



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

PSC거더 긴장력 측정을 위한  
FBG 및 EM센서 유효성 실험



2017년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

이 주 석

공학석사 학위논문

PSC거더 긴장력 측정을 위한  
FBG 및 EM센서 유효성 실험

지도교수 이 환 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2017년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

이 주 석

# 이주석의 공학석사 학위논문을 인준함

2017년 2월 24일

주 심 공학박사 국 승 규



위 원 공학박사 장 희 석



위 원 공학박사 이 환 우



# 목 차

<b>1. 서 론</b> .....	<b>1</b>
1.1 연구 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구 동향 .....	3
1.2.1 긴장력 계측 및 검증 기술 .....	3
1.2.2 긴장력의 비파괴 측정방법 .....	4
1.2.3 긴장력 관리 기술 .....	6
<b>2. 실험계획 및 방법</b> .....	<b>7</b>
2.1 센서 및 측정 장비 개요 .....	7
2.1.1 로드셀 .....	7
2.1.2 EM센서 .....	9
2.1.3 FBG센서 .....	11
2.2 실험방법 .....	14
2.2.1 계측센서의 교정실험(MTS) .....	14
2.2.2 소형 프레임 거더 실험 .....	17
2.2.3 장기계측 실험 .....	22
<b>3. 실험결과</b> .....	<b>25</b>
3.1 계측센서 교정실험 결과 .....	25
3.1.1 FBG센서 교정 실험 결과 .....	25
3.1.2 EM센서 교정 실험 결과 .....	27
3.2 소형프레임 거더 실험 .....	29
3.2.1 FBG센서 소형프레임 실험 결과 .....	29
3.2.2 EM센서 소형프레임 실험 결과 .....	32
3.3 장기계측 실험 결과 .....	34
3.3.1 FBG센서 장기계측 결과 .....	35
3.3.2 EM센서 장기계측 결과 .....	36
<b>4. 결론</b> .....	<b>37</b>
<b>참 고 문 헌</b> .....	<b>38</b>

## 그림목차

그림 2.1 FBG 센서의 원리 .....	7
그림 2.2 스마트 텐던의 개념도 .....	8
그림 2.3 Elasto-magnetic Sensor .....	9
그림 2.4 장력변화에 따른 자화 이력곡선 변화 .....	10
그림 2.5 Conventional loadcells .....	13
그림 2.6 Calibration of loadcells (하중센서의 보정) .....	15
그림 2.7 Calibration of EM sensor (EM센서의 보정) .....	15
그림 2.8 계측센서 교정실험 단계별 인장 .....	16
그림 2.9 소형프레임 거더 모식도 .....	18
그림 2.10 긴장재 배치 모식도 .....	19
그림 2.11 소형프레임 거더 실험(1) .....	19
그림 2.12 소형프레임 거더 실험(2) .....	20
그림 2.13 스마트강연선의 모식도 .....	21
그림 2.14 장기계측 실험 .....	24
그림 3.1 FBG 센서 교정실험 결과 .....	26
그림 3.2 EM 센서 교정실험 결과 .....	28
그림 3.3 FBG 센서 소형프레임 거더 실험 결과(1) .....	30
그림 3.4 FBG 센서 소형프레임 거더 실험 결과(2) .....	31
그림 3.5 Evaluation of prestress using EM sensor(강연선 3가닥) .....	32
그림 3.6 Evaluation of prestress using EM sensor(강연선 7가닥) .....	33
그림 3.7 장기계측에 따른 FBG센서의 긴장력 측정값 .....	35
그림 3.8 장기계측에 따른 EM센서의 긴장력 측정값 .....	36

## 표목차

표 2.1 Typical specifications for loadcells .....	11
표 2.2 장기계측 수행 일자 .....	23
표 3.1 장기계측 기간에 따른 긴장력 .....	34





# Effectiveness Tests for Measureable of Prestressing Force by Equiped FBG and EM Sensors

**Joo-seok, Lee**

*Department of Civil Engineering, Graduate School,  
Pukyong National University*

## **Abstract**

Effective pre-stress in the safety of PSC bridges is one of the most important factors. However, the prestressing force is only measured during construction using a jacking device and then, it can not actually be managed. In this study, we tested and investigated the performance of FBG and EM sensors capable of directly measuring the effective prestressing force. The center hole type load cell shows a tendency to measure the prestress force, especially above the reference value, when eccentric loads are applied. The EM sensor offers several advantages along with good accuracy that can be installed anywhere along the tendon. Test results can be useful for developing block-out PSC girders with FBG and EM sensors that monitor effective prestress forces over the service life.

**Keywords** : *PSC girder, prestress evaluation, loadcell, EM sensor, FBG sensor*



# 1. 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

초기의 프리스트레스트 콘크리트는 실용화 되지 못하였다. 그 이유는 당시에 사용하던 낮은 강도의 강재로 인하여 긴장응력이 낮을 수밖에 없었는데, 콘크리트의 크리프(Creep)와 수축(Shrinkage)으로 인한 응력손실로 긴장력이 거의 남아 있지 않은 상태가 되었기 때문이다. 긴장력 소멸에 대한 대안으로 1908년 미국의 Streiner는 긴장재를 재긴장하는 안을 제안하기도 하였으나 실용적으로 적용되지는 못하였다. 긴장력 손실을 극복하기 위해서는 높은 응력으로 긴장을 할 수 있는 고강도 강재를 사용하여야 했으나, 당시에는 고강도 강재를 생산하지 못하는 기술수준이었다. 따라서 그 후 오랜 기간 프리스트레스트 콘크리트의 개발은 침체를 맞았다. 하지만, 유럽에 선형 긴장에 대한 개발이 지속되던 중 1926~1928년 사이에 프랑스의 E. Freyssinet가 연성이 큰 고강도 강재에 의하여 응력손실을 극복할 수 있는 방법을 정립한 후 1940년 PS강재 정착장치를 포함한 프레시네 시스템을 개발함으로써 비로소 프리스트레스트 콘크리트 구조가 실용화 될 수 있었다. 프리스트레스트 콘크리트의 발전에는 많은 구조공학자의 노력이 있었는데, 영국의 Abeles는 1930년대에 부분긴장(Partial Prestressing) 프리스트레스트 콘크리트의 개념을 제안하였고, 1960년대까지 지속적으로 이 개념을 발전시켰다. 독일에서는 Leonhardt가, 러시아에서는 Mikhailov가, 미국에서는 하중평형 개념(Load Balancing Concept)을 개발하고 발전시킨 Lin 등 많은 구조공학자의 노력으로 프리스트레스트 콘크리트가 발전되어, 현재에는 교량 외에도 건물, 지하구조물, 송신탑, 콘크리트 관 및 말뚝, 포장, 저장탱크, 원자력발전소

의 원자로 격납건물, 운동경기장, 터널, 해양구조물 등 매우 다양한 구조물에 적용되고 있다(이재훈, 2015).

PSC 구조계에서 현재 긴장력을 비파괴적인 방법으로 평가할 수 있는 기술은 예전부터 꾸준히 연구되어 왔다. Lin(1963)은 구조물의 긴장력 손실이 구조적 강성에 변화를 준다는 것을 보였으며, Saïidi 등(1994)과 Miyamoto 등(2000)은 긴장력 손실과 구조물의 진동 특성과의 관계를 연구하였다. Civjan 등(1995)은 손상된 PSC 구조물의 잔류 긴장력 평가방법을 제시하였으며, Pessiki 등(1996)은 수십년의 공용기간이 경과한 PSC 거더의 긴장력 추정 연구를 수행하였다. Burn 등(1991)과 Sharif 등(1993)은 비부착된 연속보에서의 긴장력 손실과 PSC 합성보에서의 시간에 따른 긴장력 손실에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 이미 건설된 교량에 대한 정확한 긴장력 측정은 지금까지의 기술개발 현황으로는 쉽지 않은 일이며, 프리스트레스 긴장재의 잔존 응력 평가기술은 실무에 적용되기 위해서는 아직 해결되어야 할 문제점들이 많이 남아있다(신경준 등, 2015). 또한, 현재의 교량의 긴장력 및 안전성을 확인하는 방법은 수많은 사람들이 사용하는 중요한 사회 간접시설물의 안정성과 신뢰성을 담보하기 위한 방법으로는 부족하다. 이에 따라, 긴장력 도입 시 신장량에 의한 간접관리가 아닌 직접적인 측정을 통한 긴장력 관리가 가능하고, 공용중 장기손실이 반영된 긴장력 확인을 통하여 보강시기에 대한 선제적 선택과 적합한 보강의 결정이 가능한 거더의 개발이 요구된다(박영웅 등, 2015).

본 연구에서는 이를 위하여 PSC 거더의 시공단계부터 공용기간까지 PS 긴장력을 직접적으로 관리하기 위하여 FBG 센서와 EM 센서의 적용 가능성을 확인하는 기초실험연구로서, FBG 센서와 EM 센서를 활용하여 텐던의 긴장력을 측정하는 실험연구를 수행하였다.

## 1.2 연구 동향

### 1.2.1 긴장력 계측 및 검증 기술

최근 재료기술 및 설계기술의 급속한 발전에 따라 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 시공은 매우 보편화되었다. PSC 구조체는 콘크리트의 인장에 대한 취약점을 극복하기 위하여, 강연선 등과 같은 PS 강재를 이용하여 콘크리트에 미리 압축응력을 도입한 구조체를 말한다(Michael P. Collins, Denis Mitchell, 1991 ; Nawy, Edward G. 2009). 이러한 PSC 구조체를 구성하는 핵심 요소부재인 PS 강재의 긴장응력에 대한 주기적인 모니터링은 반드시 필요하다(신경준 등, 2015). 현재는 시공단계에서는 유압 펌프의 유압을 응력으로 환산하여 긴장재에 가해지는 긴장력을 측정할 수 있다. 반면, 사용 단계의 구조물은 긴장재의 변형이 발생하여도 구조물에 손상이 발생하지 않는 비부착 긴장재를 대상으로만 가력 실험을 할 수 있다. 비부착 긴장재의 경우 재긴장을 수행하면서, 정착단에 틈이 발생하는 시점에서의 유압 펌프의 압력을 응력으로 환산하여 현재의 긴장력을 측정할 수 있으며(Lift-off test), 이 방법은 원자로 격납건물 등에서 실제로 활용되고 있는 방법이다.

## 1.2.2 긴장력의 비파괴 측정 방법

PSC 구조계는 현재 긴장응력을 비파괴적인 방법으로 평가할 수 있는 기술은 꾸준히 연구되어 왔으나, 아직까지 실용화 단계에 이르지 못하였다. 다음은 다양한 긴장력의 비파괴 측정 방법을 제시하였다.

- 1) 초음파 및 탄성과 속도 응용법 : PC 강재의 잔존 응력 평가를 위하여 초음파 또는 탄성과를 활용하는 연구가 이루어져 왔으며, 이는 탄성체 내부의 응력 상태에 따라서 탄성과 속도가 달라지는 물리적 현상에 근거를 두고 있다. 비부착식 긴장재의 경우 초음파 도달시간이 강연선의 응력과 관계가 있음을 밝히는 사례들이 있었다(Chen and Wissawapaisal 2001). 그러나 Chaki와 Bourse(2009) 등은 유도초음파를 이용하여 비부착 PS 강연선의 응력 모니터링은 가능하지만, 그라우팅 처리된 부착식 PS 강연선에 대한 모니터링은 어렵다고 보고하였다. 그 이유는 부착식 PS 강연선의 계측 길이가 길면, 부착 특성으로 인한 초음파의 감쇄가 증가하여 응답을 측정하기 어렵기 때문이다. 탄성과속도법을 활용한 다수의 연구사례 역시 보고되고 있다. 그러나 탄성과속도법은 PC 강재의 응력이 인장강도의 40%이상이면, PC 강재의 응력에 대한 탄성과속도의 민감도가 급격히 감소하는 문제가 있다. 따라서, 기 시공된 국내 PSC 교량은 대부분 부착식 텐던을 활용한 구조형식이며, 교량 거더의 경우에는 일반적 경간장이 대략 30~40m인 것과 PC 강재의 잔류응력이 60%이상인 것을 감안하면, 초음파 및 탄성과 비파괴 긴장력 측정법의 정확도에 문제가 발생할 가능성이 있음을 보고하고 있다.

2) 진동 특성 응용법 : PSC 거더의 진동 특성변화를 이용하여 긴장력을 측정하고자 하는 연구가 진행되었다(Saiidi and Douglas 1994;). Saiidi는 1994년에 고유진동수의 변화를 계측하여 긴장력 손실을 예측할 수 있는 방법을 연구하였다. Nabil과 Brian(1996)는 거더의 중앙부분이 오픈된 PSC 거더의 동특성에 관한 실험을 수행하였으며, 긴장력과 진동수가 밀접한 관계가 있음을 밝혀냈다. PSC 교량은 긴장력의 변화 이외에도 균열, 지점부 파손 등 여러 원인에 의하여 거더의 휨강성 저하가 발생하기도 한다. 이들 손상들은 서로 다른 구조물 진동특성의 변화를 유발하기 때문에, 각각의 개별 손상에 대해서는 수많은 기법들이 개발되고 검증되었으나, 여러가지 손상이 동시에 발생하였을 때 그 기법들을 적용하기에는 문제가 있다. 따라서, 진동특성 변화만으로 긴장력의 변화를 모니터링하는 것은 현재의 기술 수준으로는 어려운 것으로 판단된다.

3) 자기장 응용법 : 자기 투자율의 변화를 측정함으로써 텐던이나 케이블의 장력을 측정하는 기술이 Wang 등(2000)에 의해 개발되었다. 자성체에 응력이 가해지면 자속 특성이 변하는 역자기변형 효과가 발생하며, 이를 응용하여 자성체의 투자율을 모니터링하여 자성체에 가해진 응력을 추정할 수 있다. Baudendistel과 Tunner(2007)는 자성체의 투자율과 응력 사이의 실험적 관계가 전체 응력구간에서 선형 비례한다는 것을 보고하였다. 이는 비자성체인 콘크리트와 강자성체인 PC 강재로 이루어진 PSC 구조물에서, PC 강재의 투자율을 계측하여 PC 강재만의 응력상태를 추정할 수 있다는 것이다.

### 1.2.3 긴장력 관리 기술

현재의 시공단계에는 신장량 측정에 의하여 간접적으로 긴장력을 검증한다. 공용중인 교량의 유효 긴장력을 측정을 위한 여러 가지 방법론이 연구되고 있으나, 아직까지 부착된 PSC 거더의 긴장력을 측정하기에는 신뢰성이 부족한 실정이다. 따라서, 현장에서는 교량의 처짐을 측정하거나 균열을 관찰하여 공용 중의 긴장력 손실, 그리고 그에 따르는 내하력 손실을 간접적으로 추정하는 방법이 사용되고 있다.

그러나, 처짐과 균열에 의한 교량의 안전성 확인 방법은 수많은 사람들이 사용하는 사회간접자본의 안정성과 신뢰성을 담보하기 위한 방법으로는 부족하다. 이에 따라, 긴장력 도입시 신장량에 의한 간접관리가 아닌 긴장력 및 긴장력 분포에 대한 직접적인 관리가 가능하고, 공용중 장기손실이 반영된 긴장력 확인을 통한 보강시기의 선제적 선택과 적합한 긴장력 결정이 가능한 거더의 개발이 필요로 한다. 따라서 안전하고 효율적인 PSC 교량을 위해서는, 시공단계부터 유지관리 단계까지 신뢰성 있는 긴장력 평가 및 검증이 가능한 센서 내장형 스마트 거더의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 긴장력 계측을 위해서 비접촉방식의 EM센서와 변형률 계측시 자기장의 영향이 없고 온도에 대한 영향을 고려할 수 있는 FBG 센서를 활용하였다.

## 2. 실험 계획 및 방법

### 2.1 센서 및 측정 장비 개요

본 실험에는 FBG 센서와 EM 센서를 활용하여 긴장력 측정을 실시하였다. FBG 센서와 EM 센서의 원리를 통해 PSC 교량에 적용하기 위한 기초실험연구로 계측센서 교정실험, 소형프레임 거더 실험, 장기계측 실험 순으로 진행하였다. 본 실험에 사용된 센서의 원리는 다음과 같다.

#### 2.1.1 FBG 센서

FBG(Fiber Bragg Grating) 센서는 0.2 mm 내외의 광섬유에 격자를 새기고 광섬유를 통해 입력한 광신호의 반사를 이용하여 격자위치에서 온도와 변형률을 측정하는 센서로서 정밀성이 뛰어난 장점이 있다. 온도와 변형률에 따라 새겨진 격자의 간격이 벌어지면서 반사되는 광신호의 파장이 바뀌게 된다. 변화된 파장을 통하여 온도와 변형률을 측정할 수 있다. 그림 2.1은 FBG 센서의 원리를 나타낸 그림이다. 입력된 광신호(Input Signal)가 광섬유를 통해 광섬유에 새겨진 격자(Bragg Grating)를 통과하면서 통과한 광신호(Transmitted Signal)과 반사된 광신호(Reflected Signal)를 통해 온도와 변형률을 측정한다.

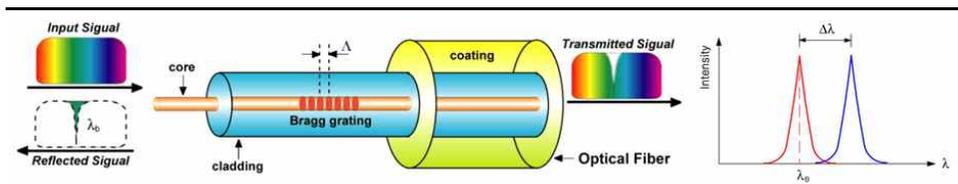


그림 2.1 FBG 센서의 원리

이와 같은 FBG 센서의 원리를 이용하여 PSC 교량에 적용할 수 있도록 개발된 스마트 강연선이 있다. 스마트 강연선은 중공 강연선에 FBG 센서를 삽입한 것으로 FBG 센서가 내장되어 온도와 변형율을 측정할 수 있는 강연선이다. 기존 강연선의 중앙 킹와이어를 제거하고 킹와이어와 같은 외경을 가지는 강재튜브(Steel tube)인 중공 킹와이어로 대체한 것이다(김재민 등, 2008). 즉, 그림 2.2와 같이 FBG 센서를 강연선에 내장하여 PS 긴장재의 변형율을 측정하고 모니터링하기 위한 기술이다.



그림 2.2 스마트텐던의 개념도

## 2.1.2 EM 센서

EM(Elasto-magnetic) 센서는 그림 2.3 ~ 그림 2.4과 같이 강자성체에 자기장을 가하게 되면 강자성체 내부의 자기장이 가해진 자기장과 평행한 상태로 정렬하게 된다. 이후 외력이 가해지면 단면의 변화로 인해서 자속 밀도가 변하게 된다. 투자율(Permeability,  $\mu$ )은 자기장의 세기에 따른 자속밀도로 장력( $\sigma$ )증가에 의해 감소하게 된다. 긴장력이 증가함에 따라 같은 자기장이 가해졌을 때에 자화되는 최댓값이 줄어든다(박주영 등, 2015). 이를 이용하여 자성체의 자화 이력곡선의 변화를 계측함으로써 자성체의 비투자율을 계측하여 자성체의 장력 변화를 계측할 수 있다. 마그네틱 센서는 뛰어난 신뢰도와 재현성의 장점을 가져 항공, 선박 등을 포함한 다양한 구조물의 모니터링에 널리 사용되고 있다(박승희 등, 2012). 또한, PSC 거더 내부에 설치가 가능한 EM 센서를 통하여 PS 텐던의 긴장력에 따라 변화하는 자기 이력을 계측할 수 있다(김준경 등, 2015).



그림 2.3 Elasto-magnetic Sensor

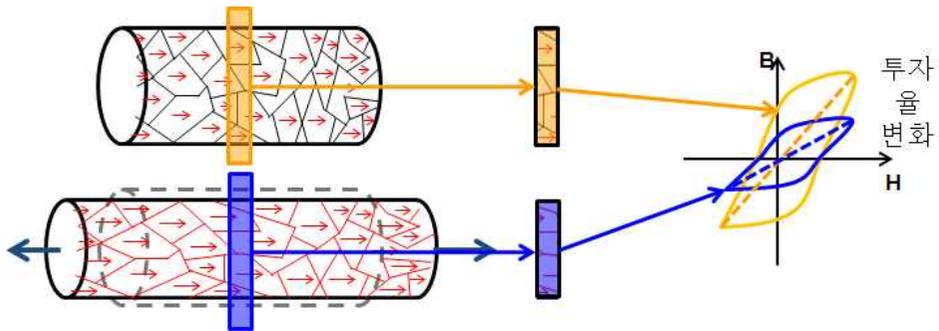


그림 2.4 장력변화에 따른 자화 이력곡선 변화

현재까지의 EM센서에 대한 연구는 단순히 PS 긴장재의 긴장력 예측 및 손상진단에 관한 실험 단계의 연구와 PSC 거더 성능에 대한 일차원적인 연구만이 이루어지고 있는 실정이다. 긴장력 계측을 위한 센서가 PSC 거더의 시공 환경에 부합되지 않게 제작되어 실제 PSC 거더에 적용되기 어려우며 마찬가지로 PSC 거더의 설계 시 센서 내장을 위한 최적설계가 이루어지지 않아 실제 PSC 거더 유지관리를 위한 전반적인 긴장력 관리 시스템으로의 적용이 힘든 실정이다.

하지만, 대량 생산될 경우 낮은 비용으로 제작·설치할 수 있으며, 또한 비접촉방법으로 동작하기 때문에 거더의 어느 위치에나 설치가 가능하기 때문에 그 개발이 절실하다.

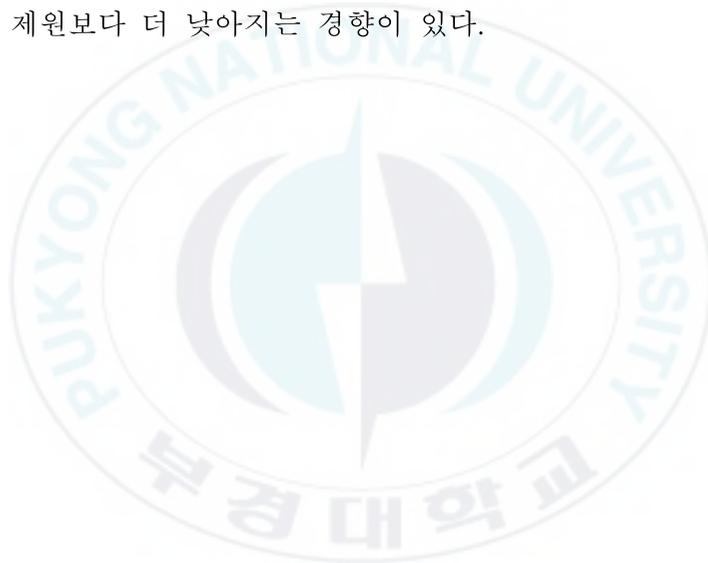
### 2.1.3 로드셀

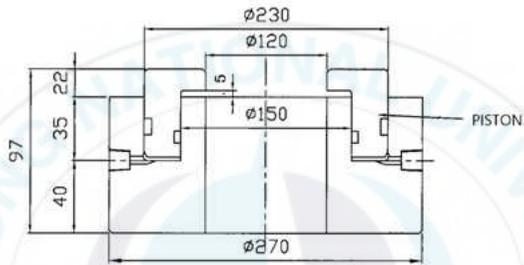
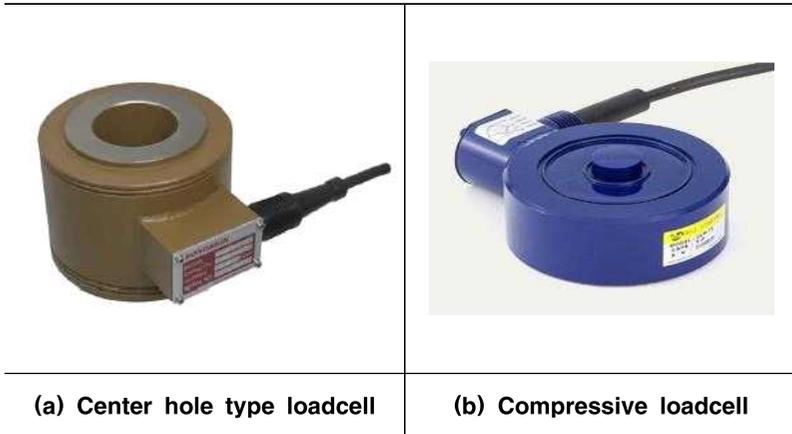
긴장력을 직접 측정하기 방법으로 로드셀을 활용 하였다. 이번 실험에서는 여러가지 로드셀을 사용했는데, 첫 번째는 그림 2.5에서 보여주는 바와 같이 프리스트레스의 긴장력 측정에 가장 일반적으로 사용되는 중공형 로드셀이다. 중공형 로드셀은 긴장재의 하중을 비교적 손쉽게 측정할 수 있는 반면, 로드셀 자체의 정확도가 다른 일반적인 로드셀에 비하여 낮은 특성을 가지고 있다. 두 번째는 일반적인 압축식 로드셀이다. 압축에 대한 하중을 일반적으로 측정하는 로드셀이며, 중공형에 비해 높은 사양을 나타낸다. 세 번째로 편심의 영향을 배제한 하중측정을 위하여 그림 2.4에서 보여주는 바와 같이 압력식 로드셀을 개발하여 적용하였다. 압력식 로드셀은 스트로크가 작은 폐쇄식 유압잭에 압력센서를 설치하여 외부 하중에 의하여 발생하는 압력의 변화 측정하여 이를 하중으로 환산하는 원리를 응용하였다. 압력식 로드셀의 크기는 단부에서 설치가 용이하도록, 최대한 납작하게 설계하였다

**표 2.1 Typical specifications for loadcells**

Items	Center-hole loadcell	Compressive loadcell	Pressure-type loadcell
Rated Output	1.0 mV/V	2.0 mV/V	1.0 mV/V
Non-linear	≤1.0% R.O	≤0.05% R.O	≤0.3% R.O
Hysteresis	≤1.0% R.O	≤0.05% R.O	≤0.3% R.O
Repeatability	≤1.0% R.O	≤0.05% R.O	≤0.3% R.O

설치된 압력센서의 정격출력은 1mV/V이고 비직진성, 반복성 및 비가역성은 0.3% R.O.로써 중공 로드셀보다 정확한 하중측정이 가능할 것으로 예상된다. 표 2.1에서는 제조사에서 제공된 중공 로드셀과 일반 로드셀의 사양을 비교하였다. 중공 로드셀은 Rated Output(전격 출력)값이 압력식 로드셀과 비교하여 50% 수준이며, 이는 계측시의 정확도와 직접적으로 관련 된 수치이다. 중공 로드셀의 비선형성, 반복성, 비가역성 역시 압력식 로드셀과 비교하여 20배의 큰 수치를 보이고 있다. 또한 실제 측정된 사례들을 분석하여 보면 편심 하중이 작용하는 경우에는 측정값의 정확도가 제품의 제원보다 더 낮아지는 경향이 있다.





(c) Pressure-type loadcell

그림 2.5 Conventional loadcells

## 2.2 실험방법

### 2.1.1 계측센서의 교정실험(MTS)

계측센서의 교정실험은 FBG 센서와 EM 센서를 MTS 재료시험기를 이용하여 진행하였다. 또한 이 후 실험에서 기준 하중으로 사용될 로드셀도 MTS 재료시험기를 통해 교정하였다. 계측센서의 교정실험에 대한 실험 방법은 다음과 같다.

압축으로 가력 해야 하는 로드셀들은 그림 2.6와 같이 압축력을 도입하고 MTS 재료시험기 하중을 기준으로 각각의 로드셀들의 하중을 교정하였다. 그림 2.6에서 좌측그림은 일반적인 압축로드셀이며, 우측그림은 증공로드셀이다. 이와 같이 기준하중 측정에 사용될 로드셀도 여러 종류를 이용하였다.

인장으로 가력 해야 하는 FBG 및 EM센서는 그림 2.7과 같이 MTS 재료시험기에 1개의 강연선을 설치하여 하중 재하를 하여 교정하였다. 그림 2.7에서 사용된 강연선은 스마트 강연선으로 FBG 센서가 내장된 강연선을 사용하여 FBG 센서에 대한 교정실험을 진행하였다. 또한 스마트 강연선에 EM 센서를 설치하여 FBG 센서와 동시에 실험을 진행하였다. 재하하중은 각각 0, 40, 80, 120, 160kN의 인장력을 도입한 후 EM센서를 MTS 재료시험기의 측정하중을 기준으로 교정하였다.

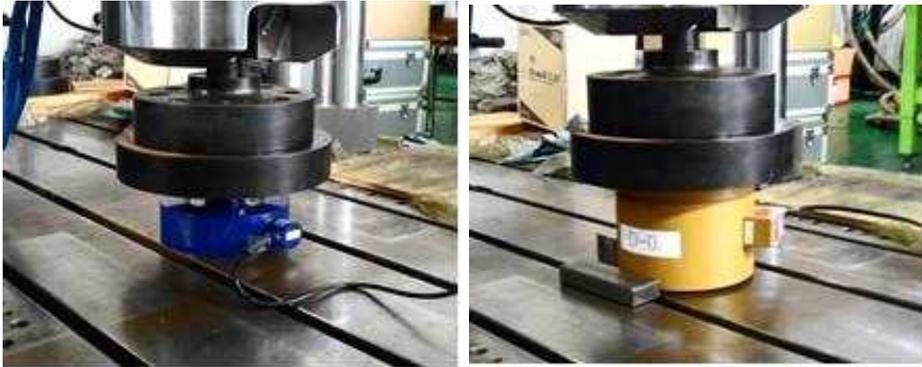


그림 2.6 Calibration of loadcells (하중센서의 보정)

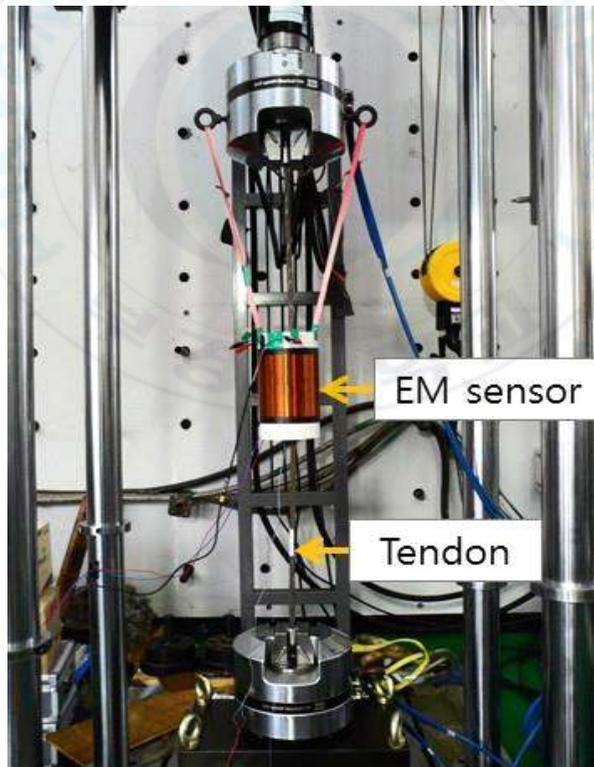


그림 2.7 Calibration of EM sensor (EM센서의 보정)

FBG센서가 내장된 스마트강연선은 다음 기준을 참조하여 적용토록 하였다.

(가) 기술표준원의 KS규격에 명시하는 바가 없어 하중재하 속도는 기존 사례를 주하여 수행

(나) 전자재시험연구소 실험사례(2006, 2008)

$$\text{하중제어} : \frac{2,000 \text{ kgf}}{60 \text{ sec}}, \quad \text{변위제어} : \frac{2 \text{ mm}}{60 \text{ sec}}$$

긴장력을 가하는 속도는 균일한 것이 바람직하므로 하중제어 또는 변위제어 방법으로 실시

(다) 20.0 kN/min(0.05 mm/s, 3 mm/min)의 속도로 수행, 최대 200 kN 하중 도입

(라) 그림 2.8과 같이 40.0kN마다 EM센서의 계측을 위해 10분간 하중 유지

(마) 그림 2.7과 같이 만능시험기(MTS) 시험기에서 수행

(바) 만능시험기의 계측은 10 Hz로 변위와 하중에 대해 계측

(사) FBG 센서 및 Strain gauge 계측장비는 10 Hz로 계측

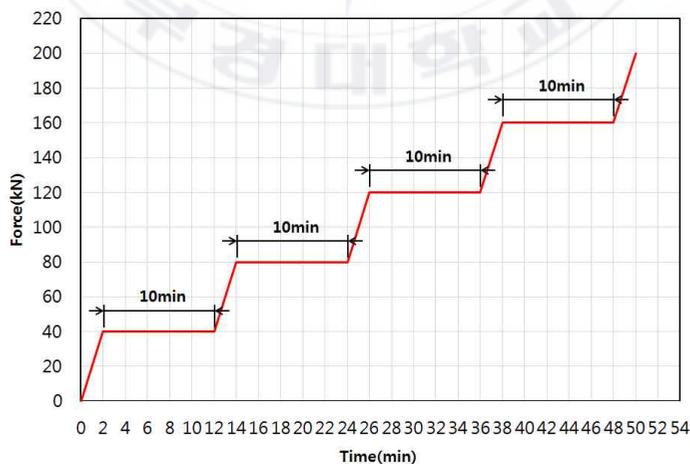


그림 2.8 계측센서 교정실험 단계별 인장

## 2.2.2 소형프레임 거더 실험

여러 종류의 계측 센서를 활용하여 텐던의 긴장력을 측정하기 위하여 소형프레임 거더 실험체를 제작하였다. 소형프레임 거더는 마찰 손실에 의한 긴장력의 영향을 배제하기 위하여 그림 2.9 ~ 그림 2.11 와 같이 2본의 I 형 강재 형강을 결합하여 내부가 비어있는 형태로 만들었으며, 양 끝단에는 프리스트레스 도입을 위한 재하판을 설치하였다.

표 2.2, 그림 2.10와 같이 강연선을 3가닥 및 7가닥 사용한 경우에 대하여 각각 직선으로 긴장력을 도입하면서 센서에 대한 계측을 실시하였다. 긴장력은 최대 강도의 70% 수준에서 적용되었다.

3가닥의 경우 200kN, 400kN, 600kN 그리고 7가닥의 경우 420kN, 700kN, 1120kN을 단계별로 긴장하였다.

$$\text{하중제어} : \frac{2,000 \text{ kgf}}{60 \text{ sec}}, \quad \text{변위제어} : \frac{2 \text{ mm}}{60 \text{ sec}}$$

- Sampling Frequency = 10 Hz (FBG), 2 Hz (MTS)
- 20.0 kN/min(0.05 mm/s, 3mm/min)의 속도로 수행
- 40.0 kN마다 EM 센서의 계측을 위해 5분간 하중유지

그림 2.9는 실험에 사용된 소형프레임 거더에 대한 모식도이며 FBG 센서가 내장된 스마트 강연선 및 일반 강연선과 EM 센서의 설치 위치를 보여준다. 또한 기준하중 측정에 사용하기 위해서 양단에 로드셀을 설치하였다. 그림 2.9와 같이 FBG 센서, EM 센서, 로드셀 그리고 인장기를 설치하여 실험을 진행하였다.

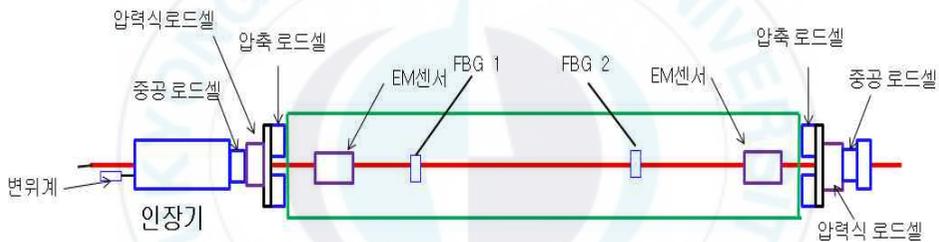
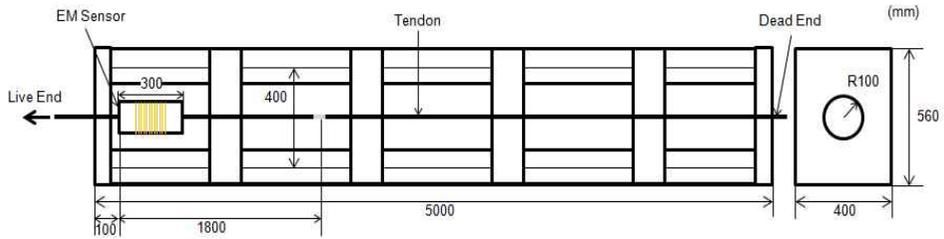


그림 2.9 소형프레임 거더 모식도

그림 2.10는 실험에 사용된 긴장재의 배치 모식도를 나타낸다. 좌측부터 3개의 강연선을 사용했을 때와 7개 강연선을 사용했을 때를 나타낸다. 3개의 강연선을 사용할 시 중앙에 FBG 센서가 내장된 스마트 강연선을, 양 옆으로 일반 강연선을 배치하였다. 7개의 강연선을 사용할 시에도 마찬가지로 중앙에 FBG 센서가 내장된 스마트 강연선을, 주위로 일반 강연선을 배치하였다. 이와 같은 내용으로 그림 2.11과 같이 실험을 진행하였다.

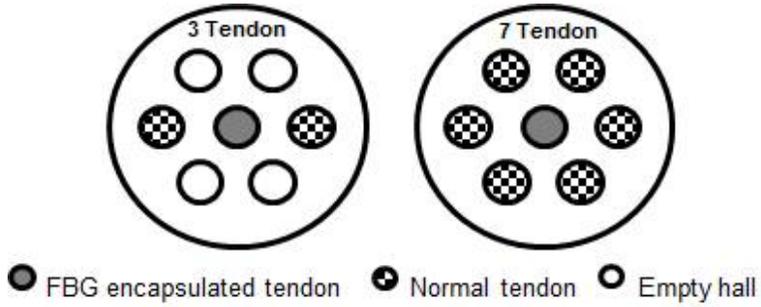


그림 2.10 긴장재 배치 모식도

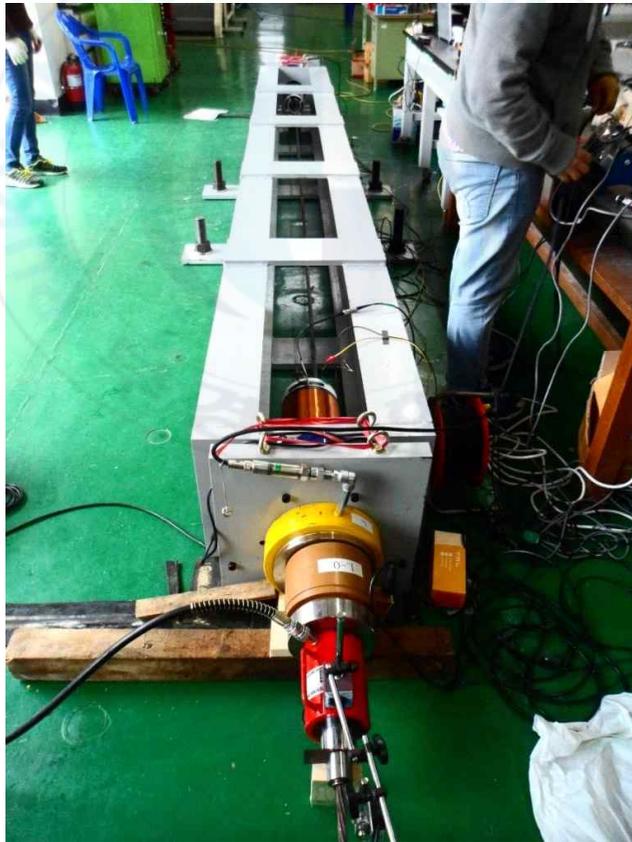


그림 2.11 소형프레임 거더 실험(1)

(가) 로드셀 설치

긴장력 계측을 위해 그림 2.12과 같이 중공로드셀과 함께 정확한 하중의 계측을 위하여 가력판에 고정밀 압축 로드셀을 3개씩 결합한 조합로드셀을 함께 설치하였다. 또한, 중공로드셀과 압력식 로드셀을 활용하여 다른 센서의 긴장력 측정에 대한 정확성을 확인하였다. 중공로드셀, 조합로드셀과 압력식로드셀은 모두 스트레인게이지 기반의 로드셀들로서 하중 가력과정에서 실시간으로 긴장력을 측정하여 모니터링 하였다.

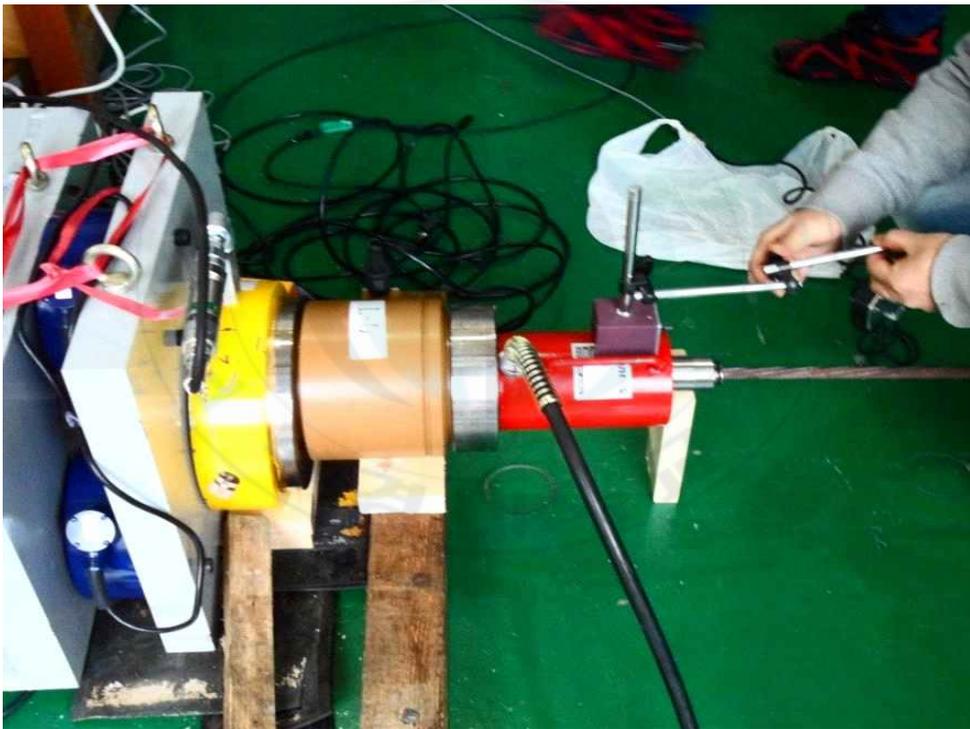


그림 2.12 소형프레임 거더 실험(2)

(나) FBG 센서 계측

FBG 센서가 내장된 스마트 강연선을 소형프레임 거더 내부 중앙에 배치하여 긴장력을 측정하였다. 스마트 강연선 내 FBG 센서는 그림 2.13와 같이 배치하였다. FBG 센서의 위치는 5.0 m 소형프레임 거더의 중앙에서 1.0 m 떨어지도록 하였다. 또한 FBG 센서 계측을 위하여 그림 2.13와 같이 계측 부위(그림 2.13에서 오른쪽 부분)는 약 2.0 m 정도 여유를 더 두었다.

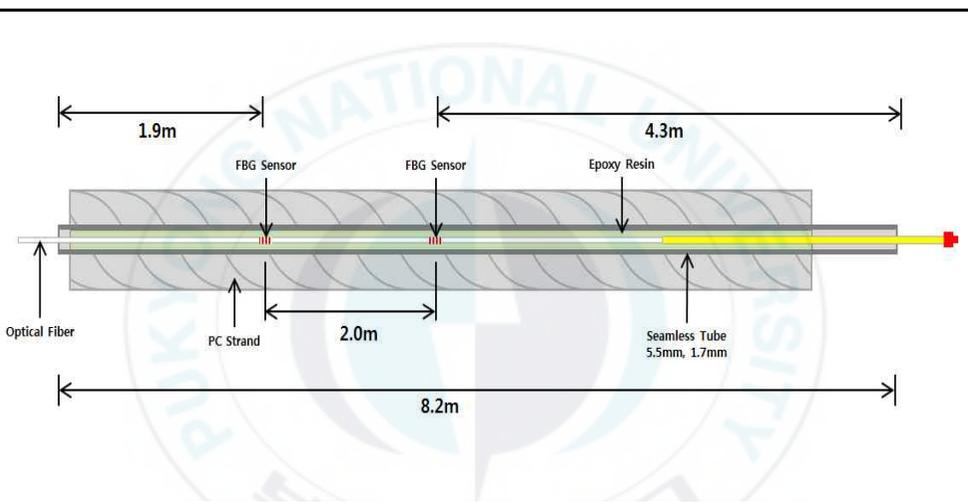


그림 2.13 스마트강연선의 모식도

- Sampling Frequency = 10 Hz (FBG)
- 단계별로 EM 센서를 계측하기 위해 5분간 하중 유지
- 3개, 7개의 강연선을 직선긴장

#### (다) EM 센서 계측

EM 센서의 측정은 강연선을 자화시키면서 그 변화를 측정해야 하며, 실험에 사용된 장비는 실시간으로 하중을 측정하지 못한다. 따라서, 긴장력을 도입하면서 각각의 긴장력 단계에서 가력을 일시적으로 멈추고 EM 센서를 이용하여 시편의 투자율을 3회씩 계측하였고 측정된 값은 로드셀 기준값과 비교하였다.

### 2.2.3 장기 계측 실험

단기 계측 실험 후 7개의 강연선을 직선배치 하고 인장하중 954 kN을 가한 상태에서 정착 시킨 후 7개월에 걸쳐 일정 시간별 계측 실시하였다. 긴장력의 시간에 따른 손실과 센서의 내구성을 확인하기 위한 실험으로 표 2.2와 같이 장기계측 실험을 진행하였다. 각 일정에 맞추어서 FBG 센서, EM 센서를 통해 긴장력을 동시에 측정하고, 기준 하중으로 사용될 로드셀도 긴장력을 동시에 측정하였다. 3차 장기계측까지는 약 1~2주 간격으로 실험을 진행하였으며, 이후 7차 장기계측까지는 약 1~2달 간격으로 실험을 진행하였다.

**표 2.2 장기계측 수행 일자**

실험명	일정	내용
1차 장기계측	15.03.06	Open frame에서 긴장 실험
2차 장기계측	15.03.20	Open frame에서 긴장 실험
3차 장기계측	15.03.27	Open frame에서 긴장 실험
4차 장기계측	15.04.28	Open frame에서 긴장 실험
5차 장기계측	15.06.15	Open frame에서 긴장 실험
6차 장기계측	15.07.09	Open frame에서 긴장 실험
7차 장기계측	15.09.23	Open frame에서 긴장 실험

그림 2.14는 장기계측 실험 진행 모습이다. 기준하중으로 사용될 로드셀과 FBG 센서 및 EM 센서를 동시에 긴장력 측정을 실시하였다. 이를 통해 각 센서의 측정값을 로드셀과 비교 분석하였다.



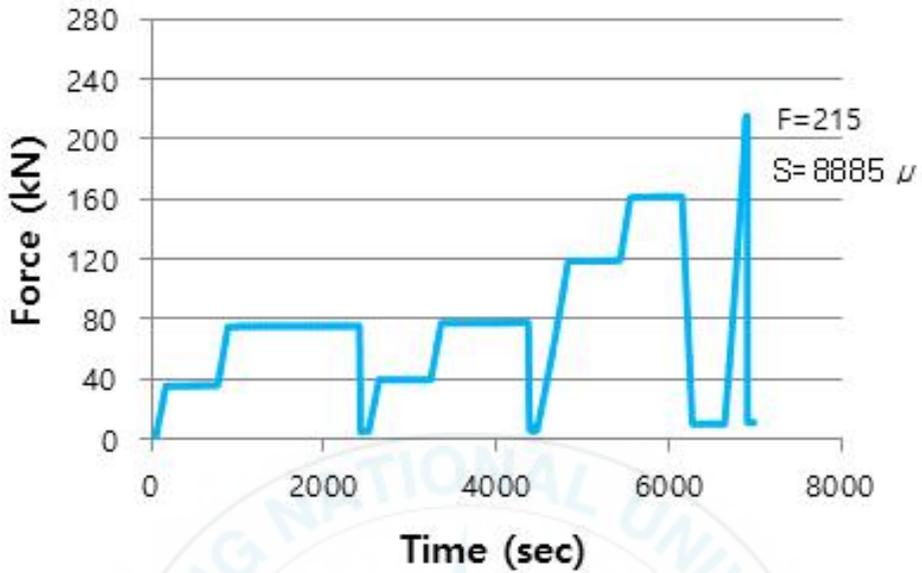
그림 2.14 장기계측 실험

### 3. 실험결과

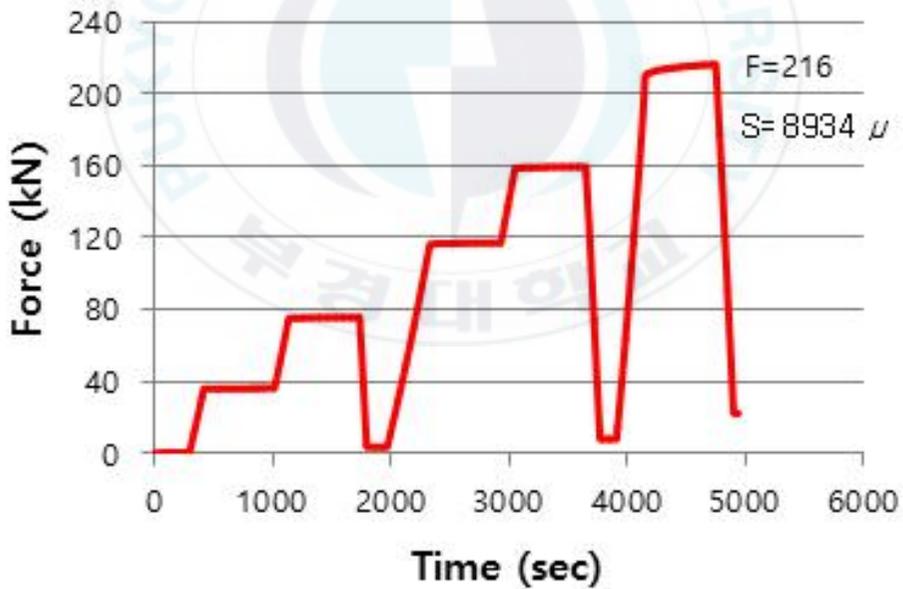
#### 3.1 계측센서의 교정실험 결과

##### 3.1.1 FBG 센서 교정실험 결과

그림 3.1은 교정실험에서의 FBG 센서 측정 값이다. 실험은 2회 실시하였으며, 각 회에 대한 실험 측정값을 시간에 따른 긴장력 그래프로 나타내었다. 그림 3.1과 같이 각 하중 단계에 따라 뚜렷이 구분할 수 있으며, FBG 센서를 이용한 긴장력은 로드셀 측정값과 오차율 10% 이내로 측정되었다. 1차 실험에는 긴장력 215 kN에 해당하는 하중에서 센서가 파단되었으며, 2차 실험에는 긴장력 216 kN에 해당하는 하중에서 센서가 파단되었다. 즉, FBG 센서는 변형을 약 0.009에 해당하는 긴장력까지 측정이 가능하다는 것을 알 수 있었다.



(a) FBG센서 1차 교정실험



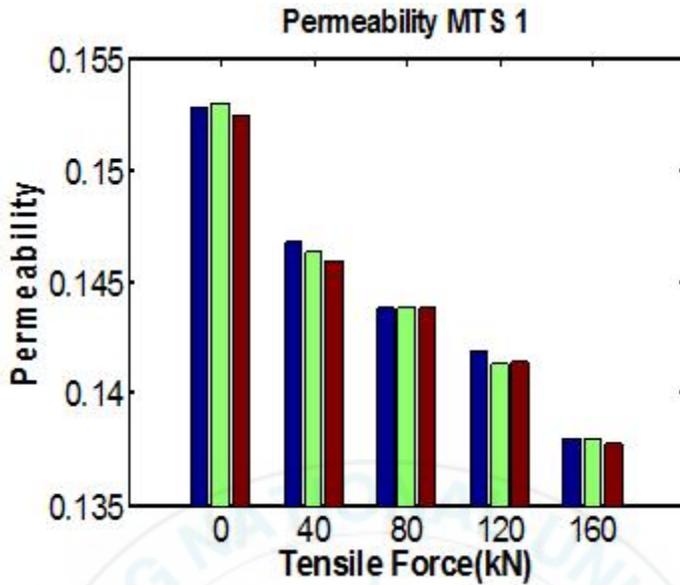
(b) FBG센서 2차 교정실험

그림 3.1 FBG 센서 교정실험 결과

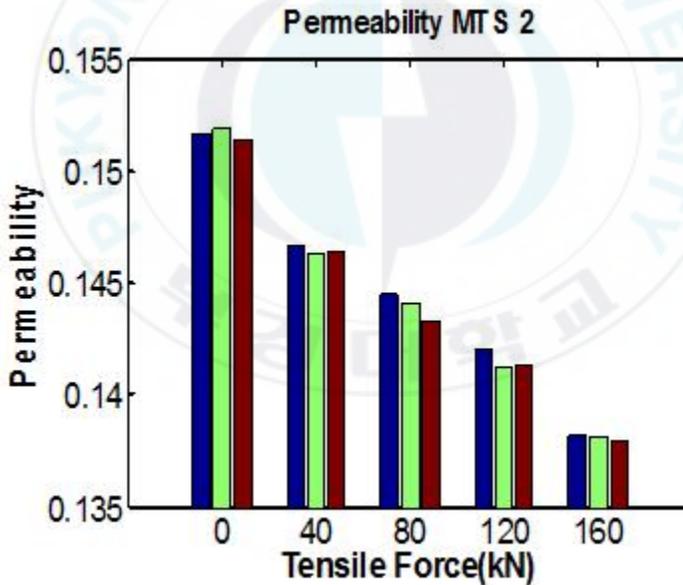
### 3.1.2 EM 센서 교정실험 결과

MTS 재료시험기 실험을 통하여 하중의 계측에 필요한 투자율을 측정하였다. 그림 3.2에서와 같이 실험은 각 하중단계별로 3회 측정을 실시하였다. 그림 3.2는 긴장력에 따른 투자율 변화를 나타내었다. 이와 같은 실험을 2회 진행하였으며 긴장재의 투자율 측정값은 긴장력이 증가됨에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 각 긴장력 단계에 따라 뚜렷이 구분할 수 있었다. 각 하중단계에서의 3회 측정시 각각의 측정값은 오차 5%이내의 측정값을 얻을 수 있었다.





(a) EM센서 1차 교정실험



(b) EM센서 2차 교정실험

그림 3.2 EM센서 교정실험 결과

## 3.2 소형프레임 거더 실험

긴장력 도입과정에서 고정밀 압축 로드셀을 3개 장착한 조합로드셀에서 얻어지는 하중, 중공로드셀 하중, 그리고 압력식로드셀에서 측정된 하중을 기준으로 FBG 및 EM 센서의 측정값과 비교 하였다.

조합로드셀은 3개의 압축로드셀을 결합하였으므로 반복 정밀도 및 비직진성은 0.15% 이내인 것으로 평가할 수 있으며, 역학적으로 긴장력 측정값을 가장 정확하게 측정할 수 있다고 판단되어 계측 값의 기준 하중 (Pref)으로 설정하였다.

실험과정에서 긴장력 도입에 사용되는 유압펌프의 압력과 비교하여서도 일관성 있는 측정 결과를 보였다.

### 3.2.1 FBG 센서 소형프레임 거더 실험 결과

PC 강선의 긴장력을 파악하기 위하여 5.0m Open Frame에 긴장재를 직선으로 배치하고 강연선의 개수변화 변화를 주어 실험결과를 분석할 목적으로 구분하여 계측을 시행하였다. 스마트 텐던 내의 2개의 FBG 센서가 내장되어 있으며, 스마트 텐더 중앙에서 고정단에 가까운 FBG 센서를 FBG-1, 인장단에 가까운 FBG 센서를 FBG-2이다.

### 1) 강연선 3개

강연선 3개일 경우 실험결과는 그림 3.3과 같이 측정되었다. 그림 3.3은 시간에 따른 긴장력 측정 값이며, 기준 하중은 사용된 로드셀으로 확인하였다. 로드셀의 하중 측정값은 보라색선으로 나타내었으며, FBG-1은 하늘색선, FBG-2는 주황색선으로 나타내었다. 긴장도중 인장단에 가까운 FBG-2가 파단되어 그림 3.3과 같이 고정단에 가까운 FBG-1에 대해서만 나타내었다.

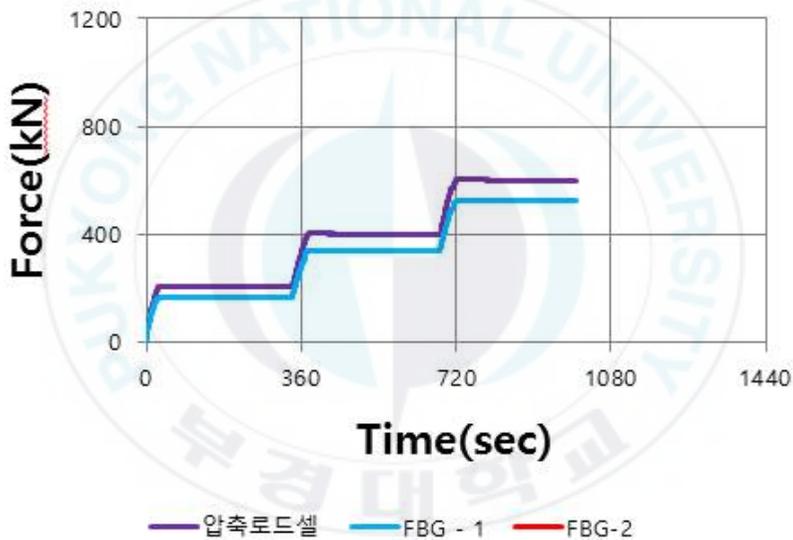


그림 3.3 FBG센서 소형프레임 거더 실험 결과(1)

## 2) 강연선 7개

강연선 7개일 경우 실험결과는 그림 3.4과 같이 측정되었다. 그림 3.4은 시간에 따른 긴장력 측정 값이며, 기준 하중은 사용된 로드셀으로 확인하였다. 로드셀의 하중 측정값은 보라색선으로 나타내었으며, FBG-1은 하늘색선, FBG-2는 주황색선으로 나타내었다. 긴장도중 인장단에 가까운 FBG-2가 파단되어 그림 3.4과 같이 고정단에 가까운 FBG-1에 대해서만 나타내었다.

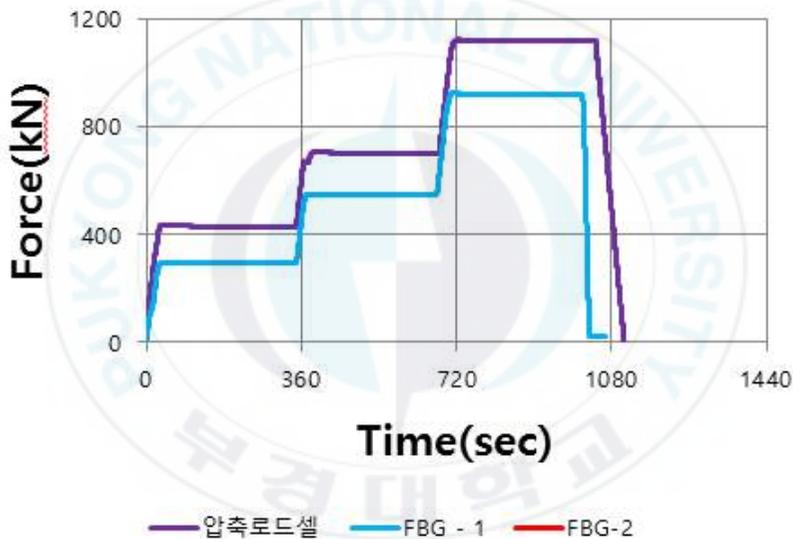


그림 3.4 FBG센서 소형프레임 거더 실험 결과(2)

FBG 센서의 각각의 실험 결과 직선 긴장일 때 좌우 각각 FBG1, 2의 변형률 값은 그림 3.3 ~ 그림 3.4에서 보듯이 하중으로 환산했을 때 최소 70%의 정확도를 보인다. 또한 긴장 도중 인장단측 FBG 센서의 파단으로 인해 오차가 교정실험보다 큰 것으로 측정되었다.

### 3.2.2 EM 센서 소형프레임 거더 실험 결과

소형프레임 거더 실험을 통하여 EM 센서의 긴장력 계측 결과를 얻었으며, 그 중 강연선 3, 7가닥에 대한 결과를 각각 그림 3.5 ~ 그림 3.6에 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 각각의 색은 실험 횟수를 나타내는데, 각 긴장력당 6회의 측정 결과 투자율을 활용한 긴장력 추정은 3가닥, 7가닥의 강연선에 대하여 5%이내의 오차율로 긴장력을 다소 정확하게 추정할 수 있음을 확인하였다.

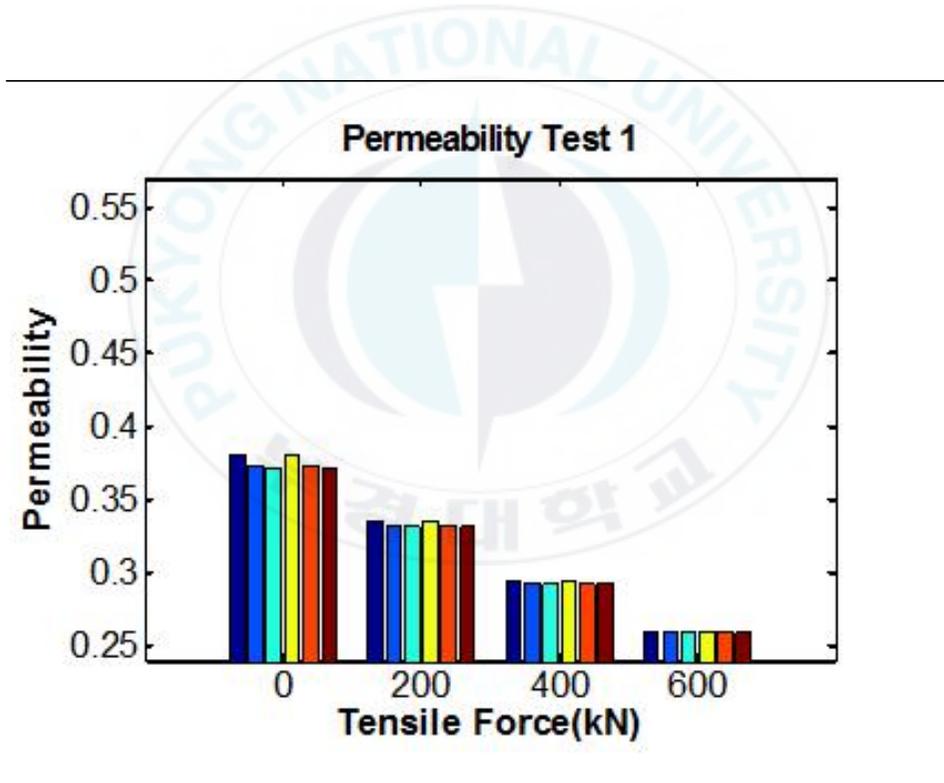


그림 3.5 Evaluation of prestress using EM sensor  
(강연선 3가닥)

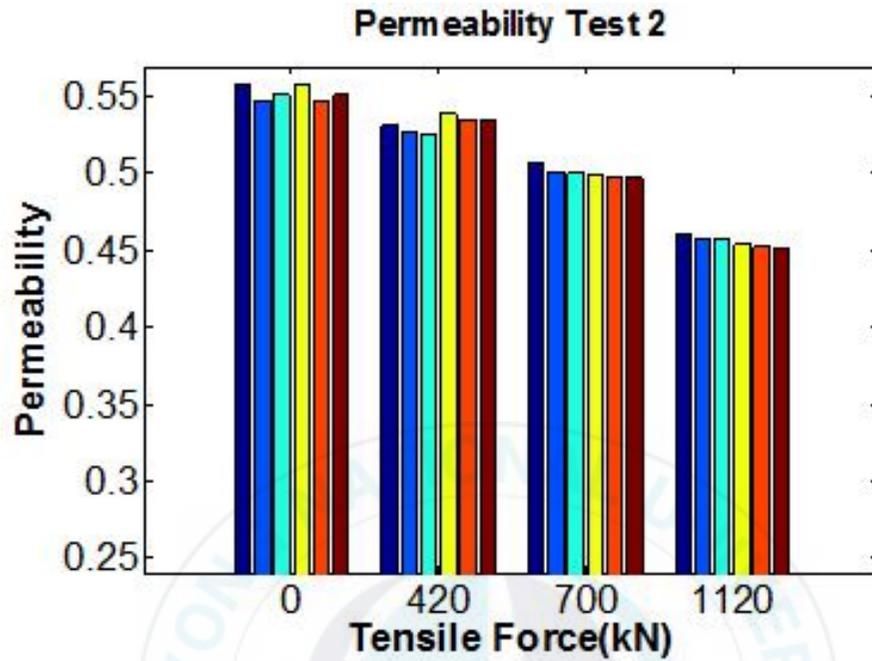


그림 3.6 Evaluation of prestress using EM sensor  
(강연선 7가닥)

### 3.3 장기 계측 실험

소형거더의 장기간 긴장력 변화를 분석하기 위한 조합 로드셀의 계측값 분석결과는 표 3.1과 같다.

**표 3.1 장기계측 기간에 따른 긴장력**

No.	1	2	3	4	5	6	7
Time after Anchorage (Day)	8	22	29	61	109	133	209
Tensile Force of Load cell (KN)	945	945	943	945	940	937	937

장기계측결과 217일간 인장력의 변화는 0.8%의 편차로서 거의 변화가 없는 것으로 계측되었다. 이는 긴장력 이외의 외부 하중을 받지 않아 긴장력의 시간적 손실이 미소한 것으로 판단된다. 위의 로드셀에서 측정된 하중을 바탕으로 다른 센서들의 긴장력 측정값을 비교하였다.

### 3.3.1 FBG센서 장기계측 실험 결과

그림 3.7에서는 각각 FBG 센서의 장기계측에 따른 계측결과를 나타낸다. 로드셀로 측정한 긴장력과 마찬가지로 변형률 변화량 또한 거의 없는 것을 볼 수 있다. 그러나 긴장 중 인장측 FBG센서 파단되었다. FBG 센서를 통한 긴장력 측정값은 최대 30% 오차를 나타내었다.



그림 3.7 장기계측에 따른 FBG센서의 긴장력 측정값

### 3.3.2 EM센서 장기계측 실험 결과

그림 3.8에서는 EM 센서의 장기계측에 따른 투자율에 관련한 계측결과를 나타낸다. 로드셀로 측정한 긴장력과 마찬가지로 투자율의 변화량 또한 거의 없는 것을 볼 수 있다. 앞선 장의 실험과 마찬가지로 긴장력과 투자율이 선형관계를 보이며, 그 오차율은 5%로 이내로 측정되었다.

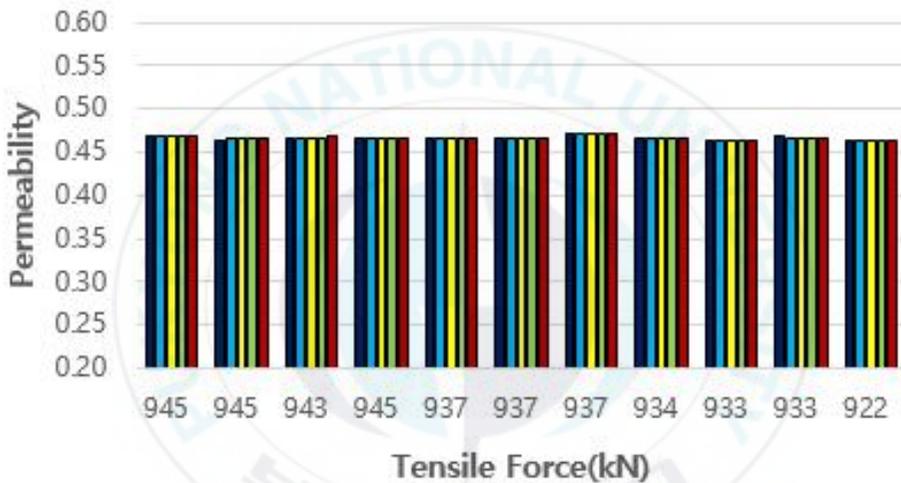


그림 3.8 장기계측에 따른 EM센서의 긴장력 측정값

## 4. 결 론

이 연구에서는 PSC 거더에 제작 단계에 설치하여 구조물 사용 중 긴장력 검증 및 모니터링에 활용할 수 있는 계측 방법의 도출을 위하여, FBG 및 EM 센서의 긴장력 계측 정확성을 비교하는 실험 연구를 수행하였다. 센서가 설치된 소형 거더를 제작하여 긴장력을 도입하였고, 센서들로부터 측정된 결과를 기준 하중과 비교하였다. 본 연구 결과 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) FBG 광섬유센서는 일관성 있는 측정값을 나타내었다. 교정실험 결과보다 소형프레임 거더 실험 및 장기계측 실험 결과에서 오차율이 크게 발생하였다. 이는 긴장 시 센서의 파단이 측정에 오차를 증가시키는 요인이 되는 것으로 판단된다. 그러므로 센서의 내구성 보장을 위한 추가 연구를 진행한다면 현장 적용 가능할 것으로 전망된다.
- (2) EM 센서는 교정실험 및 소형프레임 거더 실험을 통해 긴장력과 투자율이 선형관계임을 확인할 수 있었다. 또한 장기계측 실험을 통해 센서 내구성을 확인하였다.
- (3) 로드셀에 비해서 FBG 센서 및 EM 센서의 정확성은 아직 다소 떨어지지만, 일관성 있는 실험결과를 통해 향후 PSC 교량의 긴장력 측정에 적용 가능성을 확인하였다. 추후 센서에 대한 내구성 증가와 현장 적용성에 대한 연구가 고려되어야 할 것이다.



## 참 고 문 헌

- 이재훈 (2015) 프리스트레스트 콘크리트 강도설계법과 한계상태설계법, 동명사, pp.6~9
- 김준경, 최송이, 김재민, 이환우, 박승희 (2015) PSC 긴장재 긴장력 추정 을 위한 매립형 센서 시스템, 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술 발표 논문집, 19(2), pp.619~620
- 김재민, 김현우, 김영상, 김진원, 윤정방 (2008) 광섬유센서가 내장된 강 연선을 이용한 교량의 장력 모니터링 방법, 전산구조공학회 논문집 21(3), pp.287~294
- 박승희, 김주원, 이창길, 이종재, 길홍배 (2012) 다채널 자속누설 센서를 이용한 강케이블의 국부 단면손상 검색, 전산구조공학회 논문집, 25(4), pp.287~292
- 박영용, 신경준, 이성철, 추태현, 이환우 (2015) FBG 및 EM 센서 융합 긴장력 관리형 블록아웃 PSC 거더 시스템 개발, 한국구조물진단유지관 리공학회 가을 학술발표 논문집, 19(2), pp.351~352
- 박주영, 김준경, 장오기, 박승희, 이환우 (2015) PS 긴장재 긴장력 계측 을 위한 PSC 거더 내부 매립용 EM 센서, 전산구조공학회 논문집 28(6), pp691~697
- 신경준, 김윤용, 김재민, 박승희, 이환우 (2015) 긴장력의 직접 측정을 위 한 계측 센서 비교 실험, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.75~ 76
- 신경준, 박영용, 이성철, 김윤용, 이환우 (2015) 계측 센서를 활용한 PSC 거더 텐던의 긴장력 측정 실험, 전산구조공학회 논문집 28(6), pp715 ~722

- Michael P. Collins, Denis Mitchell** (1991) *Prestressed Concrete Structures*, Prentice Hall
- Nawy, Edward G.** (2009) *Prestressed Concrete Fifth Edition*
- Burn, N.H., Helwig, T., Tsujimoto, T.** (1991) Effective Prestress Force in Continuous Post-Tensioned Beams with Unbonded Tendons, *ACI Struct. J.*, 88(1), pp.84~90.
- Baudendistel, T.A., Tunner, M.L.** (2007) A Novel Inverse-Magnetostrictive Force Sensor, *IEEE Sensor J.*, 7(2), pp.245~250.
- Chaki, S., Bourse, G.** (2009) Stress Level Measurement in Prestressed Steel Strands using Acoustoelastic Effect, *Exp. Mech.*, 49, pp.673~681.
- Chen, H.L., Wissawapaisal, K.** (2001) Measurement of Tensile Forces in a s Waves, *ASCE J. Eng. Mech.*, 127(6), pp.599~606. Seven-Wire Prestressing Strands using Stress
- Civjan, S.A., Jirsa, J.O., Carrasquillo, R.L., Fowler, D.W.** (1995) Method to Evaluate Remaining Prestress in Damaged Prestressed Bridge Girders, Research Report No.1370-2, Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, The University of Texas, Austin.
- Lin, T.Y.** (1963) *Design of Prestressed Concrete Structures*, John Wiley & Sons, USA.
- Miyamoto, A., Tei, K., Nakamura, H., Bull, J.W.** (2000) Behavior of Prestressed Beam Strengthened with External Tendons, *J. Struct. Eng., ASCE*, 126(9), pp.1033~1044
- Nabil, F.G., Brian, R.** (1996) Dynamic Characteristics of Post-Tensioned Girders with Web Openings, *J. Struct. Eng.*, 122, pp.643~650.

- Pessiki, S., Kaczinski, M., Wescott, H.H.** (1996) Evaluation of Effective Prestress Force in 28-Year- Old Prestressed Concrete Bridge Beams, PCI J., 41(6), pp.78~89
- Saiidi, M., Douglas, B., Feng, S.** (1994) Prestress Force Effect on Vibration Frequency of Concrete Bridges, J. Struct. Eng., ASCE, 120(7), pp.2233~2241
- Sharif, A., Taher, S.E.F., Basu, P.K.** (1993) Time-dependent Losses in Prestressed Continuous Composite Beams, J. Struct. Eng., ASCE, 119(11), pp.3151~3168
- Wang, M.L., Chen, Z.** (2000) Magneto-Elastic Permeability Measurement for stress monitoring in steel tendons and cables, Proc. of the SPIE 7th Annual Symposium on Smart Structures and Materials, Health Monitoring of the Highway Transportation Infrastructure, 3995, pp.492~500



## 감사의 글

어느덧 2년이 지나 감사의 글을 쓰고 있으니 졸업이 다가왔음이 새삼 느껴 집니다. 이 글을 손에 잡으니 처음 대학원 진학결정을 할 때 막연한 두려움과 정신없었던 대학원 생활, 지루하고 쓸쓸할 뻔 했던 연구실을 왈카지껄하게 만들어 준 영웅이, 태준이, 태현이와의 추억들, 첫 입사를 했을 때의 떨림 등 여러 가지 감정들이 다시 떠오릅니다.

먼저, 저를 위해 2년 더 학업을 이어갈 수 있도록 물심양면으로 지원해 주신 부모님께 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 제가하는 결정을 믿어주시고 기다려 주신 점 깊이 감사드리며 이제 어엿한 사회인이 되었으니 보답하며 효도하며 살겠습니다.

그리고, 제가 바른길로 갈 수 있도록 지도하고 인도해주시고 조언을 아끼지 않으신 이환우 교수님 항상 감사한 마음으로 살고 있지만, 이 자리를 빌려 다시 한 번 감사드립니다. 부족한 저에게 많은 기회를 주시고 학업과 실무를 병행할 수 있도록 배려해주신 점 정말 감사드립니다. 인정받는 사람이 되기 위해 어떻게 행동해야 하는지 교수님께 많이 배웠습니다. 앞으로 제가 나아가야 할 엔지니어의 길에서 교수님의 제자로서 부끄럽지 않을 기술자가 되도록 하겠습니다.

다음으로, 제가 일을 하면서 학업을 병행할 수 있도록 배려해주시고 도와주신 우리 부전마산5공구 소장님예하 모든 직원 여러분께 감사의 말씀 전하고 싶습니다. 제가 학업에 집중할 수 있도록 많은 시간을 내어주신 팀장님, 공사팀, 특히 우리 터널팀 깊은 배려에 다시 한 번 감사드립니다. 이제 업무에 집중하여 더 많이 배우고 더욱 열심히 일하겠습니다. 준공하는 그날까지 무재해로 나아가는 부전마산 5공구가 되었으면 합니다.

또한, 저와 함께 해준 영웅이! 선배로서 많은 도움이 되지 못하고, 일찍 연구실을 나가게 되어 짐을 지어준 것만 같아 항상 미안하고 의지가 되어주는 동생이라 항상 고맙다. 너도 사회로 나갈 준비를 잘해서 꼭 좋은 일이 있길 함께 기도할게.

마지막으로, 제가 이 논문을 빌려 학업을 무사히 마치고 사회로 나아갈 수 있도록 많이 도와주시고 격려해주신 많은 연구실 선후배님들, 학과사람들, 동아리, 친척, 모두에게 감사의 뜻을 전하며 글을 마칩니다.