

## 자기이방성센서를 이용한 강지보 철도구조물의 비파괴 응력계측 Non-destructive Stress Measurement on H-shape beam in the Temporary Structure of the Railway using Magnetic Anisotropy Sensor

이승원\*<sup>†</sup>, 유지형\*\* , 김대성\*\*

Seong-Won Lee \*<sup>†</sup>, Ji-Hyeung Yoo \*\* , Dae-Sung Kim \*\*

**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 and strain gauges were conducted to derive stress sensitivity curve for general structural rolled steel SS400 that is commonly used in civil engineering structures. As a result of laboratory experiments, stress sensitivity curves for general structural rolled 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. In addition, for the field application test of the magnetic anisotropy sensor, field experiments were conducted for the two most loaded places, H-pile and inclined struts, in the temporary structure of the railway sites. The field experiment results show a similar trend in the measured values by the magnetic anisotropy sensor and by the strain gauge, with an error of about 20MPa between the two methods, which is a sufficient resolution for engineering compared with 250MPa, the yield strength of general steels.

**Keywords :** Magnetic anisotropy sensor, H-shape beam, Railway, Non-destructive, Stress measurement

초 록 최근 자기이방성센서를 이용한 비파괴 응력계측은 강교나 강관 등의 구조물 분야에서 적용되고 있으며, 터널현장에서 이용되는 강지보재에 대해서도 적용한 사례가 있다. 본 연구에서는 자기이방성센서와 스트레인게이지를 이용하여 토목구조물에서 보편적으로 사용되는 일반구조용 압연강재인 SS400에 적합한 응력감도곡선을 도출하기 위해 강제 하중재하 실험을 수행하여 계측위치에 따른 자기이방성센서에서 측정된 출력전압과 스트레인게이지로 측정된 응력의 평균을 이용하여 일반구조용 압연강재인 SS400에 적합한 응력감도곡선을 도출하였다. 또한 자기이방성센서의 현장적용성을 평가하기 위하여 철도현장의 강지보 가시설 철도구조물에서 하중을 가장 많이 받는 엄지말뚝과 경사스트럿에 현장 실험을 실시하였다. 현장실험결과, 스트레인게이지로 측정된 응력값과 자기이방성센서로 측정된 응력값이 유사한 경향을 나타내고 있으며, 스트레인게이지 대비 자기이방성센서의 오차는 약 20MPa 정도로 나타났다. 이는 일반적인 강재의 항복강도인 250MPa과 비교하여 볼 때 공학적으로 충분한 해상도를 가짐을 알 수 있다.

주요어 : 자기이방성센서, 강지보, 철도구조물, 비파괴, 응력계측

† 교신저자: 경북대학교 건설환경디자인과(swlee@kbu.ac.kr)

\*\* 경일대학교 지반방재센터

# 1. 서론

토목구조물에서 주로 사용되고 있는 강재는 압연, 냉각, 험가공 등이 이루어진 후 설치되므로 각각의 강구조물의 경우 잔류응력이 포함되어져 있다. 강구조물의 건정성 평가를 위해서는 잔류응력을 포함한 응력이력과 상태파악이 매우 중요하다. 강재의 응력 및 잔류응력을 측정하는 방법은 여러 가지가 있지만 두 가지로 대별하면 스트레인게이지로 응력의 변화를 측정하는 방법과 X-선, 초음파, 자기변형효과 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. 본 연구에서는 자기변형효과를 이용하여 강재의 비파괴 응력 계측을 위해 개발된 자기이방성센서를 이용하여 실내실험 및 강지보 철도구조물에 대한 현장실험을 수행하였으며, 그 결과를 비교·분석하여 자기이방성센서의 강지보 가시철 구조물에 대한 적용성 여부를 평가하였다.

# 2. 본론

## 2.1 자기이방성센서

### 2.1.1 자기이방성센서의 측정원리

강자성체(ferromagnetic substance)를 자화(magnetization) 시킬 때 강자성체에 가해진 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.

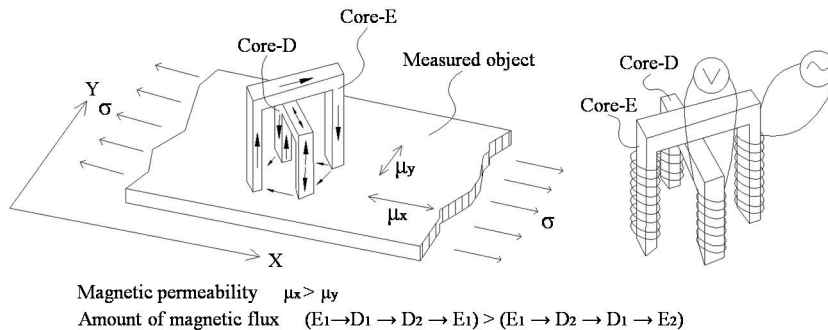


Fig. 1 Measurement principles of magnetic anisotropy sensor

자기이방성 센서는 다양한 종류가 존재하는데, 본 연구에서 적용한 것은 4족 원주형(직경 3cm, 높이 6cm)이며, 4족의 대각선상에 각각 출력코일(Core-D)과 입력코일(Core-E)이 감겨져 있다. 그림 1과 같은 응력상태를 고려하면 피측정물의 투자율은 x방향 투자율( $\mu_x$ )이 y방향 투자율( $\mu_y$ )보다 커지므로 입력코일(Core-E)에 전류를 흘리면  $E_1$ 로부터 나온 자속의 대부분은 최단거리로 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.

### 2.1.2 자기이방성센서의 구성

자기이방성 센서는 측정프로브와 측정시스템으로 이루어져 있다. 측정프로브는 그림 2와 같이 4족 원주형의 순철에 코일을 감고 외부 노이즈를 제거하기 위해 플라스틱 보호캡을 씌웠다. 그리고 측정시스템은 크게 입력부와 출력부의 두 가지 부분으로 나눌 수 있다. 입력부는 프로브와 회로에 전원을 공급해 주는 부분이며, 출력부는 프로브에서 검출된 전압을 증폭하여 필터링을 거쳐 측정자가 읽을 수 있게 디스플레이 해주는 부분이다. 그림 3은 자기이방성센서 측정시스템의 블록도를 나타내고 있다.

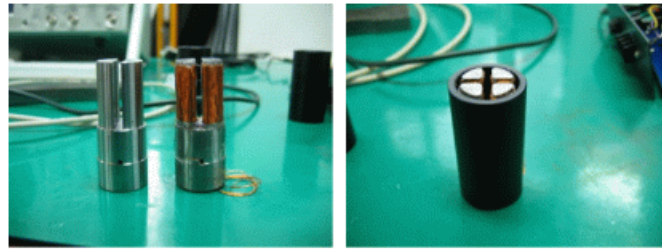


Fig. 2 Measurement probe of magnetic anisotropy sensor

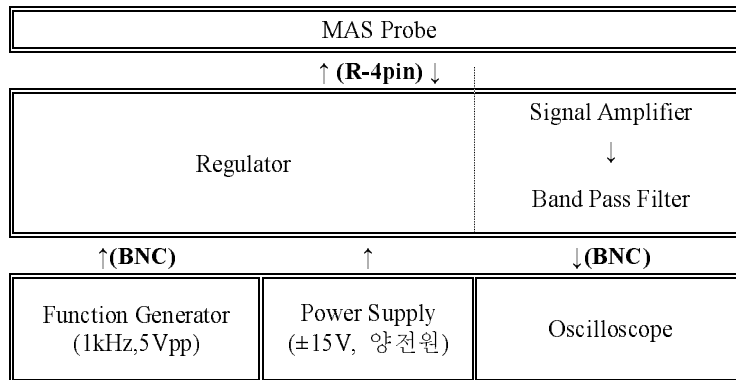


Fig. 3 Measurement system block diagram of magnetic anisotropy sensor

## 2.2 실내실험

### 2.2.1 실험개요

자기이방성 센서는 피측정물의 투자율이 응력상태에 따라 변화하는 것을 센서를 이용하여 출력전압으로 측정하는 방법이다. 따라서 출력전압을 응력으로 환산하기 위하여 강제마다 출력전압과 응력의 관계를 실험을 통하여 사전에 도출하여야 한다. 본 연구에서는 출력전압과 응

력의 관계를 도출하기 위하여 자기이방성 센서와 스트레인게이지를 이용하여 그림 4에서 보는 바와 같이 강제 하중재하시험을 수행하였다. 실험에 사용된 시험편의 제원 및 화학구성은 표 1에서 보는 바와 같으며, 하중단계는 각각 0kN, 5kN, 10kN, 15kN, 20kN의 순서로 재하를 실시하였다. 실험과정에서 응력은 2축 전기저항식 스트레인게이지를 이용하여 측정하였으며, 출력전압은 자기이방성 센서로 측정하였다.

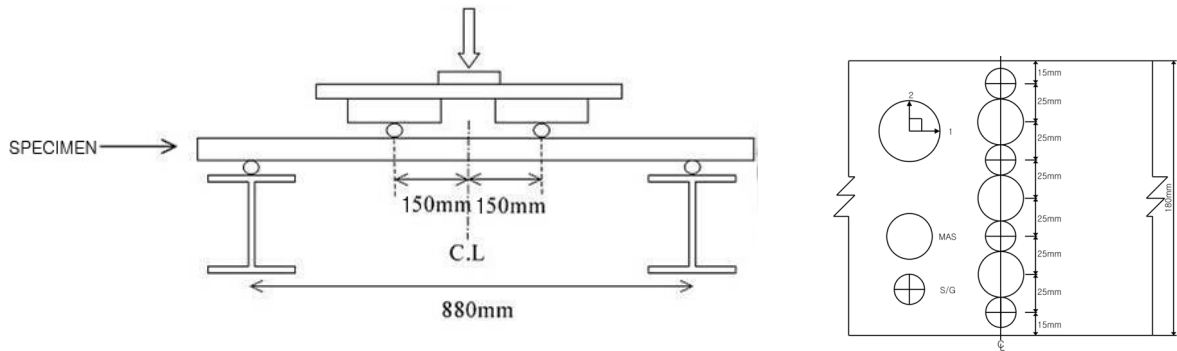
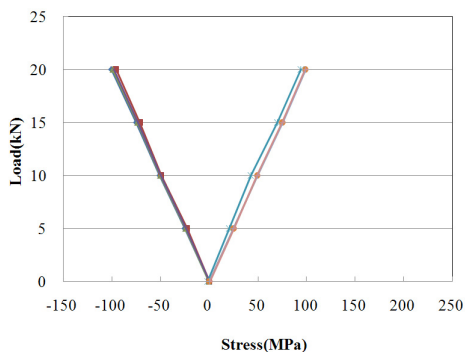


Fig. 4 Experimental schematic of Steel loading

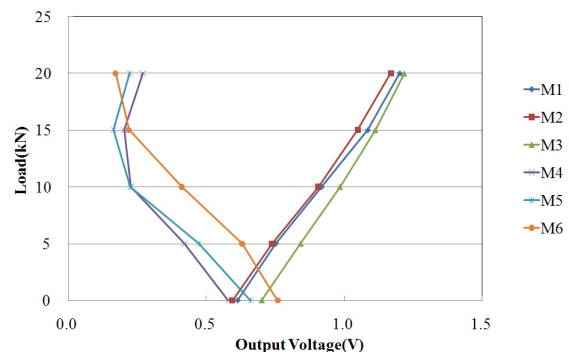
Table. 1 Specification and chemical composition of the specimen

Specification						
Size	(L)1,000 mm×(B)180 mm×(T)28 mm					
Type	SS400(Yield strength : 245MPa, Tensile strength : 425MPa, Elongation:23%)					
Chemical composition(%)						
C	Si	Mn	P	S	Alt	B
0.18	0.02	0.81	0.011	0.006	0.025	0.0016

### 2.2.2 실험결과 및 분석



(a) Strain gauge measurement results



(b) Magnetic anisotropy sensor measurement results

Fig. 5 Strain gauge and magnetic anisotropy sensor load step according to the measurement results

강제의 하중재하시험 결과, 스트레인게이지로 측정된 응력과 자기이방성 센서로 측정된 출력

전압의 상관관계를 도출하기 위하여 그림 5에서 보는 바와 같이 하중단계별 자기이방성 센서 측정위치의 좌우 스트레인게이지에서 측정된 응력의 평균값(a)과 자기이방성 센서의 출력전압(b)을 비교하였으며, 그림 6은 측정위치별 응력과 출력전압을 비교하였다. 실내실험 결과를 현장에 적용하기 위하여 그림 7에서 보는 바와 같이 스트레인게이지로 측정된 응력의 변화량과 자기이방성 센서의 출력전압의 변화량이 선형적인 관계를 나타냄을 알 수 있다.

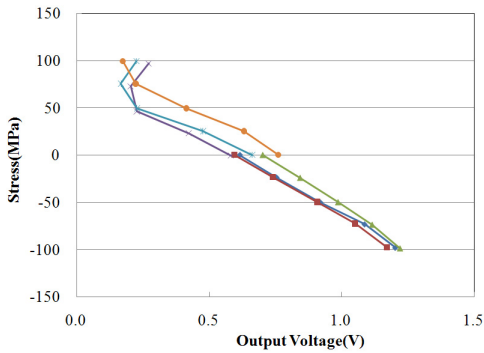


Fig. 6 Stress-Output voltage relationship(measurement locations)

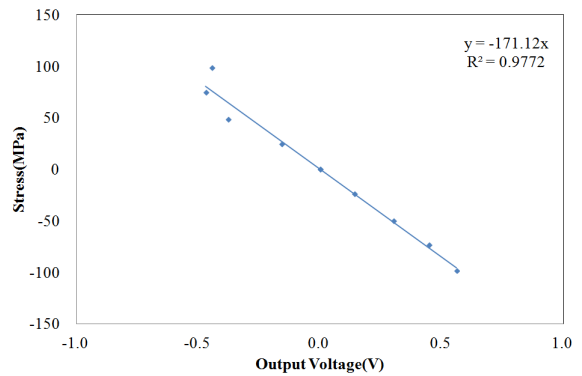


Fig. 7 Stress variance-Output voltage variance relationship

## 2.3 현장실험

### 3.1.1 현장개요

자기이방성 센서를 이용한 강지보 가시철 철도구조물의 비파괴 응력 계측을 위하여 경북 영덕군 남정면에 위치한 동해안 포항~삼척 철도 현장내 가시철 1개소에 현장실험을 수행하였다.



Fig. 8 Measurement probe of magnetic anisotropy sensor

대상 현장의 가시철 공법은 H-Pile+토류벽이며, H-Pile의 강종은 실내실험과 동일한 SS400이다. 시공현황은 초기 계측센서 설치시 약 2m 정도 굴착이 진행된 상태이며, 센서 설치 후 추가로 약 2m 굴착을 수행하였다. 현장실험은 그림 8에서 보는 바와 같이 대상 현장의 가시철 구조물에서 하중을 가장 많이 받는 엄지말뚝과 경사스트럿의 2개소에 스트레인게이지와 자기이방성 센서를 이용하여 현장계측을 실시하였다.

### 3.1.2 현장실험 결과

자기이방성센서를 이용한 강지보 가시설 철도구조물의 현장실험 결과, 그림 10에서 보는 바와 같이 스트레인게이지의 측정값과 자기이방성센서의 측정값이 유사한 경향을 나타내고 있으며, 스트레인게이지 대비 자기이방성센서의 오차는 약 20MPa 정도임을 알 수 있다.

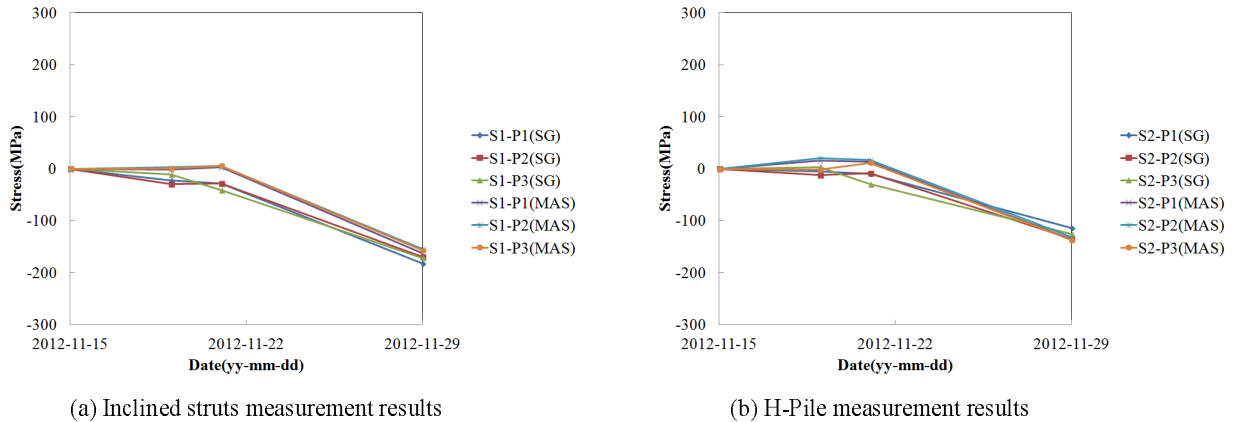


Fig. 10 Strain gauge and magnetic anisotropy sensor measurement results comparison

## 3. 결론

본 연구에서는 철도현장의 강지보 가시설 철도구조물의 비파괴 응력 계측을 위한 자기이방성센서의 적용성에 대한 실험을 수행하였다. 우선 자기이방성센서와 스트레인게이지를 이용하여 토목구조물에 보편적으로 사용되고 있는 SS400에 대한 강제 하중재하실험을 수행하였다. 실내실험결과, 잔류응력을 고려하지 않았을 때, 즉 하중이 가해지지 않은 부재에서 측정된 자기이방성센서의 출력전압을 초기 값으로 두고 하중단계에 따라 변화하는 출력전압의 변화량과 스트레인게이지의 응력 변화량은 선형적인 관계를 나타냄을 알 수 있었다. 그리고 실내실험결과를 토대로 현장실험을 수행하였다. 현장실험은 강지보 가시설 구조물에서 하중을 가장 많이 받는 엄지말뚝과 경사스트럿에 대하여 자기이방성센서와 스트레인게이지를 이용하여 응력의 경시 변화를 측정하여 비교하였다. 현장측정결과, 스트레인게이지의 측정값과 자기이방성센서의 측정값이 유사한 경향을 나타내고 있으며, 스트레인게이지 대비 자기이방성센서의 오차는 약 20MPa 정도로 나타나고 있으며, 이는 일반적인 강재의 항복강도인 250MPa과 비교하여 볼 때 공학적으로 충분한 해상도를 가짐을 알 수 있다.

## 참고문헌

- [1] 김대성, 유지형, 문홍득 (2011) 자기이방성센서를 이용한 강판의 비파괴 응력 계측에 관한 연구, *한국지반환경공학회 논문집*, 12(11), pp.71-77.
- [2] S. Akutagawa, K. Matsuoka, H. Sekimoto, T. Kobayashi, T. Uda, M. Ota and K. Yasuhara (2003) Use of Magnetic Anisotropy Sensor for Nondestructive Stress Measurement of H-beams used in Tunnel Support Systems, *Proceedings of the 39<sup>th</sup> US Rock Mechanics Symposium*, MIT, pp.2691-2696.