한국지반환경공학회 논문집
제12권 제11호 2011년 11월 pp. 71~77

# 자기이방성센서를 이용한 강판의 비파괴 응력 계측에 관한 연구

# A Study on Non-destructive Stress Measurement of Steel Plate using a Magnetic Anisotropy Sensor

김 대 성[1] · 문 홍 득† · 유 지 형[2]
Kim, Daesung · Moon, Hongduk · Yoo, Jihyeung

**ABSTRACT :** Recently, non-destructive stress measurement method using magnetic anisotropy sensor has been applied to the construction site such as steel bridges and steel pipes. In addition, steel rib used in the tunnel construction site was found to be possible to measure the stress by non-destructive method. In this study, steel loading experiments using magnetic anisotropy sensor developed in Japan and strain gauges were conducted to derive stress sensitivity curve for domestic steel SS400. Also, additional steel loading experiments and numerical analysis were performed for evaluation of applicability for non-destructive stress measurement method using magnetic anisotropy sensor. As a result of this study, stress sensitivity curves for domestic steel SS400 were derived using output voltage measured by magnetic anisotropy sensor and average of stress measured by strain gauges depending on the measurement location. And as a result of comparing additional steel loading experiments with the numerical analysis, error level of magnetic anisotropy sensor is around 20MPa. When considering the level of the yield stress(245MPa) of steel, in case of using magnetic anisotropy sensor in order to determine the stress status of steel, it has sufficient accuracy in engineering. 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.

**Keywords :** Magnetostriction, Magnetic anisotropy, Non-destructive, Stress measurement, Steel structure

**요 지 :** 최근 들어 자기이방성센서를 이용한 비파괴응력계측기법은 강교나 강관 등의 건설 분야에서 적용되어지고 있다. 또한 터널건설현장에서 이용되는 강지보재에 대해서도 적용한 사례가 있다. 본 연구에서는 일본에서 개발된 자기이방성센서와 스트레인 게이지를 이용하여 국산 강재인 SS400에 적합한 응력감도곡선을 도출하기 위해 강재하중재하실험을 수행하였다. 또한 자기이방성센서를 이용한 비파괴 응력계측기법의 적용성을 평가하기 위하여 추가 강재하중재하실험과 수치해석을 실시하였다. 본 연구의 결과, 계측위치에 따라 자기이방성센서에서 측정된 출력전압과 스트레인 게이지로 측정된 응력의 평균을 이용하여 국산 강재인 SS400에 적합한 응력감도곡선을 도출하였다. 그리고 추가 강재하중재하실험과 수치해석을 비교한 결과, 자기이방성센서의 오차범위가 약 20MPa 정도임을 알 수 있었다. 자기이방성센서를 강재의 응력상태를 파악할 목적으로 사용할 경우, 강재의 항복응력의 레벨(245MPa)을 고려하면 공학적으로 충분한 정확도를 가지고 있다고 판단된다. 특히 자기이방성센서는 계측 센서가 부착되어 있지 않은 강구조물에서 잔류응력을 고려한 현재상태의 응력을 용이하게 파악할 수 있으며, 강구조물의 유지관리에 편리하게 적용이 가능함을 확인하였다.

**주요어 :** 자기변형, 자기이방성, 비파괴, 응력계측, 강구조물

## 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 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(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 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 임

1) 비회원, 경일대학교 지반방재센터 공학박사
† 정회원, 경남과학기술대학교 건설환경공과대학 토목공학과 교수(E-mail : hdmoon@gntech.ac.kr)
2) 비회원, 경일대학교 건설공학부 교수

의 지점에서의 응력측정에는 부적합하다. 또한 초음파와 자기변형효과를 이용한 방법은 아직 실용화하기에는 어려움이 있으나 이를 위한 연구가 계속 진행되고 있다. 이중 자기변형효과를 이용한 응력 측정 기법은 다른 측정 장치에 비해 경량이고 소형이며, 간편하게 어디서나 필요한 부분의 응력을 비파괴적으로 측정할 수 있다.

본 연구에서는 자기변형효과를 이용하여 강구조물의 비파괴 응력 계측을 위해 개발된 자기이방성 센서의 적용성을 평가하기 위하여 일본에서 제작된 자기이방성센서와 스트레인 게이지를 이용하여 국내 강재(SS400)에 대해 하중재하시험을 수행하였으며, 그 결과를 비교·분석하여 자기이방성센서가 강구조물의 유지관리에 적용 가능한지를 분석하고 평가하였다.

## 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 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 2cm, 높이 3cm)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($\mu_x$)이 y방향 투자율($\mu_y$)보다 커지므로 입력코일(Core-E)에 전류를 흘리면 $E_1$로부터 나온 자속의 대부분은 최단 거리로 직접 $E_2$로 향하지만 투자율의 차이($\mu_x - \mu_y$)로 인하여, $E_1$에서 $D_1$, $D_2$에서 $E_2$로 화살표 방향과 같이 출력코일(Core-D)에 유도전류가 흘러 전압이 발생하게 된다.

출력코일에서 발생되는 출력전압(V)은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$V = N(\mu_x - \mu_y) \tag{1}$$

여기서, $N$은 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 식 (2)와 같은 관계를 가진다.

$$V = K(\sigma_x - \sigma_y) \tag{2}$$

여기서, $K$는 응력감도로 코일 및 재료의 자기적 특성 등에 의해 정해지는 상수이다. 따라서 비례 상수인 $K$를 알 수 있으면, 자기이방성센서의 출력에 의해 응력차를 얻을 수 있

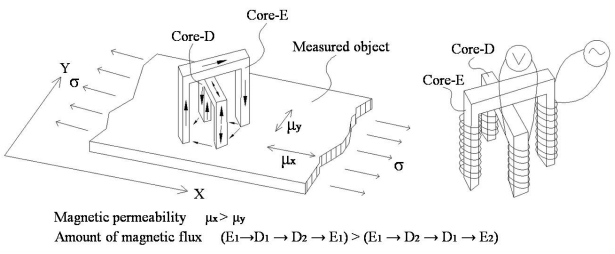


그림 1. 자기이방성센서의 측정원리(Akutagawa 등, 2003)

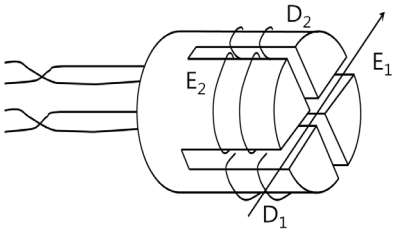


그림 2. 자기이방성센서 측정방향(Akutagawa 등, 2003)

다. 또한 센서 원리에 의해 피측정물에 대하여 회전시켰을 때의 출력전압은 180°의 주기를 가지는 코싸인(cosine) 커브로 나타나며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = K(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\phi \tag{3}$$

여기서, $\sigma_1$, $\sigma_2$는 피측정물에 작용하는 주응력이며, $\phi$는 센서의 측정방향과 주응력 $\sigma_1$의 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 $\sigma_1$의 방향이고 출력방향에서의 주응력차 $(\sigma_1 - \sigma_2)$를 구할 수 있다. 단, 피측정물에 작용하는 응력상태를 모르는 경우는 자기이방성센서를 회전시켜 4방향 계측을 수행할 필요가 있다.

## 3. 강재의 하중재하실험

### 3.1 실험개요

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. 본 연구에서는 응력감도(K)를 도출하기 위하여 자기이방성센서와 스트레인 게이지를 이용하여 그림 3에서 보는 바와 같이 강재의 하중재하시험을 수행하였다. 실험에 사용된 시험편은 국내에서 생산되는 구조용 압연 강재인 SS400을 사용하였으며 시험편의 제원 및 화학구성은 표 1에서 보는 바와 같다. 하중재하는 시험편의 중심점에서 좌우로 75mm 떨어진 지점에 2점으로 재하를 하였으며, 하중단계는 스트레인 게이지의 특성상 측정가능 영역이 탄성영역에 한정되므로 최대 재하하중을 20kN으로 설정하여 각각 0kN, 5kN, 10kN, 15kN, 20kN의 순서로 재하 및 제하를 실시하였다. 실험과정에서 응력은 2

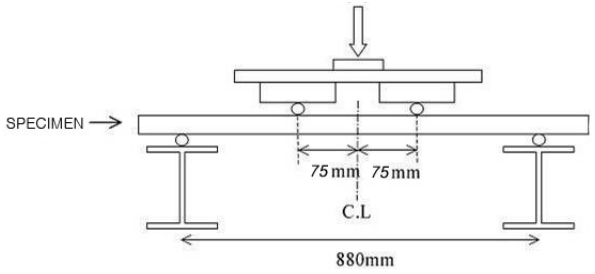


그림 3. 강재의 하중재하시험 모식도

표 1. 시험편의 제원 및 화학구성

| 시험편 제원 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Size | (L)1,000mm×(B)180mm×(T)28mm | | | | | |
| 강종 | SS400(항복강도:245㎫, 인장강도:425㎫, 연신율:23%) | | | | | |
| 시험편의 화학구성(%) | | | | | | |
| C | Si | Mn | P | S | Alt | B |
| 0.18 | 0.02 | 0.81 | 0.011 | 0.006 | 0.025 | 0.0016 |

축 전기저항식 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였으며, 출력전압은 자기이방성센서로 측정하였다. 그림 4는 스트레인 게이지(S/G)와 자기이방성센서(MAS)의 측정위치를 나타내고 있다.

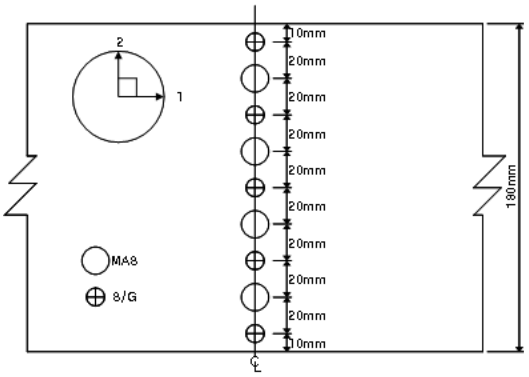


그림 4. 센서 설치 및 측정위치
(S/G : 스트레인 게이지, MAS : 자기이방성센서)

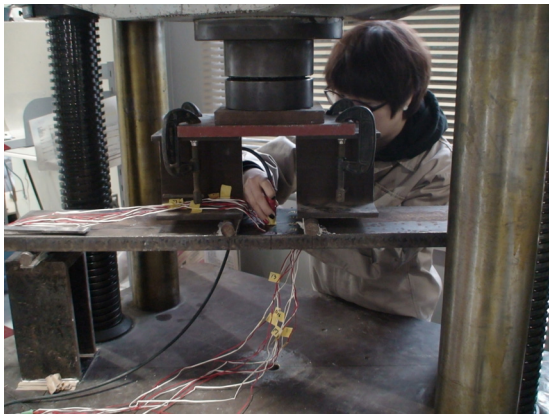

그림 5. 강재의 하중재하시험 전경

### 3.2 실험결과

구조용 압연 강재인 SS400에 대한 응력감도(K)를 도출하기 위하여 하중재하시험을 수행하였다. 그림 6은 하중단계에 따른 측정위치별 스트레인 게이지 측정값을 보여주고 있으며, 그림 7은 하중단계에 따른 측정위치별 자기이방성센서의 측정값을 보여주고 있다. 그림 8은 스트레인 게이지에서 측정된 응력과 자기이방성센서의 출력전압을 나타내고 있다. 여기서 S/G1~S/G5는 강판상부 압축측 스트레인 게이지 측정값을 표시한 것이며, S/G6~S/G10은 강판하부 인장측 스트레인 게이지 측정값을 표시한 것이다. 그리고 MAS1~MAS4는 강판상부 압축측 자기이방성센서 측정값을 표시한 것이며, MAS5~MAS8은 강판하부 인장측 자기이방성센서 측정값을 표시한 것이다.

실험결과, 그림 6에서 보는 바와 같이 스트레인 게이지의 측정값은 측정위치에 상관없이 하중단계에 따라 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 그림 7에서 보는 바와 같이 자기이방성센서의 측정값은 2번 지점과 5번 지점에서 값이 다소 차이가 나고 있지만, 전반적으로 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

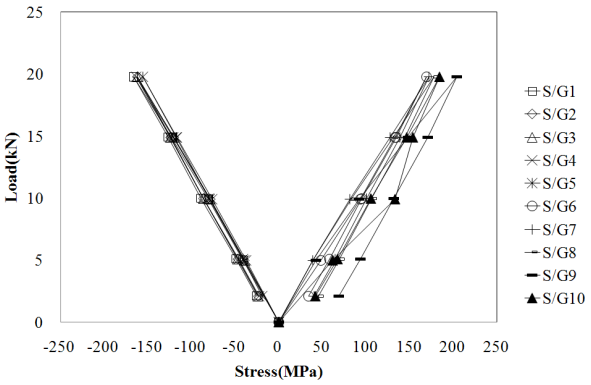


그림 6. 하중단계-측정위치별 스트레인 게이지 측정값

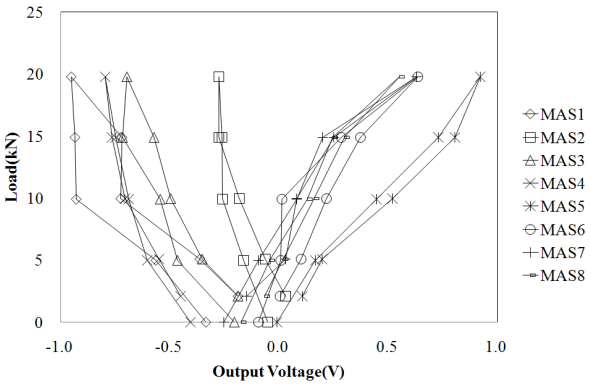


그림 7. 하중단계-측정위치별 자기이방성센서 측정값

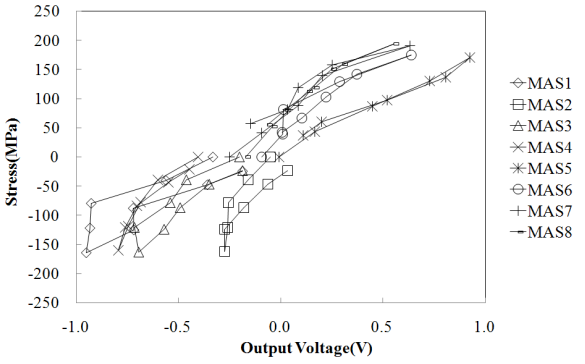


그림 8. 측정위치별 응력-출력전압

### 3.3 응력감도 곡선

실험결과를 토대로 스트레인 게이지로 측정된 응력과 자기이방성센서로 측정된 출력전압을 그림 9에서 보는 바와 같이 다양한 패턴의 근사곡선으로 작도하여 분석하였다. 분석 결과, 그림 10과 같이 응력과 출력전압을 평균한 데이터를 이용한 결과가 가장 적합한 것으로 나타났으며, 이를 SS400 강재의 응력감도곡선으로 선정하였다. 또한 하중을 재하하지 않은 상태에서 부(-)의 출력전압이 검출되고 있으므로 압축 잔류응력의 존재를 확인할 수 있다.

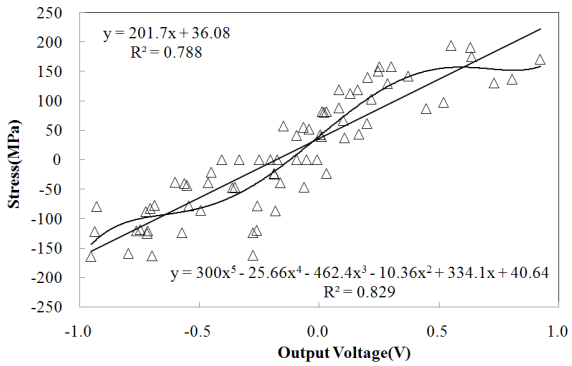


그림 9. 응력-출력전압 회귀분석

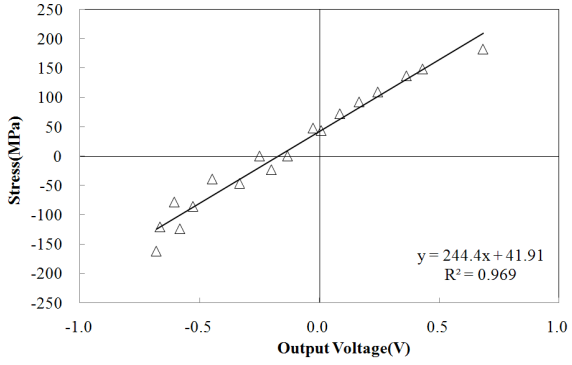


그림 10. SS400 강재에 대한 응력감도곡선

## 4. 강재의 비파괴 응력 계측 적용성 분석

### 4.1 하중재하실험을 통한 응력감도곡선 적용

국내에서 생산되는 SS400 강재에 대한 응력감도곡선을 실내실험을 통하여 구하였다. 실험결과로 얻은 응력감도곡선 및 센서의 적용성을 평가하기 위하여 추가로 강재의 하중재하실험을 수행하였다. 실험에 사용된 강재는 응력감도곡선을 구한 강재와 동일한 SS400 강재를 이용하였으며, 시험편의 크기는 (L)500mm×(B)180mm×(T)28mm이고, 시험편의 중앙에서 좌우로 50mm 떨어진 지점에 2점 재하하였다. 하중단계는 0kN, 5kN, 10kN, 15kN, 20kN의 순서로 재하 후 제하를 2회(1st, 2nd) 반복하였다. 자기이방성센서와 스트레인 게이지의 측정 위치는 응력감도곡선 작도를 위한 실험과 동일한 지점에서 측정하였으며, 자기이방성센서에서 측정된 출력전압은 도출된 응력감도곡선에 대입하여 응력을 계산하여 스트레인 게이지에서 측정된 응력과 비교하였다. 그림 11은 응력 측정용 시험편을 보여주고 있으며, 그림 12는 하중단계별 스트레인 게이지와 자기이방성센서의 응력측정 결과를 보여주고 있다. 여기서 S/G(1st)와 MAS(1st)는 1차 하중 재하 및 제하 시 측정된 스트레인 게이지와 자기이방성센서의 응력 측정값이며, S/G(2nd)와 MAS(2nd)는 2차 하중 재하 및 제하 시 측정된 스트레인 게이지와 자기이방성센서의 응력 측정값이다.

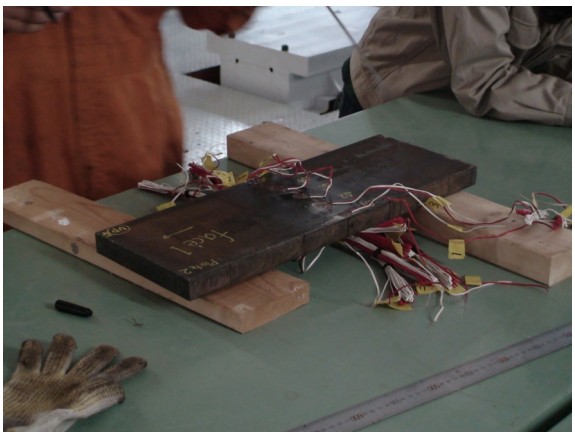

그림 11. 응력 측정용 시험편

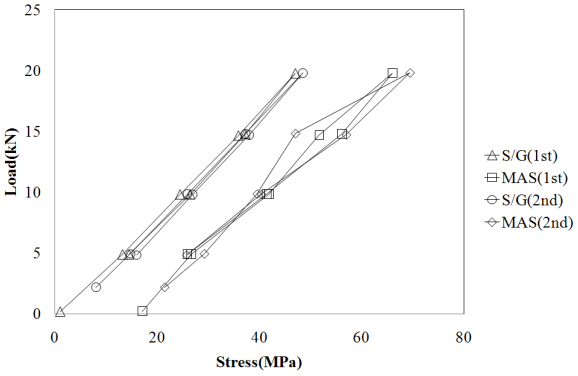


그림 12. MAS-S/G 응력측정결과 비교

실험결과, 그림 12에서 보는 바와 같이 SS400 강재에 대한 자기이방성센서에서 측정한 응력과 스트레인 게이지를 이용하여 측정된 응력을 비교하여 볼 때, 첫 번째 실험에서 두 센서간의 응력차는 13~19MPa 정도의 차이를 보이고 있고, 두 번째 실험에서는 9~20MPa 정도의 차이를 보이고 있고, 스트레인 게이지와 자기이방성센서로 측정된 응력은 하중단계에 따라 거의 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

### 4.2 수치해석을 통한 응력 거동 비교

국내에서 생산되는 SS400 강재에 대한 하중재하실험으로부터 측정한 자기이방성센서와 스트레인 게이지의 응력과 구조해석 유한요소 프로그램인 SAP2000과 MIDAS CIVIL을 이용하여 얻은 결과를 비교·분석하였다. 강재실험과 동일한 모델링을 위하여 SAP2000에서 시험편을 모델링한 후 MIDAS CIVIL과 호환하여 해석을 수행하였다. 그림 13은 모델링된 시험편을 나타내고 있으며, 그림 14는 20kN 하중재하 수치해석 결과로 강판의 응력분포를 나타내고 있다.

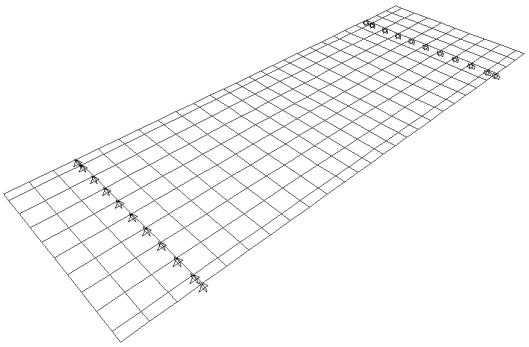

그림 13. 수치해석 모델링

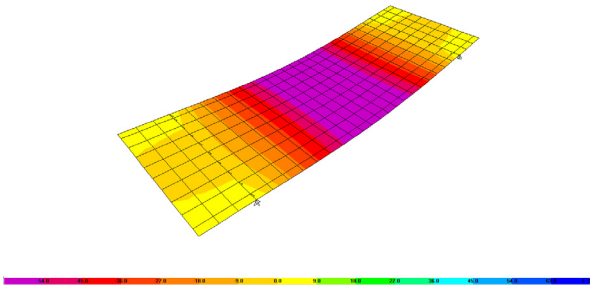

그림 14. 수치해석결과(20kN 재하 시 응력분포)

실내실험과 수치해석 결과를 분석한 결과, 그림 15는 스트레인 게이지에서 측정된 응력과 수치해석결과를 나타내고 있으며, 그림 16은 자기이방성센서에서 측정된 응력과 수치해석결과를 나타내고 있다. 그림 17은 스트레인 게이지와 자기이방성센서에서 측정된 응력과 수치해석 결과를 함께 나타내었다.

그림 15에서 보는 바와 같이 스트레인 게이지로 측정된 응력과 수치해석 결과는 하중단계가 증가할수록 차이가 커지며 최대 14MPa 정도로 스트레인 게이지에서 측정된 응력

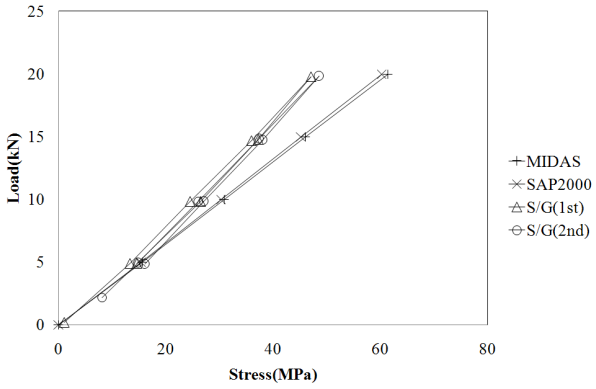


그림 15. S/G-수치해석 비교

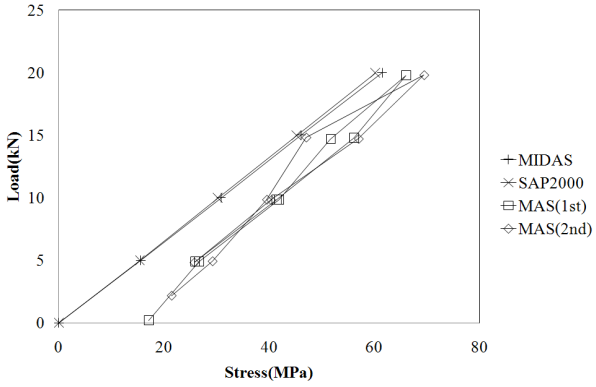


그림 16. MAS-수치해석 비교

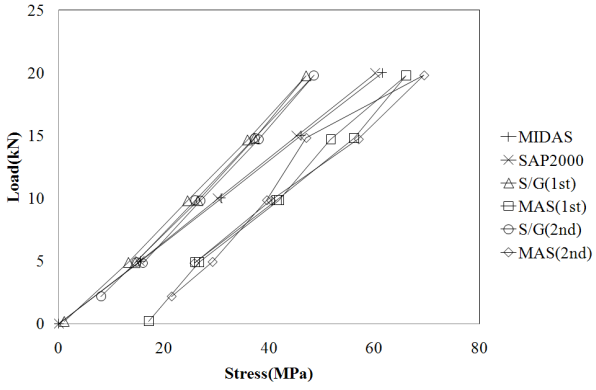


그림 17. MAS-S/G-수치해석 비교

이 작게 나타나고 있다. 스트레인 게이지를 이용한 실험결과와 수치해석이 차이를 보이는 것은 실내 실험 시 발생한 실험오차와 완전 탄성모델로 수치해석을 수행한 결과의 차이로 판단된다.

또한 그림 16에서 보는 바와 같이 자기이방성센서로 측정된 응력과 수치해석 결과는 최대 17MPa 정도 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 자기이방성센서의 경우 하중을 재하하지 않은 상태에서 응력값이 나타나는 이유는 잔류응력의 영향인 것으로 판단되며, 그림 17에서 보는 바와 같이 자기이방성센서와 스트레인 게이지, 수치해석 결과를 종합적으로 비교해 보면 하중단계에 따라 유사한 응력 거동을 보이고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

토목구조물에 많이 사용되고 있는 강재는 압연, 냉각, 휨가공 등이 이루어진 후 설치되므로 각각의 강구조물의 경우 잔류응력이 포함되어져 있다. 기존의 스트레인 게이지는 잔류응력이 포함된 절대응력을 구할 수 없다. 강구조물의 건전성 평가를 위해서는 잔류응력을 포함한 응력이력과 상태파악이 매우 중요하다. 본 연구에서는 일본에서 개발된 자기이방성센서와 스트레인 게이지를 이용하여 국내에서 생산되는 SS400 강재에 적합한 응력감도곡선의 작성을 위하여 강재의 하중재하 실험을 실시하였다. 결과 분석을 통해 계측 위치에 따른 출력전압과 응력의 평균값을 이용하여 응력감도곡선을 도출하였다. 또한 비파괴 응력 계측 기법의 적용성을 평가하기 위하여 실내실험과 수치해석을 실시한 결과, 자기이방성센서로 측정된 응력과 스트레인 게이지에서 측정된 응력, 수치해석 결과를 비교하여 볼 때 자기이방성센서의 오차범위가 약 20MPa 정도임을 알 수 있었다. 자기이방성센서를 강재의 응력상태를 파악할 목적으로 사용할 경우, 강재의 항복응력의 레벨(245MPa)을 고려하면 공학적으로 충분한 정확도를 가지고 있다고 판단되며, 특히 계측센서가 부착되어 있지 않은 강구조물에 있어 현재 상태의 응력을 용이하게 파악할 수 있어 토목구조물에 다양하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원「09기술혁신E03」에 의해 수행되었습니다.

# 참 고 문 헌


1. 吉永昭男, 瀧澤千嘉予(1977), 磁氣ひずみ效果を利用した殘留應力の測定, *日本機械論文集*, 43-365, p. 65.
2. Abuku S. (1977), Magnetic Studies of Residual Stress in Iron and Steel Induced by Uniaxial Deformation, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 16, No. 7, pp. 1161～1170.
3. Akutagawa S., Matsuoka, K., Sekimoto, H., Kobayashi, T., Uda T., Ota M. and Yasuhara K. (2003), Use of Magnetic Anisotropy Sensor for Nondestructive Stress Measurement of H-beams used in Tunnel Support Systems, *Proceedings of the 39th US Rock Mechanics Symposium*, MIT, pp. 2691～2696.
4. Kashiwaya, K., Sakamoto H. (1985), Stress Measurement using a Magnetic Anisotropy Sensor with Help of Alternating Current Demagnetization, *Japanese Society Non-Destructive Inspection*, Vol. 34, No. 3, pp. 201～20.
5. Sakai, Y., Tamura N. (2000), Experimental Research for Estimating Erection Stress of Steel Bridge using Magnetic Anisotropy Sensor, *Proceeding of the SEIKEN SYMPOSIUM,* No. 26, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, pp. 61～70.


(접수일: 2011. 9. 3 심사일: 2011. 9. 20 심사완료일: 2011. 10. 6)