

압분광법을 이용한 강재의 비접촉식 응력측정

김종우¹, 김남규^{2*}

Non-contact Stress Measurement in Steel Member using Piezospectroscopy

Jongwoo Kim¹, Namgyu Kim^{2*}

Abstract: In this paper, a novel laser-based non-contact and non-destructive stress measurement technique is newly proposed for measuring stress in steel structural members. As the demand of stress monitoring in structural members is increased, various non-destructive techniques are being applied to the field of structural health monitoring. Spectroscopic techniques are non-contact technique and widely used for chemical identification of target materials. Especially, piezospectroscopic technique is a residual stress measurement technique in thermal barrier coatings. Although the piezospectroscopic technique has high possibility of measuring structural stress in steel members, the technique has been rarely applied to this field. In this paper, piezospectroscopy-based stress measurement technique is, therefore, proposed for measuring stress in steel structural member. To do that, alumina particles have been coated onto a specimen of a structural steel rod using a thermal spray coating technique. And then, an uniaxial compression test has been conducted to the specimen to collect each fluorescence spectrum under different loading conditions. Finally, the linear relation of spectral shift and applied compressive stress of the specimen has been experimentally established.

Keywords: Stress Measurement, Steel member, Fluorescence spectroscopy, Piezospectroscopy, Passive Coating

1. 서론

강재는 시멘트와 함께 토목구조물 건설에 대표적으로 사용되는 재료로, 주요 구조부재로서 큰 하중을 지지하는데 사용된다. 따라서, 구조물의 노후가 진행됨에 따라 주요 구조부재인 강재 모니터링에 대한 중요성이 증대되고 있다. 특히, 케이블 교량의 케이블 응력 측정, 장대레일의 축력 측정, 프리스트레스콘크리트(PSC) 강선의 긴장력 측정 등은 현재까지도 난제로써 많은 연구자들로부터 연구되어지고 있다. 초음파 탐상법(Li et. al., 2016), X선 회절(Kelleher et. al., 2003), Fiber Bragg Grating 센서(Kim et. al., 2017)를 이용한 비파괴 검사 방법 등이 강재 응력측정에 적용되어지고 있으나, 현장적용을 위해서는 아직 많은 검증이 요구된다.

분광법은 일반적으로 대상물의 화학적 성분을 분석하는데 주로 사용되며, 토목분야에서는 강재의 부식을 판단하는데 일부 사용되고 있다(Zhang et. al, 2011). 압분광법은 Fig. 1과 같이 대상물이 하중을 받을 때 측정된 스펙트럼이 하중이 없는 상태에서 측정된 스펙트럼으로부터 이동(Shift)되는 현상,

즉 압분광현상을 기반으로 응력을 측정하는 방법이다(Ma and Clarke, 1993). 여기서, 응력-스펙트럼 이동 관계를 선형적으로 가정하였을 때, 압분광 계수를 도출할 수 있으며, 이를 통하여 현재상태의 응력을 측정할 수 있다. 해당 기술은 레이저를 기반으로한 비접촉식 응력측정 기술로써, 기계시설의 차열피막의 잔류응력을 측정(Grabner, 1978; Lipkin et. al., 1996)하는데 주로 사용되는 기술이며, 최근에 철도 구조물에 대한 응력 측정(Kim and Yun, 2018)을 시작으로 다양한 토목 구조물의 응력측정에 대한 적용이 시도되고 있다.

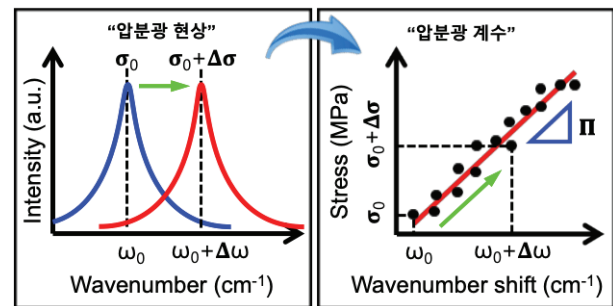


Fig. 1 Piezospectroscopic effect

따라서, 본 연구에서는 이와 같은 압분광 현상을 기반으로한, 레이저를 이용한 새로운 비접촉식/비파괴식 강재 응력 측정 방법을 제안하고, 이에 대한 적용가능성을 실험적으로 검증하였다. 이를 위하여, 1) 압분광 현상을 갖는 물질인 알루미늄

¹정회원, (주)유디엔에스, CTO

²정회원, 세종대학교 건설환경공학과 조교수, 교신저자

*Corresponding author: namgyu.kim@sejong.ac.kr

Sejong University, Seoul, 05006, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2019년 5월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

나를 구조용 강 표면에 용사코팅방법을 이용하여 도포하고, 2) 응력 측정용 코팅이 포함된 시편에 대한 압축하중시험을 수행하여, 3) 하중-스펙트럼 이동에 대한 선형성을 검증하였다.

2. 압분광법 기반 강재 응력측정

2.1 압분광법 기반 응력측정기술

압분광법을 이용하여 응력을 측정하기 위해서는 Fig. 2와 같이 레이저(Laser module)와 분광기(Spectrometer), 그리고 두 시스템과 광섬유(Optic cable)를 이용하여 연결된 탐침기(Probe)가 필요하다. 먼저 스펙트럼 수집을 위하여, 레이저 모듈에서 레이저를 발생시키고, 이를 광섬유와 탐침기를 통하여 대상 시편에 조사한다. 대상물로부터 반사되는 빛은 다시 탐침기와 광섬유를 통하여 분광기에 수집되며, 신호처리과정을 통하여, 측정된 스펙트럼의 이동량을 측정함을 통하여 현재 대상물에 가해지는 응력의 크기 및 방향을 계산할 수 있다.

2.2 응력측정용 코팅시편 제작

본 연구에서는 강재의 표면에 압분광법에 민감한 물질을 코팅하고, 이를 응력센서로 사용하고자 한다. 강재 코팅방법에는 용사코팅, 도금, 용접, 증착 등을 포함하는 여러 가지 방법이 있으나, 이를 이용하여 강재 응력을 측정하고자 하는 경우, 몇 가지 사항이 고려되어야 한다. 먼저, 모재(여기서는 강재)의 큰 열변형을 가져올 경우, 그 구조적인 거동이 바뀔 수 있으므로, 이에 해당하는 용접방법은 제외한다. 또한, 구조물의 설계연수 만큼 응력 센싱을 수행해야하기 때문에, 내충격성이 낮은 도금방법은 제외된다. 증착의 경우 모재의 열변형이 크지 않고, 피막 두께를 얇게 할 수 있으며, 내충격성이 좋은 코팅을 만들 수 있는 반면, 코팅을 위한 고진공 상태, 높은 반응 온도를 필요로 하거나, 복잡한 장치를 필요로 하는 경우가 있다. 용사코팅의 경우, 모재의 열변형이 적고, 접착력이 우수하며, 적용할 수 있는 모재가 다양하다. 또한, 다른 기술들과 달리 현장 적용 가능성이 높은 기술이다. 따라서 본 연구에서는 용사코팅을 이용하여 응력 측정용 코팅 시편을 제작하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 용사코팅의 개략적인 방법을

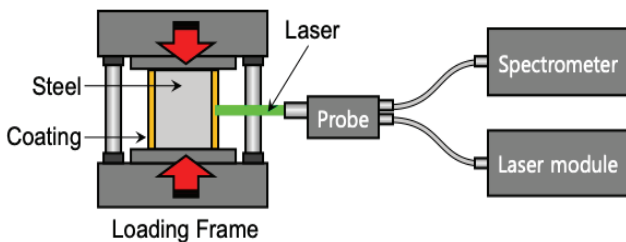


Fig. 2 Schematic Drawing of Piezospectroscopic System

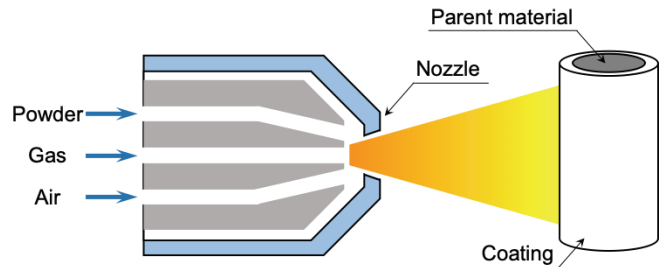


Fig. 3 Schematic Drawing of Thermal Spraying Technology

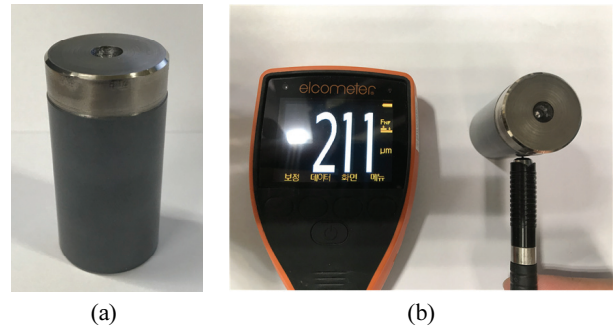


Fig. 4 The Prepared Specimen for Compression Test; (a) Structural Steel Specimen w/ Stress Coating, (b) Coating Thickness Measurement

보인다. 본 연구에서는 압분광법에 높은 민감도를 갖는 알루미늄 분말을 용사코팅 재료로 선택하였다(Kim and Yun, 2018).

Fig. 4(a)는 직경 3cm, 높이 6cm의 원통형 구조용 강재에 응력 측정용 알루미늄 코팅부가 도포된 시편을 보인다. 코팅부와 모재의 접착력을 증가시키기 위하여, 모재의 표면에 연마 및 분당 작업을 먼저 수행하였다. 분당은 두께 편차 0.05-0.1 mm로 수행되었다. 또한, 시편 회전 분사방식의 용사코팅 작업성 향상을 통한 코팅부 품질향상을 위하여, 상단 1 cm를 제외한 하단 5 cm에 대한 코팅을 수행하였다. 여기서, 시편 상단부는 코팅과정에서 클램프로 고정되었다. Fig. 4(b)는 도포된 코팅 두께 측정시험 과정을 보이며, 압축하중시험에 사용된 알루미늄 코팅은 약 211 μ m의 두께를 갖고 있음을 확인할 수 있다.

2.3 압축하중시험

본 장에서는, 알루미늄이 코팅된 구조용 강재에 대한 압축하중시험 수행을 통하여, 압축하중과 스펙트럼 이동(Shift)간의 관계를 규명하였다. 이를 위하여, 15 tonf의 압축력을 총 6 단계(증분량: 3 tonf)로 나누어 시편에 인가하였으며, 각 하중 단계에서의 스펙트럼을 계속하였다. 시험에 사용된 단계별 압축력과 응력값(지름 30 mm의 원형 면적에 대한 계산값)은 Table 1과 같다.

Fig. 5는 하중 Step 1에서 레이저를 시편에 조사하여 형광스펙트럼을 수집하는 모습을 보인다. 본 연구에서는 형광스펙트럼 수집을 위하여 532 nm의 레이저를 사용하였으며, 정밀

Table 1 Design for Compression Test

Loading Step	Force (tonf)	Stress (MPa)
Step 1	0	0.0
Step 2	3	41.6
Step 3	6	83.2
Step 4	9	124.9
Step 5	12	166.5
Step 6	15	208.1



Fig. 5 Compressive Test Setup

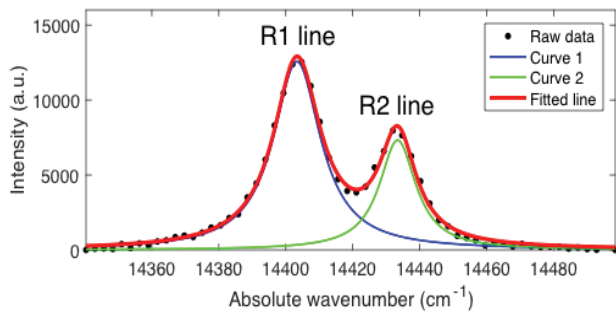
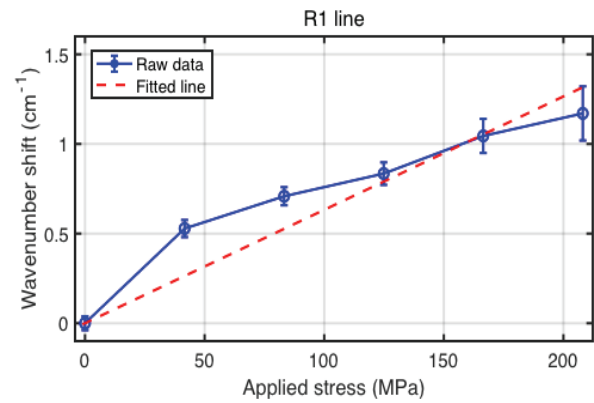


Fig. 6 Raw Spectrum and Fitted Line

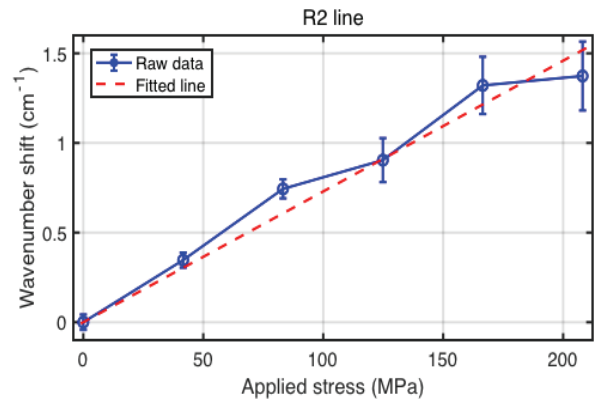
한 스펙트럼 이동량 분석을 위하여 한 하중 단계에서 10개의 스펙트럼을 수집하였다. Fig. 6은 하중 Step 1에서 응력 측정용 코팅으로부터 수집된 형광스펙트럼을 보인다. 알루미늄의 형광스펙트럼은 그림에서와 같이 두 개의 첨두값(R1, R2 lines)을 가지며, 각각의 첨두값이 응력의 크기에 따라 이동(Shift)한다.

각 하중에 따른 R1 line, R2 line의 이동량을 영점(0,0)을 지나는 1차식 커브피팅을 이용하여 Fig. 7(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 여기서, 오차막대(Error Bar)는 각 10개 데이터의 표준편차를 보인다.

위의 과정을 통하여, 강제 시편에 가해지는 압축응력과 스펙트럼 이동량이 선형적인 관계가 있음을 실험적으로 확인하였다. 즉, 약 208 MPa의 압축하중이 강제시편에 가해질 경우, R1 line은 초기 위치에서 약 1.17 cm^{-1} 만큼 우측으로 이동함을 확인하였고, R2 line의 경우에도 약 1.37 cm^{-1} 만큼 우측으로 이동하는 것을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 7 Compressive Stress vs. Wavenumber Shift and Fitted Line; (a) R1 line (R-square=0.8557), (b) R2 line (R-square=0.9638)

3. 결론

본 연구에서는, 강재에 작용하는 응력을 비파괴/비접촉식으로 측정할 수 있는 새로운 방법은 제안하고, 이에 대한 가능성을 실험적으로 검증하였다. 제안방법에서는 용사코팅을 이용하여 알루미늄을 구조용 강재표면에 도포하고, 압축하중시험을 수행하여 각 하중단계에서의 스펙트럼 이동(Shift)값을 확인하였다. 이를 통하여, 각 하중값과 스펙트럼 이동값이 선형관계를 확인하였다. 따라서, 이와 같은 선형적인 관계로부터, 1차 선형식의 상수값인 압분광 계수를 도출하고, 이를 통하여 강제도재에 작용하는 응력을 측정할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 연구비 지원(18CTAP-C130207-02)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Zouhua Li, Jingbo He, Jun Teng, Yung Wang(2016). Internal Stress Monitoring of In-Service Structural Steel Members with Ultrasonic Method. *Materials*, 9(4).
2. J. Kelleher, M.B. Prime, D. Buttle, P.M. Mummery, P.J. Webster, J. Shackleton, P.J. Withers(2003). The Measurement of Residual Stress in Railway Rails by Diffraction and other Methods. *Journal of Neutron Research*, 11(4), 187-193.
3. Jae-Min Kim, Chul-Min Kim, Song-Yi Choi, Bang Yeon Lee(2017). Enhanced Strain Measurement Range of an FBG Sensor Embedded in Seven-Wire Steel Strands. *Sensors*, 17(7)
4. Xin Zhang, Kui Xiao, Chaofang Dong, Junsheng Wu, Xiaogang Li, Yizhong Huang(2011). In situ Raman spectroscopy study of corrosion products on the surface of carbon steel in solution containing Cl⁻ and SO₄²⁻. *Engineering Failure Analysis*, 18, 1981-1989
5. Ludwig Grabner(1978). Spectroscopic technique for the measurement of residual stress in sintered Al₂O₃. *Journal of Applied Physics*, 49(2), 580-583
6. Qing Ma, David R. Clarke(1993). Stress Measurement in Single-Crystal and Polycrystalline Ceramics Using Their Optical Fluorescence. *Journal of American Ceramic Society*, 76(6), 1433-1440
7. D.M. Lipkin, D.R. Clarke(1996). Measurement of the stress in oxide scales formed by oxidation of alumina-forming alloys. *Oxidation of Metals*, 45, 267-280
8. Namgyu Kim, Hae-Bum Yun(2018). Noncontact mobile sensing for absolute stress in rail using photoluminescence piezospectroscopy. *Structural Health Monitoring*, 17(5) 1213-1224

Received : 01/23/2019

Revised : 02/11/2019

Accepted : 02/18/2019

요 지 : 본 논문에서는 압분광법을 기반으로 강재에 작용하는 응력을 비파괴/비접촉식으로 측정할 수 있는 새로운 방법은 제안하고, 이에 대한 가능성을 실험적으로 검증하였다. 분광법은 일반적으로 대상물의 화학적 성분을 분석하는데 주로 사용되며, 토목분야에서는 강재의 부식을 판단하는데 일부 사용되고 있다. 압분광법은 대상물이 하중을 받을 때 측정된 스펙트럼이 하중이 없는 상태에서 측정된 스펙트럼으로부터 이동(Shift)되는 현상인, 압분광현상을 기반으로 응력을 측정하는 방법이다. 여기서, 응력-스펙트럼 이동 관계를 선형으로 가정하였을 때, 압분광 계수를 도출할 수 있으며, 이를 통하여 현재상태의 응력을 측정할 수 있다. 해당 기술은 레이저를 기반으로한 비접촉식 응력측정 기술로써, 최근에 철도 구조물에 대한 응력 측정을 시작으로 다양한 토목구조물의 응력측정에 대한 적용이 시도되고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 압분광법 기술을 이용하여 강구조물의 응력을 측정할 수 있도록, 용사코팅을 이용하여 알루미늄을 구조용 강재표면에 도포하고, 일축압축 하중시험을 수행하여 각 하중단계에서의 스펙트럼 이동(Shift)값을 확인하였다. 이를 통하여, 각 하중값과 스펙트럼 이동값이 선형관계임을 확인하였다. 따라서, 이와 같은 선형적인 관계로부터, 1차 선형식의 상수값인 압분광 계수를 도출하고, 이를 통하여 강재에 작용하는 응력을 측정할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 응력측정, 강구조, 형광분광법, 압분광법, 용사코팅
