

# 자기유도 현상을 이용한 철근의 잔존응력 측정기술 연구

## A Study of Measuring Existing Steel Stress Using Magnetoelasticity

임 홍 철\*

Rhim, Hong-Chul

조 영 식\*\*

Cho, Young-Sik

### Abstract

This study deals with characterization and the application of magnetoelasticity as a device which measures existing steel stress. Available method of measuring existing stress needs break the concrete and cut the steel bar. But Proposed method doesn't need to cut the steel bar. A successful application of magnetoelasticity depends on the linearity of the relationship between the elastic and magnetic response due to loading. To investigate the correlation between two, steel bars are loaded in tension under uniaxial loading while the magnetic reading is recorded. Results showed linearity or partial-linearity of the elastic behavior of steel bars in relation to magnetic change. In the paper, the various factors affecting the measurements are also discussed.

키 워 드 : 비파괴검사, 자기유도, 철근 응력, 자기변형

Keywords : Non-destructive Testing, Magnetoelasticity, steel stress, Magnetostriction

## 1. 연구 배경

콘크리트 구조물은 시간이 지남에 따라 콘크리트의 열화 현상 및 과 응력으로 인한 콘크리트의 탈락으로 인하여 내구성에 큰 영향을 받고 있다. 콘크리트의 성능을 확인하기 위한 방법으로 철근의 응력을 측정하는 방법이 사용되고는 있지만, 철근의 절단을 통한 스트레인의 변화를 응력으로 환산하기 때문에 구조물의 사용성에 큰 영향을 끼치고 있다. 이에 보다 안전하고 사용성이 증대된 철근의 응력측정 방법을 제안하고자 한다.

제안된 철근의 응력 측정 방법은 자기변형 현상을 바탕으로 하고 있다. 자기변형 현상은 어떠한 자성체에 자기장의 변화가 생기면 그 물체에 변형이 생긴다는 것이다. 자기 변형 현상은 자성체나, 변형 가능한 재료 등에서 관찰되는 일반적인 현상이다. 자기변형현상을 이용한 연구는 기계공학분야에서 활발히 이루어지고 있으며 최근 구조물의 성능을 평가하기 위한 연구가 진행되고 있다. 독일 Kassel 대학에서는 프리스트레스 케이 블 표면에 맴돌이전류 센서를 위치시켜 코일의 임피던스를 측정하였고, 강재로 보강된 콘크리트의 응력변화를 유도하였는데 맴돌이전류를 이용한 응력과 변형을 측정법에서 주요한 영향 인자는 잔류응력, 자화, 자왜, 온도, 기하학적 요인으로 나타났다. 또한 강재 케이블의 응력측정을 위한 Remote Coil Magnetoelastic Stress Sensor를 개발하기 위한 연구가 미국에서 수행되었다. 일본에서는 자기변형을 이용하여 철골 구조물의 응력 측정을 목적으로 하여 투자율을 구하는 방법을 이론식으로 나타내

\* 연세대학교 건축공학과 교수

\*\* 연세대학교 건축공학과 석사과정

어, 철근의 잔존 응력을 측정하는 방법에 일본에서 보고되었다.

지금까지의 연구는 인자들 간의 상관관계에 대한 전자기적 특성에 관한 것과 강재 Cable에 관한 것이 주를 이루었다. 하지만 우리나라는 RC구조물이 주를 이루고 있으며 RC구조물의 성능을 평가하기 위한 보다 안정적인 방법의 필요성으로  $\Pi$ 형 전자기변형 센서를 개발하여 철근 응력과 자기 변형과의 관계를 정립하여야 한다.

## 2. 측정 이론 및 실험 방법

### 2.1 측정 이론

모든 자성체는 자기모멘트를 가지고 있으며 각각의 자기모멘트들은 불규칙한 방향성을 가지고 늘어서 있게 된다. 이때의 자기모멘트의 합은 '0' 이고 이를 탈자화 상태라고 한다. 탈자화상태의 자성체에 자기장이 가해지게 되면 자기모멘트가 한 방향으로 늘어서게 되어 각각의 자기모멘트의 합이 일정한 방향성을 가지고 증가하는데 이를 자화라고 한다. 자기모멘트들이 일정한 방향성을 가지게 되면 자성체의 길이가 변화하는 자기변형(Magnetostriction)이 발생하게 된다. 이때 발생하는 자기변형은  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 정도로 극히 작은 값을 가지게 된다. 역으로 자성체에 힘을 가하여 변형을 일으키면 자기모멘트들이 변형을 일으켜 자기장을 형성하게 되는데 이를 역자기변형(Inverse Magnetostriction) 이라고 한다. 본 연구에서 개발한 전자기 변형센서는 이 역자기변형을 이용하여 물체에 변형이나 응력이 작용할 때의 자기적 성질의 변화를 측정하는 것이다.

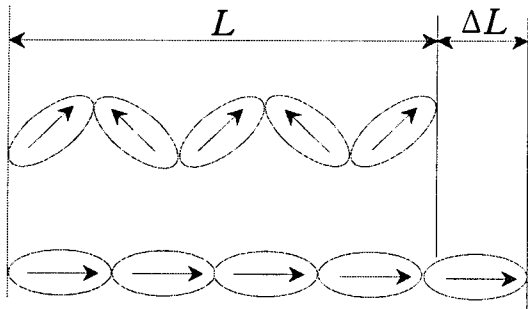


그림 1. 자화현상

## 2.2 실험 장치

전자기변형센서는  $\Pi$ 형으로 보상프로브와 측정프로브, 본체로 구성된다. 각각의 프로브는 코일을 감싼 자기회로로 구성되어 있다. 코일에 전류를 흐르게 하면 자기장이 형성되고 측정 대상체에 응력이 존재한다면 자기가 투과하는 정도에 변화가 있게 된다. 이러한 자기장의 변화는 자기회로를 통하여 불균형 전류로 전환하게 되고 이를 이용하여 응력을 측정하게 된다.

측정을 위해서는 철근이 자성체이므로 철근 자체가 가지고 있는 자기장을 측정하여야 한다. 이를 위하여 보상 프로브를 사용하여 철근 자체의 자기장을 측정하고 측정 프로브로 또 다른 철근을 측정하여 0점 조절을 하게 된다. 이때 사용되는 보상 시편들은 측정 대상체와 같은 재질의 철근을 사용한다. 0점 조절 후 측정 프로브를 대상체에 밀착시켜 대상체의 전압을 측정할 수 있다. 이렇게 측정된 전압 변화의 차이는 측정 철근에 가해진 응력의 변화와 선형관계를 가지며, 이 선형관계는 철근이 항복할 때까지 계속된다.

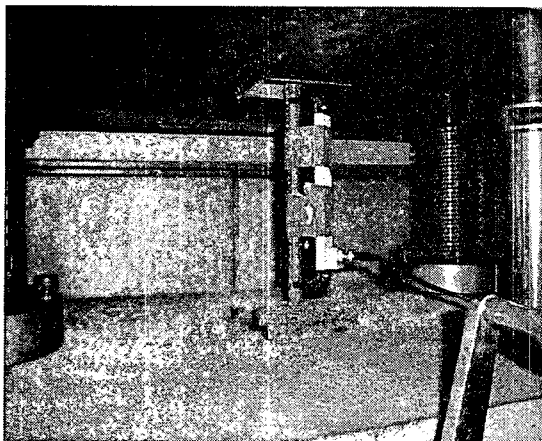


그림 2. 철근에 장착된 측정 프로브

## 2.3 실험 방법

시편은 철근 응력 확인 시편과 자기 변형 확인 시편 두 종류를 제작하였다. 철근응력 확인 시편은 KS 금속재료 인장시험 규격의 시편을 제작하였다. 철근의 직경은 응력을 결정하는 요인이기 때문에 자기변형확인 시편 제작 시 시편의 종류를 16 mm 와 19 mm 두 가지 종류의 시편을 제작하였다. 제작한 시편의 길이는 1000 mm 로 만능재료시험기(UTM)에 장착시키기 위해 양 끝단에 150 mm씩 그립부를 가공하였다. 그립부를 제

위한 총 길이가 700 mm 인 시편을 직경에 따라 7개 씩 준비하여 실험하였다.

먼저 철근의 응력 변형도 곡선을 얻기 위한 실험을 실시하였다. 철근의 항복점을 확인하게 되면 항복에 걸리는 시간과 측정 프로브로 측정된 시간에 따른 전압의 변화와의 비교가 용이해진다. 준비된 시편을 재하속도 4 mm/min 으로 인장 실험을 실시하여 철근의 항복점을 확인하였다. 두 번째로 같은 종류의 시편에 인장력을 가하여 역자기 변형에 의한 전압의 변화량을 측정한다. 역자기 변형에 의한 전압 변화를 측정하려면 먼저 보상 프로브로 측정 대상체와 같은 종류의 철근의 자체적인 전압을 측정하여야 한다. 그 다음 외력을 받지 않는 대상체와 같은 크기와 종류의 철근 시편을 측정 프로브에 접촉시킨다. 두 시편은 어떠한 외력도 받지 않는 상태이므로 전압의 차이는 '0' 이 된다. 이렇게 영점조정을 한 후 측정 프로브에는 실제 측정해야 하는 철근 시편을 접촉시킨 후 테이프고정한 다음 만능재료시험기의 그림에 고정시킨다. 준비가 끝나면 하중을 가해 실험을 실시한다. 만능재료시험기로부터 측정 시편의 응력-변형도 곡선을 얻음과 동시에 자기변형센서를 통하여 시간에 따른 전압의 변화도 기록이 된다.

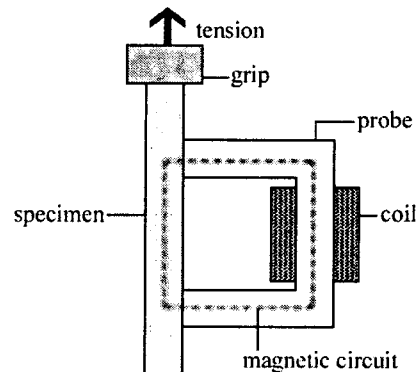


그림 3. 측정 모식도



그림 4. 응력-변형도 곡선 확인

### 3. 실험 결과 및 분석

철근응력 측정실험은 많은 인자들에 대하여 영향을 받을 수 있다. 그 중 대표적인 것들이 철근의 재질, 철근의 직경, 주변 환경 등을 들 수 있다. 이번 실험은 직경의 변화를 Parameter로 하여 직경의 변화에 따른 전압과 응력의 상관관계를 나타내었다. 직경은 19 mm 철근의 시간에 따른 응력의 변화그래프를 나타내었다(그림 5). 실험은 7개의 시편에 대하여 실시되었고, 그 값을 평균하여 그래프로 나타내었다. 직경 19 mm 에 대한 시간 - 전압의 그래프를 표현하였다(그림 6). 이 두 그래프는 항복점 이전까지 혹은 2/3부근 까지 선형 또는 부분적인 선형 관계임을 확인 할 수 있다. 이를 토대로 직경 16 mm, 19 mm 에 전압과 응력의 상관관계식을 분석하면 식(1), 식(2) 와 같다.

$$y = -0.0034x^3 + 0.0446x^2 + 0.3561x - 0.0411$$

..... 식(1) - 직경 16mm 철근

$$y = -0.001x^3 + 0.1022x^2 + 0.214x - 0.0353$$

..... 식(2) - 직경 19mm 철근

실험 결과 응력과 전압은 선형 혹은 부분적인 선형의 관계를 가지고 있음을 알았다. 현장 적용을 위해서는 재질에 변화, 주변 환경 여건들의 변화에 대한 응력 - 전압의 상관 관계등의 인자들에 대한 연구가 필요하다.

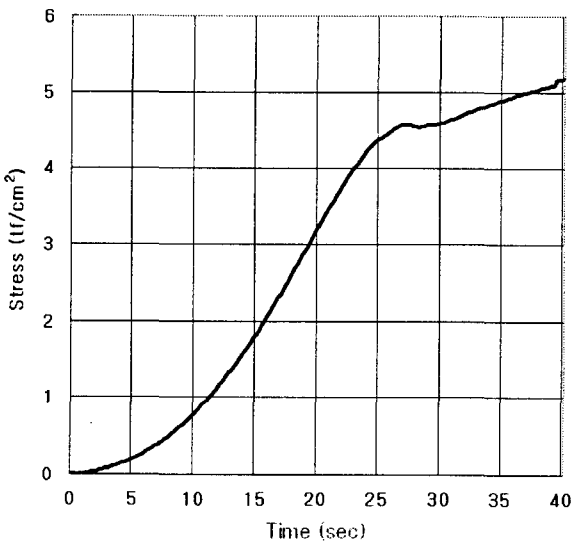


그림 5. 시간에 따른 응력 변화 곡선

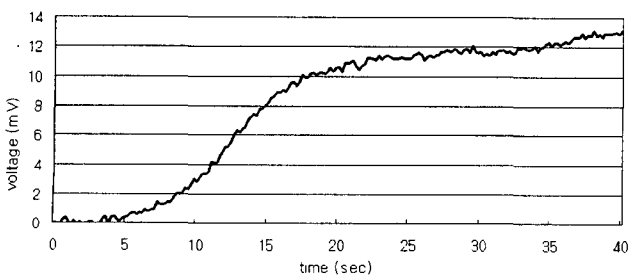


그림 6. 시간에 따른 전압 변화 곡선

### 4. 결 론

철근의 잔존응력 측정 시 보다 안전하고 신뢰성 있는 기법의 개발을 위하여 Joule이 발견한 자기변형현상을 이용한 철근의 응력 측정 방법을 제안하였다. 자기변형을 이용하여 철근의 응력을 측정하기 위해서는 응력의 변화와 자기적 변형이 선형성을 가지는 것이 중요하다. 이 두 인자간의 상호 연관성을 알고자 자기변형을 측정하는 기기를 장착하고 직경변화에 따른 인장실험을 수행 하였다. 실험결과 응력과 자기적 변형은 철근의 항복점 약 2/3지점까지의 선형관계를 입증하였다. 이 선형관계를 통하여 직경변화에 따른 전압과 응력의 상관관계식을 식 (1), 식 (2)로 제안하였다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005년도 건설핵심기술 연구개발 사업 (과제번호: 04 핵심기술 C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Rhim, H. C., 「Stress Measurement of a Steel Bar Using Magnetoelasticity」 International Workshop on Advanced Smart Material and Structure Technology Gyeong-Ju, Korea, July 21-24, 2005
2. Rhim, H. C. & Oh, Bohwan, Park, & H. S., 「Magnetoelastic Measurements of Steel Stress under Uniaxial Loading」 The 1st International Conference on Advanced Nondestructive Evaluation, Jeju, Korea, November 7-9, 2005
3. Lacheisserie, E., 「Magnetostriction : Theory and Applications of Magnetoelasticity」 CRC Press, 1993
4. Dapino, J., 「Magnetostrictive Materials - Their Use in Smart Structure Applications」 Proceedings of US-Korea Workshop on Smart Infra-Structural Systems, , 2002, pp. 43-50,
5. Schoenekess. H. & Ricken, W. & Becker, W. 「Influences of Magnetostriction and Magnetisation State on Strain and Force Measurement with Eddy-Current Sensors Applied to Steel Reinforced Concrete」 International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003, 2003