

라만 형광 분광법을 이용한 PSC 박스교 인장케이블 응력측정방법 연구

김종우¹, 김남규^{2*}

Non-contact Stress Measurement in Steel Member of PSC Box Bridge Using Raman Spectroscopy

Jongwoo Kim¹, Namgyu Kim^{2*}

Abstract: In this paper, a laser-based non-contact load cell is newly developed for measuring forces in prestressed concrete tendons. First, alumina particles have been sprayed onto an empty load cell which has no strain gauges on it, and the layer has been used as a passive stress sensor. Then, the spectral shifts in fluorescence spectroscopy have been measured using a laser-based spectroscopic system under various force levels, and it has been found that the relation of applied force and spectral shift is linear in a lab-scale test. To validate the field applicability of the customized load cell, a full-scale prestressed concrete specimen has been constructed in a yard. During the field test, it was, however, found that the coating surface has irregular stress distribution. Therefore, the location of a probe has to be fixed onto the customized load cell for using the coating layer as a passive stress sensor. So, a prototype customized load cell has been manufactured, which consists of a probe mount on its casing. Then, by performing lab-scale uniaxial compression tests with the prototype load cell, a linear relation between compression stress and spectrum shift at a specific point where laser light had been illuminated has been detected. Thus, it has a high possibility to use the prototype load cell as a force sensor of prestressed concrete tendons.

Keywords: Noncontact Sensing, Load Cell, Laser, Piezospectroscopy

1. 서 론

케이블 교량의 케이블 응력 측정, 프리스트레스크콘크리트 (PSC) 강선의 긴장력 측정 분야는, 강선(혹은 케이블)이 많은 하중을 담당한다는 점에서 토목 유지관리 분야의 매우 중요한 연구 분야 중 하나이다. 이를 측정하기 위하여, 다양한 직·간접적인 방법이 적용되고 있으며, Magnetic field(Joh et al., 2013), Electromagnetic sensor(Cho et al., 2016), 초음파 탐상법(Chaki et. al., 2009; Li et. al., 2016), Fiber Bragg Grating 센서(Kim et al., 2017) 등 다양한 비파괴 검사기술 또한 적용되어지고 있으나, 현장 적용을 위해서는 아직 추가적인 기술의 검증이 요구된다.

본 연구에서는 레이저를 기반으로 한 새로운 비파괴·비접촉식 응력측정기술을 제안하고, 해당 기술을 이용한 로드셀을 개발하였으며, 이에 대한 활용 가능성을 실험적으로 검증하였다. 본 레이저 기반 응력 측정방법의 핵심기술은 압분광법으로, Fig. 1과 같이 대상물이 하중을 받았을 때 수집된 스펙트럼이 하중이 없는 상태에서 수집된 스펙트럼으로부터 이동(Shift)되는 현상을 기반으로 응력을 측정하는 방법을 말한다. 여기서, 응력-스펙트럼 이동은 선형적인 관계를 갖는다(Ma and Clarke, 1993). 해당 기술은 차열피막의 잔류응력을 측정(Grabner, 1978; Lipkin et al., 1996)하는데 주로 사용되는 기술이며, 최근에 토목구조물의 응력측정에도 적용이 시도되고 있다(Kim and Yun, 2018).

스펙트럼이 하중이 없는 상태에서 수집된 스펙트럼으로부터 이동(Shift)되는 현상을 기반으로 응력을 측정하는 방법을 말한다. 여기서, 응력-스펙트럼 이동은 선형적인 관계를 갖는다(Ma and Clarke, 1993). 해당 기술은 차열피막의 잔류응력을 측정(Grabner, 1978; Lipkin et al., 1996)하는데 주로 사용되는 기술이며, 최근에 토목구조물의 응력측정에도 적용이 시도되고 있다(Kim and Yun, 2018).

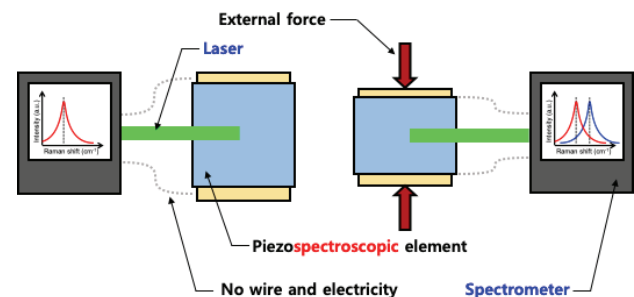


Fig. 1 Piezospectroscopic Effect

따라서, 본 연구에서는 라만 형광분광법을 이용한 인장케이블 응력측정방법을 1)실내실험을 통하여 검증하고, 2) 실규모 실험을 통하여 문제점을 파악하였으며, 3) 최종적으로 현장 적용에 적합한 응력측정용 로드셀 프로토타입을 개발하였다.

¹정회원, (주)유디엔에스, CTO

²정회원, 세종대학교 건설환경공학과 선임연구원, 교신저자

*Corresponding author: namgyu.kim@outlook.com

Sejong University, Seoul, 05006, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2019년 3월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 레이저기반 비접촉식 로드셀

2.1 알루미늄이 도포된 로드셀 제작

라만 형광분광법을 이용하여 하중을 측정하기 위해서는, 하중을 측정하고자 하는 대상물 표면에 압분광현상을 갖는 라만특성물질을 도포해야한다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 중심공 압축 타입의 로드셀 제작에 사용되는 로드셀 몸체에 알루미늄(Al_2O_3)를 코팅하고, 이를 하중 측정용 센서로 사용하였다. 코팅방법으로는 비교적 제작환경에 대한 제약이 적은 용사코팅(Fig. 3)방법이 사용되었다. 알루미늄 코팅과 모재와의 접착력을 높이기 위하여, 용사코팅을 수행하기 전에 모재 표면을 연마하고, 약 0.05~0.1mm의 본딩 코팅을 수행하였다.

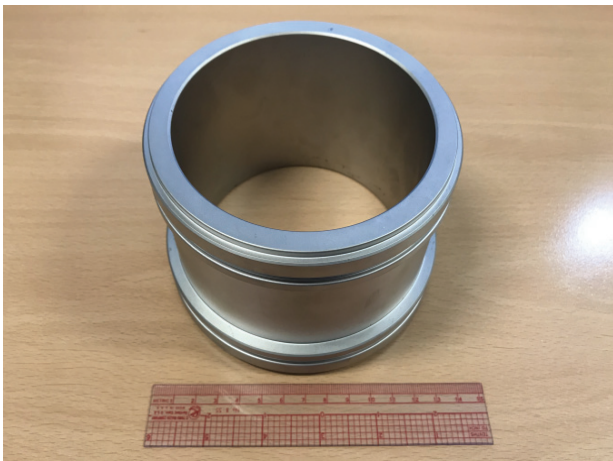


Fig. 2 Center-hole Load Cell w/o Strain Gauges

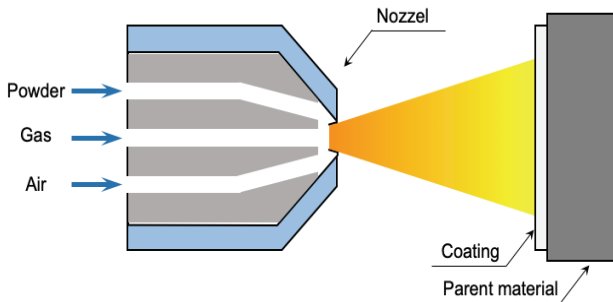


Fig. 3 Thermal Spraying Coating Process

Fig. 4는 용사코팅방법을 이용하여 도포된 알루미늄 코팅을 갖는 라만 형광분광법 기반의 비접촉식 로드셀을 보인다. 그림에서 회색빛을 띄는 부분이 용사코팅을 이용하여 도포된 알루미늄 층이며, 로드셀 케이싱 고정에 사용되는 상·하부 돌출부를 제외한 중심부에만 알루미늄이 도포되었다.

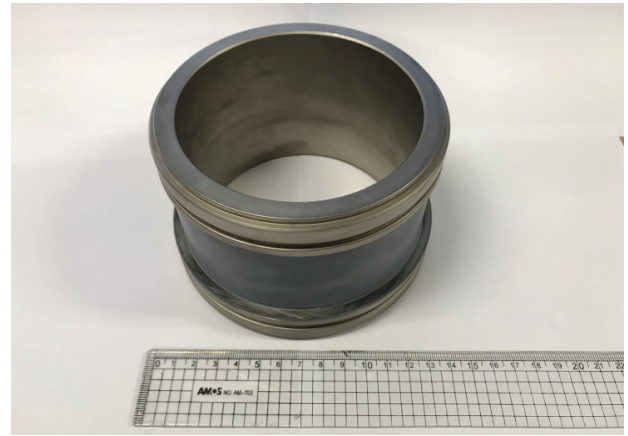


Fig. 4 Customized Center-hole Load Cell

2.2 실내실험결과

레이저기반 압분광법을 이용하여 현재 인가되는 하중을 측정하기 위해서는 응력변화와 스펙트럼 이동량이 선형적인 관계를 가져야 한다. 따라서, 이를 실험적으로 검증하기 위하여, 알루미늄이 코팅된 비접촉식 로드셀에 대하여, 일축압축시험을 수행하고, 각 하중단계에서의 스펙트럼을 수집하여 이를 분석하였다. Fig. 5는 비접촉식 로드셀에 인가된 하중을 측정하는 방법을 보이며, Fig. 6는 532nm 레이저를 알루미늄 코팅 표면에 조사한 모습을 보인다. 이와 같이, 압분광법을 이용하여 구조물의 응력을 비접촉식으로 계측할 수 있다.

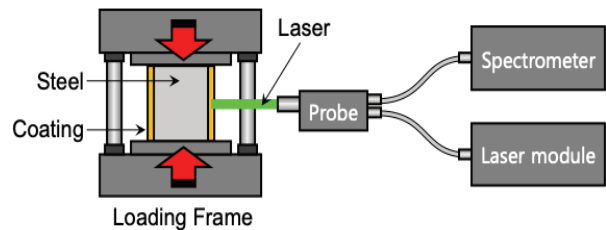


Fig. 5 Schematic Drawing of Piezospectroscopic System

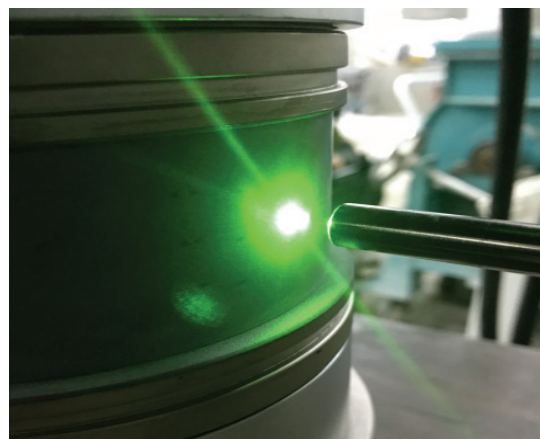


Fig. 6 Laser-spot for Stress Measurement

Fig. 7는 비접촉식 로드셀에 인가된 압축력과 각 하중단계에서의 스펙트럼 이동량을 보인다. 5 tonf의 증분량으로, 최대 70 tonf의 압축력이 시편에 인가되었으며, 70 tonf의 압축력이 비접촉식 로드셀에 인가된 경우의 스펙트럼 이동량은 약 0.7 cm⁻¹이었다. 또한, 압축력과 스펙트럼 이동의 관계가 선형적임을 해당 실험을 통하여 확인하였다.

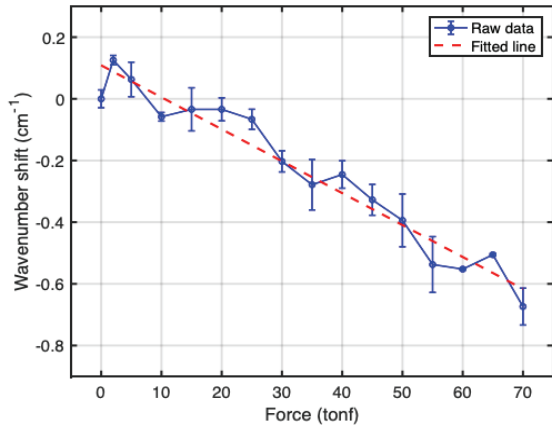


Fig. 7 Force vs. Wavenumber Shift

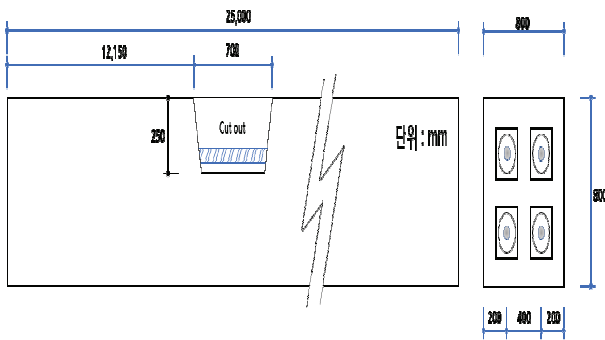


Fig. 8 Full-scale PSC Specimen

3. 현장적용 실험

실내실험을 통하여, 비접촉식 로드셀에 인가된 압축력과

스펙트럼 이동이 선형적인 관계임을 확인하였고, 이에 대한 현장 적용성 검토를 위하여, Fig. 8과 같이 전장 25m인 실규모 프리스트레스콘크리트 박스교 (PSC Box Bridge) 시험체를 제작하고, Fig. 9의 post tension jack machine을 이용하여, 강선에 긴장력을 인가하였다. 그리고 Fig. 10과 같이 실내실험과 동일한 532nm 레이저를 비접촉식 로드셀에 조사하여, 각 하중단계에서의 스펙트럼 이동량을 측정하였다.

실내실험과 동일하게 최대 70 tonf의 압축력이 비접촉식 로드셀에 인가되었지만, 그 실험결과는 실내실험결과와 일치하지 않음을 Fig. 10에서 확인할 수 있다. 이는, 레이저가 조사된 미소한 면적들이 각기 다른 하중분포를 갖기 때문이다.

즉, 실내실험에서 레이저를 조사한 위치와, 실외실험에서 레이저를 조사한 위치가 같지 않았기 때문에 위와 같은 결과를 얻은 것이다. 따라서, 해당기술을 이용하여 프리스트레스 콘크리트 강선에 인가된 장력을 측정하기 위해서는, 레이저가 조사되는 위치가 언제나 동일할 수 있도록, 프로브를 고정하는 케이싱 작업이 반드시 필요하다.



Fig. 9 Post Tension Jack Machine

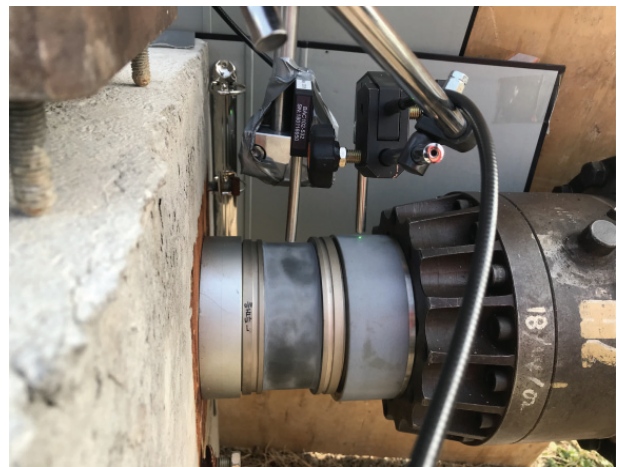


Fig. 10 Field Test Setup

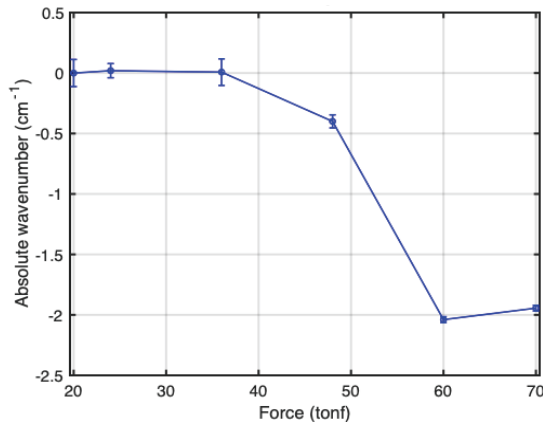


Fig. 11 Force vs. Wavenumber Shift

4. PSC 강선 응력계측용 로드셀 프로토타입

알루미늄 코팅을 응력센서로 사용하기 위해서는, 반복적인 상황에서 레이저 조사 위치가 동일해야 한다는 것을 실내외 시험을 통하여 확인하였다. 따라서, 본 연구에서는 프로브 위치를 고정할 수 있도록 케이싱을 제작하고, 케이싱이 제작된 비접촉식 로드셀에 대한 압축시험을 다시 수행하였다. 아래 Fig. 13은 프로브가 케이싱에 고정된 비접촉식 로드셀에 대한 일축압축하중시험 예를 보인다.

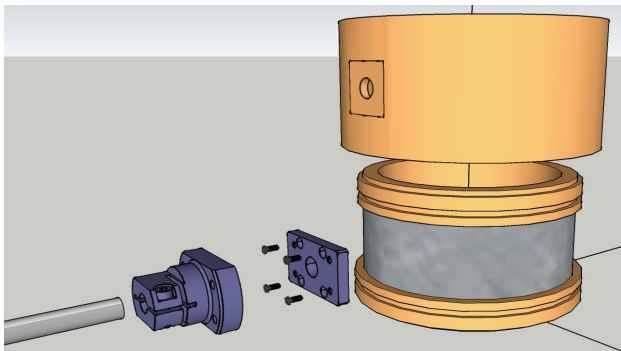


Fig. 12 Concept of Laser-based Load Cell with Probe Holder

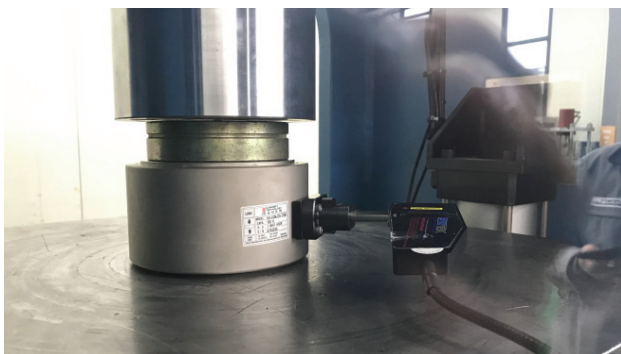


Fig. 13 Prototype of Laser-based Load Cell for PSC tendon

비접촉식 로드셀에 인가된 압축력과, 스펙트럼 이동간의 선형성을 확인하기 위하여, 10 tonf의 증분량으로 최대 40 tonf의 압축력을 비접촉식 로드셀에 인가하고, 각 하중단계에서의 스펙트럼을 수집하였다. Fig. 14는 케이싱에 고정된 프로브를 이용하여 수집된 스펙트럼 이동량을 인가된 압축력에 대하여 나타낸 것이다. 최대 40 tonf의 압축력을 비접촉식 로드셀에 인가한 경우, 압축력과 스펙트럼 이동은 선형적인 관계가 있음을 이로부터 확인하였고, 최대 이동량은 약 0.74 cm⁻¹ 이었다

직관적으로 압축력을 계산할 수 있도록, 영점을 지나는 직선을 이용하여, 커브피팅을 수행하고, 이를 적색 점선으로 Fig. 13에 같이 나타내었다. 이때, 직선의 기울기는 0.01674이고, R2는 0.9455 이다. 따라서, 해당 기울기의 역수를 취한 값인 59.74를 압분광상수로 활용하여 현재 인가된 압축력을 계산할 수 있다. 즉, 아래 식(1)과 같이 인가된 압축력(tonf)은 압분광상수와 스펙트럼 이동(cm⁻¹) 곱으로 계산할 수 있다.

$$Force = \Pi \times Spectrum\ Shift \quad (1)$$

일예로, 0.4 cm⁻¹의 스펙트럼 이동이 있을 경우, 23.90 tonf의 압축력이 인가됨을 위의 식을 통하여 계산할 수 있으며, 이는 Fig.14 에서도 동일하게 확인할 수 있다.

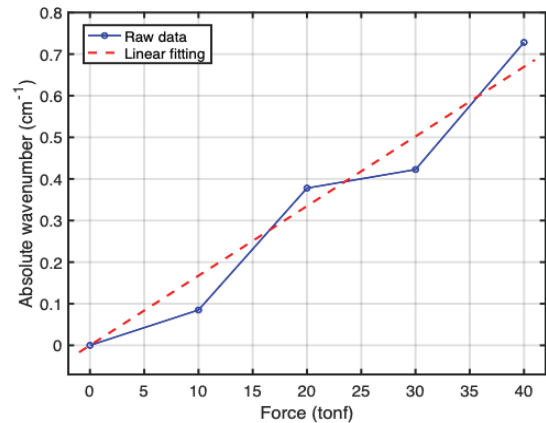


Fig. 14 Force vs. Wavenumber Shift

5. 결론

본 연구에서는, 레이저를 기반으로 한 새로운 비접촉식 로드셀을 개발하고, 이에 대한 현장적용 가능성을 실험적으로 검증하였다. 비접촉식 로드셀 개발을 위하여 중심공 압축 타입의 로드셀 제작에 사용되는 로드셀 몸체에 용사코팅기술을 이용하여 알루미늄을 도포하고, 이를 하중센서로 사용하였다. 실내 압축하중시험을 수행하여 각 하중단계에서의 스펙

트럼 이동(Shift)값을 확인하였고, 그 관계가 선형임을 확인하였다. 다만, 현장적용실험을 통하여, 반복적인 상황 하에서 레이저 조사 위치가 동일해야 하는 것을 확인하였고, 이를 보완하기 위하여 프로브를 고정할 수 있는 케이싱이 포함된 로드셀 프로토타입을 제작하였다. 해당 로드셀 프로토타입에 대한 일축압축시험을 통하여, 프로브가 고정된 위치에서 압축력과 스펙트럼 이동이 선형관계에 있음을 확인하였다. 따라서, 본 연구를 통하여 개발된 비접촉식 로드셀을 이용하여, 프리스트레스 콘크리트 텐던의 압축력을 효과적으로 측정할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

References

1. Changbin Joh, Jung Woo Lee, Imjong Kwahk(2013). Feasibility Study of Stress Measurement in Prestressing Tendons Using Villari Effect and Induced Magnetic Field. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 9(11).
2. Keunhee Cho, Jeong-Rae Cho, Sung Tae Kim, Sung Yong Park, Young-Jin Kim, Young-Hwan Park(2016). Estimation of Prestress Force Distribution in Multi-Strand System of Prestressed Concrete Structures Using Field Data Measured by Electromagnetic Sensor. *Sensors*, 16(8).
3. S. Chaki, G. Bourse(2009). Guided Ultrasonic Waves for Non-destructive Monitoring of the Streee Levels in Prestressed Steel Strands. *Ultrasonics*, 49, 162-171
4. Zouhua Li, Jingbo He, Jun Teng, Yung Wang(2016). Internal Stress Monitoring of In-Service Structural Steel Members with Ultrasonic Method. *Materials*, 9(4).
5. 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)
6. Ludwig Grabner(1978). Spectroscopic technique for the measurement of residual stress in sintered Al₂O₃. *Journal of Applied Physics*, 49(2), 580-583
7. 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
8. 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
9. 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 : 02/08/2019

Accepted : 02/12/2019

요 지 : 본 논문에서는 레이저기반 응력측정을 위한 비접촉식 로드셀을 개발을 위하여, 실내실험을 통하여 기술을 검증하고, 실규모 실험을 통하여 문제점을 파악하였으며, 최종적으로 현장적용에 적합한 응력측정용 비접촉식 로드셀 프로토타입을 개발하였다. 이를 위하여, 중심공 압축 타입의 로드셀 제작에 사용되는 로드셀 몸체 표면에 용사코팅기술을 이용하여 알루미늄을 도포하고, 레이저를 기반으로한 압분광법을 이용하여, 비접촉식으로 응력을 계측하였다. 이때, 인가되는 응력과 스펙트럼 이동간의 관계가 선형임을 확인하였다. 해당 기술의 현장 적용성 확인을 위하여, 실규모 프리스트레스 콘크리트 시편을 제작하고, 레이저를 조사하여 인가된 응력을 확인하는 과정에서, 반복적인 상황 하에서 레이저 조사 위치가 동일해야 함을 확인하였다. 이를 보완하기 위하여 프로브를 고정할 수 있는 케이싱이 포함된 로드셀 프로토타입을 제작하였고, 실내일축압축시험을 통하여 압축력과 스펙트럼 이동간의 선형성을 확인하였다. 따라서, 본 연구를 통하여 개발된 비접촉식 로드셀을 이용하여, 압축력을 효과적으로 측정할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 비접촉식 센싱, 로드셀, 레이저, 압분광법
