건설기술혁신사업 제2차년도 최종보고서

09기술혁신E03

강재 지보재의 웹기반 자동화 응력측정 시스템과 실용화 연구

2011. 10. 25.

주관연구기관 / 경남과학기술대학교
공동연구기관 / (주)메카지오텍

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

Land Transport and Maritime R&D Report

제 출 문

국토해양부장관 귀하

이 보고서를 "강재 지보재의 웹기반 자동화 응력측정 시스템 개발과 실용화 연구"과제의 최종보고서로 제출합니다.

2011. 10. 25.

주관연구기관명 : 경남과학기술대학교
주관연구책임자 : 문 홍 득
연 구 원 : 오 홍 창
" : 박 균 형
" : 성 기 근
" : 김 민 지
공동연구기관명 : (주)메카지오텍
공동연구책임자 : 이 재 호
연 구 원 : 김 대 성
" : 이 성 영
" : 하 종 진
" : 곽 기 봉
" : 성 희 영
" : 전 인 철

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>09기술혁신
E03</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td colspan="2">10. 06. 26
~ 11. 10. 25</td><td>단계구분</td><td>2/2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="5">건설기술혁신사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="5">강재 지보재의 웹기반 자동화 응력측정
시스템 개발과 실용화 연구</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">문홍득</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 12명
내부 : 5명
외부 : 7명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td colspan="2">정부 : 66,500천원
기업 : 23,500천원
계 : 90,000천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 12명
내부 : 5명
외부 : 7명</td><td>총연구비</td><td colspan="2">정부 : 162,500천원
기업 : 57,500천원
계 : 220,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">경남과학기술대학교
토목공학과</td><td>참여기업명</td><td colspan="3">(주)메카지오텍</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 :</td><td colspan="3">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="3">연구기관명 :</td><td colspan="3">연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="5">요 약</td><td>보고서면수</td><td>96</td></tr>
<tr><td colspan="7">본 연구의 개발기술은 강재 지보재의 비파괴 응력 계측이 가능한 자기이방성 센서 개발 및 웹기반 응력계측 관리시스템 구축으로서 흙막이 가시설, 앵커, 터널 등 지하구조물의 강재 지보재의 안정성과 내구성을 시공 중 및 완료단계에서 평가하고, 유지관리 단계에서도 활용할 수 있는 기술로 경제성 및 유지관리에 크게 기여할 수 있는 기술이다. 자기이방성센서는 철이나 니켈 등의 강자성체(ferromagnetic substance)를 자화(magnetization)시킬 때 응력이나 왜곡이 가해지면 그 자기적 성질이 변하는 자기변형(magnetostriction) 효과를 이용한 응력측정방법이다. 연구결과, 자기이방성센서의 오차범위가 약 20MPa 정도임을 알 수 있었다. 자기이방성센서를 강재의 응력상태를 파악할 목적으로 사용할 경우, 일반적인 강재의 항복응력의 레벨(250MPa)을 고려하면 공학적으로 충분한 정확도를 가지고 있다고 판단된다. 특히 자기이방성센서는 기존에 계측 센서가 부착되어 있지 않은 강구조물에서 잔류응력을 고려한 현재상태의 응력을 용이하게 파악할 수 있으며, 강구조물의 유지관리에 편리하게 적용이 가능함을 확인하였다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어</td><td>한 글</td><td colspan="5">자기변형, 자기이방성, 비파괴, 응력계측, 강구조물</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="5">Magnetostrcition, Magnetic Anisotropy, Non-destructive, Stress Measurement, Steel Structure</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

강재 지보재의 웹기반 자동화 응력 측정 시스템 개발과 실용화 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

최근 들어 고도성장기에 건설된 사회 기반시설에 대한 균열 및 변형 등으로 인한 노후화가 문제가 되고 있다. 특히 구조물에서 부식 및 균열 등은 그 구조물의 강도를 현저히 저하시킨다. 이러한 구조물의 안전성을 평가하기 위해서는 현재 구조물이 받고 있는 응력레벨을 파악하는 것이 매우 중요하다. 또한 생애주기비용(life cycle cost)을 고려하여 볼 때, 유지관리 측면에 있어서 손상에 이르기 전의 응력상태를 파악할 수 있으면 상당히 유리한 장점이 있다. 이러한 상황에서 응력레벨을 직접적이면서 간편하게 측정할 수 있는 장치가 강하게 요구되고 있다.

새로운 소재의 개발이 활발하게 진행되고 있는 오늘날에도 구조용 재료와 기계부품의 대부분은 철강 제품이 차지하고 있다. 철강 제품은 재료의 특성상 제조공정 또는 부품의 조립 시 응력이 발생하게 되며 발생된 응력은 잔류 응력으로 남아 재료의 파괴강도에 영향을 미치게 된다. 강재의 응력 및 잔류응력을 측정하는 방법은 여러 가지가 있지만 두 가지로 대별하면 스트레인 게이지(strain gauge)로 응력의 변화를 측정하는 방법과 X-선, 초음파, 자기변형효과(magneto-striction effect) 등을 이용한 비파괴 응력 측정방법으로 나눌 수 있다. 전자는 정밀도가 높은 측정이 가능하기 때문에 널리 사용되고 있는 방법이지만 외력에 의한 응력이나 잔류응력이 없는 상태에 미리 스트레인 게이지를 부착하여 응력을 측정해야 하는 어려움이 있다. 반면 후자는 오래 전에 축조된 구조물이라도 응력측정이 가능할 뿐만 아니라 잔류응력의 측정에도 매우 유용하다. 비파괴 응력 측정 기법인 X-선을 이용한 장치는 대형으로 손쉽게 운반이 어려우며 구조물의 임의 지점에서의 응력측정에는 부적합하다. 또한 초음파와 자기변형효과를 이용한 방법은 아직 실용화하기에는 어려움이 있으나 이를 위한 연구가 계속 진행되고 있다. 이 중 자기변형효과를 이용한 응력 측정 기법은 다른 측정 장치에 비해 경량이고 소형이며, 간편하게 어디서나 필요한 부분의 응력을 비파괴적으로 측정할 수 있다.

본 연구는 강재 지보재의 비파괴 응력 계측이 가능한 자기이방성센서 개발 및 웹기반 응력계측 관리시스템을 개발하는데 목적이 있으며, 최종 목표는 다음과 같다.

(1) 강재 지보재의 비파괴 응력 계측을 위한 자기이방성센서 개발
(2) 웹기반 응력계측 관리시스템 개발

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 강재 지보재의 웹기반 자동화 응력측정 시스템 개발 및 실용화를 위하여 다음과 같은 내용으로 연구를 수행하였다.

(1) 강재 지보재를 사용하는 지반구조물의 비파괴 응력계측 방법 조사 및 분석
(2) 자기이방성센서를 이용한 비파괴 응력 계측에 대한 개념 정립
(3) 강재 지보재의 비파괴 응력 계측을 위한 자기이방성센서 개발
(4) 자기이방성센서를 이용한 응력 측정 결과 가시화 프로그램 개발
(5) 실내실험을 통한 개발된 센서의 검증 및 적용성 평가
(6) 자기이방성센서 웹기반 응력계측관리 프로그램 개발
(7) 현장계측을 통한 개발기술의 적용성 평가 및 실용화 방안 모색

Ⅳ. 연구개발결과

연구 결과, 한국형 자기이방성센서 및 계측시스템과 측정 결과를 실시간으로 확인할 수 있는 가시화 프로그램, 웹기반 응력계측 관리 프로그램을 개발하였으며, 실내실험 및 현장실험을 통하여 개발 기술의 성능 검증 및 적용성 평가를 통하여 자기이방성센서를 이용한 강재 지보재의 비파괴 응력계측 매뉴얼(흙막이 가시설, 앵커, 교량)을 작성하였다. 주된 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

○ 강재 지보재의 비파괴 응력계측을 위한 자기이방성센서 및 측정시스템
○ 자기이방성센서 웹기반 응력계측관리 프로그램
○ 강재 지보재의 비파괴 응력계측 매뉴얼

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

본 연구개발결과인 자기이방성센서를 이용한 강구조물의 비파괴 응력 측정 기술은 교량, 터널 지보공, 가시설, 수문 등 강구조물의 초기 응력을 포함한 전 응력을 비파괴로 측정하는 장치 및 유지관리 시스템이다. 신설 강구조물의 안전성을 확인하고 싶은 경우에는 잔류응력(재료 입하시, 공장 제작 완료시, 가설 완료시)을 비파괴로 측정할 수 있으며, 기 설치된 강구조물의 안전성 및 보수·보강 효과를 확인하고 싶은 경우 각종 하중 조건 하에서 발생하는 전 응력(잔류응력+사하중+재하에 의한 응력)을 비파괴로 측정할 수 있다. 또한 사고·재해 등에 의하여 변형된 강구조물의 안전성을 확인하고 싶은 경우, 변형 부분의 발생 응력을 비파괴로 측정할 수 있으며, 강재 가시설 구조물 및 터널 지보공, 어스앵커 축력 등의 정보화 시공을 실시하고 싶은 경우, 안전성 확인을 위한 응력 측정을 비파괴로 행할 수 있다. 강구

조물의 응력 측정의 경우, 종래는 많은 작업 공정과 수작업이 필요했지만 공정을 간소화 할 수 있으며, 가시설 및 터널, 교량 등의 강구조물의 안정성과 내구성을 시공 중・완료단계에서 평가하고, 유지관리의 경제성 향상에 기여할 수 있는 기술이다. 향후 국내에서 건설될 것으로 예상되는 지하대피소, 지하스포츠시설, 지하주차장 등 다양한 지하생활공간 유지관리에 활용할 수 있으며, 산맥・하저・해저를 통과하는 초장대 교량 및 터널의 안정성 평가에 직접적으로 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 계측센서가 부착되어 있지 않은 강구조물에 있어 현재 상태의 응력을 용이하게 파악할 수 있어 토목구조물에 다양하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

SUMMARY

1. Title

A Study on Development of Web-based Automation Stress Measurement System for Steel Rib And Commercialization

Ⅱ. Research Purpose

Lately, It is becoming a problem that is aging of infrastructure constructed on high-growth period by crack and deformation.
Especially, corrosion and cracks in structure greatly reduces the strength of the structure. It is important to understand the stress level of the current state in order to stability for evaluation of the structure. Also, It is a huge advantage in terms of maintenance when considering life cycle costs if can be identify on stress state of before structure damage. Therefore, direct and easy Equipment for stress state measurement of structure is required.

Currently, the development of new materials is thriving. But most of the structural materials and machinery parts are steel products. Steel products by characteristics of materials will be occurred stress by manufacturing and assembly. And that stress has remained as residual stress. Also, fracture strength of material is affected residual stress.

Measurement methods in the stress and residual stress are several kinds of it. But both methods of general classification are as following. The first method is strain gauge stress measurement method and other things are nondestructive stress measurement methods using X-ray, ultrasound, magnetostriction effect. Stress measurement on strain gauge method has widely used method because that is possible the measurement on high resolution. But the first method is difficult to measured of stress. because strain gauge will be installed in following conditions; without stress caused by external force, and residual stress. While other things are very useful on the measurement of residual stress and stress of old construction. Equipment of X-ray used the nondestructive stress measurement method is very large size. So transportation is very hard. And it is become the measurement of stress on any place in construction. Also ultrasonic and magneto-striction effect methods are progress satisfactorily on research. But that is difficult of commercialization as yet. From among these, magneto-striction effect method is light weight and small to one thing relatively

to others. So that is able to simply measurement of non destructive anywhere.

The purpose of study is development of magnetic anisotropy sensor for non destructive stress measurement of steel rib and development of Web-based Stress Measurement System.

(1) Development of magnetic anisotropy sensor for non destructive stress measurement of steel rib.
(2) Development of Web-based Stress Measurement System.

Ⅲ. Contents of research

In this study, it is the study about the development of Web-based Automation Stress Measurement System for steel rib and commercialization.

That is as follows;

(1) Survey and analysis of non destructive stress measurement methods on geotechnical structures.
(2) Established the concept of non destructive stress measurement method using magnetic anisotropy sensor.
(3) Development of the magnetic anisotropy sensor for non destructive stress measurement of steel rib.
(4) Development of visualization program to measurement result by magnetic anisotropy sensor.
(5) Evaluate the applicability and Verification on developed sensor by laboratory experiment.
(6) Development of web-based stress measurement management program for magnetic anisotropy sensor.
(7) Evaluation and commercialization on development technique through on-site measurements.

Ⅳ. Result of research and development.

As the result, it were developed those are Korean magnetic anisotropy sensor measurement system, visualization program and web-based stress measurement management program for magnetic anisotropy sensor. And it is made the non destructive stress measurement manual(temporary earth retaining structure, anchor and bridge). Result of the study is as in the following;

○ Magnetic anisotropy sensor and measurement system for stress measurement on steel rib.
○ Web-based stress measurement management program on magnetic anisotropy sensor.
○ Non destructive stress measurement manual on steel rib.

Ⅴ. Plans to utilize of research and development result

The study development result to have watched magnetic anisotropy sensor using a non-destructive stress measurement technique for steel structure bridge, tunnel timbering, temporary earth retaining structure, water gate, and steel structure, including the pre-stress of the initial stress by nondestructive test apparatus and maintenance systems. New steel structure if you want to determine the safety of the residual stress(Material on admission, at the completion of factory production, upon completion of the hypothesis) in a nondestructive mensurable, an installed steel structure of the safety and repair, reinforce, and if you want to check the effects of all sorts that arising under load conditions total stress (residual stress+dead load+stress caused by loading) can be measured by the residual stress. In addition accidents, disasters, and so transformed by the steel structure of the safety check and if you want, modify the occurrence of partial non-destructive stress can be measured by, temporary earth retaining structure and the tunnel timbering, earth anchor axial force information construction, and would like to conduct If, safety determine occurs for the nondestructive stress measurement can be carried out with. If the steel structure of the stress measurements, as usual manual process and requires a lot of work but may need to simplify the process, temporary earth retaining structure and the tunnels, bridges, such as safety and durability of steel structure and of the construction phase is complete, evaluate and maintain, management can contribute to improving the economics of technology. Future expected to use of maintain and management with fallout shelter, basement sports facility, basement garage. Also expected to distribute directly estimating the stability of suspension bridge such as passed mountain chain, bottom of river, seabed. Especially, magnetic anisotropy sensor can easily identify the current state of stress which considers residual stress at steel structure that stress measurement sensor is not installed, so we found that magnetic anisotropy sensor can be applied at maintenance of steel structure conveniently.

목 차

제 1 장 서 론 ····· 11

제 1 절 연구개발 목표 ····· 11
1. 연구개발 최종 목표 ····· 11
제 2 절 연구개발 필요성 ····· 12
1. 핵심기술의 범위 ····· 12
2. 연구의 비전 ····· 12
제 3절 연구개발의 목표 및 내용 ····· 14
1. 연차별 연구개발의 목표 및 내용 ····· 14
2. 연구목표 설정 근거 ····· 14

제 2 장 국내·외 기술 동향 ····· 16

제 1 절 국내·외 기술 동향 ····· 16
1. 국내 기술 동향 ····· 16
2. 국외 기술 동향 ····· 17
제 2 절 관련 연구개발 현황 ····· 19
1. 국내 관련 연구개발 현황 ····· 19
2. 국외 관련 연구개발 현황 ····· 19
3. 특허 동향 ····· 19
제 3 절 국내·외 연구개발 현황에서의 입지 ····· 23
1. 연구 인프라 현황 ····· 23
2. 국내 기술개발 수준 ····· 23
3. 세부산업 또는 기술의 경쟁력 ····· 24

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 25

제 1 절 연구개발 추진전략 및 방법 ····· 25
1. 연구개발 추진전략 ····· 25
2. 연구개발 추진체계 ····· 26
제 2 절 주요 연구개발 내용 ····· 27
제 3 절 주요 연구결과 ····· 28
제 4 절 연구결과 ····· 29
1. 변형률 게이지와 수치해석을 이용한 강구조물의 응력거동 비교분석 ····· 29

2. 강재 지보재의 비파괴 응력계측을 위한 자기이방성센서 개발 ····· 39
3. 강재 지보재의 비파괴 응력계측 프로그램 개발 ····· 45
4. 자기이방성센서를 이용한 강판의 응력거동 분석 ····· 47
5. 자기이방성센서의 잔류응력 측정 확인 ····· 64
6. 자기이방성센서를 이용한 H-형강 응력측정 ····· 65
7. 응력과 출력전압의 변화량 분석 ····· 71
8. 자기이방성센서의 현장적용성 검토 ····· 80
9. 자기이방성센서를 이용한 비파괴 응력계측 시스템의 적용성 ····· 83
제 5 절 연구 성과 ····· 84

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 85
제 1 절 주요 연구목표 달성도 ····· 85
1. 연구개발 수행 진도율 ····· 85
2. 연구개발 수행 달성도 ····· 86
제 2 절 관련분야 기여도 ····· 87

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 88
제 1 절 연구개발의 활용계획 ····· 88
제 2 절 연구개발의 기대효과 ····· 89

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술 정보 ····· 91
1. 연구논문 ····· 91
2. 국외 연구기관 방문 ····· 93

제 7 장 참고문헌 ····· 94

부 록 : 자기이방성센서를 이용한 강구조물의 비파괴 응력계측기법(안)

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발 목표

1. 연구개발 최종 목표

연구개발 최종목표

(1) 강재지보재의 비파괴 응력계측 시스템 개발
(2) IT 접목형 구조물 웹기반 유지관리 시스템 개발

새로운 소재의 개발이 활발하게 진행되고 있는 오늘날에도 구조용 재료와 기계부품의 대부분은 철강 제품이 차지하고 있다. 철강 제품은 재료의 특성상 제조공정 또는 부품의 조립 시 응력이 발생하게 되며 발생된 응력은 잔류 응력으로 남아 재료의 파괴강도에 영향을 미치게 된다. 강재의 응력 및 잔류응력을 측정하는 방법은 여러 가지가 있지만 두 가지로 대별하면 스트레인 게이지(strain gauge)로 응력의 변화를 측정하는 방법과 X-선, 초음파, 자기변형효과(magneto-striction effect) 등을 이용한 비파괴 응력 측정방법으로 나눌 수 있다. 전자는 정밀도가 높은 측정이 가능하기 때문에 널리 사용되고 있는 방법이지만 외력에 의한 응력이나 잔류응력이 없는 상태에 미리 스트레인 게이지를 부착하여 응력을 측정해야 하는 어려움이 있다. 반면 후자는 오래 전에 축조된 구조물이라도 응력측정이 가능할 뿐만 아니라 잔류응력의 측정에도 매우 유용하다. 비파괴 응력 측정 기법인 X-선을 이용한 장치는 대형으로 손쉽게 운반이 어려우며 구조물의 임의 지점에서의 응력측정에는 부적합하다. 또한 초음파와 자기변형효과를 이용한 방법은 아직 실용화하기에는 어려움이 있으나 이를 위한 연구가 계속 진행되고 있다.

이에 본 연구에서는 자기변형효과를 이용한 강재 지보재의 비파괴 응력 계측이 가능한 자기이방성센서 개발 및 웹기반 응력계측 관리시스템을 개발에 대한 연구를 수행하였다.

제 2 절 연구개발 필요성

1. 핵심기술의 범위

연구분야	개발기술의 범위
강재 지보재의 웹기반 자동화 응력 측정 시스템 개발과 실용화 연구	○ 강재 지보재의 비파괴 응력 계측을 위한 자기이방성센서 개발 ○ 자기이방성센서를 이용한 응력 측정 결과 가시화 프로그램 개발 ○ 실내실험을 통한 개발된 센서의 검증 및 적용성 평가 ○ 자기이방성센서 웹기반 응력계측관리 프로그램 개발 ○ 현장계측을 통한 개발기술의 적용성 평가 및 실용화 방안 모색

1970년과 80년대에 지어진 국내 건설구조물의 사용기간이 경과되면서 노후화 되고, 최근 구조물의 유지관리에 대한 관심이 고조됨에 따라 유지관리에 따른 비용이 급격히 증가하고 있는 실정이다. 그러나 실제 유지관리를 위한 비파괴 계측장비는 국외에서 생산된 제품이 대부분이며, 구조물 외관조사와 같은 상태평가만 수행되고 있는 실정이다. 건설구조물의 관리기준은 응력과 변위가 일반적으로 적용되고 있다. 즉 시공 중 또는 공용 중인 건설구조물의 안정성 평가를 위해서는 응력과 변위에 대한 절대 값을 구할 필요성이 있다. 본 연구에서 수행된 자기이방성센서를 이용한 강재 지보재의 응력계측 시스템은 간편성, 용이성, 경제성을 최대한 고려하면서 구조물이 받고 있는 절대 응력을 구할 수 있으며, 이것을 활용하여 현재의 응력상태를 확인할 수 있다.

2. 연구의 비전

본 연구의 결과인 자기이방성센서를 이용한 강구조물의 비파괴 응력 측정 기술은 교량, 터널 지보공, 가시설, 수문 등 강구조물의 초기 응력을 포함한 전 응력을 비파괴로 측정하는 장치 및 유지관리 시스템이다. 신설 강구조물의 안전성을 확인하고 싶은 경우에는 잔류응력(재료 입하시, 공장 제작 완료시, 가설 완료시)을 비파괴로 측정할 수 있으며, 기 설치된 강구조물의 안전성 및 보수·보강 효과를 확인하고 싶은 경우 각종 하중 조건 하에서 발생하는 전 응력(잔류응력+사하중+재하에 의한 응력)을 비파괴로 측정할 수 있다. 또한 사고·재해 등에 의하여 변형된 강구조

물의 안전성을 확인하고 싶은 경우, 변형 부분의 발생 응력을 비파괴로 측정할 수 있으며, 강재 가시설 구조물 및 터널 지보공, 어스앵커 축력 등의 정보화 시공을 실시하고 싶은 경우, 안전성 확인을 위한 발생 응력 측정을 비파괴로 행할 수 있다. 강구조물의 응력 측정의 경우, 종래는 많은 작업 공정과 수작업이 필요했지만 공정을 간소화 할 수 있으며, 가시설 및 터널, 교량 등의 강구조물의 안정성과 내구성을 시공 중・완료단계에서 평가하고, 유지관리의 경제성 향상에 기여할 수 있는 기술이다. 향후 국내에서 건설될 것으로 예상되는 지하대피소, 지하스포츠시설, 지하주차장 등 다양한 지하생활공간 유지관리에 활용할 수 있으며, 산맥・하저・해저를 통과하는 초장대 교량 및 터널의 안정성 평가에 직접적으로 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 계측센서가 부착되어 있지 않은 강구조물에 있어 현재 상태의 응력을 용이하게 파악할 수 있어 토목구조물에 다양하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

제 3 절 연구개발의 목표 및 내용

1. 연차별 연구개발의 목표 및 내용

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	▪ 국내외 건설계측 센서 및 현장 계측기법 실태조사	▪ 국내외 강재 지보재의 계측방법 조사 ▪ 응력 계측기기 및 웹기반 응력측정 시스템 실태 분석
	▪ 자기이방성을 활용한 강구조물 응력계측 센서 및 시스템 개발	▪ 자기이방성 응력계측기 개념 정립 ▪ 강재 지보재를 사용하는 지반구조물의 비파괴 응력계측 방법과 개념정립 ▪ 자기이방성 응력 계측 결과 가시화 S/W (Software)개발
	▪ 강재 지보재 부재력 실험을 통한 한국형자기이방성 응력계측센서 및 시스템의 적용성 평가	▪ 기존 계측기와 비교·검토 ▪ 개발된 센서를 실내실험에 적용하여 계측성능 검증 ▪ 계측기기의 검증을 통한 데이터의 신뢰도 확보
2차년도	▪ IT 접목형 구조물 웹기반 유지관리 시스템 개발	▪ 계측 정보의 입/출력 시스템 개발 ▪ 응력계측 자동 분석 및 처리시스템 개발 ▪ 웹기반 구조물 유지관리 통합 시스템 개발
	▪ 개발된 응력계측 시스템을 활용한 강재 지보재 현장계측 및 활용방안 연구	▪ 강재 구조물의 현장계측 기법 연구 및 계획수립 ▪ 자기이방성 응력 계측기 및 유지관리시스템의 현장 적용성 평가
	▪ 자기이방성 응력계측 시스템과 IT 접목형 웹기반 유지관리 시스템의 사업화 방안 모색	▪ 자기이방성 응력계측기와 웹기반 유지관리 시스템 검토 및 보완 ▪ 수행된 연구결과 정리 및 국·내외 홍보 ▪ 사업화 방안 검토

2. 연구목표 설정 근거

최근 들어 고도 성장기에 건설된 사회 기반시설에 대한 균열 및 변형 등으로 인한 노후화가 문제가 되고 있다. 특히 구조물에서 부식 및 균열 등은 그 구조물의 강도를 현저히 저하시킨다. 이러한 구조물의 안전성을 평가하기 위해서는 현재 구

조물이 받고 있는 응력레벨을 파악하는 것이 매우 중요하다. 또한 생애주기비용(life cycle cost)을 고려하여 볼 때, 유지관리 측면에 있어서 손상에 이르기 전의 응력상태를 파악할 수 있으면 상당히 유리한 장점이 있다. 이러한 상황에서 응력레벨을 직접적이면서 간편하게 측정할 수 있는 장치가 강하게 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 강재 지보재의 비파괴 응력 계측을 위한 자기이방성센서의 개발과 웹기반 응력계측 관리시스템의 개발을 최종 목표로 설정하였다.

제 2 장 국내·외 기술 동향

제 1 절 국내·외 기술 동향

1. 국내 기술 동향

건설시장은 1970년대 이후 경제개발과 해외건설 수요로 인해 건설업의 급성장기, 1980년대의 해외건설 침체, 국내 건설시장의 팽창기, 1990년대 초 주택 200만호 건설과 대형국책사업에 따른 고성장 지속기, 1990년대 후반 외환위기 충격으로 침체된 신축 건설시장의 대안, 시장구조의 변화, 재고시설물의 노후화 및 관리의 필요성, 환경오염 방지 및 자원절약 필요성, 사용가치의 가치관 변화, 정책변화 등의 특징을 보인다. 2004년 말을 기준으로 우리나라의 건설투자액은 GDP대비 18.8%인 약 146조원에 이른다(김훈 등, 2008). 건설과정에서 태동된 시설물은 생애주기상 필연적으로 보수, 보강 개념의 리모델링 수요가 발생한다. 리모델링은 신축에 대비되는 개념으로 기존 시설물의 노후화를 억제함으로써 기능적, 사회적 수명을 연장하거나 성능개선을 통해 경제적 가치를 상승시키는 것으로써 유지관리, 보수, 개수의 세 영역으로 구분할 수 있다. 즉 보수와 개수는 단순히 낡은 것에 대한 수선이 아니라 새로운 기능과 부가가치를 창출하는 재창조의 과정이며, 유지관리는 필수불가결한 요소이다. 안전관리 기술의 핵심인 계측기기 산업분야의 수준 분석결과 최고 산업기술 보유국을 100점으로 하였을 때, 우리나라는 약 66점으로 세계 9위 수준으로 기술격차가 약 6년 정도 차이가 나며, 연구개발 인력 부족 및 연구개발비 부족 등으로 미국, 일본, 유럽 등 선진국과의 기술격차는 점점 확대될 것으로 분석되고 있다(김훈 등, 2008). 안전관리기술과 더불어 국내 계측센서 시장의 규모 또한 매년 증가되고 있는 추세로 1999년 3,100억원, 2001년 4,330억원, 2003년 5,400억원, 2005년도에는 국토개발투자 및 건설투자 중 유지관리비의 비중을 전망해 볼 때, 1996년부터 2011년 6,200억원 정도로 집계될 것으로 분석되고 있다(김훈 등, 2008). 이러한 계측센서시장의 비약적인 성장에도 불구하고, 약 60-70% 정도를 외국으로부터 의존하고 실정이다(김훈 등, 2008).

국내에서는 자기이방성센서의 기본적인 이론인 자기왜곡(자기변형), 자기누설 또는 자기저항을 이용하여 많은 연구가 수행되고 있다. 재료변형에 따른 자기왜곡을 통하여 주응력의 방향을 알 수 있는 방법과 잔류응력의 계측, 재료의 노화 및 손상된 부위를 알 수 있는 방법으로써 여러 가지로 응용되어 사용되어지고 있다. 연구내용을 살펴보면 Lead Frame 소재에 대한 잔류응력 불량탐지 시스템의 개발(우종태, 이래철, 2008 ; 한국구조물진단학회, 2006)에서는 자기왜곡법을 사용하여 재료의 불량유무를 판단하고, 로봇과 신호 제어부를 컴퓨터로 자동 혹은 수동으로 제어할

수 있는 잔류 응력 탐지시스템 운영 체계를 구축하였다(김상원, 양충진, 2000 ; RIST). 또한 강자성 배관 안과 밖의 단일 pit depth와 bulk stress에 의한 누설 자속 계산에서는 지하에 매설된 관의 제작시의 잔류응력과 토압 및 line pressure에 의해 굽힘 응력을 받는 송유관이나 가스관에 대하여 누설자속을 이용하여 계측을 하였다. 관의 부식에 의해 배관이 파괴될 위험이 있으므로 잔류응력 및 응력발생을 비파괴로 계측할 수 있다는 것이 강점이라 할 수 있다(유권상, 박영태, 2002 ; 초음파분과 학술대회). 그리고 누설 자속법을 이용한 저장탱크 바닥판재의 부식 평가에서는 지하에 매설된 저장탱크가 토양과 접촉하고 있어 부식에 의한 손상 가능성이 상존하고 있다. 그러나 접근이 불가능하여 저장물의 누설로 인한 환경오염이나 화재, 폭발과 같은 사고가 발생하는 경우가 많다. 또한 탱크 외면의 요인들은 전기적, 화학적인 요인에 의해 예측할 수 없도록 계속 변화하는 경우가 많으므로 비파괴계측이 필요하며 고르지 못한 바닥면에 자기왜곡법의 lift-off를 사용하여 보다 효과적인 측정을 하였다(원순호, 조경식, 2000 ; 비파괴검사학회지). 또 자기변형센서 바이어스 자기계의 요크 위상최적설계에서는 실린더 강철 보에서 굽힘 파가 전파될 때 가장 큰 센서 출력을 발생하기 위한 MsS 바이어스 요크의 최적 형상을 구하는 공학적 설계문제를 제안하고 이것을 처음으로 위상최적화 설계문제로 정식화 하였다. 웨이브가이드에서 전파하는 굽힘 파를 측정하기 위한 자기변형센서의 출력 극대화하는 이 연구에서는 자기장의 세기를 조절하기 쉬운 전자석을 이용하여 센서를 구성하되, 센서출력 극대화를 위한 요크 위상최적화를 정식화하여 수행하였다(김윤영, 김우철, 2004 ; 대한기계학회논문집). 단일 박막형 강자성체의 자기저항 변화는 전류의 방향과 외부 자기장에 따른 자구의 방향 사이의 각도에 의존하며 이러한 자기저항 효과를 비등방성 자기저항(anisotropic magneto resistance, AMR)이라고 하는 자기저항 효과 및 센서 응용에서는 선형성이 우수, 센서의 소형화 가능, 소비전력이 적음, 광대역의 주파수 범위에서 사용가능, 고분해능을 갖는 센서 제작의 가능함과 마지막으로 가격이 싸다는 장점을 설명하고 있다(김동영, 2008 ; 비파괴검사학회지).

2. 국외 기술 동향

자기이방성센서를 이용한 비파괴 응력계측에 관한 연구는 주로 일본에서 수행되어졌으며, 자기변형효과를 이용한 응력 측정 장치는 기계 및 자동차 부품 등에서 잔류응력을 측정하기 위하여 1960년대부터 현재까지 계속 연구되고 있다. 1970년대 후반에 들어 吉永昭男 등(1977)은 스트레스 테스터(stress tester)라고 부르는 센서를 개발하여 용접부 주위 및 구조물의 잔류응력을 측정하였다. 이들은 'ㄷ'자 모양의 두 개의 철심 주위에 동선을 감고 하나는 보상용으로, 다른 하나는 측정용 스트레스 테스터를 만들어 피측정체에 응력으로 인한 투자율의 변화가 있을 때 측정용 테스터에서 이를 감지하여 응력을 측정하였다. Abuku(1976)는 자기센서 중 가장 유용하다고 생각되는 자기이방성센서(magnetic anisotropy sensor)를 연구 개발하였

다. 자기이방성센서는 吉永昭男 등(1977)의 스트레스 테스터와는 달리 보상용 테스터가 필요 없으며 피측정체가 응력에 의해 자기이방성을 나타낼 때 이를 이용하여 잔류 응력을 측정하였다. 1980년대에 들어서면서 Kashiwaya 등(1985)은 소자법(demagnetization method)을 창안하여 응력에 의한 자기적 히스테리시스(hysteresis)를 제거하였으며, 리프트 오프(lift-off)의 영향을 고려하지 않고 응력을 측정할 수 있는 측정 방법을 개발하였다. 2000년대에 들어서면서 강교에 존재하는 잔류응력과 강교에 지나가는 자동차에 의해 발생하는 동적 응력을 모의실험과 실제 적용을 비교·검토하여 자기이방성의 실용성을 검증하였다. 계측결과 응답성에 대한 저항 값과 콘덴서의 용량, 필터의 재확인 요구됨을 알았으며 정적과 동적인 상황의 계이지 측정에 있어서의 오차는 ±5%로 임을 나타내었다(村井 亮介, 柳澤 榮一, 岡 俊藏, 廣江 哲幸, 安福 精一, 2004 ; 溶接學會論文集). 또한 자기이방성센서를 사용하여 응력을 계측할 시 선 작업이 되어야 할 응력감도곡선의 작도와 자화로 인해 발생하는 자기력에 대한 소자를 설명하였다. 자기이방성센서의 출력이 교류소자의 방향에 따라 달랐으며 출력 대 응력의 관계(응력감도곡선)를 선형으로 접근하는 방법을 찾아내었다. 그 결과 응력감도곡선의 직선화로 인해 잔류 응력의 유무와 상관없이 외력에 의해 발생하는 응력을 보다 정량적으로 도시하였다(Kenji KASHIWAYA, Hiroshi SAKAMOTO, 2004 ; 非破壞檢査第). 그리고 자기이방성을 터널에 적용하여 활용성을 증명하였다. 먼저 자기이방성을 이용하여 4개의 강재에 응력감도곡선을 작도 후 터널에 적용되는 4개의 강재에 대하여 응력을 계측하고 스트레인 게이지 값과 비교하였으며, 이들에 대한 각각의 절대치가 다른 조건에서 실험을 실시하였으므로 향후 전반적인 응력변동에 대한 경향을 파악하는 것이 중요함을 나타내었고, 강지보의 표면을 노출시켜 그 부분에 계측시스템을 구축한다면 유지 관리상의 새로운 검토항목으로 고려할 만함을 나타내었다(芥川 眞一, 太田 道宏, 安原 幸二, 松岡 敬, 2008 ; 土木學會論文集). 또한 자기이방성을 이용하여 파이프라인에 작용하는 외력으로서 내압, 자중, 토압, 차량하중, 온도변화, 지진, 지반침하로 인해 발생하는 응력을 측정하였다. 이는 파이프라인의 유지관리차원에서 매우 중요하며 비파괴계측 중 매설된 파이프라인의 응력계측 측면에선 자기이방성이 획기적임을 나타내고 있으며 필터효과에 의해 외력에 의해 발생하는 응력만을 측정할 수 있음을 밝혔다. 그리고 곡관 제조시 큰 응력이 잔류함을 나타내었다(Shoichi IIMURA, Yoshiaki SAKAI, 2006 ; 非破壞檢査第).

제 2 절 관련 연구개발 현황

1. 국내 관련 연구개발 현황

국내에서 응력계측 센서와 시스템 개발에 대한 연구는 상대적으로 미비하며, 일반적으로 계측결과를 통한 구조물의 거동특성을 분석하는 내용위주로 연구 개발이 이루어져 있다. 국내 연구기관에서는 건설구조물의 설계 및 시공에 관한 주제를 주로 연구테마로 다루었으며, 계측 센서와 시스템 개발에 대한 연구는 상대적으로 미비하며, 강지보재의 비파괴 응력계측을 위한 자기이방성센서와 관련된 연구와 강재지보재의 응력거동 메커니즘을 분석한 연구사례는 없는 것으로 나타났다.

2. 국외 관련 연구개발 현황

본 연구과제인 자기이방성을 활용한 강재지보재의 응력계측분야는 일본을 제외하고는 아직까지 뚜렷하게 앞선 국가는 없다고 판단되어진다. 특히 본 연구의 경우, 전기/전자, 기계/센서, 계측/유지관리 등 다양한 분야가 결합된 복합형 연구주제이며, 연구기간과 연구비를 고려할 때 초기 연구의 개발방향이 과제의 성패를 가늠한다고 판단되어진다. 특히 일본에서 강재 지보재의 비파괴 응력 계측 및 데이터 해석 분야에 많은 연구실적을 가지고 있는 (주)건설공학연구소의 Sakurai Shunsuke 소장, 고베대학교의 Akutagawa Shinichi 교수와 연계하여 연구 개발을 수행하였으며, 이들이 가지고 있는 인적네트워크를 활용하여 다양한 국가의 연구기관, 대학 및 연구자들과의 협력체계를 구축하고 있는 것으로 나타났다.

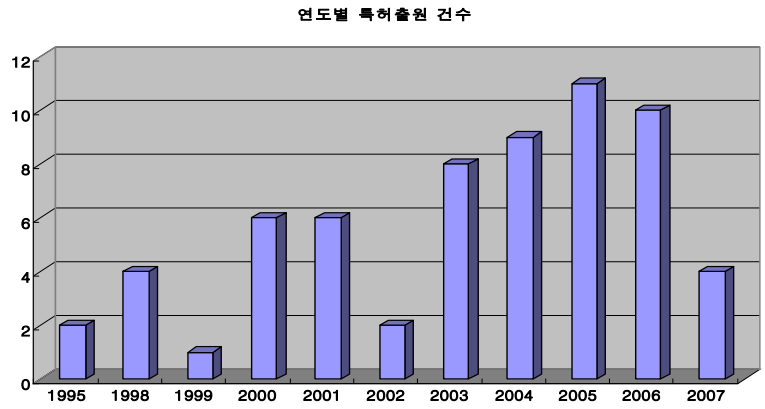
자기이방성 응력 측정 원리는 1960년대부터 연구가 수행되어져 왔으며, 현재는 일본 고베대학교에서 자기이방성 센서에 대한 연구가 수행되고 있지만 국·내외특허출원은 없는 상태이다. 본 연구는 국내 강재의 비파괴 응력 계측에 적합한 계측시스템 개발로서 자기이방성센서를 이용한 비파괴 응력계측 시스템 및 IT 접목형 정보공유를 위한 웹기반 시스템을 구축할 예정이다.

3. 특허 동향

강재 지보재의 웹기반 자동화 응력 측정 시스템 개발과 실용화 연구와 관련하여 본 과제와 연관이 있는 출원, 공개 또는 등록된 특허자료를 조사, 정리 및 분석하여, 그 기술 개발의 동향 등을 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 조사 대상은 토목용 계측 및 유지관리에 관한 기술로 연도별 특허동향과 계측시스템, 계측기기, 계측방법에 관한 기술 등의 기술 분야로 나누어 분석하였다. 특허 동향 분석을 위한 시간적 기준은 특허존속기간이 통상 20년임을 고려하여 1995년 이후에 출원되어 공개 또는 등록된 특허를 조사대상으로 하였으며, 키워드는 토목용 계측 및 유지관리(계

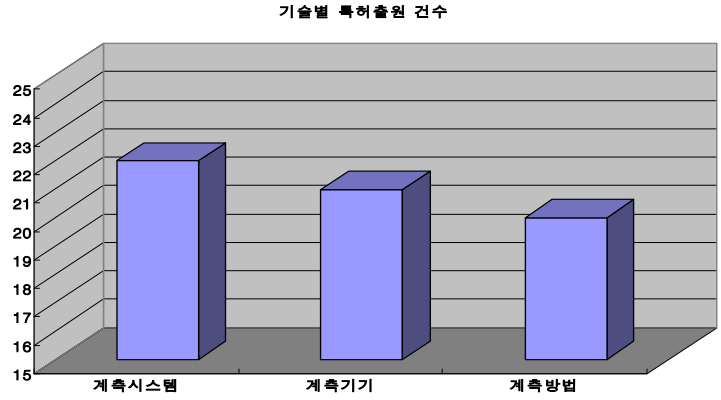
측시스템, 계측기기, 계측방법)에 관하여 한정하여 특허자료를 조사하였다.

본 특허조사를 통하여 토목용 계측 및 유지관리에 관한 특허출원은 1995년 이후부터 급격히 증가하다가 최근 들어 서서히 감소하는 추세를 보이고 있다. 한편, 각 기술 분야별 특허출원 추이를 살펴보면, 계측시스템에 관한 출원이 가장 많은 것으로 조사되었다. 다음 그림은 연도별 특허출원 건수를 나타낸 것이다(특허정보서비스).



<그림 2-1> 연도별 특허출원 건수

아래 그림은 기술별 특허출원 건수를 나타낸 것이다(특허정보서비스).

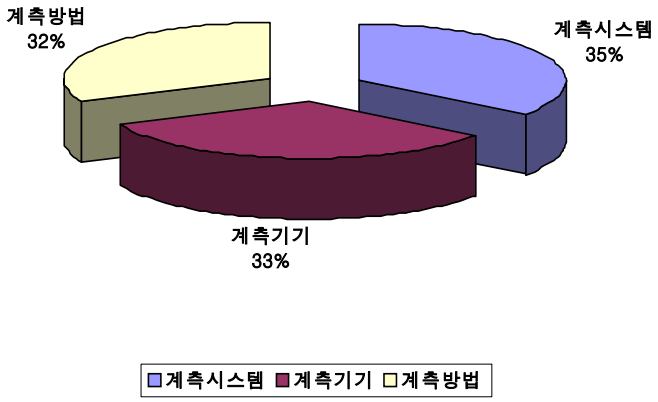


<그림 2-2> 기술별 특허출원 건수

토목용 계측 및 유지관리에 관하여 조사된 특허문헌들은 크게 계측시스템, 계측기기, 계측방법에 관한 기술 등으로 분류해 볼 수 있다. 다음 그래프들은 각 기술 분류에 대한 출원 점유율 및 기술 분류에 따른 연도별 특허출원 추이를 나타내고 있다. 그래프들을 살펴보면, 2004년부터 2006년 사이에 계측기기에 관한 특허가 대두되고 있다. 이 시기에는 광섬유를 이용한 계측기기의 개발로 인하여 광섬유 관련

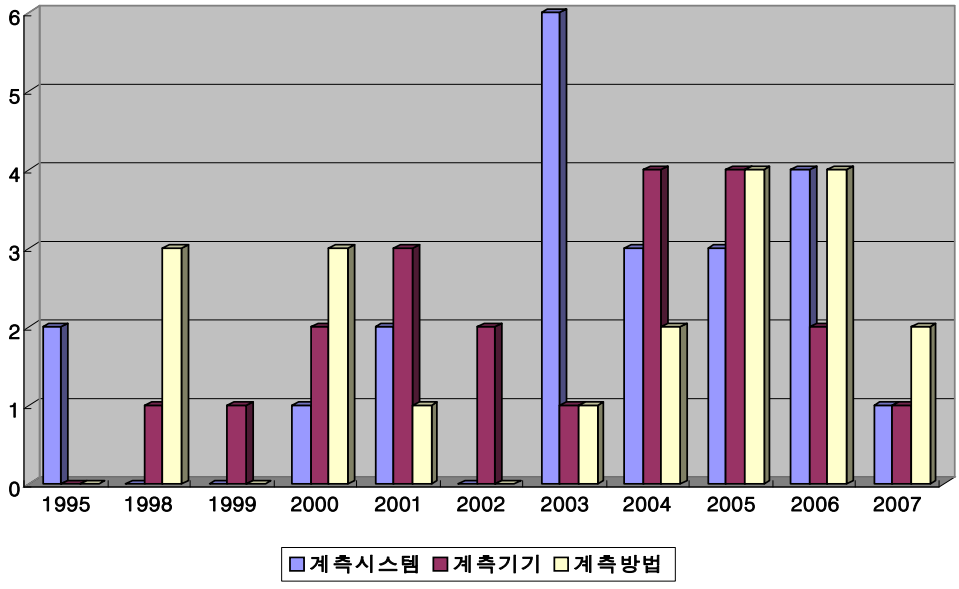
특허가 주류를 이루고 있다. 전반적인 특허동향을 살펴보면 계측방법에서 차츰 계측시스템으로 특허동향이 변화하고 있음을 알 수 있다.

다음 그림은 계측방법, 계측기기, 계측시스템별 특허출원 분포도를 나타낸 것이다(특허정보서비스).



<그림 2-3> 계측방법, 계측기기, 계측시스템별 특허출원 분포도

다음 그림은 연도별 계측방법, 계측기기, 계측시스템별 특허출원 건수를 나타낸 것이다(특허정보서비스).



<그림 2-4> 연도별 계측방법, 계측기기, 계측시스템별 특허출원건수

토목용 계측 및 유지관리 계측에 관한 특허들은 주로 기존 외국에서 개발된 계측 센서들을 이용하여 좀 더 정확하고 안정적인 데이터 수집을 위한 계측 방법론적인 측면에서 사용자 중심의 계측시스템으로의 변화를 보이고 있으며, 최근 들어 광섬유를 이용한 계측기나 계측시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 특허 조사 결과, 자기이방성 응력계측시스템에 관한 특허는 현재 없는 것으로 나타났으며, 광섬유와 마찬가지로 본 연구개발의 결과인 자기이방성 응력센서의 개발을 통하여 국내 계측 관련 연구 분야에 크게 기여할 것으로 판단된다.

제 3 절 국내·외 연구개발 현황에서의 입지

1. 연구 인프라 현황

본 연구에서 수행하고 있는 강재 지보재의 웹기반 응력 측정시스템 개발에 대한 국내의 연구인프라 수준은 선진국과 대비해 전반적으로 낙후되어 있는 상황이다. 이러한 상황은 전반적인 국내의 계측기술에 대한 인프라 수준 자체가 선진국에 비해 다소 뒤떨어져 있으며, 본 연구에서 추진하는 기술들이 계측기술에 있어 기술수준이 높은 것들인 점을 감안한다면 당연한 결과로 볼 수 있다. 아래 표는 김훈 등(2008)의 문헌을 참조하여, 고급인력 확보, 자동화 계측시스템, 설치기술, 통신 및 전원장치 등의 수준으로 선진국 대비 인프라 수준을 정성적으로 평가한 것이다.

<표 2-1> 선진국 대비 인프라 수준

기술분야	인프라 항목	선진국 대비 인프라 수준				
		부족	다소 부족	동등	우월	보다 우월
계측 기술	고급인력확보	○				
	자동화계측시스템			○		
	설치기술			○		
	통신 및 전원대처능력		○			
	연구 개발비		○			
	연구시설		○			
	연구시간		○			

2. 국내 기술개발 수준

본 연구에서 추진하고 있는 핵심 기술 분야의 기술개발 수준은 전반적으로 기술의 도입단계에 해당한다. 선진국과의 기술격차는 5~6년 정도인 것으로 추정되며 본 연구가 완료되는 시점에는 기술격차가 2~3년으로 줄어들 것으로 판단되며, 개발기술의 성숙 또는 경쟁단계에 진입될 것으로 예측된다.

<표 2-2> 관련 기술의 국내 기술개발 수준 현황

연구분야	현재기술수준			과제완료시 기술수준		
	기술수준 (%)	기술격차 (년)	비고	기술수준 (%)	기술격차 (년)	비고
강구조물의 비파괴 응력계측기법	30	5-6	도입 단계	80	2-3	성숙 단계

3. 세부산업 또는 기술의 경쟁력

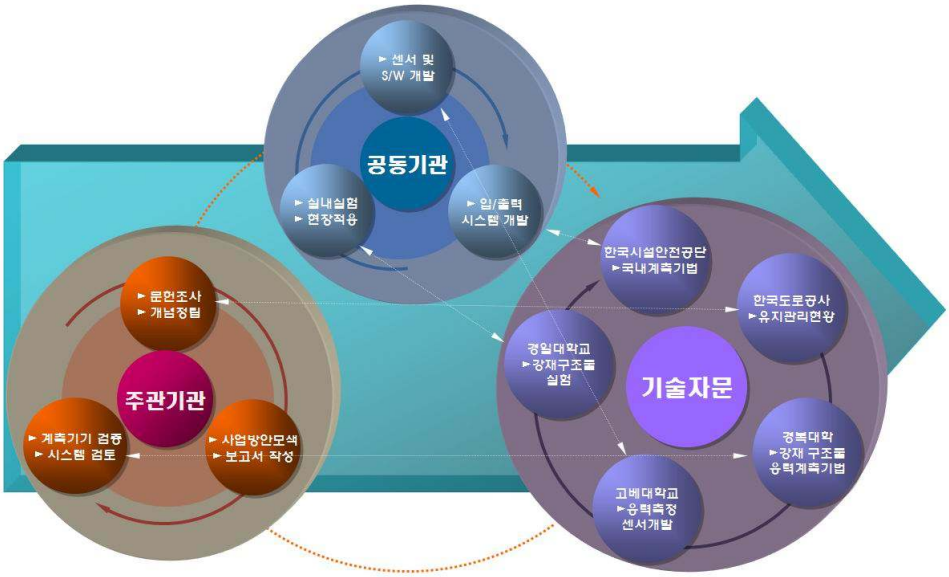
본 연구에서 추진하고 있는 세부산업 또는 기술 경쟁력은 국외의 경우와 비교하여 국내 개발현황이 아직 미비한 상태이나 본 연구개발과제를 통하여 경쟁력 있는 계측기법 및 시스템 등의 기술이 개발될 것이다.

세부 산업 또는 기술 내용	국외현황 (주요선진국명)	국내개발현황	수준 (국외대비)
자기이방성센서기술	일본	경남과학기술대학교 (주)메카지오텍 경일대학교	50%
강구조물 비파괴 응력계측 기술	일본	경남과학기술대학교 (주)메카지오텍 경일대학교	50%
비파괴 계측을 통한 강구조물의 응력거동 분석 기술	일본	경남과학기술대학교 (주)메카지오텍 경일대학교	40%

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구개발 추진전략 및 방법

1. 연구개발 추진전략



■ 강재 지보재의 웹기반 비파괴 응력 측정 시스템 개발 및 실용화에 중점

■ 산·학 공동연구개발팀 구축을 통한 연구 효율성 확보

○대학연구기관과 산업체의 공동 연구를 통한 신기술 개발

○계측관련 기업참여를 통한 실용화 가능성 확보

○관련 선진연구를 수행한 외국 연구기관과의 인적네트워크를 통한 연구 수행

■ 연구성과의 현장적용 및 검증을 통한 개발기술의 완성도 확보

2. 연구개발 추진체계



본 연구를 위해 주관연구기관인 경남과학기술대학교과 공동연구기관인 (주)메카지오텍으로 연구팀을 구성하였다. 주관연구기관인 경남과학기술대학교는 강재 지보재의 비파괴 응력계측을 위한 이론적인 내용을 정립하고 개발된 센서를 이용하여 실내실험 및 현장실험을 통하여 성능평가 및 검증을 수행하였으며, 공동연구기관인 (주)메카지오텍은 주관기관의 연구내용을 바탕으로 자기이방성센서 측정시스템 및 응력계측 자동 분석 및 처리를 위한 시스템을 개발 업무를 수행하였다.

제 2 절 주요 연구개발 내용

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	▪ 국내·외 건설계측 센서 및 현장 계측기법 실태조사	▪ 국내외 강재 지보재의 계측방법 조사 ▪ 응력 계측기기 및 웹기반 응력측정 시스템 실태 분석
	▪ 자기이방성을 활용한 강구조물 응력계측 센서 및 시스템 개발	▪ 자기이방성 응력계측 개념 수립 ▪ 강재 지보재를 사용하는 지반구조물의 비파괴 응력계측 방법과 개념정립 ▪ 자기이방성 응력계측센서 및 시스템 개발
	▪ 강재 지보재 부재력 실험을 통한 한국형자기이방성 응력계측센서 및 시스템의 적용성 평가	▪ 기존 계측기와 비교·검토 ▪ 개발된 센서를 강재 실내실험에 적용하 여 계측성능 검증 ▪ 계측기기의 검증을 통한 데이터의 신뢰도 확보
2차년도	▪ IT 접목형 구조물 웹기반 유지관리 시스템 개발	▪ 계측 정보의 입/출력 시스템 개발 ▪ 응력계측 자동 분석 및 처리시스템 개발 ▪ 웹기반 구조물 유지관리 통합 시스템 개발
	▪ 개발된 응력측정 시스템을 활용한 강재 지보재 현장계측 및 활용방안 연구	▪ 강재구조물의 현장계측 기법 연구 및 계획수립 ▪ 자기이방성 응력 계측기 및 유지관리 시스템의 현장 적용성 평가
	▪ 자기이방성 계측 시스템과 IT접목형 웹기반 유지관리시스템의 사업화 방안 모색 및 연구보고서 작성	▪ 자기이방성 응력계측기와 웹기반 유지관리 시스템 검토 및 보완 ▪ 수행된 연구결과 정리 및 국·내외 홍보 ▪ 사업화 방안 검토 및 연구 보고서 작성

제 3 절 주요 연구결과

연 차	연구 내용	연구 결과
1차년도	▪ 국내·외 건설계측 센서 및 현장 계측기법 실태조사	▪ 기술동향 조사를 통한 연구수행 방향 설정 및 실험계획 수립
	▪ 자기이방성을 활용한 강구조물 응력계측 센서 및 시스템 개발	▪ 자기이방성 응력계측 개념 수립 ▪ 강재 지보재를 사용하는 지반구조물의 비파괴 응력계측 방법과 개념정립 ▪ 자기이방성 응력계측센서 및 시스템 개발
	▪ 강재 지보재 부재력 실험을 통한 한국형자기이방성 응력계측센서 및 시스템의 적용성 평가	▪ 기존 계측기와 비교·검토 ▪ 개발된 센서를 강재 실내실험에 적용하 여 계측성능 검증 ▪ 계측기기의 검증을 통한 데이터의 신뢰도 확보
2차년도	▪ IT 접목형 구조물 웹기반 유지관리 시스템 개발	▪ 계측 정보의 입/출력 시스템 개발 ▪ 응력계측 자동 분석 및 처리시스템 개발 ▪ 웹기반 구조물 유지관리 통합 시스템 개발
	▪ 개발된 응력측정 시스템을 활용한 강재 지보재 현장계측 및 활용방안 연구	▪ 강재구조물의 현장계측 기법 연구 및 계획수립 ▪ 자기이방성 응력 계측기 및 유지관리 시스템의 현장 적용성 평가
	▪ 자기이방성 계측 시스템과 IT접목형 웹기반 유지관리시스템의 사업화 방안 모색 및 연구보고서 작성	▪ 자기이방성 응력계측기와 웹기반 유지관리 시스템 검토 및 보완 ▪ 수행된 연구결과 정리 및 국·내외 홍보 ▪ 사업화 방안 검토 및 연구 보고서 작성

제 4 절 연구결과

1. 변형률 게이지와 수치해석을 이용한 강구조물의 응력거동 비교분석

자기이방성센서를 이용한 강구조물의 응력측정시스템 개발에 있어서 강지보 구조물의 응력거동을 파악하기 위한 기초 연구로 하중단계에 따른 강재의 응력거동을 파악하기 위하여 국외자료를 토대로 강재하중재하 시험을 수행하였다.

가. 변형률 게이지를 이용한 강구조물의 응력거동 분석-실내시험

(1) 연구개요

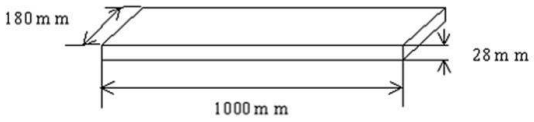
실제 강재에 대한 실험을 통한 강재의 응력 거동 분석 및 항복하중 이상의 하중재하를 통해 강재의 거동 확인하고, 변형률 게이지 설치 위치에 따른 하중 단계별 응력 변화 확인하는 것이 주된 목표이다.

강재하중재하시험에 사용된 강재는 구조용 압연 강재인 SS400을 사용하였으며, 사용된 강재의 화학조성 및 역학적 특성은 <표 3-1>에서 보는 바와 같다. <그림 3-1>은 강재하중재하 시험을 위해 제작된 시험편의 모식도이고, <그림 3-2>는 강재하중재하시험 모식도 이다. <그림 3-3>은 변형률 게이지 부착위치를 나타내고 있다. 실험에 사용된 변형률 게이지는 전기저항식 2축 센서(Tokyo Sokki, Type. FCA-5-11-1L)를 사용하였으며, 변형률 게이지의 길이는 5㎜이고, 변형률 게이지 저항치는 120±0.5Ω이다. <그림 3-4>는 강재하중재하시험 전경을 보여주고 있으며, 강재하중재하시험을 위해 100tonf까지 하중재하가 가능한 구조모형 시험 장치를 이용하였다.

<표 3-1> 강재(SS400) 제원표

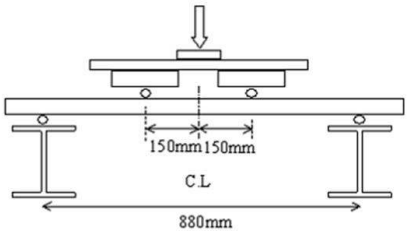
강 종	CHEMICAL COMPOSITION, %							TENSILE TEST		
SS400	C	Si	Mn	P	S	Alt	B	항복강도 MPa	인장강도 MPa	연신율 %
	0.18	0.02	0.81	0.011	0.006	0.025	0.016	245	425	23.0

- 시험편 제작
  - SIZE : [L]1,000㎜ × [B]180㎜ × [T]28㎜
  - 강종 : SS400 [항복강도 : 245MPa, 인장강도 : 425MPa, 연신율 : 23.0%]
  - 화학구성
    C : 0.18%, Si : 0.02%, Mn : 0.81%, P : 0.011%, S : 0.006%, Alt : 0.025%, B : 0.0016%
- 변형률 게이지
  - 변형률 게이지 : Tokyo Sokki[일본], Type. FCA-5-11-1L[전기저항식 2축 센서]
    Gauge Length : 5㎜
    Gauge Resistance : 120±0.5Ω



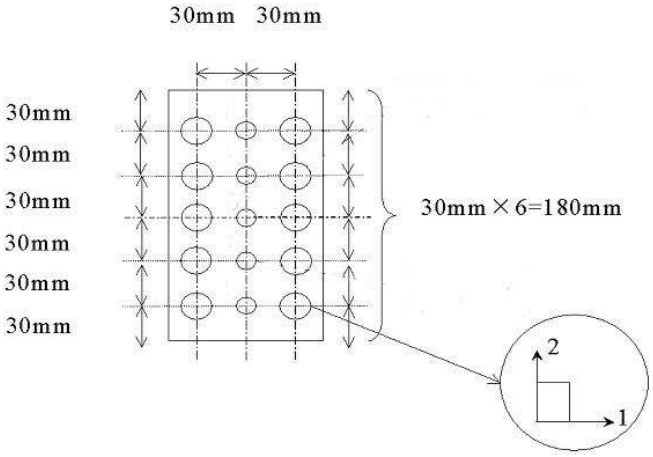
시험편 : SS400, (L)1000㎜ × (B)180㎜ × (T)28㎜

<그림 3-1> 시편



하중재하시험 모식도

<그림 3-2> 하중재하시험 모식도



<그림 3-3> 변형률 게이지 부착 위치



<그림 3-4> 강재하중재하시험 전경

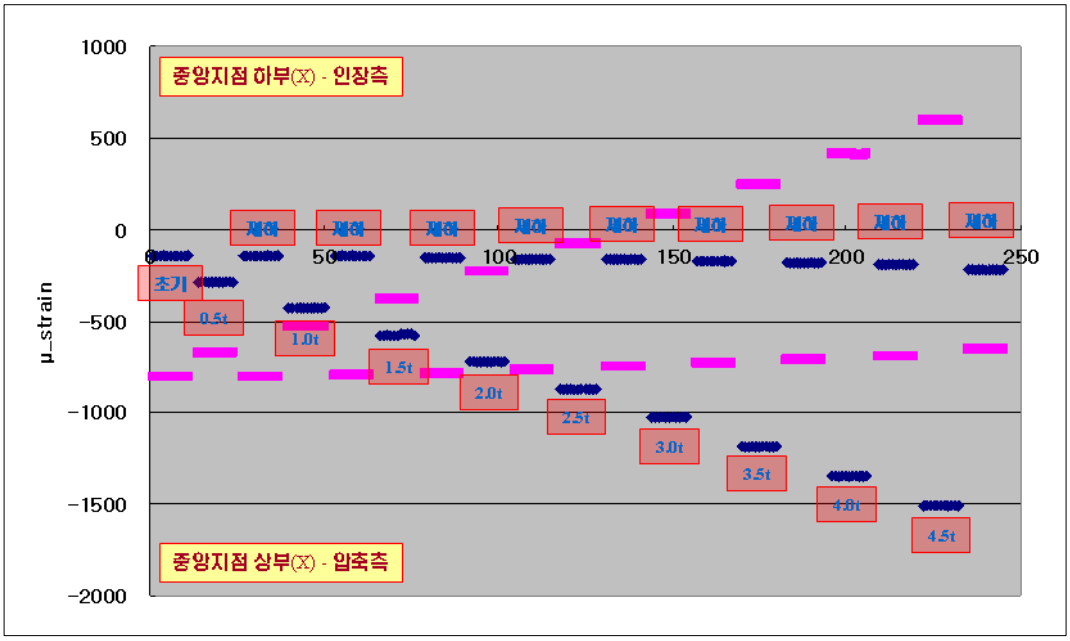
강재하중재하 시험은 각 재하조건에 따라 총 5번의 실험을 수행하였으며, 각 실험에 대한 하중재하조건은 <표 3-2>에서 보는 바와 같다. 또한 시험편의 항복하중 이상의 하중재하를 통하여 강재의 소성영역을 확인하였다.

<표 3-2> 강재하중재하시험 하중재하조건

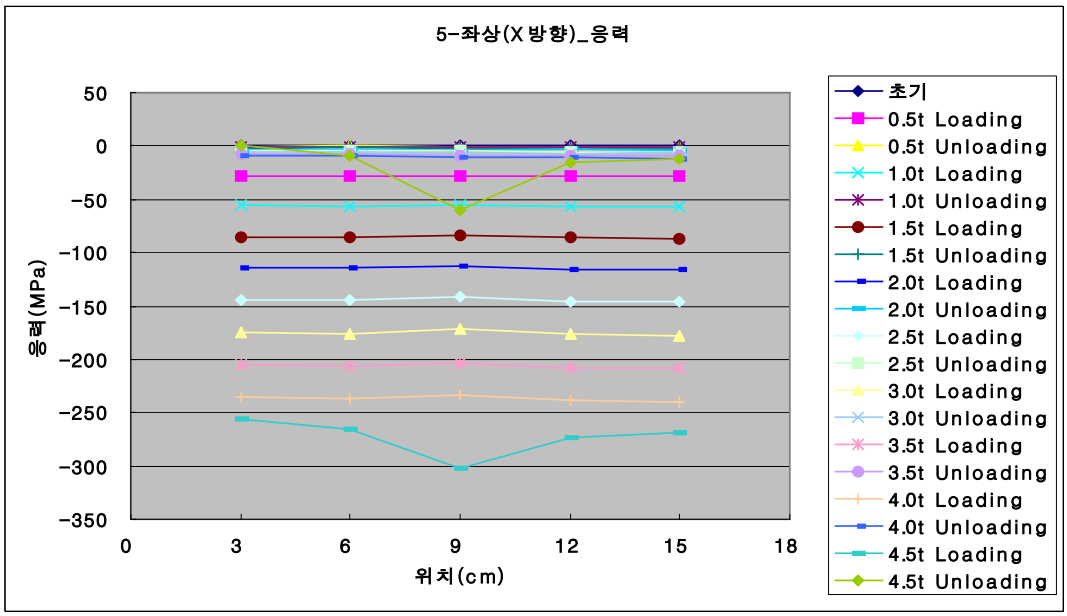
구 분	1st Test	2nd Test	3rd Test	4th Test	5th Test
하중재하조건	초기 0.75t Loading 1.50t Loading 2.25t Loading 2.27t Loading 2.25t Unloading 1.50t Unloading 0.75t Unloading 0.00t Unloading	초기 0.5t Loading 1.0t Loading 1.5t Loading 2.0t Loading 2.5t Loading 3.0t Loading 3.5t Loading 4.0t Loading 4.5t Loading 5.0t Loading	초기 0.75t Loading 0.75t Unloading 1.50t Loading 1.50t Unloading 2.25t Loading 2.25t Unloading 2.75t Loading 2.75t Unloading	초기 0.75t Loading 1.50t Loading 2.25t Loading 2.75t Loading 2.25t Unloading 1.50t Unloading 0.75t Unloading 0.00t Unloading	초기 0.5t Loading 0.5t Unloading 1.0t Loading 1.0t Unloading 1.5t Loading 1.5t Unloading 2.0t Loading 2.0t Unloading 2.5t Loading 2.5t Unloading 3.0t Loading 3.0t Unloading 3.5t Loading 3.5t Unloading 4.0t Loading 4.0t Unloading 4.5t Loading 4.5t Unloading

(2) 연구결과

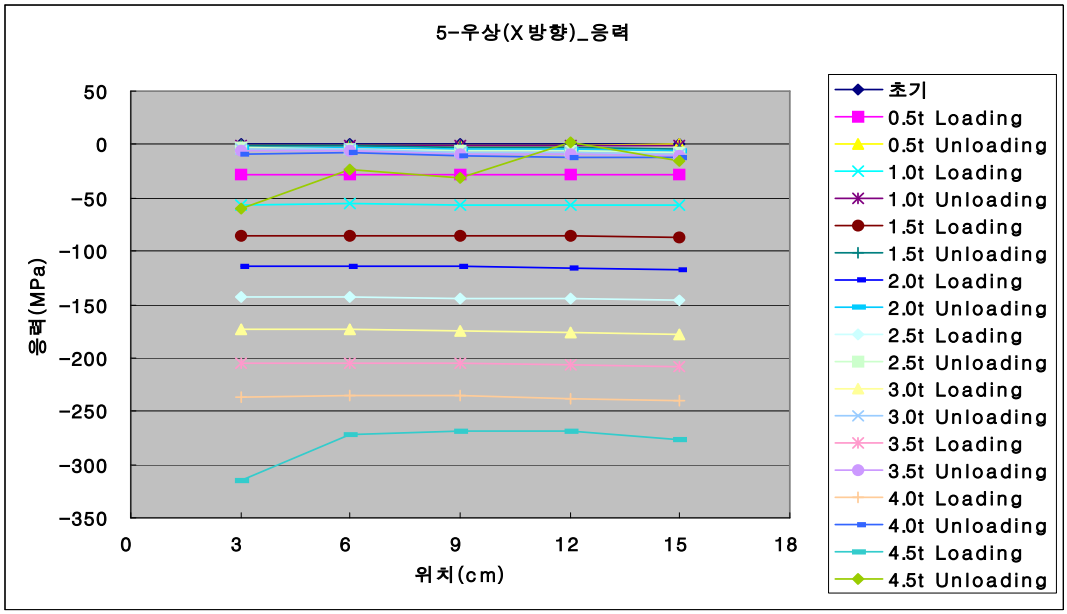
강재하중재하시험 결과를 살펴보면, <그림 3-5>에 하중재하단계에 따른 강재의 중앙지점 상부(압축측)와 하부(인장측)의 X축 방향 변형률을 나타내었으며, <그림 3-6>부터 <그림 3-8>까지는 강판상부에서 압축측 X축 방향 변형률 게이지를 부착한 위치에서 하중재하단계에 따른 각각의 응력값을 도시한 것이다. 그리고 <그림 3-9>는 좌우측 변형률 게이지에서 측정된 응력값과 중앙지점에서 측정된 응력값을 비교한 것이다.



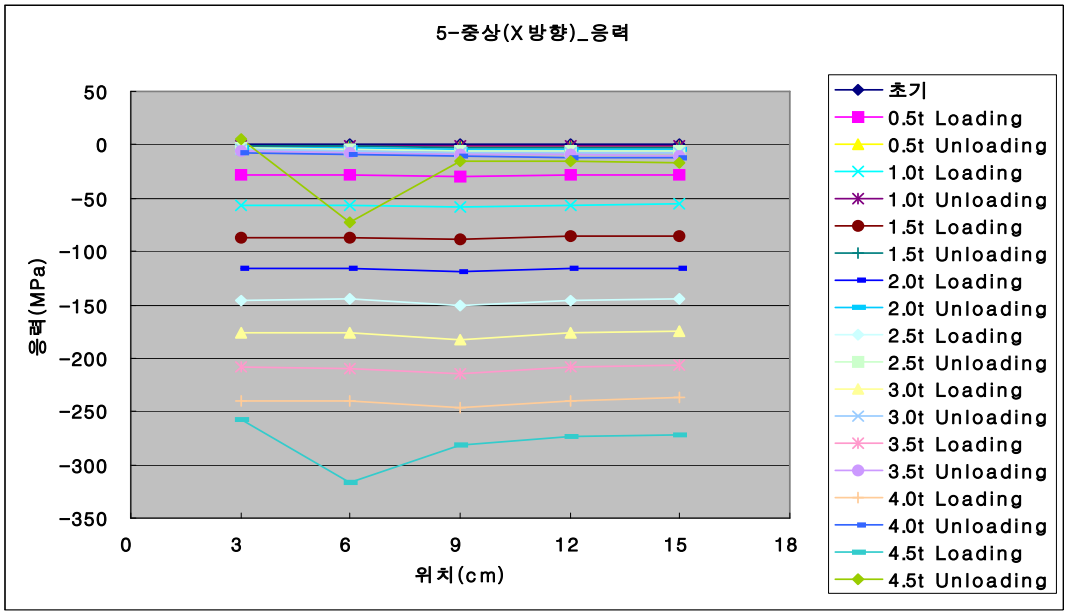
<그림 3-5> 강재하중재하시험 변형률 측정 결과



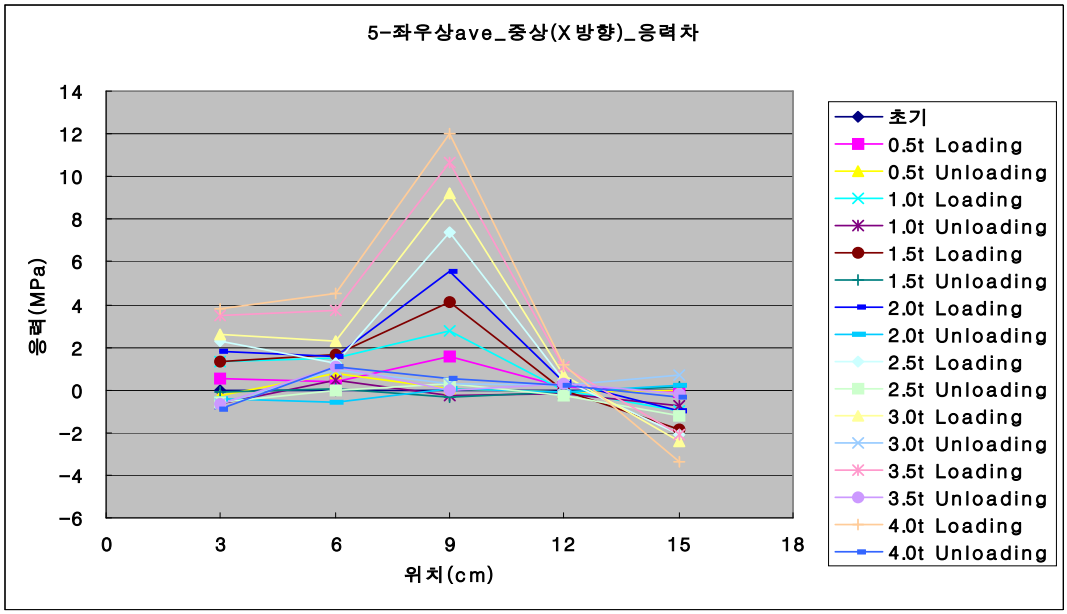
<그림 3-6> 변형률 게이지 위치에 따른 응력값
(좌측 상부-X방향)



<그림 3-7> 변형률 게이지 위치에 따른 응력값
(좌측 상부-X방향)



<그림 3-8> 변형률 게이지 위치에 따른 응력값
(중앙 상부-X방향)

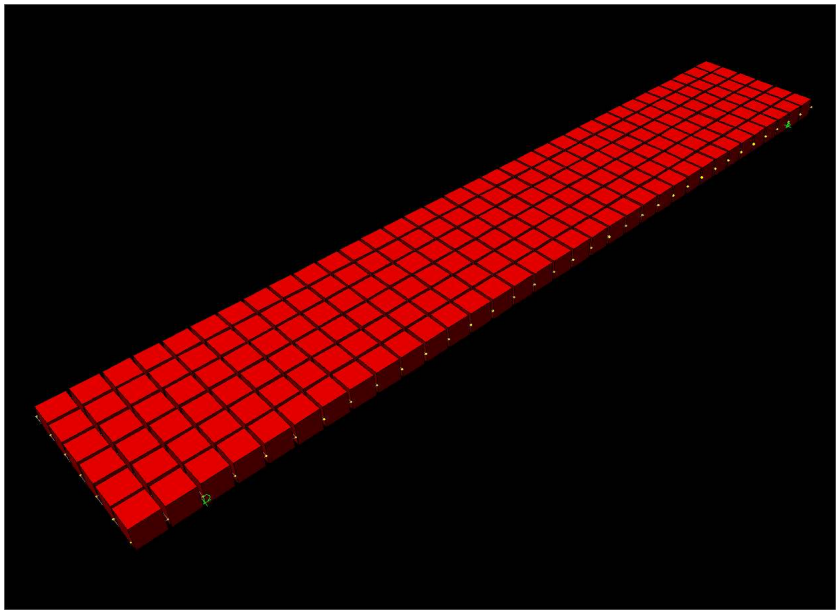


<그림 3-9> 변형률 게이지 위치에 따른 응력차

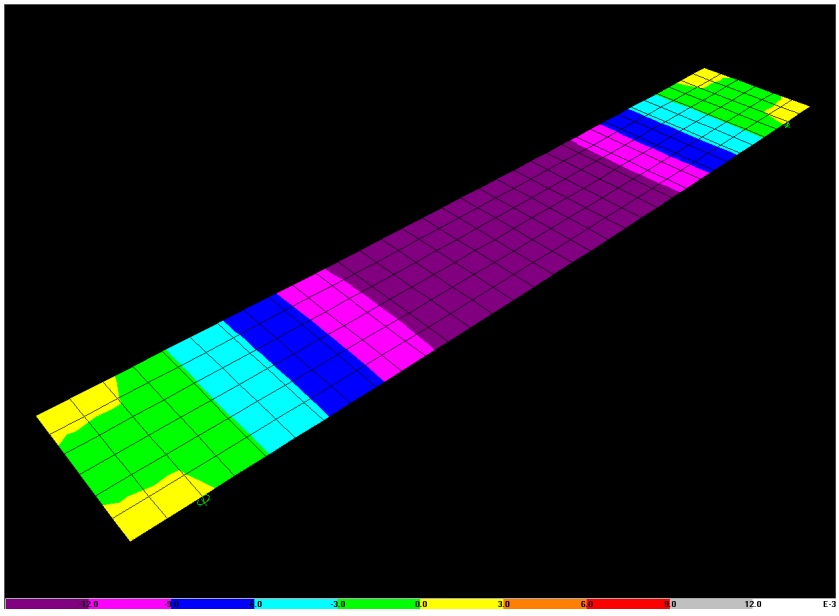
나. 변형률 게이지를 이용한 강구조물의 응력거동 분석-수치해석

(1) 연구개요

본 연구에서는 강재하중재하시험과 수치해석 결과와의 비교·분석을 위하여 구조해석 유한요소 프로그램인 SAP2000과 MIDAS CIVIL을 이용하여 강재하중재하시험과 동일한 조건으로 수치해석을 수행하였다. <그림 3-10>은 강재하중재하시험의 모델링 상태를 보여주고 있으며, <그림 3-11>은 수치해석 결과로 하중재하로 인한 강재의 응력분포를 나타내고 있다.



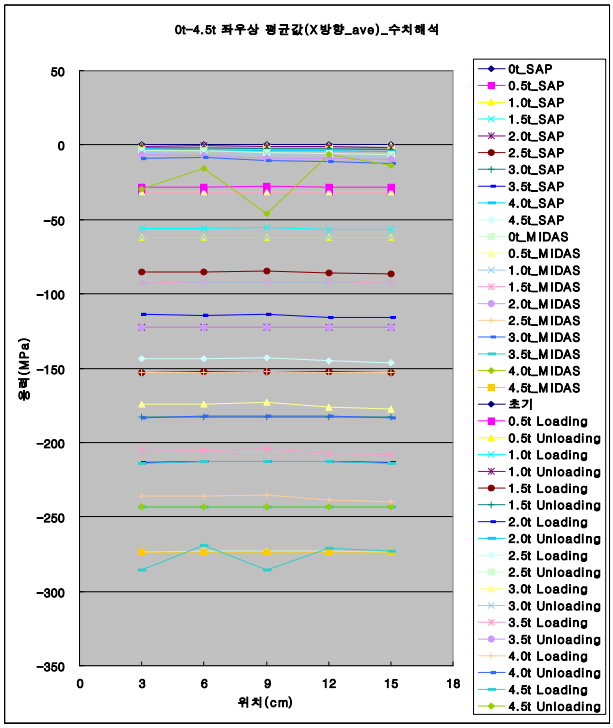
<그림 3-10> 수치해석을 위한 유한요소 모델링



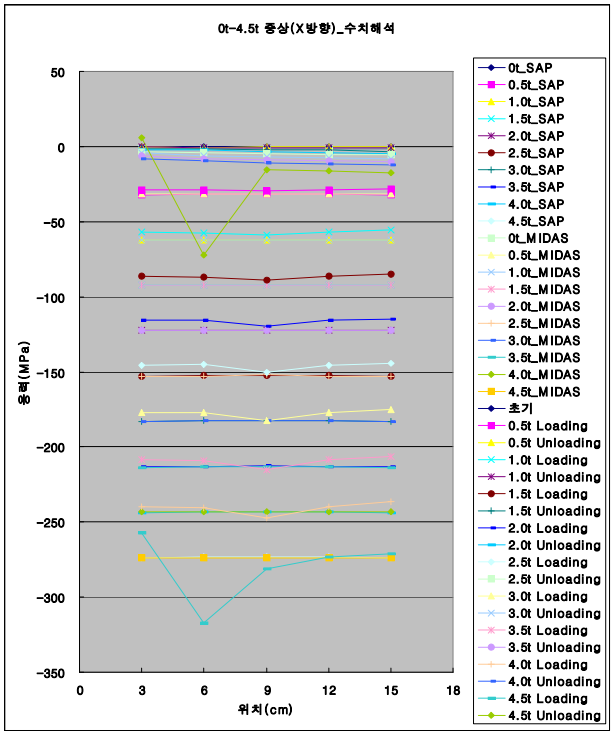
<그림 3-11> 하중재하로 인한 강재의 응력 분포

(2) 연구결과

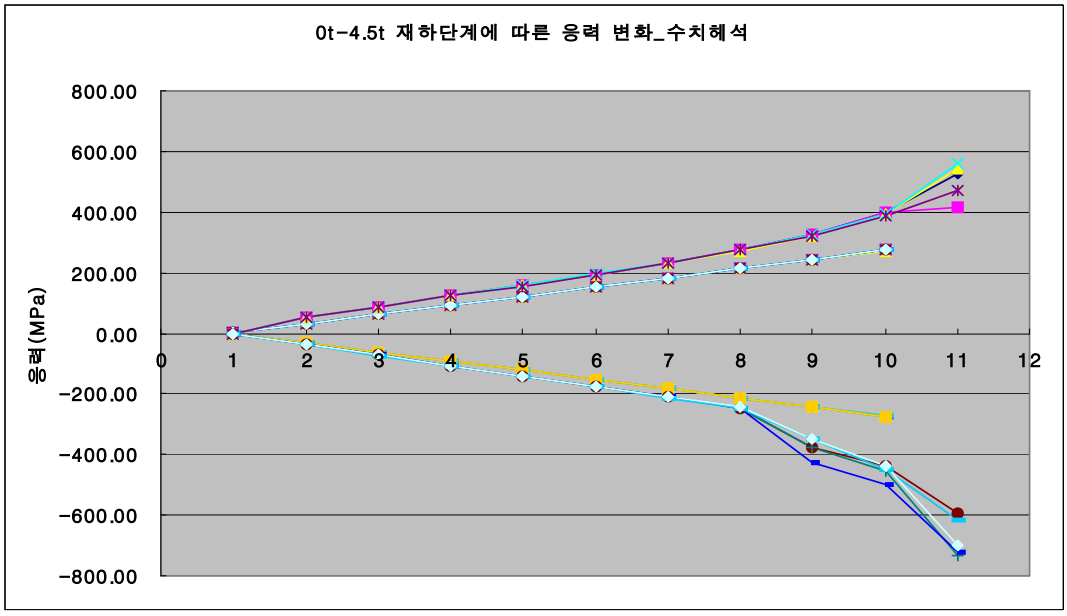
강재하중재하시험의 결과와 수치해석의 결과를 비교한 결과를 <그림 3-12>와 <그림 3-13>에 각각 나타내었으며, <그림 3-14>는 하중재하단계에 따른 응력값을 비교하였으며, <그림 3-15>는 재하하중에 따른 처짐값을 비교하여 도시하였다.



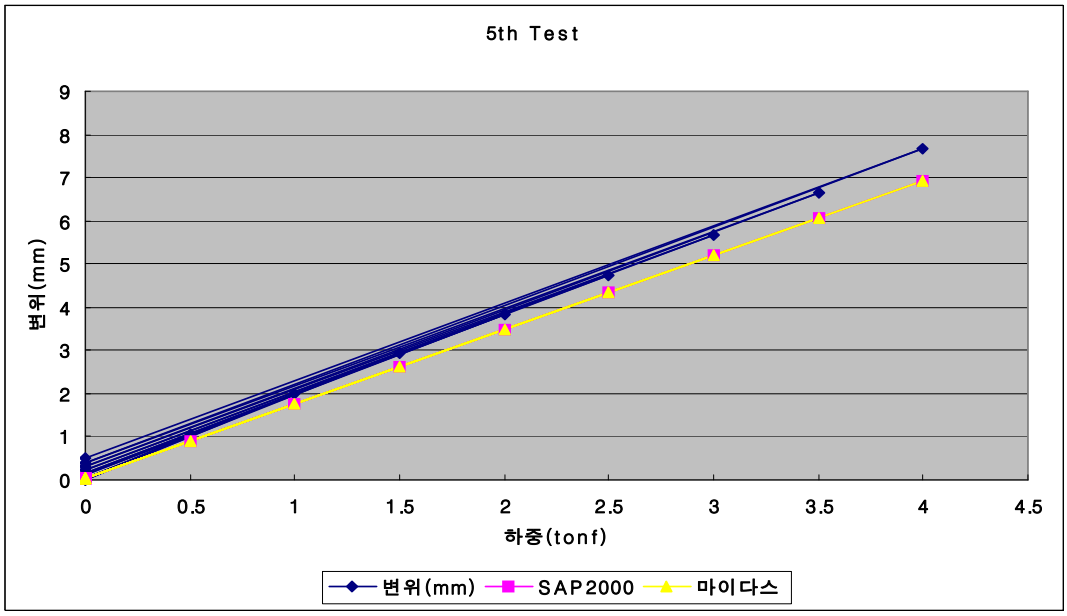
<그림3-12> 수치해석 결과와의 비교
(좌우 상부 평균 응력 - 수치해석 응력)



<그림3-13> 수치해석 결과와의 비교
(중앙 상부 응력 - 수치해석 응력)



<그림 3-14> 하중재하단계에 따른 응력값 비교



<그림 3-15> 재하하중에 따른 처짐값 비교

수치해석과 변형률 게이지를 이용하여 강재하중재하시험을 통한 실제 강재에 대한 응력거동을 분석한 결과, 우선 3.5tonf의 하중을 재하 하였을 때 인장측에서 소성거동이 나타났으며, 탄성모델을 이용한 수치해석 결과와 비교하여 볼 때, 실측값과 다소 차이를 보임을 알 수 있다. 이것은 강재에 대한 반복재하시험 결과에서 알 수 있듯이 강재의 응력 거동이 탄성 거동이 아닌 탄소성 거동을 하기 때문임을 알 수 있다. 또한 강재의 상부와 하부의 응력거동은 압축과 인장만 다를 뿐 유사한 거동을 나타냄을 알 수 있었으며, 강재하중재하시험 결과, X축이 인장을 받을 경우 Y

축은 압축거동을 보이고 있었다.

향후 본 실험결과를 토대로 비파괴 응력 측정 기법인 자기이방성 응력센서의 응력감도곡선에 대한 연구를 위하여 소성영역 및 잔류응력의 거동을 파악하기 위해 비탄성모델을 이용한 수치해석이 필요할 것으로 판단된다.

2. 강재 지보재의 비파괴 응력계측을 위한 자기이방성센서 개발

가. 개 요

새로운 소재의 개발이 활발하게 진행되고 있는 오늘날에도 구조용 재료와 기계부품의 대부분은 철강이 차지하고 있다. 그러나 그 사용조건은 시간이 경과함에 따라 높은 신뢰성과 안정성을 필요로 하고 있다. 이와 같은 흐름 가운데 재료의 제조공정 또는 부품 조립시에 응력이 발생하게 되고 여기서 발생하는 응력을 쉽게 제거할 수 없는 경우에, 이러한 종류의 잔류응력은 재료의 강도, 파괴강도 및 기존의 조립된 부품에서는 응력관리라는 측면에서 중요한 영향을 미친다.

구조물의 응력 및 잔류응력의 측정방법에는 여러 가지가 있지만 두 가지로 대별하면 변형률 게이지로 대표되는 응력의 변화를 측정하는 방법과 X선 등을 이용한 응력측정법으로 대표되는 비파괴로 응력을 측정하는 방법으로 나눌 수 있다. 변형률 게이지법은 정밀도가 높아 널리 사용하고 있는 방법이지만 무응력 상태와의 차로서 기존의 응력을 구하기 때문에 외력에 의한 응력 및 잔류응력이 없는 재료에 미리 변형률 게이지를 부착하여 응력을 측정해야 하는 어려움이 있다. 반면 비파괴 응력 측정법은 재료를 파괴하지 않고도 응력을 구할 수 있으며, 가령 오랜 시간 전에 조립한 물건이라도 응력 측정이 가능할 뿐만 아니라 특히 잔류응력의 측정에는 매우 유용하다.

이렇게 응력을 비파괴로 측정할 수 있는 것으로는 X선법, 초음파를 이용한 방법, 자기변형효과(Magnetostriction effect)를 이용한 방법 등이 있으나 X선을 이용한 장치는 대형으로 손쉽게 운반이 어려우며 구조물의 임의 지점에서의 응력 측정에는 부적합하다. 초음파와 자기변형효과를 이용한 방법은 아직 실용화하기에는 어려움이 있으나 이를 위한 연구가 계속 진행되고 있다. 이 중 자기변형효과를 이용한 응력 측정방법은 다른 측정 장치에 비해 경량, 소형이며 간편하게 어디서나 필요한 부분의 잔류응력을 비파괴적으로 측정할 수 있다.

나. 이론적 배경

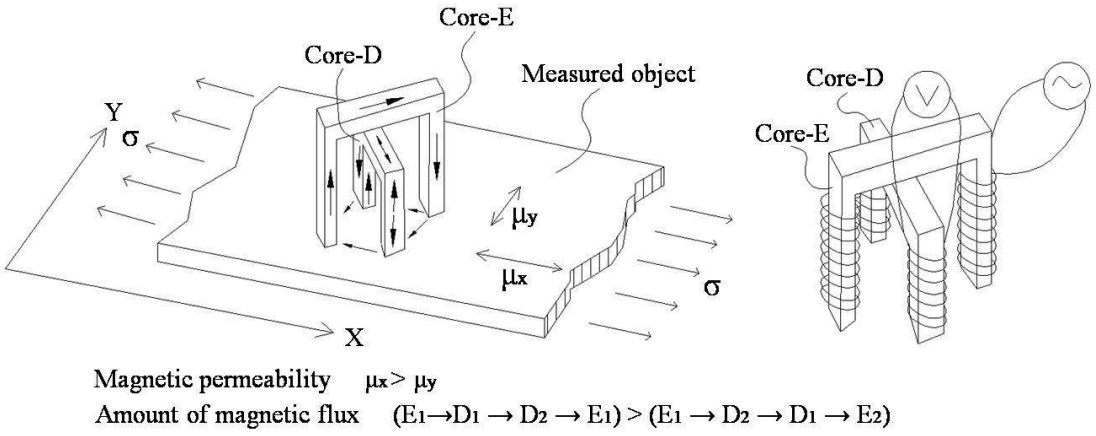
자기변형효과를 이용한 응력 측정 장치는 기계 및 자동차 부품 등에서 잔류응력을 측정하기 위하여 1960년대부터 현재까지 계속 연구되고 있다. 1970년대 후반에 들어 吉永昭男 등(1977)은 스트레스 테스터(stress tester)라고 부르는 센서를 개발하여 용접부 주위 및 구조물의 잔류응력을 측정하였다. 이들은 'ㄷ'자 모양의 두 개의 철심 주위에 동선을 감고 하나는 보상용으로, 다른 하나는 측정용 스트레스 테스터를 만들어 피측정체에 응력으로 인한 투자율의 변화가 있을 때 측정용 테스터에서 이를 감지하여 응력을 측정하였다. Abuku(1976)는 자기센서 중 가장 유용하다고 생각되는 자기이방성센서(magnetic anisotropy sensor)를 연구 개발하였다. 자기

이방성센서는 吉永昭男 등(1977)의 스트레스 테스터와는 달리 보상용 테스터가 필요 없으며 피측정체가 응력에 의해 자기이방성을 나타낼 때 이를 이용하여 잔류응력을 측정하였다. 1980년대에 들어서면서 Kashiwaya 등(1985)은 소자법(demagnetization method)을 창안하여 응력에 의한 자기적 히스테리시스(hysteresis)를 제거하였으며, 리프트 오프(lift-off)의 영향을 고려하지 않고 응력을 측정할 수 있는 측정 방법을 개발하였다.

최근 들어 건설 분야에서 자기이방성센서를 이용한 응력 측정 기법은 강교나 강관 등의 분야에서 사용예가 있으며 터널 건설현장에서 이용되는 강지보재(H형강)에 대해서도 현장계측이 가능함이 밝혀졌다(Akutagawa 등, 2003; Sakai 등, 2000).

강자성체(ferromagnetic substance)를 자화(magnetization)시킬 때 강자성체에 가해준 자계(magnetic field)의 세기에 따라 자로(magnetic circuit) 방향으로 길이가 약간 변하는데, 이러한 길이의 변화를 자기변형(magnetostriction)이라 하며 길이에 대한 자기변형은 자화를 시키는 방향에 평행하게 변형한다. 재료에 따라 자기변형의 특성이 달라지는데, 자기변형이 자화한 방향으로 늘어나면 정의 자기변형이라 하며, 자기변형이 자화한 방향으로 줄어들면 부의 자기변형이라 한다. 철(iron)과 같은 강재(steel)는 자화가 되면 정의 자기변형이 발생한다. 즉 강재에 인장응력이 발생하면 자기변형이 자화한 방향으로 늘어나 투자율(magnetic permeability)이 좋아지며, 이러한 투자율의 변화를 측정하기 위해 자기이방성센서가 활용되고 있다.

자기이방성센서는 다양한 종류가 존재하는데, 본 연구에서 적용한 것은 4족 원주형(직경 2㎝, 높이 3㎝)이며, 4족의 대각선상에 각각 출력코일(Core-D)과 입력코일(Core-E)이 감겨져 있다. 그림 3-16과 같은 응력상태를 고려하면 피측정물의 투자율(透磁率, 자속 통과 정도)은 x방향 투자율(μ_x)이 y방향 투자율(μ_y)보다 커지므로 입력코일(Core-E)에 전류를 흘리면 E_1로부터 나온 자속의 대부분은 최단 거리로 직접 E_2로 향하지만 투자율의 차이($\mu_x - \mu_y$)로 인하여 E_1에서 D_1, D_2에서 E_2로 화살표 방향과 같이 출력코일(Core-D)에 유도전류가 흘러 전압이 발생하게 된다.



<그림 3-16> 자기이방성센서의 측정원리

출력코일에서 발생되는 출력전압(V)은 다음 식(1)과 같이 계산된다.

$$V = N(\mu_x - \mu_y) \qquad (1)$$

여기서 N은 피측정물의 자기적 특성, 자기이방성센서와 피측정물의 거리 등에 의해 정해지는 상수이다.

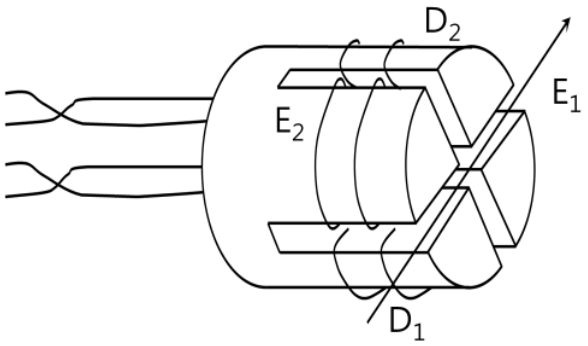
피측정물 투자율의 이방성 $(\mu_x - \mu_y)$은 직교하는 2축의 응력차 $(\sigma_x - \sigma_y)$에 비례하므로 다음 식(2)와 같은 관계를 가진다.

$$V = K(\sigma_x - \sigma_y) \qquad (2)$$

여기서 K는 응력감도로 코일 및 재료의 자기적 특성 등에 의해 정해지는 상수이다. 따라서 비례 상수인 K를 알 수 있으면, 자기이방성센서의 출력에 의해 응력차를 얻을 수 있다. 또한 센서 원리에 의해 피측정물에 대하여 회전시켰을 때의 출력전압은 180°의 주기를 가지는 코싸인(cosine) 커브로 나타나며 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = K(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\phi \qquad (3)$$

여기서 σ_1, σ_2는 피측정물에 작용하는 주응력이며, ϕ는 센서의 측정방향과 주응력 σ_1의 방향이 이루는 각이다. 센서의 측정방향이란 그림 2의 화살표 방향으로 자기이방성센서를 0°, 45°, 90°, 135°의 4방향으로 회전시켜 출력전압이 최대가 되는 방향을 구하면, 그 때의 자기이방성센서의 방향이 주응력 σ_1의 방향이고 출력방향에서의 주응력차 $(\sigma_1 - \sigma_2)$를 구할 수 있다. 단, 피측정물에 작용하는 응력상태를 모르는 경우는 자기이방성센서를 회전시켜 4방향 계측을 수행할 필요가 있다.

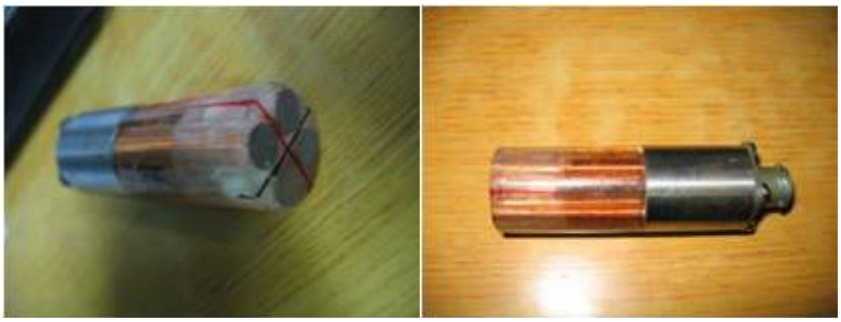


<그림 3-17> 자기이방성센서의 측정방향

다. 자기이방성센서를 이용한 비파괴 응력계측 시스템 개발(1차 시제품)

자기이방성센서를 이용한 비파괴 응력계측 시스템 개발을 위해 1차 시제품을 제작하였다. 1차 시제품으로 만들어진 프로브는 그림 3-18에서 보는 바와 같이 직경(D)이 25mm이고, 높이(H)가 40mm인 4족 원주형으로 제작하였다. 또한 인가전압은 AC9V, 60Hz의 정전압을 이용하였으며, 출력전압을 측정하기 위하여 그림 3-19에서 보는 바와 같이 Digital multimeter UT60E(UNI-TREND INTERNATIONAL LTD.)를 이용하였으며, RS-232C Serial 통신을 이용하여 PC 통신을 하였다.

1차 시제품 제작 후 실험실에서 간이 테스트를 실시한 결과, 출력전압이 상당히 작게 측정(8mV 이하)되어 측정방향에 따른 출력전압의 차가 상당히 적어 출력전압 측정장치로 정확한 측정이 어려운 문제점이 발생하였다.



<그림 3-18> 1차 시제품 프로브



<그림 3-19> 자기이방성센서 측정시스템(1차 시제품)

라. 자기이방성센서를 이용한 비파괴 응력계측 시스템 개발(2차 시제품)

1차 시제품의 문제점을 보완하기 위하여 Function Generator를 이용하여 인가전압 및 주파수를 상향(20Vpp, 1kHz) 조정하였으며, 정밀한 측정값을 얻기 위해 Oscilloscope를 이용하여 출력전압 측정 및 주파수 분석을 수행하였다. 또한 기계식 Band Pass Filter를 이용하여 1kHz 대역에 대한 주파수를 필터링하였다.



<그림 3-20> 자기이방성센서 측정시스템(2차 시제품)

2차 시제품 제작 후 실내실험을 수행한 결과, 1차 시제품에 비해 출력전압은 상승하였으나, 기계식 Band Pass Filter의 한계로 인한 필터링 문제 및 측정 프로브의 디자인에 의한 오차가 심하게 발생하는 문제점이 발생되었다.

마. 자기이방성센서를 이용한 비파괴 응력계측 시스템 개발(3차 시제품)

1차 시제품의 수정을 통해 2차 시제품을 이용한 실험결과, 문제점이 도출되어 3차 시제품을 제작하였다. 3차 시제품 개발 내용을 살펴보면 측정 프로브는 그림 3-21에서 보는 바와 같이 직경(D)이 30mm이고, 높이(H)가 60mm인 4족 원주형으로 설계 변경하였으며, 외부 저항을 차단하기 위하여 플라스틱 보호캡을 덮었다. 또한 기존 장비들을 연결하던 방식에서 탈피하여 그림 3-22에서 보는 바와 같이 자기이방성센서 측정회로를 제작하여 다양한 기능들을 한 개의 회로 기판에 탑재하였다. 그림 3-23은 자기이방성센서 측정시스템 3차 시제품을 보여주고 있다.



<그림 3-21> 프로브 설계 변경(3차 시제품)

[Magnetic Anisotropy Sensor System]

측정부 →

MAS Probe

↑ **(R-4pin)** ↓

회로기판 →

Signal Generator(1kHz,5Vpp) Signal Amplifier

↑ ↓

Regulator Band Pass Filter

↑ **(adapter)** ↓ **(BNC)**

AC220V 60Hz A/D Converter

↓ **(RS-232)**

PC

<그림 3-22> 자기이방성센서 측정시스템 블록도



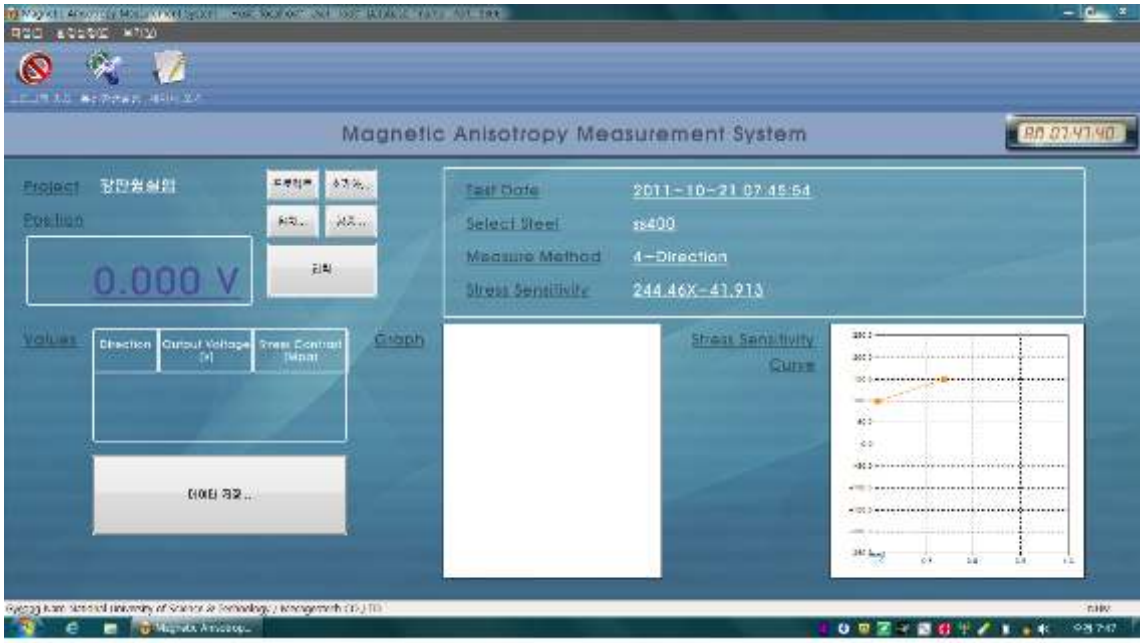
<그림 3-23> 자기이방성센서 측정시스템(3차 시제품)

3. 강재 지보재 비파괴 응력계측 프로그램 개발

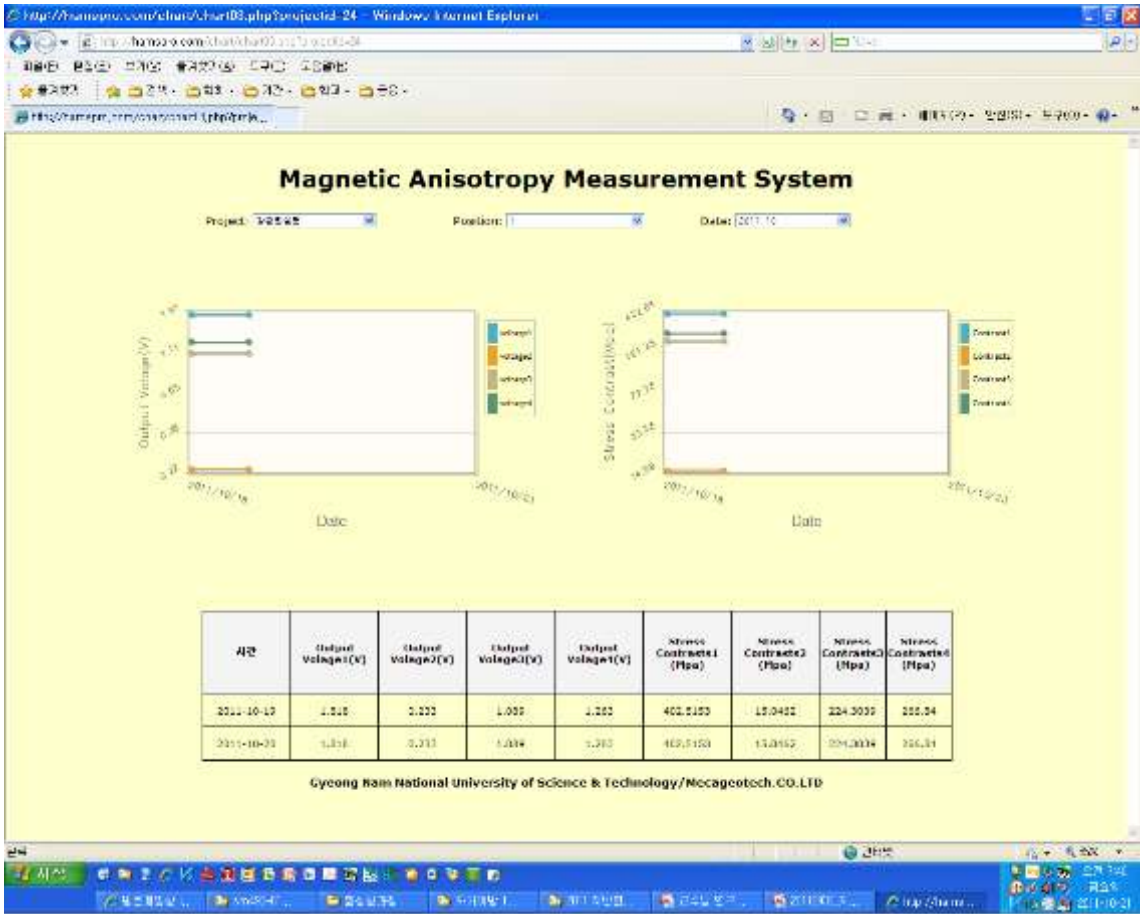
본 연구에서는 자기이방성을 활용한 강구조물 응력계측 시스템 및 IT 접목형 구조물 웹기반 유지관리 시스템 개발로서 유저인터페이스를 통해 현장에서 확인된 계측결과를 쉽고, 빠르게 분석・처리・평가하여 정보를 공유 하는데 목적이 있다. 특히, 대상구조물의 재원과 계측위치(입/출력모듈), 계측결과의 가시화(계측결과 평가모듈), 현재의 구조물 안정성(유지관리 시스템의 평가모듈)등을 종합적으로 반영할 수 있도록 개발하였다.

개발된 프로그램은 자기이방성센서를 이용하여 측정된 강재 지보재의 응력 계측결과 값을 가시화 프로그램을 통하여 실시간으로 확인할 수 있으며, 통신망을 통하여 분석 데이터를 계측 위치별, 시간대별로 실시간으로 통합운영프로그램으로 전송하여 D/B를 구축할 수 있다. 아래에 보는 그림은 가시화 프로그램 인터페이스와 웹기반 통합운영프로그램 인터페이스이다.

가시화 프로그램의 기능은 프로젝트의 설정, 위치별 측정데이터 저장, 강종에 따른 응력감도곡선 적용 및 계측결과 분석, 실시간 계측데이터 업로드 기능이 있으며, 웹기반 프로그램은 인터넷을 통한 실시간 결과 확인 및 프로젝트별, 측정위치별 결과 확인 및 월간 계측결과 변화를 한눈에 파악할 수 있도록 개발하였다.



<그림 3-24> 자기이방성 측정시스템 가시화 프로그램



<그림 3-25> 자기이방성 측정시스템 웹기반 프로그램

4. 자기이방성센서를 이용한 강판의 응력거동 분석

자기이방성의 원리는 피측정물의 투자율이 응력상태에 따라 변화하는 것을 센서를 이용하여 출력전압으로 측정하는 방법이다. 따라서 출력전압을 응력으로 환산하기 위하여 강재마다 출력전압과 응력의 관계(응력감도, K)를 실험을 통하여 사전에 도출하여야 한다.

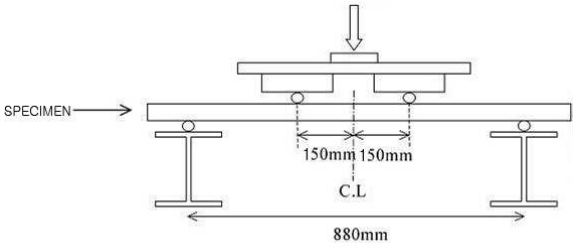
가. SS400 강판의 응력거동 분석

(1) 실험개요

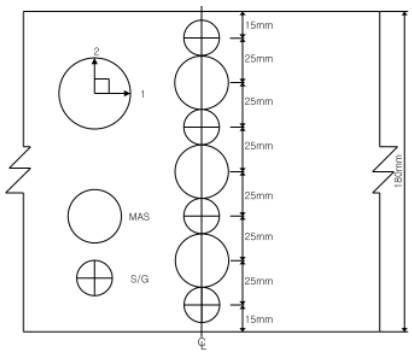
본 연구에서는 응력감도(K)를 도출하기 위하여 자기이방성센서와 스트레인게이지를 이용하여 그림 3-26에서 보는 바와 같이 강재의 하중재하시험을 수행하였다. 실험에 사용된 시험편은 국내에서 생산되는 일반구조용 압연강재인 SS400와 용접구조용 압연강재인 SM490을 사용하였으며, 시험편은 동일하게 2개씩 제작하여 열처리(풀림, annealing)를 한 시험편과 열처리를 하지 않은 시험편(non-annealing)으로 나누어 동일한 실험을 수행하였다. 시험편의 제원 및 화학구성은 표 3-3에서 보는 바와 같다. 하중재하는 시험편의 중심점에서 좌우로 150㎜ 떨어진 지점에 2점으로 재하를 하였으며, 하중단계는 스트레인게이지의 특성상 측정가능 영역이 탄성영역에 한정되므로 최대 재하하중을 20kN으로 설정하여 각각 0kN, 5kN, 10kN, 15kN, 20kN의 순서로 재하를 실시하였다. 실험과정에서 응력은 2축 전기저항식 스트레인게이지를 이용하여 측정하였으며, 출력전압은 자기이방성센서로 측정하였다. 그림 3-27은 스트레인게이지(S/G)와 자기이방성센서(MAS)의 측정위치를 나타내고 있다.

<표 3-3> 시험편의 제원 및 화학구성

SS400 시험편				
Size	(L)1,000㎜×(B)180㎜×(T)28㎜			
강종	SS400(항복강도:245㎫, 인장강도:425㎫, 연신율:23%)			
시험편의 화학구성(%)				
C	Si	Mn	P	S
0.16	0.31	1.33	0.013	0.005
SM490 시험편				
Size	(L)1,000㎜×(B)180㎜×(T)28㎜			
	SM490(항복강도:245㎫, 인장강도:425㎫, 연신율:23%)			
시험편의 화학구성(%)				
C	Si	Mn	P	S
0.17	0.29	1.47	0.016	0.003



<그림 3-26> 하중재하시험 모식도



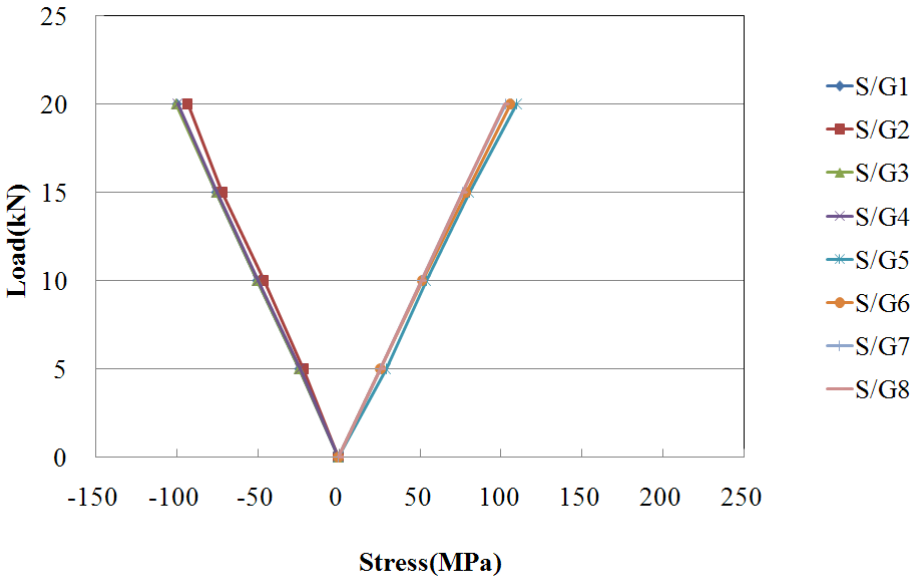
<그림 3-27> 센서 설치 및 측정위치



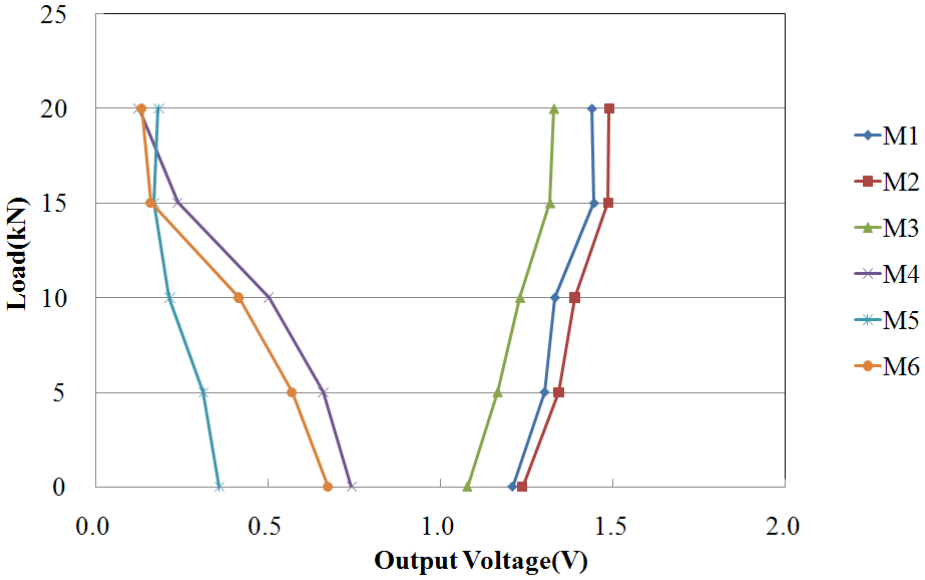
<그림 3-28> 하중재하시험 전경

(2) 실험결과 및 분석

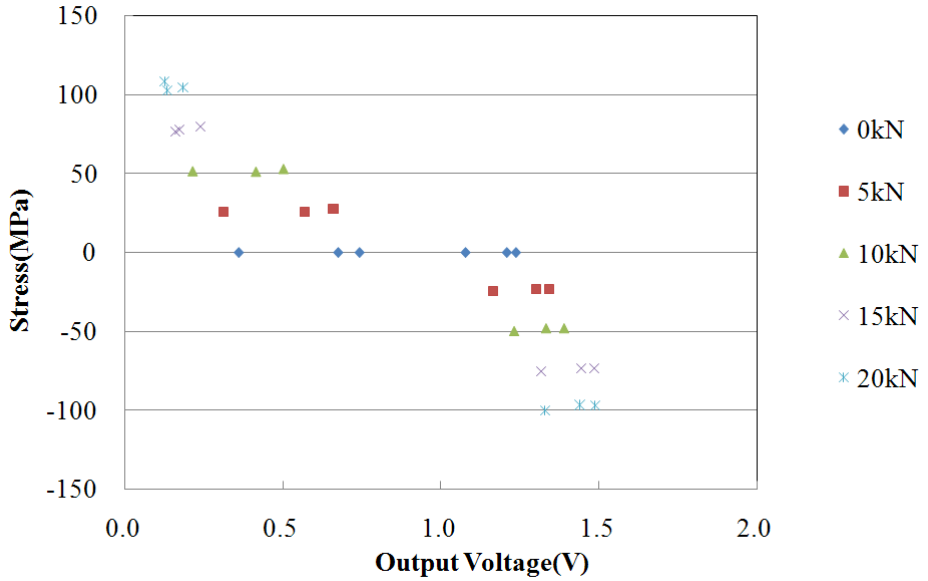
본 실험의 결과, 변형율 게이지로 측정된 응력과 자기이방성센서로 측정된 출력전압의 상관관계를 도출하기 위하여 첫째로, 자기이방성센서 좌우의 변형률 게이지 평균 응력값과 자기이방성센서의 출력전압을 비교하였으며, 두 번째로 하중단계별 출력전압과 응력의 분포를 분석하였다. 세 번째로 출력전압과 응력값을 회귀 분석하여 상관관계를 분석하였으며, 마지막으로 하중단계별 출력전압과 응력의 평균값을 이용하여 회귀분석을 수행하였다. 여기서 S/G1~S/G4는 강판상부 스트레인게이지 측정값을 표시한 것이며, S/G5~S/G8은 강판하부 스트레인게이지 측정값을 표시한 것이다. 그리고 MAS1~MAS3은 강판상부 자기이방성센서 측정값을 표시한 것이며, MAS5~MAS8은 강판하부 자기이방성센서 측정값을 표시한 것이다.



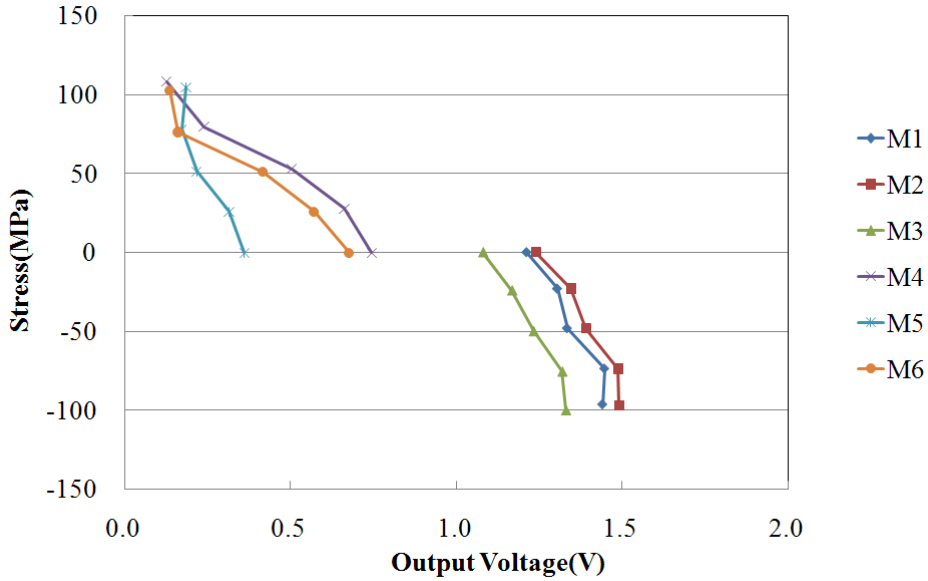
<그림 3-29> 하중단계별 S/G 측정값(SS400, Non-annealing)



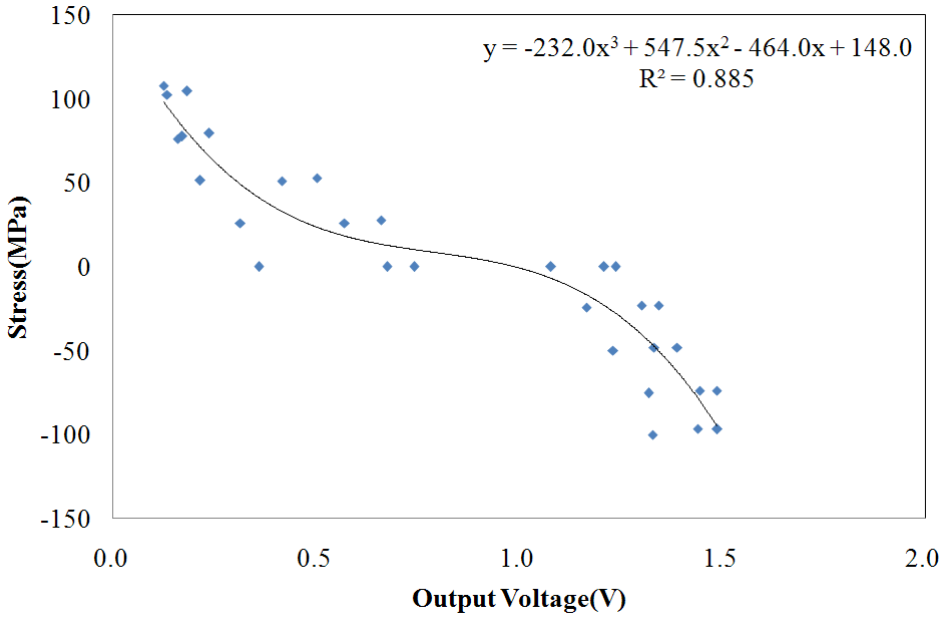
<그림 3-30> 하중단계별 MAS 측정값(SS400, Non-annealing)



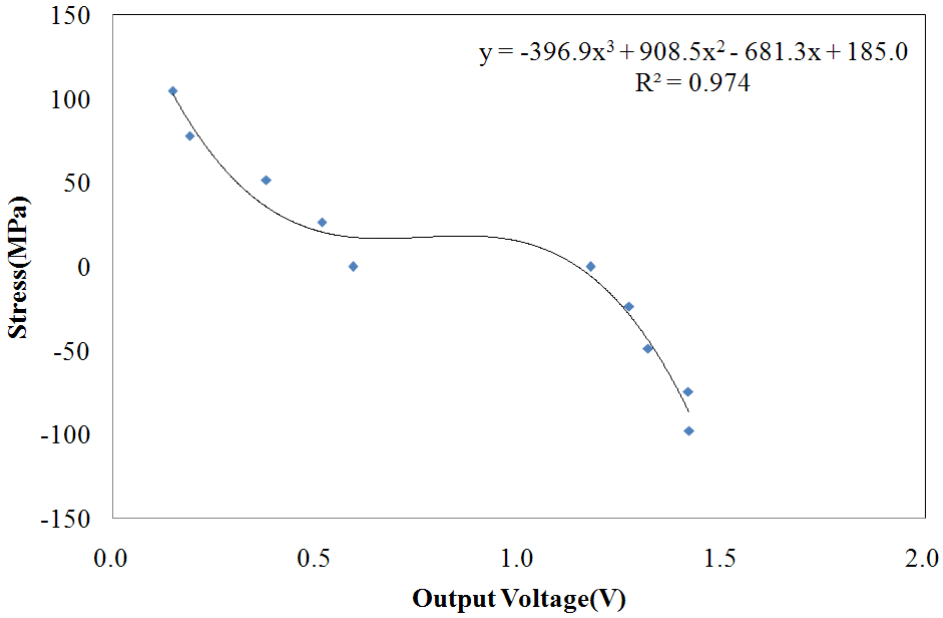
<그림 3-31> 하중단계별 응력-출력전압 분포(SS400, Non-annealing)



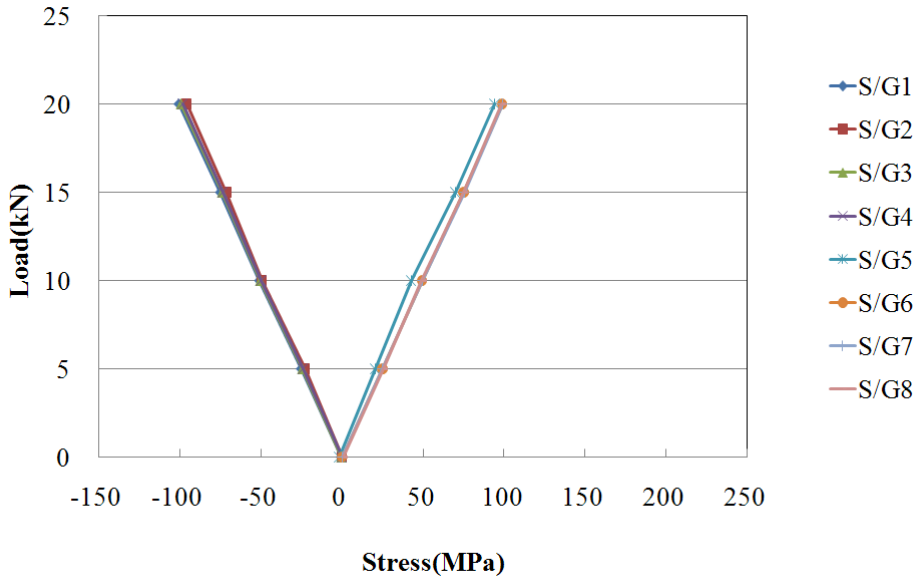
<그림 3-32> 측정위치별 응력-출력전압 분포(SS400, Non-annealing)



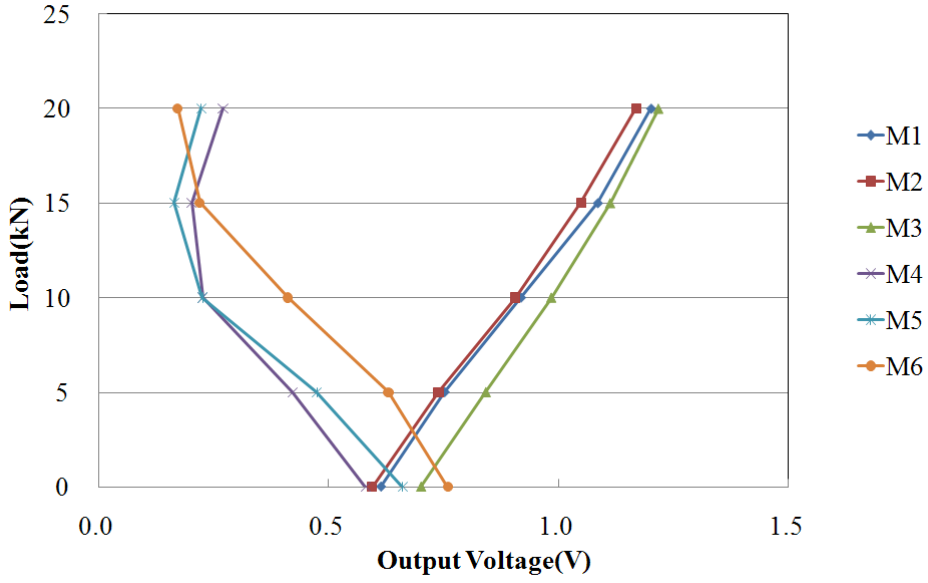
<그림 3-33> 응력-출력전압 회귀분석(SS400, Non-annealing)



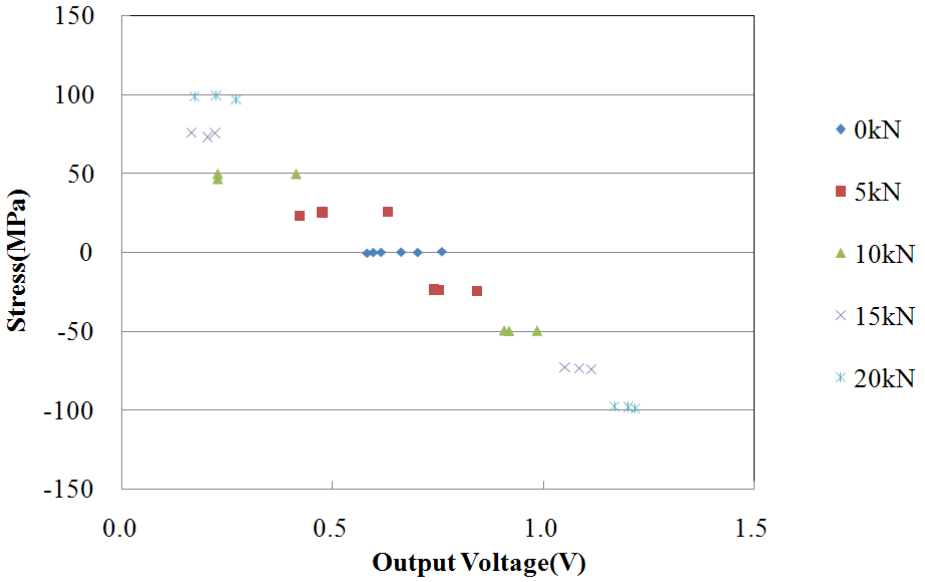
<그림 3-34> 평균 응력-출력전압 회귀분석(SS400, Non-annealing)



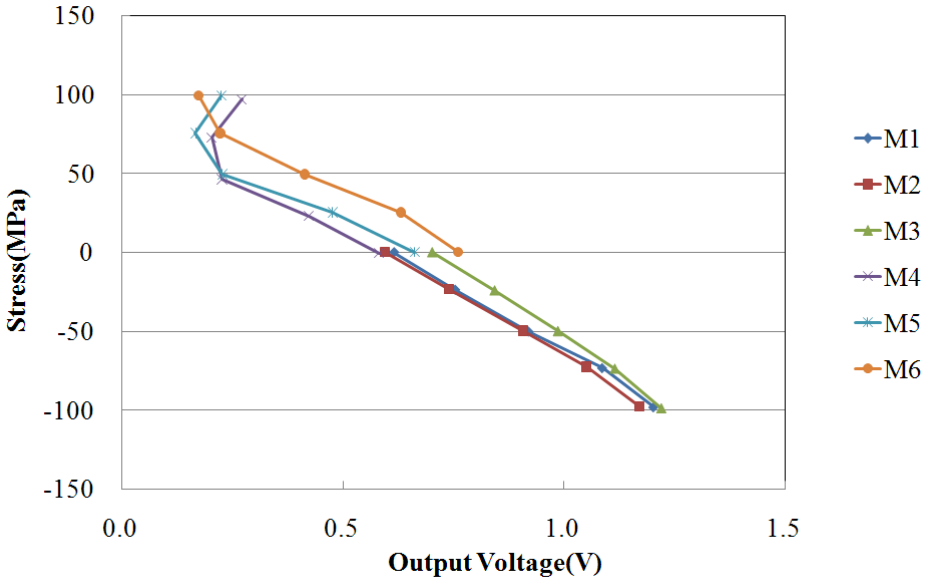
<그림 3-35> 하중단계별 S/G 측정값(SS400, Annealing)



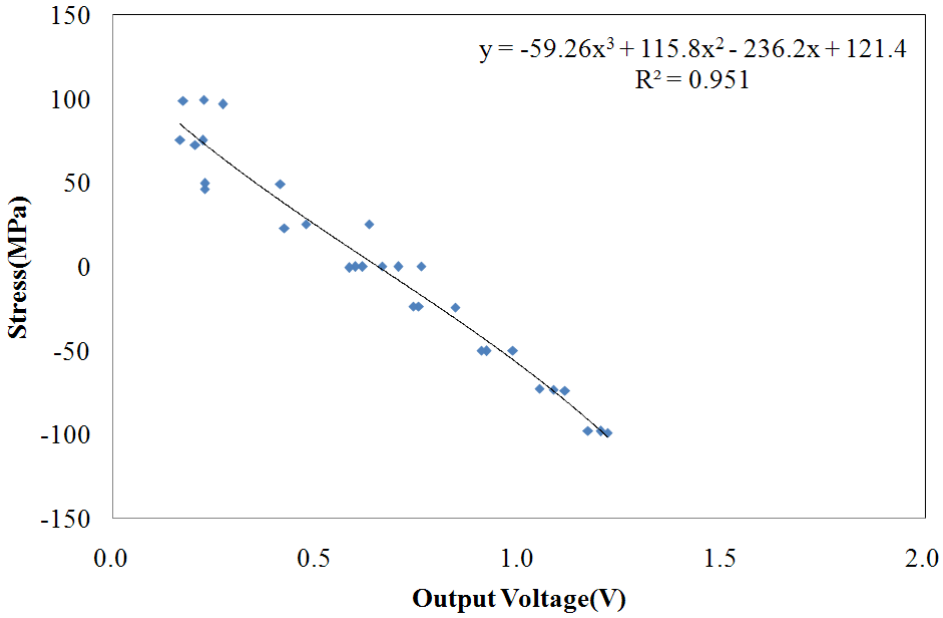
<그림 3-36> 하중단계별 MAS 측정값(SS400, Annealing)



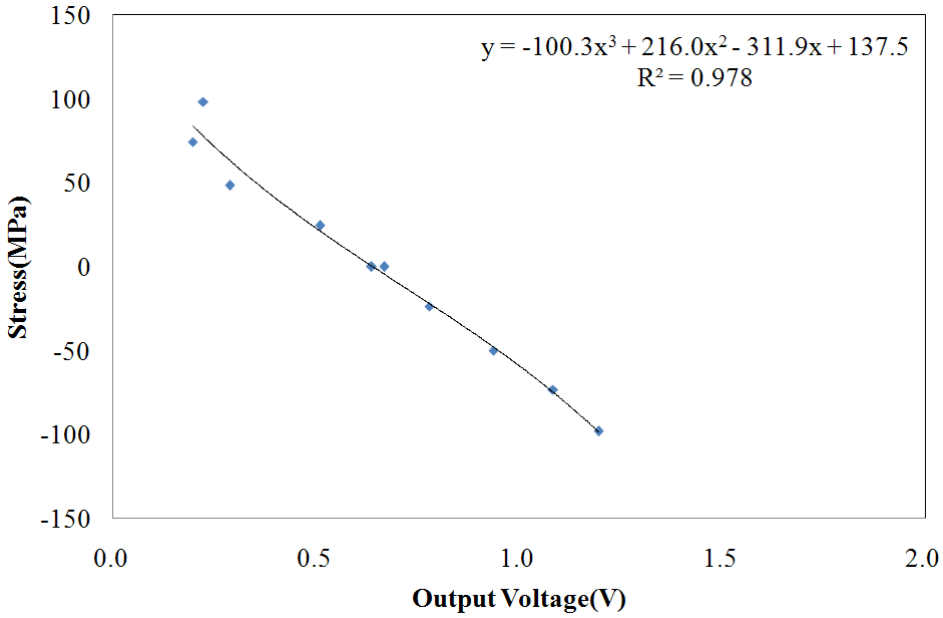
<그림 3-37> 하중단계별 응력-출력전압 분포(SS400, Annealing)



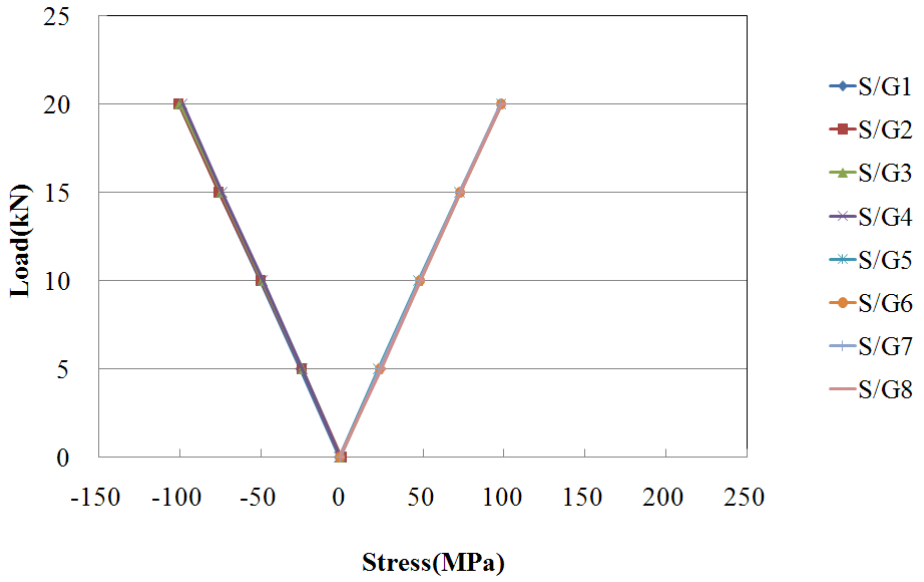
<그림 3-38> 측정위치별 응력-출력전압 분포(SS400, Annealing)



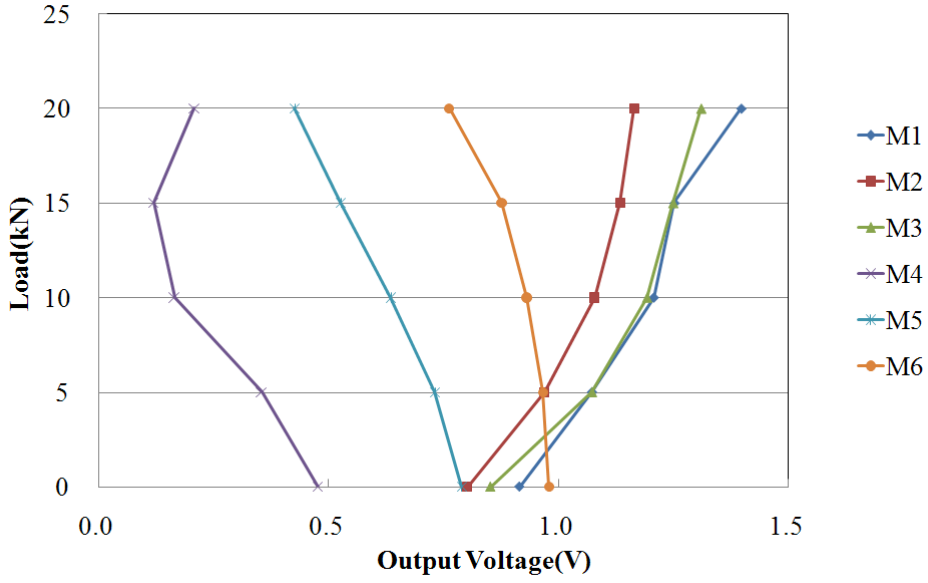
<그림 3-39> 응력-출력전압 회귀분석(SS400, Annealing)



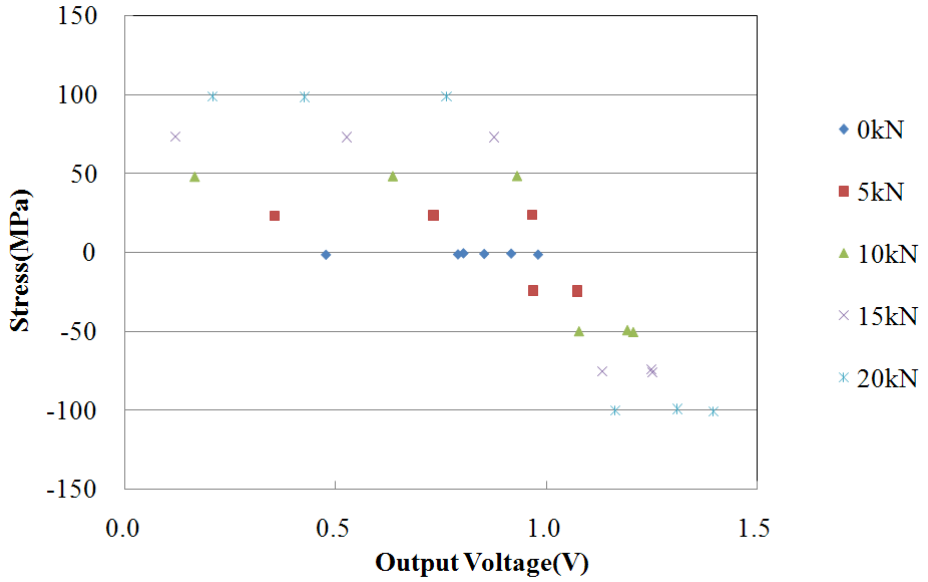
<그림 3-40> 평균 응력-출력전압 회귀분석(SS400, Annealing)



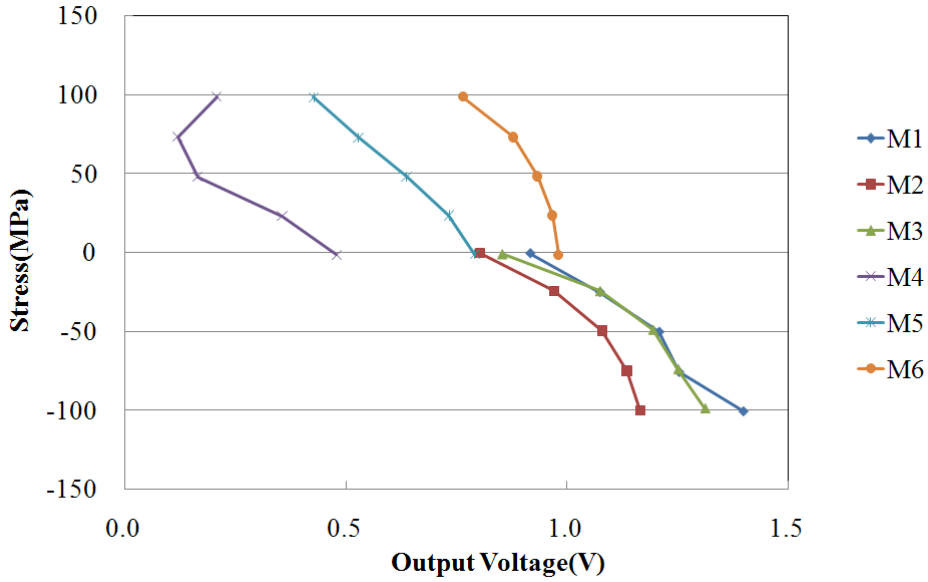
<그림 3-41> 하중단계별 S/G 측정값(SM490, Non-anealing)



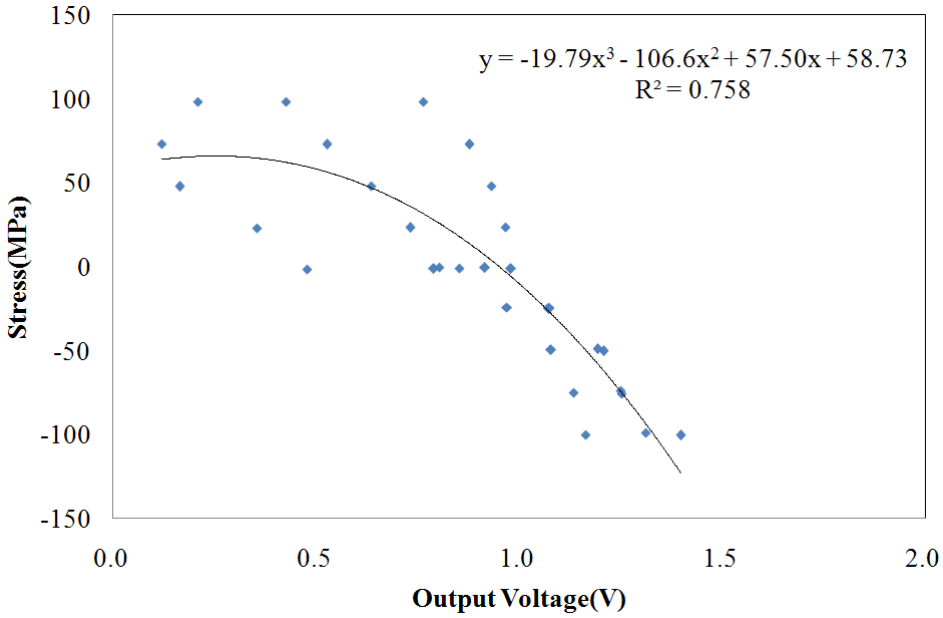
<그림 3-42> 하중단계별 MAS 측정값(SM490, Non-anealing)



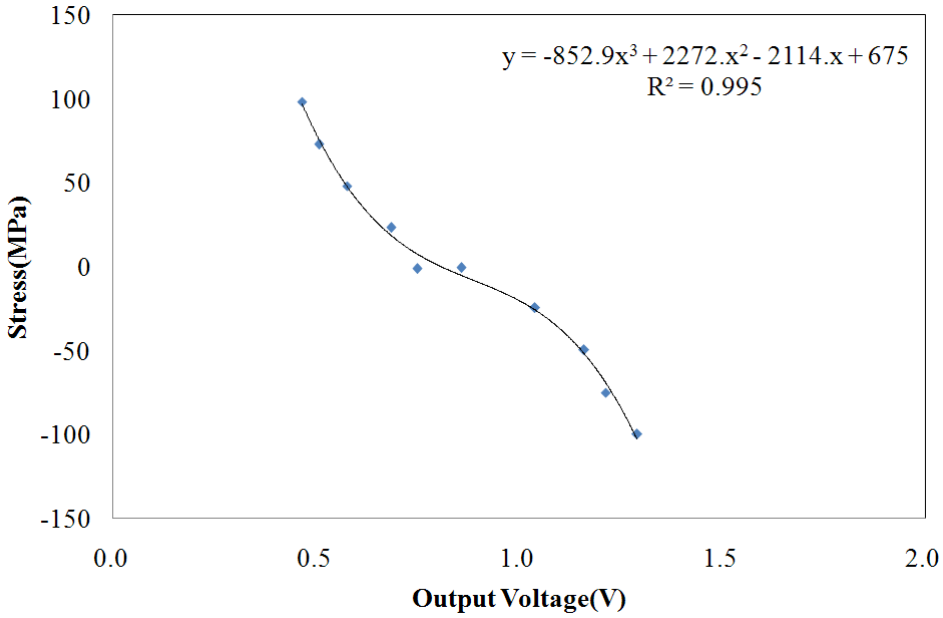
<그림 3-43> 하중단계별 응력-출력전압 분포(SM490, Non-anealing)



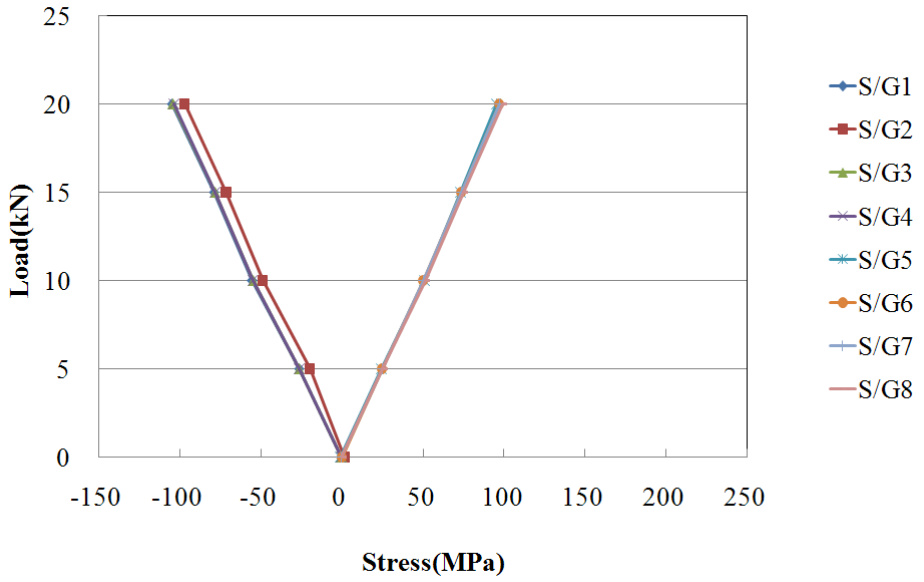
<그림 3-44> 측정위치별 응력-출력전압 분포(SM490, Non-anealing)



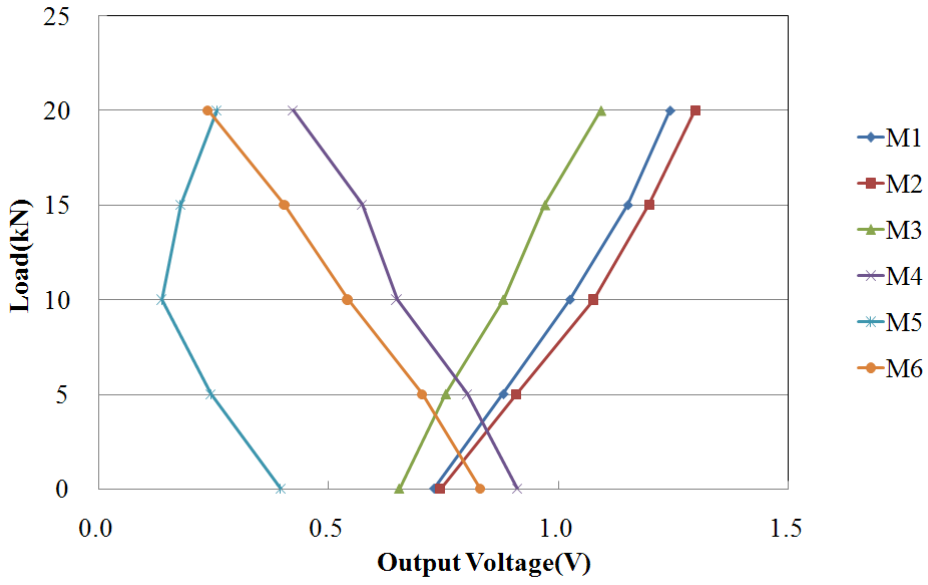
<그림 3-45> 응력-출력전압 회귀분석(SM490, Non-anealing)



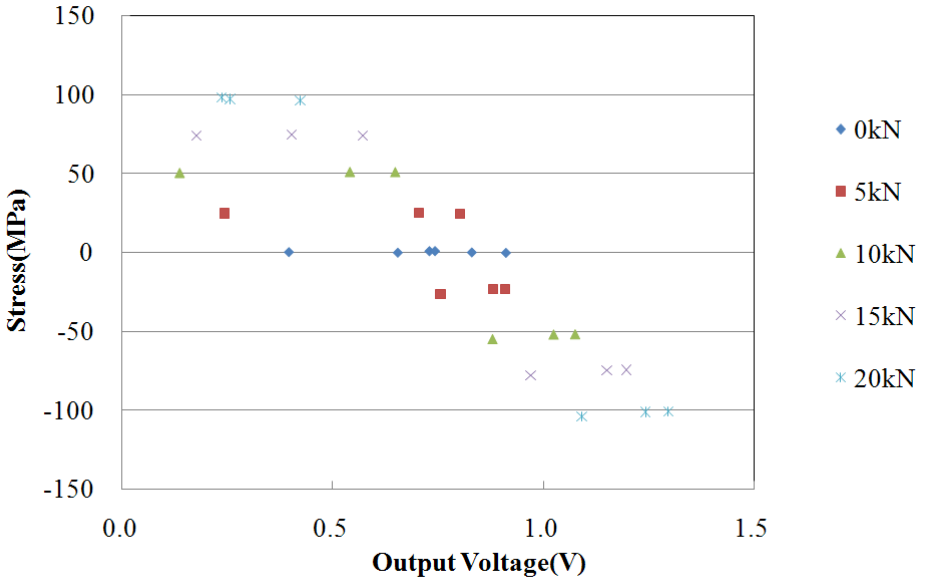
<그림 3-46> 평균 응력-출력전압 회귀분석(SM490, Non-anealing)



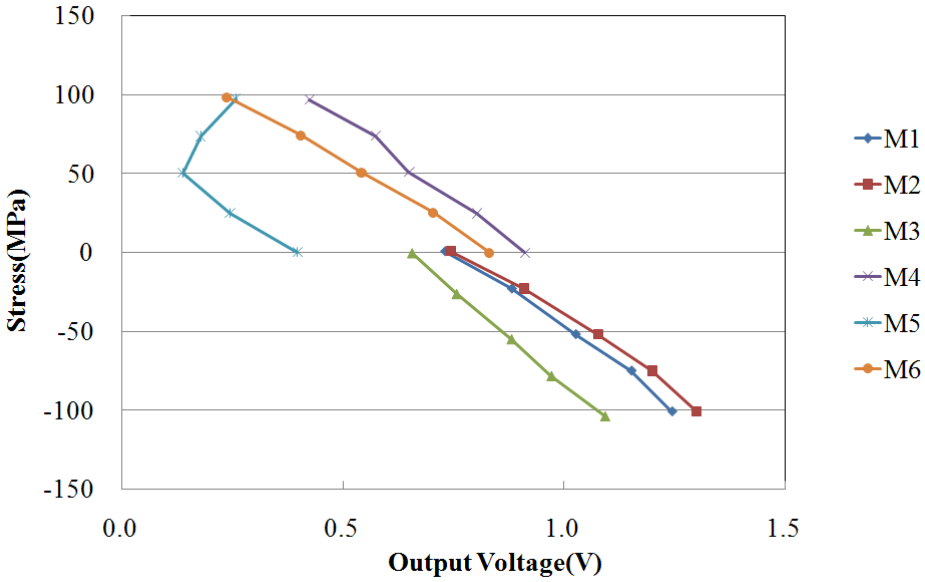
<그림 3-47> 하중단계별 S/G 측정값(SM490, Anealing)



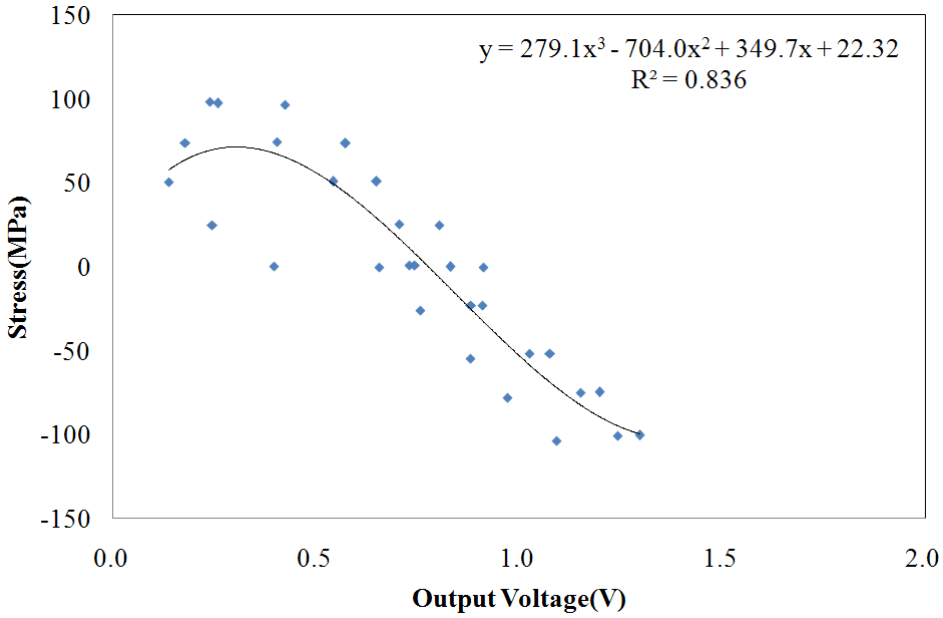
<그림 3-48> 하중단계별 MAS 측정값(SM490, Anealing)



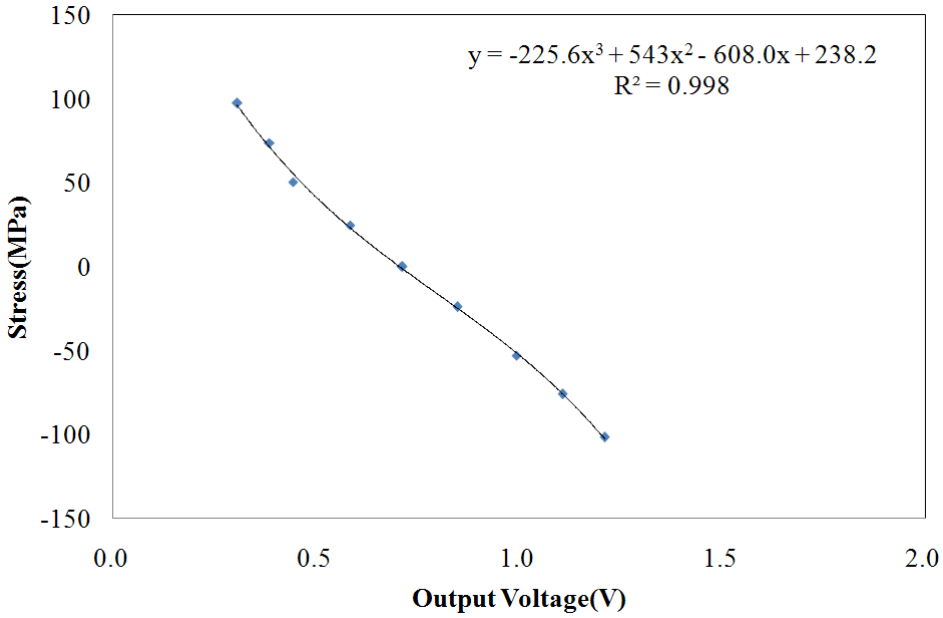
<그림 3-49> 하중단계별 응력-출력전압 분포(SM490, Anealing)



<그림 3-50> 측정위치별 응력-출력전압 분포(SM490, Anealing)



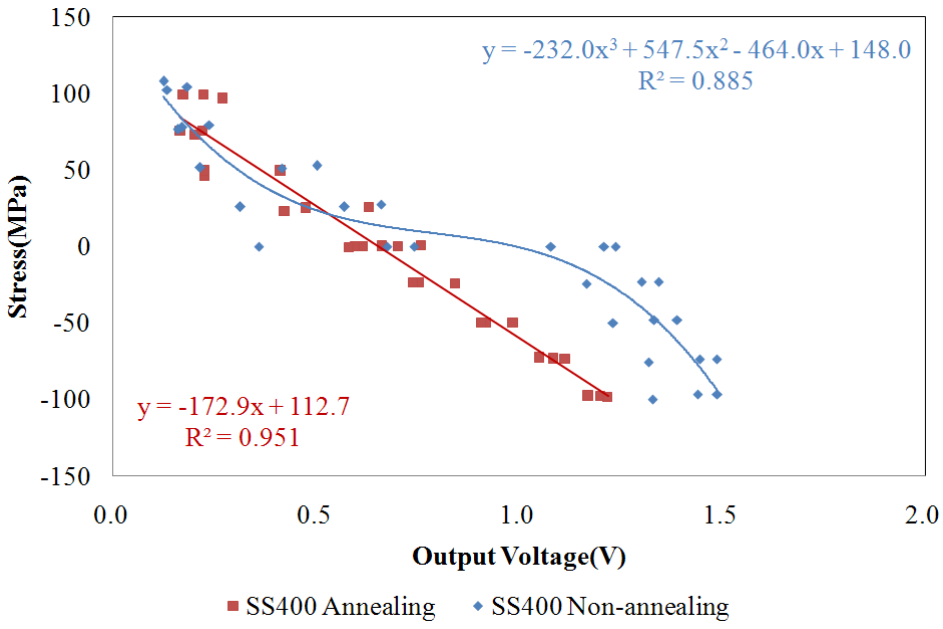
<그림 3-51> 응력-출력전압 회귀분석(SM490, Anealing)



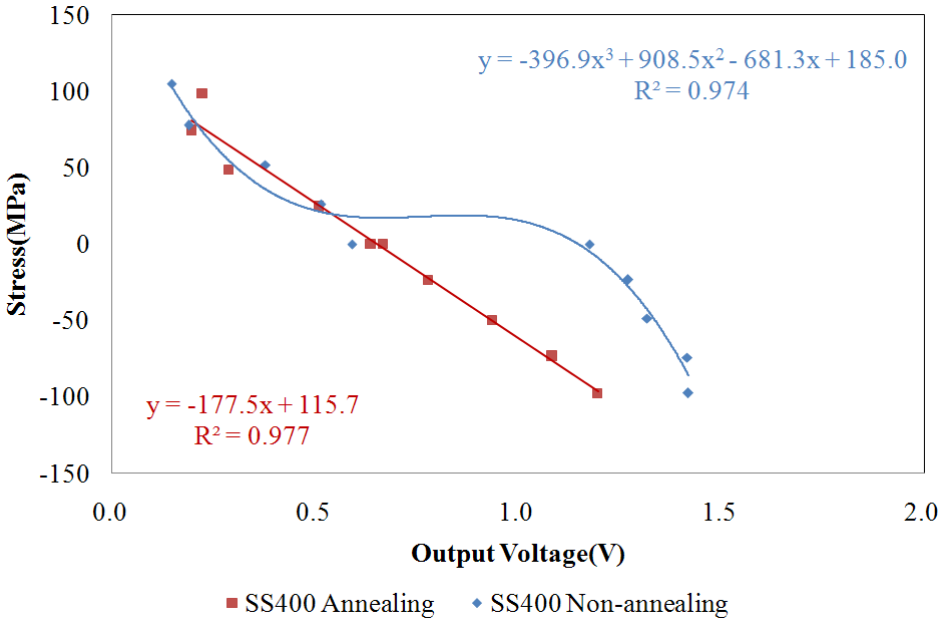
<그림 3-52> 평균 응력-출력전압 회귀분석(SM490, Anealing)

(3) 응력감도곡선 작성

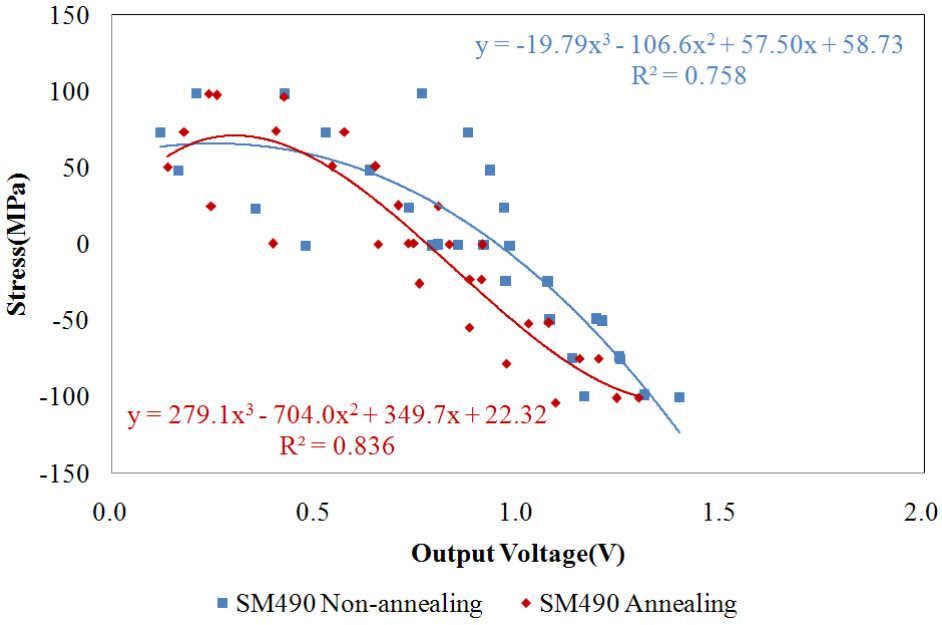
일반구조용 압연강재인 SS400과 용접구조용 압연강재인 SM490에 대한 강재 하중재하실험 결과를 토대로 다양한 패턴의 근사곡선을 작도하였다. 열처리 가공 전과 후의 실험 결과를 비교하여 보면 열처리 가공 전의 시험편에 대한 실험결과는 강종에 관계없이 3차 다항식의 관계를 보이고 있으며, 열처리 가공 후의 시험편에 대한 실험결과는 열처리 가공 전과 비교하여 선형적인 관계를 나타내는 것으로 나타났다. 이것은 열처리 가공으로 인하여 강재 내부에 존재하고 있던 잔류응력이 소산되어 곡선구간이 선형으로 나타나는 것으로 판단된다. 따라서 실험결과를 분석하여 얻은 응력감도곡선은 열처리 가공을 수행한 강재에 대한 실험결과를 응력감도곡선으로 선정하였다.



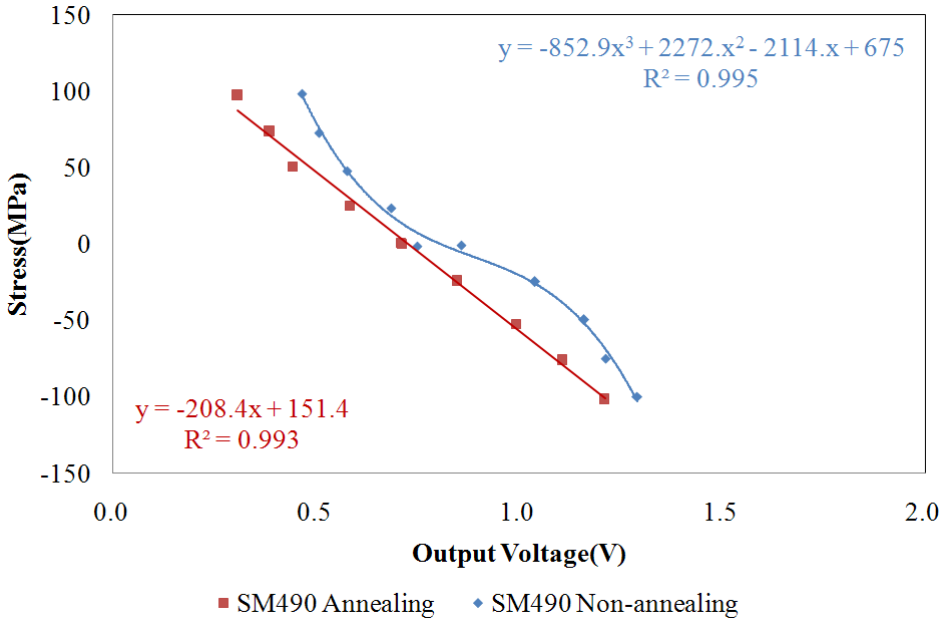
<그림 3-53> 응력-출력전압 관계(SS400, 열처리 전·후 비교)



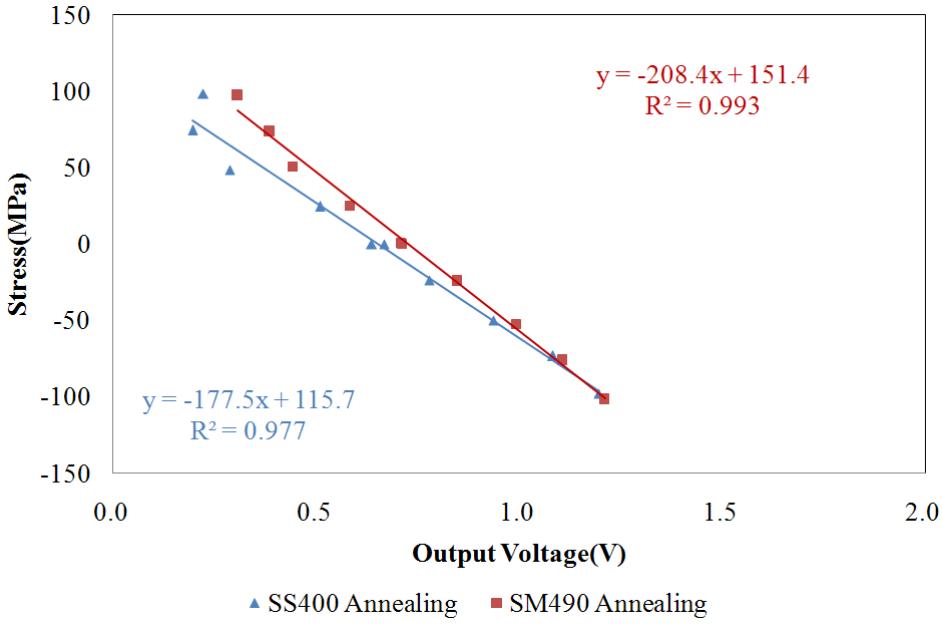
<그림 3-54> 평균응력-출력전압 관계(SS400, 열처리 전·후 비교)



<그림 3-55> 응력-출력전압 관계(SM490, 열처리 전·후 비교)



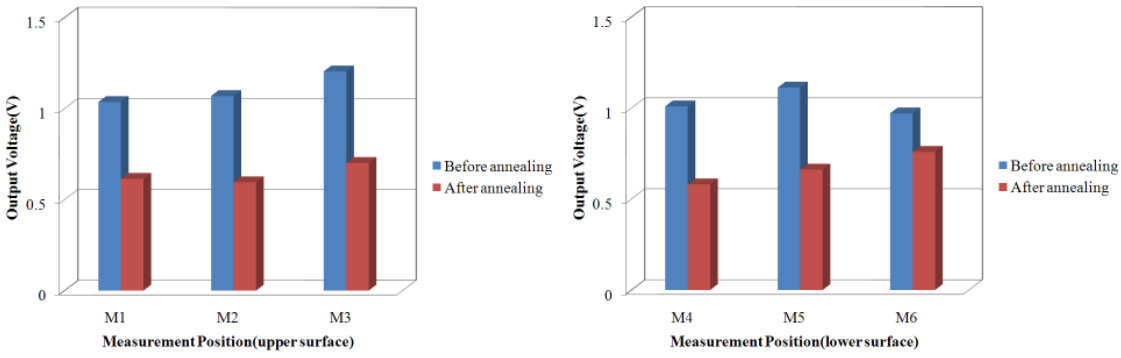
<그림 3-56> 평균응력-출력전압 관계(SM490, 열처리 전·후 비교)



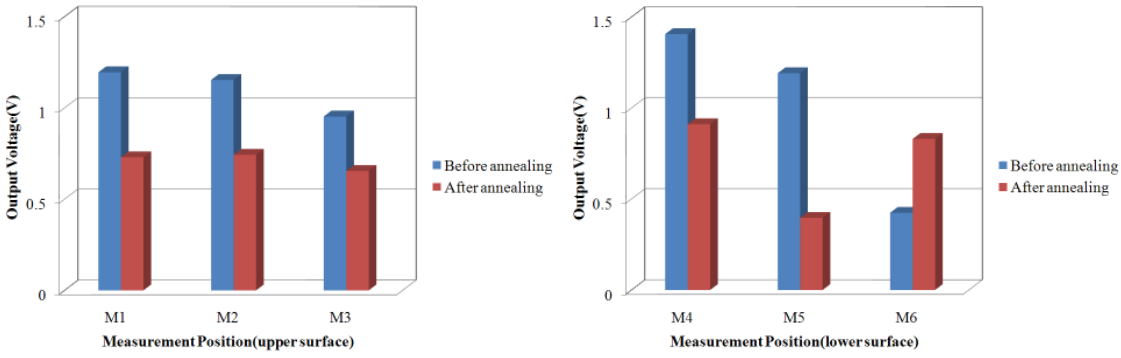
<그림 3-57> 응력감도곡선(SS400, SM490)

5. 자기이방성센서의 잔류응력 측정 확인

자기이방성센서가 잔류응력의 측정이 가능한지 파악하기 위하여 강재 열처리(풀림 가공)를 수행하였다. 비교를 위하여 무하중 상태의 시험편에 자기이방성센서를 이용하여 4방향 계측을 하였으며, 가장 큰 출력전압을 나타내는 방향에 대하여 풀림 가공 전·후의 출력전압을 비교하였다. 그림 3-58과 3-59는 풀림가공 전·후의 측정위치별 출력전압의 차이를 나타내고 있다. 자기이방성센서의 측정프로브에서 측정되는 기본 출력전압이 500~520mV 정도로 나타나고 있으며, 풀림가공을 하지 않은 시험편에서 측정된 출력전압은 300~1400mV 정도의 차이를 나타내고 있는 반면에, 풀림가공을 한 시험편에서 측정된 출력전압은 300~700mV 정도로 나타나고 있다. 이는 풀림가공으로 인하여 시험편의 잔류응력이 일정이상 제거된 영향으로 판단된다.



<그림 3-58> 풀림가공을 통한 자기이방성센서의 출력전압 변화(SS400 강판)



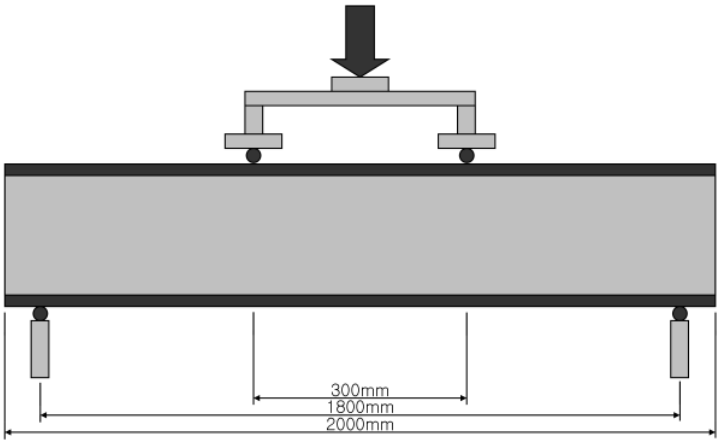
<그림 3-59> 풀림가공을 통한 자기이방성센서의 출력전압 변화(SM490 강판)

6. 자기이방성센서를 이용한 H-형강 응력측정

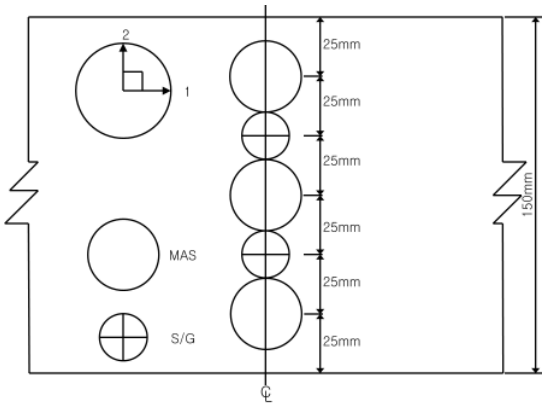
(1) 실험개요

강판의 휨 실험으로부터 도출된 일반구조용 압연강재인 SS400 강재에 대한 응력감도곡선을 구하였다. 선정된 응력감도곡선 및 센서의 적용성을 평가하기 위하여 H-형강에 대한 강재하중재하실험을 수행하였다.

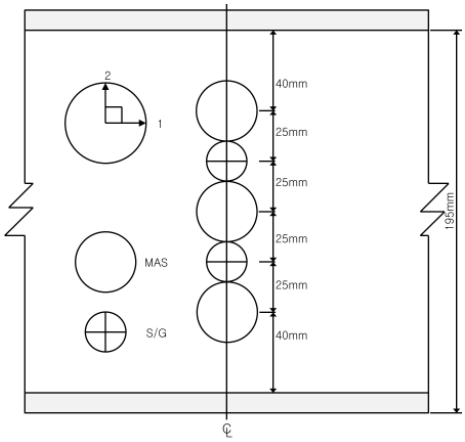
실험에는 사용된 강재는 구조용 압연 강재인 SS400 H-형강을 사용하였으며, H-형강 시험편(194×150×6×9, L=2m)의 중심점에서 좌우로 150mm 떨어진 지점에 하중을 이점 재하를 하였다. 하중단계는 각각 0kN, 10kN, 20kN, 30kN, 40kN, 50kN의 순서로 하중을 재하하여 실험하였다. 자기이방성센서와 변형률 게이지의 측정위치는 그림 3-61과 3-62에 보는 바와 같으며, 그림 3-60은 H-형강 하중재하시험 모식도를 나타내고 있다. 자기이방성센서에서 측정된 출력전압에 응력감도곡선을 접목하여 응력을 산정하여 변형률 게이지에서 측정된 응력값과 비교하였다.



<그림 3-60> H-형강 하중재하시험 모식도



<그림 3-61> 상하부 플랜지 센서 측정위치



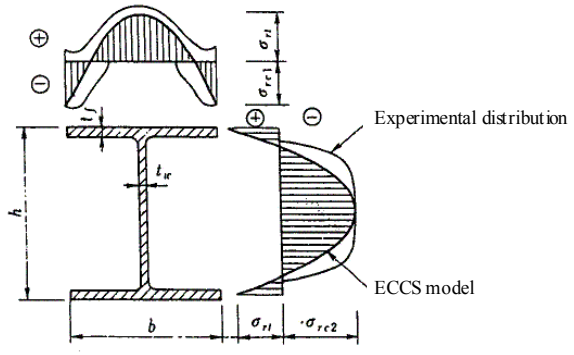
<그림 3-62> 좌우 웹 센서 측정위치



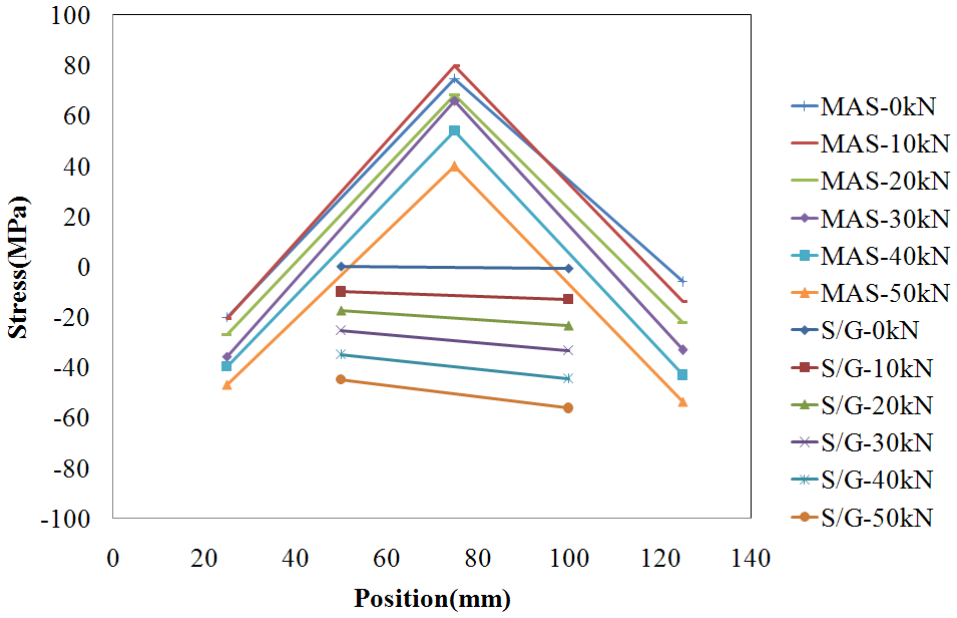
<그림 3-63> H-형강 하중재하시험 전경

(2) 실험결과 및 분석

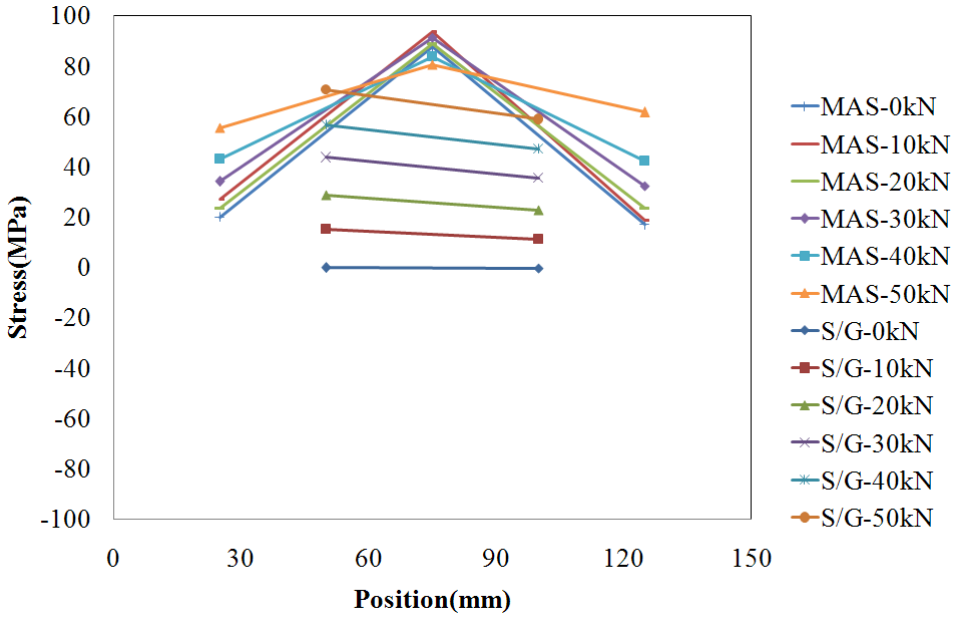
실험 결과, 초기 무하중 상태에서 상부 플랜지 중앙부와 좌우측의 응력차이는 약 80~100MPa 정도로 나타나고 있으며, 하부 플랜지 역시 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 좌측과 우측 웹부분 역시 -80~-100MPa 정도로 나타나고 있다. 이는 그림 3-64에서 보는 바와 같이 H-형강의 이론적인 잔류응력 분포와 동일한 것으로 판단된다. 따라서 자기이방성센서를 이용하여 H-형강의 응력을 측정하기 위해서는 초기 측정된 잔류응력을 소거한 측정값을 사용하여야 기존 계측센서와 유사한 값을 얻을 수 있을 것으로 판단되며, 중앙지점을 제외한 좌우측에서 측정된 자기이방성센서의 응력값은 스트레인 게이지의 응력값과 약 20MPa 정도의 범위내에 있는 것을 알 수 있다. 여기서, S/G-L은 자기이방성센서 측정위치의 중앙을 기준으로 왼쪽 편에 부착된 스트레인 게이지이며, S/G-R은 자기이방성센서 측정위치의 중앙을 기준으로 오른쪽 편에 부착된 스트레인 게이지이다. 또한 M-C은 자기이방성센서 중앙점 측정위치를 나타내며, M-L은 좌측, M-R은 우측을 나타내고 있다.



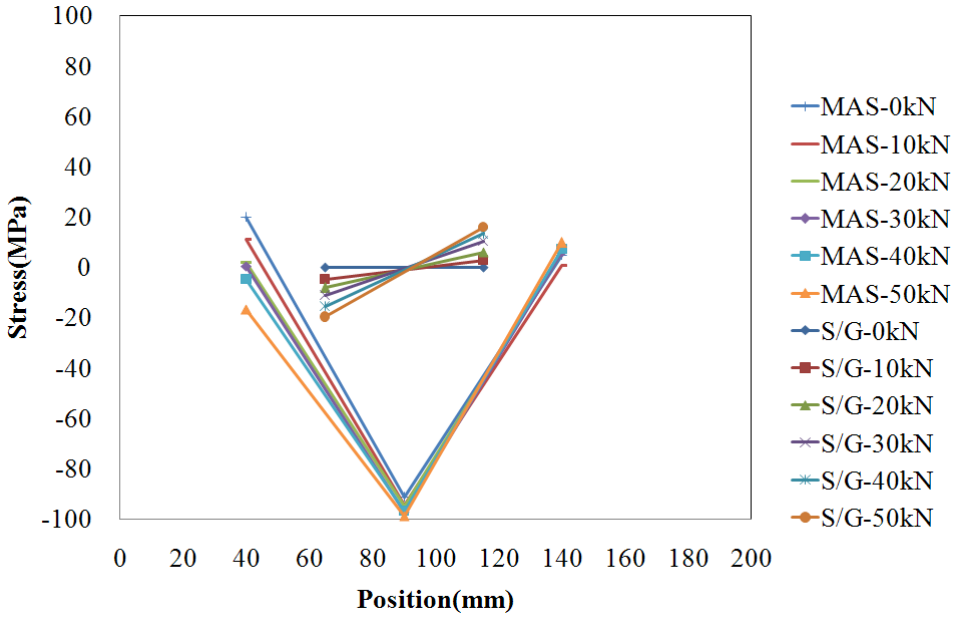
<그림 3-64> H-형강의 이론적인 잔류응력분포



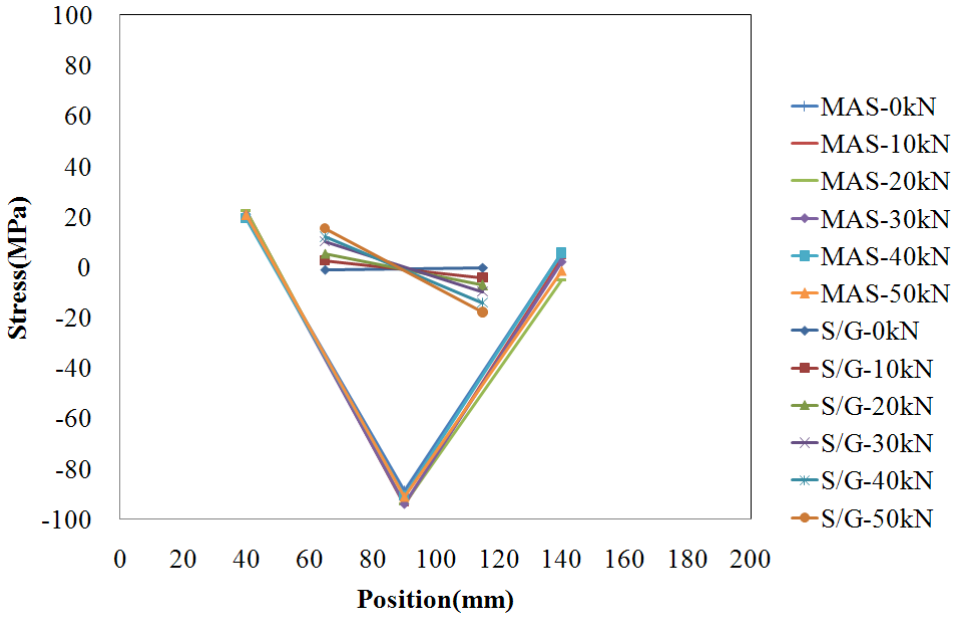
<그림 3-65> 하중단계별 측정위치별 응력분포(상부 플랜지)



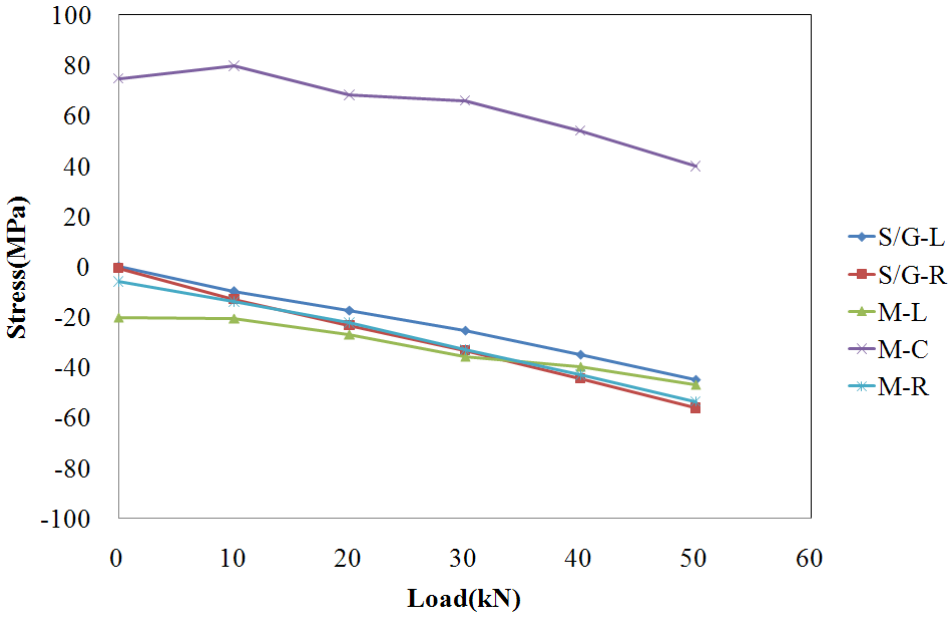
<그림 3-66> 하중단계별 측정위치별 응력분포(하부 플랜지)



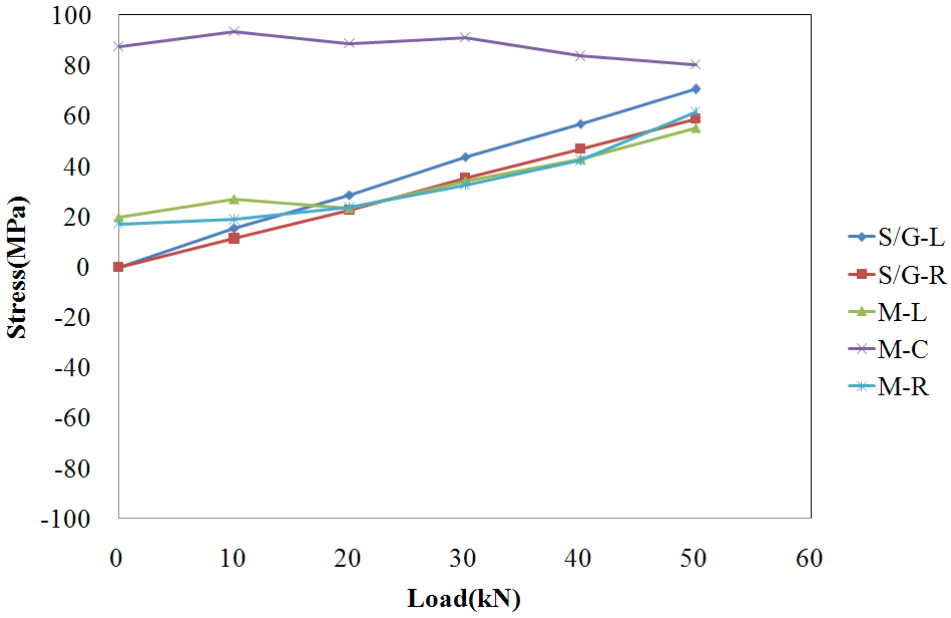
<그림 3-67> 하중단계별 측정위치별 응력분포(좌측 웹)



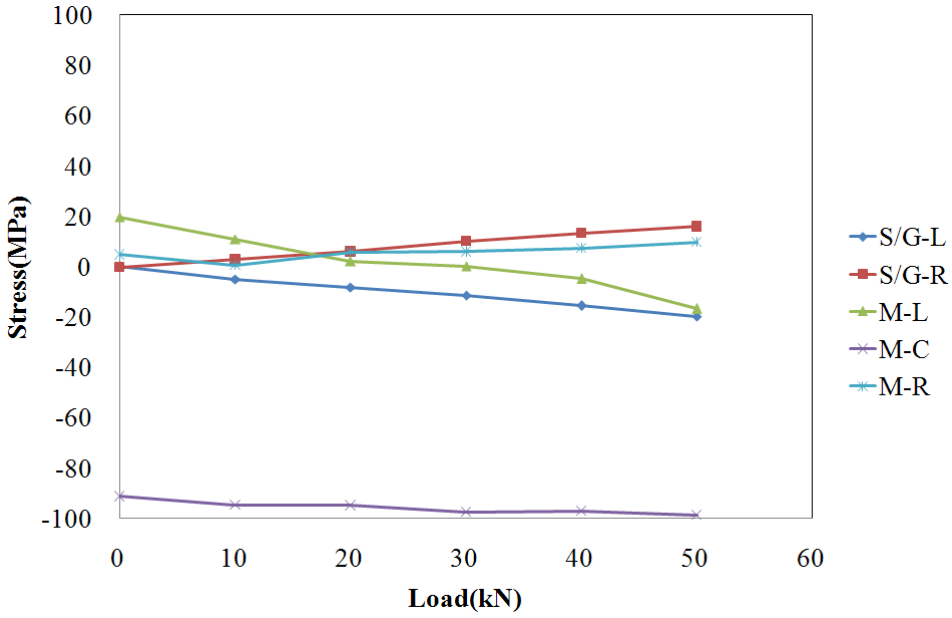
<그림 3-68> 하중단계별 측정위치별 응력분포(우측 웹)



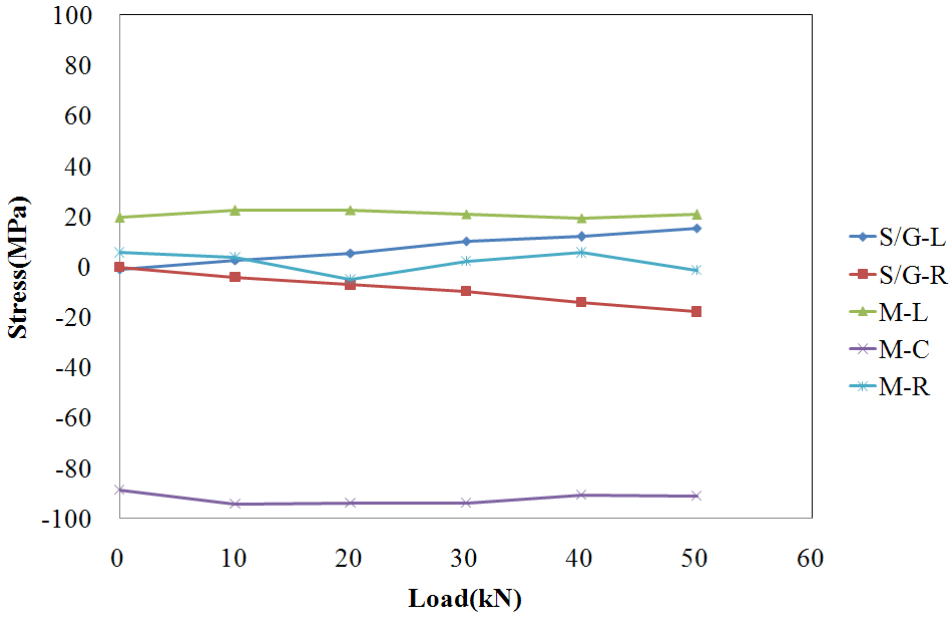
<그림 3-69> 하중단계별 응력분포(상부 플랜지)



<그림 3-70> 하중단계별 응력분포(하부 플랜지)



<그림 3-71> 하중단계별 응력분포(좌측 웹)

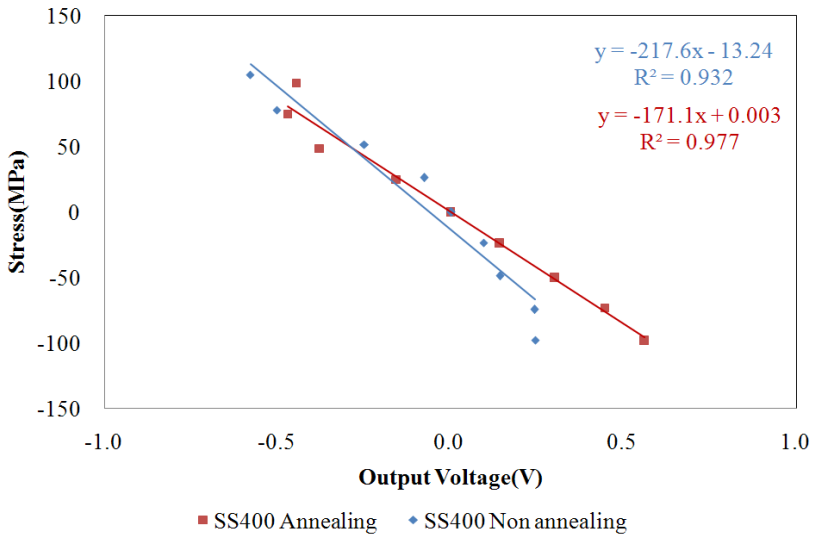


<그림 3-72> 하중단계별 응력분포(우측 웹)

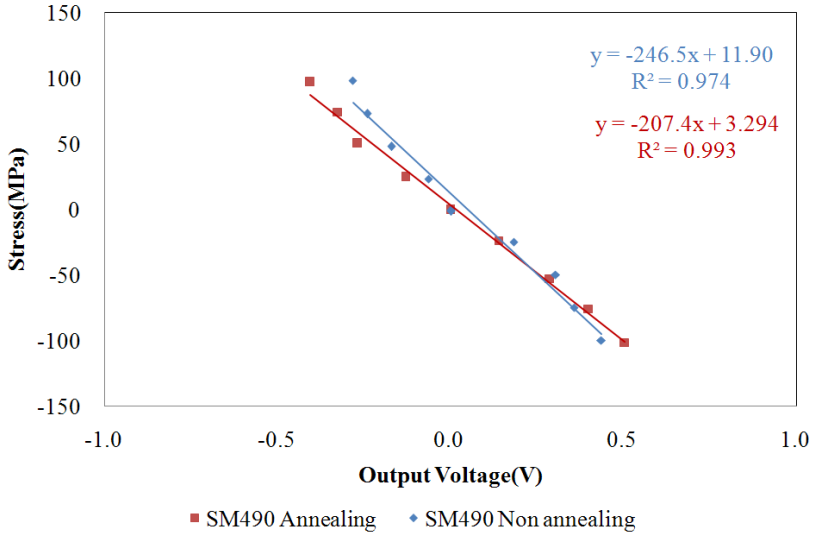
7. 응력과 출력전압의 변화량 분석

(1) 하중단계에 따른 강판의 응력과 출력전압의 변화량 분석

강판의 휨 실험 결과를 토대로 분석기법을 달리하여 하중단계에 따른 스트레인 게이지의 응력 변화량과 자기이방성센서의 출력전압의 변화량을 비교·분석하였다. 잔류응력을 고려하지 않았을 때, 즉 하중이 가해지지 않은 부재에서 측정된 자기이방성센서의 출력전압을 초기값으로 두고 하중단계에 따라 변화하는 출력전압의 변화량과 스트레인 게이지의 응력 변화를 비교·분석하였다.



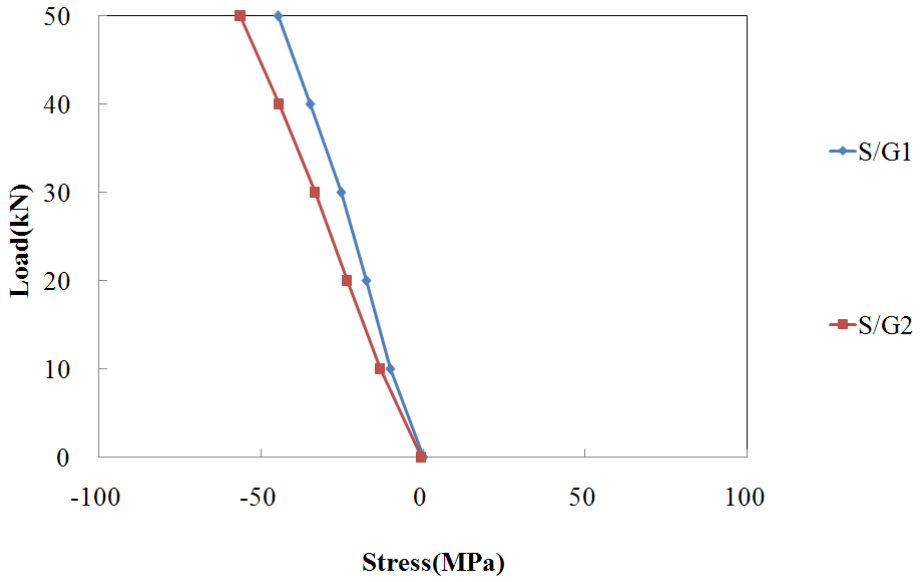
<그림 3-73> 스트레인 게이지의 응력과 출력전압의 변화량 관계(SS400)



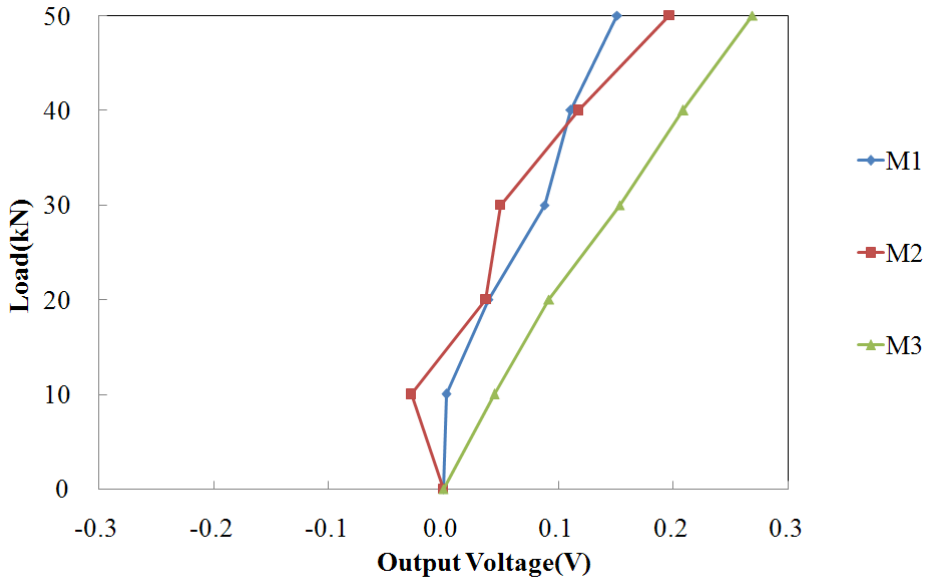
<그림 3-74> 스트레인 게이지의 응력과 출력전압의 변화량 관계(SM490)

(2) 하중단계에 따른 H-형강의 응력과 출력전압의 변화량 분석

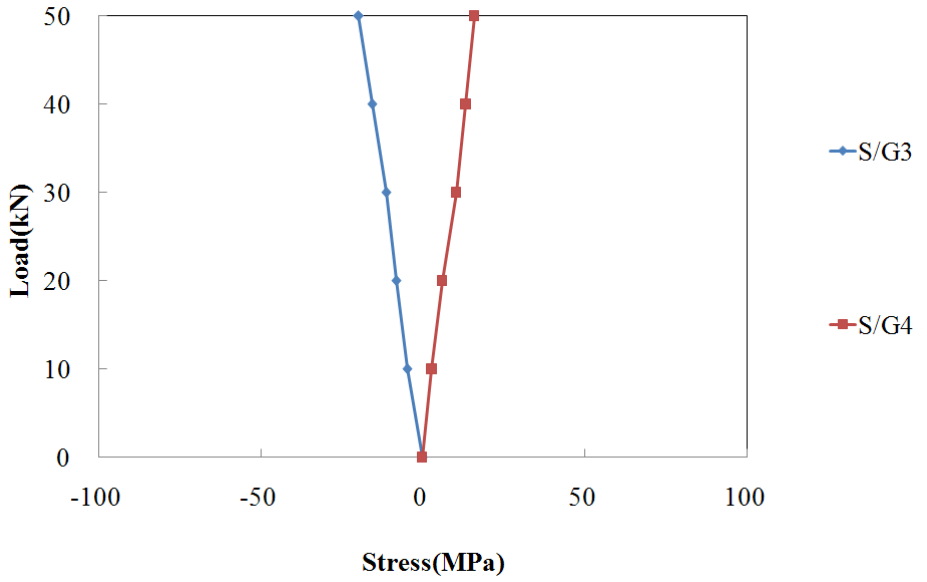
H-형강의 휨 실험에서 측정된 자기이방성센서의 출력전압과 스트레인 게이지로 측정된 응력값을 비교·분석하였다. 잔류응력을 고려하지 않았을 때, 즉 하중이 가해지지 않은 부재에서 측정된 자기이방성센서의 출력전압을 초기값으로 두고 하중단계에 따라 변화하는 출력전압의 변화에 따른 응력의 변화량과 스트레인 게이지의 응력 변화량를 비교함으로써 센서의 적용성을 평가하였다. 그림 3-75와 그림 3-76은 상부플랜지에서 측정된 결과를 나타내고 있으며, 그림 3-77과 그림 3-78은 좌측 웹부분, 그림 3-79와 그림 3-80은 하부플랜지, 그림 3-81과 그림 3-82는 우측 웹부분의 센서 측정결과를 보여주고 있다.



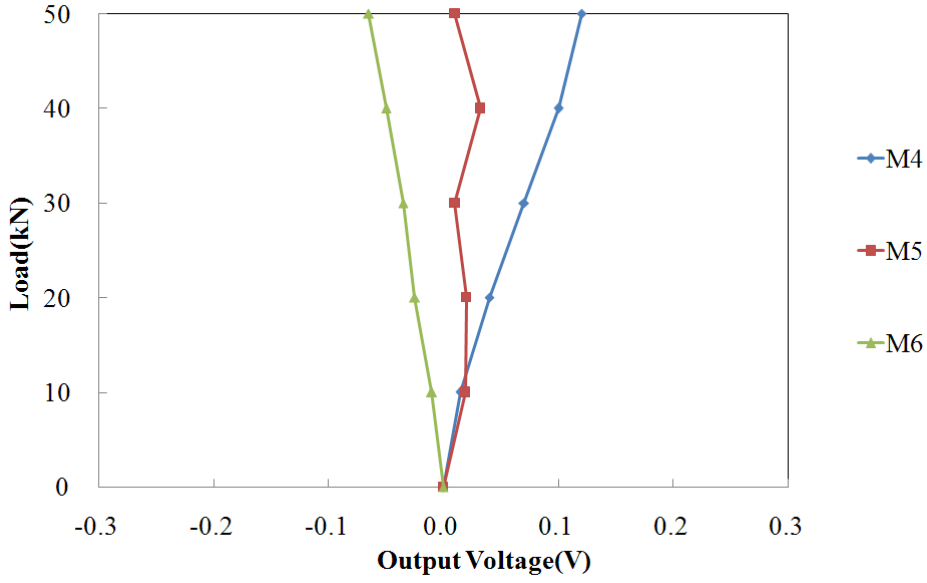
<그림 3-75> 스트레인 게이지로 측정된 응력(상부 플랜지)



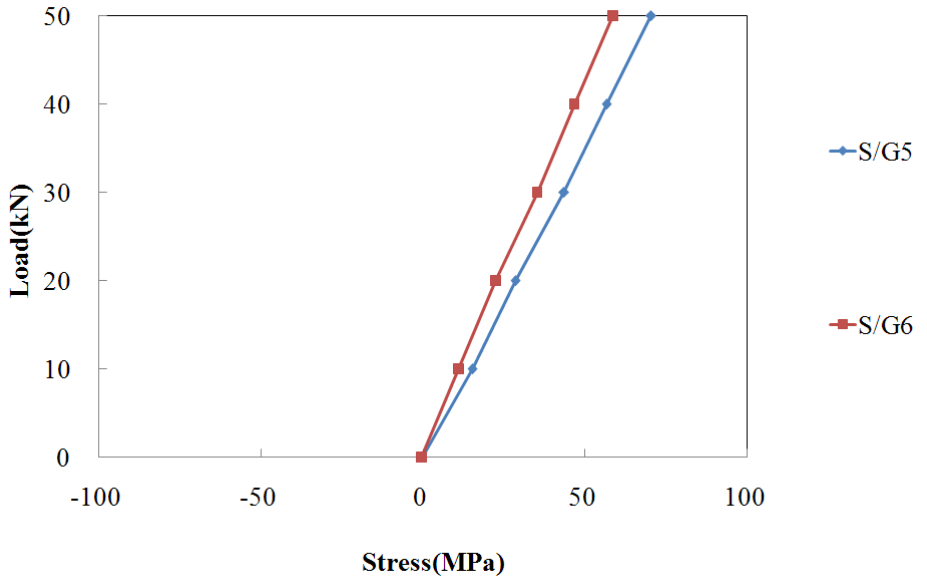
<그림 3-76> 자기이방성센서로 측정된 출력전압(상부 플랜지)



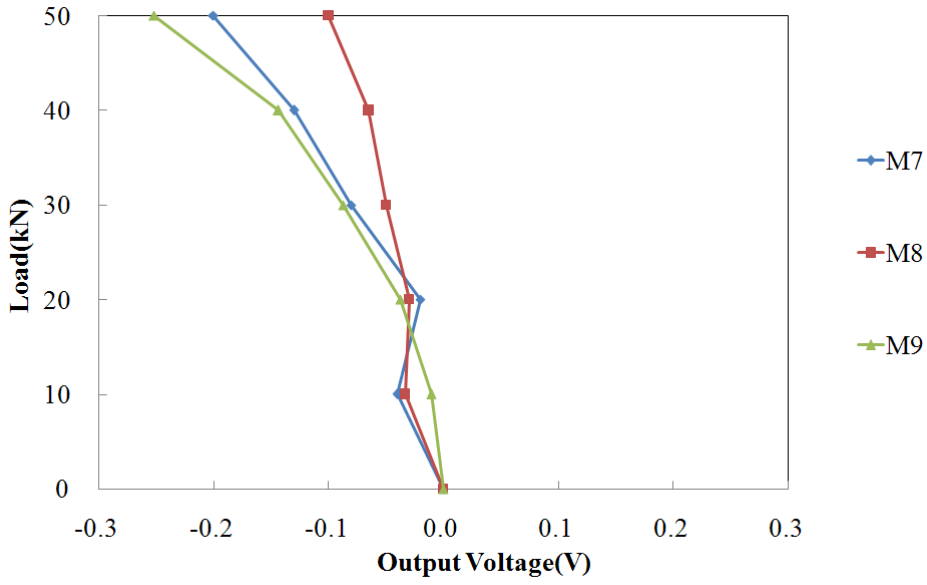
<그림 3-77> 스트레인 게이지로 측정된 응력(좌측 웹)



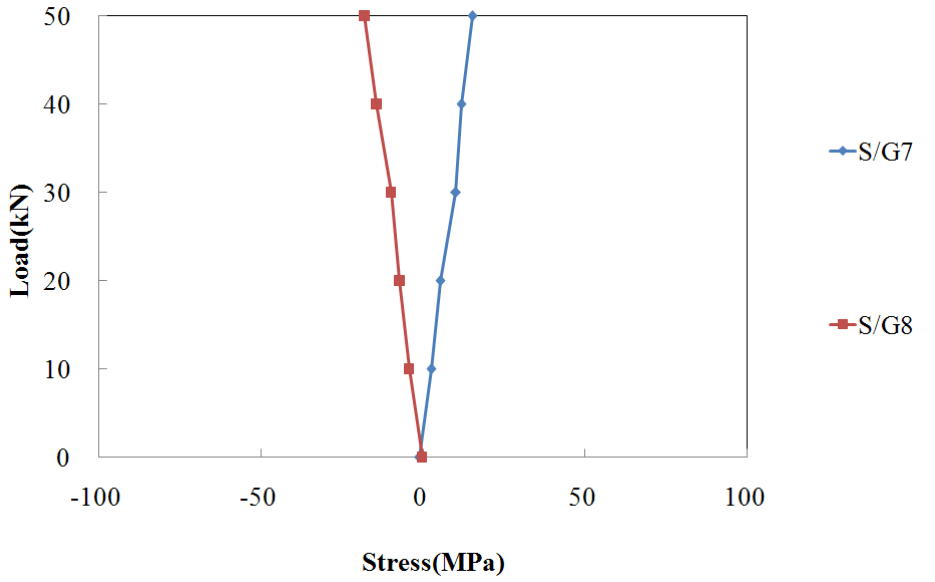
<그림 3-78> 자기이방성센서로 측정된 출력전압(좌측 웹)



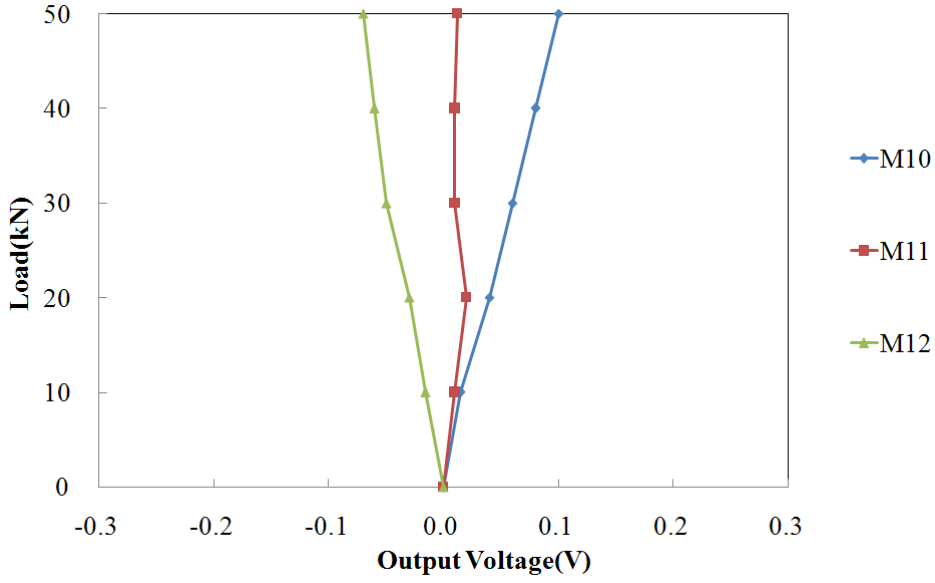
<그림 3-79> 스트레인 게이지로 측정된 응력(하부 플랜지)



<그림 3-80> 자기이방성센서로 측정된 출력전압(하부 플랜지)



<그림 3-81> 스트레인 게이지로 측정된 응력(우측 웹)

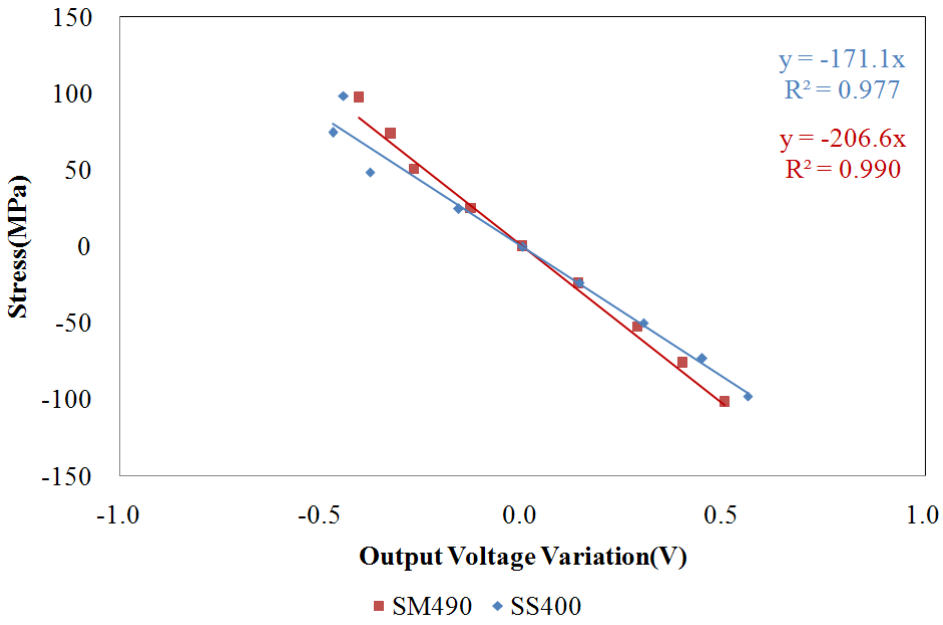


<그림 3-82> 자기이방성센서로 측정된 출력전압(우측 웹)

(3) 결과비교・분석

강판의 휨 실험 결과를 토대로 분석기법을 달리하여 하중단계에 따른 스트레인 게이지의 응력 변화량과 자기이방성센서의 출력전압의 변화량을 비교・분석한 결과, 무하중시 자기이방성센서에서 측정된 출력전압을 초기값으로 두고 하중단계에 따른 출력전압의 변화량과 스트레인 게이지로 측정된 응력 변화량은 선형적인 관계를 가지고 있는 것으로 나타났으며, 잔류응력 제거를 위해 열처리를 한 경우가 그렇지 않은 경우보다 더 높은 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 3-83은 그림 3-73과 그림 3-74의 결과를 토대로 최종 선정된 자기이방성센서의 출력전압과 응력과의 상관관계를 나타내고 있으며, 여기서 도출된 회귀식을 이용하여 H-형강의 휨 실험에서 측정된 자기이방성센서의 출력전압을 그림 3-83의 1차 회귀식(SS400)에 적용하여 구한 응력값과 스트레인 게이지로 측정된 응력값을 비교・분석하였다.

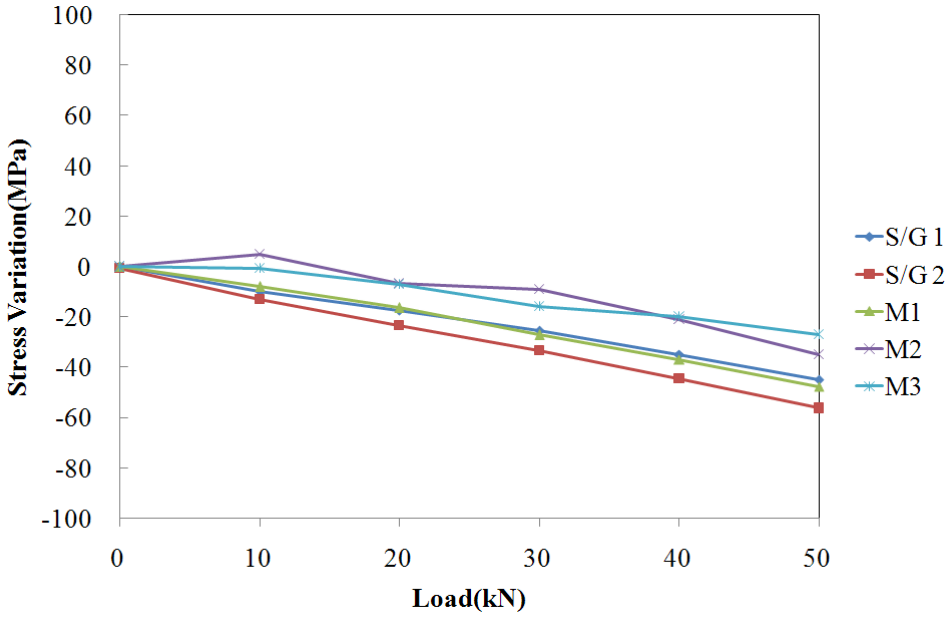


<그림 3-83> 출력전압의 변화량과 응력과의 상관관계

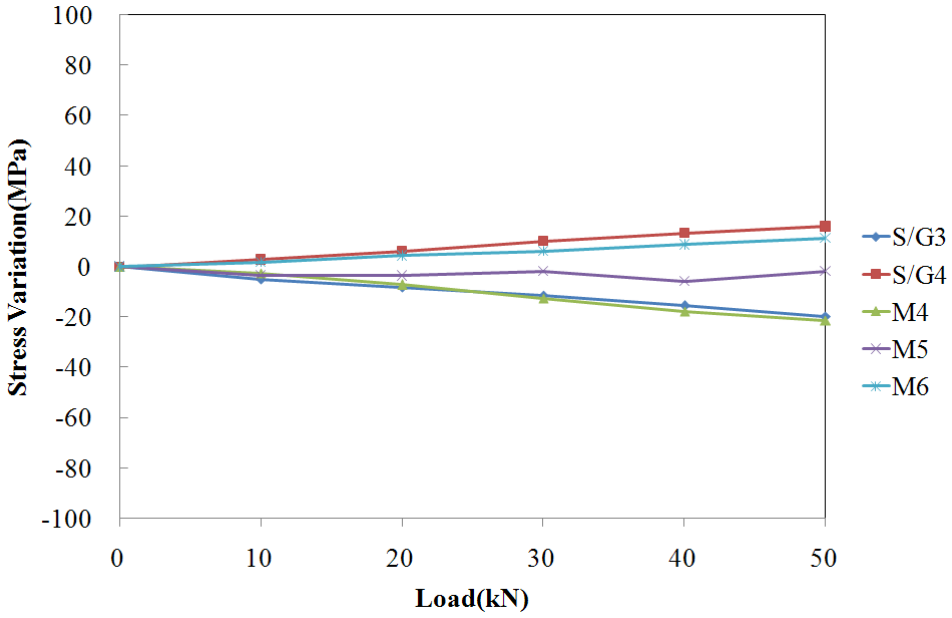
H-형강의 휨 실험에서 잔류응력을 고려하지 않았을 때, 즉 하중이 가해지지 않은 부재에서 측정된 자기이방성센서의 출력전압을 초기값으로 두고 하중단계에 따라 변화하는 출력전압의 변화에 따른 응력의 변화량과 스트레인 게이지의 응력 변화량를 비교・분석한 결과, 하중단계에 따른 스트레인 게이지의 응력 변화량과 자기이방성센서로 측정된 응력 변화량을 유사한 경향을 나타내고 있으며, 최대 20MPa 정도의 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 3-84부터 그림 3-87은 각각 상부플랜지, 좌측 웹부분, 하부플랜지, 우측 웹

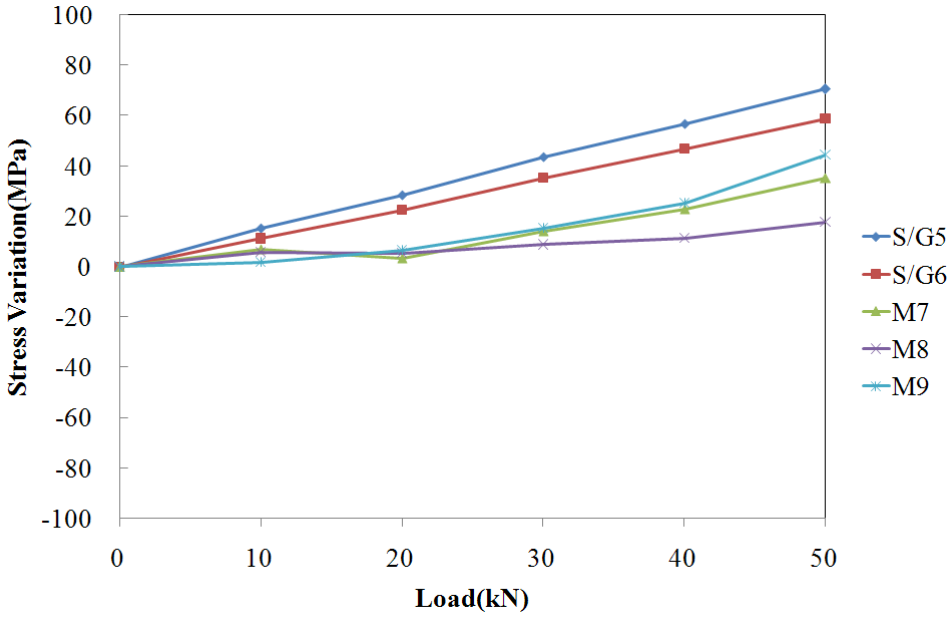
부분의 스트레인게이지의 응력과 자기이방성센서의 응력 비교한 결과를 보여주고 있다.



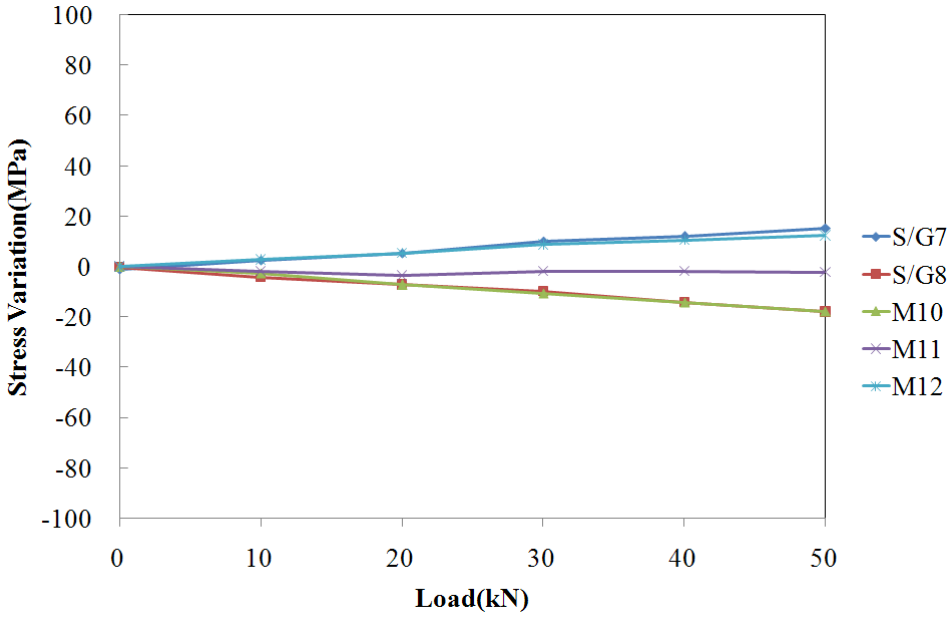
<그림 3-84> 스트레인게이지의 응력과 자기이방성센서의 응력 비교(상부 플랜지)



<그림 3-85> 스트레인게이지의 응력과 자기이방성센서의 응력 비교(좌측 웹)



<그림 3-86> 스트레인게이지의 응력과 자기이방성센서의 응력 비교(하부 플랜지)



<그림 3-87> 스트레인게이지의 응력과 자기이방성센서의 응력 비교(우측 웹)

8. 자기이방성센서의 현장적용성 검토

가. 흙막이 가시설 현장 적용

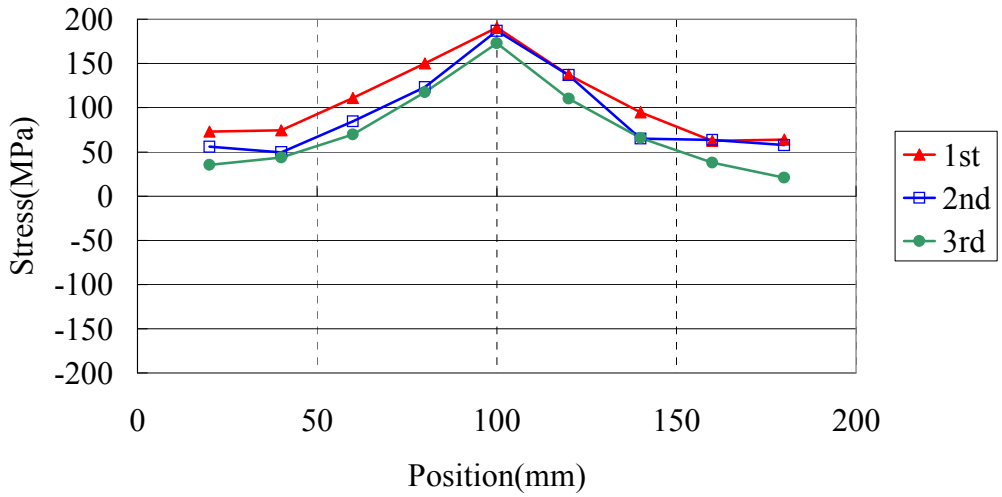
본 연구에서 개발된 자기이방성센서를 이용하여 흙막이 가시설에 현장에 적용하였다. 적용된 현장은 파이프 루프(pipe roof) 추진공법을 시공하기 위하여 설치된 흙막이 가시설로 2011년 8월부터 강재 지보재의 응력계측(주2회)을 수행한 현장으로 자기이방성센서를 이용한 응력계측은 9월에 3회에 걸쳐 계측하여 스트레인 게이지의 측정값과 자기이방성센서로부터 측정된 측정값을 비교하였다. 강재 지보재 설치 전 초기 계측이 이루어지지 않아 1회 계측값을 기준으로 하여 자기이방성센서로 측정된 응력값의 증감을 스트레인 게이지의 증감값과 비교하였다. 그림 3-89는 자기이방성센서를 이용한 흙막이 가시설 현장계측 결과를 나타낸 것이며, 표 3-4는 현장계측결과를 비교한 것으로 자기이방성센서와 스트레인 게이지에서 측정된 응력 차이는 약 10~20MPa 정도로 나타나고 있다. 현장계측시 일상오차(부주의, 오독 등), 계기오차(편차 미조정, 영점 미조정 등), 환경오차(기후, 습도, 먼지, 침식 등), 관측오차(시차, 개인오차 등), 특수오차(계측기내 소음 등) 등이 발생될 수 있으므로 이와 같은 오차를 극소화할 수 있도록 계획단계에서 분석단계까지 담당기술자의 체계적인 훈련이 필요하다.



<그림 3-88> 흙막이 가시설 현장 계측 전경

<표 3-4> 현장계측결과 비교 (Unit : MPa)

Measurement timing	Magnetic anisotropy sensor	Strain gauge
Between 1_{st} and 2_{nd} measurements	15.2	31.6
Between 1_{st} and 3_{rd} measurements	28.7	41.3



<그림 3-89> 자기이방성센서를 이용한 흙막이 가시설 현장계측결과

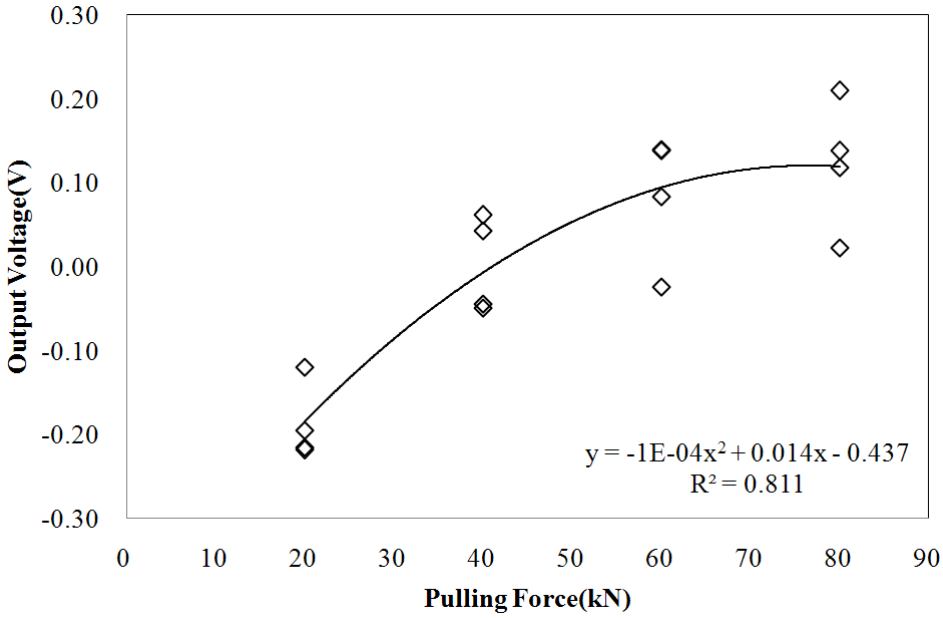
나. 앵커 현장 적용

본 연구에서 개발된 자기이방성센서를 이용하여 앵커가 설치된 현장에 적용하였다. 적용된 현장은 앵커 설치 후 인발력 확인을 위해 인발실험을 수행하는 현장으로 앵커의 인발로 인하여 앵커 지압판에 걸리는 하중을 자기이방성센서를 이용하여 비파괴적으로 계측하였다. 앵커 지압판에 걸리는 하중은 인발시험시 설치된 로드셀을 이용하여 측정하였으며, 자기이방성센서는 앵커 지압판 상하좌우 4지점을 4방향 계측으로 측정하였다.

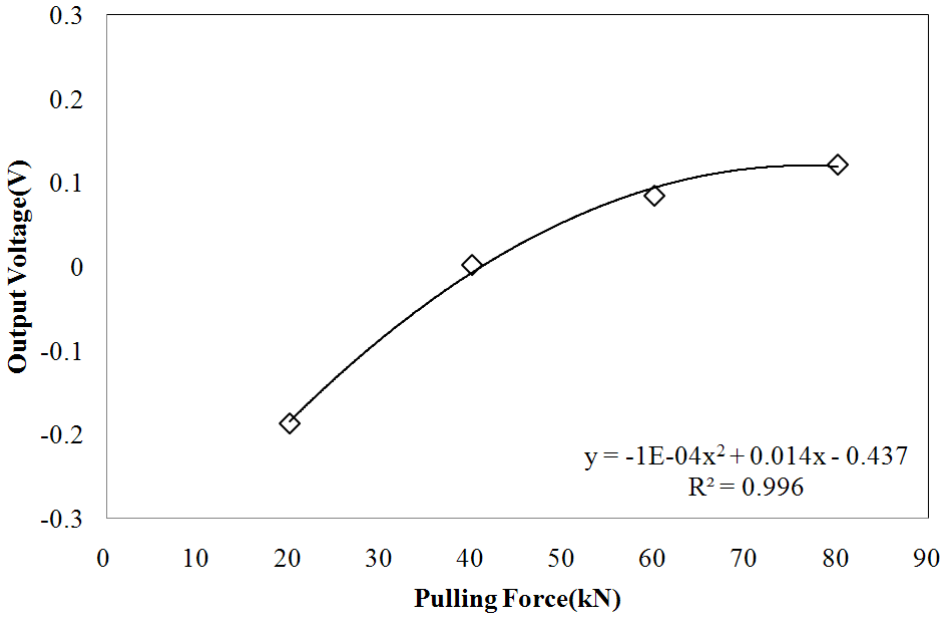
앵커 인발 실험시 자기이방성센서를 이용하여 앵커 지압판에서의 출력전압을 측정한 결과, 앵커 인발로 인한 인발력과 자기이방성센서의 출력전압은 그림 3-91과 그림 3-92와 같은 상관관계를 가짐을 알 수 있었다. 앵커 인발 실험의 경우, 앵커 지압판이 완전히 정착되지 않은 상태에서 실험을 수행하였으며, 현장 여건 등에 의해 많은 제한 사항이 있어 상관관계가 낮게 나타났지만, 실내실험을 통해 앵커의 인발력과 자기이방성센서의 출력전압과의 상관관계를 도출한 후 현장에 정착된 앵커에 대한 현장계측이 이루어질 경우 앵커 지압판의 비파괴 계측을 통하여 앵커에 작용하고 있는 인발력을 보다 정확히 측정할 수 있을 것으로 판단된다.



<그림 3-90> 앵커 현장 계측 전경



<그림 3-91> 앵커 인발력과 출력전압의 상관관계



<그림 3-91> 앵커 인발력과 평균 출력전압의 상관관계

9. 자기이방성센서를 이용한 비파괴 응력계측 시스템의 적용성

○ 노후화된 강재구조물에 있어 현재 상태의 응력을 파악하는 것은 안정성평가 관점에서는 상당히 중요함.

○ 토목구조물에 적용되고 있는 강재는 압연, 냉각, 휨 가공 등이 이루어진 후 설치되므로 각각의 강구조물의 경우 잔류응력이 포함되어져 있음. 기존의 변형률게이지는 잔류응력이 포함된 전응력을 구할 수 없음.

○ 국내 강구조물의 건전성(안정성)평가를 위해 잔류응력을 포함한 응력이력과 상태파악은 중요함.

○ 자기이방성센서 및 시스템 개발과 관련하여 강재의 응력거동을 파악하기 위해 강재하중재하을 실시하였으며, 실험결과 분석을 통하여 센서 부착위치와 하중에 따른 응력상태를 파악할 수 있었음.

○ 자기이방성센서를 통한 현장 강재의 응력을 파악하기 위해서 전압과 응력의 감도곡선을 사전에 작성할 필요성이 있음. 국내 토목현장에서 주로 사용되고 있는 구조용 압연 강재인 SS400과 용접 구조용 압연 강재인 SM490에 적합한 응력감도곡선의 작성을 위하여 강재하중재하 실험을 실시하였으며, 결과분석에 통해 계측 위치에 따른 출력전압과 응력의 평균값을 이용하여 응력감도곡선을 구하였음.

○ 자기이방성센서와 응력감도곡선의 검증 및 평가를 위하여 H-형강에 대한 강재하중재하실험을 실시한 결과, 자기이방성 센서로 측정된 응력값과 변형률게이지의 응력값을 비교·분석하였음.

○ 자기이방성센서로부터 구한 응력값을 통해 강재의 잔류응력과 이력에 대한 검토가 가능함을 알 수 있었음.

○ H-형강에 대해서 자기이방성센서를 통한 잔류응력을 분석하였음. 실험결과에서 기존의 연구와 부합되는 결론을 얻었음. 자기이방성센서의 출력전압을 통해 H-형강의 응력 정도와 분포를 파악하는 것은 가능하다고 판단됨.

○ 현장적용실험을 통하여 흙막이 가시설 구조물에서 자기이방성센서를 이용한 비파괴 응력계측이 가능함을 확인하였음.

○ 또한 앵커 현장 인발실험에 자기이방성센서를 접목하여 자기이방성센서를 이용한 앵커 지압판의 출력전압을 측정하여 앵커의 인발력과 자기이방성센서의 출력전압과의 상관관계가 있음을 확인하였으며, 추가적인 실험을 통하여 보다 정확한 결과값을 얻을 수 있을 것으로 판단됨.

제 5 절 연구 성과

성과목표	성과지표	측정방법	최종목표치	실적치	목표치 설정 근거
논문	학술지게재 논문건수	논문게재	2	1	연 1회 게재
	학술회의발표 논문건수	논문발표	4	7	연 2회 발표
지식 재산권	소프트웨어 (S/W)등록건수	소프트웨어 (S/W)등록	1	1	연구개발 대상기술
인증	인증기술 개발실적	인증기술 개발건수 (특허출원: 특허청)	1	0	자기이방센서를 활용한 흙막이 가시설 H-beam 응력계측시스템
계획설계 기술	수치해석건수	수치해석	2	2	지보구조응력
현장적용 효과	현장적용건수	적용건수	6	4	현장시험
비용절감 효과	유지보수 비용절감 효과	유지보수 비용절감	2	0	가시설 1단면당 스트레인게이지 사용료(10개 X 15,000)인 150,000원 정도의 비용절감
기획/계획 수립	기술동향 조사실적	기술동향 조사건수	2	2	국내1건, 국외1건
국제협력 및 협약	국제회의 개최건수	국제회의 개최건수	1	1	1회 개최
산학연 협력	산학연간 기술지원	기술지원	1	1	현장기술지도
사업화	시제품 출시건수	시제품 출시	1	1	시제품
연구성과 확산노력	연구개발 관련홍보	워크샵 박람회	2	2	워크샵 1회 개최
신소재·신공법 개발		신공법 개발건	3	3	- 흙막이 가시설 H-beam 응력계측시스템 - 터널 H-beam 응력계측시스템 - 토목구조물 보강용 앵커 응력계측시스템
실시계약		실시계약건	1	1	(주)메카지오텍

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 주요 연구목표 달성도

1. 연구개발 수행 진도율

구분 / 개발내용	연구개발기간 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	진도(%)
강재 구조물의 현장 계측 기법 연구 및 설치계획 수립	·····	·····	·····	·····													100
	———	———	———	———													
자기이방성 응력 계측기와 웹기반 유지관리 시스템 검토					·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····			100
					———	———	———	———	———	———	———	———	———	———			
응력계측시스템 검증을 통한 데이터의 신뢰도 확보	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····									100
	———	———	———	———	———	———	———	———									
IT 접목형 구조물 웹기반 유지관리 시스템 개발					·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····					100
					———	———	———	———	———	———	———	———					
응력 계측 및 유지관리 시스템의 현장 적용성 평가 및 기존계측기와 비교·검토													·····	·····	·····	·····	100
													———	———	———	———	
총 진도율	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	·····	100
	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	

····· 당초계획

——— 실 적

2. 연구개발 수행 달성도

목 표	달성도(%)	내 용
◦ 국내외 건설계측 센서 및 현장 계측기법 실태 조사	100	◦ 국내외 강재 지보재의 계측방법 조사 ◦ 응력계측기기 및 웹기반 응력측정 시스템 실태분석
◦ 자기이방성을 활용한 강구조물의 응력계측 센서 및 시스템 개발	100	◦ 자기이방성 응력계측기 개념 수립 ◦ 강재 지보재를 사용하는 지반구조물의 비파괴 응력계측 방법과 개념정립 ◦ 자기이방성 응력계측 측정결과의 가시화 S/W 개발
◦ 강재 지보재 부재력 실험을 통한 자기이방성 시스템 적용성 평가	100	◦ 기존 계측기와 비교・검토 ◦ 개발된 센서를 강재 실내실험에 적용하여 계측성능 검증 ◦ 계측기기의 검증을 통한 데이터의 신뢰도 확보
◦ 응력계측시스템 검증을 통한 데이터의 신뢰도 확보	100	◦ 강재의 열처리를 통한 자기이방성센서의 잔류응력 측정 가능성 분석 ◦ 열처리된 강재를 이용한 강재하중재하실험을 통한 응력감도곡선 도출 ◦ 강재하중재하시험으로부터 도출된 응력감도곡선을 적용하여 H-형강의 잔류응력 측정 및 하중단계별 응력거동 분석
◦ 웹기반 응력관리 시스템 개발	100	◦ 가시화 프로그램과 연동되는 웹기반 응력계측 관리 프로그램 개발 ◦ 실시간 계측데이터 확인 및 응력거동 경시변화 분석
◦ 응력계측 및 유지관리 시스템의 현장 적용성 평가 및 기존 계측기기와 비교	100	◦ 흙막이 가시설 현장 적용 분석 ◦ 앵커 현장 적용성 분석

제 2 절 관련분야 기여도

본 연구는 '강재 지보재의 웹기반 자동화 응력측정 시스템 개발'을 위하여 산학공동으로 연구를 수행하여 강구조물의 비파괴 응력 계측 기술을 개발하여 국내 비파괴 계측의 기술적 수준을 선진국 수준으로 끌어올리고 이를 사업화하여 관련 분야의 산업기반을 확충할 수 있는 계기로 예상된다.

○ 본 연구개발을 통하여 계측센서 및 비파괴 계측 분야의 관련 산업을 확충함으로서 산업을 활성화 시키고 이를 통하여 전문인력의 수요를 확충시키는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

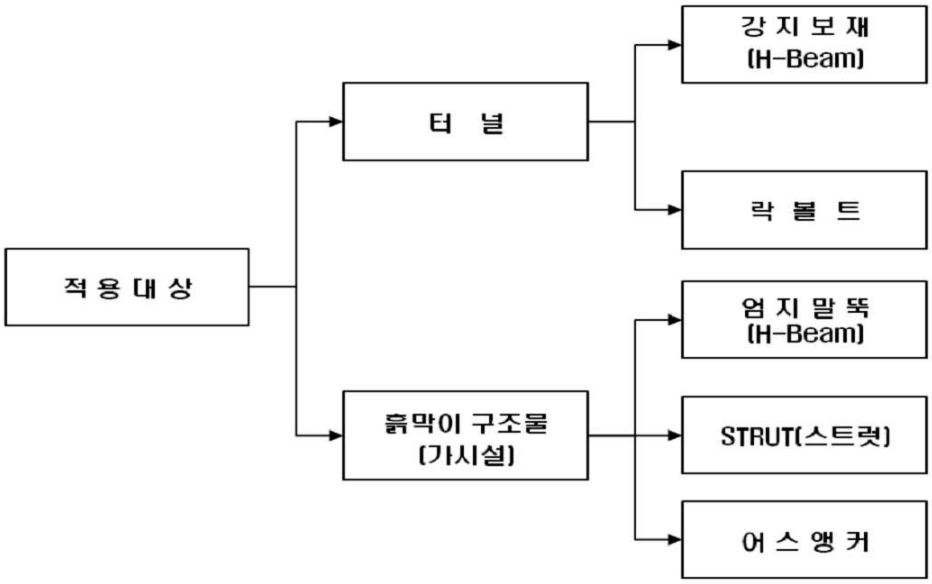
○ 성공적인 연구개발을 통하여 참여기업의 기술개발 의지를 북돋고 각종 신기술, 신공법에 대한 기술이전을 수행하여 새로운 시장을 개척함으로서 관련 산업구조의 건전한 개선이 예상된다.

○ 본 연구에서 추진하는 연구개발 분야는 강구조물의 비파괴 응력계측에 관한 기술 개발로서 관련 분야 선진국에서도 이제 사업화 또는 실용화 단계에 이른 기술이 대다수를 차지한다. 따라서 내실있는 연구개발을 통하여 사업화 및 실용화를 수행하고 각종 국제 학술행사에 연구개발결과를 홍보함으로서 계측기술분야에서 최고의 기술력을 갖는 국가 이미지를 만들어 낼 수 있을 것으로 판단된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구개발의 활용계획

응력계측기기 및 웹기반 응력측정 자동화 시스템 실태 분석으로서 국내 ·외 지하구조물의 계측방법 및 유지관리 등에 대한 자료를 수집하여 차후 이에 대한 연구의 밑바탕을 구축할 것으로 판단된다. 국내 실정에 맞는 자기이방성을 활용한 강구조물 응력계측 센서 및 시스템 개발과 IT접목형 구조물 웹기반 유지관리 시스템 개발을 수행하여 터널의 강지보재·락볼트, 토류구조물의 말뚝·띠장·스트럿·앵커 등의 강재 구조물의 비파괴 응력측정에 활용할 수 있을 것으로 기대되며, 구조물 웹기반 유지관리 프로그램을 통해 하나의 통합계측시스템에 이용될 것으로 판단된다.



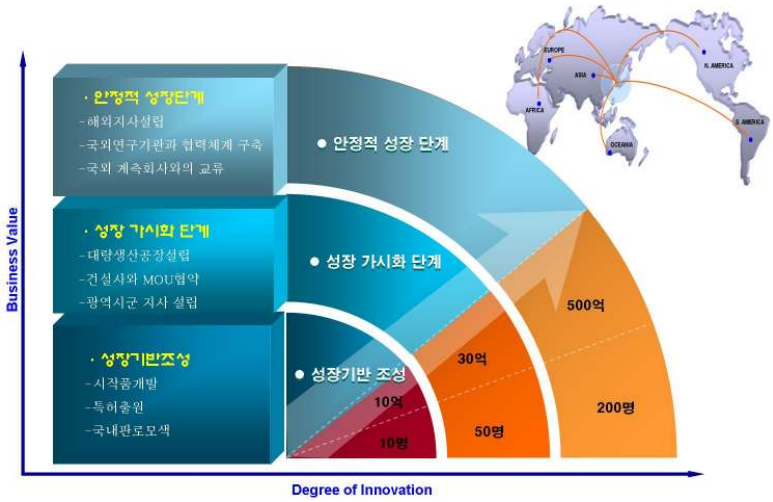
자기이방성 계측시스템은 변형률게이지가 기존에 설치되지 않은 노후화된 강재구조물에 있어 절대응력을 비파괴적으로 구할 수 있는데 장점이 있다. 개발기술대상은 비파괴 계측이 가능한 자기이방성 응력 계측기 개발 및 웹기반 응력측정 시스템 구축으로서 터널 등 지하구조물의 강재지보재의 안정성과 내구성을 시공 중 및 완료단계에서 평가하고, 유지관리 단계에서도 활용할 수 있어 경제성 향상에 크게 기여할 수 있는 신기술이다. 강재 지보재에 대한 현장 계측에 관한 연구를 수행하여 현장 계측기기 및 계측 장비의 기술향상을 유도하여 토목시공현장의 계측 결과에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 강재 지보재의 종류별로 동일한 단

면에 대하여 지보재에 대한 다양한 계측방법들을 동시에 적용하고 이들 결과들을 상호·비교함으로써 가장 신뢰성 있는 지보재 계측방법 및 계측기기를 개발할 예정이며 개발된 계측방법과 기기에 대한 보급 및 실용화를 이룰 수 있을 것으로 기대된다. 향후 국내에서 건설될 것으로 예상되는 지하대피소, 지하스포츠시설, 지하주차장 등 다양한 지하생활공간 유지관리에 활용할 수 있으며, 산맥·하저·해저를 통과하는 초장대 터널의 안정성 평가에 직접적으로 기여할 수 있을 것으로 판단된다.



<그림 5-1> 연구개발의 활용방안

제 2 절 연구개발의 기대효과



<그림 5-2> 연구결과의 기대효과 및 사업화 방안

<표 5-1> 연구결과의 기대효과

분 야	내 용
기술적 측면	- 국내 현장에 적합한 비파괴 응력계측기와 웹기반 응력측정 시스템 구축이 가능하다. - 현재 지하구조물에서 발생하고 있는 응력을 비파괴계측으로 정밀한 측정 값 획득이 가능하다. - 지하구조물의 응력 발생메커니즘을 규명할 수 있으며, 변형거동과의 상관성을 분석하여 지반-지보재의 상호작용에 대한 연구 성과를 창출할 수 있다. - 시공 중 또는 완료단계에서 얻어지는 응력 값과 구축된 웹기반 응력측정 시스템을 통해 지하구조물의 안정성과 경제성을 극대화 할 수 있다. - 응력계측시스템 개발과 웹기반 구축 노하우를 통하여 다양한 학제간 연구가 가능하며, 이와 같은 기술적 결과를 토대로 유지관리에 대한 새로운 학문분야를 창출 할 수 있다.
경제●산업적 측면	- 자기이방성 응력계측 센서는 반영구적으로 이용 가능하며, 뛰어난 사용성과 용이한 현장 적용성으로 인해 공사인건비 및 기자재비의 절감 등 경제적 효과가 크게 기대된다. - 자기이방성 응력계측기는 계측유지관리 비용이 건설시공현장에 변형률게이지 사용료의 약 40% 절감효과가 예상된다. - 개발된 웹기반 응력측정 시스템은 기존 토목구조를 유지관리 프로그램과 연계시킴으로써 관련분야 기술의 산업적 확장에 기여할 수 있다. - 도로, 철도, 터널, 사면의 건설과 관련된 대규모 토목구조물의 안정성 제고와 시공 및 유지관리과정에서의 재해예방을 통한 인적 및 물적 손실을 감소시킬 수 있다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술 정보

1. 연구논문

- 논문제목 : Magnetostriction Stress Measurement on Dynamic Stress of Bridges and sensitivity Calibration
- 저 자 : 村井 亮介, 柳沢 栄一, 岡 俊蔵, 廣江 哲幸, 安福 精一
- 년 도 : 2004년
- 주요내용 : 강교에 존재하는 잔류응력과 강교에 지나가는 자동차에 의해 발생하는 동적 응력을 모의 실험과 실내적용을 비교•검토하여 자기이방성이 실용성을 검증하였다. 계측결과 응답성에 대한 저항값과 콘덴서의 용량, 필터의 재확인이 요구됨을 알았으며 정적과 동적인 사황의 계이지 측정에 있어서의 오차는 ±5%로 임을 나타내었다.

- 논문제목 : Linearization Method of Output vs. Stress in Stress Measurement using Magnetic Anisotropy Sensor
- 저 자 : Kenji KASHWAYA & Hiroshi SAKAMOTO
- 년 도 : 2004년
- 주요내용 : 자기이방성센서를 사용하여 응력을 계측할 시에 선 작업이 되어야 할 응력감도곡선의 작도와 자화로 인해 발생하는 자기력에 대한 소자를 설명하였다. 자기이방성센서의 출력이 교류소자방향에 따라 달랐으며 출력대 응력의 관계(응력감도곡선)를 선형으로 접근하는 방법을 찾아내었다. 그 결과 응력감도의 직선화로 인해 잔류응력의 유무와 상관없이 외력에 의해 발생하는 응력을 보다 정량적으로 도시하였다.

- 논문제목 : Measurement of stresses in the steel ribs used for NATM tunnel by magnetic sensor
- 저 자 : 芥川 真一, 太田 道宏, 安原 幸二, 松岡 敬
- 년 도 : 2008년
- 주요내용 : 자기이방성을 터널에 적용하여 활용성을 증명하였다. 먼저 자기입아성을 이용하여 4개의 강재에 응력감도곡선을 작도 후 터널에 적용되는 4개의 강재에 대하여 응력을 계측하고 스트레인 게이지값과 비교하였으며, 이들에 대한 각각의 절대치가 다른 조건에서 실험을 실시하였으며, 이들에 대한 각각의 절대치가 다른 조건에서 실험을 실시하였으므로 향후 전반적인 응력변동에 대한 경향을 파악하는

것이 중요함을 나타내었고, 강지보의 표면을 노출시켜 그 부분에 계측시스템을 구출한다면 유지 관리상의 새로운 검토항목으로 고려할 만함을 나타내었다.

- 논문제목 : Non-destructive Evaluation of Stress in Bent Pipe by Magnetic Anisotropy Sensor - Out-of-Plane Bending
- 저　　자 : Shoichi IIMURA & Yoshiki SAKAI,
- 년　　도 : 2006년
- 주요내용 : 자기이방성을 이용하여 파이프라인에 작용하는 외력으로서 내압, 자중, 토압, 차량하중, 온도변화, 지진, 지반침하로 인해 발생하는 응력을 측정하였다. 이는 파이프라인의 유지관리차원에서 매우 중요하며 비파괴계측 중 매설된 파이프라인의 응력계측 측면에선 자기이방성이 획기적임을 나타내고 있으며 필터효과에 의해 외력에 의해 발생하는 응력만을 측정할 수 있음을 밝혔다. 그리고 곡관 제조시 큰 응력이 잔류함을 나타내었다.

- 논문제목 : Non-destructive Method for Bending Stress Evaluation of Linepipe using a Magnetic Anisotropy Sensor
- 저　　자 : Yoshiaki SAKAI & Hiroyuki UNISHI
- 년　　도 : 2004년
- 주요내용 : 자왜법을 이용한 배관의 응력 측정 기술에 대하여 그 측정 원리와 시험을 통한 「자왜식 강관 휨 응력 측정 시스템」을 소개

- 논문제목 : Applicability of Stress Measurement Technique using Magneto-Strictive Effect of Welded Structures
- 저　　자 : MURAI Ryosuke 외
- 년　　도 : 2003년
- 주요내용 : 용접된 구조물에 작용하는 여러 가지의 응력에 대하여 자왜법을 이용한 실내 시험 및 실제교량의 잔류 응력 측정 시험, 가설 각 단계의 응력 측정 시험을 실시했다.

2. 국외 연구기관 방문

- 출장지 및 기관

출장도시	방문기관
고베	고베대학교 토목공학과

- 방문기간 : 2010. 03. 11(목) ~ 03. 13(토)
- 기관에 대한 설명 : 강재지보재의 응력 계측 및 데이터해석 분야에 많은 연구실적을 가지고 있는 일본의 (주)건설공학연구소의 Sakurai Shunsuke 소장, 고베대학의 Akutagawa Shinichi 교수와 연계하여 연구수행

제 7 장 참고문헌

1. 건설교통R&D 혁신로드맵 주요 프로그램, 2006
2. 국가과학기술지식정보서비스, http://www.ntis.go.kr
3. 김훈, 김용수, 송한일, 안승수, 2008, “안전관리기술과 첨단센서의 융합”, 대한토목학회지 제56권 제6호, pp.19-30
4. 바이텍코리아 http://www.baytech.co.kr/1_0/1_7/1_7.htm
5. 박덕근, 2008, “급경사지 재해예방에 관한 법률”, 2008 지질공학 단기실무강좌, 사면일반, pp.1-84
6. 박인근, 2000, “비파괴검사기술을 이용한 응력측정”, 안전보건정보서비스 자유게시판, http://www.kosha.net
7. 법제처, http://www.moleg.go.kr
8. 우종태, 2006, “지하철 유지관리계측 세부지침(안)”, 2004, 서울특별시지하철건설본부, pp.11-20
9. 우종태, 2004, “흙막이 공사에서 계측의 문제점 및 대책”, 한국구조물진단학회지, pp.5-15
10. 우종태, 김종수, 이송, 2001, “지하철 터널에서 유지관리계측의 문제점 분석 및 개선방안”, 한국구조물진단학회 논문집, Vol. 5. No.4, pp.161-167
11. 우종태, 이래철, 2008, “건설계측공학”
12. (주)지구환경전문가그룹 http://www.ege.co.kr/rnd/궁_02_01.asp
13. (주)홍익, 계측관리, pp.4-6
14. 이제이텍 http://ejtech.net/newsite/html/Business01_6.htm
15. 지오넷, 2005, “유비쿼터스를 이용한 터널 자동계측시스템”
16. 천병식, 남순성, 1996, “서울지하철 터널의 계측관리 기준치에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제 16권, 제Ⅲ-1호, pp.47-59
17. 특허정보검색서비스, http://www.kipris.or.kr
18. 한국구조물진단학회, 2006, “지하구조물 안전계측 이론과 실무”, 구미서관, pp. 3-65
19. A.I Feldman, J.B McRae, 1999, "5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics", 1999, pp.95-100.
20. Campbell Scientific. Inc. http://www.campbellsci.com
21. Campbell Scientific Ltd http://www.campbellsci.co.uk
22. Clough, G. W., Smith, E. M., and Sweeney, B. P., 1987, “Movement Control of Excavation Support Systems by Iterative Design”, Found. Eng. Vol.2, ASCE, Proc. of Congress, pp.869-884
23. Franklin, J.A. ,1976, "An Observation Approach to the Selection and Control

of Rock Tunnel Linings, Shotcrete for Ground Support", ASCE, pp. 556-596
24. John dunnicliff, 1993, "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance", pp. 39-40
25. KANE GeoTech, Inc. http://www.kanegeotech.com
26. Kenji Oi, Tsuneaki Shimura, Lee Jaeho, Shinichi Akutagawa, 2004, "A Study about Non-Destructive Stress Measurement of Load in Tunnel Support Structures at A Large-Scale NATM Tunnel", Memoirs of Construction Engineering Research Institute ,No.46 pp.99-111
27. Lambe, T. W., 1970, "Braced Excavation", Proceedings of the Speciality Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth-Retaining Structures, ASCE, pp.149-218
28. Peck, R. B., 1969, Deep excavations and tunneling in soft ground, Proceedings 7th International Coference Soil Mechanis and Foundation Engineering, Mexico, State-of-the-Art Volume, pp.225~290
29. Roctest Co., LTD (Canada), http://www.roctest.com/index.php?module=CMS&id=47
30. Sakurai, S., 1997, "Lessons Learned form Field Measurements in Tunnelling", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.12, No.4, pp.453-460
31. Terzaghi, K. and Peck, R. B., 1967, "Soil Mechanics in Engineering Practice", 2nd Edition, John Wiley and Sons, pp.394-413
32. Toyoko Elmes Co., LTD http://www.elmes.co.jp/service/doboku01.html
33. Tokyo Sokushin Co., LTD http://www.to-soku.co.jp/business.htm
34. Applicability of Stress Measurement Technique using Magneto-Strictive Effect to Welded Structures - MURAI Ryosuke 외, 일본용접학회 논문집 제21권 제4호, pp.532-538, 2003
35. Magnetostriction Stress Measurement on Dynamic Stress of Bridges and Sensitivity Calibration of Steel used for Bridges- MURAI Ryosuke 외, 일본용접학회 논문집 제22권 제3호, pp.411-416, 2004
36. Linearization Method of Output vs. Stress in Stress Measurement using Magnetic Anisotropy Sensor - Kenji KASHWAYA & Hiroshi SAKAMOTO, 일본비파괴검사 논문집 제 53권 2호, 2004
37. Non-destructive Method for Bending Stress Evaluation of Linepipe using a Magnetic Anisotropy Sensor- Yoshiaki SAKAI & Hiroyuki UNISHI, 일본비파괴검사 제53권 12호, 2004
38. Non-destructive Evaluation of Stress in Bent Pipe by Magnetic Anisotropy Sensor - Out-of-Plane Bending - Shoichi IIMURA & Yoshiki SAKAI, 일본비파괴검사 논문집 제 55권 11호, 2006

39. Magnetoresistive sensors for Non-destructive Evaluation - A. Jander, C. Smith and R. Schneider, 10th SPIE International Symposium, Conference 5770
40. Magnetic Studies of Residual Stress in Iron and Steel Induced by Uniaxial Deformation - Seiichi ABUKU, Japanese Journal of Applied Physics Vol.16 No.7, 1976
41. 자기이방성 센서에 의한 응력측정법에 관한 연구, 김정태, 부산대학교 기계공학과 석사학위논문, 1988.02
42. 자기저항효과 및 센서 응용, 김동영, 비파괴검사학회지 Vol.28 No.5, 2008.10
43. H형강 및 각형강관의 잔류응력에 관한 연구, 김욱선, 권영봉, 한국강구조학회 학술대회논문집, 1994
44. 비파괴검사기술의 최신 연구동향, 이승석, 김기복, 비파괴검사학회지, Vol.24 No.1, 2004.02
45. 자기 센싱의 터널공사 자동화에 대한 응용, 한국과학기술정보연구원, http://www.reseat.re.kr
46. 국내외 터널 계측관련 특허조사, 한국특허정보원 특허정보검색서비스, ttp://www.kipris.or.kr

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

자기이방성센서를 이용한 강구조물의 비파괴 응력계측기법(안)

2011.11

경남과학기술대학교 (주)메카지오텍

1. 서 론

새로운 소재의 개발이 활발하게 진행되고 있는 오늘날에도 구조용 재료와 기계부품의 대부분은 철강 제품이 차지하고 있다. 철강 제품은 재료의 특성상 제조공정 또는 부품의 조립시 응력이 발생하게 되며 발생된 응력은 잔류 응력으로 남아 재료의 파괴강도에 영향을 미치게 된다. 강재의 응력 및 잔류응력을 측정하는 방법은 여러 가지가 있지만 두 가지로 대별하면 스트레인게이지(strain gauge)로 응력의 변화를 측정하는 방법과 X-선, 초음파, 자기변형효과(magnetostriction effect) 등을 이용한 비파괴 응력 측정방법으로 나눌 수 있다. 전자는 정밀도가 높은 측정이 가능하기 때문에 널리 사용되고 있는 방법이지만 외력에 의한 응력이나 잔류응력이 없는 상태에 미리 스트레인게이지를 부착하여 응력을 측정해야 하는 어려움이 있다. 반면 후자는 오래 전에 축조된 구조물이라도 응력측정이 가능할 뿐만 아니라 잔류응력의 측정에도 매우 유용하다. 비파괴 응력 측정 기법인 X-선을 이용한 장치는 대형으로 손쉽게 운반이 어려우며 구조물의 임의 지점에서의 응력측정에는 부적합하다. 또한 초음파와 자기변형효과를 이용한 방법은 아직 실용화하기에는 어려움이 있으나 이를 위한 연구가 계속 진행되고 있다. 이 중 자기변형효과를 이용한 응력 측정 기법은 다른 측정 장치에 비해 경량이고 소형이며, 간편하게 어디서나 필요한 부분의 응력을 비파괴적으로 측정할 수 있다.

본 메뉴얼에서는 자기이방성센서를 이용한 강재의 비파괴 응력계측기법에 대하여 기술하였다.

2. 자기이방성센서의 원리

자기변형효과를 이용한 응력 측정 장치는 기계 및 자동차 부품 등에서 잔류응력을 측정하기 위하여 1960년대부터 현재까지 계속 연구되고 있다. 1970년대 후반에 들어 吉永昭男 등(1977)은 스트레스 테스터(stress tester)라고 부르는 센서를 개발하여 용접부 주위 및 구조물의 잔류응력을 측정하였다. 이들은 'ㄷ'자 모양의 두 개의 철심 주위에 동선을 감고 하나는 보상용으로, 다른 하나는 측정용 스트레스 테스터를 만들어 피측정체에 응력으로 인한 투자율의 변화가 있을 때 측정용 테스터에서 이를 감지하여 응력을 측정하였다. Abuku(1976)는 자기센서 중 가장 유용하다고 생각되는 자기이방성센서(magnetic anisotropy sensor)를 연구 개발하였다. 자기이방성센서는 吉永昭男 등(1977)의 스트레스 테스터와는 달리 보상용 테스터가 필요 없으며 피측정체가 응력에 의해 자기이방성을 나타낼 때 이를 이용하여 잔류응력을 측정하였다. 1980년대에 들어서면서 Kashiwaya 등(1985)은 소자법(demagnetization method)을 창안하여 응력에 의한 자기적 히스테리

시스(hysteresis)를 제거하였으며, 리프트 오프(lift-off)의 영향을 고려하지 않고 응력을 측정할 수 있는 측정 방법을 개발하였다.

최근 들어 건설 분야에서 자기이방성센서를 이용한 응력 측정 기법은 강교나 강관 등의 분야에서 사용예가 있으며 터널 건설현장에서 이용되는 강지보재(H형강)에 대해서도 현장계측이 가능함이 밝혀졌다(Akutagawa 등, 2003; Sakai 등, 2000).

강자성체(ferromagnetic substance)를 자화(magnetization)시킬 때 강자성체에 가해준 자계(magnetic field)의 세기에 따라 자로(magnetic circuit) 방향으로 길이가 약간 변하는데, 이러한 길이의 변화를 자기변형(magnetostriction)이라 하며 길이에 대한 자기변형은 자화를 시키는 방향에 평행하게 변형한다. 재료에 따라 자기변형의 특성이 달라지는데, 자기변형이 자화한 방향으로 늘어나면 정의 자기변형이라 하며, 자기변형이 자화한 방향으로 줄어들면 부의 자기변형이라 한다. 철(iron)과 같은 강재(steel)는 자화가 되면 정의 자기변형이 발생한다. 즉 강재에 인장응력이 발생하면 자기변형이 자화한 방향으로 늘어나 투자율(magnetic permeability)이 좋아지며, 이러한 투자율의 변화를 측정하기 위해 자기이방성센서가 활용되고 있다.

자기이방성센서는 다양한 종류가 존재하는데, 본 보고서에서 적용한 것은 4족 원주형(직경 3㎝, 높이 6㎝)이며, 4족의 대각선상에 각각 출력코일(Core-D)과 입력코일(Core-E)이 감겨져 있다. 그림 1과 같은 응력상태를 고려하면 피측정물의 투자율(透磁率, 자속 통과 정도)은 x방향 투자율(μ_x)이 y방향 투자율(μ_y)보다 커지므로 입력코일(Core-E)에 전류를 흘리면 E_1로부터 나온 자속의 대부분은 최단 거리로 직접 E_2로 향하지만 투자율의 차이($\mu_x - \mu_y$)로 인하여 E_1에서 D_1, D_2에서 E_2로 화살표 방향과 같이 출력코일(Core-D)에 유도전류가 흘러 전압이 발생하게 된다.

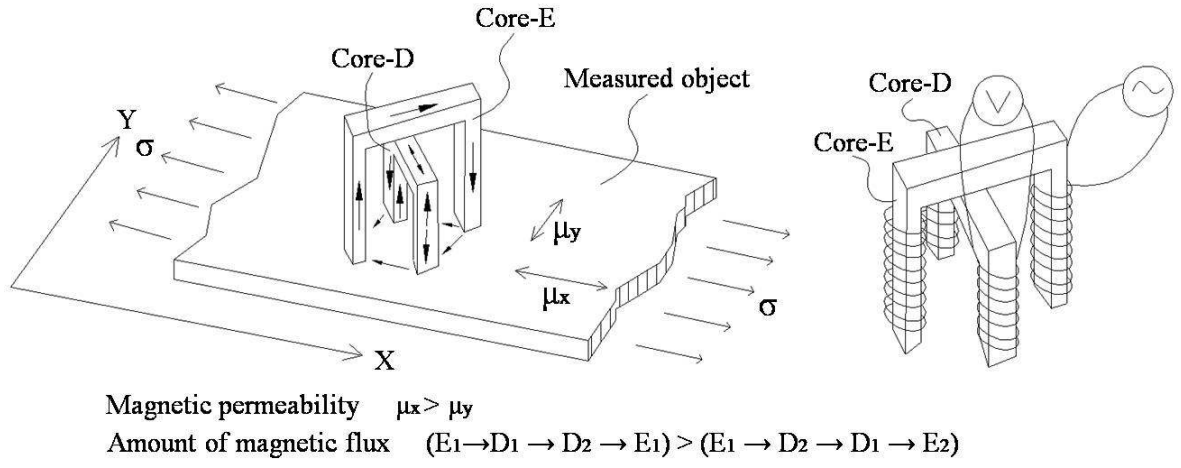


그림 1. 자기이방성센서의 측정원리

출력코일에서 발생되는 출력전압(V)은 다음 식(1)과 같이 계산된다.

$$V = N(\mu_x - \mu_y) \qquad (1)$$

여기서 N은 피측정물의 자기적 특성, 자기이방성센서와 피측정물의 거리 등에 의해 정해지는 상수이다.

피측정물 투자율의 이방성 ($\mu_x - \mu_y$)은 직교하는 2축의 응력차 ($\sigma_x - \sigma_y$)에 비례하므로 다음 식(2)와 같은 관계를 가진다.

$$V = K(\sigma_x - \sigma_y) \qquad (2)$$

여기서 K는 응력감도로 코일 및 재료의 자기적 특성 등에 의해 정해지는 상수이다. 따라서 비례 상수인 K를 알 수 있으면, 자기이방성센서의 출력에 의해 응력차를 얻을 수 있다. 또한 센서 원리에 의해 피측정물에 대하여 회전시켰을 때의 출력전압은 180°의 주기를 가지는 코싸인(cosine) 커브로 나타나며 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = K(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\phi \qquad (3)$$

여기서 σ_1, σ_2는 피측정물에 작용하는 주응력이며, ϕ는 센서의 측정방향과 주응력 σ_1의 방향이 이루는 각이다. 센서의 측정방향이란 그림 2의 화살표 방향으로 자기이방성센서를 0°, 45°, 90°, 135°의 4방향으로 회전시켜 출력전압이 최대가 되는 방향을 구하면, 그 때의 자기이방성센서의 방향이 주응력 σ_1의 방향이고 출력방향에서의 주응력차 ($\sigma_1 - \sigma_2$)를 구할 수 있다. 단, 피측정물에 작용하는 응력상태를 모르는 경우는 자기이방성센서를 회전시켜 4방향 계측을 수행할 필요가 있다.

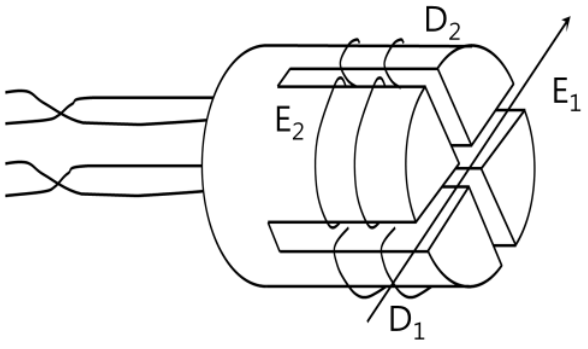


그림 2. 자기이방성센서의 측정방향

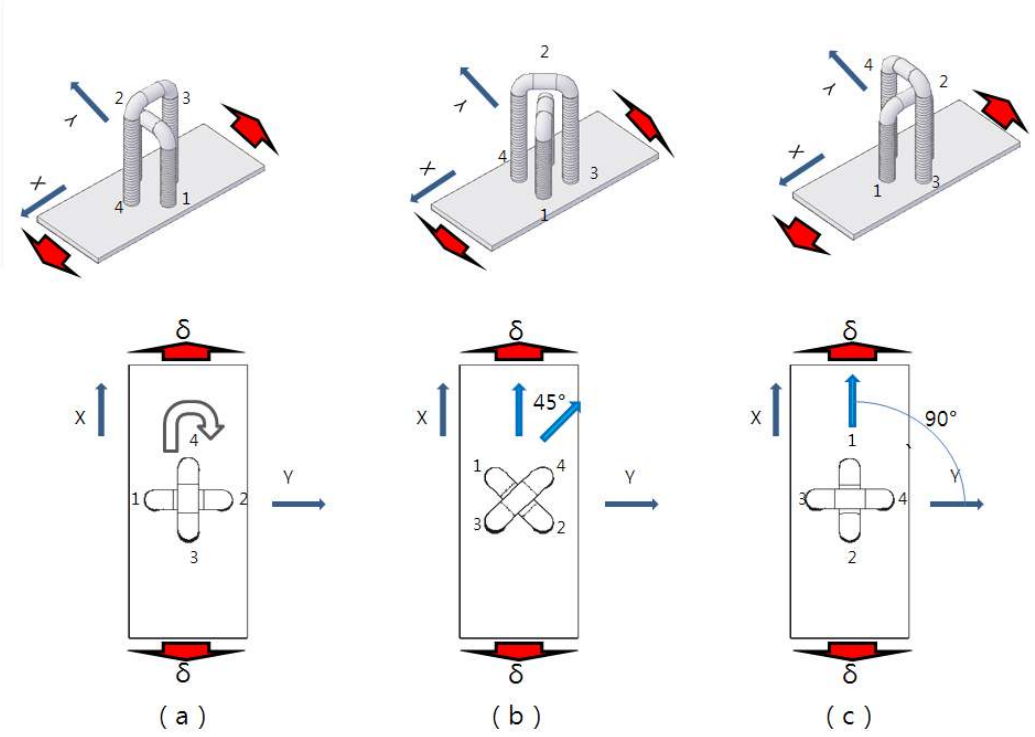
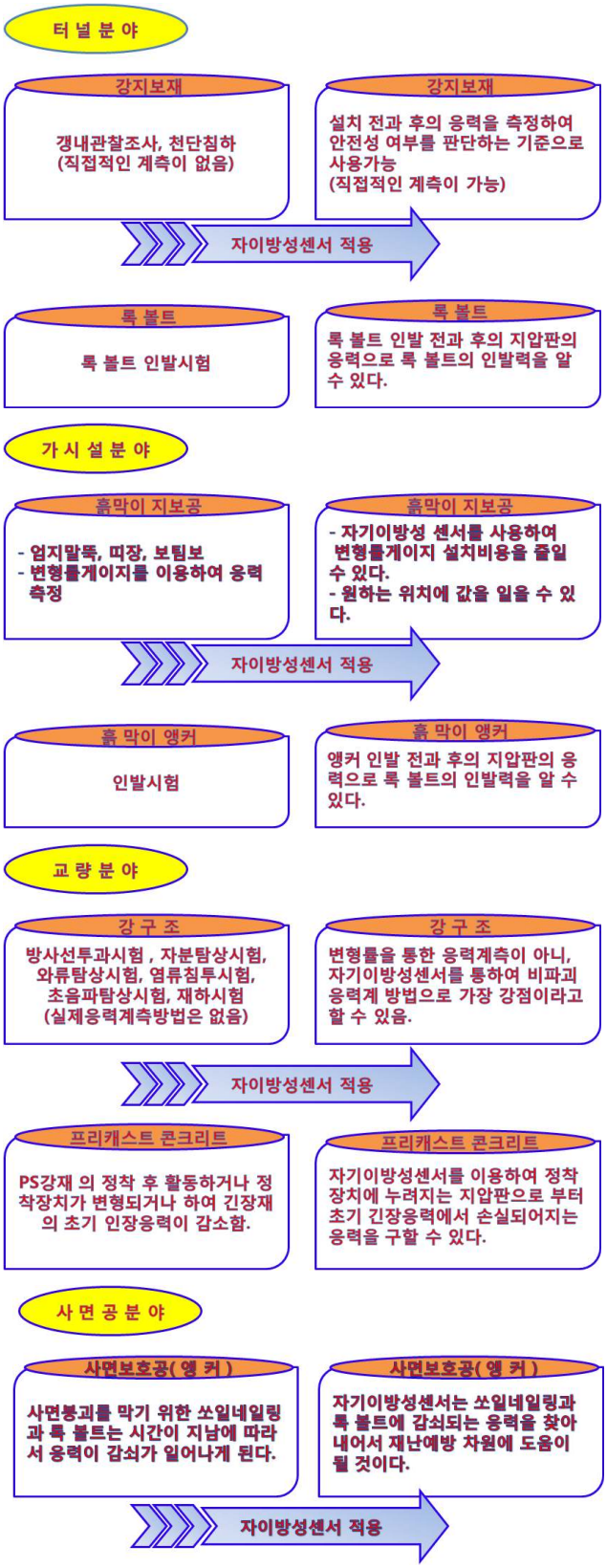


그림 3. 응력의 변화에 따른 투자율의 변화를 측정

3. 자기이방성센서의 적용에 관한 이해

자기변형효과에 의한 강구조물의 응력 측정기술은 강구조물(교량, 터널 지보공, 수문 등)의 초기 응력을 포함한 전 응력을 비파괴로 측정하는 장치 및 측정 시스템이다. 종래는 스트레인 게이지를 이용하여 강구조물의 응력을 측정하고 있었지만, 자기이방성센서를 이용한 비파괴 응력 측정시스템은 공공 공사용으로 강구조물(신설·기 설치된 교량·수문 등)의 응력을 조사·측정할 수 있다. 신설 강구조물(교량, 수문 등)의 안전성을 확인하고 싶은 경우에는 잔류 응력(재료 입하 시, 공장 제작 완료시, 가설 완료시)을 비파괴로 측정할 수 있다. 기 설치된 강구조물의 안전성을 확인하고 싶은 경우 각종 하중 조건 하에서 발생하는 전응력(잔류 응력+사 하중+재하에 의한 응력)을 비파괴로 측정할 수 있다. 이미 설치된 강구조물의 보수·보강 효과를 확인하고 싶은 경우 각종 하중 조건 하에서 발생하는 전 응력을 비파괴로 측정할 수 있다. 사고·재해 등에 의하여 변형한 강 구조물의 안전성을 확인하고 싶은 경우, 변형 부분의 발생 응력을 비파괴로 측정할 수 있다. 강재 터널 지보공의 정보화 시공을 실시하고 싶은 경우, 안전성 확인을 위한 발생 응력 측정을 비파괴로 행할 수 있다. 어스 앵커 축력, PC 교량의 포스트텐션력 등을 관리하고 싶은 경우, 거리 도구의 응력 측정에 의하여 관리할 수 있다.

4. 자기이방성센서의 적용분야



5. 강재지보재의 비파괴 응력 측정방법

5.1 강재지보재의 응력 측정 개요

강철 제품 지보공의 응력 측정에 필요로 하는 작업 시간, 강철 제품 지보공이 현장에 반입 되어 야적장에 보관되는 시기, 또 그것이 터널이나 흙막이 가시설에 시공되기 전까지의 시기에 자기이방성센서에 의해 표면의 응력측정을 실시할 수 있다. 터널 및 흙막이 가시설에서 유지관리 및 시공 중 계측을 위해 자기이방성센서를 이용하여 초기 출력전압을 파악해 두면 계측시 초기 측정결과로 부터 변동량을 파악할 수 있다. 단 터널의 경우 강재지보재의 표면이 노출되어져 있는 기간 동안 강재지보재의 응력을 측정할 수 있다.



그림 4. 자기이방성센서를 이용한 강재지보재 응력 측정

5.2 강재지보재의 응력 측정 방법

① 측정에 앞서 센서 데이터 읽음값의 출력전압 상태를 확인하여 이상이 없는지 확인한다.
② 계측을 수행하기 전 그라인더 혹은 사포 등을 이용하여 측정면을 깨끗하게 한다.
③ 측정방향을 표시할 표적지를 측정대상면에 부착한다.
④ 자기이방성센서를 이용하여 출력전압을 측정한다.
⑤ 이후 계측빈도에 의거 측정을 수행한다. 측정시 계측시간과 주변여건을 함께 기록한다.
⑥ 1회 측정시 동일한 측정지점에서 2~3회 반복 측정을 수행한다.
⑦ 측정된 출력전압은 실내실험에서 도출된 자기이방성센서의 출력전압과 앵커의 축력 관계를 이용하여 응력으로 환산한다.

5.3 계측 빈도

계측 빈도는 계측의 중요성 목적 공사의 진척 정도, 계측방법 및 공사 중 발생하는 변위량의 크

기 및 증가 속도 등에 따라 달리 결정 되어야 한다. 지반의 거동은 일일 굴토량과 작업기계, 기상(우천)등에 영향을 받으므로 Data의 변화속도와 안정성 여부의 관련성을 충분히 고려하여 적절한 측정 빈도를 설정해야 한다. Data의 변화속도가 빠른 계측항목의 측정 빈도는 높이고, 반대로 장기간에 걸쳐 변화량이 미세한 계측항목은 빈도를 낮추는 것이 좋으며, 안전과의 관련성이 깊은 계측항목은 빈도를 높일 필요가 있다.

6. 앵커축력의 비파괴 응력 측정방법

6.1 앵커의 축력 측정목적

자기이방성센서의 지반보강조물의 적용으로 앵커의 축력 측정에 주목했다. 앵커의 축력을 자기이방성센서로 측정하기 위하여 실제 하중이 전달된는 앵커 두부의 너트부분과 지압판에 대한 계측방법을 고안하였다. 우선 너트와 지압판에 대한 기초 정보로써 지압판 중앙부에 앵커의 축력을 상정해서 하중재하를 시행해 자기이방성센서를 이용해 지압판의 응력상태를 조사하기로 했다. 또 최후에 얻어진 지압판의 응력에서 앵커의 축력을 간편하게 평가할 방법을 제안한다.

앵커 공법은 비교적 작은 시추공에 고강도의 강재 등의 끌어 재를 삽입해, 이것을 정착시켜 강재의 항장력을 이용하는 공법이다. 앵커는 견인력을 지반에 직접 전달시키는 기능을 가지는 앵커 몸체, 앵커 머리 부분으로부터의 견인력을 앵커몸체에 전달하는 부분 및 앵커를 구조물에 간결 하는 역할을 가지는 앵커 머리 부분에 의해 구성된다.

앵커축력 측정방법은, 자기이방성센서를 이용하여 앵커 머리 부분의 앵커 플레이트 및 너트의 응력 상태와 앵커 축력과의 관계를 이용하는 것이다.



그림 5. 자기이방성센서를 이용한 앵커의 축력 측정

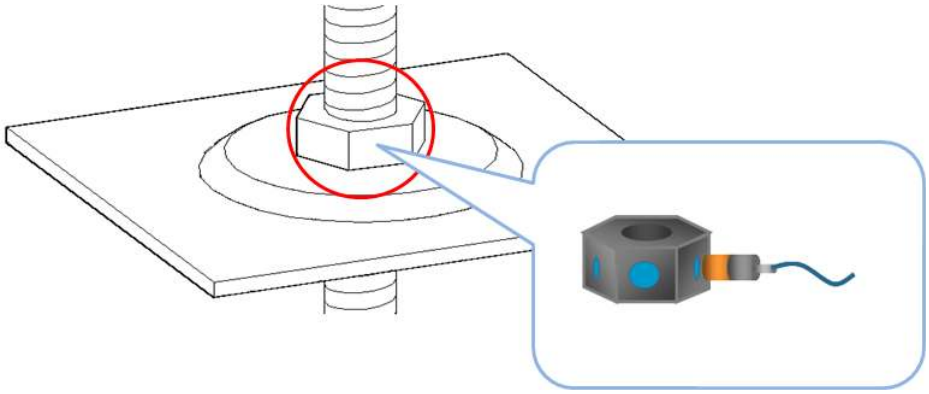


그림 6. 앵커의 머리 부분과 너트

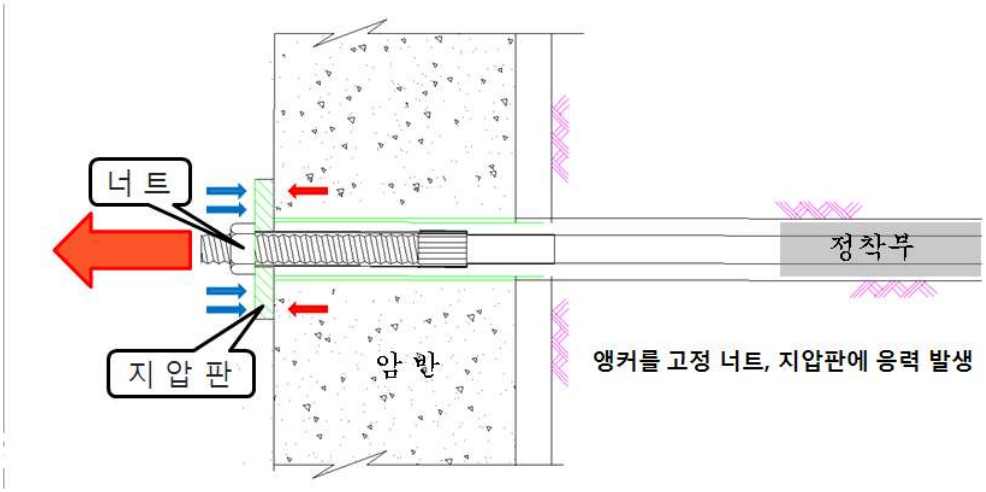


그림 7. 앵커 구조의 개략도

6.2 앵커의 축력 측정 방법

① 측정에 앞서 센서 데이터 읽음값의 출력전압 상태를 확인하여 이상이 없는지 확인한다.

② 계측을 수행하기 전 그라인더 혹은 사포 등을 이용하여 측정면을 깨끗하게 한다.

③ 측정방향을 표시할 표적지를 측정대상면에 부착한다.

④ 자기이방성센서를 이용하여 출력전압을 측정한다.

⑤ 이후 계측빈도에 의거 측정을 수행한다. 측정시 계측시간과 주변여건을 함께 기록한다.

⑥ 1회 측정시 동일한 측정지점에서 2~3회 반복 측정을 수행한다.

⑦ 측정된 출력전압은 실내실험에서 도출된 자기이방성센서의 출력전압과 앵커의 축력 관계를 이용하여 응력으로 환산한다.

6.3 계측 빈도

계측 빈도는 계측의 중요성 목적 공사의 진척 정도, 계측방법 및 공사 중 발생하는 변위량의 크기 및 증가 속도 등에 따라 달리 결정 되어야 한다. 지반의 거동은 일일 굴토량과 작업기계, 기상(우천)등에 영향을 받으므로 Data의 변화속도와 안정성 여부의 관련성을 충분히 고려하여 적절한 측정 빈도를 설정해야 한다. Data의 변화속도가 빠른 계측항목의 측정 빈도는 높이고, 반대로 장기간에 걸쳐 변화량이 미세한 계측항목은 빈도를 낮추는 것이 좋으며, 안전과의 관련성이 깊은 계측항목은 빈도를 높일 필요가 있다.

7. 강교량 부재의 비파괴 응력 측정방법

7.1 강교량 부재의 응력 측정 목적

일반적으로 강재는 콘크리트에 비해 고강도 재료이므로 교량의 경량화 및 장대화가 가능하다는 장점이 있지만, 이로 인해 활화중이 차지하는 비율이 콘크리트 교량에 비해 크므로 피로의 영향을 많이 받고. 도장과 피막이 열화된 경우 부식의 영향을 받기 쉬운 약점도 있다. 이와 같은 피로와 부식에 의한 손상은 시간경과에 따라 누적되는 성질이 있으므로 강교량의 수명을 지배하는 중요한 변수가 된다. 그 외 강교량에 빈번히 생기는 손상으로는 고장력 볼트의 지연파괴, 마모에 외화열화손상, 화재로 인한 손상, 시공 부주의로 인한 변형 등이 있다.



그림 8. 강교량 BOX 내부의 누수인한 부식

7.2 강교량 부재의 응력측정방법

① 측정에 앞서 센서 데이터 읽음값의 출력전압 상태를 확인하여 이상이 없는지 확인한다.
② 계측을 수행하기 전 그라인더 혹은 사포 등을 이용하여 측정면을 깨끗하게 한다.
③ 측정방향을 표시할 표적지를 측정대상면에 부착한다.
④ 자기이방성센서를 이용하여 출력전압을 측정한다.
⑤ 이후 계측빈도에 의거 측정을 수행한다. 측정시 계측시간과 주변여건을 함께 기록한다.
⑥ 1회 측정시 동일한 측정지점에서 2~3회 반복 측정을 수행한다.
⑦ 측정된 출력전압은 응력감도곡선을 이용하여 응력으로 환산한다.

7.3 계측 빈도

계측 빈도는 계측의 중요성 목적 공사의 진척 정도, 계측방법 및 공사 중 발생하는 변위량의 크기 및 증가 속도 등에 따라 달리 결정 되어야 한다. 지반의 거동은 일일 굴토량과 작업기계, 기상(우천)등에 영향을 받으므로 Data의 변화속도와 안정성 여부의 관련성을 충분히 고려하여 적절한 측정 빈도를 설정해야 한다. Data의 변화속도가 빠른 계측항목의 측정 빈도는 높이고, 반대로 장기간에 걸쳐 변화량이 미세한 계측항목은 빈도를 낮추는 것이 좋으며, 안전과의 관련성이 깊은 계측항목은 빈도를 높일 필요가 있다.

8. 계측결과분석 및 관리

8.1 응력감도곡선 작성

계측 전 계측 대상물과 동일한 강종의 시험편에 대하여 하중재하실험을 수행하여 스트레인 게이지와 자기이방성센서로 구하여진 응력과 출력전압의 상관관계 곡선을 도출한다. 도출된 응력감도곡선을 이용하여 측정대상물의 계측위치를 선정한 후 자기이방성센서로 응력 계측을 수행한다.

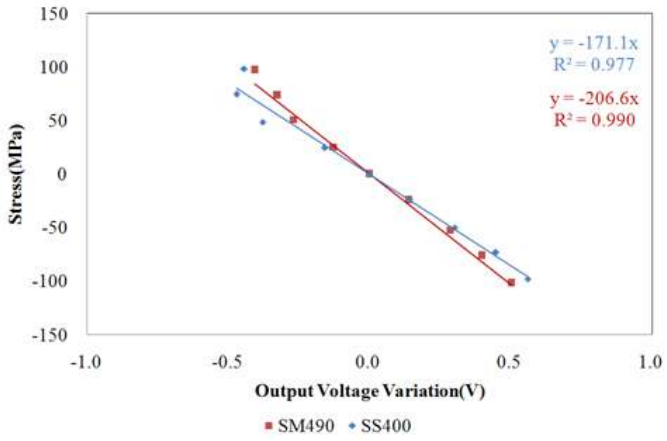


그림 9. 응력감도곡선 예

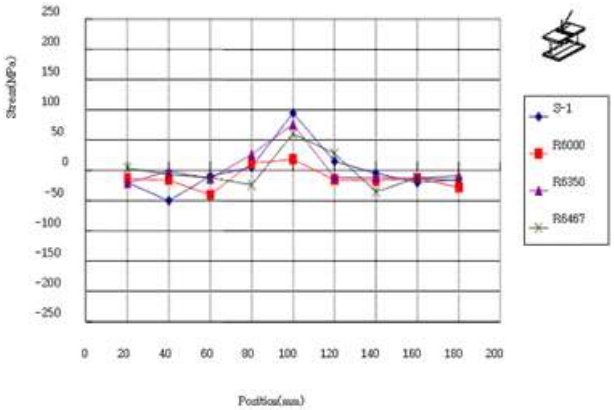


그림 10. 자기이방성센서를 이용한 H-형강의 응력분포 예

8.2 앵커축력-출력전압 상관관계 분석

계측전 계측 대상물과 동일한 강종의 시험편에 대하여 하중재하실험을 수행하여 로드셀과 자기

이방성센서로 구하여진 앵커의 축력과 출력전압의 상관관계 곡선을 도출한다. 도출된 앵커 축력-출력전압의 관계식을 이용하여 측정대상물의 계측위치를 선정한 후 자기이방성센서로 응력 계측을 수행한다.

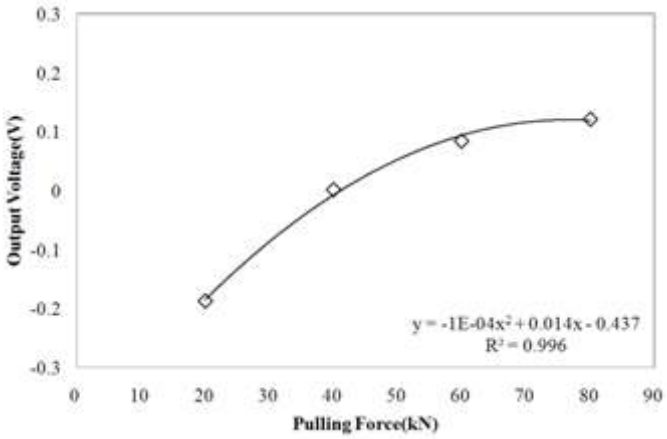


그림 11. 앵커의 축력과 출력전압의 상관관계 예

8.3 계측자료의 수집 및 정리

계측기의 측정은 앞에서 언급한 바와 같이 계측의 원리와 목적을 이해하고 있는 경험있는 기술자에 의해서 수행되어야 한다. 계측시에는 일상오차(부주의, 오독, 계산실수), 계기오차(편차 미조정, 영점 미조정 등), 환경오차(기후, 습도, 먼지, 침식 등), 관측오차(시차, 개인오차 등), 특수오차(계측기내 소음) 등이 발생될 수 있으므로 이와 같은 오차를 극소화할 수 있도록 계획단계에서 분석단계까지 담당기술자의 체계적인 훈련이 필요하다. 계측결과에 대하여 기록하여야 할 항목으로는 계측번호, 일시, 계측대상물, 측정자, 기후, 기온, 현장상황, 이상치의 원인 등을 기록해야 한다.

계측기기의 초기치는 신뢰성 있는 기초자료로 활용할 수 있도록 시공 전에 얻어져야 한다. 자료의 수집빈도는 공사정도에 따라 적절하게 결정되어야 하며, 급격한 구조물의 응력변화나 주변구조물에 문제점이 발생되면 그 빈도를 증가시켜야 할 것이다. 측정일시 사이의 공백 기간 중의 변화도 주의 깊게 관찰하여야 하며, 자료 수집 시 공사내용 및 주변상황, 기상조건 등도 면밀히 기록하여 분석시 유효 적절히 이용 가능하도록 조치하는 것이 바람직하다. 현장에서 얻어진 자료는 즉시 공사현황 및 기상상태 등을 고려하여 분석하고, 도표 등으로 가시화함으로써 대상구조물 및 주변건물 등의 현재 상황을 판단하고 이를 예측치와 비교하여 그 차이에 대한 연구를 통해 원인을 규명하여 공사의 안정성을 판단할 수 있도록 한다.

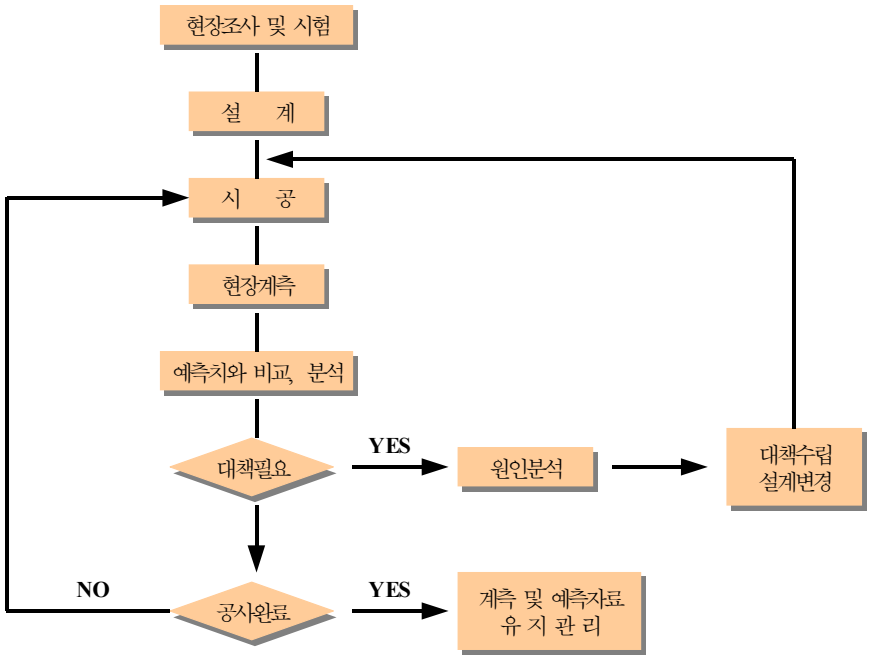


그림 12. 계측자료의 수집 흐름도

수집된 계측결과는 다음과 같은 두 가지 항목에 대해 정리되어야 한다. 첫째, 즉각적인 조치를 필요로 하는 갑작스런 변화가 발생했는지 판단하기 위해 계측결과에 대한 신속한 평가가 이루어져야 한다. 둘째, 관찰된 거동사이에 발생하는 경향을 파악하기 위해 계측결과 처리에 의한 결과의 도시와 요약이 필요하다.

① 계산쉬트(Calculation sheet)

계측결과를 변위, 압력, 변형율, 하중 등의 공학적인 의미를 갖는 값으로 변환시키기 위해 계산쉬트에 옮긴다. 이 작업은 일반적으로 측정 후 24시간이내에 수행하는 것이 바람직하다. 계산쉬트에는 방정식, 보정계수, 영점, 수정계수 등 계산에 필요한 항목이 포함된다.

② 요약쉬트(Summary sheet)

계산쉬트에는 일반적으로 계측기술자, 시공자, 설계자, 발주자 등이 검토하기에는 너무 방대하므로 이를 측정날짜. 시간, 측정치 비교 등을 포함하는 요약쉬트에 옮겨 기록한다. 이 목록에 따라 계측결과의 로깅이 이루어지게 된다.

③ 데이터 플로트(Data plots)

수치 Data는 그래프 형태로 요약되는 것이 바람지하며, 이는 계측치의 정확도가 부족하여 큰 오차를 포함하는 Data 읽음이나, 오산 진동 등에 의한 계측의 경향이나 실제 변화 형태를 구분, 판단하기 위해 필요하다.

9. 주의사항

강재의 경우 센서를 이용하여 측정하기 이전에 계측할 위치의 표면 이물질이나, 도장을 제거한 후 사용하여야 하며, 계측 후 표면에 녹이 생기지 않도록 표면을 처리하여야한다. 또한 전자기장 영향범위 이내에 있으면 데이터의 정밀도가 떨어지며, 강구조물에 한정해서 사용이 가능하다.