

강선의 전기적 임피던스와 응력, 온도 및 주파수 사이의 실험적 관계

응유엔 주이 흥* · 김병화**

Nguyen, Duy-Hung*, Kim, Byeong Hwa**

Experimental Relationship between Electrical Impedance of a Steel Wire and Applied Stress, Temperature, and Excited Frequency

ABSTRACT

This paper presents an experimental investigation regarding the sensitivity of electrical impedance of a steel wire to tensile stress, ambient temperature and induced frequency. For various stress levels and temperatures, the electrical impedance of a steel wire has been measured on a self-sensing system. The three experimental cases are carried out at various temperature conditions, stress levels and applied frequencies. If the temperature increases and stress level decreases at a given frequency, the electrical impedance on the steel wire increases. The results show that the correlation between electrical impedance and temperature is a linear relationship at all stress levels. It is noted that the sensitivity of impedance to temperature is much higher than the stress.

Key words : Tensile stress, Electrical impedance, Self-diagnosis, Nondestructive evaluation

초 록

이 논문은 인장 응력, 주변 온도 및 인가 주파수에 대한 강선의 전기적 임피던스 민감도에 관한 실험적 조사이다. 다양한 응력 수준 및 온도에 대해서, 강선의 전기적 임피던스가 자가진단 시스템에서 측정되었다. 세 가지 경우의 실험이 다양한 온도 조건, 응력 수준 및 적용 주파수에 대해서 수행되었다. 주어진 주파수에서 온도가 상승하고 응력이 감소하면 강선의 전기 임피던스가 증가한다. 실험 결과는 전기적 임피던스와 온도 사이의 상관관계가 모든 응력 수준에서 선형 관계임을 보여준다. 온도에 대한 임피던스의 감도는 응력보다 훨씬 높다는 점이 주목 된다.

검색어 : 긴장력, 전기적 임피던스, 자가진단, 비파괴 진단

1. 서론

강선, 강연선 및 케이블과 같은 선재는 다양한 구조물에 중요 축부재로서 널리 적용되어 왔다. 이러한 축부재는 구조효율이 높아서 상시에도 높은 응력상태를 유지하고 있다. 그러므로 축부재의 도입 응력 수준을 모니터링하는 것은 구조 건전도 모니터링(structural health monitoring; SHM) 분야에서 매우 중요한 문제 중에 하나이고, 많은 연구가 수행되었다(Karbhari and Ansari, 2009). 특히, SHM 방법 중에서 많은 비파괴 진단기법들이 큰 진보를 이루어졌는데, 주목할 만한 비파괴 진단기법들은 진동 기법, 유도초음파(ultrasonic guided wave; UGW) 기법, 변형률 기반 기법, 전자기기계적 임피던스(electromechanical impedance; EMI) 기법, 탄성자기(elasto-magnetic; EM) 기법 및 전자기 진동(electromagnetic oscillation) 기법 등을 포함한다.

* 경남대학교 대학원 사회기반시스템공학과 박사과정 (Kyungnam University · duyhunggtv2@gmail.com)

** 정회원 · 교신저자 · 경남대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Kyungnam University · bhkim@kyungnam.ac.kr)

Received November 20, 2019/ revised December 3, 2019/ accepted December 12, 2019

진동 기법은 케이블의 고유 진동수를 측정하여, 케이블의 장력을 추정 하는 방법이다(Kim and Park, 2007). 다양한 현장 적용 사례를 통하여, 진동 기법을 이용한 사장교 케이블이나 현수교 행어의 장력추정은 실무적으로 보편화되었다. 그러나 추정 정확도가 케이블의 굽힘 강성, 새그비(sag ratio) 및 경계 조건에 따라서 영향을 받는 경우가 있어서, 다양한 측면에서 실용 공식들이 제안되었다(Fang and Wang, 2012; Huang et al., 2014; Xie and Li, 2014).

유도초음파 기법(Chaki and Bourse, 2009)은 응력이 가해진 강선 및 강연선에 유도초음파의 전파 속도를 측정하여 축 방향 하중을 추정하는 방법이다. 강연선은 중심 강선과 주변 강선들 사이에 복잡한 공극의 형상은 유도초음파의 전파속도에 영향을 미칠 수 있다. 그리고, 부착식 텐던의 경우에는 감쇠 때문에 1.5 m 이상의 거리에서 유도초음파의 응답을 감지할 수 없는 문제점이 있다. 최근에는 강연선에 대한 유도초음파 장력 지수가 제안되었다(Qian et al., 2018).

변형을 기반 기법은 전통적 변형률계를 대체하여 광섬유 센서를 선재 내부에 설치하여 이용하는 기법이다(Kim et al., 2015). 광섬유 센서를 강연선 중심강선(king wire) 내부에 설치하는 스마트 강연선(Cho et al., 2017)이나, 탄소 섬유 강화 폴리머 바에 삽입되는 스마트 바(Dan et al., 2018), 그리고 강연선 표면에 직접 부착될 수 있는 긴 광섬유 센서(Shen et al., 2018) 등이 변형을 기반 기법에 포함 된다.

EMI 기법은 압전(piezoelectric) 재료를 액추에이터와 센서로 이용하는데, 진단 대상 구조물의 표면에 압전 센서를 부착하고, 고주파 임피던스 응답을 측정하여 장력을 추정한다(Na and Baek, 2018). 많은 적용 연구(Zhu and Scalea, 2016; Ryu et al., 2019; Dang et al., 2019)가 토목 구조물에 적용되었다.

EM기법은 강자성체의 투자율(magnetic permeability)을 측정하여 장력을 추정한다. 프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete; PSC) 구조의 텐던(tendon) 응력추정에 적용되었고(Kim et al., 2017; Kim et al., 2019), 공용중인 사장교 케이블의 장력 모니터링에 적용되었으며(Cappello et al., 2018), 주변 온도 변화에 따른 PSC 텐던 긴장력의 장기손실에 대한 연구(Chen and Zhang, 2018)가 수행되었다. 또한, 다양한 형태의 EM센서가 연구되었다(Joh et al., 2013; Zhang et al., 2014; Duan et al., 2016; Zhang et al., 2019b).

최근에는 전자기 진동법(Li et al., 2018; Chen et al., 2018)이 제안되었다. 강연선을 인덕턴스(Inductance)와 커패시턴스(Capacitance)로 간주하고, 일련의 전기회로를 구성한 후에 시스템의 공진 주파수를 측정함으로써 강연선의 응력을 추정한다. 응력과 주파수 사이의 관계가 선형임을 보였지만, 상관관계가 강연선의 길이에 따라서도

변화되는 문제점이 있다(Zhang et al., 2019a).

상기 진단 기술은 아직까지는 상당히 비싸고, 다소 노동 집약적이다. 그리고 몇 가지 방법은 장기 모니터링 프로세스에 효과적이지 않으며, 일부 방법은 구조물 내부에 사전 설치된 측정 센서를 필요로 한다. 이러한 문제점들은 공용 중 SHM에 대한 저변확대에 있어 가장 큰 걸림돌이다.

강자성체가 기계적 응력을 받는 경우에 전기적 임피던스가 변하는데, 이를 응력-임피던스(stress-impedance; SI) 효과라고 한다(Sugawara et al., 1996; Shen et al., 1997). SI 효과를 이용한 가속도 센서 및 응력(변형) 센서 등이 다양한 비정질 자성재료에 대해서 연구되었다(Mohri et al., 2001; Kraus et al., 2003; Zhou et al., 2005; Chen et al., 2006; Zhou et al., 2006; Peng et al., 2011; Qin et al., 2011; Fosalau et al., 2013). 그러나 이러한 강자성 재료에 기초한 센서의 경우에는 요구되는 전류의 가진 주파수가 수 MHz 이상으로 상당히 높아서 계측 비용이 높다. 더욱이 SI 효과는 재료마다 큰 차이가 있는데, 재료의 자기 특성, 기계적 특성, 자기 탄성 에너지 및 재료에 적용되는 응력 패턴에 따라 다르다.

본 연구에서는, 강선의 저주파 임피던스를 계측하여 응력을 추정할 수 있는 방법 연구의 일부이다. 연구 기법은 앞서 언급한 SI효과를 이용하지만 고주파가 아니고 상대적으로 저주파를 이용하는 것이 다르다. 또한, 강선 자체의 특정구간을 직접 센서로서 활용하여 스스로 도입 응력을 평가(self diagnosis by electrical impedance; SDEI)하는 기법으로서, 기존의 EMI기법과는 다소 차이가 있다. 다시 말하면, 임피던스 계측은 상용 LCR 미터의 탐촉자를 강선(호스트 구조)에 직접 부착하기 때문에, 호스트 구조에 부착된 트랜스 듀서의 전기 임피던스 매개 변수를 기반으로 하는 EMI 방법과 다르다.

일반적으로 온도 변화의 영향을 전혀 받지 않는 모니터링 방법이나 매개 변수는 없다. 따라서, 본 연구에서는 강선의 응력을 추정하기 위한 전기적 임피던스의 온도와 주파수에 대한 민감도를 실험적으로 평가하였다.

2. 임피던스 민감도 실험의 설정

2.1 재료

인장 강도(f_u)가 2000 MPa이고, 직경이 0.95 mm 인 강선을 실험 대상으로 선정하였다. 작은 직경의 강선은 큰 하중을 사용하지 않고, 큰 응력을 가할 수 있기 때문에 선택하였다. 강선의 축 방향 응력은 축 방향 무게 추를 이용하여 단계별로 도입하였다. 단계별 미소 하중 증가분은 작은 무게 추를 하나씩 올려놓아서 구현하였다. 단계별 도입 장력은 하중이 증가 시킬 때마다 계산되었다. 도입

인장 응력의 비(f/f_0)는 10 %에서 70 %의 범위에서 10 %씩 증분하여 조사하였다.

길이, 외경 및 두께가 각각 1 m, 2 cm, 2 mm 인 알루미늄 파이프에 탄소 섬유 가열 와이어(12 k 탄소 섬유 유형, 저항 33 ohm/m)를 감아서 강선 주변의 온도를 제어할 수 있는 환경을 만들었다. 가열 전력은 변압기로부터 가열 와이어에 정격 전압을 공급함으로써 생성하였다. 가열 온도는 수동으로 제어하였다.

강선의 온도 뿐 만 아니라 실내 온도의 기록은 2 개의 RTD 센서를 Arduino Uno R3과 MAX31865(2020)에 연결하여 측정하였다. 측정된 온도는 LCD I2C를 통해서 모니터링 하였다.

2.2 실험 설정

Fig. 1은 다양한 응력 수준과 온도 변화에서 강선의 전기적 임피던스 측정을 위한 실험 설정을 보여준다. 2.5 m 길이의 가열 와이어를 알루미늄 파이프를 따라 균일하게 감싸고, 지지대에 수직으로 매달았다. 그리고 탄소 섬유 가열 와이어는 전기 케이블 및 전원 콘센트에 의해 변압기에 연결하였다. 알루미늄 파이프 내부에 위치한 강선(실험 표본)은 양 단부에 위치한 2 개의 플라스틱 조각 덕분에 서로 접촉되지 않는다. 강선 온도 센서는 알루미늄 파이프 내부의 강선 시편에 부착되었다.

온도 제어 시험동안에 강선 하단에 위치한 무게추를 조절하여 단계별 응력을 도입하였다. 단계별 상이한 인장 응력 수준을 적용하기 위해서 작은 무게추를 추가 하였다. 시편이 늘어나고 안정화 된 후에, 변압기에 연결된 가열 탄소 섬유의 전원 스위치를 켜면 알루미늄 파이프의 온도가 올라가고, 알루미늄 파이프 내의 공기가 열전도 현상에 의해서 덩어지고 결국에는 강선의 온도가 올라가게 된다. 여기서 모든 단계의 도입된 응력 수준은 강선의 탄성 한계 미만이다.

각 실험에 대해서 온도는 30 분 동안 30 °C에서 60 °C의 범위로 증가시켰다. 강선 및 알루미늄 파이프의 초기 온도는 실온 부근에서 대략 25 °C에서 28 °C였다. 실험 기간 동안 가열 속도는 엄격하게 제어되었으므로 변압기의 출력 전압은 50-60V AC로 관리되었다.

LCR 미터는 4 단자 프로브(probe)와 함께 사용되어, 다양한 조건에서 전선에 쉽게 연결될 수 있다. 실험 프로브는 2 개의 악어 클립(crocodile clip)을 연장하여, 강선에 부착하였고, 실험을 따라 2 개의 단부 클립 사이의 거리를 모든 시험에 대해 1m로 고정하였다.

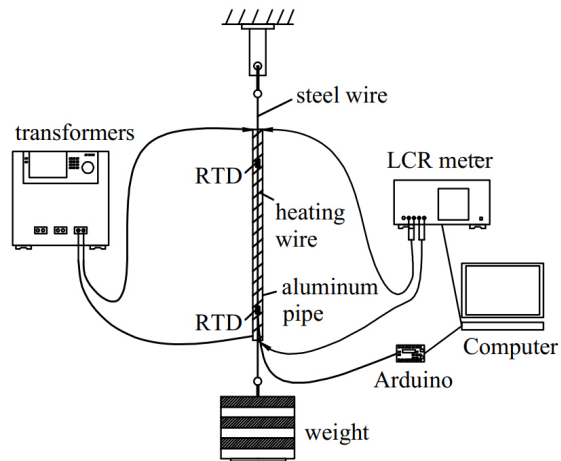
2.3 EIS 적용 및 온도 측정

기본적으로 EIS 방법은 서로 다른 주파수에서 작은 진폭의 교류 신호(AC)로 시스템의 임피던스를 측정하는 것이다. 강선의 전기적 임피던스는 2 개의 정밀 LCR 미터로 직접 측정하고 분석하였다. 첫 번째 LCR 미터는 Hioki사의 모델 번호 HiTester 3532-50 (Hioki EE Corporation, Japan)(Hioki, E. E. Corporation, 2006)를 사용하였다. 가진 주파수는 42 Hz부터 5 MHz까지 이다. 사용된 단자 프로브는 모델 번호 9140 4 단자 프로브이다. 두 번째 LCR미터는 Agilent사의 모델 번호 U1732C(휴대용 장치)(Agilent Technologies, Inc., 2017)이다. 전류 진폭은 0.1 mA 및 실온 유지조건에서 다양한 주파수의 가진 잔류가 사용되었다.

저항 온도 감지기(RTD)는 온도 변화에 따라 저항 값을 변경하는 저항을 포함하는 온도 센서이다. MAX31865는 저항을 판독하고 RTD에 최적화 된 증폭기이다. 온도 센서의 저항 값을 디지털 신호로 변환 한 후에 처리하여 Arduino Uno R3에 로드하였다. 분석 후에 측정된 온도 값은 LCD I2C에 표시되었다. 실제 측정 장비의 개략도와 사진이 Fig. 2에 보인다.



(a)



(b)

Fig. 1. Test Setup. (a) Overview, (b) Schematic Diagram

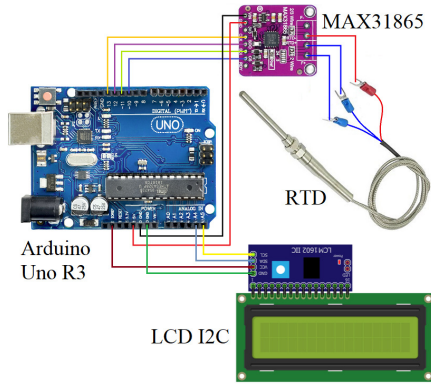


Fig. 2. Circuit Diagram for Connecting MAX31865 and LCD I2C to Arduino Uno R3

2.4 측정 시나리오

강선의 전기적 임피던스에 영향을 주는 인자는 도입 응력, 주변 온도, 가진 주파수 및 사용 계측기의 정밀도 등을 고려할 수 있다.

측정은 세 가지 경우가 고려되었다. Case I는, 강선의 전기적 임피던스가 가진 주파수에 따라 얼마나 민감한지를 조사하는 실험이다. 온도 변수를 실온으로 설정하여 상수로 고정하고, 가진 주파수를 변경시켜가면서 세 가지 다른 응력 수준에 대하여 강선의 전기적 임피던스를 계측하였다.

Case II는 임피던스 계측 장비의 변동성을 조사하는 실험이다. 온도 변수와 가진 주파수를 각각 실온과 10 kHz로 고정하여 상수로 고정하고, 여러 가지 다른 도입 응력 상태에서 강선의 전기적 임피던스를 조차하였다.

Case III는 임피던스의 온도에 대한 민감도를 조사하는 것이다. 계측 장비의 변동성을 고정하기 위해서 Hioki LCR 3532-50 만을 사용하고, 가진 주파수를 10 kHz로 고정하여 가진 주파수의 변동성도 고정하였다. 세 가지 다른 응력 수준에 대하여 온도 변화에 대한 민감도를 조사하였다. 전기적 임피던스의 모든 판독 값은 온도를 2 °C 씩 증가하면서 강선의 응력 수준 및 온도를 기록하였다.

3. 실험 결과

상기 세 가지 측정 시나리오 대하여 전기적 임피던스가 기록되었다. 실험 데이터를 그리고, 선형 회귀법을 사용하여 가장 적합한 보간 선을 산정하였다.

3.1 측정 Case I

휴대용 Agilent U1732C는 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz 및 10 kHz의 4 가지 주파수 가진만 지원한다. 그러나 Hioki LCR 미터는 넓은 주파수 범위를 지원하며 유연하게 변경할 수 있다. 따라서 Hioki LCR 미터가 실온에서의 주파수 민감도를 평가하는 데 사용

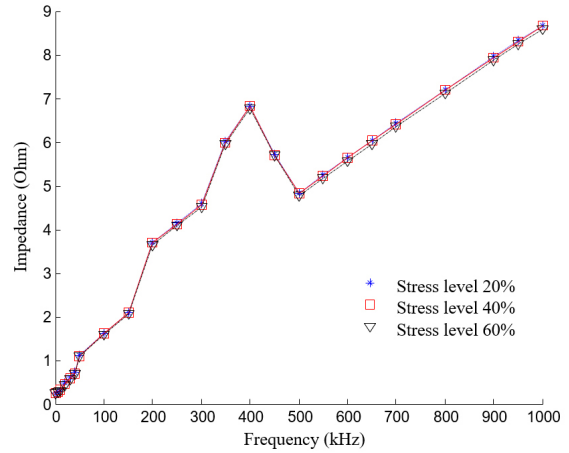


Fig. 3. Sensitivity of Electrical Impedance to Frequency for a Few Stress Levels

되었다. 전기적 임피던스와 주파수 사이의 관계는 각각 20 %, 40 % 및 60 %의 세 가지 응력 수준에서 100 Hz부터 1 MHz까지의 가진 주파수 대비 전기적 임피던스 판독 값을 그려서 결정한다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 세 가지 응력 수준 모두에 대해 측정된 강선의 전기적 임피던스는 매우 유사하다. 가진 주파수가 증가함에 따라 강선의 전기적 임피던스가 증가함을 알 수 있다. 여기서, 측정 장치의 편의를 위해서 10 kHz의 가진 주파수가 설정되었다. 여기서, 가진 주파수 400 kHz 이전의 기울기와 이후의 기울기가 다른데, 이는 단자 프로브의 성능한계 때문이다.

3.2 측정 Case II

가진 주파수를 10 kHz로 고정하고 두 종류의 LCR미터의 계측 값을 상호 비교하였다. 온도는 25 °C 실온에서 계측하였고, 강선에 도입된 응력은 선형 탄성 범위 이내이다.

Fig. 4에 보이는 바와 같이, 강선에 도입된 응력이 증가할수록 강선의 전기적 임피던스는 선형 감소한다. 이러한 관계에 기초하여, 강선의 전기적 임피던스와 도입응력은 역 선형 관계를 갖는다는 사실이 재확인 된다. 그리고 계측기의 감도에 따라서 계측된 임피던스의 절대 값은 서로 미소한 차이가 보인다. 그러나 도입 응력과 임피던스 사이의 관계는 동일하다.

3.3 측정 Case III

온도에 대한 전기 임피던스의 감도를 평가하기 위해서 강선을 30 °C 에서 60 °C 로 가열하면서 세 가지 응력 수준에 대해서 실험을 수행하였다. Fig. 5에 보이는 바와 같이, 온도가 선형으로 증가함에 따라 강선의 전기적 임피던스가 증가하는 것을 볼 수 있다. 3 개의 근사 선은 3 개의 서로 다른 도입 응력 크기를 나타내고, 평행하다. 온도 효과는 모든 응력 수준에서 유사함을 알 수 있다.

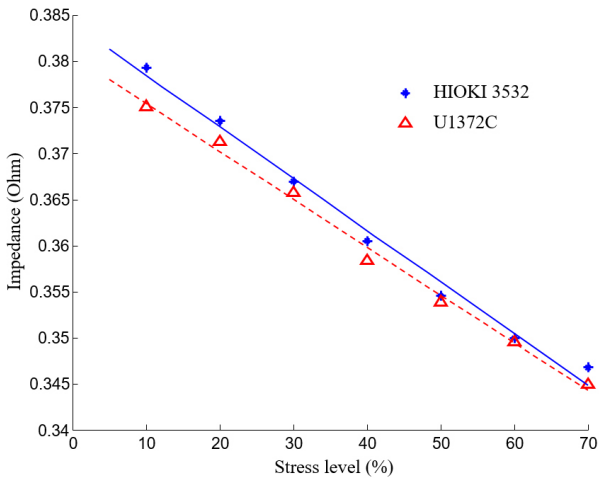


Fig. 4. Sensitivity of Electrical Impedance to Stress Level for Given Frequency of 10 kHz and Temperature of 25 °C

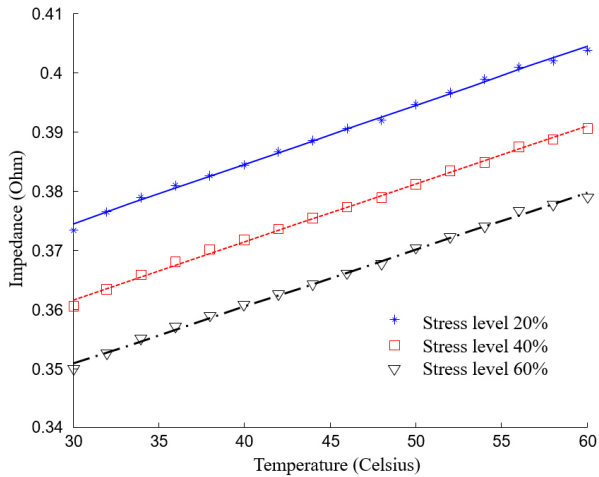


Fig. 5. Sensitivity of Electrical Impedance to Temperature for Given Stress Level and Frequency of 10 kHz

3.4 분석

온도가 상승하고 응력 수준이 감소하면 강선의 전기 임피던스가 증가한다. 왜냐하면 임피던스의 온도 민감도가 응력 민감도보다 훨씬 크기 때문이다. Fig. 6에 도시 된 바와 같이, 전기 임피던스와 온도 사이의 관계는 모든 응력 수준에서 선형 상관관계를 가지고 있다. 따라서, 온도의 영향이 임피던스 측정 결과에 매우 중요하다고 추론할 수 있다.

실험 결과에 기초하여, 전기적 임피던스는 축 부재의 현존 응력 평가에 매우 잠재력이 높은 인디케이터(indicator)라고 말할 수 있다. 그러나 이 접근법의 실용성, 적용성 및 타당성은 추가로 조사되어야 한다.

응력-임피던스(SI) 효과의 이용은 강선에 대한 응력 추정 기회를 제공하며, 그 자체로 응력 측정 센서로 사용 할 수 있다.

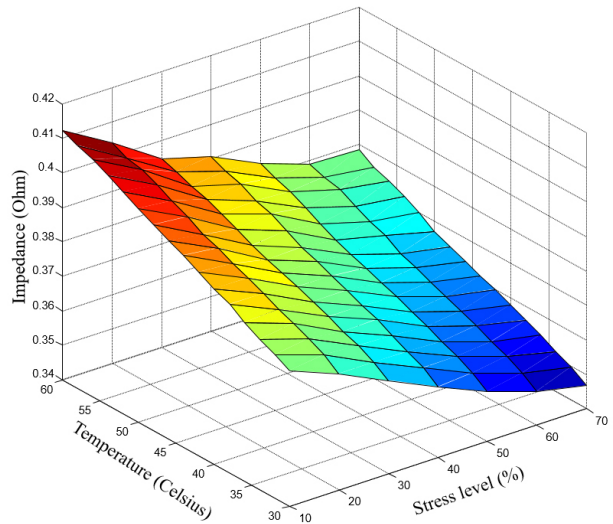


Fig. 6. The Sensitivity of Impedance to Temperature and Stress Level at 10 kHz Frequency

응력의 변형의 변형은 Fig. 6로부터 측정된다. 수평축에 보이는 강선의 임피던스와 수직축에 보이는 강선의 온도를 계속하면, 수평 축에 보이는 강선의 도입응력이 결정된다. 강선의 도입응력을 임피던스와 온도의 함수식으로 나타내면, 다음 Eq. (1)과 같다.

$$S(Z, T) = 608 + 1.693T - 1706Z \tag{1}$$

여기서, S는 강선의 극한강도 대비 도입된 응력비를 나타내고, Z 와 T는 각각 강선의 임피던스와 온도를 나타낸다. 강선의 온도와 임피던스를 계속하면 Eq. (1)를 이용하여 강선에 도입된 현재 응력을 추정할 수 있다.

4. 결론

SDEI 기법을 이용하여 강선의 전기적 임피던스에 영향을 주는 몇 가지 주요 영향인자에 대해서 실험적 민감도를 조사하였다. 실험 결과로부터 다음 네 가지 결과를 보여준다.

- 첫째, 강선의 전기적 임피던스는 가진 주파수에 비례한다.
- 둘째, 강선의 전기적 임피던스는 도입 응력에 선형 반비례한다.
- 셋째, 강선의 전기적 임피던스는 주변 온도에 선형 비례한다.
- 넷째, 온도에 대한 민감도가 응력에 대한 민감도보다 크다.

그러므로 전기적 임피던스를 이용하여 강선에 도입된 응력을 추정하기 위해서는, 온도의 보정이 반드시 필요하다. 왜냐하면, 온도에 대한 전기적 임피던스의 민감도가 도입 응력에 대한 민감도

보다 크기 때문이다. 연구 결과에 기초로 하여, SDEI 기법은 긴장된 강선의 응력을 정량화하기 위한 자가진단 기법으로서 상당한 잠재력을 보여준다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단(NRF-2018R1D1A1B07043521)의 지원을 받았습니다.

본 논문은 2019 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

- Agilent Technologies, Inc. (2017). *Agilent U1732C Handheld LCR meter, user's guide*, Agilent Technologies, California, USA.
- Cappello, C., Zonta, D., Laasri, H. A., Glisic, B. and Wang, M. (2018). "Calibration of elasto-magnetic sensors on in-service cable-stayed bridges for stress monitoring." *Sensors*, Vol. 18, No. 2, 466.
- Chaki, S. and Bourse, G. (2009). "Stress level measurement in prestressed steel strands using acoustoelastic effect." *Experimental Mechanics*, Vol. 49, pp. 673-681.
- Chen, D., Zhang, B., Li, X., Tu, C., Yuan, C., Li, W., Zhou, Z. and Liang, Z. (2018). "A stress measurement method for steel strands based on LC oscillation." *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2018, pp. 1-8.
- Chen, J. A., Ding, W., Zhou, Y., Cao, Y., Zhou, Z. M. and Zhang, Y. M. (2006). "Stress-impedance effects in sandwiched FeCuNbCrSiB/Cu/FeCuNbCrSiB films." *Materials Letters*, Vol. 60, No. 21, pp. 2554-2557.
- Chen, Z. and Zhang, S. (2018). "EM-based monitoring and probabilistic analysis of prestress loss of bonded tendons in PSC beams." *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2018, No. 11, pp. 1-9.
- Cho, K., Kim, S. T., Cho, J. R. and Park, Y. H. (2017). "Estimation of tendon force distribution in prestressed concrete girders using smart strand." *Applied Sciences*, Vol. 7, No. 12, 1319.
- Dan, D., Jia, P., Li, G. and Niu, P. (2018). "Experimental study on mechanical and sensing properties of smart composite prestressed tendon." *Materials*, Vol. 11, No. 11, 2087.
- Dang, N. L., Huynh, T. C., Kim, J. T. (2019). "Local strand-breakage detection in multi-strand anchorage system using an impedance-based stress monitoring method-feasibility study." *Sensors*, Vol. 19, No. 5, 1054.
- Duan, Y. F., Zhang, R., Dong, C. Z., Luo, Y. Z., Or, S. W., Zhao, Y. and Fan, K. Q. (2016). "Development of elasto-magneto-electric (EME) sensor for in-service cable force monitoring." *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 16, No. 04, 1640016.
- Fang, Z. and Wang, J. (2012). "Practical formula for cable tension estimation by vibration method." *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 161-164.
- Fosalau, C., Damian, C. and Zet, C. (2013). "A high performance strain gage based on the stress impedance effect in magnetic amorphous wires." *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 191, pp. 105-110.
- Hioki, E. E. Corporation (2006). *HIOKI 3532 LCR hitester instruction manual*, HIOKI E. E. Corporation, Nagano, Japan.
- Huang, Y. H., Fu, J. Y., Wang, R. H., Quan, G., Rui, R. and Ai-Rong, R. (2014). "Practical formula to calculate tension of vertical cable with hinged-fixed conditions based on vibration method." *Journal of VibroEngineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 997-1009.
- Joh, C., Lee, J. W. and Kwahk, I. (2013). "Feasibility study of stress measurement in prestressing tendons using Villari effect and induced magnetic field." *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 2013, 249829.
- Karbhari, V. M. and Ansari, F. (2009). *Structural health monitoring of civil infrastructure systems*, CRC Press, Florida, USA.
- Kim J. K., Kim, J. W. and Park S. H. (2019). "Investigation of applicability of an embedded EM sensor to measure the tension of a PSC Girder." *Journal of Sensors*, Vol. 2019, No. 6, pp. 1-12, 2469647.
- Kim J. K., Kim, J. W., Lee, C. G. and Park S. H. (2017). "Development of embedded EM sensors for estimating tensile forces of PSC girder bridges." *Sensors*, Vol. 17, No. 9, 1989, 28867790.
- Kim, B. H. and Park, T. (2007). "Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 304, No. 3-5, pp. 660-676.
- Kim, S. T., Park, Y., Park, S. Y., Cho, K. and Cho, J. R. (2015). "A sensor-type PC strand with an embedded FBG sensor for monitoring prestress forces." *Sensors*, Vol. 15, No. 1, pp. 1060-1070.
- Kraus, L., Bydžovský, J. and Švec, P. (2003). "Continuous stress annealing of amorphous ribbons for strain sensing applications." *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 106, No. 1-3, pp. 117-120.
- Li, X., Zhang, B., Yuan, C., Tu, C., Chen, D., Chen, Z. and Li, Y. (2018). "An electromagnetic oscillation method for stress measurement of steel stands." *Measurement*, Vol. 125, pp. 330-335.
- MAX31865 (2020), *GitHub*, Available at: https://github.com/adafruit/Adafruit_MAX31865 (Accessed: March 5, 2020).
- Mohri, K., Uchiyama, T., Shen, L. P., Cai, C. M. and Panina, L. V. (2001). "Sensitive micro magnetic sensor family utilizing magneto-impedance (MI) and stress-impedance (SI) effects for intelligent measurements and controls." *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 91, No. 1-2, pp. 85-90.
- Na, W. and Baek, J. (2018). "A review of the piezoelectric electromechanical impedance based structural health monitoring technique for engineering structures." *Sensors*, Vol. 18, No. 5, 1307.
- Peng, B., Zhang, W. L., Liu, J. D. and Zhang, W. X. (2011). "Stress impedance effect of FeCoSiB/Cu/FeCoSiB sandwich layers on flexible substrate." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, No. 11, pp. 1574-1576.
- Qian, J., Chen, X., Sun, L., Yao, G. and Wang, X. (2018). "Numerical and experimental identification of seven-wire strand tensions using scale energy entropy spectra of ultrasonic guided waves." *Shock and Vibration*, Vol. 2018, No. 6, 6905073.

- Qin, F. X., Peng, H. X., Popov, V. V. and Phan, M. H. (2011). "Giant magneto-impedance and stress-impedance effects of microwire composites for sensing applications." *Solid State Communications*, Vol. 151, No. 4, pp. 293-296.
- Ryu, J. Y., Huynh, T. C. and Kim, J. T. (2019). "Tension force estimation in axially loaded members using wearable piezoelectric interface technique." *Sensors*, Vol. 19, No. 1, 47.
- Shen, L. P., Uchiyama, T., Mohri, K., Kita, E. and Bushida, K. (1997). "Sensitive stress-impedance micro sensor using amorphous magnetostrictive wire." *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 3355-3357.
- Shen, S., Wang, Y., Ma, S. L., Huang, D., Wu, Z. H. and Guo, X. (2018). "Evaluation of prestress loss distribution during pre-tensioning and post-tensioning using long-gauge fiber bragg grating sensors." *Sensors*, Vol. 18, No. 12, 4106.
- Sugawara, J., Kubota, T. and Goto, S. (1996). *Stress measurement method for ferromagnetic metal body, stress distribution measurement method for sheet sensor, and sheet sensor for stress distribution measurement*, Japan Patent Office (In Japanese).
- Xie, X. and Li, X. Z. (2014). "Genetic algorithm-based tension identification of hanger by solving inverse eigenvalue problem." *Inverse Problems in Science and Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp. 966-987.
- Zhang, B., Tu, C., Li, X., Cui, H. and Zheng, G. (2019a). "Length effect on the stress detection of prestressed steel strands based on electromagnetic oscillation method." *Sensors*, Vol. 19, No. 12, 2782.
- Zhang, R., Duan, Y. F., Or, S. W. and Zhao, Y. (2014). "Smart elasto-magneto-electric (EME) sensors for stress monitoring of steel cables: Design theory and experimental validation." *Sensors*, Vol. 14, No. 8, pp. 13644-13660.
- Zhang, S., Zhou, J., Zhou, Y., Zhang, H. and Chen, J. (2019b). "Cable tension monitoring based on the elasto-magnetic effect and the self-induction phenomenon." *Materials*, Vol. 12, No. 14, 2230.
- Zhou, Y., Mao, X. H., Chen, J. A., Ding, W., Gao, X. Y. and Zhou, Z. M. (2005). "Stress-impedance effects in layered FeSiB/Cu/FeSiB films with a meander line structure." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 292, pp. 255-259.
- Zhou, Z., Cao, Y., Zhou, Y., Chen, J. A. and Ding, W. (2006). "Stress-impedance effects in sandwiched FeCuNbCrSiB/Cu/FeCuNbCrSiB films fabricated by Microelectromechanical Systems technique." *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 7, pp. 2450-2454.
- Zhu, X. and Scalea, F. L. (2016). "Sensitivity to axial stress of electro mechanical impedance measurements." *Experimental Mechanics*, Vol. 56, No. 9, pp. 1599-1610.