를 사용하여 제작된 미국의 MSI사와 독일의 PAT사의 축

중감지기 단면을 나타낸 것이다.

Fig. 3-2-1에서 보는 바와 같이 가운데에는 구리선 다발이 존재하며, 그 주위를 피에조 재료가 둘러싸고 있다. 피에조 재료는 다시 황동튜브에 둘러싸여있는 구조이다. 피에조 분극방향은 가운데 구리선에서 밖으로 향하는 방향으로 되어있다. 그 단면의 폭과 높이는 각각 1.8 mm와 6.7 mm이며, 길이는 1.8 m이다. 구리선의 직경은 0.06 mm이며, 이는 센서의 +극 역할을 한다. 황동튜브의 두께는 0.5 mm로서, 이는 센서의 -극 역할을 한다. 이러한 구조는 외부로부터 변형을 받았을 때 구리선과 황동튜브 사이에서 전기적 출력을 얻게 되는데, 그 크기는 센서 두께 방향의 압축력과 관계가 있고, 센서 길이 방향의 굽힘력에는 반응을 하지 않는다.[23]

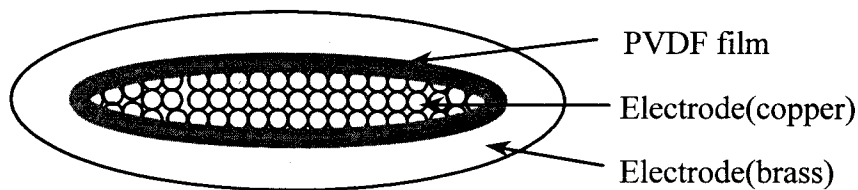


Fig. 3-2-1. WIM sensor made of co-polymer

3. 축중감지기의 감지부 설계 및 제작

기존의 축중감지기 원리를 참고하여, 본 연구에서는 2장의 PVDF 필름을 서로 접착한 형태의 새로운 개념의 축중감지기를 고안하였다. 본 연구에서 사용한 PVDF 필름은 다양한 형태와 크기로 구매가 가능한 재료이다. 구입된 PVDF 필름을 이용하여 기존의 축중감지기를 대체할 수 있는 새로운 모델을 고안하였다.

본 연구에서 선정한 PVDF 필름은 양 표면에 전극처리가 되어있고, 그 위에 비닐을 코팅한 제품이다. 필름의 단면 크기는 4.8 mm × 0.4 mm이고, 길이는 1480 mm이며, 필름 1장의 커패시턴스는 12.1 nF이다. 필름에는 이미 전극처리가 되어있어, 필름 표면이 기존 제품의 구리선 역할을 하기 때문에 기존 제품과는 다르게 구리선이 더 이상 필요가 없는 구조이다. 그러나, 센서 외부의 황동튜브는 센서 형태 유지 및 보호 측면에서 계속 사용하였다. Fig. 3-2-2는 본 연구에서 제작한 축중감지기의 단면을 개략적으로 나타낸 것이다. 따라서 황동튜브의 압축에 의해 서로 접착된 2장의 PVDF 필름에 형성된 +와 -전극으로부터 출력전압이 취득된다.

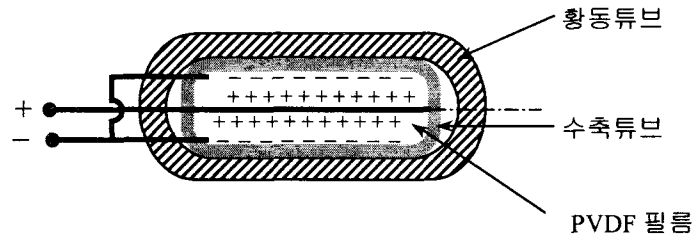


Fig. 3-2-2. Cross-section of WIM sensor made of PVDF film

3.1 황동튜브의 설계 및 제작

설계된 황동튜브는 단면의 크기가 7.7 mm×2.6 mm이고, 두께와 길이가 각각 0.5 mm, 1500 mm이다. 황동튜브는 압출과정을 거쳐 제작되었다. 황동튜브 내부의 균일도를 알아보기 위해 15 cm 간격으로 절단한 후 단면형상을 측정하였다. 10개의 단면치수는 균일도가 상대 표준편차 2.5 %로 양호함을 보였다. 황동튜브는 센서가 도로상에 설치되었을 때 주행 차량의 중량에 대해 PVDF 필름을 보호하는 역할을 하게 된다.

황동튜브와 PVDF 필름이 접촉하는 부분에 고무와 같은 탄성체가 삽입된다면 균일한 출력 신호를 얻을 수 있을 것으로 판단하고, 고무로 된 수축튜브를 이용하는 방법을 사용하였다.

3.2 압전 센서의 제작

황동튜브 내부에서 PVDF 필름의 정렬을 도와주는 역할과 함께 센서의 균일도 향상을 위하여 고무 재질의 수축튜브를 이용하였다.

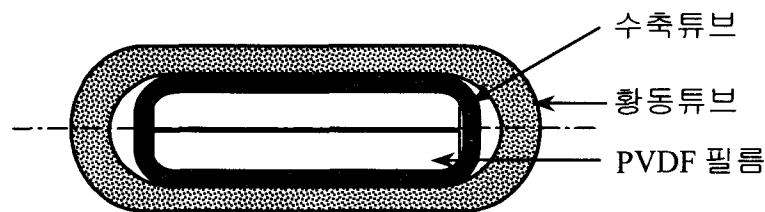


Fig. 3-2-3. Cross-section of WIM sensor using shrinkable tube

압전센서의 제작 과정을 설명하면, 두장의 PVDF 필름을 서로 겹쳐서, 지름 4 mm의 수축 튜브에 삽입한 후 가열·수축시켰다. Fig. 3은 수축튜브가 사용된 축중 감지기 단면을 나타 낸다. 그다음 PVDF가 삽입된 수축튜브를 황동튜브에 삽입하여 센서를 완성하였다. 황동튜브 에 삽입시 마찰력이 작용하여 밀어주는 힘 만으로는 삽입이 불가능하였으므로, 수축튜브 외

부에 약간의 윤활제를 바르고, 황동튜브 반대편에서 와이어를 이용하여 필름을 당겨주는 방법으로 제작하였다. 로울러를 통해 압연을 해주게 되면, 압하율이 커지더라도 수축튜브의 탄력이 작용하므로 PVDF 필름에도 손상이 없었으며, 균일한 압연 효과를 얻을 수가 있었다. 압연이 균일하게 되어야 센서의 출력신호는 높은 균일도를 갖게되므로, 압연 작업시 압하율 8 % 이하로 여러번에 걸쳐 제작하였다. 여기서 사용된 압하율 K는 다음과 같이 계산된다.[24]

$$K = \frac{H_i - H_o}{H_i} \quad (3.2.1)$$

여기서, H_i 는 압연 전 두께를, H_o 는 압연 후 두께를 나타낸다.

Fig. 3-2-4는 황동튜브를 로울러를 통해 압연하는 과정을 보여주고 있으며, Fig. 3-2-5는 완성된 축중감지기의 외형을 보여주고 있다. 그림에서 검은색 띠는 수축튜브로 포장된 PVDF 필름을 나타낸다.

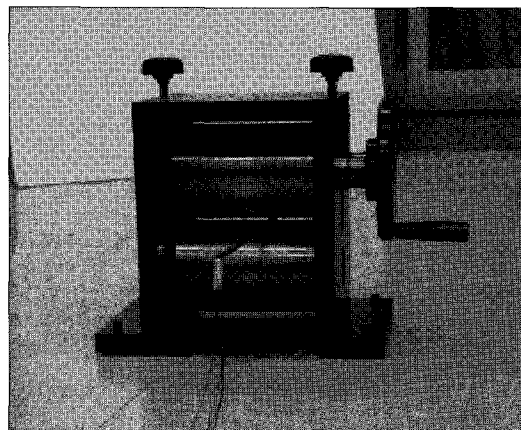


Fig. 3-2-4. Rolling of WIM sensor

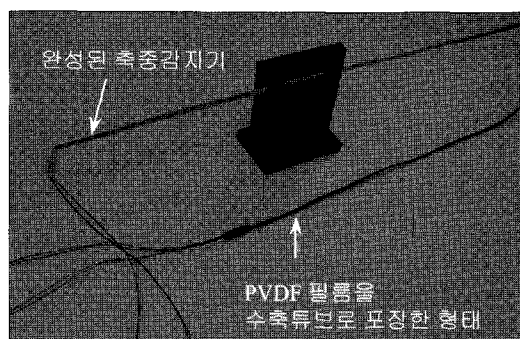


Fig. 3-2-5. The picture of WIM sensor

4. 축중감지기의 특성 평가

4.1 균일도 평가

길이가 1.5 m인 축중감지기는 위치에 따른 신호의 균일도가 높아야 센서로서의 제기능을 수행할 수 있다. 수축튜브를 이용하여 제작된 축중감지기의 출력신호 균일도를 검증하고, 출력특성을 파악하기 위하여 충격시험을 행하였다. 측정은 10 cm 간격으로 10 군데의 지점에 대하여 수행하였다. 감지기를 고정시키기 위해 지그를 사용하였고, 충격해머로부터 축중감지기에 충격력을 가해주었다.

사용된 충격해머는 힘센서가 내장되어 있는 F/T 8200 이다. F/T 센서의 기준 감도는 4.15 pC/N이고, 최대 선형 오차는 $\pm 0.40 \%$ 이다. 충격해머로부터 입력된 힘을 측정하고, 축중감지기의 출력 신호를 측정함으로써, 축중감지기의 감도를 계산할 수 있다. 각 위치에 대하여 4 번의 측정을 수행하여, 이의 평균값을 위치별 감도로 정하였다.

측정된 출력값을 표본이 되는 미국의 MSI 사 축중감지기와 비교하였다. Table 3-2-1은 측정 결과를 나타낸다.

Table 3-2-1. Sensitivity of the WIM sensor

위 치	출력전압(mV/N)	
	This study	MSI
1	4.36	23.97
2	3.64	21.11
3	4.45	21.88
4	4.13	21.37
5	4.56	20.94
6	3.59	24.36
7	4.39	21.69
8	4.20	18.23
9	3.93	19.06
10	4.33	20.61
평 균	4.16	21.32
상대표준편차(%)	8.11	8.85

실험 결과, 본 연구에서 제작한 축중감지기의 감도는 8.11 %의 상대 표준편차를 나타내었고, 이는 비교 대상인 MSI사 축중감지기 감도의 상대표준편차인 8.85 %보다 우수한 성능을 나타내었다.

본 연구에서 개발한 축중감지기의 평균 감도는 4.16 (mV/N)으로 MSI사 제품에 비해 약

20 % 정도의 감도를 나타낸다. 이는 두 제품의 커패시턴스 차이에 기인한다. 본 연구에서 개발한 충격감지기의 커패시턴스는 25.4 nF이고, MSI사 충격감지기의 커패시턴스는 7.4 nF이다. 전압과 커패시턴스와의 관계는 서로 반비례 관계에 있으므로, 본 연구에서 제작한 충격감지기의 평균 출력 전압이 MSI사 제품에 비해 낮게 나타나는 것이다.

4.2 선형도 평가

충격감지기 출력의 선형도를 평가하기 위해서는 충격감지기에 가해지는 하중을 증가시키며 출력을 측정할 필요가 있다. 이를 위하여 정량적인 충격을 가할 수 있는 펜덜럼 충격 발생 장치를 설계·제작하였다. 펜덜럼 추의 무게는 50 g 씩 증가하도록 제작하였으며, 펜덜럼 팔의 길이는 30 cm로 하였다.

펜덜럼 충격에 의한 충격량은 다음과 같다.

$$mv = m\sqrt{2gl} \quad (3.2.2)$$

여기서, m과 v는 각각 추의 질량과 충돌시의 속도를 나타내며, g와 l은 각각 중력가속도와 펜덜럼 팔의 길이를 나타낸다.

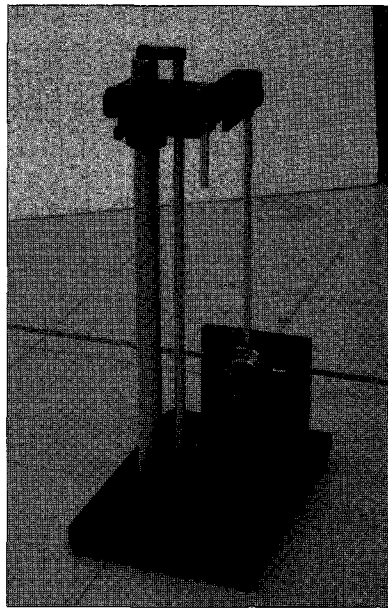


Fig. 3-2-6. Figure of impact generator with WIM sensor

추가적인 추의 인가 없이도 펜덜럼 팔 자체의 질량에 의해 충격량이 발생한다. 따라서, 본 연구에서는 펜덜럼 자체의 충돌에 의해 발생하는 충격량을 50 g의 등가 펜덜럼 추에 의한 충격량과 같게 하고자 하였다. 충격량에 대한 해석으로부터 펜덜럼 팔 자체 질량 mb와, 이에

해당하는 등가 추의 질량 m 사이에는 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있다.

$$\frac{m_b}{m} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (3.2.3)$$

따라서 추의 질량 50 g에 해당하는 펜듈럼 팔의 질량인 81.6 g으로 펜듈럼을 제작하였다. Fig. 3-2-6은 제작된 충격 발생 장치의 모습을 나타낸다.

실험중에 충격 발생 장치에 장착한 추 질량 범위는 50 g ~ 500 g 이다. 하중변화에 따른 출력전압을 측정하기위한 지시계로서 Oscilloscope를 사용하였다. 50 g의 분동으로 추의 질량을 증가시키면서, 각각의 질량에서 세 번의 실험으로 평균값을 택하였다. Fig. 3-2-7은 실험 결과를 나타낸 그래프이다. 추의 질량과 출력 전압 간의 상관계수는 0.98의 선형도를 나타내었다.

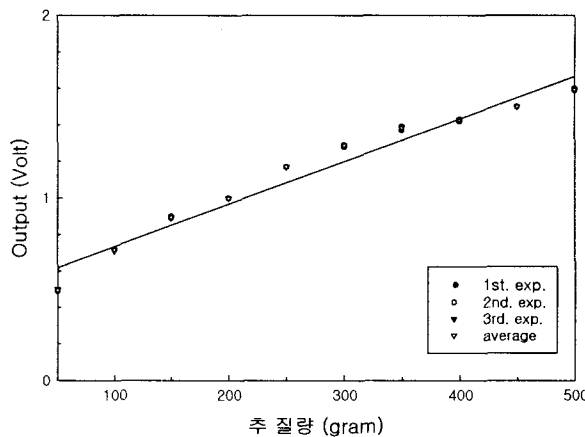


Fig. 7. Linearity of WIM sensor

4.3 온도특성 평가

일반 도로에 설치되어 차량의 중량을 측정하기 위한 축중감지기는 주위 온도에 따라 출력 특성이 다르게 얻어질 수 있다. 축중감지기를 설계·제작하였을 때 선정된 PVDF 필름이나 감지부 재료의 특성, 기계가공 정밀도 및 여러 가지 요인들의 복합작용의 결과로 이상적인 조건하에서 기대하였던 축중감지기 특성과 벗어나는 결과를 얻게 되는 것이 보통이다. 그 중 대표적인 예가 온도변화에 따른 축중감지기의 감도변화이다. 그 이유는 축중감지기를 보호하는 황동튜브와 PVDF 필름 및 수축튜브의 열팽창계수가 상이하므로, 하중에 따른 감도에 변화가 오기 마련이다.

제작된 축중감지기의 온도특성을 실험하기 위해서, 서로 다른 3가지 시험 온도(0 °C, 20 °C, 50 °C)에서 선형도 실험에 사용했던 충격 발생 장치를 이용하여 같은 방법으로 실험을

행하였다. Table 3-2-2는 축중감지기의 온도 특성 실험 결과이다. 실험온도 20 °C를 기준으로 설정하고, 0 °C 와 50 °C에서의 각각의 출력에 대한 상대오차를 계산하였다. 각 온도에 대한 출력 데이터를 1차식으로 fitting하여 직선성 오차를 상대적으로 표시하였다. 그리고, 추 질량에 대한 출력 전압과의 상관계수(correlation coefficient)를 구하였다. 서로다른 3가지의 온도에서 추 질량과 출력 전압간의 상관계수는 0.98을 얻었다. Fig. 8은 3가지 온도에서의 출력값을 그래프화 한 것인데, 0 °C에서의 출력이 20 °C의 기준온도의 출력에 비해 6.33 ~ 11.94 % 낮은 값을 얻었다. 그 이유는 온도 저하에 따른 황동튜브 및 PVDF 필름의 수축으로 인한 것이라 생각된다.

Table 3-2-2. Temperature characteristics of the WIM sensor

추질량 (g)	Output (Volt)			상대오차 (%)	
	0 °C	20 °C	50 °C	0 °C	50 °C
50	0.46	0.49	0.48	-7.43	-3.38
100	0.68	0.72	0.71	-5.58	-0.47
150	0.79	0.89	0.87	-11.94	-2.99
200	0.94	1.00	1.01	-6.33	1.33
250	1.09	1.17	1.17	-6.84	0.00
300	1.20	1.29	1.28	-6.74	-0.26
350	1.28	1.38	1.36	-7.71	-1.45
400	1.32	1.43	1.44	-7.48	0.70
450	1.39	1.50	1.49	-7.11	-0.89
500	1.44	1.59	1.57	-9.83	-1.26

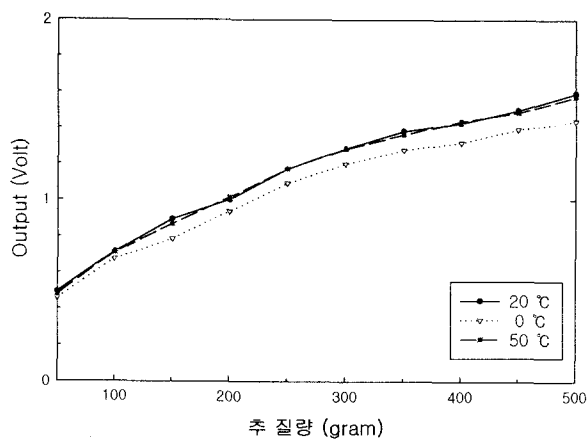


Fig. 3-2-8. Temperature characteristics of the WIM sensor

5. 결 론

본 연구에서는 차량 운행중 하중의 정확한 측정을 위하여 피에조 필름을 이용한 축중감지기를 개발하고자 하였다. 이를 위하여 피에조 필름 2장을 포갠 후, 수축튜브 포장하고, 이를 다시 타원형 단면의 황동튜브에 삽입하여 압연작업을 행하였다.

본 센서의 경우 길이가 긴 띠 형태를 가지며, 따라서 길이 방향에 따른 균일도가 매우 중요한 특성을 가진다. 균일도 향상을 위해 수축튜브를 사용하였으며, 측정결과 비교대상인 미국의 MSI 사의 제품과 비등한 균일도를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 개발한 축중감지기의 균일도는 8.11 % 이었고, MSI사 감지기의 균일도는 8.85 % 이었다.

선형도에 대해서는 추의 질량과 출력간의 상관계수는 0.98 이상의 선형도를 보였다.

온도 특성은 20 ℃와 50 ℃에서는 상대오차가 0 ~ 3.38 %로 차이가 적은 반면, 시험온도 0 ℃에서의 출력은 기준 20 ℃와의 상대오차가 6.33 ~ 11.94 %로 나타났다.

제 3 절 Built-in 센서 기술 개발 I :

원형 기동을 이용한 다축 힘센서

1. 서 론

기계설비의 자동화, 공작기계의 고급화, 로봇의 고정밀화 등으로 여러 방향의 힘과 모멘트를 정확하게 측정해야 할 필요성이 증가하고 있다. 또한 구조물이 대형화 됨에 따라 이의 안전 관리가 중요한 문제가 되고 있다. 그러나 이러한 분야에서 다축 힘/모멘트 센서의 활용은 센서의 비용과 센서의 사용으로 인한 구조물의 강성 저하 문제 때문에 활발하지 못한 실정이다. 그러므로 기계, 토목 및 건축 구조물의 일부분을 힘/모멘트 감지부로 설계하여 구조물에 부하되는 힘/모멘트를 측정하는 연구를 시도할 필요가 있다.

Ono 등[25]은 처짐은 작으면서 큰 스트레인을 측정할 수 있는 병렬평판 구조의 다축 로드셀을 개발하였고, Hatamura 등[26]은 힘 성분을 측정하기 위한 병렬평판 구조와 모멘트 성분을 측정하기 위한 방사평판 구조가 조합된 전체 크기가 $20 \times 20 \times 48 \text{ mm}^3$ 인 소형 다축 로드셀을 개발하였다. 또한 김 등[27]은 병렬평판 구조를 갖는 3분력 로드셀을 개발하였고 강 등[28]은 변형률 분포가 완만하고 가공이 용이한 쌍안경식 6축 로드셀을 설계 제작하였다.

그러나 기존의 다축 로드셀은 감지부의 구조 설계와 다축 성분의 출력 및 상호 간섭 오차를 예상하는 것이 어렵고, 감지부의 강성이 작아 힘 센서를 구조물에 장착함으로써 전체 시스템의 강성이 작아진다는 문제를 갖고 있다. Schwarzingger 등[29]은 3차원 공간상에서 물체를 잡는 그리퍼(gripper)의 힘제어를 위해 그리퍼에 직접 스트레인 게이지를 부착하여 6축의 힘 및 모멘트를 측정하는 연구를 시도하였으나 각 회로의 출력을 성분별로 분리하는 방법이 제시되지 않았다.

본 연구는 대형 구조물 부재의 형상이 기동형이라는 사실에 착안하여 기동을 감지부로 사용하여 다축의 힘 및 모멘트를 성분별로 검출하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 기동형 다축 힘/모멘트 센서

2.1 설계

Fig. 3-3-1은 설계한 원기동형 다축 힘/모멘트 센서의 기본 개념을 보여주고 있으며, 성분별 스트레인 게이지의 부착 위치와 방향은 Fig. 3-3-2와 같다. 여기서 S는 스트레인 게이지를, 첨자는 각 스트레인 게이지의 구별을 위한 임의의 번호를 나타낸다.

Fig. 3-3-3과 같이 힘 및 모멘트 성분을 측정하기 위해 6개의 회로를 구성하였으며, 각 회로에 임의의 번호를 부여하였다. Scir.1은 6개의 회로 중 1번 회로를 의미한다. Scir.1과

Scir.5는 F_x , M_y 검출회로이고, Scir.2와 Scir.4는 F_y , M_x 검출회로이며, Scir.3는 F_z Scir.6는 M_z 검출회로이다.

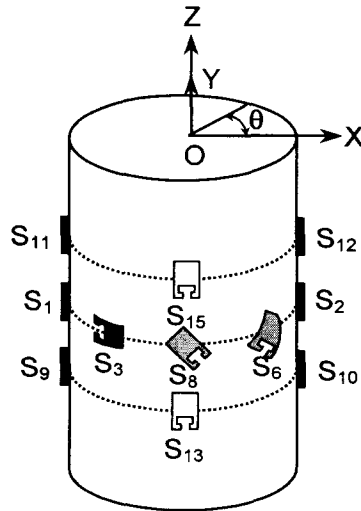


Fig. 3-3-1. A sensing element of column-type for measuring three forces and three moments using strain gage

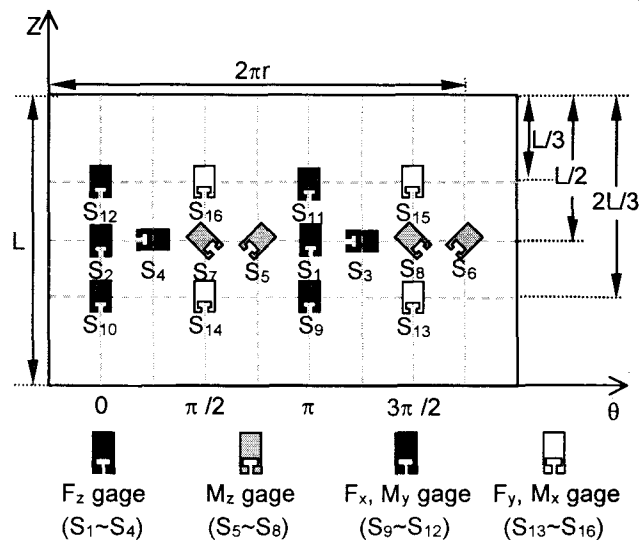


Fig. 3-3-2. Positions of strain gages for the measurement of forces and moments in the six-component load cell

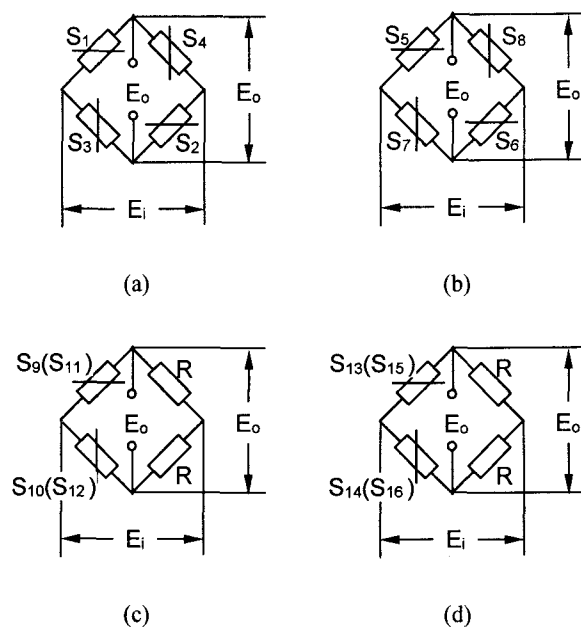


Fig. 3-3-3. Bridge circuit for measuring forces and moments: (a) full bridge circuit, $S_{cir.3}$ for measuring F_z ; (b) full bridge circuit, $S_{cir.6}$ for measuring M_z ; (c) half bridge circuit, $S_{cir.1}(S_{cir.5})$ for measuring F_x, M_y ; (d) half bridge circuit, $S_{cir.2}(S_{cir.4})$ for measuring F_y, M_x

Fig. 3-3-1 ~ Fig. 3-3-3에서와 같이 F_z 검출회로($S1\sim S4$)는 축방향으로 부착된 스트레인 게이지 2개와 원주방향으로 부착된 스트레인 게이지 2개를 갖는 완전 결선 브리지 회로로 구성하였다. F_z 을 가하면 $S1, S2$ 는 인장을 $S3, S4$ 는 포와송비 만큼의 압축을 받는다. 따라서 입력 전압(E_i)에 대한 출력 전압(E_o)의 비는 다음과 같다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{S1} = \varepsilon_{S2} = \frac{4F_z}{\pi D^2 E} \quad (3.3.1)$$

$$\varepsilon_{S3} = \varepsilon_{S4} = -\nu \varepsilon_{S1} \quad (3.3.2)$$

$$\left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{F_z} = \frac{(1+\nu)K\varepsilon}{2 - \{(1-\nu)K\varepsilon\}} \approx \frac{1.3K\varepsilon}{2} \quad (3.3.3)$$

여기서, D 는 감지부의 지름, E 는 탄성계수, ν 는 푸아송비, K 는 게이지 상수이다. 본 논문에서는 200 kN에 해당하는 F_z 을 가했을 때, $S_{cir.3}$ 에서 2 mV/V의 출력이 나오도록 설계하였다. 또한 감지부의 지름(D)에 대한 길이(L)의 비를 2.0 으로하여 끝단 효과의 영향을 작게

하였다[30, 31]. 이러한 과정을 거쳐 설계된 감지부는 지름 28.1 mm, 길이 56.2 mm이었다.

Mz 검출회로(S5~S8)는 축방향에 대하여 $\pm 45^\circ$ 방향으로 부착된 스트레인 게이지 4개를 갖는 완전결선 브리지 회로이며, Mz를 가하면 기둥의 비틀림 변형으로 S5, S6은 인장을 S7, S8은 압축을 받는다. Mz의 용량은 Fz에 의해 이미 설계된 감지부의 치수와 설계하고자 하는 Scir.6의 정격 출력에 의해 결정된다. 모두 액티브(active) 게이지로 변형률식과 입력 전압 (E_i)에 대한 출력 전압 (E_o)의 비는 다음과 같다.

$$\varepsilon_{S5} = \varepsilon_{S6} = -\varepsilon_{S7} = -\varepsilon_{S8} = \varepsilon_{45^\circ} = \frac{\gamma}{2} = \frac{8M_z}{\pi D^3 G} \quad (3.3.4)$$

$$\left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{M_z} = K\varepsilon \quad (3.3.5)$$

여기서, γ 는 감지부의 전단 변형률, G 는 횡탄성계수를 나타내고 있다. 위의 식(3.3.4), (3.3.5)와 Scir.6의 정격 출력 2 mV/V로부터 Mz의 용량은 696.3 Nm로 결정되었다.

Fig. 3-3-4와 같이 Fx 및 My 검출회로는 축방향의 스트레인 게이지 2개를 갖는 1/2 브리지(half- bridge) 회로로 구성하였다. S9, S10으로 구성된 Scir.1과 S11, S12로 구성된 Scir.5를 보여주며, Fx, My를 가하면 기둥의 굽힘 변형으로 S9, S11은 인장을 S10, S12는 압축을 받는다. Fx에 의한 변형률식은 다음과 같다.

$$\varepsilon_{S9} = -\varepsilon_{S10} = z_1 \times \frac{32F_x}{\pi D^3 E} \quad (3.3.6)$$

$$\varepsilon_{S11} = -\varepsilon_{S12} = z_2 \times \frac{32F_x}{\pi D^3 E} \quad (3.3.7)$$

My에 의한 변형률식은 다음과 같다.

$$\varepsilon_{S9} = \varepsilon_{S10} = -\varepsilon_{S11} = -\varepsilon_{S12} = \frac{32M_y}{\pi D^3 E} \quad (3.3.8)$$

Fx, My에 의한 1/2 브리지 회로의 출력은 다음과 같다.

$$\left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{F_x} = \left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{M_y} = \frac{K\varepsilon}{2\{1-(K\varepsilon)^2\}} \approx \frac{K\varepsilon}{2} \quad (3.3.9)$$

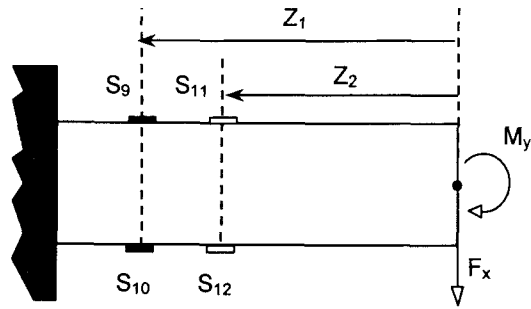


Fig. 3-3-4. Sensing element subjected to F_x and M_y loadings

이때, F_x 의 정격하중에 Scir.1의 정격출력이 2 mV/V가 되고, M_y 의 정격하중에 Scir.5의 정격출력이 2 mV/V가 되도록 설계하였다. 위의 식(3.3.6)~(3.3.9)와 각 회로의 정격출력으로부터 F_x 의 용량이 24.4 kN, M_y 의 용량이 913.9 Nm로 결정되었다. 감지부 형상으로 인해 F_y , M_x 용량도 동일하다. 위의 이론식(3.3.1)~(3.3.9)로부터 구한 각 성분별 설계하중 (designed load)과 회로별 출력은 Table 3-3-1과 같다.

Table 3-3-1. Output voltage of sensing element subjected to the designed load

Load (F : kN) (M : Nm)	Output voltage (μ V/V)					
	Scir.1	Scir.2	Scir.3	Scir.4	Scir.5	Scir.6
F_x (24.4)	2000	0	0	0	1000	0
F_y (24.4)	0	2000	0	1000	0	0
F_z (200)	0	0	2000	0	0	0
M_x (913.9)	0	-2000	0	-2000	0	0
M_y (913.9)	2000	0	0	0	2000	0
M_z (696.3)	0	0	0	0	0	2000

2.2 유한요소해석

다축의 힘이 동시에 감지부에 가해졌을 때 감지부의 안전성을 검토하고, 각 스트레인 게이지 부착위치에서의 변형률을 얻기 위해, 상용 유한요소해석 프로그램 ANSYS ver.5.7을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 8절점 3자유도를 갖는 3차원 요소를 사용하였으며, 격자의 형상은 Fig. 3-3-5와 같다.

해석 과정에서 요소의 갯수는 8496개 이고, 절점의 갯수는 9481개 였으며, 로드셀 바닥면의 절점을 모든 방향에 대해 구속하였고, 기둥과 플레이트(plate)는 응력집중의 완화를 위해 라운딩으로 처리하였다. 감지부의 재질은 종탄성계수 210 GPa이고 푸아송비가 0.3인 SNCM

8종으로 설계하였다.

안정성의 검토를 위해 성분별 하중을 동시에 가하여 von-Mises stress를 확인하였다. 해석 결과 Fig. 3-3-6과 같이 응력이 집중되는 부분의 von-Mises stress가 1.97 GPa로 SNCM8종의 항복 응력값 1.4 GPa 보다 크게 계산되었다. 이에, 설계응력과 스트레인 게이지의 피로한도를 고려하여, 감지부의 치수 변화없이 센서의 감도만을 2 mV/V에서 0.5 mV/V로 수정 하였으며, 이에따라 설계하중도 초기 설계하중의 1/4로 수정되었다. 따라서, 설계하중은 F_x , F_y 은 6.1 kN, F_z 은 50 kN, M_x , M_y 는 228.5 Nm, M_z 은 174.1 Nm로 최종 결정되었다.

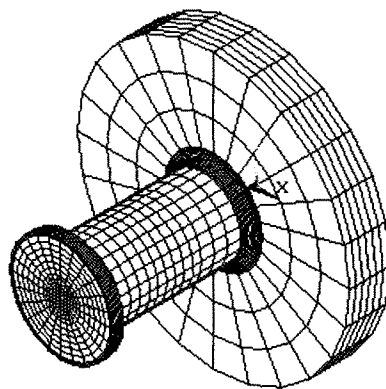


Fig. 3-3-5. Finite element mesh of sensing element

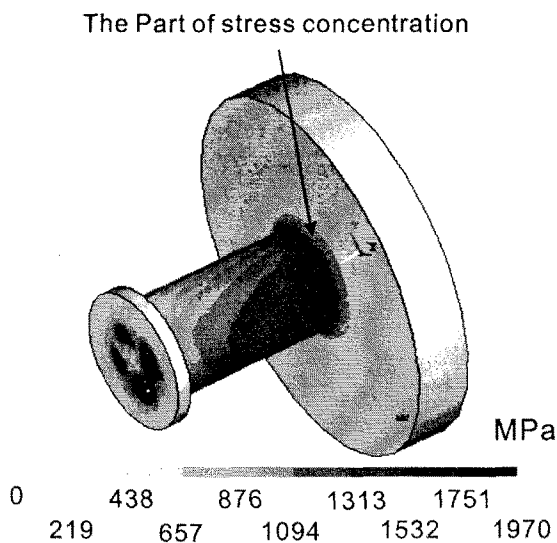


Fig. 3-3-6. Von-mises stress value from finite element analysis

2.3 성분별 출력 분리 방법

기동형 감지부는 F_x , M_y 를 가할 경우 Scir.1과 Scir.5에서 모두 출력이 나타난다. 따라서 두 회로의 출력을 성분별 출력으로 분리할 필요가 있으며, 식 (3.3.6)~(3.3.8)을 이용하여 힘과 모멘트 성분을 분리할 수 있다. Fig. 3-3-4에서 처럼 F_x 나 M_y 가 가해지는 경우 Scir.1의 출력과 Scir.5의 출력은 다음의 관계를 갖는다.

$$\left. \frac{E_o}{E_i} \right|^{Scir.1} = \left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{F_x}^{Scir.1} + \left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{M_y}^{Scir.1} \quad (3.3.10)$$

$$\left. \frac{E_o}{E_i} \right|^{Scir.5} = \left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{F_x}^{Scir.5} + \left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{M_y}^{Scir.5} \quad (3.3.11)$$

$$\left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{F_x}^{Scir.1} = \beta \left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{F_x}^{Scir.5} \quad (3.3.12)$$

$$\left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{M_y}^{Scir.1} = \left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{M_y}^{Scir.5} \quad (3.3.13)$$

여기서 β 는 $\frac{z_1}{z_2}$ 이다. 따라서 각 하중에 대한 출력은 다음과 같이 분리하여 얻을 수 있다.

$$\left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{F_x} = \frac{\beta}{\beta-1} \left(\left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{F_x}^{Scir.1} - \left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{F_x}^{Scir.5} \right) \quad (3.3.14)$$

$$\left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{M_y} = \frac{1}{\beta-1} \left(\beta \left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{M_y}^{Scir.5} - \left. \frac{E_o}{E_i} \right|_{M_y}^{Scir.1} \right) \quad (3.3.15)$$

감지부 형상이 축대칭이므로, F_y , M_x 에 대하여도 같은 방식으로 Scir.2의 출력과 Scir.4의 출력을 분리하면 다음과 같다.

$$\frac{E_o}{E_i} \Big|_{F_y} = \frac{\beta}{\beta-1} \left(\frac{E_o}{E_i} \Big|^{S_{cir.2}} - \frac{E_o}{E_i} \Big|^{S_{cir.4}} \right) \quad (3.3.16)$$

$$\frac{E_o}{E_i} \Big|_{M_x} = -\frac{1}{\beta-1} \left(\beta \frac{E_o}{E_i} \Big|^{S_{cir.4}} - \frac{E_o}{E_i} \Big|^{S_{cir.2}} \right) \quad (3.3.17)$$

2.4 제작 및 특성 시험

기둥형 감지부를 갖는 다축 힘/모멘트 센서는 Fig. 3-3-7과 같이 한 몸체로 가공하였고, 로드셀 지지부와 힘이 가해질 부분은 볼트로 연결할 수 있도록 하였다. 스트레인 게이지가 부착될 표면은 정밀 다듬질을 하여 공차를 ± 0.02 mm로 하여 가공하였다. 스트레인 게이지 16개를 부착하여 2개의 완전 회선 회로와 4개의 1/2 회로를 구성하였다. 부착된 스트레인 게이지는 길이 1.57 mm, 게이지 폭 1.57 mm, 전체 길이 4.8 mm, 전체 폭 3.1 mm이고 게이지 상수가 2.12인 센서용 게이지 MM-N2A-06-SO71P-350(Measurement Co., USA)를 사용하였다.

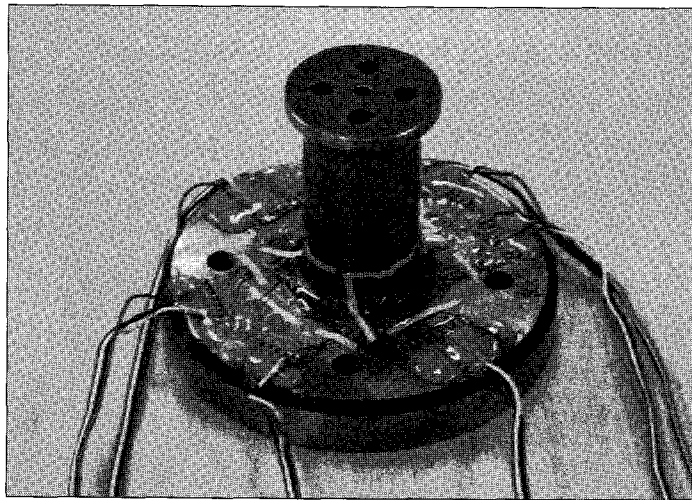


Fig. 3-3-7. The fabricated multi-component sensor of column type

한국표준과학연구원의 5 kN 실하중 힘표준기를 이용하여 F_x , F_y 를 가하였으며, 축과 수직 한 하중을 가하기 위해 Fig. 3-3-8과 같은 지그를 이용하였다. 지그를 사용함으로써 발생하는 힘 작용점의 이동을 고려하여, 최종 회로별 출력에서 출력값을 보정하였다.

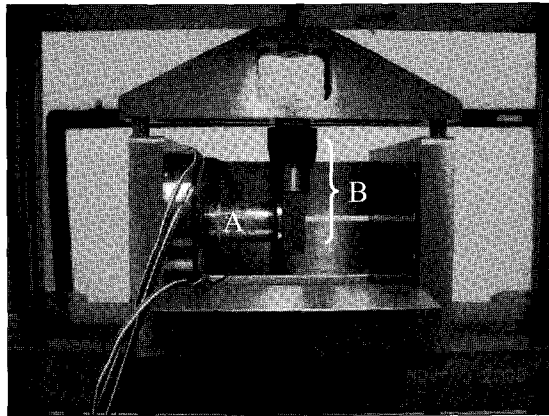


Fig. 3-3-8. The multi-component sensor(A) and zigs(B) for F_x and F_y loadings

100 kN 실하중 힘표준기를 이용하여 F_z 을 가하였고, 6축 시험기를 이용하여 모멘트 성분을 가하였다. 이때 밑면의 고정과 위면의 하중전달을 위해 Fig. 3-3-9와 같이 원형평판을 제작하여 실험을 수행하였다.

실험하중(experimental load)은 시험장치의 용량 문제로 F_x , F_y 는 3 kN, F_z 은 50 kN, M_x , M_y , M_z 은 45 Nm이었다. 설계하중에 대한 실험하중의 비율은 F_x , F_y 는 48.2 %, F_z 은 100 %, M_x , M_y 는 19.7 %, M_z 은 25.8 %이었다.

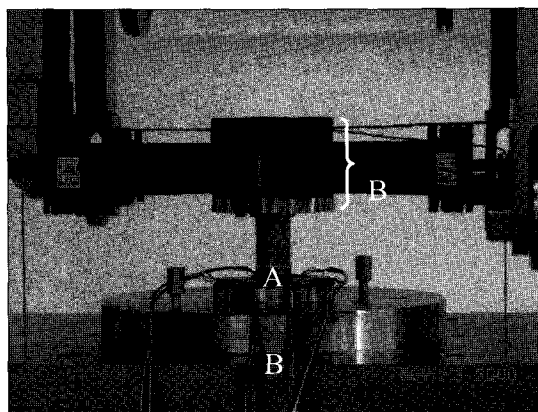


Fig. 3-3-9. The multi-component sensor(A) and zigs(B) for moment loadings

실험에 사용된 지시계는 DK38S6 (HBM co., Germany)로 6개 채널의 출력을 동시에 취하였다. 실험은 전기식힘측정기의 교정 절차(C-07-1-0040 -2000)에 따라 최대하중을 미리 3회 가한 후, 본 시험을 3회 수행하였다. 본 시험은 F_x , F_y 는 7단계, F_z 은 6단계, 모멘트 성분은 10단계의 등간격으로 나누어 1, 2회 실험은 증가순 하중을 가하였으며, 마지막 3회 실험에서 증가 감소순 하중을 가하였다.

3. 결과 및 토의

원기둥 감지부를 이용하여 다축의 힘과 모멘트를 감지하기 위해 게이지의 부착 위치와 방향을 결정하였고, 브리지 회로를 구성하였다. 특히 F_x , M_y 및 F_y , M_x 성분을 분리하기 위해 하중 작용점으로부터 거리가 서로 다른 두 지점에 게이지를 부착하는 방법을 이용하였다. 또한 제작한 다축로드셀의 안전성을 고려하여 감도와 설계하중을 1/4로 수정하였다. Table 3-3-2는 제작한 기둥형 감지부를 갖는 다축 힘/모멘트 센서의 회로별 출력을 보여주고 있다. 설계에서와 같이 Scir.3는 F_z 에 대해서, Scir.6는 M_z 에 대해서 반응을 하였고, Scir.1과 Scir.5는 F_x , M_y 두 성분 대해서, Scir.2와 Scir.4는 F_y , M_x 두 성분 대해서 반응하였다.

Table 3-3-2. Output voltages of sensing element subjected to the experimental load.

Load (F : kN) (M : Nm)	Output voltage ($\mu V/V$)					
	Scir.1	Scir.2	Scir.3	Scir.4	Scir.5	Scir.6
$F_x(3)$	261.8	12.5	-1.7	15.3	136.6	-5.1
$F_y(3)$	18.1	264.7	0.2	134.8	15.1	5.4
$F_z(50)$	-13.9	6.0	526.8	5.9	-12.5	2.4
$M_x(45)$	-4.8	-104.8	0.4	-102.8	-3.9	-1.2
$M_y(45)$	91.7	-0.9	-0.2	0.1	91.5	3.3
$M_z(45)$	-0.2	0.5	1.1	-1.1	0.8	133.4

이러한 회로별 출력을 식(14)~(17)에 의해 각 성분별 출력으로 변환한 값을 Table 3-3-3에서 보여주고 있다. Table 3-4-2에서의 대각선항 이외의 출력을 제거함으로써, 서로 다른 두 성분간의 출력의 중첩이 효과적으로 제거되었음을 확인할 수 있었다.

Table 3-3-3. Output voltages obtained from addition and subtraction procedure using signals of Table 3-3-2.

Load (F : kN) (M : Nm)	Output voltage ($\mu V/V$)					
	S_{F_x}	S_{F_y}	S_{F_z}	S_{M_x}	S_{M_y}	S_{M_z}
$F_x(3)$	250.3	-5.7	-1.7	18.2	11.3	-5.1
$F_y(3)$	6.1	259.7	0.2	5.0	12.0	5.4
$F_z(50)$	-2.8	0.3	526.8	5.8	-11.0	2.4
$M_x(45)$	-1.8	-3.9	0.4	100.9	-3.0	-1.2
$M_y(45)$	0.3	-1.9	-0.2	-0.9	102.8	3.8
$M_z(45)$	-2.1	3.1	1.1	-2.7	1.9	133.4

Table 3-3-4는 실험에 의한 출력, 설계식에 의한 출력 그리고 유한 요소에 의해 계산된 출력을 보여준다. 실험에 의한 출력을 기준으로 했을 때, 설계식에 의한 출력의 편차는 -2.4 ~ -7.2 %이었다. 유한요소 해석에 의한 출력의 편차는 -2.8 ~ 2.8 %로 실험 결과의 타당성을 보여주었다. 용량의 한계로 실험하지 못한 설계하중에서의 출력은 Table 3-3-3의 실험하중에서의 출력으로부터 비례적으로 계산하여 Table 3-3-5에 나타내었다.

Fig. 3-3-10에서 최대 상호간섭오차는 F_x 가 작용할때 M_x 를 검출하는 회로에서 7.3 % FS/FS 이었고, 나머지 성분의 경우는 모두 5 % 이내이었다. 감지부의 형상이 축대칭형임에도 불구하고, F_x 에서 7.8 %, F_y 에서 4.8 %로 차이가 나는 것은 실험상의 오차로 판단된다. 시판되는 다축 로드셀의 상호간섭오차가 2~3 % FS/FS 이내임을 고려하면 제작된 기동형 다축로드셀의 상호간섭오차가 다소 큰 편이지만, 제작 비용과 강성 유지면에서 큰 장점을 갖는다.

Table 3-3-4. Comparison of output voltages obtained from experiment, theory and FEM.

	Output voltage ($\mu V/V$)				
	Experiment	Theory		FEM	
S_{F_x}	250.3	241.0	-3.7%	257.4	2.8%
S_{F_y}	259.7	241.0	-7.2%	257.4	-0.9%
S_{F_z}	526.8	499.6	-5.2%	511.8	-2.8%
S_{M_x}	100.9	98.5	-2.4%	101.4	0.5%
S_{M_y}	102.8	98.5	-4.2%	101.4	-1.4%
S_{M_z}	133.4	129.3	-3.1%	132.2	-0.9%

Table 3-3-5 Output voltages of sensing element subjected to the designed load.

Load (F : kN) (M : Nm)	Output voltage ($\mu V/V$)					
	S_{F_x}	S_{F_y}	S_{F_z}	S_{M_x}	S_{M_y}	S_{M_z}
$F_x(6.1)$	519.0	-11.7	-3.5	37.6	23.8	-10.6
$F_y(6.1)$	12.6	538.4	0.4	10.3	25.0	11.1
$F_z(50)$	-2.8	0.3	526.8	5.8	-11.0	2.4
$M_x(228)$	-9.2	-19.8	1.8	512.2	-15.0	-6.1
$M_y(228)$	1.6	-9.6	-1.2	-4.5	522.0	19.1
$M_z(174)$	-8.2	12.1	4.2	-10.3	7.3	516.1

Table 3-3-6은 각 하중 성분에 대한 비직선도오차, 재현도오차, 히스테리시스오차 및 상호 간섭오차 수준을 보여준다. 비직선도오차는 0.03~0.17 %, 재현도오차는 0.01~0.15%, 히스테리시스오차는 0.01~0.41 %로 나타났다. F_x 에서 오차가 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 나머지 하중에서 비직선도오차, 재현도오차, 히스테리시스오차는 0.12 % 이내였다.

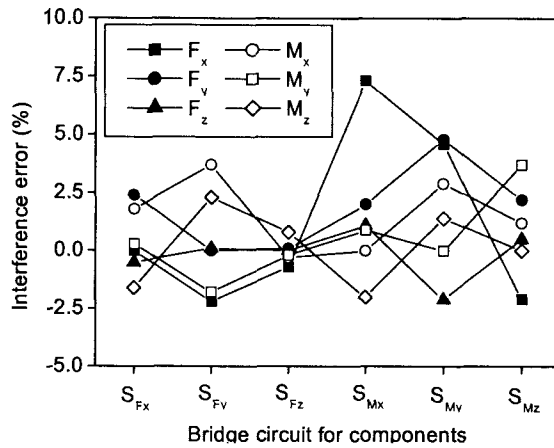


Fig. 3-3-10. Interference error for output voltages of multi-component sensor obtained from experiment

Table 3-3-6. Rated output-voltage, nonlinearity error, repeatability error, hysteresis error and interference error obtained from experiment.

Load	R.O. ($\mu V/V$)	N.E. (%)	R.E. (%)	H.E. (%)	I.E. (%)
F_x	519.0	0.17	0.15	0.41	7.3
F_y	538.4	0.02	0.03	0.10	4.8
F_z	526.8	0.09	0.01	0.01	-2.1
M_x	512.2	0.05	0.12	0.09	-3.7
M_y	522.0	0.03	0.05	0.12	3.7
M_z	516.1	0.06	0.03	0.11	-2.3

where, R.O. : rated output, N.E. : nonlinearity error, R.E. : repeatability error
H.E. : hysteresis error, I.E. : interference error

4. 결 론

본 연구에서는 기둥의 변형만으로 다축의 힘을 측정하기 위한 게이지의 부착위치, 조합 방법 및 성분별 분리 과정을 제시하였다. 유한요소 해석을 수행하여 감지부의 안전성 검토와

변형을 해석을 수행하여 감도와 설계하중을 수정하였다. 설계·제작한 기동형 감지부를 갖는 다축 힘/모멘트 센서의 특성 평가를 수행하여 상호간섭오차를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 가. 제작한 기동형 감지부를 갖는 다축 로드셀의 게이지 부착 위치와 방향, 브리지 회로를 구성하고, 회로별 출력을 성분별 출력으로 변환함으로써 중첩된 신호로부터 서로 다른 두 성분을 분리하였다.
- 나. 최대 상호간섭오차는 F_x 에서 7.3 % FS/FS이었으며, 나머지 성분에서는 5 % FS/FS 이내였다. 시판되는 다축 로드셀을 고려하면 제작된 기동형 다축로드셀의 상호간섭오차가 다소 크지만, 기존의 기동형 구조물에 스트레인 게이지를 부착하여 다축의 힘과 모멘트를 측정할 수 있으므로, 제작 비용과 강성 유지면에서 우수하여, 응용 범위가 넓을 것으로 기대한다.

제 4 절 Built-in 센서 기술 개발 II : 스마트 탄성받침

1. 서 론

교량의 내구성과 초기 용적능력을 유지하는 것이 관심을 모으고 있다[32, 33]. 오랫동안 검사프로그램은 거대한 구조물의 변화상태를 검사하였다. 사용자의 결정을 돕기 위해 발전된 계측 방법은 교량의 민감한 부품이 구조상의 적합성 여부를 평가할 수 있게 되었다. 특히, 구조물의 이상 거동은 종종 교량을 지지하는 부분의 하중을 재 분포시키는 원인이 되기도 한다.

일반적으로 교량은 여러 개의 플랜트로 구성되어있고, 교각의 갑판을 지지해준다. 또한, 갑판과 부두에 사용된 탄성베어링은 지진에 의해 발생하는 교량의 반발력과 교량을 이용하는 승객에게 교량의 유연성을 제공한다. 이처럼 탄성 베어링은 독립된 베어링을 사용하여 교량에 전달되는 수평력 피해를 줄일 수 있게 되었다. 강철 플랜트의 리터리빙(interleaving)에 사용된 얇은 판으로 된 고무를 부착한 독립구조의 베어링은 중력하중에도 충분히 견딜 수 있는 수직 허용강도를 가지고 있을 뿐 아니라, 수평 유연성을 지니고 있는 독립형 교량의 대부분의 지진을 일으키는 현저한 주파수대역을 제거하여 교량에 전달되는 주파수를 이동시킨다.

그동안 교량 구조물의 특성을 파악하기 위한 기술로 스트레인게이지와 광섬유[34, 35]를 부착하였다. 그러나 이러한 방법은 교량 구조물에 많은 센서를 필요로 하고 교량에 부착되어야 되기 때문에 불편하고 비효율적이다. 반면, 탄성빔 안에 PVDF 필름 센서를 삽입하면 교량 구조물의 보존이 쉽고 효율적으로 모니터하고 평가할 수 있게 된다. PVDF 필름의 특성은 다음과 같다[36] : 넓은 주파수 대역(0.001 Hz 에서 109 Hz); 넓은 동적특성 범위; 저증폭 임피던스; 고전압 출력; 주위 환경에 대한 높은 안전성(습도, 화학물질 등); 사용 접착제를 이용한 접착. 이처럼 본 연구는 PVDF 폴리머 필름을 이용하여 교량구조물을 효과적이고 간단하게 안전성을 모니터하는 고성능 탄성 베어링 개발을 설명하고 있다.

2. 교량모드해석을 위한 이론적인 접근

교량의 끝을 구속하는 빔을 가정하자. 이 빔이 병진 또는 회전이 억제되는 선형 탄성체라면, 이것은 Fig. 3-4-1에서와 같이 스프링 시스템으로 단순화할 수 있을 것이다. 끝지점의 스프링 상수를 k_1 과 k_2 라고 하자.

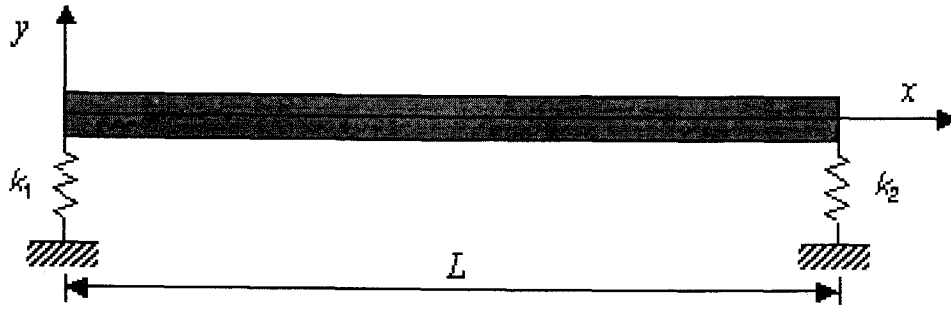


Fig. 3-4-1. Simple beam model with spring constant for bridge modal analysis

스프링 상수가 k 와 같다면 지배 방정식과 경계 조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} \right) dx = -m \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} \quad (3.4.1)$$

$$EI(Y''')_{x=0} = -k(Y)_{x=0}, \quad (3.4.2)$$

$$EI(Y'')_{x=0} = 0, \quad (3.4.3)$$

$$EI(Y''')_{x=L} = -k(Y)_{x=L}, \quad (3.4.4)$$

$$EI(Y'')_{x=L} = 0, \quad (3.4.5)$$

여기서 m 은 단위 길이당 질량, E 는 탄성률, I 는 관성모멘트이고 Y 는 y 축방향의 이동이다. 여기서 식(3.4.1)의 일반 함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Y(x) = A(\sin \beta x + C_2 \cos \beta x + C_3 \sinh \beta x + C_4 \cosh \beta x). \quad (3.4.6)$$

식(3.4.2)에서 식(3.4.5)까지를 이용하여 β 를 풀면

$$\frac{E^2 I^2}{L^6} (\beta L)^6 (1 - \cos \beta L \cosh \beta L) - 4k^2 \sin \beta L \sinh \beta L = 0 \quad (3.4.7)$$

그리고 변수들도 다음과 같이 계산된다.

$$C_2 = \frac{1}{\cos \beta L - \cosh \beta L} (C_3 \sinh \beta L - \sin \beta L), \quad (3.4.8)$$

$$C_3 = \frac{EI\beta^3 \cos \beta L - EI\beta^3 \cosh \beta L + 2k \sin \beta L}{EI\beta^3 \cos \beta L - EI\beta^3 \cosh \beta L + 2k \sinh \beta L} \quad (3.4.9)$$

$$C_4 = C_2, \quad (3.4.10)$$

빔의 끝지점에서의 반발력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_{x=0} = AEI\beta^3(-1+C_3), \quad (3.4.11)$$

$$F_{x=L} = AEI\beta^3(-\cos \beta L + C_2 \sin \beta L + C_3 \cosh \beta L + C_4 \sinh \beta L). \quad (3.4.12)$$

한편, 주파수(f)를 알 수 있다면, 다음과 같이 β 를 쉽게 구할 수 있다.

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{4\pi^2 f^2 m}{EI}}. \quad (3.4.13)$$

2. PVDF 필름을 사용한 스마트탄성 받침의 동적거동

Fig. 3-4-1은 PVDF 필름을 이용하여 만든 2개의 탄성 베어링의 스프링 상수를 s 로 가정하였을 때의 스프링 상수 k_1 , k_2 를 보여준다. 여기서 탄성 베어링의 동적 거동을 평가할 수 있다. 교량을 지지하는 탄성 베어링의 동적 거동을 모니터링하기 위해 Fig. 3-4-2(a)에서와 같이 탄성 베어링 안에 PVDF 필름을 삽입하였다. PVDF 필름은 탄성베어링을 부착하였고 에폭시 수지를 덮어 접착하였다. Fig. 3-4-2 (b)는 PVDF 필름을 이용한 탄성 베어링을 보여준다.

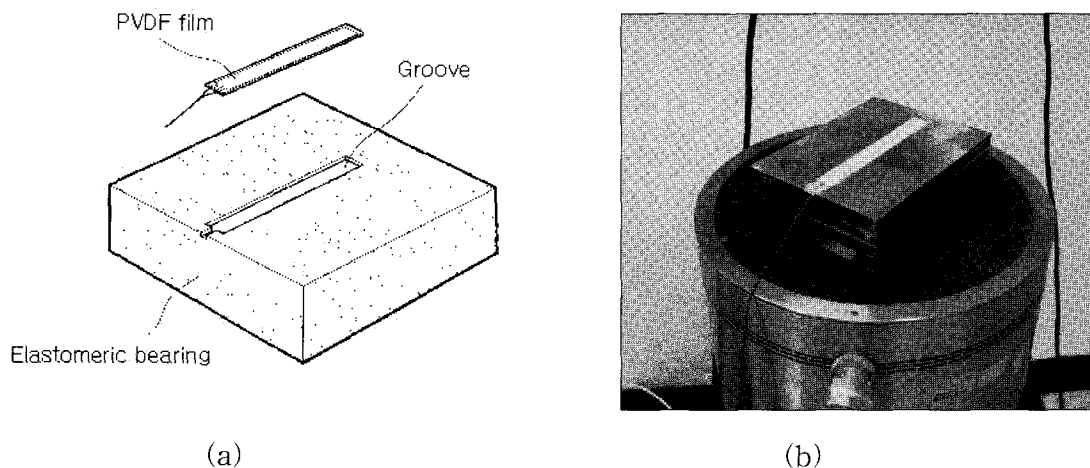


Fig. 3-4-2. Elastomeric bearing on exciter : (a) schematic diagram of with PVDF film on the elastomeric bearing; (b) Fabrication of elastomeric bearing with PVDF film

Fig. 3-4-3은 탄성 베어링의 동적 거동을 측정하기 위한 실험장치를 보여주고 있다. 동적 힘은 PVDF 필름에 부착된 15kg 질량의 가속도 센서로 구할 수 있다. 탄성 베어링은 shaker(B & K 4802 and 4817)와 신호증폭기(B & K 2708)에 의해 가속된다.

Fig. 3-4-4는 FFT 분석기와 액츄에이터를 이용한 스위프 방법(sweep method)로부터, PVDF 필름의 출력전압에 대한 감도(N)를 얻어내는 방법을 보여준다. 40 Hz에서 100 Hz 범위에서의 감도는 거의 일정하다. 탄성 베어링과 15kg 질량의 스프링이 상호작용으로 인해 나타나는 탄성 베어링의 동조주파수는 대략 32 Hz에서 발생한다.

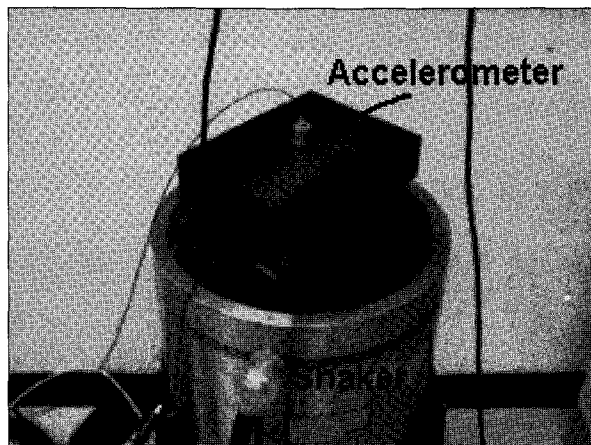


Fig. 3-4-3. Experimental set up for dynamic behavior of elastomeric bearing with PVDF film

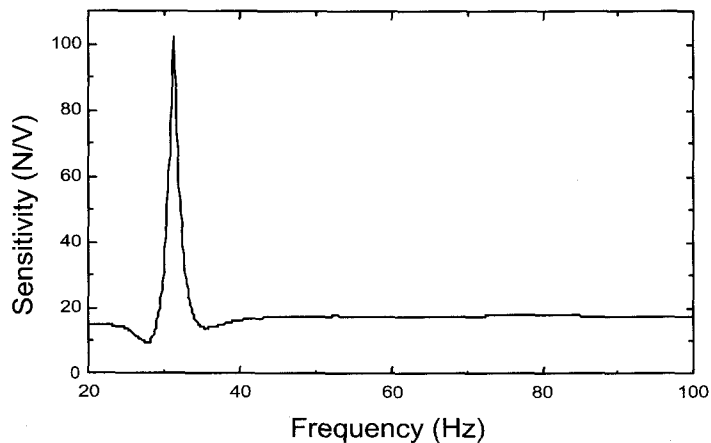


Fig. 3-4-4. Sensitivity of force (N) to output voltage of PVDF film as a function of frequency

3. 스마트탄성 받침을 이용한 교량의 안전성 체크 절차

고성능 탄성 베어링은 교량 구조물의 안전성을 모니터링하기 위해 개발되었다. Fig. 3-4-5는 탄성 베어링에 삽입된 PVDF 필름으로부터 얻어진 형상 분석(modal analysis)[37]을 이용하여 교량 구조물의 안전성을 평가하는 순서를 설명하고 있다. 첫 번째, PVDF 필름 센서를 삽입한 교량을 지지하는 탄성 베어링으로부터 동적 반응 힘(dynamic reaction force)을 식 (3.4.11)과 식 (3.4.12)로 측정할 수 있다. 그 다음, 고성능 탄성빔으로부터 얻은 신호를 이용하여 FFT 분석기로 주파수 분석을 수행한다. 그 후 Fig. 3-4-1에서 보여주는 것과 같이 교량 구조물의 경계조건으로 형태를 분석하고 획득된 주파수 분석을 식 (3.4.1)처럼 덧셈 계산 방식으로 처리한다. 참고문헌에서 신호 분석을 통해 초기 주파수(f)를 얻는다면, 특성 방정식 β 의 해를 구할 수 있다.

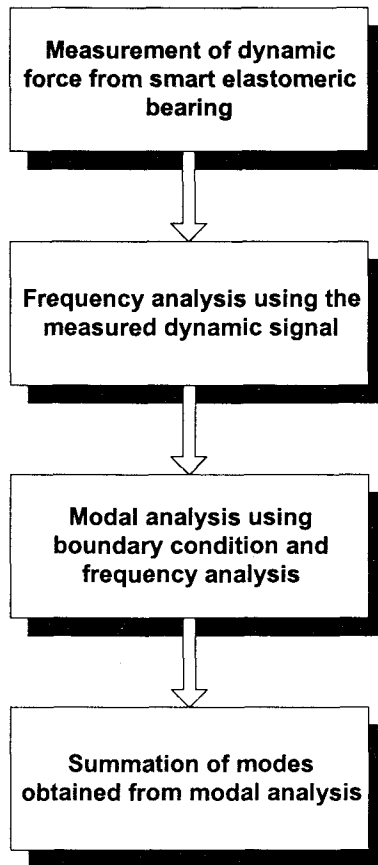


Fig. 3-4-5. Procedure for safety evaluation of bridge structure using smart elastomeric bearing

Fig. 3-4-6에서 보여주는 것처럼 교량을 이용하는 승객과 지진이 일어날 경우에 대해 교량 구조물의 분석에 관한 연구와 실험 평가가 보다 많이 이루어지면 고성능 탄성 베어링의 필요성을 느끼게 될 것이다.

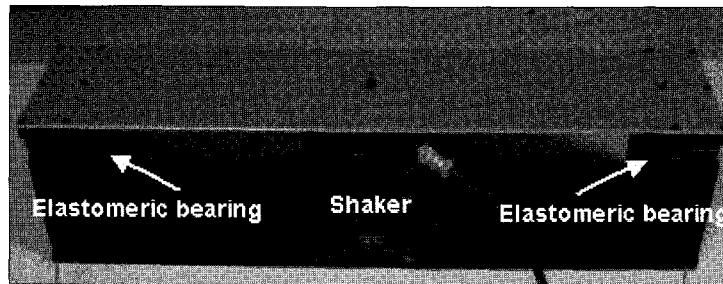


Fig. 3-4-6. Schematic diagram of bridge structure equipped with smart elastomeric bearing using PVDF film sensor

4. 결 론

교량의 건전성을 평가하고 모니터링하기 위해 PVDF필름을 가진 스마트 탄성받침이 개발되었다. PVDF필름이 탄성받침 내부에 삽입되었고 보호막으로 입혔다. 스마트 탄성받침의 동적거동은 임의의 질량과 진동기에 의해 평가되었다. 이 스마트 탄성받침은 교량의 동적거동을 실시간으로 모니터링할 수 있는 지능형 센서로서의 가능성을 보여주었다.

제 5 절 고정밀 대용량 힘 발생기 오차 보상기법 개발

1. 서 론

고정밀 대용량 힘 발생기는 유압식으로 힘을 발생하고 표준 로드셀(Load cell)을 이용하여 힘의 크기를 측정한다. 표준 로드셀의 정밀도는 매우 우수하여 일반적으로 사용되는 힘 센서를 교정할 경우에는 특별한 오차보상 없이 적용이 가능하지만 정밀 힘 센서 교정을 위해서는 발생할 수 있는 오차를 최소화 해야할 필요가 있다.

로드셀에서 발생할수 있는 오차는 크게 히스테리시스(Hysteresis) 특성과 크립(Creep)특성이 있다. 이러한 비선형 특성은 압전구동기(PZT actuator), 자석(Magnet)의 자화등에서 쉽게 관찰할 수 있는 특성이다. 이러한 비선형 오차들은 구동기, 센서등의 특성을 현저히 저하시키는 요인이기 때문에 이를 극복하기 위한 연구들이 많이 이루어 졌다.[38-41]

본 연구에서는 대용량 힘 발생기의 히스테리시스 및 크립 특성을 분석하고 이를 보상하기 위한 기법을 개발하고자 한다.

2. 히스테리시스 특성 해석 및 오차 보상

히스테리시스는 대부분의 센서 및 구동기에서 발생할수 있는 특성으로 이에 대한 해석 수행한 많은 연구들이 있었다. 히스테리시스 모델링 방법으로 Landau[42], Jung[40] 등 많은 연구기법들이 소개되고 있지만 이러한 여러 가지 모델링 기법중에서 지금까지 가장 잘 알려진 모델링 기법은 Preisach에 의해 제안되었다.[43]

Preisach 모델은 다음식과 같이 표현된다.

$$x(t) = \int \int_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}[u(t)] d\alpha d\beta \quad (3.5.1)$$

여기서 $x(t)$ 는 출력특성이고, $\mu(\alpha, \beta)$ 는 Preisach 모델의 가중함수이고, α, β 는 입력값의 증감 변환값(Switching value)이고, $u(t)$ 는 입력값이며, $\gamma_{\alpha\beta}[u(t)]$ 는 입력값에 의해 결정되는 히스테리시스 연산자이다. 힘교정기에 Preisach 모델이 적용될 경우 $u(t)$ 는 입력힘이 되고 $x(t)$ 는 표준 로드셀의 출력 전압이 된다. 히스테리시 특성이 포함된 현재의 출력값은 과거의 입력들에 대한 함수이기 때문에, 가중함수 $\mu(\alpha, \beta)$ 는 모든 입력들에 대해 실험적으로 결정되어야 하는 값이다. 그러나 힘센서의 경우 대부분 용량이 정해져 있기 때문에 교정절차서에 명시된 힘 교정 범위에 대해서만 해석을 하더라도 무방하다. 대용량 유압식 힘 발생기에 적용하여 이러한 히스테리시스 특성을 살펴 보았다. Fig. 3-5-1은 힘 측정 및 평가연구실에서 보유하고 있는 500 kN 용량의 유압식 힘 발생기이다. 이러한 힘 발생기는 200, 300 그

리고 500 kN의 최대범위를 갖는 힘센서들을 교정하게 된다.

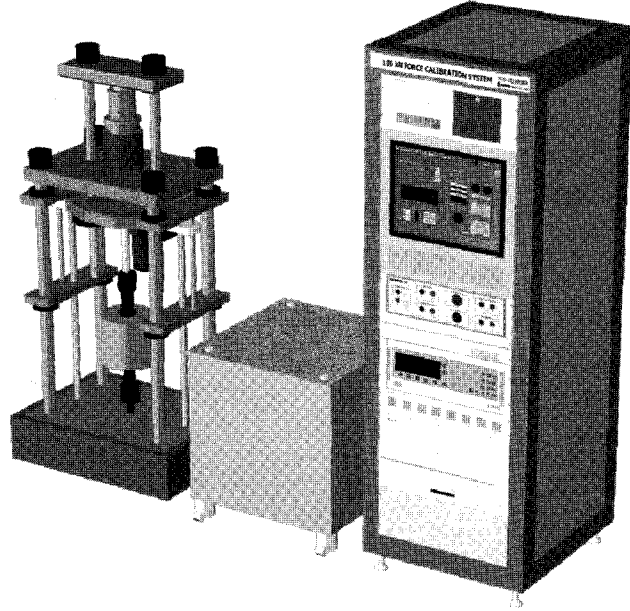


Fig. 3-5-1. 대용량 유압식 힘 교정기

500 kN 용량의 힘 발생기에 실하중을 가하여 정확한 힘을 인가한 후 그 특성을 살펴 보았다. 측정은 500 kN까지 실하중을 단계적으로 증가시켜 출력전압을 측정한 후 증가의 역순으로 분동을 제거하면서 출력을 기록하였다. Fig. 3-5-2는 이러한 측정에서의 입력힘 대 출력값을 도시하고 그 결과를 1차 직선 피팅한 결과이다. 힘과 전압의 변환계수는 0.00399517 mV/V/kN 이었고 1차의 선형적인 결과를 보여주고 있다.

$$V = 0.00399517F \quad (3.5.2)$$

여기서 F(kN)는 입력힘 이고 V(mV/V)는 로드셀의 출력값이다.

하지만 대부분 로드셀의 특성은 1차 형태가 아닌 고유의 비선형 특성에 의해 2차 형태의 특성을 가지고 있기 때문에 실제 교정에서는 2차 곡선 피팅식을 구하고 이에 대한 불확도를 산출하게 된다.

Fig. 3-5-2에서는 비선형성이나 히스테리시스 오차가 잘 보이지 않지만 1차 직선 피팅식과 실제 측정값과의 오차를 구하여 1차 특성을 제거하게 되면 Fig. 3-5-3과 같은 비선형 특성을 파악할수 있다.

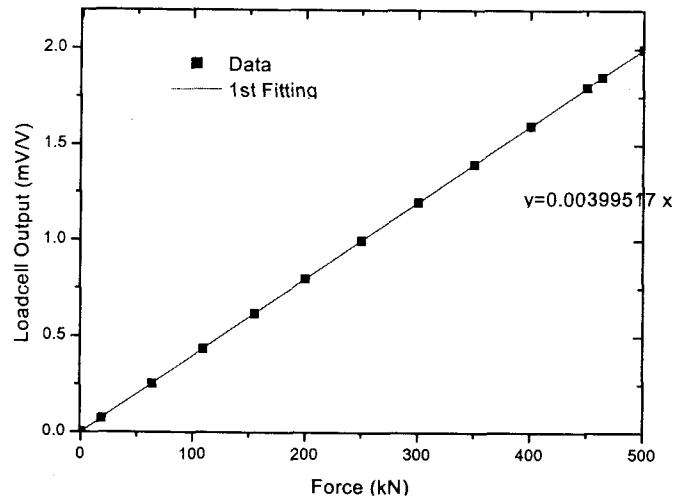


Fig. 3-5-2. 실하중 대 로드셀 출력의 1차 직선 피팅결과

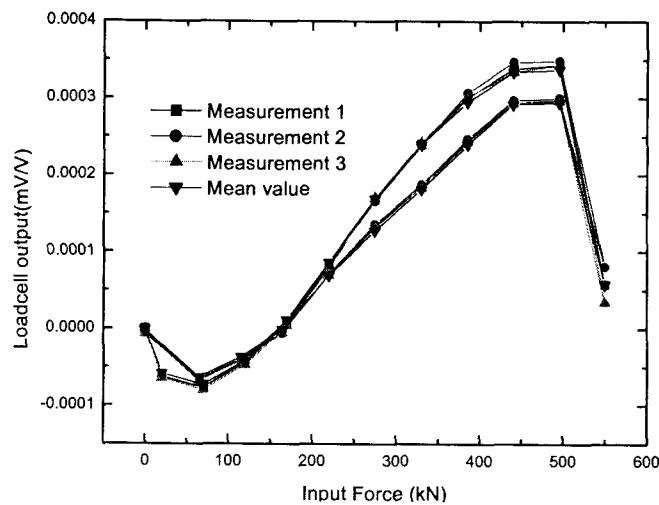


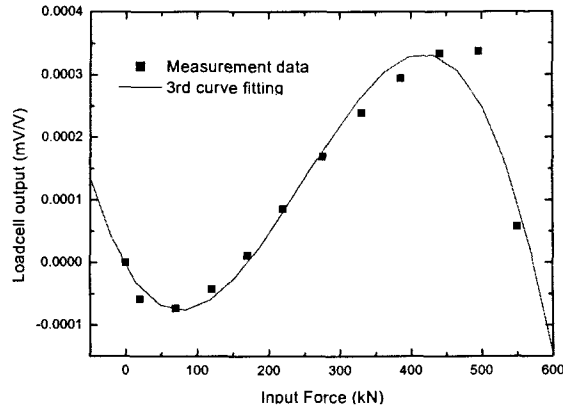
Fig. 3-5-3. 로드셀의 비선형 특성 및 히스테리시스 오차

위의 그림에서 알수 있듯이 300 kN 까지는 히스테리시스에 의한 영향이 미약하여 무시할 수 있고 비선형 곡선의 형태도 2차 특성을 보여주고 있기 때문에 기존의 교정 방법으로도 충분히 평가가 가능하다.

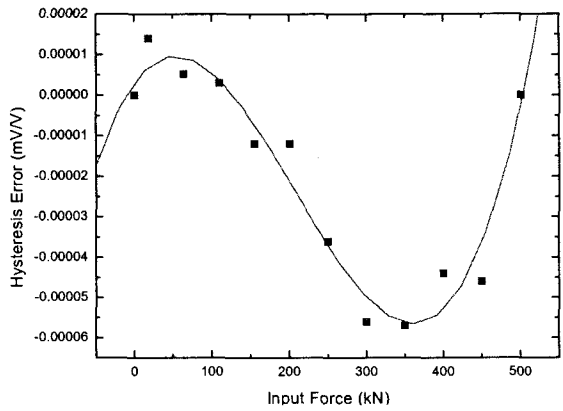
반면에 300 ~ 500 kN 까지의 결과에서는 히스테리시스 특성이 뚜렷하게 나타나고 있으며 비선형 특성 곡선은 3차 형태를 보여주고 있다. 따라서, 고용량의 힘일수록 히스테리시스와 3차 형태의 오차를 동시에 보상해 주어야 할 필요가 있다.

500 kN 까지의 교정에서 필요한 히스테리시스와 3차 형태의 비선형성 보상을 위해 입력힘을 증가하면서 측정된 결과와 감소 시키면서 측정된 결과에 대해 각각 3차 피팅식을 구할 필요가 있다. Fig. 3-5-4(a)는 힘을 단계적으로 증가하면서 구한 측정결과에서 1차식을 제거한

후 핏팅한 결과이다. Fig. 3-5-4(b)는 증가시 얻은 결과와 감소시 얻은 결과의 차이로 히스테리시스양을 나타내고 있으며 3차 곡선으로 핏팅한 결과이다. 다음 식들은 이러한 두 결과의 핏팅 식을 나타내고 있다.



(a) 입력힘 증가시 3차원 비선형 특성



(b) 히스테리시스 오차 특성

Fig. 3-5-4. 500 kN 입력힘에 대한 비선형 특성

$$V_1 = 0.003992 F + 1.3536 \times 10^{-8} F^2 - 1.8450 \times 10^{-11} F^3 \quad (3.5.3)$$

$$V_2 = -2.6170 \times 10^{-7} F - 2.8287 \times 10^{-9} F^2 + 4.5589 \times 10^{-12} F^3 \quad (3.5.4)$$

위의 V_1 은 입력힘을 증가시켰을 경우의 곡선 핏팅식이고 V_2 감소시켰을 경우의 힘 V_1 에 대한 증감분을 나타내는 것으로 500 kN까지의 측정에서 히스테리시스 오차를 제거하기 위해서는 V_1 에 V_2 를 추가하여 고려해야 한다.

지금까지의 특성결과 해석을 토대로 하여 히스테리시스 오차와 3차원 비선형성 오차를 동시에 보상하기 위해서 다음과 같은 보상 개념을 사용한다.

- a) 500 kN 까지 증가시 : V_1 이용
500 kN에서 감소시 : $V_1 + V_2$ 이용
- b) 500 kN 미만 까지 입력힘 증가시 : V_1
500 kN 미만에서 감소시 히스테리시스 특성 매우 미약하므로 무시.

앞에서 설명한 것처럼 일반적인 대용량 힘센서의 교정은 200 kN, 300 kN, 500 kN으로 나눠지기 때문에 중간범위를 고려할 필요가 없고 따라서 위의 특성보상개념은 대용량 오차 보상에 적합하게 된다. 즉, 300 kN용량은 V_1 만을 이용하고 500 kN 이상의 용량은 V_1 과 V_2 를 동시에 적용하여 사용한다.

Fig. 3-5-5는 이러한 보상개념을 사용하여 보상한 후의 오차이며 보상전에 0.02% 였던 오차를 0.001% 까지 감소 시킬수 있었다.

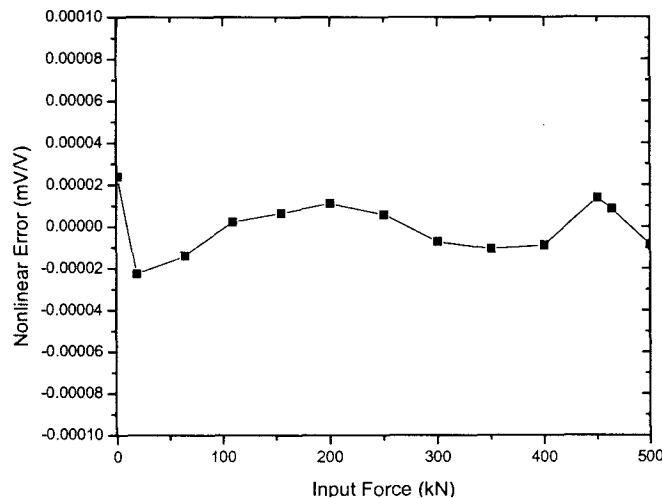


Fig. 3-5-5. 비선형 보상후 오차 결과

3. 크립 특성 해석 및 오차 보상

크립은 히스테리시스 오차와 함께 대표적인 비선형특성으로 시간에 따라 변하는 특성을 나타낸다. 대표적인 힘센서인 로드셀의 경우에 출력값이 수십 초의 초기 응답특성을 보인후 정상상태에 도달하게 된다. 크립은 힘이 가해진후 초기의 응답(Initial response after force change)과 일정시간 후 응답(Response at a later time) 사이의 차이로 표현될 수 있다. 이

러한 크립현상은 고용량의 힘 일수록 크기가 크고 정상상태에 도달하는 시간도 매우 길어 측정결과와 큰 오차요인이 되고 있다. 크립현상은 다음과 같이 로그형태와 지수함수 형태로 표현될수 있다.[44]

$$x(t) = a_0 + a_1 e^{-b_1 t} \quad (3.5.5)$$

$$x(t) = L(1 + \gamma \log_{10}(t/t_0)) \quad (3.5.6)$$

압전구동기의 경우 대부분 로그형태를 사용하지만 일반적으로 지수형태의 모델링을 사용하게 된다. a_0 는 정상상태에 도달하였을 경우의 출력값이고 a_1 은 초기 측정값과 정상상태의 값사이의 변화량이며, $1/b_1$ 은 정상상태에 도달하는 정도를 나타내는 시간 계수(time constant)가 된다.

크립특성은 힘의 입력과 제거시 모두 나타나고, 크립량은 용량이 일반적으로 큰 힘이 가해질 경우 증가하게 된다. 또한 큰힘에 입력과 제거에 대해 정상상태에 도달하는 시간이 오래 걸리게 된다.

크립량을 해석하기 위해 각각의 입력힘에 대해 변화량을 나누어 정상화(Normalization)시켜 상대적인 값을 비교하였다. 크립량은 입력량과 밀접한 관계가 있기 때문에 상대적인 응답 특성 비교를 위해 다음식과 같이 변환한다.

$$CR = \frac{r - r_{ref}}{r_{ref} - r_0} \quad (3.5.7)$$

여기서 r 은 로드셀의 출력값이고, 20 sec 후의 출력값을 읽음값을 r_{ref} 로 하였다. 그리고 r_0 는 초기 실하중 변화전의 출력값이다. 로드셀의 출력을 측정할 때 초기 실하중을 가하면서 발생하는 진동 및 주기운동 등의 영향이 제거되어야만하기 때문에 20 sec 라는 간격을 두고 측정한다.

Fig. 3-5-6은 실하중을 가할 경우 발생하는 크립 응답 특성(Creep Response)과 실하중을 제거한 후 발생하는 크립 회복 특성(Creep Recovery Response)을 동시에 보여주고 있다. 크립 회복 특성은 큰 입력힘이 제거될 경우가 작은 입력힘을 제거할 경우보다 상대적인 특성이 우수하였으며 크립정도도 미약하였다. 크립 응답특성은 200 kN, 300 kN의 입력힘에 대해서는 비슷한 경향을 보인 반면 500 kN에 대해서는 크립량이 크고 응답속도도 굉장히 느리게 나타났다.

힘의 입력제거시 크립 회복특성은 30 sec 이내에 정상상태에 도달하고 크립정도도 미약했기 때문에 그 영향을 무시할수 있다. 또한 200 kN, 300 kN의 힘 입력 응답 또한 크립영향

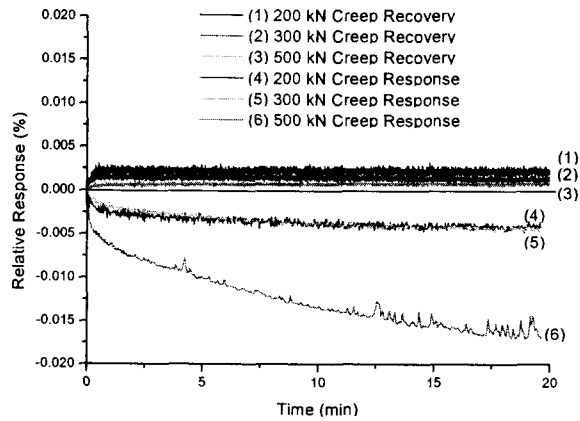


Fig. 3-5-6. 비선형 보상후 오차 결과

이 30 sec 이후에 무시할 만하였다. 그러나 500 kN 입력힘 인가시 크립 특성은 오차가 크고 그 응답속도도 매우 느리다. 따라서 500 kN 이상의 고용량의 힘에 대해서만 크립특성을 고려하여 보상하면 된다.

$$CR_{500kN} = -0.01831 + 0.01421e^{-0.001695t} \quad (3.5.8)$$

위의 식은 500 kN의 크립특성에 대한 피팅식이다. 반응이 굉장히 느리기 때문에 측정시간에 따라 크립량을 예측하여 측정결과에 반영해야 한다. 크립특성 보상후 오차가 0.005%이하로 감소 하였다.

4. 결 론

제작된 500 kN 힘교정기의 성능을 평가하였다. 그 결과, 10 kN에서는 6×10^{-4} , 그 5×10^{-4} 이상에서는 이하의 확장 불확도를 나타내는 우수한 특성을 확인할 수 있었다.

제 6 절 MEMS를 이용한 미세 힘센서 개발

1. 서 론

지금까지 변형을 게이지(strain gage)에 기초한 많은 힘센서(load cell)가 교량, 빌딩의 안전문제나 측정 물질 시험 기계와 산업용 로봇 등의 모니터(monitor)에 많이 사용되고 있다. 그러나 몇몇 시스템들은 일반적인 로드 셀이 아닌 작고 높은 감도와 정확도를 갖는 새로운 힘센서를 필요로 하고 있으며 정확한 작은 힘을 조절할 수 있는 것을 요구한다.

한편으로는 최근의 미소기계 기술(MEMS: micro electro mechanical system), 반도체공정의 고집적화로 제작과 연계하여 미소기계 제조들은 압력센서와 유사하면서 미세한 힘 센서의 개발 가능성을 보여주고 있다. 특히 몇몇 연구자들은 원격 매니플레이터, 인공지능 로봇 그리고 햅틱 인터페이스를 위한 몇몇 힘 센서로 구성된 촉각 센서의 개발을 시도하고 있다. 이들 촉각 센서들은 잡는 힘 조절을 위한 촉각 픽셀에 적용되어 수직응력(normal force)을 감지할 수 있으며 잡는 위치와 물체 인식을 위한 촉각 이미지를 제공한다. 그러나 또한 촉각 이미지와 수직응력을 얻기 위해서 탄젠트 힘(tangential forces)을 아는 것은 또한 힘 조절을 위해 제한되고 있으며 3축 촉각 센서를 필요로 한다.

Kane 등[45]과 Mei 등[46]은 촉각 센서의 재현의 가능성을 보여주기 위해 미소기계 기술을 사용한 정사각형 막(membrane) 형태를 갖춘 몇몇 3축 힘센서로 구성된 촉각센서를 제조하였다. 그러나 이것들은 감지 요소(sensing element)의 모양과 가공의 복잡성 때문에 제조가 쉽지 않다. 한편, Wang 과 Beebe[47]는 정사각형 막 형태를 갖춘 미세 전단응력 센서를 제조하였다. 센서 제조 공정이 간단하지만 센서의 감도와 온도 보정은 고려되지 않았다. 다른 한편으로는 대부분의 연구자들이 한정된 정사각형 막을 갖는 감지 요소를 설계하기 위해서 유한요소 분석을 사용하고 있다. 일반적으로 회로형 막을 갖춘 감지 요소의 경우에는 그것의 휨이 탄성과 박막 이론[48]에 의해 이론적으로 얻어질 수 있으나 유한 정사각형 요소의 경우에는 그것이 이론적인 접근을 하여 사용하기에는 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 대략적이며 간단한 빔 이론에 기초한 유한 정사각형 감지 요소를 갖춘 3축 미세 힘센서를 위한 설계 방법에 대해 제시한다. 여기에다가 설계된 감지 요소는 상업용 유한 요소 분석 소프트웨어인 ANSYS ver. 5.5[49]를 사용하여 검증하였다. 막에서 압전소자의 최적 위치는 감도와 온도 보상을 고려하여 결정하였다. 결국 본 연구팀은 실리콘 미소기계 기술에 기초한 미세 힘센서의 감지 요소를 위한 설계 공정을 구현하였다.

2. 미세 힘 센서를 위한 감지 요소의 설계

2.1 빔 이론에 기초한 설계

Fig. 3-6-1은 힘센서의 정사각형 감지 요소를 보여주고 있는데 이것은 3축 즉 F_x , F_y , F_z 를 측정할 수 있다. 감지 요소는 하중을 받는 구역(loading block)과 측면 구역(side block)으로 구성되어 있다. 여기에다가 과도한 하중 보호 구역(overload protection block)이 과도한 하중이 가해졌을 경우 힘센서를 보호하기 위한 감지 요소를 붙여놓았다.

막의 휨과 감지 요소의 형태 설계를 위해 필요한 변형 분포를 얻기 위해서 Fig. 3-6-2에서 보인 것과 같이 정사각형 막이 4개의 사다리꼴 빔 A, B, C, D 라고 가정한다. 빔 길이는 L , 하중 구역의 길이와 높이는 각각 d , h_1 그리고 막의 두께는 h , 그리고 과도한 하중 보호 구역의 높이는 h_2 이다. 하중 구역은 감지 요소의 막에 견디는 두꺼운 두께를 갖기 때문에 견고한 강체(rigid body)라고 가정한다.

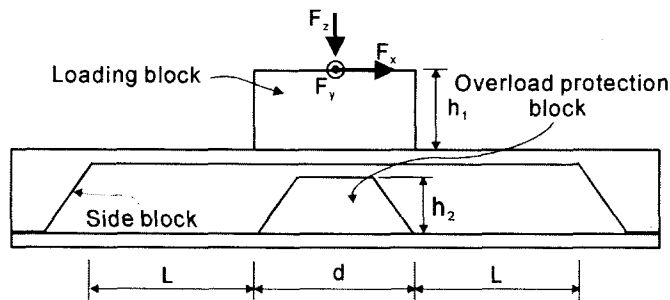


Fig. 3-6-1. Schematic diagram of a sensing element subjected to F_x , F_y and F_z loadings

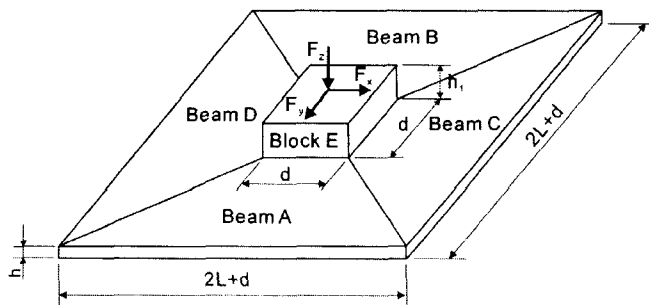


Fig. 3-6-2. Schematic diagram of the trapezoidal beam model

다른 한편으로는 Fig. 3-6-3에 나타낸 교차 빔 모델은 휨과 사다리꼴 빔 모델의 변형 분포를 비교하도록 장치했다.

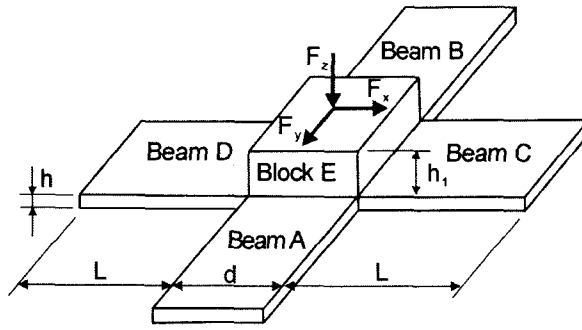


Fig. 3-6-3. Schematic diagram of the cross beam model

본 연구팀은 Fig. 3-6-4에 나타난 것과 같은 SOI(silicon on insulator) 웨이퍼를 사용하였으며 이것은 $45\mu\text{m}$ 실리콘이 $500\mu\text{m}$ 두께로 {100} 웨이퍼에 증착되어 있는 것이다. 막의 크기는 $2.404\text{mm} \times 2.404\text{mm}$ 그리고 이것의 두께는 $45\mu\text{m}$ 이다. 각 하중의 용량은 $0.1\text{N} \sim 5\text{N}$ 이며 이것은 인체가 물체의 표면에 접촉했을 때의 질감을 느끼기 위해 필요한 힘의 범위이다[50]. {100} 웨이퍼의 경우, 감지 요소의 지지 구역은 KOH 용액을 사용하여 비등방성 습식 식각이 행해졌을 때 54.74° 기울기를 갖는다[51]. 세 개의 하중이 하중 구역(loadung block)에 가해졌을 때 사다리꼴 빔 모델의 최대 휨은 $25.342\mu\text{m}$ 이다. 따라서 과부하 보호 구역의 높이, h_2 ,는 감지 요소의 손상을 고려해서 $474\mu\text{m}$ 이다.

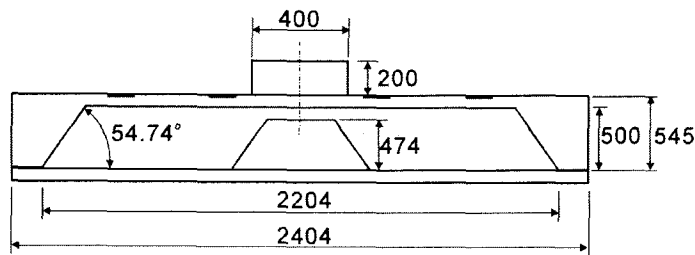


Fig. 3-6-4. Schematic diagram of the dimension for the designed force sensor (unit : mm)

2.2 유한요소해석

Fig. 3-6-4에 나타난 것과 같이 사다리꼴 빔 모델을 사용한 감지요소의 설계를 확정하기 위해서 상용 유한 요소 프로그램, ANSYS ver. 5.7을 사용하였다[49]. Fig. 3-6-5에 여덟 개의 절점과 네 개의 자유도를 갖춘 감지 요소의 유한 요소 모델이 나타나있다. 감지 요소의 지지 구역은 바닥에 고정되어 있고 각각의 하중은 집중하중이라고 가정하였다.

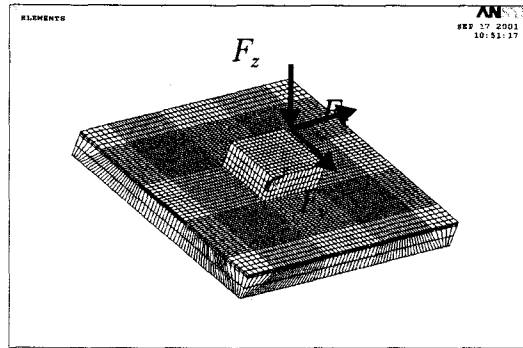


Fig. 3-6-5. Finite element model of sensing element subjected to F_x , F_y and F_z loadings

다른 한편으로는 실리콘 웨이퍼의 물질 성질은 비등방성이다. (100) 웨이퍼의 경우는 컴플라이언스 성분은 직각 좌표계가 주축과 일치했을 때 $S_{11}=7.68 \times 10^{-3}/\text{GPa}$, $S_{12}=-2.14 \times 10^{-3}/\text{GPa}$ 그리고 $S_{44}=12.6 \times 10^{-3}/\text{GPa}$ 이다[52]. 따라서 Fig. 3-6-5에 나타난 좌표를 위한 새로운 물질의 성질은 Ting의 방법[53]으로부터 얻어진다. 여기에다가 등방성 물질로 가정된 분석은 비등방성 가정과 함께 비교되어 행해졌다. 탄성 모듈러스, 포아송 비,는 각각 190 Gpa, 0.17이다[51].

각각의 하중에 관련된 감지 요소의 경우는 사다리꼴 빔 모델의 변형 분포는 교차 빔 모델과 비교했을 때 유한 요소 분석의 경우와 비슷하다[54]. 다른 한편으로는 등방성 물질로 가정한 모델의 변형 분포는 비등방성 물질로 가정한 모델과 비교했을 때 10%의 차이를 보인다[54]. 따라서 등방성 물질로 가정한 모델은 비등방성 가정 대신에 충분히 사용할 수 있으며 실리콘 웨이퍼의 감지 요소 제조 설계에 사용할 수 있다.

한편 Table 3-6-1에는 5N 하중이 가해진 감지 요소의 경우에 빔 이론과 유한 요소 방법으로 얻어진 최대 휨을 비교해 나타내었다. 사다리꼴 빔 모델은 교차 빔 모델과 대조적인 유한 요소 분석과 비슷하다.

Table 3-6-1. Comparison of maximum deflection obtained from beam theory and finite element analysis under F_x , F_y and F_z loadings of 5N

Loading	Beam theory(m)		FEM(m)
	Trapezoidal	Cross	
Fz	13.910	29.726	13.803
Fx	-5.716	-2.392	-4.649
Fy	0.000	0.000	0.000

3. 감도를 위한 완전결선 브릿지 설계

변형 게이지와 같이 압전소자(piezoresistor)의 위치는 미세 힘 센서의 온도 보상과 감도측면에서 매우 중요하다. 따라서 압전소자의 최적의 위치는 요한 요소 분석으로부터 얻어진 변형분포에 의해 결정된다. 정사각형 막의 경우에서 F_x 또는 F_y 하중이 가해졌을 때 최대 변형분포의 위치는 막의 중앙선에 있다. F_z 하중의 위치는 또한 막의 중앙선에 있다. 따라서 F_x 하중을 위한 압전소자는 중앙선으로부터 $60\mu\text{m}$ 떨어져 있다.

Fig. 3-6-9에는 F_x , F_y , 그리고 F_z 하중의 압전소자 위치를 나타내었다. 네 개의 저항 R_{z1} , R_{z2} , R_{z3} , R_{z4} 은 F_z 하중과 연관이 있고 F_x 하중의 경우에 있어서는 R_{x1} , R_{x2} , R_{x3} , R_{x4} 와 연관이 있으며 F_y 하중의 경우에는 R_{y1} , R_{y2} , R_{y3} , R_{y4} 와 연관이 있다. 압전소자의 넓이는 금속 선의 여유 때문에 $18\mu\text{m}$ 이다.

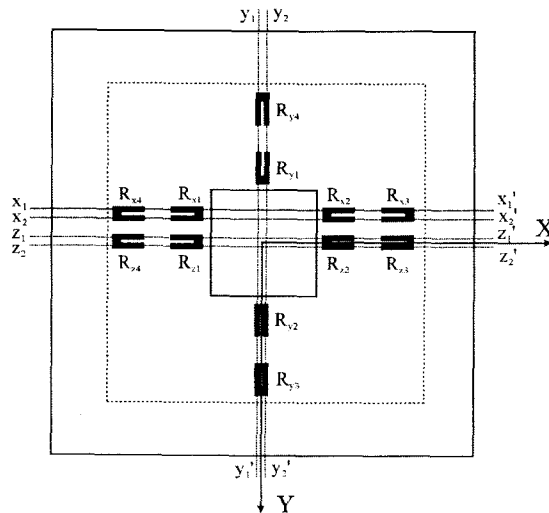


Fig. 3-6-9. Location of piezoresistors for measuring F_x , F_y and F_z loadings

센서의 감도를 증가시키고 주위의 온도와 세 축의 coupling 효과를 감소시키기 위해서 네 개의 압전소자로 구성된 최적의 전체 브릿지 회로의 설치는 매우 중요하다. 세 축 하중에 부합하는 세 개의 전체 브릿지 회로의 출력 전압의 평가는 간섭 효과를 감소시키기 위해서 전체 브릿지 회로 안에 압전소자를 최적의 조건으로 배열을 얻기 위해 필요하다.

출력 전압, 저항의 변화율은 다음 식에 의해 간단히 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (3.6.1)$$

여기에서 ϵ 은 축 변형, K 는 게이지 인자이다. 일반적으로 변형 게이지에서 게이지 인자는 2.0이고 단일 실리콘을 위해서는 90.0이며 폴리실리콘을 위해서는 30.0이다[55]. 본 연구는 단일 실리콘으로 인하여 게이지 인자로 90.0을 사용하였다.

변화 속도, $\Delta R/R$,는 유한 요소 분석과 식 1로부터 얻어진 변형 분포를 사용하여 쉽게 계산할 수 있다. Fig. 3-6-10에 5N의 F_z 하중을 다루는 감지 요소의 경우에 Z_1-Z_1' , Z_2-Z_2' , X_1-X_1' , X_2-X_2' , Y_1-Y_1' 그리고 Y_2-Y_2' 축의 저항의 변형 속도를 나타내었다. Fig. 3-6-11과 Fig. 3-6-12에 F_x 또는 F_y 하중의 저항 변형 속도가 나타나 있다. 다른 한편으로 Fig. 3-6-13에는 감지 요소의 온도가 10°C 증가했을 때 저항의 변형 속도를 나타내었다.

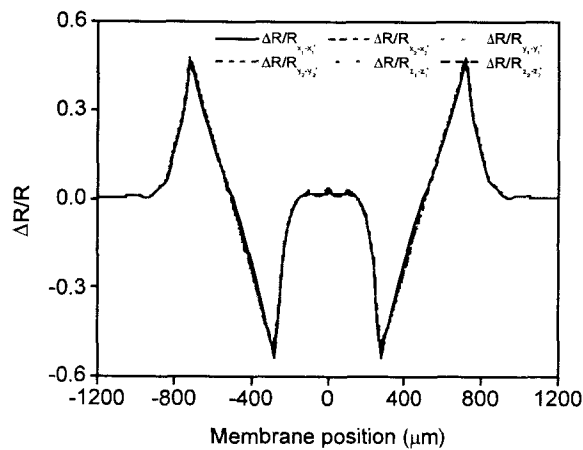


Fig. 3-6-10. The rate of piezoresistors change of under F_z loading (5 N)

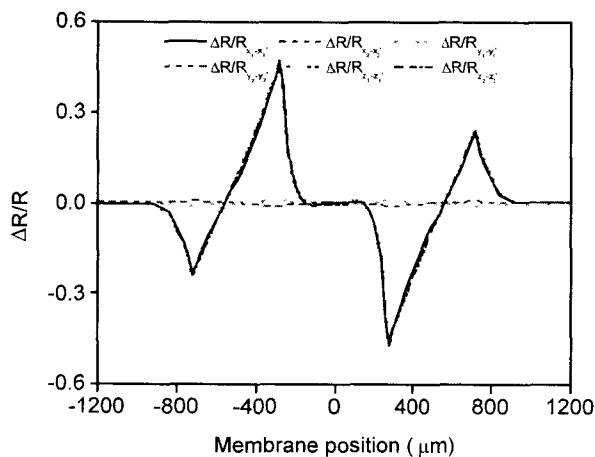


Fig. 3-6-11. The rate of piezoresistors change of under F_x loading(5 N)

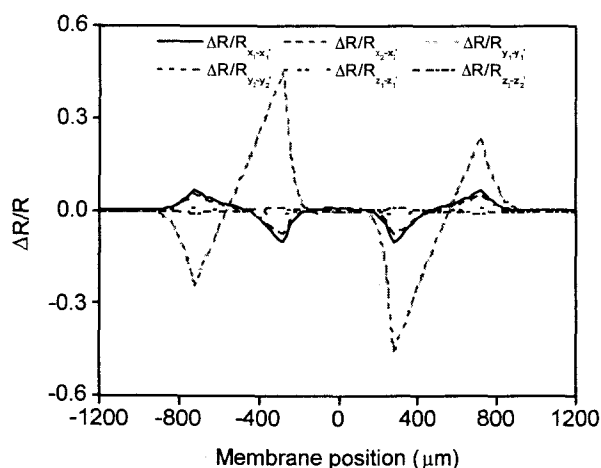


Fig. 3-6-12. The rate of piezoresistors change of under F_y loading(5 N)

Fig. 3-6-13에서는 설계된 전체 브릿지 회로가 나타나 있다. Fig. 3-6-10에 있는 F_z 하중의 경우 저항의 변화 속도는 F_x 와 F_y 하중의 경우와 다르다. 따라서 F_z 하중의 브릿지 회로에서 R_{z2} 와 R_{z3} 의 정렬은 F_x 와 F_y 회로의 저항과 다르다.

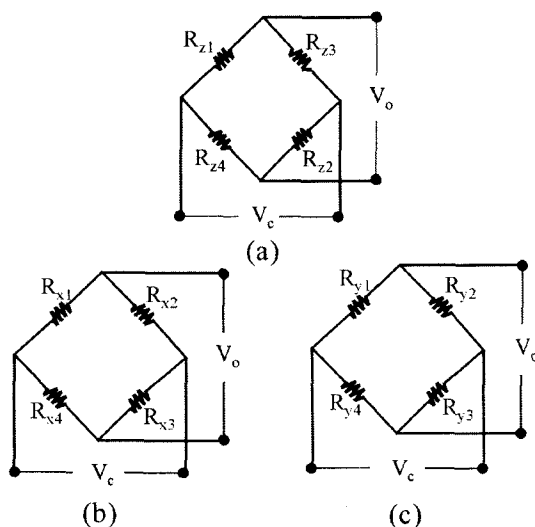


Fig. 3-6-13. Full bridge circuits of piezoresistor for measurement of three-component force : (a) F_z circuit; (b) F_x circuit; (c) F_y circuit

Table 3-6-2에는 전체 브릿지 회로로부터 얻어진 출력 전압을 나타내었다. 3요소의 간섭 효과는 거의 영이다. 여기에다가 외부환경 온도 영향($\Delta T=10^\circ\text{C}$)의 출력전압은 하중 조건에 대하여 1/50%이다.

Table 3-6-2. Comparison of full bridge circuit output obtained from the designed force sensor under F_x , F_y and F_z loadings (5N)

Loading	$\left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right _{F_z}$	$\left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right _{F_x}$	$\left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right _{F_y}$
F_z (5 N)	-7.78E-1	-5.55E-17	-2.78E-17
F_x (5 N)	0.00E+0	5.41E-1	0.00E+0
F_y (5 N)	0.00E+0	0.000	5.44E-1
$\Delta T=10^\circ\text{C}$	-2.61E-4	-5.42E-20	-8.13E-20

4. 미세기계 기술을 이용한 감지요소의 설계 과정

Fig. 3-6-14에의 (a)에서 (e)까지는 미세기계 기술(MEMS)을 사용한 설계공정을 나타내고 있다. $500\mu\text{m}$ 두께의 웨이퍼에 $45\mu\text{m}$ 실리콘이 증착된 SOI 웨이퍼는 Fig. 3-6-14 (a)에 나타낸 것과 같이 세정을 한다. 다음에 Fig. 3-6-14 (b)에 있는 것처럼 실리콘 웨이퍼의 압전소자의 형태는 포토리소그래피에 의해 형성된다. Fig. 3-6-14 (c)에는 인의 열확산 공정에 의해 형성된 압전소자가 나타나 있다. 그리고 다른 한편으로는 Fig. 3-6-13에서 보인 것과 같이 전체 브릿지 회로는 압전소자를 연결하기 위해서 금속선을 필요로 한다. Fig. 3-6-14 (b)는 포토리소그래피를 이용한 접촉 구멍과 금속 선의 연결을 나타내고 있다. Fig. 3-6-14 (e)에는 형성된 감지요소와 SU-8 포토리지스트와 KOH 용액을 사용하는 하중 구역이 나타나 있다. 미세기계 기술에 기초한 설계 공정을 사용함으로써 제작 공정은 현재 진행 중에 있다.

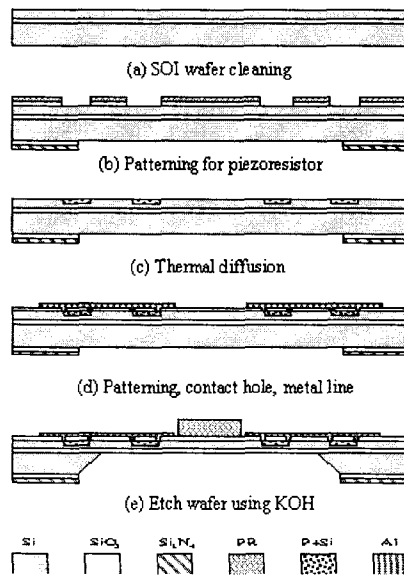


Fig. 3-6-14. Schematic diagram of micro-fabrication for tri-axial force sensor

5. 결 론

마이크로머시닝 기술을 이용한 3축을 측정할 수 있는 사각형 박판 형태의 미세 힘센서를 설계하였다. 각 하중의 용량은 0.1 N- 5 N이다. 감지부를 쉽게 설계하기 위하여 사각형박막은 네 개의 사다리꼴 빔으로 가정하여 감지부의 처짐을 구하였다. 한편 유한요소법을 사용하여 근사적인 빔이론이 사각형 박막의 감지부를 설계하는데 매우 유용한 것임을 보여주었다. 또한 각 하중에 대한 감도 및 간섭효과를 고려하여 최종적인 감지부 형상 및 저항소자의 위치를 구하였다. 최종적으로 마이크로머시닝 기술을 이용하여 미세 힘센서를 제작하는 공정을 수립하였다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1. 계획대비 목표 달성도

번호	세부연구개발목표	달 성 내 용	달성도(%)
1	· 단축/다축 힘센서 최적화 기술 개발	· 힘센서 설계의 해석적, 수치해석적, 실험적 방법 기술 개발 완료 · 다축 힘센서의 동특성 해석 세계 최초로 수행	100
2	· 피에조 필름 응용기술 개발	· 피에조 필름의 특성치와 출력 감도와와의 관계 파악 · 피에조 필름 배열에 따른 측정 가능 힘 성분 분석 · 피에조 필름 온도특성 평가 및 DB 구축	100
3	· 고정밀 대용량 빌드업 힘 측정 시스템 개발	· 4.5 MN 빌드업 시스템 제작 및 특성 평가 : 0.03 % 이내	100
4	· Built-in 센서 기술 개발 I : 원형 기둥을 이용한 다축 힘센서	· 원형 기둥을 이용한 다축 힘센서 설계 기술 개발 · 시제품 제작 및 특성 평가 · 반도체계이지 사용으로 56배의 감도향상 확인	100
5	· Built-in 센서 기술 개발 II : 스마트 탄성받침 (세계최초)	· 스마트 탄성받침 시제품 제작 및 특성 평가 · 스마트 탄성받침의 적용 가능성 파악을 위한 교량 진동해석 가능성 확인	100
6	· 고정밀 대용량 힘 발생기 오차 보상기법 개발	· 기준 로드셀의 직선성, 히스테리시스, 크립 오차의 보상 기법 개발 · 기준 힘센서의 정밀 특성 평가 · 500 kN 콤팩트형 정밀힘 발생기 설계완료 · 오차보상기법을 이용한 힘 발생기 보완 완료	100

2. 관련 분야에의 기여도

2.1 다축 힘센서 동특성 해석

본 연구에서는 독일의 표준 연구 기관인 PTB와의 공동 연구를 통해 다축 힘센서의 동특성 해석을 위한 실험적 연구 방법을 세계 최초로 제안하였고, 이를 수행하였다. 다축 힘센서

는 각종 로봇의 제어 등 동적 환경에서 사용되며, 따라서 동특성이 매우 중요하다. 본 연구를 통한 다축 힘센서의 동특성 평가 기술은 날로 증대하고 있는 다축 힘센서의 평가 및 동작거동을 고려한 다축 힘센서 설계/제작의 기반기술로 활용 가능하다.

2.2 원기둥 감지부를 이용한 다축 힘센서 개발

본 연구에서는 일반적인 구조물의 골격으로 흔히 사용되는 원기둥을 직접 감지부로 사용하여 이에 작용하는 6 분력의 힘을 측정할 수 있는 다축 힘센서 기술을 개발하였다. 이는 구조물 상시 안전진단을 위해 구조물에 추가적인 힘센서를 삽입할 때 발생하는 경제적, 기술적 문제를 해결하여, 작은 제작 비용으로 구현 가능하며 구조물의 강성을 그대로 유지할 수 있다는 점에서 로봇, 교량, 해양구조물, 도로구조물 등에 많은 응용이 가능할 것이다.

2.3 스마트 탄성받침 개발

그동안 교량의 상태 진단을 위해서는 스트레인게이지 어레이, 가속도계 어레이 등을 설치하거나, 광섬유 센서 등을 설치하여 교량의 거동을 분석하였다. 그러나, 상기 방법들은 추가적인 센서의 설치로 인한 경제적, 기술적, 유지보수의 문제점들을 야기시켰다. 본 연구에서는 교량의 상판과 교각 사이에 삽입되는 탄성받침에 피에조 필름을 내장하여 세계 최초로 스마트 탄성받침을 개발하였다. 스마트 탄성받침은 기존 교량 거동 방법의 문제점을 해결해 줌으로 교량 상태 감시에 매우 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

2.4 미세 힘센서 개발

첨단 원격 의료 진단용 로봇 및 미세 수술용 로봇의 그립퍼(gripper)는 초정밀도를 가지고 전단력과 수직력을 동시에 측정할 수 있는 3축 힘센서를 요구하고 있다. 그러나 기존의 로드셀(load cell)은 정밀도 및 크기문제로 그립퍼에는 적당하지 않다. 따라서 본 연구에서는 MEMS 제작 기술에 바탕을 둔 0.1 ~ 5 N 용량의 2.4 mm × 2.4 mm 크기의 미세 힘센서 설계를 통하여 그립퍼로서의 가능성을 확인하였고 현재 반도체 공정설계에 따라 제작중이다. 또한 Wisconsin-Madison내의 의공학 실험실과 정전기력을 이용한 촉각 제시 시스템 개발을 통하여 시각 장애자를 위한 의사전달, 첨단 항법장치 그리고 가상환경에서의 촉각 제시 기술 가능성을 보여 주었다.

2.5 고정밀 대용량 힘 발생기 오차 보상기법 개발

고정밀 대용량 힘 발생기의 개발로, 국내 힘관련 교정기관의 교정 정확도를 향상시킬 수 있으며, 이는 나아가 관련 산업의 국제 경쟁력 강화를 가져올 수 있으며, 향후 지속될 MRA 체제에서의 기술 장벽을 극복할 수 있다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

다축 힘센서 동특성 평가 기술을 바탕으로 동측정에 적합한 다축 힘센서 개발의 기반 기술로 활용한다.

고정밀 빌드업 힘 측정 시스템을 이용하여 10 MN 힘표준기의 정확도를 향상시키고, 2003년에 시작되는 국가별 핵심비교에서 우수한 결과를 얻도록 한다. 이로부터, 국내 관련 산업의 힘표준 소급성을 국제적으로 인정받도록 한다.

구조물을 힘 측정의 감지부로 활용하는 원기동형 다축 힘센서 기술은, 각종 토목 구조물의 상시 안전 진단에 효과적으로 응용 가능하므로 기업체 기술이전을 추진한다.

스마트 탄성받침은 각종 교량에 기본적으로 장착되어 교량의 상태 모니터링에 사용될 수 있다. 개발된 기술은 국내 최대의 탄성받침 생산업체인 유니슨 주식회사에 기술이전하여 상품화 되도록 한다.

고정밀 유압식 힘발생기의 오차성분 감소로, 힘분야 교정기관의 능력 향상을 이룰 수 있다. 개발된 기술은 유압식 힘발생기 전문 생산업체인 (주)파워 MnC에 기술이전하여 상품화 되도록 한다.

국내외적으로 현재 진행중인 미세 힘센서의 개발은 향후 10년 이내에 개발이 완료되어 첨단 원격 의료용 로봇, 미세 수술용 로봇, 그리고 가상환경 구현 기술에 활용될 수 있을 것으로 전망되고 있다. 따라서 본 과제의 1단계에서 확립한 설계기술을 2단계 미세 힘센서 개발의 기반기술로서 활용되도록 한다. 또한 정전기력을 이용한 촉각제시 시스템 역시 향후 시각 장애자용 의사 전달 및 가상환경 구현 시스템의 기반기술로 활용한다.

본 연구실 고유 기술인 힘표준기 정확도 평가기술을 이용하여 각국 힘표준기들에 관한 평가 DB를 구축한다면, 본 기술은 힘표준기 평가의 국제표준 기술로 채택되어 세계 힘표준을 선도하는 기술로 활용될 수 있다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

NIST Microforce 실험실

1. Nano Newton level 힘 표준기 개발의 필요성

- 현재 나노 압입기에 대한 힘 평가를 집중적으로 수행하고 있음, 향후 AFM 프로브에 대한 평가를 계획하고 있음, 실제적으로 NIST도 나노 힘 표준기의 필요성을 찾고 있음.
- 현재 NIST에서는 정전기력을 이용한 힘 표준기 개발 외에 빛의 Radiation을 이용한 힘 표준기 개발도 고려하고 있음

2. 현재 NIST의 나노 힘 표준기 개발시 필요한 장비

- Voltage measurement : \$ 8,000
- Capacitance measurement : \$ 26,000
- Differential-displacement interferometer \$ 30,000
- Manufacture of Leaf spring using EDM (Va-Cu, 20 μ m) : \$ 2,000
- Inner and outer electrodes using Al 6061-T6 : \$ 10,000 - 20,000
- two 5-axis stages(including 3-axis stage) : \$ 4,000
- Control system : \$ 20,000
- AFM 및 Nano indenter 구입

3. 힘 표준기를 위한 항온항습실의 필요성

- 정밀도를 높이기 위해서는 항온항습실이 필요함
- NIST에서는 Digital load cell에 대한 시험방법을 어느 정도 확립하였으며 계속 연구를 수행하고 있음

Wisconsin-Madison 대학의 Biomedical Engineering 부에 소속되어 있는 MMB
(Microtechnology for Medicine and Biology) 실험실

1. 정전기력을 이용한 MEMS 기반 촉각 제시 시스템 개발 및 평가 수행

- 유전율 및 제작공정을 고려한 유전체 선정 : BCB(Dow Corning Co.)
- 선정된 유전체에 대한 새로운 반도체 공정 Recipe 작성
- MEMS에 기반을 둔 촉각 제시 시스템 제작 및 평가 수행

2. 향후 연구 테마

- 정전기력을 이용한 촉감 재현 시스템 개발
- "Construction material"을 이용한 "Microfluidics" 플랫폼 제작
- Hydrogel을 이용한 마이크로 mixer, valve 제작 기술
- LOC(lab on a chip) 및 POC(point of care) 신개념에 대한 센서 제작기술

제 7 장 참 고 문 헌

- [1] A. Bray, 1972, "The Influence of Contact Stresses on the Characteristics of a Load Cell," V D I Berichte, pp.43~52.
- [2] G.M. Robinson, 1986, "Errors due to Non-Uniform Axisymmetric Loading of Column Load Cell," Mechanical Problems in Measuring Force and Mass, Martinus Nijhoff Publishers.
- [3] G.M. Robinson, 1995, "Genetic Algorithm Optimization of Load Cell Geometry by Finite Element Analysis," pp. 927~952
- [4] G.M. Robinson, 1995, "The Influence of Contact Stresses on Cylindrical Strain Gauge Load Cells," Proceedings of the 14th Conference of IMEKO TC3 on Measurement of Force and Mass, Warszawa, Poland, September.
- [5] K.G. Sundin and M. Johsson, 1985, "A Stiff and Compact Impact-Force Transducer Based on Strain Measurement," Cambridge University
- [6] Mitchell, R. A., Wooley, R. M. and Fisher, C. R., 1971, "Formulation and Experimental Verification of an Axisymmetric Finite-element Structural Analysis," J. of Res. of the National Bureau of Standards, 75C, Nos 3 & 4, 155~163.
- [7] Dae-Im Kang, 1994, "Design and Application of Force Measuring System Using Build-up Technique," Ph. D. Thesis, Korea Advanced Institute Science and Technology.
- [8] C. Y. Lee, D. I. Kang, 1998, "Nonlinear Finite Element Analysis According to Design Parameters of A Column Type Load Cells", Proceedings of the 16th Conference of IMEKO TC3 on Measurement of Force and Mass, Taejon, Republic of Korea, September.
- [9] R. Kumme, M. Peters and A. Sawla, 1995 "Improvements of dynamic force calibration Part 2," Commission of the European Communities(BCR information, Report EUR No. 16497EN) ISBN 92-827-5344-1 122.
- [10] R. Kumme, 1996 "Untersuchungen eines direkten Verfahrens zur dynamischen Kalibrierung von Kraftmeßgeräten - ein Beitrag zur Verringerung der Meßunsicherheit Dissertation," Technische Universität Braunschweig (PTB-Bericht MA-48) ISBN 3-89429-744-1 170.
- [11] R. Kumme, 1996 "The determination of the effective dynamic force for the

- calibration of force transducers, with due regard to the distribution of mass and acceleration," Proceedings of the 15th IMEKO TC3 Conference, Madrid (Spain) 129 ~138.
- [12] R. Kumme, 1997 "The main influences on the dynamic properties of force measuring devices," Proceedings of the 14th IMEKO World Congress, Tampere (Finland) 3 102~107.
- [13] Y. Fujii and H. Fujimoto, 1999 "Design Note: Proposal for an impulse response evaluation method for force transducers," Meas. Sci. Technol. 10 N31~N33.
- [14] Y. Fujii, H. Fujimoto and S. Namioka, 1999 "Mass measurement under weightless conditions," Review of Scientific Instruments 70(1) 111~113.
- [15] Y. Fujii and H. Fujimoto, 1999 "Measurement of frictional characteristics of a pneumatic linear bearing," Meas. Sci. Technol. 10 362~366.
- [16] M. Kobusch, T. Bruns, R. Kumme and Y.-K. Park, 2002 "Preliminary investigations of dynamic responses of a multi-component force-moment sensor subject to impulse forces," IMEKO TC3, Germany, to be published.
- [17] Y.-K. Park, R. Kumme and D.-I. Kang, 2002 "Dynamic investigation of a 3-component force-moment sensor," accepted for publication to Meas. Sci. Technol.
- [18] D.-I. Kang, G.-S. Kim, H.-G. Song and J.-T. Lee, 1997 "Characteristic evaluation of 3-component force sensor," Proceedings of IMEKO TC3 1~6.
- [19] G.-S. Kim, D.-I. Kang, S.-Y. Jeung and J.-W. Joo, 1997 "Design of sensing element for 3-component load cell using parallel plate structure," J. Korean Soc. Mech. Engng 15(9) 127~34.
- [20] D.-I. Kang, S.-Y. Jeung and J.-W. Joo. 1987 "Design and evaluation of binocular type six-component load cell by using experimental technique," J. of KSME 21(11) 1921~1930.
- [21] G.-S. Kim, 2000 "The development of a six-component force/moment sensor testing machine and its evaluation of uncertainty," Meas. Sci. Technol. 11 1377~1382.
- [22] 노관섭, 1997, "국내 포장의 유지보수 현황 및 개선 방향," 도로교통 안전협회 기술보고서, pp.57~61.
- [23] 손병기, 1992, 센서의 압전변환기능, 일진사, pp.28~30.
- [24] 염영하, 1996, 신편 기계공작법, 동명사, pp.142~154.
- [25] K. Ono and Y. Hatamura, 1986, "A New Design for 6-component Force/Torque Sensors," Mechanical Problems in Measuring Force and Mass, pp. 39~48.

- [26] Y. Hatamura, K. Matsumoto and H. Morishita, 1989, "A Miniature 6-Axis Force Sensor of Multi-layer Parallel Plate Structure," Proc. Conf. IMEKO, pp. 567~582.
- [27] 김갑순, 강대임, 정수연, 주진원, 1997, "병렬판 구조를 이용한 3분력 로드셀 감지부의 설계," 대한기계학회 논문집 A, 제 21권, 제 11호, pp. 1871~1884.
- [28] 강대임, 김갑순, 정수연, 주진원, 1997, "실험계획법에 의한 쌍안경식 6축 로드셀의 설계 및 개발," 대한기계학회 논문집 A, 제 21권, 제 11호, pp. 1921~1930.
- [29] C. Schwarzsinger, L. Supper and H. Winsauer, 1992, "Strain Gages as Sensors for Controlling the Manipulative Robot Hand OEDIPUS," REports in Applied Measurement, Vol. 8, pp. 17~22.
- [30] The Staff of Measurements Group, 1988, "Strain Gage Based Transducers", pp. 7~28.
- [31] 강대임, 1994, "BUILD-UP 기법을 이용한 힘 측정 시스템의 설계 및 응용", 박사학위논문, 한국과학기술원.
- [32] C.C. Lin, T.T. Soong and H.G. Natke, 1990, "Real time system identification of degrading structures," J Engrg. Mech. ASCE, Vol. 126, No. 10, pp.126~136.
- [33] M. Sanayei and O. Onipede, 1991 "Damage assessment of structures using static test data," AIAA J Vol. 26 No. 1, pp. 104~110.
- [34] H.J. Miesslerer and R. Lessing, 1989 "Monitoring of load bearing structures with optical fibres," IABSE Symposium, Lisbon.
- [35] J.M. Caussignac, M. Barbachì and A. Chabert, 1996 "Bridge bearings equipped with optical fiber sensor for measuring vertical load through the support," Proceeding of SPIE, Vo. 2719, pp. 220~228.
- [36] Piezo film sensors technical manual, Measurement Specialties, Inc., www.msisua.com.
- [37] R. Hajela and F.I. Soeiro, 1990 "Structural damage detection based on static and modal analysis," AIAA J. Vol 28, No. 6, pp. 1110~1115.
- [38] E. Crawley and E. Anderson, 1989 "Detailed models of piezoceramic actuation of beams", Proceeding of 30th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, (Mobile, AL), New York:AIAA, pp.2000~2010.
- [39] S. Jung and S. Kim, 1994 "Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuators by feed-forward model reference control. Prec. Eng., 16, pp.49~45.
- [40] P. Ge and M. Jouaneh, 1996 "Tracking control of piezoceramic actuator", IEEE

- Trans. Control System Technology, Vol.4, pp.209~216.
- [41] 정희원, 2001 “압전소자 구동기의 이력과 크립현상의 분석 및 응용에 관한 연구”, 박사 학위논문, KAIST.
- [42] L.D. Landau and E.M.Lifshitz, 1960 “Electrodynamics of Continuous Media”, Pergamon Press : Oxford.
- [43] Preisach F., 1935 “On Magnetic Aftereffect”, Zeitschrift fur Physik, Vol.94, pp.277 ~302.
- [44] Thomas W. Bartel and Simone L. Yaniv, 1997 “Creep and creep recovery response of load cells tested according to U.S. and International Evaluation Procedures”, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. Vol.102, No.3, pp.349~362.
- [45] B.J. Kane, M.R. Cutkosy and G.T.A. Kovacs, 1996 “CMOS-compatible traction stress sensor for use in high-resolution tactile imaging,” Sensor and Actuators (A), Vol. 54, pp.511~516.
- [46] T. Mei, W.J. Li, Y. Ge, Y. Chen, L. Ni and M.H. Chan, 2000 “An integrated MEMS three-dimensional tactile sensor with large force range,” Sensors and Actuators(A), Vol. 80, pp.155~162.
- [47] L. Wang and D.J. Beebe, 2000 “A silicon-shear force sensor: development and characterization,” Sensor and Actuators(A), Vol. 84, pp.33~44.
- [48] Timoshenko and Woinowsky-Krieger, 1959 Theory of plates and shells, McGraw-Hill, Inc.
- [49] ANSYS Ver. 5.5 Manual, 2000.
- [50] K.E. Pennywitt, Robotic tactile sensing, in Byte, pp. 177~200.
- [51] K.E. Petersen, 1982 “Silicon as a mechanical material,” Proc. IEEE, Vol.70, pp.420 ~457.
- [52] J.J. Wortman and R.A. Evans, 1965 “Youngs modulus, shear modulus, and Poissons ratio in silicon and germanium,” Journal of Applied Physics, Vol. 36(1), pp.153~156.
- [53] T.C.T. Ting, 1995 “Generalized Dundurs constant for anisotropic bimaternal,” International Journal of Solids and Structures, Vol.32, pp.483~500.
- [54] J.H. Kim, W.K. Cho, Y.K. Park and D.I. Kang, 2002 “Design and fabrication of micro force sensor using MEMS fabrication technology,” KSPE, Spring annual meeting, pp.497~502.
- [55] Mohamed, Gad-el-Hak, 2001, The MEMS Handbook, CRC Press.

여 백

특정연구개발사업 연구결과 활용계획서

사업명	중사업명	특정연구개발사업			
	세부사업명	국가지정연구실사업			
과제명		센서/신개념을 이용한 힘 측정기술 및 응용			
연구기관		한국표준과학연구원	연구책임자	강대임	
총연구기간		2000년. 6월. 14일. ~ 2002년. 6월. 13일. (24개월)			
총연구비 (단위 : 천원)		정부출연금	민간부담금	합계	
		673,454	-	673,454	
기술분야		측정표준기술			
참여기업		없음			
공동연구기관		없음			
위탁연구기관		없음			
연구결과활용 (해당항목에(√) 표시)		1. 기업화 ()	2. 기술이전()	3. 후속연구추진(V)	4. 타사업에 활용()
		5. 선행 및 기 초연구()	6. 기타목적활용 (교육, 연구)()	7. 활용중단(미활용) ()	8. 기타()

특정연구개발사업 처리규정 제 31조(연구개발결과의 보고) 제 2항에 의거 연구결과 활용계획서를 제출합니다.

첨부 : 1. 연구결과 활용계획서 1부.
2. 기술요약서 1부

2002 년 6 월 일

연구책임자 : 강대임 (인)

연구기관장 : 은희준 (직인)

과학기술부장관 귀하

연구결과 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

가. 최종목표

- 스트레인게이지, 피에조 필름, MEMS 기술을 이용한 힘 측정 기술의 개발 및 응용
- Built-in 센서 기술의 개발 및 응용
- 신개념을 이용한 힘 측정기술의 개발
- 힘센서 동적평가기술 개발 및 시스템 구축

나. 단계목표

- 단축/다축 힘센서 최적화 기술 및 응용 기술 개발
- 피에조 필름 응용 기술 개발
- Built-in 센서 기술 개발 : 스마트 탄성받침, 원형기둥을 이용한 다축 힘센서
- 힘센서 정적 특성 평가 기술 개발

2. 연구수행결과 현황(연구종료시점까지)

가. 특허(실용신안) 등 자료목록

발명명칭	특허공고번호 출원(등록)번호	공고일자 출원(등록)일자	발명자 (출원인)	출원국	비고
스트레인게이지 부착구	2000-36964호	2000. 6	표준연구원	한국	출원
축감측정 장치 및 방법	2000-37810호	2000. 7	표준연구원	한국	출원
기동형 감지부를 이용한 다축 힘/모멘트 검출방법 (국외 준비중)	2001-0082771호	2001. 12	표준연구원	한국	출원
교량의 안전진단 방법 및 장치 (국외 준비중)	2002-0016204호	2002. 3.	표준연구원	한국	출원

나. 프로그램 등록목록

프로그램 명칭	등록번호	등록일자	개발자	비고

다. 노하우 내역

- 로드셀/토크셀 감지부 설계 기술
- 스트레인게이지 부착 및 처리 기술
- 피에조 필름 응용 기술
- Build-up 시스템 구성 기술
- 미세 힘센서 설계 및 공정 기술
- 대용량 힘 발생 기술

라. 발생품 및 시작품 내역

- 대용량 로드셀 (10 MN)
- 원기둥형 다축 로드셀
- 스마트 탄성받침
- 500 kN 대용량 힘 발생기
- 3축 미세 힘센서
- 정전기력 측각 제시 장치

마. 논문게재 및 발표 실적

○ 논문게재 실적(필요시 별지사용)

학술지 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명	SCI게재 여부
한국정밀공학회	퍼지제어기를 이용한 토크표준기의 정밀제어	2001년 7월	7	한국정밀공학회	한국	X
대한기계학회	원기등을 이용한 6축 힘/모멘트 센서의 설계 및 제작	게재 승인		대한기계학회	한국	X
한국정밀공학회	미세 힘 센서 개발 및 응용에 관한 연구동향	2002년 3월	3	한국정밀공학회	한국	X
한국정밀공학회	나노 힘 측정표준의 국제 연구동향	2002년 3월	3	한국정밀공학회	한국	X
Measurement	Design and evaluation of a six-component load cell	2002년 9월	32	Elsevier		O
Meas. Sci. and Tech.	Dynamic investigation of a three-component force-moment sensor	2002년 5월	13	Institute of Physics Publishing	UK	O
Meas. Sci. and Tech.	Dynamic investigation of a binocular 6-component force-moment sensor	2002년 7월	13	Institute of Physics Publishing	UK	O

학술지 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명	SCI게재 여부
IEEE Sensor J.	Design of a three-component silicon-based force sensor with square membrane using approximate beam theory	심사중			USA	X
Measurement	Design and analysis of column type multi-component force/moment sensor	게재승인				O
Meas. Sci. and Tech.	Design and fabrication of a three-component force/moment sensor using parallel plate-beams	심사중			UK	O
Experi. Tech.	Development of a binocular type six-component load cell using experimental technique	게재승인			USA	O
Experi. Mech.	Deadweights pendulum motion in a 500 kN force standard machine	심사중			USA	O
계: 12						

○ 학술회의 발표 실적(필요시 별지사용)

학술회의 명칭	제 목	계재연월일	호	발행기관	국 명
대한기계학회 2001년 춘계 학술대회(제주)	기둥을 이용한 다축 힘/모멘트 감지 방법에 관한 연구	2001년 6월			한국
대한기계학회 2001년 춘계 학술대회(제주)	유한요소해석을 이용한 3축 힘 촉각센서 설계 및 해석	2001년 6월			한국
대한기계학회 2002년 춘계 부문학술대회(수원)	대용량 compact형 로드셀 설계 및 해석	2002년 3월			한국
한국정밀공학회 2002년도 춘계학술대회	MEMS 제작기술을 이용한 미세 힘센서 설계 및 제작	2002년 5월			한국
16th IMEKO world congress	Establishment of large force standards based on built-in force transducers and build-up system	2000년 9월			오스트 리아
APMF 2000	Deadweight motion in the 540 kN force standard machine	2000년 11월			일본
APMF 2000	Development of the fully automated deadweight force calibrators	2000년 11월			일본

학술회의 명칭	제 목	계재연월일	호	발 행 기 관	국 명
17th IMEKO TC-3 confer.	Design and Analysis of of column type multi-component force/moment sensor	2001년 9월			터어키
17th IMEKO TC-3 confer.	Investigation of the dynamic behaviour of PTB deadweight force standard machines	2001년 9월			터어키
17th IMEKO TC-3 confer.	Development of a High precision hydraulic force calibration system	2001년 9월			터어키
Int. Sensor Confer.	Design of a three-component silicon-based force sensor using beam theory and finite element analysis	2001년 10월			한국
18th IMEKO TC-3 confer.	Dynamic investigation of multi-component force sensors using harmonic excitation	2002년 9월			독일
18th IMEKO TC-3 confer.	Development of smart elastometric bearing equipped with PVDF polymer film for monitoring vertical load through the support	2002년 9월			독일
18th IMEKO TC-3 confer.	Design and fabrication of a three-component force sensor using microfabrication technology	2002년 9월			독일
계: 14					

3. 연구성과

※ 기술이전이나 기업화 완료(추진중 포함) 실적

년 월	대상기관	내 용	비 고
2000. 8	(주) 파워엠앤씨	실하중토크 교정기 설계 및 제작기술	기술전수료 : 9,800천원
2001. 10.	(주) R&B	토크셀 설계 및 제작기술	기술전수료 : 10,000천원
2001. 11 - 2002. 3	(주) 모텍스	전자저울용 로드셀 제작 및 공정기술	무 상

4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

가. 당해연도 활용계획

본 과제는 2단계로 나누어져 있으며, 현재는 1단계가 종료된 상태이다. 따라서, 실용화 가능한 연구 결과들은 과제의 최종 종료 시에 다수 도출될 것이며, 1단계의 연구 결과들은 2단계 연구에 직접적으로 활용될 것이다.

그럼에도 불구하고, 1단계에서 도출된 연구결과 중 활용 가능성이 큰 결과들은 다음과 같다.

- 원기동형 감지부를 갖는 다축힘센서기술

1단계에서 개발된 기술을 토대로, 2단계의 당해연도 연구 시 4각형 단면과 I자형 단면을 갖는 다축힘센서를 개발할 것이다.

- 스마트 탄성받침

1단계의 연구를 통해, 피에조 필름을 이용한 스마트 탄성받침의 가능성을 파악하였다. 2단계 연구를 통해서, 이의 신뢰성 및 적용 가능성을 분석할 것이다.

- 고정밀 대용량 힘 발생기술

본 연구를 통해 500 kN 대용량 고정밀 힘발생기술을 개발하여, 이를 기존의 힘발생기에 적용하였다. 상기 기기는 힘센서의 교정에 직접 활용되에 산업체로의 표준 보급 역할을 담당하게 된다.

- 정전기력을 이용한 촉각제시기술

본 연구에서는 MEMS 공정을 이용하여 정전기력 촉각제시기술을 개발하였다. 본 기술은 시각장애자용 점자 제시시스템으로 활용할 수 있으며, 구체적으로는 시각장애자용 PDA에서 활용될 수 있다.

나. 활용방법

전술한 바와 같이 본 1단계 연구의 도출 결과들은 2단계 연구를 위한 기반 기술로 활용될 것이다.

다. 차년도이후 활용계획

- 원기동형 감지부를 갖는 다축힘센서기술

4각형 단면과 I자형 단면을 갖는 다축힘센서의 개발을 통해 현장 응용성을 강화한 후, 실제 구조물에 적용한다.

- 스마트 탄성받침

스마트 탄성받침의 신뢰성 및 적용 가능성을 확보한 후, 탄성 받침 생산업체로의 기술 이전을 추진한다.

- 정전기력을 이용한 촉각제시기술
- 벤처기업으로의 기술이전을 추진한다. 시각장애인용 PDA 등, 가능한 응용 분야를 도출한다.

5. 기대효과

- 스마트 탄성 받침 실용화에 따른 매출 효과 (연간 2백억원)
- 정밀 힘센서 실용화에 따른 수입대체효과
- 힘제어 정밀 로봇 실용화에 따른 매출 효과
- 원격 의료 진단, 촉각 가상 환경 등의 미래 분야의 핵심 측정 기술 개발을 통한 미래 신산업 수요 창출
- 교량, 도로, 대형 구조물 등의 상시 감시를 통한 사회간접자본의 안전 관리에 기여
- 힘 측정의 정밀화를 통해 제품의 품질 향상, 원가 절감, 저가 실현 등에 기여
- 힘 관련 표준의 확보로 관련 산업의 표준화에 기여
- 국가간 상호 표준 인정에 합격할 수 있는 표준 능력을 확보함으로써 국내 제품의 수출 향상에 기여

6. 문제점 및 건의사항(연구성과의 제고를 위한 제도·규정 및 연구관리 등의 개선점을 기재)

- 없음

기술 요약서

■ 기술의 명칭

※기술이란? 과제 수행결과 확보된 신기술, 산업재산권, 기술적 노하우 등 개발된 성과 중 수요자에게 공급할 수 있는 형태의 기술을 의미함

- 대용량 로드셀 최적화 기술
- 기동형 다축 힘센서 기술
- 스마트 탄성받침 기술
- 고정밀 대용량 힘발생기술
- MEMS를 이용한 정전기력 측각제시기술

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	2000-N-NL-C-141			
과 제 명	센서/신개념을 이용한 힘측정기술 및 응용			
사 업 명	특정연구개발사업			
세부사업명	국가지정연구실사업			
연구기관	한국표준과학연구원	기관유형	출연연구소	
참여기관(기업)	없음			
총연구기간	24개월			
총연구비	정부(673,454)천원 민간(-)천원 합계(673,454)천원			
연구책임자 1	성 명	강 대 임	주민번호	
	근무기관 부 서	한국표준과학연구원 물리표준부	E-mail	dikang@kriss.re.kr
	직위/직급	부장/책임연구원	전화번호	042-868-5010
실무연락책임자	성 명	박 연 규	소속/부서	표준연구원/물리표준부
	직위/직급	선임연구원	E-mail	ykpark@kriss.re.kr
	전화번호	042-868-5240	FAX	042-868-5249
	주 소	(305-340) 대전시 유성구 도룡동 1번지		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

본 기술은 힘의 정밀 측정 및 이의 응용과 관련된 것이다. 구체적으로는, 대용량 로드셀의 현상 최적화와 고정밀 대용량 힘 발생기술 등 대용량 힘의 측정 및 평가와 관련된 기술, 기동형 다축 힘센서와 스마트 탄성 받침과 같은 기존의 구조물을 이용하여 힘을 측정할 수 있는 built-in 측정 기술, 미세힘의 제어와 관련된 MEMS를 이용한 정전기력 촉각 제시 기술이 있다.

<기술적 특징>

- (1) 접촉 조건(로드셀 지지부의 외경)을 최적화 시킴으로써 로드셀 특성 향상시킬 수 있었다. 이를 통하여 컴팩트한 고정밀 대용량 로드셀의 구현이 가능하다.
- (2) 대용량 힘 발생기는 기존 로드셀을 이용하여 유압 실린더로 힘을 발생한다. 이때, 기존 로드셀이 갖는 히스테리시스 특성 및 크립 특성을 보상함으로써, 고정밀 힘 발생을 가능하게 하였다.
- (3) 기존의 기동형 구조물에 스트레인게이지를 부착하여 6축의 힘과 모멘트를 측정할 수 있으며, 제작비용이 저렴하여 응용 범위가 넓고 구조물 안전 감시에 효과적 활용 가능하다. 본 기술은 원기동 형상 뿐 아니라, 사각 형상의 감지부에도 적용 가능하다.
- (4) 각종 교량의 하단에 설치되는 탄성받침에 피에조 필름을 결합하여 교량의 상태 진단을 할 수 있다. 교량에 반드시 설치되어야 하는 탄성받침을 이용하므로, 경제적 교량 진단을 달성할 수 있다.
- (5) 전극과 유전체 사이에 작용하는 정전기력을 이용하는 촉각제시기술을 MEMS를 1 용하여 구현하였다. 시각장애자의 점자인식 등에 활용할 수 있다.

[용도·이용분야]

- (1) 대용량 힘의 정밀 측정
- (2) 고정밀 힘발생기를 통한 교정의 달성 및, 힘교정기의 상품화 및 교정기관에의 보급 효율화
- (3) 기동형 다축힘센서를 이용한 구조물의 상태 진단
- (4) 스마트 탄성받침을 이용한 교량 안전 모니터링
- (5) MEMS를 이용한 촉각제시를 통한 시각장애인용 PDA 등 점자 제시 시스템

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오.)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적용시킴
	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
V	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

■ 본 기술과 관련하여 추가로 확보되었거나 개발중인 기술

[기술개요]

기술명	기동형 다축 힘센서 기술
개발단계	<input type="checkbox"/> 연구개발 계획 <input checked="" type="checkbox"/> 연구개발 중 <input type="checkbox"/> 연구개발 완료
기술개요	본 연구에서 개발된 원기동형 다축힘센서를 확장하여, 사각형 및 I자형 단면을 갖는 다축 힘센서를 개발함

[기술을 도출한 과제현황]

과 제 관 리 번 호	M1-0204-00-0075			
과 제 명	센서/신개념을 이용한 힘측정기술 및 응용 (2단계)			
사 업 명	특정연구개발사업			
세 부 사 업 명	국가지정연구실사업			
연 구 기 관	한국표준과학연구원	기관유형	출 연 연	
참여기관(기업)				
총 연 구 기 간	2002.6.14-2005.6.13			
총 연 구 비	합계 : (990)백만원 - 정부 : (990)백만원 민간 : ()백만원			
연 구 책 임 자	소 속	한국표준과학연구원 /물리표준부	성 명	강 대 임
	전화번호	042-868-5010	E-mail	dikang@kriss.re.kr
연구개발 주요내용				
<ul style="list-style-type: none"> · 대용량 힘 정확도 향상 · 힘센서 동적 특성 평가 시스템 기술 개발 · Built-in 센서 상용화 · 미래 지향 신개념 힘 측정 기초 기술 개발 : 마이크로 힘 측정 기술 · 실하중 힘표준기 정확도 DB 구축 및 표준화 				

BIBLIOGRAPHIC DATA SHEET		1. 관리번호	2. 수행부서 질량힘그룹	3. 발행일 2002. 6. 13
4. 제목/부제 센서/신개념을 이용한 힘 측정기술 및 응용			7. 주제분야	
5. 저자(공저자) 강대임, 박연규, 김종호, 최인묵, 송후근, 이정태		8. 수행기관 보고서번호 KRISS/IR--2002-062		
6. 수행기관(KRISS 이외의 공동 혹은 위탁연구기관) 한국표준과학연구원		9. 계약번호		10. 자료내역
11. 위탁기관				
12. 보충사항 (관련업무를 기록한다)				
13. 초록(주요 참고문헌이나 관련문헌이 있을 경우 여기에 명시한다)				
<ul style="list-style-type: none"> · 단축/다축 힘센서 최적화 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 힘센서 설계의 해석적, 수치해석적, 실험적 방법 기술 개발 완료 - 다축 힘센서의 동특성 해석 세계 최초로 수행 · 피에조 필름 응용기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 피에조 필름의 특성치와 출력 감도와의 관계 파악 - 피에조 필름 배열에 따른 측정 가능 힘 성분 분석 - 피에조 필름 온도특성 평가 및 DB 구축 · Built-in 센서 기술 개발 : 원형 기동을 이용한 다축 힘센서 <ul style="list-style-type: none"> - 원형 기동을 이용한 다축 힘센서 설계 기술 개발 - 시제품 제작 및 특성 평가 - 반도체게이지 사용으로 56배의 감도향상 확인 · Built-in 센서 기술 개발 : 스마트 탄성받침 <ul style="list-style-type: none"> - 스마트 탄성받침 시제품 제작 및 특성 평가 - 스마트 탄성받침의 적용 가능성 파악을 위한 교량 진동해석 가능성 확인 · 고정밀 대용량 힘 발생기 오차 보상기법 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 기준 로드셀의 직선성, 히스테리시스, 크립 오차의 보상 기법 개발 - 기준 힘센서의 정밀 특성 평가 - 오차보상기법을 이용한 힘 발생기 성능 개선 · 미세 힘센서 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 미세 다축 힘센서 설계 - 정전기력을 이용한 촉각제시기술 개발 				
14. 키워드(6~12개) 힘, 힘센서, 힘측정, 힘평가, 내장형 힘센서, 스트레인 게이지				
15. 배포구분		16. 해제기간 2001년 11월 ~ 년 월		17. 면수 112
				18. 가격

한국표준과학연구원

BIBLIOGRAPHIC DATA SHEET		1. REPORT NO.	2. PERFORMING LAB. Mass & Force Group	3. REPORT DATE 2002. 6. 13
4. TITLE/SUBTITLE Force measurement technology with sensors/new concepts and its application			7. SUBJECT CATEGORY	
5. AUTHOR (S) Dae-Im Kang, Yon-Kyu Park, Jong-Ho Kim, In-Mook Choi, Hou-Keun Song, Jeong-Tae Lee		8. PERFORMAING ORGANIZATION REPORT NO KRISS/IR--2002-062		
6. PERFORMAING ORGANIZATION NAME Korea Research Institute of Standards and Science		9. CONTRACT OR GRANT NO.		10. TYPE OF REPORT
11. SPONSORING ORGANIZATION				
12. SUPPLEMENTARY NOTES				
13. ABSTRACT <ul style="list-style-type: none"> · Development of optimizing technique for single-/multi- component force sensor <ul style="list-style-type: none"> - Development of analytical, numerical and experimental method for force sensor design - Dynamic evaluation of multi-component force sensor · Development of application technique of PVDF film <ul style="list-style-type: none"> - Investigation of relation between characteristics of PVDF film and its sensitivity - Analysis of measurable force components according to film combination - Characterization of temperature sensitivity · Built-in sensor technique : Multi-component force sensor by using cylindrical column <ul style="list-style-type: none"> - Development of design technique of multi-component force sensor having cylindrical type sensing part - Development of prototype and its evaluation - Increasement of sensitivity by using semi-conductor gage · Built-in sensor technique : Smart port bearing <ul style="list-style-type: none"> - Development of prototype and its evaluation - Feasibility analysis of bridge vibration by using smart port bearing · Development of error compensation technique for precision large force generator <ul style="list-style-type: none"> - Development of error compensation technique due to nonlinearity, hysteresis and creep of master loadcell - Precision evaluation of master loadcell - Performance increment of force generator by applying the developed technique · Development of MEMS force sensor <ul style="list-style-type: none"> - Development of design technique of multi-component MEMS force sensor - Development of tactile generating system by using electro static force 				
14. KEYWORDS force, force sensor, force measurement, force evaluation, built-in sensor, strain gage				
15. CLASSIFICATION	16. SCHEDULE OF DECLASSIFICATION 2001. Nov. ~		17. NO. OF PAGES 112	18. PRICE

KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE

주 의

1. 이 보고서는 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.