

FBG 광섬유 센서 및 EM 센서 융합 생애주기 긴장력 관리형 블록아웃 PSC 거더 시스템 개발 최종평가 검토자료

2017 . 10. 16.

주관연구기관 / 부경대학교 산학협력단

공동연구기관 / 전남대학교 산학협력단

공동연구기관 / 성균관대학교 산학협력단

위탁연구기관 / 충남대학교 산학협력단

위탁연구기관 / 한국전력국제원자력대학원대학교
산학협력단

참 여 기 업 / (주)성환이앤씨

국 토 교 통 부

(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

'FBG 광섬유센서 및 EM 센서 융합 생애주기 긴장력 관리형 블록아웃 PSC 거더 시스템 개발'(연구개발 기간 : 2014. 8. ~ 2017. 8.) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

주관연구기관명 : 부경대학교 산학협력단

(김창수)

공동연구기관명 : 전남대학교 산학협력단

(송진규)

공동연구기관명 : 성균관대학교 산학협력단

(유지범)

위탁연구기관명 : 충남대학교 산학협력단

(김영국)

위탁연구기관명 : 한국전력국제원자력대학원대학교 산학협력단 (김창락)

참여기관명 : (주)성환이앤씨

(조윤영)

주관연구기관책임자: 이환우

공동연구기관책임자: 김재민

공동연구기관책임자: 박승희

위탁연구기관책임자: 김운용

위탁연구기관책임자: 이성철

참여기관책임자: 조윤영

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	16CTAP-C078424-03	해당 단계 연구 기간	2014. 8. 7. ~ 2017. 8. 6.	단계구분	1/1 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	FBG 광섬유 센서 및 EM 센서 융합 생애주기 긴장력 관리형 블록아웃 PSC 거더 시스템 개발			
연구책임자	이환우	해당단계 참여 연구원 수	총: 32 명 내부: 28 명 외부: 4 명	해당단계 연구개발비	정부: 300,000 천원 기업: 100,000 천원 정부 외: - 계: 400,000 천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 68 명 내부: 64 명 외부: 4 명	총 연구개발비	정부: 900,000 천원 기업: 300,000 천원 정부 외: - 계: 1,200,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	부경대학교 산학협력단			참여기업명 (주)성환이앤씨	
공동연구	연구기관명: 전남대학교 산학협력단			연구책임자: 김재민	
공동연구	연구기관명: 성균관대학교 산학협력단			연구책임자: 박승희	
위탁연구	연구기관명: 충남대학교 산학협력단			연구책임자: 김윤용	
위탁연구	연구기관명: 한국전력경제원자력대학교 산학협력단			연구책임자: 이성철	
□ FBG 및 EM 센서 내장형 생애주기 긴장력 관리형 거더 시스템 ① FBG/EM 센서의 개별 검증 실험 - 긴장력 추정 오차율 5% 이내 달성 - 장기계측에서 안정적 계측 가능 ② PSC 거더 부분 모델 실험 - 프리스트레스 손실에 대한 장단기 모니터링이 가능한 것을 확인 ③ 실물 거더 실험 - 부재 제작부터 파괴단계까지 상태 모니터링 검증 - 텐던 긴장력에 대해 긴장 시 4.2%, 사용하중 시 10%의 오차로 추정 가능 ④ 실제 현장 적용을 통한 거더 시스템 검증 - 긴장시 텐던 긴장력에 대해 5% 이내 오차범위 달성 - 향후 타 현장에서 적용 가능할 것으로 판단 ⑤ 품질 및 유지관리 지침보고서 작성 □ FBG 광섬유 센서를 이용한 긴장재 성능 관리 시스템 ① 스마트 텐던 변형률 계측 범위를 0.65%에서 1.73%로 개선 ② 긴장력 추정 오차 범위 5% 이내 달성 ③ 성능개선 스마트 텐던 시작품 제작 (길이 30m) ④ 품질 및 유지관리 가이드라인 개발 □ EM 센서를 이용한 긴장재 모니터링 센서 및 알고리즘 개발 ① 매립형 EM 센서를 이용한 긴장력 계측 기법 개발 ② 투자율 및 면적 추출 후 인공신경망 및 회귀분석을 이용한 긴장력 추정식 도출 ③ 오차범위 5% 이내로 긴장력 추정 가능 ④ 실제 현장에 적용 가능한 매뉴얼 개발				보고서 면수 68 page	

4. 국문 요약문

연구의 목적 및 내용	□ 이 연구의 최종목표는 생애주기 전반에 걸쳐 설계긴장력 관리가 가능한 FBG 광섬유 센서 및 EM 센서 내장형 블록아웃 PSC 거더 시스템 개발임. □ 이를 위하여 (1) FBG 광섬유센서 및 EM 센서 기반 PS 긴장재 긴장력 계측시스템을 개발하고, (2) 이를 블록아웃 공법과 융합하여 생애주기 유지관리가 용이한 PSC 거더를 개발하고자 함. □ 이로부터 정확한 긴장력 계측을 통해 시공시 설계긴장력 도입의 오차를 줄이고, PSC 생애주기 전반에 걸쳐 설계 긴장력 관리가 가능한 PSC 거더 시스템을 사업화하는 기반을 마련하고자 함. □ PS 긴장재 성능관리를 위한 FBG 센서 계측시스템 개발 - PS 긴장재 긴장력의 절대값 계측을 위한 FBG 광섬유센서 응용기술 개선 - 계측 긴장력 분포를 이용하여 마찰계수 추정 - 스마트 텐던 변형률 계측 범위 개선: 최대 변형률 계측범위 1% 달성 - 스마트 텐던을 이용한 긴장력 추정 오차 범위: 5% 이내 달성 - 개선한 스마트 텐던의 현장 적용성을 확인하기 위한 길이 30m 시편 제작 - 스마트 텐던의 품질관리 및 유지관리 가이드라인 개발 □ PS 긴장재 성능관리를 위한 EM 센서 계측시스템 개발 - PS 긴장재 긴장력의 상대값 계측을 위한 EM 센서 최적화 설계 - 매립형 EM 센서를 이용한 매립형 긴장력 계측 시스템 개발 □ FBG 및 EM 센서 Hybrid 계측시스템 내장형 블록아웃 공법을 통해, 시공 시 긴장 최적화와 긴장력 관리 및 보강 시기와 소요 보강력의 정략적 평가를 통한 재긴장이 용이한 PSC 거더 개발 - Hybrid PS 긴장재 긴장력 계측시스템 융합을 위한 블록아웃 상세 개발 - 개발된 PSC 거더의 실험실 환경 및 실제 현장을 모사한 환경에서의 신뢰성 검증 실험 - FBG 및 EM 센서를 이용한 Hybrid 계측시스템과 블록아웃 PSC 거더가 융합된 생애주기 전반에 걸쳐 긴장력 관리가 가능한 블록아웃 PSC 거더 시스템 개발				
연구개발성과	(1) FBG 광섬유센서를 이용한 PS 긴장재 성능관리시스템 (2) EM 센서를 이용한 PS 긴장재 긴장력 모니터링 센서 및 알고리즘 (3) FBG 및 EM 센서 내장형 블록아웃 PSC 거더 시스템의 시공단계 및 공용 중 품질관리 지침 (4) 긴장력의 모니터링과 유지관리가 용이한 FBG 및 EM 센서 내장형 블록아웃 PSC 거더 시스템 개발				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	▪ 구조물 유지관리 기업으로의 기술확산을 통해 PSC 거더의 긴장력 관리 사업 실용화 ▪ 센서/계측기기 업체로의 기술이전을 통한 PS 긴장재 긴장력 계측 센서 제품화 ▪ PS 긴장재 긴장력 계측의 선진기술 선점으로 미래 원천기술 확보 ▪ 블록아웃 공법을 이용한 PSC 거더의 원천기술 확보 ▪ FBG 광섬유센서 및 EM 센서를 이용한 PS 긴장재 긴장력 계측 기법의 국내외 특허권 획득으로 미래기술선점 및 무형자산 확보 ▪ PS 긴장재 유지관리 시스템의 현수교/사장교 케이블 유지관리에 활용 가능 ▪ PS 긴장재 긴장력 계측 산업, 블록아웃 PSC 거더 시공 및 유지관리 산업 등 신산업 창출				
핵심어 (5개 이내)	PSC 거더	긴장력관리	FBG 광섬유센서	EM 센서	블록아웃

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	□ Development of Block-out PSC girder system that can manage the tensile force during life cycle using embedded FBG fiber optic sensor and EM sensor is the purpose of this research. □ For achieve this, this research develops (1) the FBG fiber optic sensor and the EM sensor based tensile force measurement system, and (2) the PSC girder that can be easily maintainable through converging embedded sensor system and block-out method. □ Through this, the errors that occurs during inducing tensile force can be reduced using tensile force measurement system and furthermore, this research provides the industrialize base of PSC girder system that can manage the tensile force during whole life cycle. □ Development of FBG sensor measurement system to manage performance of PS tendons - Improvement of FBG fiber optic sensor technique for measuring absolute value of tensile force of PS tendons - Estimation of Friction Coefficient using Measuring Tension - Smart Tendon strain measurement range improvement: Maximum strain measurement range 1% achieved - Tension error estimation range using smart tendon: within 5% - Production of specimen of 30m in length to check the applicability of the improved smart tendon in the field - Development of quality management guidelines and maintenance guidelines for Smart Tendon □ Development of EM sensor measurement system to manage performance of PS tendons - Optimization of EM sensor for measuring relative value of tensile force of PS tendons - Development of embedded EM sensor for embedded tensile force monitoring system □ Development of easy possible to re-tension PSC girder through optimizing and managing the tensile force during construction by converging FBG/EM hybrid sensor system and block-out method and assessing the reinforcement time and force. - Development of block-out method to converge with hybrid tensile force measurement system - Experimental verification of reliability of developed PSC girder in laboratory-scale and real-scale - Development of PSC girder system that can manage life cycle tensile force by converging the FBG/EM hybrid measurement system and block-out PSC girder
Results	(1) The PSC tendon performance management system using FBG fiber optic sensor (2) The tensile force monitoring sensor and algorithm using EM sensor (3) The guideline for quality control of FBG/EM sensor embedded block-out PSC girder system during life cycle (4) Development of block-out PSC girder system with built-in FBG and EM sensor for monitoring and maintenance of tensile force
Expected Contribution	▪ Commercialization of tensile force of PSC girder management service through technical transfer to the structure maintenance company ▪ Commercialization of tensile force measurement sensor through technical transfer to the sensor/measurement equipment company ▪ Ensure future fundamental technology through acquire preoccupancy of tensile force of PS tendon measurement technique ▪ Ensure fundamental technology of PSC girder using block-out method ▪ Secure future technology and intangible assets through acquiring patents about tensile force measurement technique using FBG and EM sensors ▪ Apply the tensile force management system to the cable-stayed bridges ▪ Create new industry about tensile force measurement and construction block-out PSC guider
Keywords	PSC Girder Prestressing Force Management Optical FBG Sensor EM Sensor Block-Out

6. 영문 목차

< Contents >

1. Outline of R&D Project	1
2. Status of domestic and overseas technology development	4
3. Contents and Results	24
4. Achievement of goals and contribution to related fields	52
5. Expected Contribution	56
6. Overseas science and technology information	58
7. Security rating of R&D results	60
8. Research facilities and equipment registered in NTIS	61
9. Implementation of safety measures in laboratories	62
10. Representative Research Results of R&D Project	64
11. References	65

7. 본문 목차

< 목 차 >

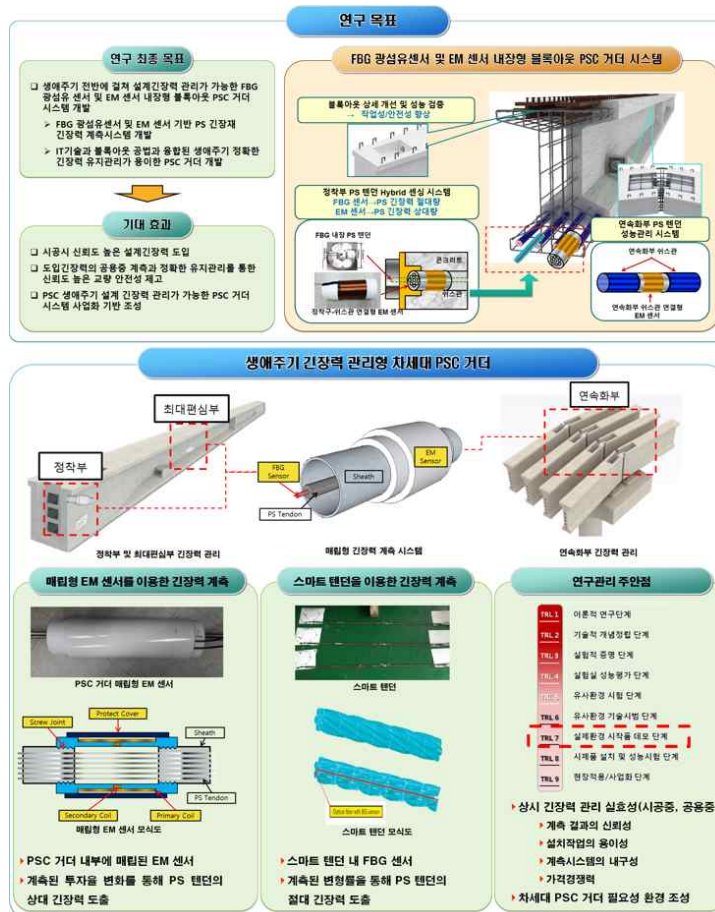
1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	4
3. 연구 수행 내용 및 성과	24
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	52
5. 연구개발성과의 활용 계획	56
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	58
7. 연구개발성과의 보안등급	60
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	61
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	62
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	64
11. 참고 문헌	65

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

가. 최종 목표

- 이 연구의 최종목표는 생애주기 전반에 걸쳐 설계긴장력 관리가 가능한 FBG 광섬유 센서 및 EM 센서 내장형 블록아웃 PSC 거더 시스템 개발이며 이를 위해 다음과 같은 세부 연구 목표를 가진다.
- ㉠ 생애주기 동안에 설계 긴장력 및 긴장력 분포의 직접 측정이 가능하고 거더 보강을 위한 재긴장 시기의 선제적 선택과 소요 보강량의 최적화 결정이 가능한 블록아웃 PSC 거더 시스템 개발
- ㉡ FBG 광섬유 센서 및 EM 센서를 이용한 PS 긴장재 성능관리시스템 개발
- ㉢ 3년의 연구기간동안 센서 요소기술을 개발하고, 축소 부재실험 및 실물거더 적용 실험을 통해 시공과정과 하중 재하과정에서 측정성능을 검증하고 센서 손상 여부를 검증함
- 최종 연구성과물은 그림과 같이 긴장력 측정 센서가 내장된 블록아웃 PSC 거더 시스템이며, 시스템 개발 및 유사환경에서의 시범운행을 통하여 신뢰성 검증을 완료한다.



<그림 1.1-1> 연구목표 및 차세대 PSC 거더

2. 연구개발의 필요성

- 본 연구개발을 통해 개발될 FBG 광섬유센서 및 EM 센서 융합 생애주기 긴장력 관리형 블록아웃 PSC 거더 시스템은 기술적, 경제산업적, 사회문화적 측면에서 다음과 같은 중요성 및 필요성을 가지고 있다.

가. 기술적 측면

- PSC 거더의 효율적인 설계 및 시공/유지관리를 위해서는 긴장력의 관리가 매우 중요하다. 본 연구 개발을 통해 설계단계에서부터 시공 및 유지관리에 이르는 생애주기 긴장력 관리가 가능해 짐으로써 PSC 거더의 설계, 시공 및 유지관리의 최적화가 가능하다.
- 즉, 시공중의 정확한 긴장력 검증과 공용중의 정확한 긴장력 측정이 가능하다.
- 본 연구개발을 통해 개발될 긴장력 관리가 가능한 블록아웃 PSC 거더는 기존 PSC 거더 대비 긴장력의 관리가 효율적이고 연속화 지점부에서의 긴장력 손실이 적으므로 보다 장경간의 PSC 거더 설계 및 시공이 가능하다.
- 지진, 폭발, 테러 등 재해/재난 상황 시 주요 사회시설기반시설인 도로교의 안전 상태는 매우 중요한 정보이다. 본 연구개발을 통해 개발될 생애주기 긴장력 관리가 가능한 블록아웃 PSC 거더는 손상발생시 현장에서 즉각적인 평가가 가능하여 그로 인한 인적, 물적 피해를 최소화하는 것이 가능하다.

나. 경제산업적 측면

- 사회기반시설물 중 하나인 도로교의 시공 및 유지관리에는 많은 비용이 소요되며 여러 불확실성을 내포하고 있다. 본 연구개발을 통하여 PSC 거더의 효율적 설계, 시공을 통해 시공시 드는 비용을 절감하고 손쉬운 긴장력 측정으로 유지관리 비용을 절감할 수 있으며, 나아가 생애주기 긴장력 관리를 통하여 PSC 거더의 안전하고 신뢰성있는 사용이 가능하다.
- 본 연구의 결과를 활용하여 정확한 긴장력의 예측과 이를 반영한 설계가 가능하여 PSC 거더의 효율을 높이고 장경간화를 가능하게 할 것이다.
- 본 연구개발을 통해 개발될 스마트 교량을 필두로 도로교 유지관리용 센서 산업의 시장 확대를 통하여 국내의 센서 산업을 활성화 시키고 나아가 유지관리용 센서 및 스마트 교량의 해외 수출 및 수주를 통하여 센서 및 건설업의 해외 진출 기회 확대가 가능하다.

다. 사회문화적 측면

- 현재 국가적으로 시설물, 구조물 등에 대한 안전에 사회적 관심이 매우 높은 상태이다. 본 연구개발을 통해 안전한 도로교 시공 및 유지관리 기법 적용이 가능하며 이로써 도로교에 대한 사회적 불안 해소가 가능하다.
- 안전한 도로교 시공 및 유지관리 기법의 개발을 통하여 도로교 안전성을 향상시키며 세계적으로 선진 교량 시공, 유지관리 기술 보유국으로서 국가 위상 향상이 가능하다.

- ☐ 이와 같은 기술적, 경제산업적, 사회문화적 중요성으로 인해 FBG 광섬유센서 및 EM 센서 융합 생애주기 긴장력 관리형 블록아웃 PSC 거더 시스템 개발이 필요하다.

3. 연구개발 범위

<표 1.3-1> 연구개발 단계

구분		1차년도	2차년도	3차년도	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☐	☐	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	☐	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☐	☐	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	☒	☒	☒	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

- ☐ 본 연구과제는 시스템유형의 TRL 7단계까지의 개발을 목표로 하고 있다. 이를 위하여 FBG 광섬유센서 및 EM 센서를 이용한 PS 긴장재 긴장력 계측 센서 및 시스템을 개발하였다. 이를 적용하여 생애주기 전반에 걸쳐 설계긴장력 관리가 가능한 블록아웃 PSC 거더 시스템을 개발하였고, 실험실 환경에서의 적용성/신뢰성 테스트 및 이를 기반으로 제한된 실제 현장에서의 검증을 수행하였다.

- ☐ 실험실 환경에서의 실험 결과와 모의 현장 검증의 비교 분석을 통해 실제 현장 적용성을 확보하고 사업화를 위한 참여기업으로의 기술 이전을 실시하여 사업화를 위한 준비 단계를 진행할 예정이다.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국가 연구개발사업 유사연구 실적

가. 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과

<표 2.1-1> 연구개발과제 검토 결과

부처명	사업명	과제명	예산 (천원)	비 고
미래창조과학부(2015년)	한국건설기술연구원연구운영비지원사업	PSC 교량의 스마트 긴장력 관리 및 고품질 그라우트 기술 개발	1,063,000	중복 가능성 낮음
한국연구재단(2013년)	기초연구사업	PSC 거더교 연속지점부의 긴장력 손실에 미치는 블록아웃과 인장기의 영향	147,420	중복 가능성 낮음
한국산학연합회(2012년)	산학연공동기술사업	연속지점부에 블록아웃을 도입한 PSC 거더 개발	52,176	중복 가능성 낮음
소방방재청(2010년)	자연재해저감기술개발사업	감지형앵커를 이용한 사면 보강 및 모니터링 기술 개발	360,000	중복 가능성 낮음
건설교통기술평가원(2008년)	건설교통기술연구개발과제(건설교통 R&D 정책·인프라)	교량 및 지반보강을 위한 스마트 텐던 기술의 사업화를 위한 추가기술개발 및 검증	353,350	중복 가능성 낮음
건설교통부(2003년)	건설핵심기술연구개발사업	마그네틱 장력 센서 개발 및 이를 활용한 대형케이블 구조물 안전감시 시스템 개발과 실용화 연구	1,168,732	중복 가능성 낮음

□ 선행 연구개발과제 검토 결과 본 연구개발과제와 중복 가능성이 높은 과제는 존재하지 않는 것으로 확인되었다. 따라서 FBG 광섬유센서 및 EM 센서를 이용한 PS 긴장재 관리 시스템과 블록아웃 공법을 이용한 PSC 거더와의 융합을 통한 생애주기 긴장력 관리가 가능한 PSC 거더 시스템은 기존 연구과제와 차별화된 연구과제로 그 고유성을 확인하였다.

2. 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

가. PSC 거더교에서 PS 긴장재의 긴장력 관리 기법

□ PSC 거더는 초기에 긴장력으로 도입된 압축응력으로 인해 콘크리트 보의 하면에 추가 인장응력이 작용하더라도, 그 보하면의 응력이 콘크리트의 휨인장 강도를 넘지 않도록 조절하여 균열 발생을 방지한다. 그러나 공용 연한과 하중 이력, 콘크리트 크리프와 건조수축, PS 긴장재의 릴렉세이션, 정착부 손상 및 온도 변화, 또는 PS 긴장재 자체의 국부 손상 등의 다양한 요인에 의한 긴장력 손실로 인해 설계 긴장력과 실제 긴장력과의 차이가 발생하며 이로 인해 구조물의 처짐이나 균열이 증가하여 구조물의 성능 저하 또는 심각한 안전도 저하가 야기된다.

□ 따라서 PSC 거더의 사용성과 안전성을 확보하기 위해서는 PS 긴장재의 긴장력 관리가 매우 중요하다. 이를 위해 <표 2.2-1>과 같은 구조건전성 평가기법들이 제안되고 있으며, 실험 모형구조물이나 실제 구조물을 대상으로 제안된 기법의 실용성을 검증하기 위한 연구가 진행되고 있다.

□ PSC 구조물의 시공시에 도입해 주어야 하는 긴장력을 결정하기 위해서는 과상마찰계수(k)와 곡률마찰계수(μ)의 정확한 정보가 매우 중요하다. 그러나 <표 2.2-2>과 같이 국외 기준에 비해 과상마찰계수가 10배까지 차이가 있어서 국내 실정에 적합한 마찰계수를 조사할 필요가 있다. 설계에 사용된 마찰계수가 실제와 차이가 클 경우 PSC 교량이 과다 또는 과소 설계됨으로써 제작 비용의 증가, 구조물 품질관리의 어려움이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 PSC 구조물의 마찰계수를 평가하기 위한 연구가 국내에서도 몇 차례 수행되었으나 아직까지 일관성이 있는 결과를 얻지 못한 상태이다.

<표 2.2-1> PS 긴장재 긴장력 계측 및 손실에 대한 연구 현황

구분	연도	연구자	연구주제
국내	2015	김성태	A Sensor-Type PC Strand with an Embedded FBG Sensor for Monitoring Prestress Forces
	2015	조근희	Estimation of Prestress Force Distribution in the Multi-Strand System of Prestressed Concrete Structures
	2013	이환우	블록-아웃을 이용한 연속화 거더의 긴장력 손실 감소
	2013	김윤용	긴장재의 국부적인 꺾임으로 인한 PSC 연속화 거더의 긴장력 손실
	2012	김재민	FBG Sensors Encapsulated into 7-Wire Steel Strand for Tension Monitoring of a Prestressing Tendon
	2012	김병화	긴장력 변화에 의한 자기펄스 전파속도 및 응력과 속도 변화를 통한 PSC 텐턴의 긴장력 추정 기법에 대한 연구
	2009	김정태	PSC 거더 교량의 진동 특성 변화 및 전기역학적 임피던스 특성 변화를 이용한 PS긴장재 긴장력 변화 모니터링 기법에 대한 연구
	2007	김재민	FBG 센서를 내장한 스마트 강연선 및 이를 이용한 긴장력 및 마찰계수 추정 기법에 대한 연구
국외	2017	Guo	Monitoring and analysis of long-term prestress losses in post-tensioned concrete beams
	2013	Lan	Monitoring of structural prestress loss in RC beams by inner distributed Brillouin and fiber Bragg grating sensors on a single optical fiber
	2008	Chandoga	EM 센서를 이용한 PS 긴장재의 모니터링 기법에 대한 연구
	1998	Wang	EM(Elasto-Magnetic)센서를 이용한 PS 긴장재 및 장대교량의 케이블의 장력 측정 기법에 대한 연구
	1997	Issa	전기저항식 센서를 이용한 PSC 교량의 장기거동에 대한 연구
	1994	Saiidi	PSC 거더 교량의 진동특성 변화를 이용한 긴장력 모니터링 기법에 대한 연구

<표 2.2-2> 설계시방서에 따른 마찰계수값의 비교 (아연도금된 금속 쉬스)

설계기준	파상마찰계수 k (1/m)	곡률마찰계수 μ (1/radian)
콘크리트구조설계기준(2007)	0.0015~0.0066	0.15~0.25
도로교설계기준(2005)	0.0015~0.0066	0.15~0.25
ACI 318-08 (2008)	0.0015~0.0066	0.15~0.25
AASHTO Standard Specification (2002)	0.00066	0.15~0.25
AASHTO LRFD (2007)	0.00066	0.15~0.25
PCI Bridge Design Manual (2003)	0.00066	0.20
PTI Post-Tensioning Manual (2006)	0.0010~0.0023 (추천값: 0.0016)	0.24~0.22 (추천값: 0.18)
Prestress Manual (California, 2005)	0.00066	0.15, 0.20, 0.25, 기타 (긴장재 길이 관련)
Canadian Highway Bridge Design Code(2006)	0.003, 0.005 (덕트의 직경 관련)	0.20
BS 8110 (1997)	0.0033 이상	0.20, 0.25, 0.30 (강연선 및 덕트의 녹슨 상태)
Eurocode 2 (2002)	0.00095~0.0019	0.19
CEB-FIP Model Code (1993)	0.00095~0.0019	0.19
일본콘크리트표준시방서(2007)	0.004	0.30
일본도로교시방서(2002)	0.004	0.30

□ 따라서 PSC 거더의 성능 및 안전성을 정확하게 평가하고 사용하기 위해서는 실제 거더에서 발생하는 긴장력 손실을 정확하게 평가하고 이를 고려한 경제적이고 안전한 단면을 개발하는 것이 매우 중요하며, 이에 대한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다.

3. PS 긴장재의 긴장력 계측 기술 조사

가. 기존 PS 긴장재의 긴장력 계측 기법 동향 분석

(1) 긴장력 계측 및 검증 기술 현황

(가) 긴장력의 직접 측정 방법 현황

- ① 시공중 유압펌프의 압력으로 긴장력 측정: 긴장력 외 여러 요소에 영향 받음
- ② 유압잭으로 재 긴장을 하여 긴장력을 계측
: 비부착인 경우에만 적용 가능

(나) 긴장력의 비파괴 측정 방법 현황

- ① PSC구조계의 현재 긴장응력을 비파괴적인 방법으로 평가할 수 있는 기술은 꾸준히 연구되어 왔으나, 아직까지 실용화 단계에 이르지 못함.
- ② 초음파 및 탄성과 속도 응용법: 측정 대상과 정확도에 한계가 있음.

-
- ③ 진동 특성 응용법: 긴장력 외에 여러 가지 요인의 영향을 함께 받음.
 - ④ 자기장 응용법: 케이블교 등에 적용되었으나, 콘크리트 내부의 긴장력 측정에 대해서는 심화 연구 및 검증이 필요. 콘크리트 내부 긴장재의 응력 측정을 위해서는 시공 중에 센서를 설치해야 함.

(2) 긴장력 관리 기술 현황

(가) 원자로 건물

- ① 비부착 텐던은 Lift-Off 방법으로 유효긴장력을 직접 측정할 수 있음
- ② 부착식 텐던은 시공시 별도로 제작한 테스트 빔에 실험으로 긴장력 측정

(나) 케이블 교량

- ① 시공단계에서는 유압측정이나 Lift-off 방법으로 긴장력 검증 가능
- ② 긴장재가 노출되어 있기 때문에, 진동수를 측정하는 등 간접적인 방법으로 긴장력을 추정하고 교량의 건전성 평가를 할 수 있음

(다) PSC 교량

- ① 시공단계에는 신장량 측정에 의하여 간접적으로 긴장력 검증
- ② 공용중인 교량의 유효 긴장력을 측정하기 위한 여러 가지 방법론이 연구되고 있으나, 아직까지 부착된 긴장재를 포함한 PSC 거더의 긴장력을 측정하기에는 신뢰성이 부족
- ② 현장에서는 교량의 처짐을 측정하거나 균열을 관찰하여 공용 중의 긴장력 손실, 그리고 그에 따르는 내하력 손실을 간접적으로 추정하는 방법이 사용됨
- ③ 그러나, 처짐과 균열에 의한 교량의 안전성 확인 방법은 수많은 사람들이 사용하는 사회간접자본의 안정성과 신뢰성을 담보하기 위한 방법으로는 부족함
- ④ 따라서, 앞으로는 긴장력 도입시 신장량에 의한 간접관리가 아닌 긴장력 및 긴장력 분포에 대한 직접적인 관리가 가능하고, 공용중 장기손실이 반영된 긴장력 확인을 통한 보강시기의 선제적 선택과 적합한 긴장력량의 결정이 가능한 거더의 개발이 필요할 것임

(라) PSC 거더는 거더 내부의 PS 긴장재의 긴장력에 의해 하중 부하 능력이 결정되므로 시공 및 공용중 긴장력의 관리가 매우 중요함

- ① 시공 중 긴장력은 긴장재의 신장량 측정에 의한 간접적으로 추정
- ② 공용중은 교량의 처짐과 균열을 관찰하여 긴장력 손실을 간접 추정
- ③ 긴장재의 잔존응력 평가에 대한 여러 방법이 시도되고 있으나, 정확한 긴장력 및 성능 저하 평가는 어려움

(마) 따라서 안전하고 효율적인 PSC 교량을 위해서는, 시공단계부터 유지관리 단계까지 신뢰성 있는 긴장력 평가 및 검증이 가능한 센서 내장형 스마트 거더의 개발이 필요함

- ① 긴장력 계측을 위해서 비접촉방식의 Electro Magnetic 방식의 EM센서를 활용
- ② 변형률 계측을 위해서는 전자기장의 영향이 없고 온도에 대한 영향을 고려할 수 있는 광섬유(FBG)센서를 활용

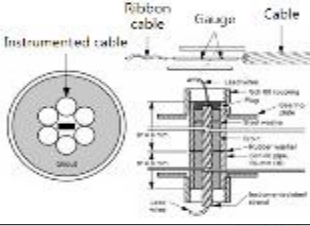
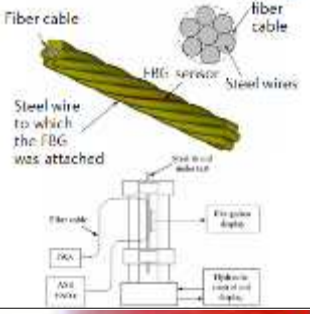
나. FBG 광섬유 센서를 이용한 긴장재 성능 관리 시스템

(1) 기존 기법 대비 FBG 센서의 차별성

(가) 광섬유 센서의 특징

- ① 전자기장의 영향이 전혀 없고, 온도에 대한 보상이 정확함
- ② 기존 기술의 국/내외 논문 및 자료 조사
- ③ 기존 기술과 장단점 비교

<표 2.3-1> 기존기술의 장단점 비교

종류	개념도	장점	단점
스트인게이지를 내장한 강연선		제작비용 저가	장기모니터링이 어려움 현장적용이 어려움 전자기파에 영향이 큼 노이즈가 큼 부재의 강성이 부족함
FBG 센서를 외부 결합한 강연선		전자기파의 영향이 없음 부재역할 및 센서역할 가능 제작이 간편함 제작비용 저가	현장적용 어려움 변형률 측정 폭이 작음
7 Wire Steel Strand with FRP Bar		계측범위 우수 (1.3%이상) 사용응력범위 내에서 선형거동임 CFRP PC Cable에 비해 정착이 용이함 내식성이 우수함	내열성이 낮음 철과 FRP 사이의 열팽창계수 차이가 커서 ($\alpha_{CFRP} \ll \alpha_{steel}$) 온도상승시 정착구에서 CFRP bar의 Slip 발생 가능성이 있음
7 Wire Steel Strand with Seamless 중공 King Wire		제작길이에 제한이 없음 (600m 이상 생산가능) 내식성이 우수함 정착이 용이함	사용응력범위 내에서 King Wire 항복하드로 연성이 우수한 King Wire 필요함

(2) FBG 센서를 이용한 PS 긴장재의 긴장력 계측 선행연구

- FBG 센서를 도입한 7연 강연선(스마트 강연선)을 제작하고 PSC 거더교에 적용하였다. 그리고 스마트 강연선으로 측정된 변형률을 이용하여 PS 긴장재의 긴장력을 예측하였다(김현우, 2008). FBG 센서의 계측 파장을 이용하여 스마트 강연선의 변형률(ϵ_{FBG})을 측정하였고, 측정된 변형률 값을 다음 식에 적용하여 긴장력($P_{estimated}$)을 예측하였다.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \quad (\text{식 } 2.3.1)$$

$$P_{estimated} = E_{ps} \times A_{ps} \times \varepsilon_{FBG} \quad (\text{식 } 2.3.2)$$

여기서,

$\Delta\lambda$: FBG 센서의 반사파장의 변화(nm)

λ_B : FBG 센서의 초기 반사파장(nm)

P_e : 광탄성 상수(0.22 for silica)

$\Delta\varepsilon$: 유효 변형률

α : 광섬유의 열팽창계수($1.20 \times 10^{-5} / ^\circ C$)

ξ : 광섬유의 열광학계수($5.67 \times 10^{-6} / ^\circ C$)

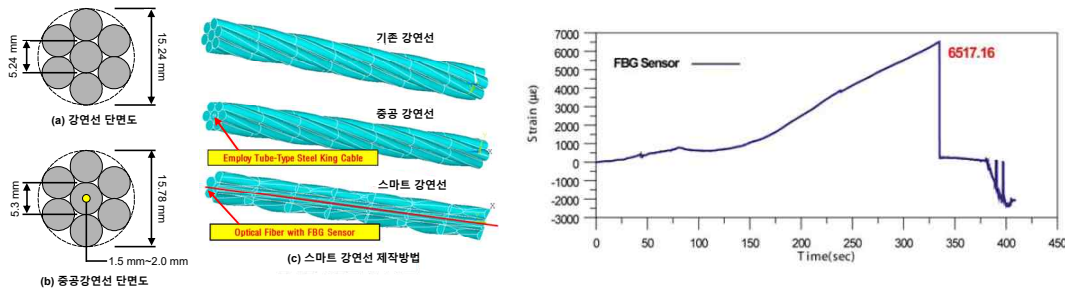
ΔT : 온도 변화량

E_{ps} : 강연선 탄성계수($200 GPa$)

A_{ps} : 강연선의 단면적($142.533 mm^2$)

ε_{FBG} : 측정 변형률(FBG 센서 계측 변형률값)

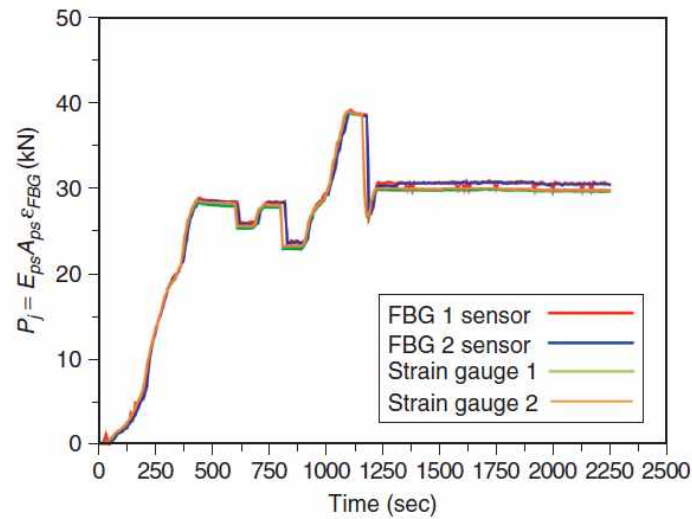
$P_{estimated}$: 예측 긴장력(FBG 센서 예측 긴장력)



<그림 2.3-1> 스마트 텐던의 개념도 제안

<그림 2.3-2> 스마트 텐던에 대한 인장시험 결과 (최대 계측 변형률 0.65%)

□ <그림 2.3-3>은 인장시험의 변형률 결과를 (식 2.3.2)에 적용함으로써 FBG 센서의 추정 긴장력과 스트레인게이지 추정 긴장력을 비교한 사례이다. 이로 부터 FBG 센서와 스트레인게이지에 의한 예측 긴장력이 일치하여 FBG 센서가 강연선과 일체로 거동하며 (식 2.3.2)이 유효함을 알 수 있다.



<그림 2.3-3> 스마트 강연선의 긴장력 추정 사례 (Kim et al., 2012)

다. EM 센서를 이용한 긴장재 모니터링 센서 및 알고리즘 개발

(1) 기존 기법 대비 EM 센서의 차별성

(가) 기존 연구 동향

- ① EM 센서를 이용한 긴장력 계측 방법은 국내외적으로 많은 연구가 이루어짐
- ② 국내에는 에이팩스 솔루션 및 브리텍에서 상용화 제품을 출시하였으며 한국건설기술연구원 및 표준과학기술연구원에서 관련 연구를 진행하였음
- ③ 국외에는 M.L Wang 교수 팀 및 다수의 팀이 EM 센서를 이용한 긴장력 계측 기법에 대한 연구를 진행하였음
- ④ 기존 연구들은 현수교 및 사장교의 긴장력을 계측하거나 PSC 거더의 외부에 센서를 설치하여 초기 긴장력 도입시의 긴장력 계측 기법에 대한 연구가 이루어졌음

(2) FBG 센서를 이용한 PS 긴장재의 긴장력 계측 선행연구

(가) 마그네틱 장력 센서 및 측정장치: (주)에이팩스 솔루션

□ (주)에이팩스 솔루션은 사장교 및 현수교의 케이블의 안전 감시 시스템 개발을 위해 강자성체의 스틸와이어 케이블에 스트레스가 가해지면 투자율이 변화하는 것을 이용하여 케이블의 장력측정이 가능한 마그네틱센서(EM sensor)를 설계 제작하고 시스템을 구축하여 성능을 시험하였다. 또한 장력센서의 특성을 평가할수 있는 전자회로를 구성하고 이를 컴퓨터와 인터페이스 시켜 센서의 성능을 시험하였고 이를 통해 개발된 기술을 한강의 사장교 및 현수교에 적용하여 시험하였다.



<그림 2.3-2> 에이팩스 솔루션이 제작한 마그네틱 장력 센서 및 측정 장치

(나) 케이블 장력측정 장치: (주)브리텍

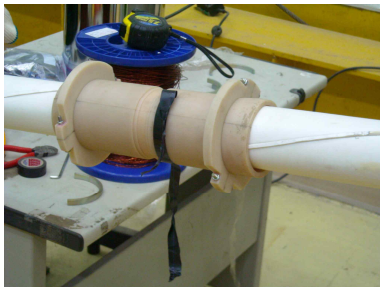
- (주)브리텍은 케이블 장력측정을 위하여 1, 2차 원통코일(solenoid)을 사용하여 1차 원통코일로는 자기장(EM flux)을 형성하고 전자기 유도원리패러데이의 법칙)에 의해 2차 원통코일에 유도된 전압을 측정하는 EM센서를 개발하였다. 이와 같은 과정으로부터 상대투자율(relative magnetic permeability)을 산정하면, 강재 케이블과 같은 강자성(ferromagnetic) 재료의 투자율이 온도와 응력의 함수라는 사실에 기초하여 케이블의 장력을 측정하였다.



(a) EM 센서



(b) EM센서 계측기



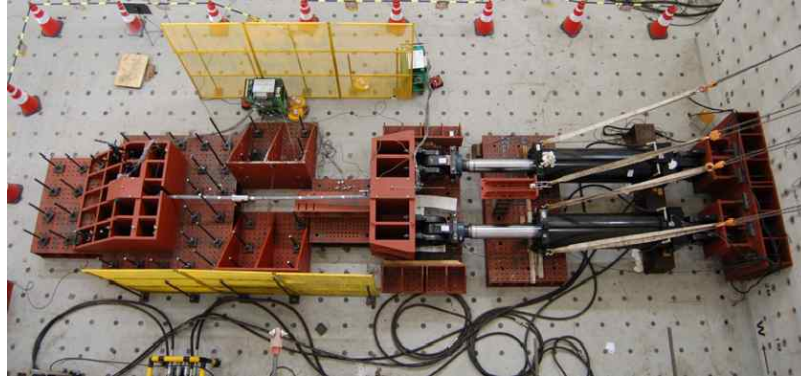
(c) 코일보빈의 모습



(d) EM센서 현장 설치 모습

<그림 2.3-3> 브리텍이 제작한 EM 센서

- (주)브리텍은 사장교 케이블을 대상으로 장력 측정 실험을 수행하였다. EM센서를 사용하여 실제 장력 측정을 위한 사전작업으로서 피측정체인 케이블에 대하여 기본보정(calibration)작업이 필요하며, 다양한 케이블에 대하여 기본정보작업 수행 후 도출된 장력 변환식을 데이터베이스화(DB) 한다면 EM센서의 적용성과 편의성을 더욱 향상시킬 수 있다. 또한 아래와 그림과 같이 기본 보정작업 시 측정된 상대투자율의 평균값에 대해 보정된 상대투자율과 케이블 장력과의 관계를 도식하는 그래프로서 이를 3차식으로 회귀분석하여 온도보정이 포함된 케이블 장력 변환식을 도출하였다.
- 해당 연구에서 수행한 사장교 케이블 장력 측정 실험으로 전자기 응용 비파괴 기술을 이용한 EM센서는 설치와 측정이 비교적 간단하며 정확성이 높다는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 다양한 케이블에 대하여 기본보정작업을 수행 후 도출된 장력 변환식 DB를 구축하여 현장 적용성을 향상시킬 필요가 있다.
- (주)브리텍은 정착경간에 설치가능한 EM(Electro Magnetic)센서를 이용하여 현수교 PPWS(Prefabricated Parallel Wire Strand) 실험체를 대상으로 장력 평가실험을 수행하였으며 적용성을 확인하였다.



<그림 2.3-4> PPWS 실험체 설치 모습

- (주)브리텍은 실제 적용될 현수교 PPWS를 대상으로 EM센서에 의한 장력평가 실험에 대한 연구를 진행하였다. 장력평가를 위한 EM센서는 PPWS 실험체 1/3지점에 실패모양의 코일보빈(coil bobbin)을 조립한 수 2차, 1차 원통코일을 차례로 코일보빈에 권선하여 현장 제작 설치하였다.
- 해당 연구에서는 장력오차가 최대 6%정도까지 산정되나 현수교에 설치되는 PPWS의 실용력수준은 보증인장강도의 30~40% 수준이므로 실제 발생한 오차는 0.51~0.76%라 할 수 있다. 그러므로 EM센서 적용 시 실제 장력오차는 1% 미만으로 상당히 높은 신뢰도를 나타내는 것으로 판단된다.

(다) EM센서를 활용한 멀티 텐던의 긴장력 분포 계측: 한국건설기술연구원

- 한국건설기술연구원은 PSC 개별 강연선에 도입되는 긴장력을 계측할 수 있는 장치를 개발하였다. 이의 작동 성능시험을 통해 개별 강연선 간에 서로 다른 긴장력이 도입될 수 있음을 확인하였다. 강연선의 긴장력은 Elasto-magnetic 센서(EM 센서) 또는 스마트 강연선을 통해 계측할 수 있으며, 여기서는 EM 센서를 통해 계측하는 방법을 선택하였다. EM 센서를 유압기에 장착하는 방법으로는 EM 센서 장치를 유압기 내부에 설치하는 방법과 EM 센서 장치를 유압기의 앞 부분에 장착하는 방법을 고려할 수 있다. 이 중에서 장치가 조금 더 커지지만, 장 탈착이 쉽고 배선 등의 유지보수가 쉬운 장점이 있으므로 유압기의 앞부분에 EM 센서 장치를 장착하는 방법으로 선택하였다. <그림 2.3-5>은 개발된 장치의 모습으로 직경 15.2 mm 강연선 19가닥의 긴장력 분포를 계측할 수 있다.



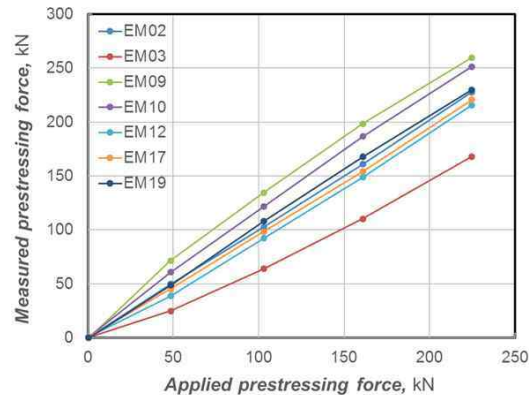
(a) EM 센서 장치



(b) 유압기에 장착된 모습

<그림 2.3-5> 한국건설기술연구원이 제안한 EM 센서 장치 및 장착 모습

□ 한국건설기술연구원은 개발한 장치를 검증하기 위하여 <그림 2.3-6(a)>와 같이 EM 센서 장치 앞부분에 강연선이 꼽혀진 앵커헤드를 설치하고 긴장력을 재하하였다. <그림 2.3-6(b)>는 재하된 긴장력과 계측된 긴장력을 일부 강연선에 대해서만 보인 것으로 강연선들의 긴장력이 서로 다름을 확인할 수 있다.



(a) 긴장력 분포 계측 실험 모습

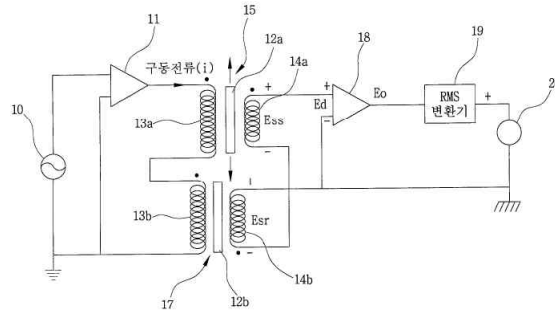
(b) 재하 긴장력에 대한 계측 긴장력 분포

<그림 2.3-6> 개발된 EM 센서 장치 및 장착 모습

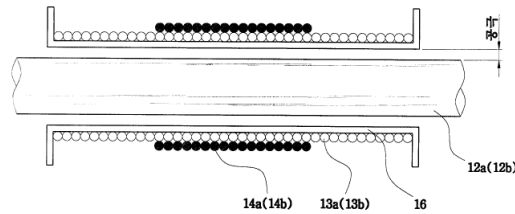
□ PSC 구조에서 개별 강연선에 도입되는 긴장력을 계측할 수 있는 장치를 개발하였다. 이의 작동 성능 시험을 통해 개별 강연선 간에 서로 다른 긴장력이 도입될 수 있음을 확인하였다. 추후 개발된 장치를 통해 실제 현장에서의 긴장력 분포를 계측하고자 하며, 이는 PSC 구조의 안전성을 확보할 수 있는 기초자료가 될 수 있을 것이다.

(라) 자동보상형 EM방식의 장력측정방법 및 장치: 한국표준과학연구원

□ 한국표준과학연구원이 만든 이 발명은 자동보상형 EM 방식의 장력측정방법 및 장치에 관한 것으로서, 측정 EM 센서와 기준 EM 센서의 조합형 센서수단을 채용하여 온도, 습도, 지지물의 노화 등과 같은 주위의 환경변화에 적극적으로 대응할 수 있도록 함으로써, 주위의 환경변화를 자동으로 보상할 수 있고, 이에 따라 주위 환경에 관계없이 장력변화에 따른 출력을 안정되게 얻을 수 있으며, 결국 구조물에 대한 보다 정확하고 신뢰할 수 있는 장력측정값을 얻을 수 있도록 한 자동보상형 EM 방식의 장력측정방법 및 장치를 제공하고자 하였다.



(a) 도면1



(b) 도면2

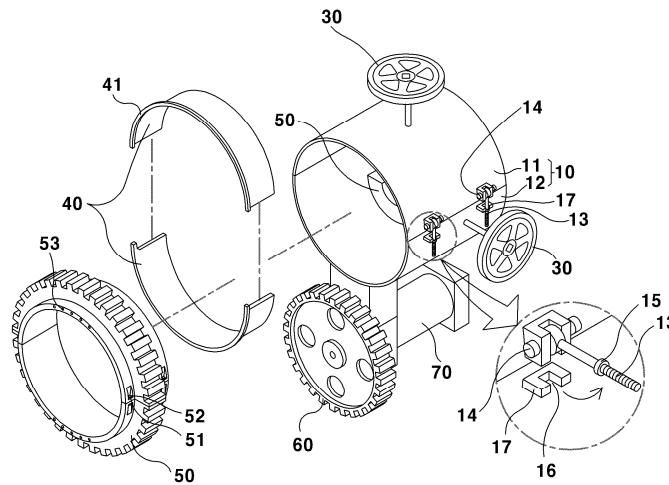
<그림 2.3-7> 한국표준과학원이 제안한 EM 센서 계측 기법

- 주위 환경변화조건과 부하조건을 부여한 측정 EM 센서와 주위 환경변화조건만을 부여한 기준 EM 센서에 각각의 입력전압을 인가하는 단계와, 측정 EM 센서와 기준 EM 센서로부터 유기되는 각각의 출력전압(E_{ss} , E_{sr})을 역극성으로 직렬 연결하여 얻어진 편차값(E_d)을 프리앰프를 사용하여 적절한 크기의 신호로 증폭하는 단계와, RMS 변환기를 이용하여 교류전압을 직류전압으로 변환하는 동시에 이를 직류 볼트미터로 표시하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하였다.
- 보빈을 이용하여 권취한 1차 코일 및 그 위의 2차 코일을 이용하였으며, 또한, 상기 측정 EM 센서와 기준 EM 센서의 각 1차 코일은 동일한 권선수로 감겨져 있는 것이 본 발명의 주요 특징이다.
- 기준 EM 센서와 측정 EM 센서에 주위 환경변화조건을 부여하는 과정에서는 기준 EM 센서가 설치되는 지지물은 측정 EM 센서가 설치되는 지지물과 동일한 것을 사용하고, 항상 무부하 상태로 있으면서 주위 환경변화는 측정 EM 센서와 동일한 조건으로 조성하였다.
- ㉔ 장력측정장치 구성: 정현파의 발생·증폭을 위한 신호 발생기 및 전력 증폭기, 1차 코일, 발생하는 자화력에 의해 전압이 유기되는 2차코일을 갖는 측정 EM 센서, 무부하 상태의 지지물상에 설치되며 전력 증폭기로부터 출력되는 전류가 인가되는 1차코일, 발생하는 자화력에 의해 전압이 유기되는 2차코일을 갖는 기준 EM 센서로 구성
- ㉕ RMS 변환부 및 직류볼트미터: 측정 EM 센서와 기준 EM 센서의 각 2차코일을 역극성으로 직렬 연결하여 얻어진 차이값을 프리앰프의 입력단에 가하여 적절한 크기의 신호로 변환하고, 이 신호를 직류전압으로 변환하는 RMS 변환부 및 이를 표시하는 직류 볼트미터를 포함하여 구성
- ㉖ 권취: 측정 EM 센서와 기준 EM 센서의 각각의 코일은 지지물로부터 일정한 공극을 유지하는 보빈을 이용

- ㉔ 측정 EM 센서와 기준 EM 센서의 각 1차코일: 전력 증폭기와 직렬로 회로 구성되어 전력 증폭기로부터 출력되는 전류를 동시에 제공받을 수 있도록 되어 있으며, 기준 EM 센서가 설치되는 지지물과 측정 EM 센서가 설치되는 지지물은 동일한 조건의 주위 환경변화를 받도록 되어 있는 것을 특징으로 하였다. 또한, 상기 각각의 지지물이 받는 주위 환경변화는 온도, 습도, 지지물의 노화를 포함한다.

(마) 케이블 장력 측정센서 제작용 분할형 권선장치 : (주)브리텍

- (주)브리텍이 만든 이 발명은 장력 측정센서 제작을 위한 분할형 권선장치에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 교량의 지지를 위해 설치된 케이블의 장력측정을 위한 센서의 코일 권선작업이 용이하게 이루어질 수 있도록 분할형 구조를 이루는 권선장치 구조체에 관한 것이다.

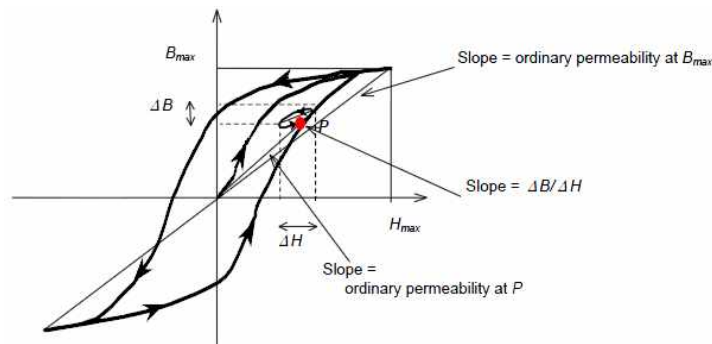


<그림 2.3-8> 권선장치 분해도

- (주)브리텍이 발명한 권선장치는 교량용 케이블에 장력측정센서의 설치를 위한 와이어 권선작업이 효과적으로 이루어질 수 있게 하여 작업효율을 향상시킬 수 있게 하였다.
- 내부가 비워진 원통형상을 이루는 본체하우징은 금속재로서 제1하우징과 제2하우징의 분할형 구조를 이루고, 본체하우징 내부는 케이블과 가압 체결이 이루어지도록 일정 곡률을 이루는 다수의 가압 체결구가 방사형태로 구비되어 있다. 각 가압 체결구의 가압력 조절을 위한 조절핸들은 핸들축이 본체하우징에 나사결합되어 지며 관통 체결되었고, 본체하우징의 일측에는 2개로 분할된 구조를 이루는 플라스틱 재질의 결합링이 결합되었으며, 결합링에는 역시 플라스틱 재질로서 2개로 분할된 구조를 이루는 피동기어가 회전 가능 하게 끼워져 구비되었다. 이러한 피동기어를 회전시키기 위한 동력을 전달하기 위해 구동기어가 기어 치합상태로 구성되며, 본체하우징 외측 하부에는 구동기어에 구동력을 전달하기 위한 구동모터가 설치되었다.
- 본 발명의 코일 권선장치는 분할형 구조를 이룸으로서 교량에 이미 설치되어져 있는 케이블에 대한 설치 및 해체가 가능하게 되어 케이블 장력 측정용 센서 설치를 위한 코일 권선작업이 보다 용이하게 이루어질 수 있게 됨을 알 수 있다.

(바) Elasto-magnetic 센서 관련 연구개발 사항

- 실린더형의 elasto-magnetic 센서를 이용하여 프리스트레스 콘크리트(PC)의 다양한 긴장재 및 장대교량의 케이블의 장력을 측정함으로써 케이블의 손상을 검색할 수 있는 비파괴 검사 기술을 연구하고 있다. 이 기술은 Ashidagawa bridge 등에 적용되어졌다.



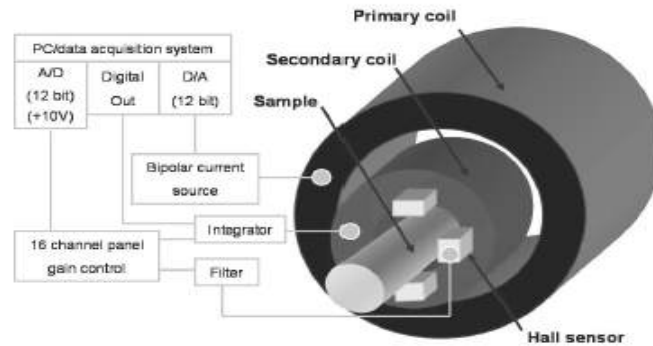
<그림 2.3-9> 강자성체의 일반적인 B-H 곡선



<그림 2.3-10> 교량 챔버에 위치한 E/M 센서

- Early corrosion detection in structural carbon steels using electromagnetic sensors

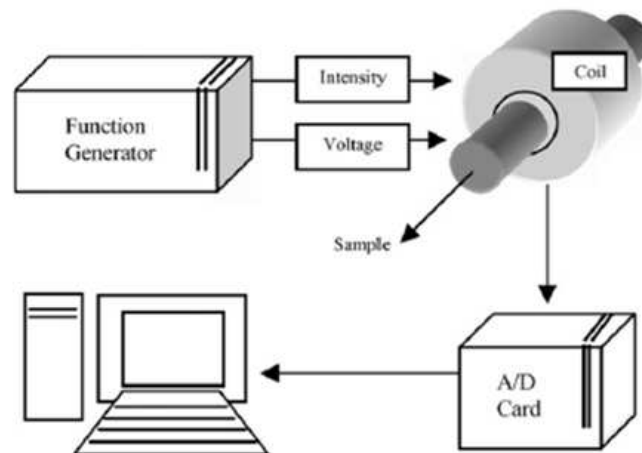
- EM센서를 이용하여 구조용 탄소강의 부식을 계측하는 것이다. 실험에 강재의 자기 특성에 부식의 영향을 얼마나 주는지 평가하고, 부식으로 생긴 질량손실에 관련된 곡선과 방정식을 만든다. 결과적으로 EM센서는 초기 단계에 자기포화에 변동을 계측하는 신뢰성이 있는 것을 알 수 있다.
- 균일한 부식이 작용된 면에서 느리고 지속적 단면적의 감소가 보이고 있다. 5 %, 10 %, 15 %. 감소된 단면에서 자기장을 유도하여 단면 감소의 효과가 어떻게 발생하는지 검사하였고, 제어는 부식 반응에 그들의 자성 산화철 형성 및 표면 형태 변화의 영향을 평가하기 위해 강철 샘플에서 유도하였다.
- 결론적으로 EM센서는 질량 손실이 0.01g/cm²이하 또는 감자기 포화에서의 변화에 기초하여 영역의 감소 0.5% 질량 손실을 검출하기 위해 확실하게 사용될 수 있다. 그리고 0.01g/cm²보다 큰 질량 손실에 대해 부식 샘플 조직 수치는 긍정적으로 이탈하는 경향이 있었다. 마지막에 실험에 얻은 결과를 보고 부식으로 인한 질량손실의 양이 실험식을 사용하여 추정 될 수 있다.



<그림 2.3-11> EM 센서를 이용한 긴장력 계측 시스템

- Hardness profile plotting using multi-frequency multi-output electromagnetic sensor

□ 마이크로 구조체 및 다른 경화 층 두께를 가진 샘플의 경도 값의 비파괴 와전류 방식을 사용하여 경도 값과 와전류 장비 출력 전압 간의 관계가 선형이라는 결과를 얻어냈다. 각각의 출력 전압에 대한 최적의 주파수를 이용하여 표면으로부터 소정의 거리에서의 경도를 측정하고 경도 프로파일을 그렸다.



<그림 2.3-12> EM 센서 계측 시스템

- Temperature effects on cable stayed bridge using health monitoring system: a case study

□ 중국 남부 광둥성에 있는 ZHANJIANG 해만 대교를 완공 후 영구적인 HMS를 설치하였다. HMS의 목적은 매우 높은 온도, 습도, 및 바다 염소량 조건 구조적 거동을 모니터링 하는 것이다. 이런 시스템 (HMS)에 따라 열적 효과에 대한 분석 작업을 했으며, 분석에 연구 된 매개 변수는 열 시간의 시차와 강 박스 거더의 경사도로 설정하였다. 연구 결과, 강철 대들보 온도 경사도가 설계 표준보다 컸으며, 추가적인 연구 결과는 유한요소모델을 사용하여 계산 된 값에 측정 된 데이터 비교를 통하여 얻어졌다.

□ 본 연구에서는 철저한 방식으로 이러한 연구 결과를 제시하였으며, 측정 장치의 자유 위치에서 조건을 추정 및 미래의 수동 검사에 대한 관심의 영역을 제안하였다.

또한 열적거동의 실제적인 예를 제공하기 위해 HMS의 능력을 분석한다. 결과적으로 ZHANJIANG 해완 대교 케이스에서 HMS 의해 수집 된 데이터를 통하여 실제 온도 패턴의 예가 제공 될 것이다.

- ☐ 결과를 보면 HMS는 측량하지 못하는 교량을 추정할 때 효과적이고 더 광범위한 영역에서 유용하다. 앞으로 더 세부적 평가방법을 개발하고 HMS를 함께 사용하면 좋은 효과가 있을 것이다. 또한 HMS 데이터의 지속적인 연구가 교량의 관리와 발전을 위한 소중한 지식을 제공 할 것이다.

- Detection and Monitoring of Corrosion in Structural Carbon Steels Using Electromagnetic Sensors

- ☐ 환경적 원인이나 관리 문제 및 다른 여러 문제로 장비, 기계들이 시간이 지나면서 악화됨에 따라 안전하지 않게 되므로, 사용수명을 길게 하는 유지관리의 건전성 모니터링의 중요성이 커지고 있다. 미국 일리노이 대학의 Ming L. Wang 교수가 EM센서의 사용 가능한 분야를 연구하는 것이며, 본 연구에 사용된 EM센서는 재료 부식에 인한 단면적의 변화에 따라 자기특성의 변화를 계측할 수 있고, 단면적의 감소의 관점에서 부식의 정량적 측정을 얻을 수 있다는 신뢰성을 가지고 있다.

- ☐ 길이 813 mm, 직경 12.5 mm인 세 가지 다른 철강: AISI 1018, AISI 1045, and AISI 1045-High Mn 을 실험에 쓴다. 먼저 자성을 없애고 부식 단면의 부식비율이 5%, 10%, 15%일 때의 부식 반응에 자성 산화철 형성 및 표면 형태 변화의 영향을 평가한다.

- ☐ EM센서가 앞으로 자기 특성의 변화에 기초하여 부식을 검출하는 NDE 센서로 사용될 수 있는 잠재력을 가지고 있고, 이 센서를 통하여 95 % 신뢰 범위 내에서 효과적으로 검출 할 수 있었다. 또한 센서는 구조용 강재의 부식이 균일 할 때 계측이 가장 정교하게 나타났다. 그리고 XRD에 의해 확인된 부식 생성물들(magnetite, maghemite, goethite, lepidocrocite, hematite, and akaganeite)이 포화자기에 의한 영향은 적고, 검출 및 센서를 이용하여서 부식의 초기 단계의 모니터링으로는 유의 하지 않았다.

- Assessment of the Effect of Microstructure on the Magnetic Behavior of Structural Carbon Steels Using an Electromagnetic Sensor

- ☐ EM센서를 이용해서 네 개 탄소강의 자기특성을 이용하여 미세 구조와 관련하여 평가하는 것에 관련된 연구를 진행하였다. 이들의 구성 요소들, 미세조직특징(페라이트 체적 분율, 입경, 개재물 등) 및 그 포화 자속 밀도, 유지력, 보자력을 비교 하였다. 실험에서 AISI 1010, AISI 1018, AISI 1045, and AISI 1045-high manganese 의 4가지 철근이 쓰였다. 연구 결과 미세 구조와 강재의 자기 특성과는 매우 관련이 높음을 보여주었다.

- ☐ 자기 응답에 대한 강봉의 단면적의 변동의 효과를 조사 하였다. 강철 막대 직경 체계적 가공에 의해 감소하고 자기 특성을 평가하였다. 전자기 센서로 측정 구조용 탄소강 및 자기 특성의 금속 특성에 일관된 관계가 얻어졌다.

- ☐ 이외에도 센서는 의한 단면적의 변화에 자기 특성의 변화를 감지 할 수 있는 것으

로 밝혀졌다. 이러한 결과는 전자기 센서가 감지하여 열화기구에 의한 제강 또는 변경의 다른 단계 동안 발생하는 미세 조직 형태학적 변화를 모니터링을 하기 위해 신뢰성 있는 비파괴 센서로 사용할 수 있는 잠재력을 가지고 있음을 알 수 있었다.

- 슬로바키아 Projstar PK Ltd.의 Chandoga M 등은 지난 20년간의 실험을 통해 강재의 힘이나 스트레스를 측정을 통한 Elasto-Magnetic 방법이 프리스트레싱 스틸 케이블의 모니터링에 정확하고 신뢰할 수 있으며 일반적으로 적용 가능함을 확인하였다. 또한 EM방법은 동적 하중 측정에 적합하고 특별한 타입의 EM센서는 지속적으로 케이블 내부의 동적 응력 변화를 측정할 수 있으며 케이블 교차 부분의 교통량에 의한 하중, 풍속, 지진뿐만 아니라 앵커 근처의 모니터링이 가능하다. 케이블을 따라 이동하는 EM센서는 1% 이상의 단면감소 손상 감지가 가능하다. 따라서 케이블의 단선 등의 손상이나 부식의 모니터링을 할 수 있다.



<그림 2.3-13> 앵커리지 헤드의 센서 설치

(사) LF·LMA EM 검사법: Weischedel and Hohle

- Weischedel and Hohle(1995)는 사장케이블의 평가를 위한 두가지 기능의 electromagnetic (EM) 방법(LF검사와 LMA검사 두가지 EM 검사법)을 논의하였다. Weischedel 와 Hohle 는 LF 검사는 부식, 피복 등의 상태의 단계적인 변화를 계측할 수 없는 차등센서에 기반 한다고 하였고, 절대적 센서는 변화를 계측하는 것이 요구된다고 하였다. 듀얼 시스템은 LF와 LMA를 동시에 계측할 수 있게 다른 두가지의 센서를 포함한다.
- 또한 EM 방법이 25년 동안 사장교 케이블을 위해서 독일에서 사용되었다고 보고 하였고, 와이어 절단을 찾아내기 위해서 케이블을 따라 이동할 수 있는 4개의 센서(LF타입)을 사용하는 장치에 대해 언급하였다. LMA 계측의 정확성에 관하여 자기 파편의 영향에 대해서도 논의한 바 있다.

4. PSC 거더의 기술 현황

- 국내에서 가장 많이 적용되고 있는 PSC 거더는 30m 정도의 경간에 주로 사용되는 경제적인 교량형식으로서 90년대 초 한국도로공사 표준도에 근거하여 적용되어 왔다. 최근 중·장 지간의 교량 수요가 증가함에 따라 지간장이 40~50 m 인 교량에 적용이 가능하도록 PSC 거더의 단면형상을 개선하고 긴장재를 단계별로 긴장시킬 수 있는 신공법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

□ <표 2.4-1>에 PSC 거더와 관련된 건설 신기술(국토교통부)을 나타내었다. 긴장 효율을 증진시켜 교량의 형고를 낮추고 지간장을 확장시키는 기술이다.

<표 2.4-1> PSC 거더 관련 신공법 현황

구 분	IPC	E-Beam	PnP	Dr-girder	C 거더
개발사	(주)인터컨스텍	우경건설(주) (주)건화	(주)대우건설 (주)비엔지건설 터트 한국시설안전공단	동부건설(주) (주)한맥기술 (주)장현산업	성환이앤씨
공법의 명칭	단부의 측면에 설치된 정착장치와 연속 텐던을 이용한 PSC-I형 거더 합성교의 연속화 공법	PSC-I형 거더의 상연에 강관을 매설하고, 부모멘트 구간에 강관 및 강선을 연결한 교량의 연속화 공법	프리캐스트 바닥판의 선재하 하중 효과를 이용하여 거더 상단 단블럭에서 2차 긴장력을 도입한 도로용 PSC 합성거더 시공기술	거더 단부의 상부에 긴장재의 이완과 재긴장이 가능한 장착시스템을 이용한 프리스트레스트 콘크리트 거더 공법	단부돌출블록 및 연속지점부 상단공간부를 이용한 다경간 피에스씨 거더교 시공방법
특징	- 단면개선 및 단계별 긴장에 의한 형고 축소 유지관리를 위해 일부 비부착 강선 배치	- 중앙부 및 연속 지점부 단면을 강관 보강 - 강관 적용에 따른 제작비용 증가	- 프리캐스트 바닥판	- 프리캐스트 바닥판 비합성시 2차 긴장력 도입	- 단부 블록-아웃 공법으로 작업 안정성 및 긴장력 손실 저감
유지관리 긴장	일부 비부착 강선	측면에 별도의 유지관리 쉬스	가로보에 유지관리를 쉬스	- 긴장력 조절 장치 - 포장 철거 등 시공 어려움	측면에 별도의 유지관리 쉬스
시공오차 및 곡률반경의 영향	있음	있음	있음	있음	영향 최소화
연속화 특징	긴장 손실발생	- 연속부 시공 복잡 - 긴장 손실발생	긴장 손실발생	긴장 손실발생	긴장 손실 최소화
2차 긴장 안전성	위험 (측면 고공작업)	위험 (측면 고공작업)	안전 (거더 상면 작업)	안전 (거더 상면 작업)	안전 (거더 상면 작업)

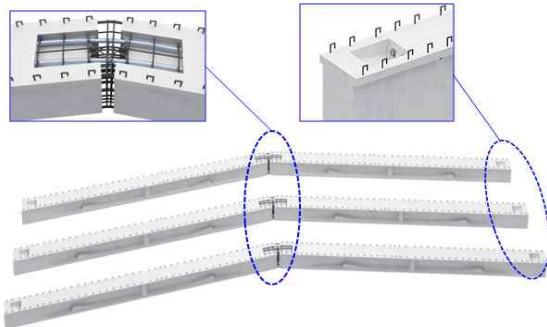
□ 프리스트레스트 공법은 압축에는 강하고 인장에 약한 콘크리트의 특징을 응용하여 콘크리트 거더의 장지간화를 이루었으며, 또한 많은 건설 사례를 통하여 안전성이 증명된 신뢰성 있는 공법이라 할 수 있다.

□ 이러한 신공법들은 단경간 PSC 거더의 연속화 공법을 통하여 거더의 구조적 안전성 및 효율을 증가시킨다. 그러나, C-거더를 제외한 공법들은 연속화부에서 발생하는 시공오차 및 평면/종단선형(구간) 등에 의해 발생하는 국부 마찰손실의 영향을 감소시킬 수 없는 단점을 가지고 있다.

□ 2차 긴장방법을 비교하면, 시공방법에 따라 거더 측면에서 긴장하기 때문에 작업공간에 따른 안전성 위험이 있으며 적용 가능한 인장기의 종류가 한정되기 때문에 정착구 켜기의 활동손실이 크게 발생하는 공법이 일부 존재한다.



<그림 2.4-1> 기존 PSC 거더교 거더의 측면에서 2차 긴장 작업



<그림 2.4-2> PSC 거더교 지점의 블록아웃 C 거더의 개념도 및 시공사례

- 본 연구에서 제안되는 신거더의 기본 형식인 C-거더는 지점부 블록아웃 공법을 통하여 2차 긴장시 작업안전성 및 시공 효율성을 확보하고, 연속지점부에서는 긴장력의 절곡손실을 저감시킨 특징을 가지고 있다. 또한, 지점부 블록아웃은 센서를 매입할 공간을 마련하고 관련 작업을 신뢰성 있게 진행하기 위한 최적의 위치이다.
- PSC 교량은 긴장력이 곧 교량의 강도를 결정하기 때문에 긴장력의 유지관리가 안전성의 핵심이다. PSC 교량의 건설 역사는 다른 형식에 비해 상대적으로 짧기 때문에, 많은 연구자들이 기 건설된 PSC 교량의 긴장력을 추정하기 노력해왔다. 그러나, 연구 개발 필요성에서 자세히 서술한 바와 같이 아직 주목할 만한 성과를 내지는 못하였다.
- 따라서, 앞으로는 시공시와 공용중의 정확하고 신뢰성있는 긴장력 검증을 위하여 교량의 건설단계에서부터 긴장력 측정을 위한 센서를 매입한 교량에 대한 연구가 필요할 것이다.

5. 국내외 관련 기술 특허 동향

<표 2.5-1> 국내외 관련 기술 특허 동향

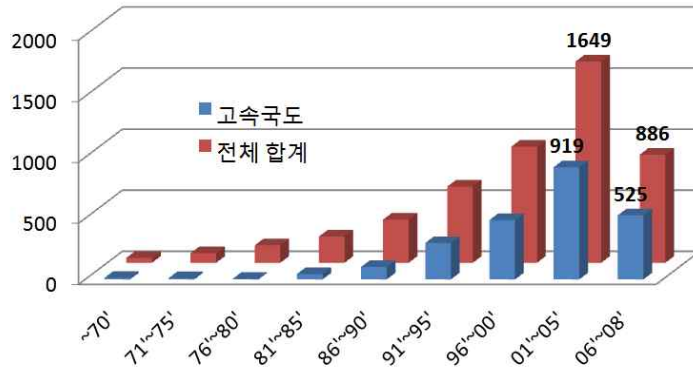
구분	출원국	출원번호 (출원일)	출원인	요약	현재 상태	침해 가능성
1	대한민국	2012-0044446 (2012.04.27)	주식회사 포스코건설	콘크리트 내부 긴장재의 긴장력을 측정하기 위하여 긴장재의 일부를 외부로 노출시켜 긴장력을 측정하는 기술	등록	없음
2	대한민국	2009-0107394 (2009.11.09)	한국수력원 자력 주식회사/ 한국전력공 사	PS 긴장재에 로드셀 및 임팩터를 이용하여 종진동 주파수를 계산하고 이를 이용해 긴장력을 평가하는 기술	등록	없음
3	대한민국	2008-0085032 (2008.08.29)	한국건설기 술연구원	PS 긴장재의 긴장력 손실량을 측정하기 위하여 FBG 광섬유센서를 채결부재에 연결하여 긴장재의 긴장력 변화를 측정하는 기술	거절	없음
4	일본	2002-223596 (2002.07.31)	TAIHEIYO CEMENT CORP	대형 프리스트레스 콘크리트 구조물에 사용되는 긴장재의 파단을 탄성과 기반의 계측 시스템을 통하여 모니터링 하는 기술	등록	없음

□ PSC 거더 긴장재의 긴장력 관리 기법에 관한 국내외 주요 선행 특허에 대하여 조사한 결과 포스코 건설, 한국수력원자력 및 한국건설기술연구원 등의 국내 토목관련 연구소에서 긴장재를 노출시키거나 FBG 광섬유 센서 및 종진동 계측 등을 통하여 PSC 긴장재의 긴장력을 계측하는 기술에 대한 특허가 다수 출원되어 있었다. 또한 일본의 TAIHEIYO CEMENT에서 탄성과 계측 시스템을 이용한 긴장재 모니터링 시스템 등 해외에서도 PSC 구조물의 긴장재 관리를 위한 다수의 기술이 특허 출원 및 등록이 되어 있었다.

□ 본 연구과제인 FBG 광섬유 센서 및 EM 센서를 이용한 생애주기 긴장력 관리가 가능한 블록아웃 PSC 거더 기술은 FBG 광섬유 센서를 이용한다는 점이 선행 특허와 일부 유사하지만 EM 센서 및 블록아웃 공법을 이용한 PSC 거더의 생애주기 긴장력 관리가 가능한 기법에 대한 선행 특허는 없는 것으로 확인되어 추후 사업화과정에서 문제가 발생할 가능성은 없는 것으로 판단된다.

6. 국내외 시장분석 및 산업동향

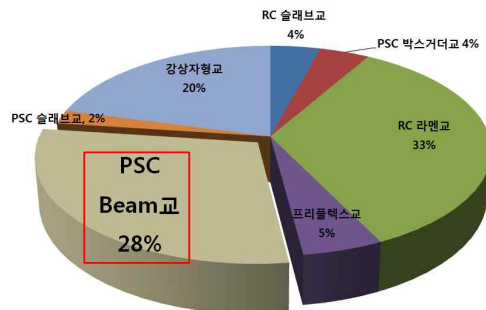
□ PSC 구조물은 하중에 의해 콘크리트에 발생하는 응력을 상쇄시키도록 역방향 응력을 미리주어 콘크리트의 처짐과 균열을 줄여 구조물의 안전성, 내구성, 수밀성, 복원성 등을 향상시킨 구조물이다. 이를 이용한 PSC 거더는 1950년대 초반 미국에서 교량 설계 시 적용되어 1956년에 설계방법 및 구조단면이 표준화되면서 단·중경간 교량 중에서 가장 효율적이면서 경제적인 교량으로 평가되어 시공이 증가되어 왔다.(<그림 2.6-1> 참조)



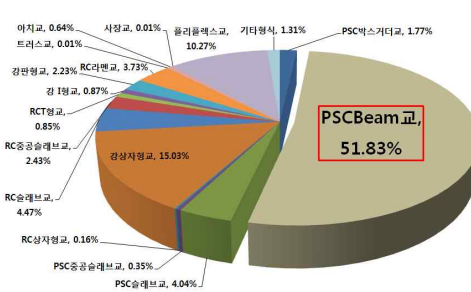
<그림 2.6-1> 연도별 완공 PSC 교량 개소

□ 국내에서는 1960년대 이후 PSC 거더가 도입되었으며, 표준도가 제안되면서 도로교 전체 연장의 23.6%, 철도교 전체 연장 중 38.6%를 점유하며, 도로교는 25~35m, 철도교는 20~25m 경간에 널리 적용되는 가장 보편화된 교량형식으로 현재까지 인식되고 있다. 고속국도의 경우 전체 교량형식 중 PSC 거더교가 전체의 28%를 점유하고 있으며 경간장 20m~50m 이하의 경우에는 51.83%를 점유하고 있다.(<그림 2.6-2> 참조)

□ 현재 국내 PSC 거더 시장은 현재 경간장 20~50m에서 50%이상의 점유율을 가지고 있으며 향후 본 연구개발을 통해 PSC 거더의 장경간화가 가능할 경우 50m 이상의 경간장에서도 시장이 확대될 전망이다. 따라서 FBG 광섬유센서 및 EM 센서 융합 생애주기 긴장력 관리형 블록아웃 PSC 거더 시스템 개발의 시장성은 높은 것으로 검토된다.



(a) 고속국도 교량 상부형식



(b) 고속국도 경간장 20~50 m

<그림 2.6-2> 고속국도 교량형식 현황 및 PSC 거더교 비중(한국콘크리트학회, 2010)

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

□ 연구 수행 내용은 요약된 내용을 수록하였으며, 자세한 내용은 부록에 첨부하였음

1. FBG 및 EM 센서 내장형 생애주기 긴장력 관리형 거더 시스템

가. 긴장력 계측 방법 비교

(1) 긴장력 계측 기술 현황

□ PS강재의 긴장응력은 긴장시 불가피한 즉시손실뿐 만 아니라, 콘크리트의 크리프 및 건조수축 그리고 PS강재의 릴랙세이션 등과 같은 시간 의존적 손실에 의하여 지속적으로 감소되고 있다. 그러므로 PSC 구조계를 구성하는 핵심 요소부재인 PS 강재의 긴장응력에 대한 주기적 모니터링은 반드시 필요하다. 그러나, PSC구조계의 현재 긴장응력을 비파괴적인 방법으로 평가할 수 있는 기술은 꾸준히 연구되어 왔으나, 아직까지 실용화 단계에 이르지 못하였다. PS 긴장재의 잔존 응력 평가 기술이 실무에 적용되기 위해서는 아직 해결되어야 할 많은 문제점들이 있다.

(가) 하중 재하법

□ 가장 기본적인 긴장력 측정 기법은 긴장재에 적용된 하중을 직접 측정하는 것이다. 시공단계에서는 유압 펌프의 유압을 응력으로 환산하여 PS 긴장재에 가해지는 긴장력을 측정할 수 있다. 사용 중의 구조물은 긴장재에 하중을 주어 변형시켜도 구조물에 손상이 발생하지 않는 비부착 텐던을 대상으로만 가력 시험을 할 수 있다. 비부착 텐던의 경우 재긴장시 정착단에 틈이 발생하는 시점에서의 유압 펌프의 유압을 응력으로 환산하여 긴장력 측정할 수 있다 (Lift-Off Test).



<그림 3.1-1> 원자력발전소 원자로격납건물에서의 PS 긴장 및 긴장력 계측 과정

(나) 초음파 및 탄성파 속도 응용법

□ PS 강재의 잔존 응력 평가 기술에 대한 초기의 연구는 대부분 초음파 등의 고주파 펄스를 이용한 비부착식 PSC 텐던의 긴장력 평가 타당성 연구로서, 미국과 유럽을 중심으로 이루어졌다.

□ 탄성파의 속도를 이용하는 방법은 대부분 유도 초음파를 이용하는 방법이 주로 연구되었다. 그러나 초음파는 부착식 PSC처럼 그라우팅 처리된 경우에는 에너지의 감쇠가 크기 때문에 구조응답의 계측이 쉽지 않다.

- Jang et al. (2013)은 김병화 등(2012)의 제안식으로 탄성파속도법을 국내 원자력발전소 격납건물의 부착식 PSC 수직텐던에 적용하여 PS강재의 잔존응력을 추정하기도 하였으나 여전히 해결해야하는 한계가 있다.

(다) 진동특성 응용법

- PSC 거더의 진동 특성 변화를 이용하여 긴장력을 측정하고자 하는 연구가 진행되었다. (Saïidi and Douglas 1994, Kim 등 2003). M. Saïidi는 1994년에 고유진동수 계측에 의해 긴장력 손실을 예측할 수 있는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 단순지지 된 보에서 경계조건을 적용한 후 동적 평형 방정식을 이용하여 도심에 작용하는 축력만을 고려한 고유진동수 예측식을 제안하였다.
- 대표적인 진동기반 손상모니터링 기법은 가속도 자료를 이용하는 손상모니터링 기법과 압전 임피던스(piezoelectric impedance) 특성을 이용한 손상모니터링 기법이 있다. Kim 등 (2009)는 PSC 거더 교량의 진동특성과 함께 텐던 정착판의 전기-역학적 임피던스 특성의 변화를 이용하여 긴장력의 변화를 모니터링하는 기법을 연구하였다.

(라) 자기장 응용법

- 자기장을 이용한 응력센서 분야에서 최근 주목할 만한 연구성과가 보고되었는데 (Baudendistel and Tunner 2007; Calkins et al 2007), 기존 비파괴 방법의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 고려할 수 있다. 자기변형(Magnetostriction)은 모든 자성체(Ferromagnetic Materials)의 고유특성으로써 1842년 James Joule에 의해서 발견되었고 줄효과(Joule Effect)로 알려져 있다. 줄효과와 반대현상이 1975년 Villari에 의해서 발견되었으며, 자성체에 응력이 가해지면 자속 특성이 변하는 역자기변형(Inverse Magnetostriction)효과를 말한다. 자기 응력센서의 기본원리는 자성체의 자속특성 중에서 투자율(Magnetic Permeability)을 모니터링하여 자성체에 가해진 응력을 추정하는 것이다. 사장교와 현수교 등의 케이블의 응력 계측에 사용되고 있다.

(2) 긴장력 관리 기술 현황

(가) 원자로 건물

- 국내 가동 중 중수로 및 일부 경수로 원전의 원자로건물에 부착식 텐던이 설치되어 있고, 이들에 대한 긴장력 평가는 원자로건물의 구조건전성 평가 시 매우 중요하다. 부착식 텐던은 텐던을 둘러싸고 있는 쉬스관 내부를 시멘트 그라우트로 채우는 형식으로서 현재 월성 1, 2, 3, 4 호기와 울진 1, 2 호기가 부착식 텐던을 채택하고 있다(통상산업부 1994). 반면 비부착식 텐던은 쉬스관을 그리스로 채운다.



<그림 3.1-2> 원자력 발전소 구조물의 쉬스관 모습

(나) 케이블 교량

- 사장교나 현수교와 같은 케이블 교량에서 케이블의 긴장력은 구조물에 하중으로 작용할 뿐 아니라, 케이블의 강성을 구현하는 요소이기 때문에 적절한 장력의 도입(무응력 길이 조절)은 설계 및 시공에서 가장 중요한 부분 중 하나이다. 일단 장력이 도입된 케이블은 시공이 진행되어감에 따라 수시로 구조계가 변화하여 복잡한 장력의 변화과정을 겪게 된다. 정확한 장력이 도입된 케이블이라 하더라도 여러 가지 오차 유발요인으로 인해 시공단계를 거치는 동안 목표치에 정확하게 일치시키기가 거의 불가능하다. 이러한 오차를 발생시키는 요인으로서는 부정확한 모델링, 작용하중, 사용재료 물리량의 편차, 단면의 치수, 계산의 오차, 장력의 손실, 시공단계의 미고려 등이 있다.
- 케이블 교량의 시공단계에서는 PSC 구조물과 마찬가지로 시공단계에서는 유압을 측정하여 긴장력을 계산할 수 있으며, 또한 아래의 그림과 같이 Lift-off 방법을 사용하여 도입된 긴장력을 검증할 수 있다. 최근에는 자기장 기반 비파괴 측정 기법을 적용하기도 하였다.



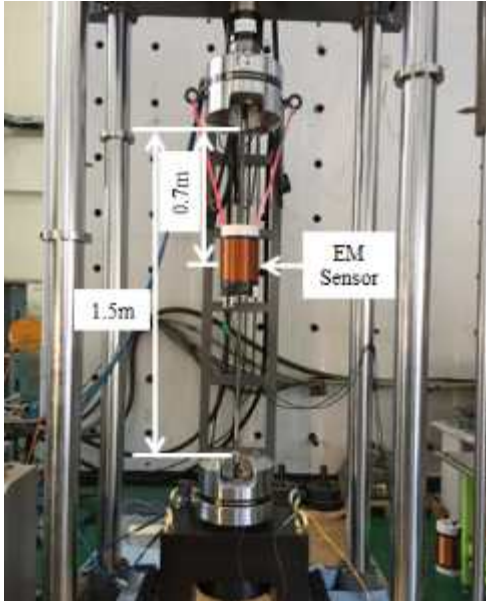
<그림 3.1-3> 케이블 교량의 Lift-off test 모습

나. FBG/EM 센서의 개별 검증 (Calibration) 실험

(1) MTS 및 소형 프레임 거더 실험 개요 및 방법

(가) 실험 개요

- 모든 계측 센서는 허용범위 이내의 오차를 보이도록 설계되고 있으며, 합리적인 절차로 교정해서 사용해야 하며, 센서가 사용될 환경에 대하여 예상된 성능을 보여주는지 검증하여야 한다.
- 본 연구에서는 동일한 조건에서 연구에 사용될 로드셀, FBG센서와 EM센서를 검증하고 교정하여 각각 센서의 정확도를 높이는 동시에, 센서간의 계측 일관성과 호환성 또한 검토하고자 하였다.
- 대형 MTS 재료 시험기로 각 센서들에 대한 성능 검증 및 교정을 수행하였으며, 소형 거더 시험체에서 1가닥, 3가닥, 7가닥 강연선을 사용하여 긴장력을 도입한 후, 긴장력 측정에 대한 검증 및 센서 적용성 평가를 수행하였다.
- 최종적으로 실험이 끝난 후에 7가닥 강연선을 정착하였고, 이후 긴장력을 모니터링하는 장기 계측 실험을 수행하여 장기 성능을 검증 하였다.



<그림 3.1-4> 대형 MTS 재료 시험기 실험



<그림 3.1-5> 소형 거더 실험

(나) FBG 센서를 이용한 긴장력 추정 기법 검증

- ☐ 대형 재료 시험기를 활용한 센서 검증 및 교정 실험 결과 기존대비 38% 증가한 변형률 최대 계측범위 0.9%를 달성하였다.
- ☐ 소형거더모델을 사용한 7가닥 실험 결과를 통해 변형률 최대 계측범위 0.7% 달성하였다.
- ☐ 센서 파단의 원인분석을 통해 스마트텐던의 내구성을 약 48% 향상시켰다.
- ☐ FBG 광섬유센서를 이용하여 탄성범위내에서는 오차율 5% 이내로 긴장력을 추정할 수 있었다.

(다) EM 센서를 이용한 긴장력 추정 기법 검증

- ☐ 대형 재료 시험기를 활용한 센서 검증 및 교정 실험 결과, EM 센서의 투자율은 긴장력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며 각 긴장력 단계에 따라 뚜렷히 구분될 수 있는 결과를 나타내었다.
- ☐ 소형 거더 모델을 통한 1가닥, 3가닥, 7가닥 실험 결과 모두 긴장력이 증가함에 따라 긴장력이 감소하는 경향을 나타내었으며 각 긴장력 단계에 따라 투자율 변화를 확연히 파악할 수 있었다.
- ☐ 개발된 긴장력 추정 알고리즘을 적용한 결과 회귀분석을 이용한 긴장력 추정 알고리즘은 약 15%의 오차를 가지고 있었으며 인공신경망을 이용하여 구축한 긴장력 추정 알고리즘은 오차율 5% 이내로 긴장력을 추정할 수 있다.
- ☐ 따라서 개발된 7가닥용 EM 센서 및 인공신경망을 이용한 긴장력 추정 알고리즘을 이용하여 PSC 거더의 긴장력을 합리적으로 추정이 가능함을 확인하였다.

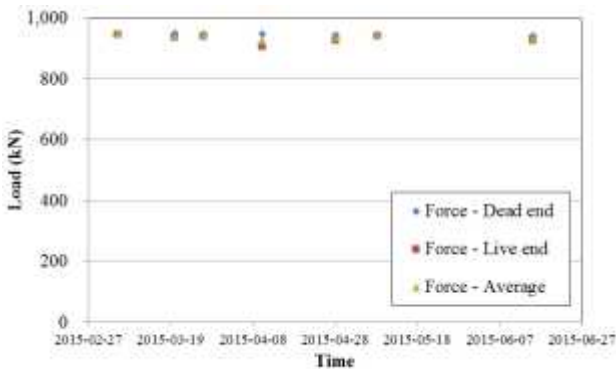
(2) 장기 계측 실험

(가) 실험 개요

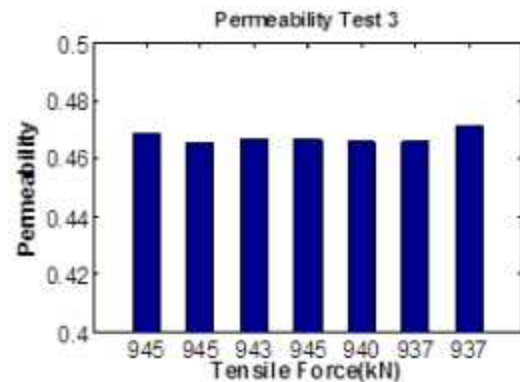
- 공용중의 PSC거더는 차량 하중 뿐만 아니라 매일 매일의 일교차와 계절의 변화, 그리고 우천을 직접 견뎌야 하는 조건에 있다. 따라서, 장기간 계측성능 및 내구성능에 대한 검토가 필수적이다. 이에, 2~3차년의 연구기간에 장기간의 내구 성능을 검토하는 연구계획을 수립하였다.
- 1차년도에서는 기존의 계획에는 없었지만, 소형 거더 실험에서 인장 실험이 끝난 후에 7가닥 강연선을 정착하였고, 이후 긴장력을 계속적으로 모니터링하는 장기 계측 실험을 수행하였다.

(나) 실험 결과

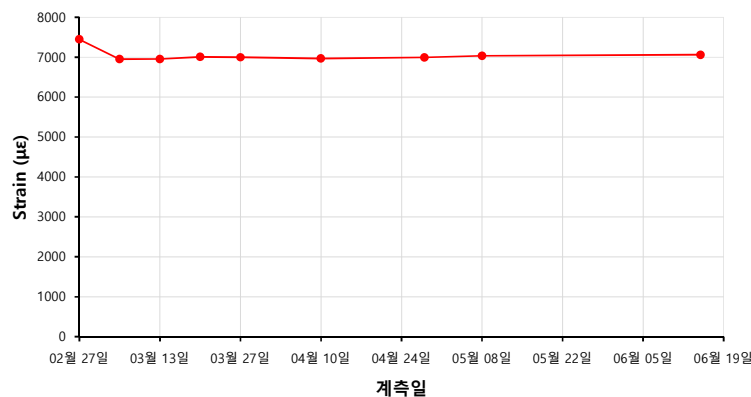
- 로드셀은 장기 계측 결과에 따르면 시간과 온도의 영향을 거의 받지 않는 안정적인 데이터를 얻을 수 있음을 확인하였다.
- FBG 센서와 EM 센서 역시 장기계측에서 안정적인 계측이 가능하였다.



(a) 로드셀 장기 계측



(b) EM센서 장기계측



(c) FBG 센서 장기 계측

<그림 3.1-6> 장기 계측 결과

<표 3.1-1> 실험 및 장기 계측 수행 일정

실험명	일정	내용
실험 준비 점검 회의	15.01.05	실험 준비 점검 회의
1차 실험	15.01.26	✓ MTS 실험 • MTS 로드셀을 기준으로 (인장하중) EM센서, FBG센서, 스트레인 게이지 교정 (압축하중) 실험용 로드셀 교정 ✓ Open frame에서 긴장 실험
2차실험-1일차	15.02.25	✓ MTS 실험 • MTS 로드셀을 기준으로 (인장하중) EM센서, FBG센서, 스트레인 게이지 교정 (압축하중) 실험용 로드셀 교정 ✓ Open frame에서 긴장 실험
2차실험-2일차	15.02.26	✓ Open frame에서 긴장 실험
1차 장기계측	15.03.06	✓ Open frame에서 긴장 실험
2차 장기계측	15.03.13	✓ Open frame에서 긴장 실험
3차 장기계측	15.03.20	✓ Open frame에서 긴장 실험
4차 장기계측	15.03.27	✓ Open frame에서 긴장 실험
5차 장기계측	15.04.10	✓ Open frame에서 긴장 실험
6차 장기계측	15.04.28	✓ Open frame에서 긴장 실험
7차 장기계측	15.05.08	✓ Open frame에서 긴장 실험
8차 장기계측	15.06.15	✓ Open frame에서 긴장 실험
9차 장기계측	15.07.09	✓ Open frame에서 긴장 실험
10차 장기계측	15.08.17	✓ Open frame에서 긴장 실험
11차 장기계측	15.09.23	✓ Open frame에서 긴장 실험
장기계측 해체	15.10.02	-



(a) 1차 장기계측



(b) 8차 장기계측

<그림 3.1-7> 장기 계측 모습

다. PSC 거더 부분 모델 실험

(1) 실험개요

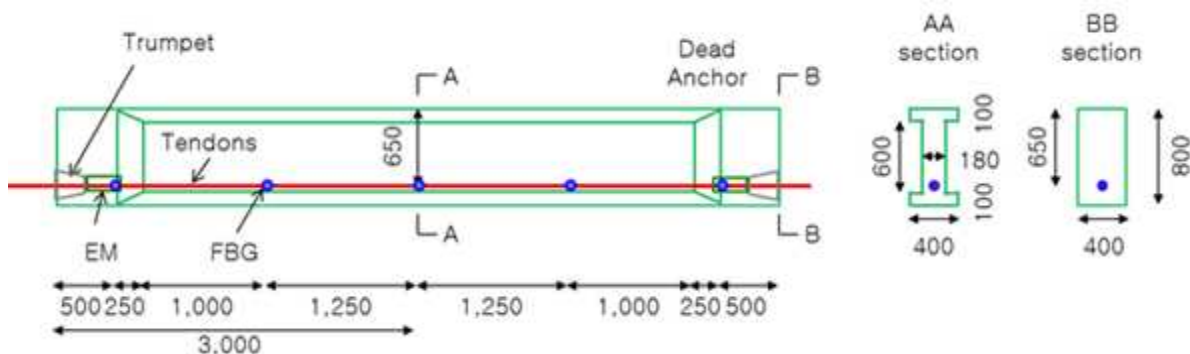
- PSC 거더 부분 모델 실험을 통한 FBG/EM 센서의 현장 적용성 평가
- FBG/EM 센서를 사용하여 긴장력 도입 시 마찰 손실에 따른 긴장력의 변화를 모니터링하고, 내하력 실험 시 손상도에 따른 텐던의 응력 변화 계측을 검증함

(2) 긴장력 계측을 위한 주요 계측 센서 및 장비

- 광섬유 FBG센서, EM센서, 중공로드셀, 자체제작 로드셀

(3) 시험체 규격 및 시험 변수

- 시험체 수량 및 규격 : 총 6개의 길이 6 m의 포스트텐션 거더 시험체 제작
- 시험 변수 : 텐던 배치(마찰 손실에 따른 텐던 변형을 및 응력 변화 계측) 및 복부 두께(콘크리트 피복 두께에 따른 영향 파악)



<그림 3.1-8> 부분모델 시험체 상세 및 센서 위치 - W18-1 시험체

(4) 프리스트레스 긴장 실험

- 콘크리트 타설 후 재령 27일에 포스트텐서닝을 통해 총 5~6단계를 거쳐 프리스트레스 도입
- 각 프리스트레스 도입 단계별, 긴장력 도입 및 정착 후 설치된 센서를 통하여 각 위치별로 긴장력 계측



(a) 강연선 긴장



(b) EM 센서 계측 장비

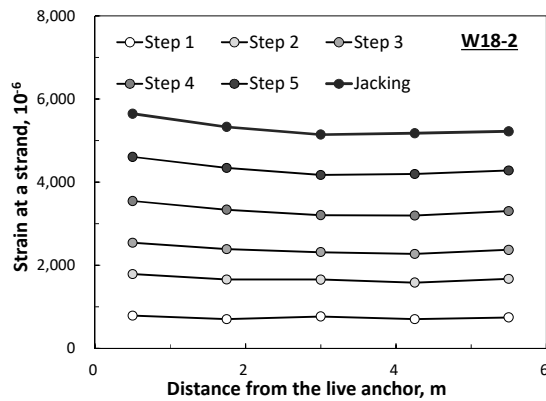


(c) FBG 계측 장비

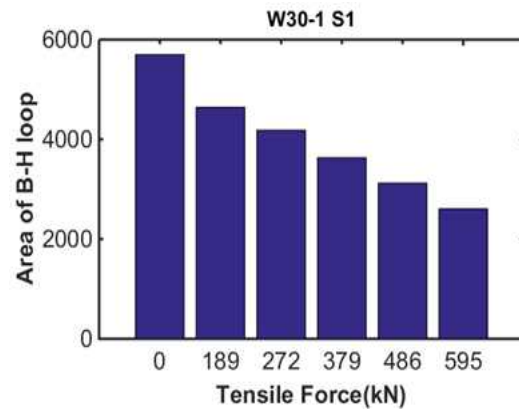
<그림 3.1-9> 강연선 긴장 및 주요 계측 장비

(가) 긴장 시 FBG 센서 계측 결과

- 긴장 시 긴장력 계측 결과 : FBG 및 EM 센서로부터 각 위치별에 따른 텐던의 변형률과 긴장력을 합리적으로 계측할 수 있는 것으로 나타났으며, 계측 결과로부터 마찰 손실 및 단부 슬립에 의한 텐던 긴장력의 영향이 확인되었음



(a) FBG 계측 결과 - W18-2



(b) EM 계측 결과 - W30-1

<그림 3.1-10> 긴장력 도입 단계별 강연선 변형률 및 응력 분포

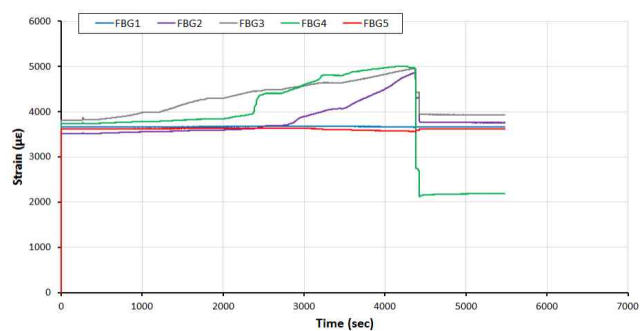
(5) 부분모델 시험체 내하력 실험

- 부분모델 시험체의 손상이 발생할 경우 EM 및 FBG 센서들을 통하여 모니터링이 가능한지 여부를 확인하기 위해 부분모델 시험체를 대상으로 내하력 실험을 수행하였다. 재하실험 시 순경간을 4.5 m로 설정하고 경간의 중앙부를 3점 재하 방식으로 가력하였음

- 균열이 발생함에 따라, 발생 위치 인근에서의 센서를 통하여 손상을 모니터링 할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 주요 지점에 FBG 센서 및 EM 센서를 매립할 경우 공용 중 발생가능한 부재의 손상 여부를 용이하게 확인할 수 있을 것으로 판단 됨



(a) 파괴 시 균열 양상



(b) 손상도에 따른 강연선 변형률 변화

<그림 3.1-11> 부분모델 시험체 내하력 실험 주요 결과 - W30-2

(6) 소결론

- PSC 거더 부분 모델 실험을 통해 EM 및 FBG 센서를 PSC 거더에 설치하여 현장 적용이 가능한 것을 확인하였으며, 계측 결과로부터 마찰 손실 및 부재 손상도 까지 모니터링 가능한 것으로 나타남

- 향후 PSC 거더에 이들 센서들을 적용 시 예측된 텐던의 응력 및 변형을 변화를 통해 거더의 손상 여부를 확인 가능할 것으로 판단됨

라. 실물 거더 실험

(1) 실험개요

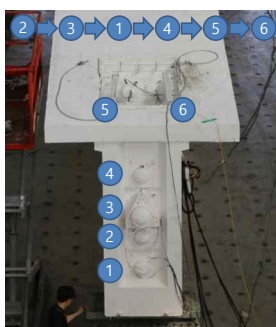
- 실물 크기의 PSC 거더에 대하여 개발된 FBG 센서와 EM 센서를 활용하여 시공단계부터 사용단계까지 긴장력의 관리와 손상 감지 등의 모니터링을 적절히 수행할 수 있는지에 대한 검증을 수행하였다. 실물 크기의 블록아웃 PSC 거더(50M C 거더) 1본을 제작하여 제작과정부터 긴장력에 대한 모니터링을 수행하였고, 정적 재하 실험을 통하여 손상이 가해진 경우에 대한 예측 성능 시험을 실시하였음

(2) 긴장력 관리형 블록아웃 PSC 실물거더 제작 및 긴장력 도입

- 생애주기 긴장력 관리형 블록아웃 PSC 실물 거더(50M C 거더) 1본을 제작함
- 시공단계인 강연선의 1차 및 2차 긴장 시 FBG/EM 센서를 통하여 긴장재의 변형률과 응력을 모니터링 하였음



(a) 실물 거더 제작 모습



(b) 텐던 긴장 순서



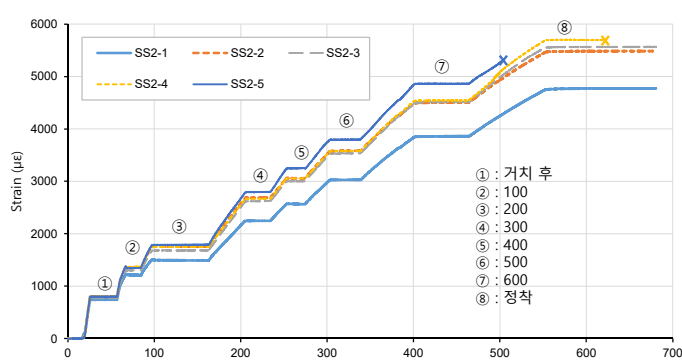
(c) 1차 긴장



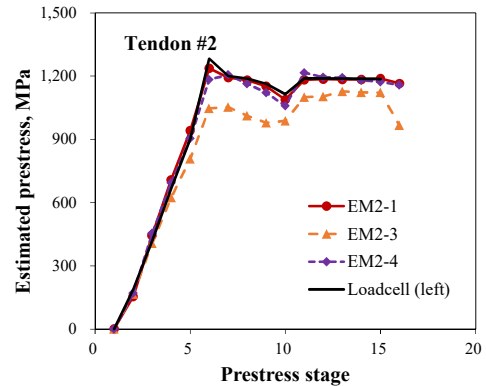
(d) 2차 긴장

<그림 3.1-12> 실물 거더 제작 및 텐던 긴장 모습

- 1차 및 2차 텐던 긴장 시 FBG/EM 센서의 측정값을 활용하여 위치별 텐던 응력 및 긴장력을 이론값 대비 오차율 4.2% 범위로 추정할 수 있었음



(a) FBG 계측 결과 - SS2



(b) EM 계측 결과 - 2번 텐던

<그림 3.1-13> 긴장력 도입 단계별 강연선 변형률 및 응력 분포

(3) 긴장력 관리형 블록아웃 PSS 실험물거더 내하력 실험

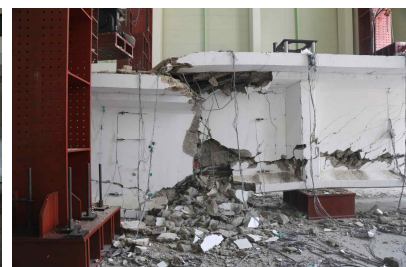
- ☐ 시공이 완료된 이후, 공용과정에서 발생하는 손상을 모사하기 위하여 정적 하중 재하 실험을 수행함
- ☐ 도로교설계기준(한계상태설계법)-2015에 제안된 트럭 하중을 고려하여, 유압가력장비 2대를 각각 단부로부터 20.5 m 이격된 지점에 설치하여, 4점 하중 재하 실험을 수행
- ☐ 1,500 ~ 2000 kN 가력 시 휨 균열이 발생하였으며, 3,681 kN에 도달했을 때 휨 파괴 발생



(a) 시험 모습



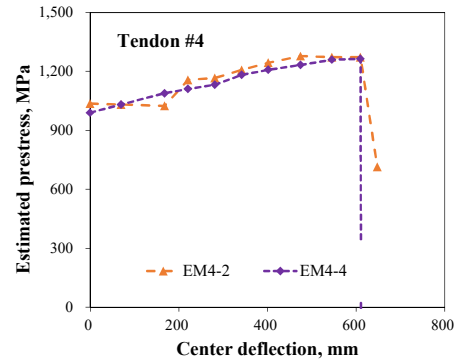
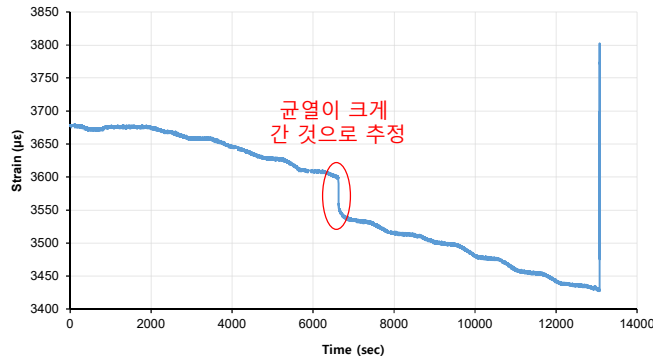
(b) 균열 양상



(c) 휨 파괴 전경

<그림 3.1-14> 실험물 거더 시험 전경 및 파괴 결과

- ☐ FBG 센서 계측 결과 : 하중 증가에 따라 텐던 변형률이 변화하는 것으로 나타났으며, 특정 하중 단계에서 텐던 변형률이 크게 변화하는 것을 통해 FBG 센서 인근에서 심각한 균열이 발생한 것을 추정 가능하였음
- ☐ EM 센서 계측 결과 : 실험물거더 중앙부 인근에 매립된 EM센서 계측 결과로부터, 휨 변형 및 부재 손상이 증가함에 따라 텐던 응력이 증가하는 것으로 나타남
- ☐ FBG/EM 센서 계측 결과 활하중에 대한 텐던 긴장력 변화량에 대해 이론값 대비 오차율 10% 범위로 측정할 수 있었음



(a) 하중 단계별 FBG 센서 계측 결과

(b) 하중 단계별 EM 센서 계측 결과

<그림 3.1-15> 내하력 실험 시 하중 단계별 텐던 변형률 및 응력 계측 결과

(4) 소결론

- ☐ PSC 실물 거더에 대한 1차 및 2차 긴장 실험 및 내하력 실험 결과, FBG/EM 센서를 통해 긴장 시 텐던 긴장력에 대해 4.2%, 사용하중 시 활하중에 의한 텐던 긴장력 변화율에 대해 10%의 오차로 텐던 긴장력을 추정 가능한 것으로 나타남
- ☐ 향후 FBG/EM 센서를 활용하여 프리스트레스 도입 및 공용 중 긴장재의 긴장력을 합리적으로 모니터링할 수 있는 것으로 나타남

마. 실제 현장 적용을 통한 현장 적용성 검증

- ☐ 최종적으로 실제 현장으로의 적용성을 검증하기 위하여 경남 밀양 “○○도로건설 사업 현장”에 건설 중인 25m 2경간의 실제 PSC 거더에 적용하여 현장 적용성을 검증하였다.

☐ 현장 정보

- ㉠ 위치 : 경남 밀양 “○○도로건설 사업 현장”
- ㉡ 시공교량 : 25m 2경간 PSC 거더 교
- ㉢ 거더수 : 1경간당 8개, 총 16개 거더



(a) 전체 현장

<그림 3.1-16> 경남 밀양 “○○도로건설 사업 현장”>



(b) EM 센서 설치



(c) 타설후 센서 매립 위치

<그림 3.1-16(계속)> 경남 밀양 “○○도로건설 사업 현장”>

- 센서는 각 경간의 최 외측 거더의 중앙부에 거더당 1개씩 매립되었으며(총 4개 거더 4개 센서) 센서 케이블은 거더 내부로 약 15m를 보호용 튜브를 이용하여 연결하였다.
- 긴장력은 각 거더별로 0, 100, 200, 300, 445 kgf/cm²을 도입한 후 정착을 실시하였으며 각 단계마다 EM 센서를 이용하여 자기이력 곡선을 3회씩 계측하였다.
- 긴장력 도입에 따른 자기이력곡선 계측 결과 기존 실험과 동일하게 긴장력이 증가함에 따라 자기이력곡선의 면적이 감소하는 것을 확인하였으며 이를 추출하여 실험을 통해 도출된 긴장력 추정식에 대입하여 긴장력을 추정하였다.
- 추정된 긴장력값과 유압기의 유압 및 설계 긴장력과 상호 비교 결과 긴장력 오차를 5% 이내로 긴장력 계측이 가능함을 확인하였다.
- 따라서 실제 현장에서도 매립형 EM 센서를 이용하여 자기이력곡선의 면적비를 계측함으로써 거더에 도입되는 긴장력을 오차율 5% 이내로 추정할 수 있음을 확인하였다.

바. 품질 및 유지관리 지침

(1) 개요

- PSC 교량의 최적 유지관리는 교량 손상을 사전에 예방하고 이미 발생한 부위는 조속히 보수함으로써 교량의 기능을 유지하는 것이다. 따라서 PSC 교량 긴장재의 긴장력에 대한 지속적인 점검과 사전 정비를 체계적으로 시행하여 교량이 노후화되는 속도를 지연시키고 발견된 손상은 초기에 대책을 강구하는 일상적인 예방유지관리 활동은 매우 중요하다. 또한 긴장력 저하에 따른 조치 및 기능 회복을 위한 보수/보강은 최단시간내 최대의 작업효과를 낼 수 있도록 철저한 작업계획과 관리가 필요하다.

(2) 목적

- 품질 및 유지관리 지침 매뉴얼(증빙 A-7-①)은 PSC 교량 유지관리 담당자들이 효율적으로 관련 업무를 수행할 수 있도록 관련 정보를 제공하는 참고용 안내서이다.
- 본 매뉴얼은 I형 PSC 거더 교량을 대상으로 하였으며 다른 형식의 PSC 교량에 대해서도 적절한 보정을 통하여 적용할 수 있을 것이다.

-
- 본 매뉴얼은 PSC 거더의 시공 시 센서의 설치 기법 및 도입 긴장력 관리, 공용 중 FBG 광섬유 센서 및 EM 센서를 이용한 긴장력 저하 모니터링에 대한 내용이다.

(3) 시공 중 긴장력 관리

- PSC 거더의 시공시 긴장재에 도입되는 긴장력을 관리하는 것은 PSC 거더의 목표 성능을 확보하는 것에 있어 매우 중요하다. 따라서 시공 중인 PSC 거더의 긴장력 도입시 설치된 스마트 텐던 및 매립형 EM 센서를 이용하여 긴장력을 모니터링하여 적절한 수준의 긴장력이 도입된 것을 확인하고 관리하여야 한다.
- 거더에 긴장력을 도입시 최소 2단계 이상으로 나누어 긴장력을 도입하고 각 단계마다 설치된 FBG 광섬유 센서 및 EM 센서를 이용하여 긴장력을 추정하여야 한다. 또한 사전에 계획된 최종 도입 긴장력만큼 유압잭을 인장하여 고정된 후 FBG 광섬유 센서 및 EM 센서 계측을 실시하고 정착손실분을 감안하여 설계 긴장력과 일치하도록 긴장력을 조정한다. 긴장재의 정착 완료 후 다시 한번 FBG 광섬유 센서 및 EM 센서를 이용하여 긴장력을 계측하여 계측된 값과 설계 긴장력과의 차이를 확인한다. 특히, FBG 광섬유 센서는 긴장완료 후 지속적인 긴장력 모니터링을 위하여 단부보호장치를 이용하여 보호 한다.

(4) 공용 중 긴장력 관리

- PSC 거더의 시공 완료 후 정기점검을 통해 PS 긴장재의 긴장력을 모니터링 하여야 한다.
- 정기점검은 순찰과 유사한 성격의 점검으로 공용중인 PSC 교량의 긴장력 상태 파악을 위해 정기적으로 실시하는 점검을 말한다.
- ① 대상교량 : 스마트 텐던 및 매립형 EM 센서가 설치된 모든 교량
- ② 점검주기 : 반기에 1회 이상
- ③ 점검장비 :
 - ㉠ FBG 광섬유 센서 : 관련 계측 장비 (Interrogator)
 - ㉡ EM 센서 : 관련 계측 장비 (Power Integrator 및 Controller)
- 정기점검은 긴장재의 긴장력 상태변화를 모니터링하여 손상을 조기에 발견하기 위함이며, 정밀 조사가 필요한 부재를 파악하기 위함이다. 반복계측횟수를 5회 미만으로 하며, 기존 모니터링 이력과 비교하여 긴장력 손실을 확인한다.
- 정기점검을 실시한 점검자는 지체없이 그 실시결과를 관리주체에게 통보하여야 하며 정기 모니터링 결과는 정기점검결과표에 계측 시간, 계측 시 추정된 긴장력을 기입하고 계측 결과 데이터를 DB에 업데이트하여야 한다.
- 정기점검시 이상이 발생한 교량은 관리주체에게 통보하여 정밀점검을 통해 긴장력 저하가 발생한 원인을 파악하고 필요시 보수/보강에 착수하도록 하여야 한다.

(5) 검측 체크리스트

- ① 스마트 텐던(FBG 광섬유 센서)
 - ㉠ 거더 연장에 따른 FBG 센서의 위치 및 개수를 결정하였는가.
 - ㉡ 거더 제작과정을 고려하여 스마트 텐더의 길이를 결정하였는가.

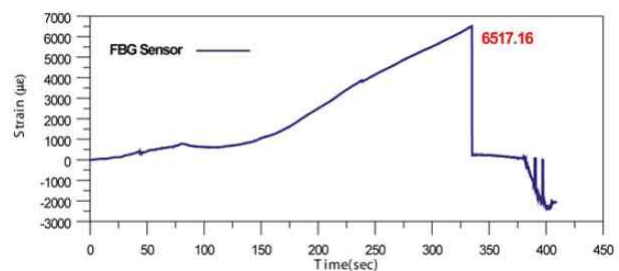
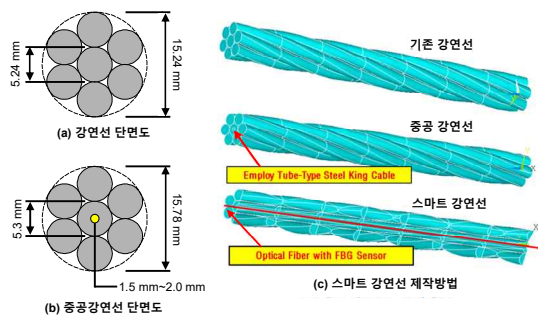
- ㉔ FBG 센서는 도면과 동일한 위치에 설치되었는가.
 - ㉕ FBG 센서의 파장 변화를 확인하였는가(FBG 센서 보호 후, 스마트 텐던 제작 후).
 - ㉖ 단부 보호장치를 이용하여 FBG 센서 단부 보호가 잘 되었는가.
 - ㉗ 스마트 텐던의 이동 후 FBG 센서를 확인하였는가.
 - ㉘ 긴장력 도입 전 무응력 상태의 FBG 센서의 파장값을 확인하였는가.
 - ㉙ 긴장력 도입 전 온도를 체크 하였는가.
 - ㉚ 설계 긴장력과 FBG 센서 계측값이 허용오차안에서 측정되는가.(5% 이내)
 - ㉛ 최종 계측값과 정착후 계측값의 차이는 확인하였는가.
- ② 매립형 EM 센서(EM 센서)
- ㉔ 거더 연장에 따른 EM센서의 설치위치 및 설치개수를 결정하였는가.
 - ㉕ 거더 제작과정을 고려하여 EM센서의 설치작업 시기를 결정하였는가.
 - ㉖ EM센서는 도면과 동일한 위치에 설치되었는가.
 - ㉗ EM센서의 상태를 확인하였는가.
 - 권선 상태
 - 케이블 연결부
 - ㉘ EM센서와 쉬스관의 연결부위는 수밀한가.
 - ㉙ 단자함 연결부에 대한 안전성을 확보하였는가.
 - ㉚ 긴장력 도입전 무응력 상태의 EM센서 계측값을 확인하였는가.
 - ㉛ 긴장력 도입시 단계적으로 EM센서의 계측이 이루어지는가.
 - ㉜ 설계 긴장력과 EM센서 계측값이 허용오차안에서 측정되는가.(5% 이내)
 - ㉝ 최종 계측값과 정착후 계측값의 차이는 확인하였는가.

2. FBG 광섬유 센서를 이용한 긴장재 성능 관리 시스템

가. PS 긴장재의 긴장력 계측 기술 문헌조사

(1) 기존 기술의 국/내외 논문 및 자료 조사

- ☐ FBG 센서를 도입한 7연 강연선(스마트 텐던) 제안 및 최대 계측 변형률 0.65% 달성.



<그림 3.2-1> 스마트 텐던의 개념도 제안

<그림 3.2-2> 스마트 텐던에 대한 인장시험 결과
(최대 계측 변형률 0.65%)

나. FBG 센서 내장 스마트 텐던 내구성 개선

(1) 스마트 텐던 변형률 계측 범위 개선

□ FBG 센서 자체의 재코팅 방법이 개선된 FBG 센서 선택: Acrylate 재코팅→Polyimide 재코팅

□ 킹 와이어의 내구성 개선을 위한 스테인레스 무계목(seamless) 강제 튜브 제작: 용접관 인발 강제튜브→무계목 스테인리스 강제 튜브

□ 킹 와이어 내부에서 FBG 센서 보호방법 제안: 스마트 텐던 킹와이어 내부 Resin의 미세균열 전파로 FBG 센서의 파단에 대한 보호 대책으로 Plastic 튜브를 이용하여 FBG 센서 보호하는 방법을 제안. 두 가지 Plastic 튜브와 두 가지 킹와이어 제원에 대한 실험을 통해 외경 5.3mm, 내경 1.9mm 인 스테인리스 킹와이어와 Polyimide 튜브의 조합이 가장 효과적인 것으로 결론을 도출.

① 스마트 텐던의 최대 계측 변형률 범위를 0.65%에서 1.73%로 향상

② 스마트 텐던의 긴장력 추정 오차 범위를 5% 이내로 달성

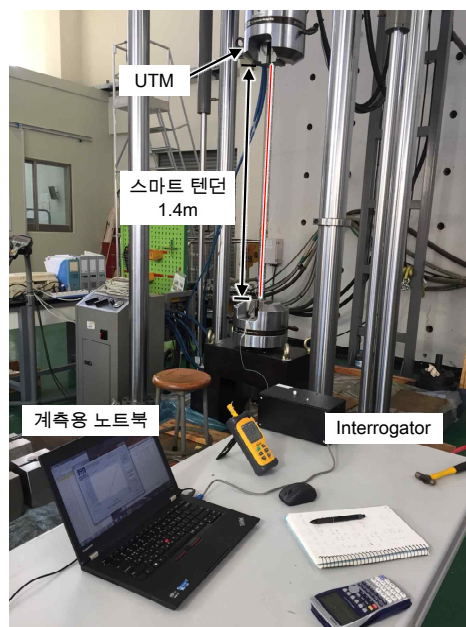
③ 성과물: 논문게재 1건, 특허출원 3건, 특허등록 2건

㉠ SCI급 논문 게재: Enhanced strain measurement range of an FBG sensor embedded in seven-wire steel strands (증빙 B-2-①-다)

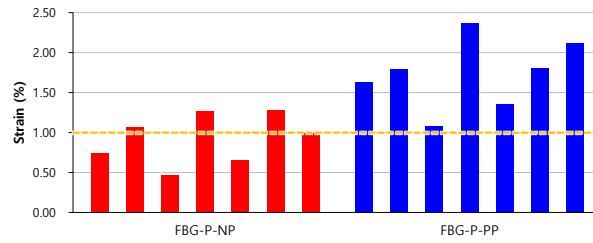
㉡ 특허 출원/등록: 광섬유센서 내장형 복합 강연선 (증빙 B-2-①-가)

㉢ 특허 출원/등록: 광섬유 센서를 가진 복합강연선 및 이의 제조방법 (증빙 B-2-①-나)

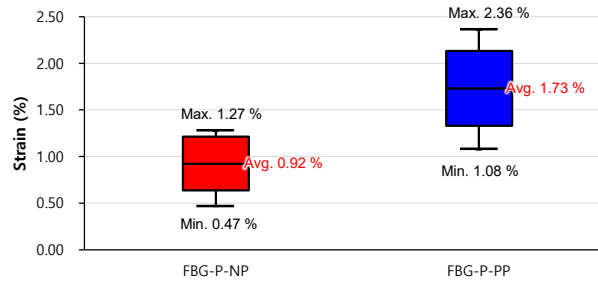
㉣ 특허 출원: 복합강연선용 광섬유센서유닛과 광섬유센서유닛의 제조방법 및 이를 이용한 복합강연선 (증빙 B-2-①-라)



<그림 3.2-3> FBG 센서가 보호된 스마트 텐던의 실내 인장실험 Set-up

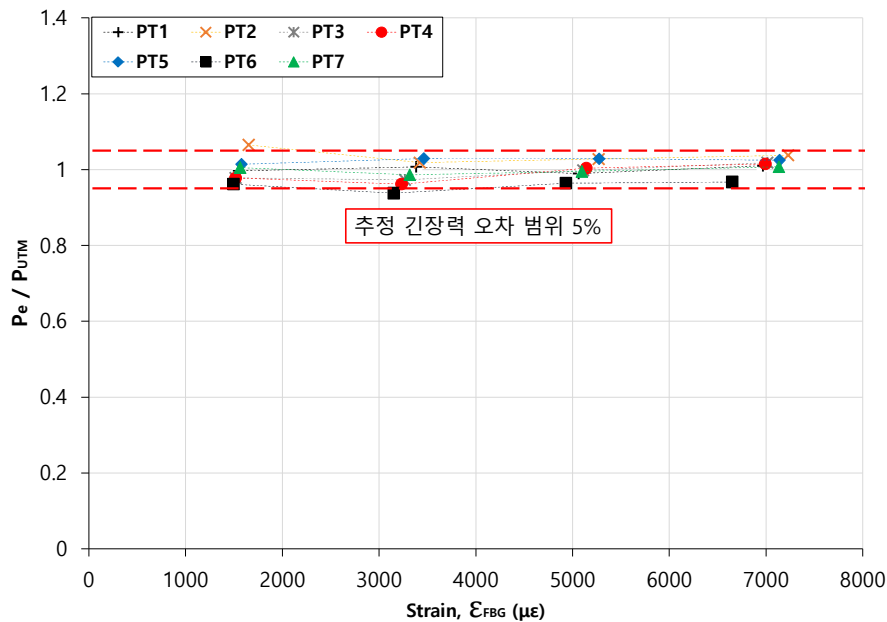


(a) FBG 센서의 보호유무에 따른 스마트 텐던의 최대 계측 변형률



(b) FBG 센서의 보호유무에 따른 스마트 텐던의 최대 계측 변형률 분포

<그림 3.2-4> 제안된 FBG 센서의 보호방법의 실험적 검증



<그림 3.2-5> FBG 센서 변형률로 계산한 긴장력과 UTM 계측 긴장력 비교

(2) FBG 센서 부착강도 개선

- 스마트 텐던 제작 시 사용되는 Epoxy resin을 부착강도가 높은 제품으로 교체: 부착강도 6.0MPa→부착강도 13.8MPa

① 성과물: 보고서 1건

㉔ 실험보고서: 증빙 B-2-②

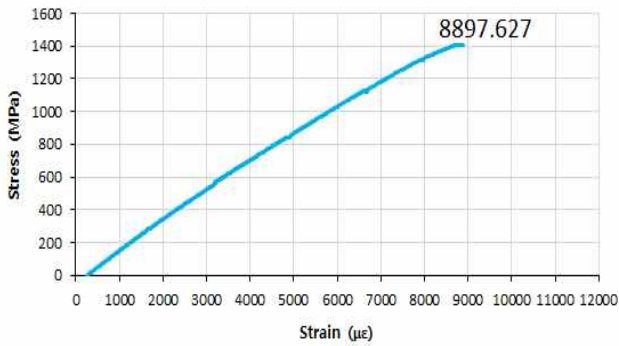


(a) Type A (기존 연구)

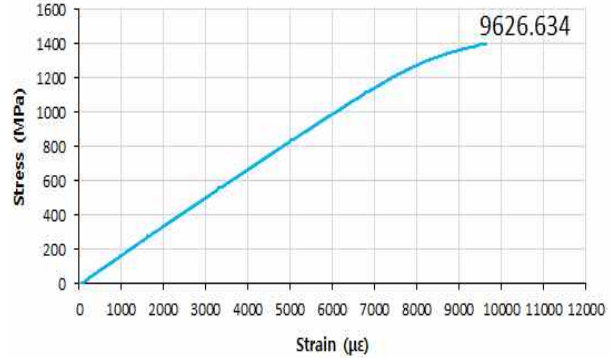


(b) Type B (본 연구)

<그림 3.2-6> 부착강도가 다른 두 종류의 Epoxy resin



(a) Type A (기존 연구)



(b) Type B (본 연구)

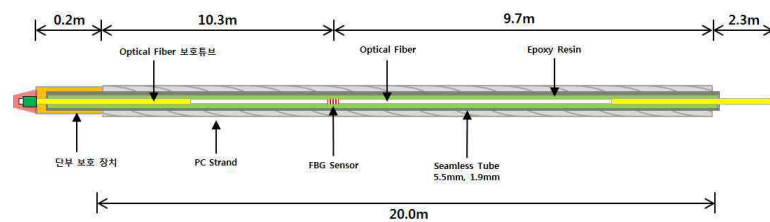
<그림 3.2-7> Epoxy resin의 종류에 따른 최대 계측 범위

(3) 성능개선 스마트 텐던 시작품 제작 (길이 20m의 스마트 텐던 제작)

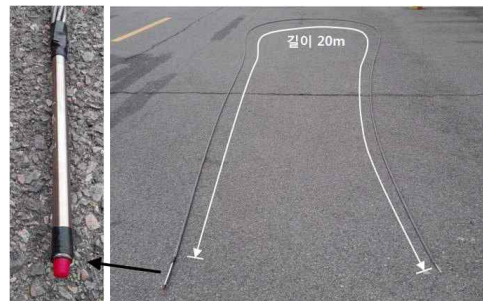
□ 실내실험을 통하여 내구성을 개선시킨 스마트 텐던의 현장 적용성을 확인하기 위해 길이 20m인 스마트텐던 시작품을 그림 3.19와 같이 제작

① 성과물: 보고서 1건

㉔ 시작품 제작 보고서: 증빙 B-2-③



(a) 성능개선 스마트 텐던 FBG 센서 위치 및 모식도



(b) 성능개선 스마트 텐던

<그림 3.2-8> 성능개선 스마트 텐던 20m 시작품 제작

다. 거더 시작품에 스마트 텐던 적용

(1) 성능개선 스마트 텐던 시작품 제작 (길이 30m의 스마트 텐던 제작)

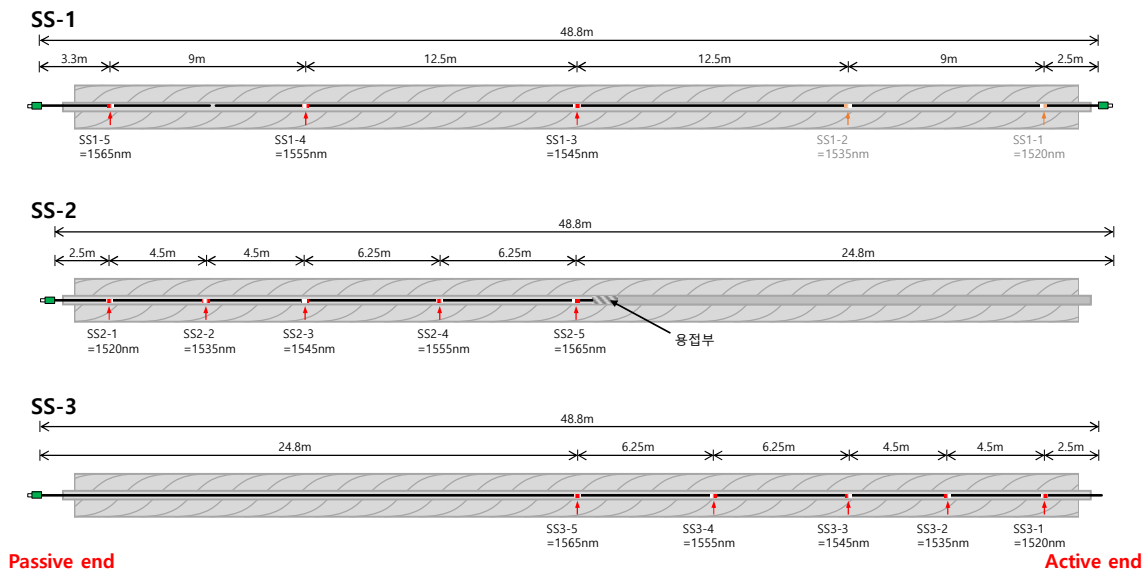
□ 길이 50m 실규모 PSC 거더의 재하시험에 적용을 위한 스마트 텐던 시작품 제작

① 성과물: 논문게재 1건, 특허출원 1건, 보고서 1건

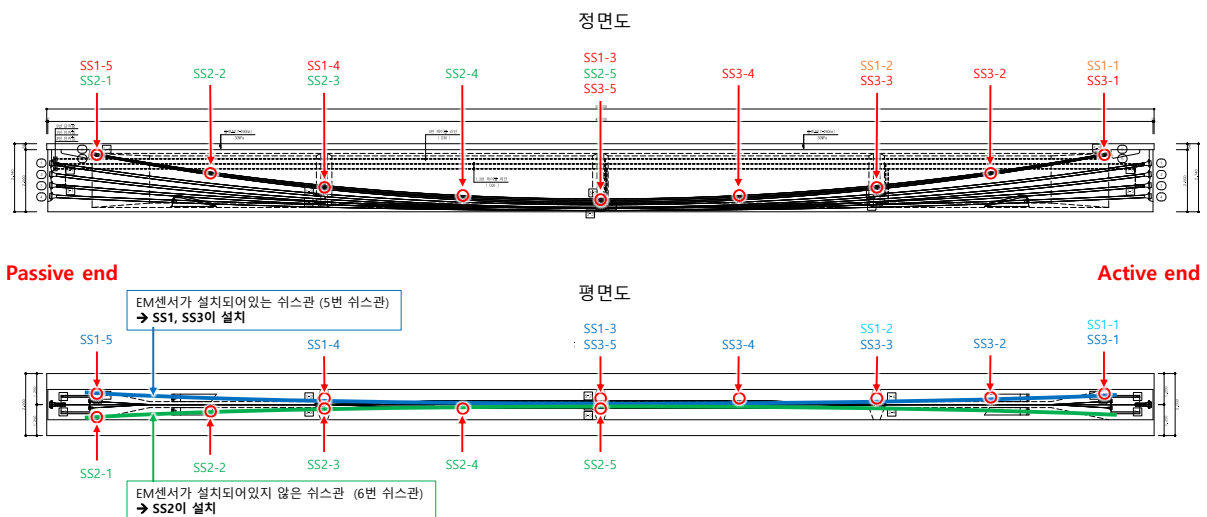
㉔ 비 SCI급 논문게재: FBG 광섬유 센서가 내장된 7연 강연선을 이용한 포스트텐션 UHPC 교량의 긴장력 장기모니터링 (증빙 B-3-①-나)

㉔ 특허 출원: 튜브 내 광섬유센서 장착을 위한 고착제 주입장치 및 이를 이용한 튜브 내 광섬유센서를 장착하는 방법 및 이에 사용되는 광섬유센서 (증빙 B-3-①-가)

㉔ 시작품 제작 보고서: 증빙 B-3-①-다

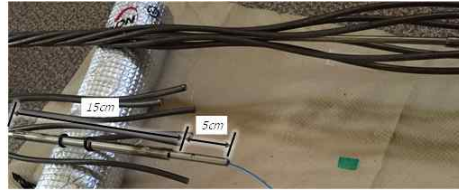


(a) 성능개선 50m 스마트 텐던 FBG 센서 위치

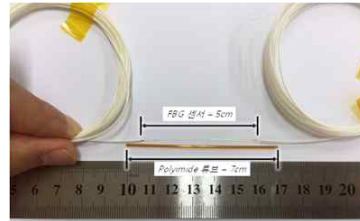


(b) PSC 거더의 FBG 센서 배치도

<그림 3.2-9> 50m 실크기 PSC 거더에 적용한 스마트 텐던 모식도



(a) 중공강연선 제작



(b) FBG 센서 제작



(c) 중공강연선과 FBG 센서의 일체화



(d) 스마트 텐던의 단부보호

<그림 3.2-10> 성능개선 50m 스마트 텐던의 제작과정

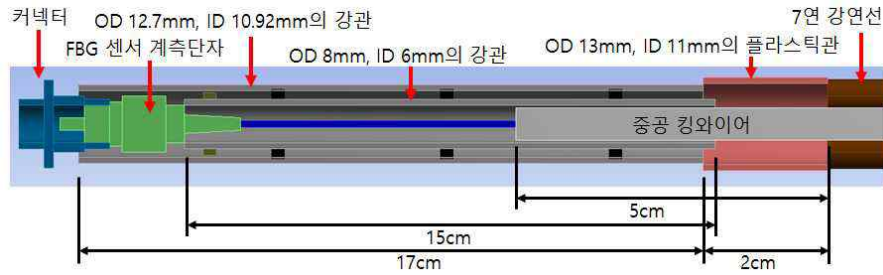
(2) 스마트 텐던 단부 보호장치 개선

□ 긴장 과정 중 및 긴장 완료 후 단부보호장치 - 긴장장치가 통과하는 외경의 steel 강관으로 보호된 단부보호장치 개선안 설계

① 성과물: 논문게재 1건, 특허출원 1건, 특허등록 1건

㉞ SCI급 논문 게재: Measurement of prestressing force in pretensioned UHPC deck using a fiber optic FBG sensor embedded in a 7-wire strand (중방 B-3-②-나)

㉟ 특허 출원/등록: 광섬유센서 중공나선이 구비되어 콘크리트 부착부 변형률 측정이 용이한 7연선과 이의 제조방법 (중방 B-3-②-가)



<그림 3.2-11> 단부보호장치 개념도

라. C-거더에 스마트 텐던 적용 가이드라인 개발

(1) 스마트 텐던 단부 보호장치 제작

- 긴장 과정 중 단부보호장치 - 긴장장치가 통과하는 외경의 steel 강관으로 단부보호
- 긴장 완료 후 단부보호장치 - 긴장 완료 후 스마트 텐던의 단부를 절단하고 steel 주름관을 이용하여 단부 보호.

① 성과물: 보고서 1건

- ㉠ 단부 보호장치 제작보고서: 증빙 B-4-①



<그림 3.2-12> 긴장 완료 후 단부보호장치

(2) 스마트 텐던의 품질관리 가이드라인 개발

- 최대 변형률 계측 범위를 1%로 개선하였고, 긴장력 예측을 위하여 작용하는 하중과 비교한 정확도도 5%로 개선. 정확도와 내구성을 포함한 스마트강연선을 제작하기 위하여 품질관리 가이드라인을 작성

① 스마트 텐던의 품질관리 가이드라인 목차

- ㉠ 중공강연선 제작
- ㉡ 중공강연선 세척
- ㉢ FBG 센서의 주문 및 제작
- ㉣ 중공강연선과 FBG 센서의 일체화
- ㉤ 스마트강연선 보호

② 성과물: 보고서 1건

- ㉠ 품질관리 가이드라인: 증빙 B-4-② 참조

(3) 스마트 텐던의 유지관리 가이드라인 개발

- 스마트강연선의 재료 및 제작, 측정장비, 인장실험 시, 장기모니터링에 대한 유지관

리가 필요하며 이를 위해 가이드라인을 작성

- ① 스마트 텐던의 유지관리 가이드라인 목차
 - ㉔ 측정장비 소개 및 계측 시 고려사항
 - ㉕ 재료 및 제작 고려사항
 - ㉖ 인장실험 시 고려사항
 - ㉗ 장기모니터링 고려사항
- ② 성과물: 보고서 1건
 - ㉔ 유지관리 가이드라인: 중빙 B-4-③ 참조

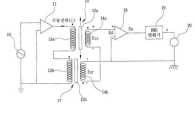
3. EM 센서를 이용한 긴장재 모니터링 센서 및 알고리즘 개발

가. EM 센서를 이용한 장력 계측 센서의 장단점 비교

□ EM 센서를 이용한 장력 계측 센서는 (주)에이팩스 솔루션, (주)브리텍, 한국건설기술연구원, 한국표준과학연구원 등의 사례가 있으며 각 센서에 대한 특징은 <표 3.3-1>에 정리하였다.

<표 3.3-1> EM 센서를 이용한 장력 계측 센서의 장단점

구분	연구내용	특징	단점	비고
에이팩스 솔루션	EM 센서를 이용한 장력계측시스템	현수교, 사장교 등 케이블 교량의 장력 측정이 가능함	현장에서 케이블 시편에 직접 권선해야 함 외부에 노출된 케이블에 대해서만 계측이 가능함	
브리텍	EM 센서를 이용한 장력계측시스템	현수교, 사장교 등 케이블 교량의 장력 측정이 가능함 현수교 주케이블에 대한 장력 계측이 가능함 현장 권선이 용이하도록 권선 장치를 개발함	현장에서 케이블 시편에 직접 권선해야 함 외부에 노출된 케이블에 대해서만 계측이 가능함	
한국건설 기술연구원	EM센서가 장착된 유압기	PSC 구조물의 시공 시 도입 긴장력 측정이 가능함 하나의 장비로 여러 구조물의 긴장력 계측이 가능함 긴장재 각각의	시공 시에만 계측이 가능하며 긴장력 도입 완료 후부터는 긴장력 측정이 불가능함 정착단에 도입된 긴장력만 측정이 가능함	

구분	연구내용	특징	단점	비고
		긴장력 분포를 계측 가능함		
한국표준 과학연구원	자동보상형 EM방식의 장력측정기법	온도, 습도, 지지물의 노화 등 주위의 환경변화를 자동으로 보상하여 주위 환경에 관계없이 장력변화를 측정할 수 있음	외부에 노출된 케이블에 대한 장력만 계측이 가능함	
본 연구팀	매립형 EM 센서를 이용한 긴장력 계측 기법	PSC 거더 내부에 매립이 가능한 EM 센서 도입 정착단 뿐만 아니라 쉬스관 이 설치된 어디서든 긴장력 측정이 가능함 시공시 뿐만 아니라 공용시에도 긴장력 측정이 가능함	EM 센서가 매립된 신규 PSC 교량에만 적용이 가능함(기존 교량에 적용이 불가능함)	

나. EM 센서 시작품 성능 평가 및 적용성 검증

- PSC 거더의 긴장력 계측을 위하여 PSC 거더 내부에 매립이 가능한 EM 센서 시작품을 제작하였다. 센서의 한쪽 끝단은 정착구 내부 구멍으로 삽입되기 위하여 사선 가공을 하고 나머지 한 끝단은 쉬스관과의 연결을 위하여 나사선 가공을 하여 쉬스관-정착구 사이에서 조인트 형태로 설치가 가능하다.



(a) EM 센서 시작품



(b) EM 센서 시작품 설치도

<그림 3.3-1> EM 센서 시작품

- 실험실 단계에서 실시한 1가닥, 3가닥, 7가닥의 긴장재에 대한 실험 계측값을 이용하여 긴장력 추정용 인공신경망을 학습시키고 학습된 인공신경망을 검증한 결과 실험실 단계의 긴장력을 오차율 5% 이내로 추정할 수 있음을 확인하였다.
- 또한 학습된 인공신경망을 이용하여 7가닥이 거치된 실험체에서 수행된 장기 거동 계측 실험을 검증한 결과 긴장력 오차율 5% 이내로 긴장력을 추정할 수 있음을 확인하였다.
- 긴장력에 따른 자기이력곡선의 면적 변화를 이용하여 긴장력을 추정하기 위하여 회귀분석 기법을 적용하여 긴장력 추정 알고리즘을 구축하였다. 자기이력곡선의 면적은 긴장력 변화에 따라 선형적으로 변화하는 것을 확인하였으므로 이를 이용하여 선형회귀분석을 실시하여 EM 센서의 계측값으로부터 긴장력 추정이 가능한 긴장력 추정식을 도출하였다.
- 도출된 긴장력 추정식을 이용하여 실물 거더실험 및 실제 시공 현장에서 적용한 결과 5%이내의 오차 범위 내에서 긴장력을 추정할 수 있음을 확인하였다.

라. EM 센서를 이용한 PSC 거더 긴장력 손실량 모니터링 기법의 적용성 검증

- 실제 PSC 거더에 매립이 가능한 매립형 EM 센서 시제품을 제작하였다. 매립형 EM 센서 시제품은 기존의 시제품이 한 끝단만 쉬스관과의 연결이 가능한 나사선을 형성한 것과 달리 양 끝단에 쉬스관과 연결이 가능한 나사선을 형성하였다. 이를 통해 기존 시제품이 정착부에만 설치가 가능한 것과 달리 시제품은 쉬스관이 설치된 모든 구간에 설치가 가능한 장점이 있었다.



(a) 코일과 동축케이블의 연결



(b) PVC 케이싱 완료 후

<그림 3.5-3> 매립형 EM 센서

- 개발된 매립형 EM 센서를 이용한 긴장력 추정 기법의 현장 적용성을 검증하기 위하여 소형 PSC 거더 모델 실험, 실거더 실험 및 현장 적용 실험을 실시하였다.
- 우선, 매립형 EM 센서의 적용가능성을 검증하기 위하여 6m 경간의 소형 PSC 거더를 제작하였고, 개발된 매립형 EM 센서를 양단부 및 최대편심부에 설치하여 긴장력 변화에 따라 자기이력곡선의 변화를 계측하였다.

- ☐ 계측 결과 긴장력이 증가함에 따라 자기이력곡선의 면적이 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며 이를 정량화 하기 위하여 자기이력곡선의 면적비를 지표(index)로 계산하여 긴장력과의 상관관계를 분석하였다.
- ☐ 자기이력곡선의 면적비는 긴장력과 선형적인 관계를 가지고 있는 것을 확인할 수 있었으며 이를 이용하여 긴장력 추정식을 도출할 수 있었다.
- ☐ 실제 시공되는 PSC 거더에 대한 EM 센서의 적용 가능성을 검증하기 위하여 EM 센서를 매립하여 50m 경간의 실물 거더 실험체를 제작하였고, 시공 과정과 공용 중 조건에 대한 긴장력 측정을 검증하였다.
- ☐ 50m 거더에서도 소형 거더 실험체와 동일하게 긴장력 증가에 따라 자기이력곡선의 면적비가 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통하여 개발된 콘크리트 매립형 EM 센서를 실물 크기의 PSC 거더에 적용 가능함을 확인하였다.
- ☐ 최종적으로 실제 PSC 교량을 시공하는 현장에서 개발된 콘크리트 매립형 EM 센서를 검증하였다. 경남 밀양에 건설되는 지간 25 m 경간의 PSC 교량에 대하여 현장 적용 검증 실험을 수행하였다.
- ☐ 긴장력 도입에 따라 발생하는 자기이력곡선의 변화를 계측하였으며, 계측 결과 실제 현장에서도 매립형 EM 센서를 이용하여 자기이력곡선의 면적비를 계측할 수 있었고, 거더에 도입되는 긴장력을 오차율 5% 이내로 추정할 수 있음을 확인하였다.

마. 품질 및 유지관리 지침

- ☐ PSC 교량 유지관리 담당자들이 매립형 EM 센서를 이용한 긴장력 모니터링 기법을 효율적으로 업무에 적용할 수 있도록 EM 센서를 이용한 긴장력 관리 매뉴얼을 작성하였다.
- ☐ 매뉴얼은 매립형 EM 센서의 제작부터 PSC 거더의 시공 시 센서 설치 기법 및 도입 긴장력 관리, 공용중 EM 센서를 이용한 긴장력 저하 모니터링에 관한 내용을 기술하였다.
- ☐ 우선, EM 센서가 설치되는 교량의 환경과 조건에 따라 EM 센서를 주문 제작한다.
- ☐ 제작된 매립형 EM 센서는 시공하는 교량의 쉬스관의 정해진 위치에 설치하여 양 끝단을 쉬스관과 일체화 시킨다. 설치 후 계측용 케이블을 단자함 위치까지 연장하고 콘크리트를 타설한다.
- ☐ 콘크리트의 양생이 완료 된 후 긴장력 계측 프로세스에 따라 긴장력을 계측한다. 이때 계측용 장비는 매뉴얼에 기재된 것과 동등 이상의 스펙을 가진 계측기 및 계측 프로그램을 이용하여야 본 매뉴얼에서 제시한 추정 기법을 적용할 수 있다.
- ☐ 시공 중 긴장력 모니터링을 통하여 PSC 거더에 도입되는 긴장력을 설계 긴장력과 비교하여 관리할 수 있다.
- ☐ 매립형 EM 센서가 설치된 교량에 대하여 반기에 1회 이상의 계측관리를 통해 공용 중 긴장력 관리를 수행한다. 계측시 매뉴얼에 제시한 EM 센서 계측 점검표를 이용하여 계측 및 긴장력 관리를 실시한다.

4. 결론

가. FBG 및 EM 센서 내장형 생애주기 긴장력 관리형 거더 시스템

(1) FBG/EM 센서의 개별 검증 및 교정 실험을 통한 거더 시스템

(가) 대형 재료시험기(MTS) 및 소형 프레임 거더 실험

① FBG 센서를 이용한 긴장력 추정 기법 검증

- ☐ MTS 실험 결과 기존대비 38% 증가한 변형률 최대 계측범위 0.9%를 개선하여 1차년도 연구 성과목표(변형률 계측범위 0.9%)를 달성하였다.
- ☐ 소형거더모델을 통한 실험 결과를 통해 7가닥 강연선에 대하여 변형률 최대 계측범위 0.7% 달성하였다.
- ☐ 센서파단의 원인분석을 통해 스마트텐던의 내구성을 약 48% 향상시켰다.
- ☐ FBG 광섬유센서를 이용한 긴장력 추정은 탄성범위내에서는 오차율 5% 이내로 긴장력을 추정하여 연구 성과목표(오차율 5% 이내)를 달성하였다.

② EM 센서를 이용한 긴장력 추정 기법 검증

- ☐ MTS 실험 결과 투자율은 긴장력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며 각 긴장력 단계에 따라 뚜렷히 구분될 수 있는 결과를 나타내었다.
- ☐ 소형 거더 모델을 통하여 1가닥, 3가닥, 7가닥 강선에 대한 실험 결과 모두 긴장력이 증가함에 따라 투자율이 감소하는 경향을 나타내었으며 각 긴장력 단계에 따라 투자율 변화를 확연히 파악할 수 있었다.
- ☐ 개발된 긴장력 추정 알고리즘을 적용한 결과 회귀분석을 이용한 긴장력 추정 알고리즘은 약 15%의 오차를 가지고 있었으며 인공지능망을 이용하여 구축한 긴장력 추정 알고리즘은 오차율 5% 이내로 긴장력을 추정하여 연구 성과목표(오차율 5% 이내)를 달성하였다.
- ☐ 따라서 개발된 7가닥용 EM 센서 및 인공지능망을 이용한 긴장력 추정 알고리즘을 이용하여 PSC 거더의 긴장력 추정이 가능함을 확인하였다.

(나) 장기계측실험

- ☐ 로드셀은 장기 계측 결과에 따르면 시간과 온도의 영향을 거의 받지 않는 안정적인 데이터를 얻을 수 있음을 확인하였다.
- ☐ FBG 센서와 EM 센서 역시 장기계측에서 안정적인 사용이 가능하였다.

(2) PSC 거더 부분 모델 실험을 통한 센서 및 거더 시스템 검증

- ☐ PSC 거더 부분 모델 실험을 통해 EM 및 FBG 센서의 현장 적용이 가능한 것을 확인하였으며, 계측 결과로부터 마찰 손실 및 부재 손상도까지 산정 가능한 것으로 나타났다.
- ☐ 향후 실거더에 이들 센서들을 적용 시 계측된 텐던의 응력 및 변형률 변화를 통해 거더의 손상 여부를 확인 가능할 것으로 검증하였다.

(3) 실물 거더 실험을 통한 센서 및 거더 시스템 검증

- ☐ PSC 실물 거더에 대한 1차 및 2차 긴장 실험 및 내하력 실험 결과, FBG/EM 센서를 통해 시공 중 텐던의 긴장력을 4.2 % 오차범위 내에서 추정하였으며, 사용하중 시 활하중에 의한 텐던 긴장력 변화율에 대해 10%의 오차내로 텐던 긴장력을 추정 가능하여 연구 성과목표(긴장하중 : 5% 이내, 사용하중 : 20 % 이내)를 달성하였다.
- ☐ 향후 FBG/EM 센서를 활용하여 PSC 거더 및 교라에 대하여 프리스트레스 도입 및 공용 중 긴장재의 긴장력을 합리적으로 모니터링할 수 있는 것으로 나타났다.

(4) 실제 현장 적용을 통한 거더 시스템 검증

- ☐ 실제 현장에서의 적용 가능성 검증을 위해 경남 밀양 “○○도로건설 사업 현장”에 건설중인 25m 2경간 PSC 거더교 현장 적용 결과, EM 센서를 통해 긴장시 텐던 긴장력에 대해 5% 이내의 오차로 긴장력 추정이 가능하여 연구 성과목표(오차율 5% 이내)를 달성하였다.
- ☐ 이를 통해 개발된 시스템을 향후 타 현장에서의 프리스트레스 도입 시 설계 긴장력의 효율적인 도입을 위해 적용 가능할 것으로 판단되었다.

(5) 품질 및 유지관리 지침

- ☐ FBG/EM 센서의 개별 검증 실험(Calibration), PSC 거더 부분 모델실험, 실물 거더 실험을 수행하면서 품질 및 유지관리 지침사항을 정리하였다.

나. FBG 광섬유 센서를 이용한 긴장재 성능 관리 시스템

- ☐ 스마트 텐던 변형률 계측 범위 개선: 0.65%에서 1.73%로 개선하여 연구 성과목표(변형률 계측범위 1%)를 달성하였다.
 - ㉠ FBG 센서 자체의 재코팅 방법이 개선된 FBG 센서 선택: Acrylate 재코팅→Polyimide 재코팅
 - ㉡ 킹 와이어의 내구성 개선을 위한 스테인레스 무계목(seamless) 강제 튜브 제작 : 용접관 인발 강제튜브→무계목 스테인리스 강제 튜브
 - ㉢ 킹 와이어 내부에서 FBG 센서 보호방법 제안: 스마트 텐던 킹와이어 내부 Resin의 미세균열 전파로 FBG 센서의 파단에 대한 보호 대책으로 Plastic 튜브를 이용하여 FBG 센서 보호하는 방법을 제안
- ☐ 스마트 텐던의 긴장력 오차 범위 5% 이내로 추정하여 연구 성과목표(오차율 5% 이내)를 달성하였다.
- ☐ 성능개선 스마트 텐던 시작품 제작 (길이 30m의 스마트 텐던 제작)
 - ㉠ 길이 50m 실규모 PSC 거더의 재하시험에 적용을 위한 스마트 텐던 시작품 제작
- ☐ 스마트 텐던의 품질관리 가이드라인 개발
 - ㉠ 최대 변형률 계측 범위를 1%로 개선하여 연구 성과목표(변형률 계측범위 1%)를 달성
 - ㉡ 긴장력 예측을 위하여 작용하는 하중과 비교한 정확도도 5%로 개선하여 연구 성

과목표(오차율 5% 이내)를 달성

㉔ 스마트강연선을 제작하기 위하여 품질관리 가이드라인을 작성

□ 스마트 텐던의 유지관리 가이드라인 개발

㉕ 스마트강연선의 재료 및 제작, 측정장비, 인장실험 시, 장기모니터링에 대한 유지관리가 필요하며 이를 위해 가이드라인을 작성

다. EM 센서를 이용한 긴장재 모니터링 센서 및 알고리즘 개발

□ 기존 비파괴 검사법으로 정확히 측정이 어려운 PSC 거더 내부 텐던의 긴장력 계측을 위하여 본 연구는 매립형 EM 센서를 이용한 긴장력 계측 기법에 대한 연구를 실시하였다.

□ PSC 거더 내부 텐던의 긴장력을 계측하기 위해 PSC 거더 내부에서 직접적인 계측인 가능한 매립형 EM 센서를 개발하였으며 개발된 매립형 EM 센서를 이용하여 긴장력 변화에 따른 자기 이력 계측 결과를 파악한 결과 긴장력이 증가함에 따라 자기이력곡선의 기울기인 투자율과 자기이력곡선의 면적이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

□ 긴장력에 따른 계측신호의 변화를 정량화하기 위하여 투자율 및 면적을 추출하고 추출된 인자를 이용하여 인공신경망 및 회귀분석을 이용하여 긴장력 추정식을 도출하였다.

□ 부분모델 실험, 실거더 실험 및 현장 적용 실험을 통하여 개발된 EM 센서를 이용한 긴장력 계측 기법에 대한 적용성 검증을 실시하였으며 실험 결과 매립형 EM 센서를 이용하여 긴장력을 오차범위 5% 이내로 추정이 가능하여 연구 성과목표(오차율 5% 이내)를 달성하였다.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 정량적 성과지표

- ☐ 총 3차년도 연구과제이며, 각 년차별 정량적 성과지표는 다음과 같다.
- ☐ 수행연구기관으로는 부경대학교(주관연구기관), 전남대학교(공동연구기관, 공동1), 성균관대학교(공동연구기관, 공동2), 충남대학교(위탁연구기관), 한국전력국제원자력대학원대학교(위탁연구기관), (주)성환이앤씨(참여기업)으로 구성되어 있다.
- ☐ 당초 계획한 성과보다 초과달성한 건은 굵은글씨로 표시하였다.

<표 4.1-1> 정량적 성과지표

성과지표		연차별 성과 건수				목표
		1차년도	2차년도	3차년도	계	
국외 학술지			2	5	7	5
국내 학술지			5	1	6	9
특허	출원	5	4	1	10	8
	등록		1	5	7	0
시제품			1	1	2	1
S/W		1		1	2	1
현장시험 및 검증				1	1	0
학술발표		1	10	12	23	0

* 초과달성은 굵은글씨로 표시

<표 4.1-2> 정량적 성과지표 세부 목록

연차	성과지표		명칭	저자	일자	계제지
	구분	달성도				
1	특허출원	5/4	프리스트레스 콘크리트 거더에 형성된 개별 텐던의 긴장력 측정장치	성균관대학교	15.03.23	대한민국
			PSC ANCHORAGE FOR MONITORING A STATUS CHANGE OF PS STEEL MEMBER AND PSC GIRDER USING THE SAME	성균관대학교	15.04.16	미국
			PSC 거더 정착구-위스관 연결형 EM 센서	부경대학교	15.07.03	대한민국
			광섬유 센서를 가진 복합강연선 및 이의 제조방법	전남대학교	15.07.15	대한민국
			광섬유 센서 내장형 복합 강연선	전남대학교	15.07.15	대한민국
	S/W	1/1	엘라스토마그네틱(EM) 센서를 이용한 프리스트레스(PS) 텐던 긴장력 계측 프로그램	성균관대학교	15.04.15	대한민국
	학술대회	4/0	FBG센서가 내장된 7연 강연선을 이용한 UHPC 리브형 바닥판의 긴장력 모니터링	김현우 등 5명	15.04.02	구조물진단유지관리공학회
			PSC 거더와 연속지점부의 긴장재 절곡마찰손실	김승진 등 4명	15.04.03	구조물진단유지관리공학회
			EM센서를 활용한 PSC 텐던 긴장력손실 관리	차기훈 등 5명	15.04.09	전산구조공학회
			Tensile force monitoring for Pre-Stress tendon of PSC Girder by incorporating FBG and EM sensors	김준경 등 4명	15.06.24	NDCM
2	국의 학술지 (SCI 급)	2/2	Measurement of Prestressing Force in Pretensioned UHPC Deck	김재민 등 4명	16.10.10	Hindawi Publishing Corporation
			ANN-based tensile force estimation for pre-stressed tendons of PSC girders using FBG/EM hybrid sensing	김준경 등 5명	17.10.01	INSIGHT
	국내 학술지	5/5	EM센서를 활용한 PSC 텐던 긴장력 손실 관리	김준경 등 5명	15.08.01	전산구조공학회
			계측 센서를 활용한 PSC 거더 텐던의 긴장력 측정 실험	신경준 등 5명	15.12.31	전산구조공학회
			FBG 센서를 이용한 강연선 전달길이 측정	이성철 등 5명	15.12.31	전산구조공학회
			FBG 광섬유센서가 내장된 7연 강연선을 이용한 포스트텐션 UHPC 교량의 긴장력 장기모니터링	김현우 등 5명	15.12.31	전산구조공학회
			PS 긴장재 긴장력 계측을 위한 PSC 거더 내부 매립용 EM 센서	박영웅 등 5명	15.12.31	전산구조공학회
	특허 출원	4/4	광섬유센서 내장 중공나선이 구비되어 콘크리트 부속부 변형을 계측이 용이한 7연선과 이의 제조방법	전남대학교	15.09.01	대한민국
			PSC 거더 정착구-위스관 연결형 EM 센서	부경대학교	16.01.27	대한민국
			상태모니터링이 가능한 프리-스트레스 구조물 및 시공방법	부경대학교	16.03.08	대한민국
	특허 등록	1/0	튜브 내 광섬유센서 장착을 위한 고착재 주입장치	전남대학교	16.06.29	대한민국
			PS 강재의 상태 변화 모니터링이 가능한 PSC 정착구 및 이를 구비한 PSC거더	성균관대학교	15.09.07	대한민국
	시제품	1/1	긴장력 모니터링용 EM 센서 시제품	성균관대학교	15.07.06	대한민국
	학술대회	11/0	Prestressing Tensile Force Estimation for PSC Girder based on EM Sensor Measurement	김준경 등 4명	15.08.12	IWNEST
			PSC 긴장재 긴장력 추정용 위한 매립형 센서 시스템	김준경 등 5명	15.10.16	구조물진단유지관리공학회
			FBG 센서 활용 고강도 콘크리트에서의 텐던 전달길이 측정 실험 연구	이성철 등 5명	15.10.16	구조물진단유지관리공학회
			FBG 및 EM 센서 융합 긴장력 관리형 블록아웃 PSC 거더 시스템 개발	박영웅 등 5명	15.10.16	구조물진단유지관리공학회
			FBG센서 내장 7연강연선의 계측범위 개선	김재민 등 3명	15.10.29	토목학회
			긴장력의 직접 측정을 위한 계측 센서 비교 실험	신경준 등 5명	15.10.30	토목학회
			스마트 강연선의 FBG 센서 보호방법 개선	최승이 등 3명	16.04.06	구조물진단유지관리공학회
			고강도 콘크리트에서의 강연선 전달길이 기존 모델들에 대한 실험적 고찰	이성철 등 5명	16.04.14	전산구조공학회
			FBG 센서를 이용한 강연선전달길이 측정	이성철 등 5명	16.04.14	전산구조공학회
			EM 센서를 이용한 PSC 교량의 건전성 평가 기법	김준경 등 4명	16.05.13	콘크리트학회
3	국의 학술지 (SCI 급)	5/3	*Damage Detection with FBG Sensors for Pre-Stress Concrete Girders	이성철 등 4명	17.06.12	Key Engineering Materials
			Enhanced Strain Measurement Range of an FBG Sensor Embedded in Seven-Wire Steel Strands	김재민 등 4명	17.07.18	Sensors
			Construction Condition and Damage Monitoring of Post-Tensioned PSC Girders Using Embedded Sensors	신경준 등 5명	17.08.10	Sensors
			Development of Embedded EM Sensor for Estimating Tensile Force of PSC Girder Bridges	김준경 등 5명	17.08.31	Sensors
			Magnetic flux leakage-based local damage detection and quantification for steel wire rope non-destructive evaluation	김주원 등 2명	17.08.01	JIMSS
	국내 학술지	1/4	누설자속기법을 이용한 엘리베이터 케이블 압착변형 진단	유병준 등 3명	17.08.01	비파괴검사학회지
	특허 출원	1/0	복합강연선용 광섬유센서유닛과 광섬유센서유닛의 제조방법 및 이를 이용한 복합강연선	전남대학교	16.06.29	대한민국
			프리스트레스 콘크리트 거더에 형성된 개별 텐던의 긴장력 측정 장치	성균관대학교	16.08.29	대한민국
	특허 등록	6/0	PSC 거더 정착구-위스관 연결형 EM 센서	부경대학교	16.08.30	대한민국
			광섬유 센서를 가진 복합강연선 및 이의 제조방법	전남대학교	17.02.28	대한민국
			광섬유 센서 내장형 복합 강연선	전남대학교	17.06.29	대한민국
			광섬유센서 내장 중공나선이 구비되어 콘크리트 부속부 변형을 계측이 용이한 7연선과 이의 제조방법	전남대학교	17.06.29	대한민국
			튜브 내 광섬유센서 장착을 위한 고착재 주입장치	전남대학교	17.09.15	대한민국
	시제품	1/0	긴장력 모니터링용 EM 센서 개선 시제품	성균관대학교	16.08.20	대한민국
	S/W	1/0	엘라스토 마그네틱(EM)계측 및 긴장력 산정 프로그램	성균관대학교	17.08.08	대한민국
	현장시험 및 검증	1/0	FBG 및 EM 센서 융합 블록아웃 PSC거더의 생애주기 하중단계별 구조성능 검증실험	부경대학교	16.08.01	명지대학교
	학술대회	12/0	Tensile Force and Relaxation Monitoring of PS Tendons for PSC Girder Bridges using EM sensor	김준경 등 3명	16.08.24	ASHMCS
			PSC 거더 긴장력 측정을 위한 계측 센서 성능 실험	이성철 등 5명	16.10.13	구조물진단유지관리공학회
			Damage Detection with FBG Sensors for Post-tensioned PSC Girders	이성철 등 4명	16.10.14	ICMSET
			스마트 7연 강연선에 내장되는 FBG 센서의 보호방법	김준경 등 4명	16.10.20	토목학회
			PSC 거더 생애주기 긴장력 관리를 위한 FBG 및 EM 센서를 적용한 축소모델 실험	박영웅 등 5명	16.10.21	토목학회
			최소 전단 보강된 PSC 거더의 전단 강도	벤자민 등 4명	16.11.03	콘크리트학회
			FBG 센서를 활용한 포스트텐션 보의 마찰 계수 평가	한누배 등 4명	16.11.03	콘크리트학회
			PSC 거더 축소모델을 통한 생애주기 하중단계별 긴장력 계측 센서 성능 실험	박영웅 등 5명	16.11.25	전산구조공학회
			EM센서를 활용한 50m 길거더의 긴장력 모니터링 기법	김준경 등 4명	16.11.25	전산구조공학회
PSC 거더 축소모델을 통한 긴장력 계측 센서 성능 실험			박영웅 등 5명	17.04.06	전산구조공학회	
PSC 거더 축소모델을 통한 생애주기 긴장력 계측 센서 성능 실험			박영웅 등 5명	17.04.13	구조물진단유지관리공학회	
Monitoring of tensile force of PSC girder by measuring iron loss variation using EM sensors			김준경 등 5명	17.07.13	PHM	

나. 정성적 성과지표

- 총 3차년도 연구과제이며, 각 년차별 정성적 성과지표는 다음과 같다.
- <표 4.1-3>은 정성적 성과점검기준 및 달성도를 정리하여 표로 나타내었다.
- 각 단위성과에 대한 검증방법에 대해서는 별권(부록)으로 증빙하였다.

<표 4.1-3> 정성적 성과점검기준 및 달성도

구분	단위성과	성과점검기준							
		질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치		
주요	1-1	PSC 거더의 강성률에 관한 국내외 관련 기술 동향	①	간장력 계측 방법 비교	간장력 계측 방법 비교	100	장단점 비교 보고서	조사분석보고서	3.22
	1-2	계측 시스템 내장형 정적구 상세 설계	①	계측 시스템 내장형 정적구 상세 설계 개발	계측시스템 매입을 위한 정적구 상세 설계 개발	100	설계도	정적구 상세 설계도	4.30
	1-3	FBG/EM 센서의 calibration 실험	①	FBG/EM 센서의 calibration 실험	측정방법간 계측값 비교/검출/보정	100	실내 실험	실험보고서	7.62
	1-4	거더 부분 모델 제작 및 성능평가	①	FBG/EM 센서의 성능평가	소규모 PSC부재에 대한 센서 현장 적용성 평가	100	실험 수행	실험보고서	6.45
	1-5	거더 시제품 제작	①	시제품 제작	시제품 제작	100	설계도면 및 시제품 제작 여부	상세 설계도/시제품	10.75
	1-6	시제품 재하실험	①	시제품 재하 실험	교량 실제 운영 환경을 고려한 FBG/EM 센서 내장 거더의 재하실험으로 개발된 시스템 검증	100	내장 센서를 이용한 간장력 측정값과 실제 측정값의 오차율 : -간장하중 : 5% 이내 -사용하중 : 20%이내	실험 결과 보고서	15.06
	1-7	품질관리 및 유지관리 지침 개발	①	품질관리 및 유지관리 지침 개발	개발된 거더의 품질 및 유지관리 지침 개발	100	간장력 계측 및 평가에 대한 지침 포함 여부	지침보고서	5.37
	기초	2-1	PS 간장력의 기술개발 기술 문헌조사	①	기초 기술의 국내외 논문 및 자료 조사	기초 기술과의 차별화 방안 확보	100	기초 기술 비교 보고서	보고서 작성 여부
2-2		FBG 센서 내장 스마트 텐던 내부구조 개선	①	스마트 텐던 변형률 계측 범위 개선	스마트 텐던 최대 변형률 계측범위 0.9% 설정	100	특허출원, 실내 실험	논문, 특허출원 여부	3.23
			②	FBG 센서 부하강도 개선	레진 경화, 주입 공정 개선	100	실내실험	실험 보고서 작성 여부	1.08
			③	성능개선 스마트 텐던 시제품 제작	길이 20m의 성능개선 스마트 텐던 제작	100	시제품 제작	시제품 제작 여부	4.30
2-3		거더 시제품에 스마트 텐던 적용	①	성능개선 스마트 텐던 시제품 제작	최대 계측 변형률 1%, 길이 30m의 시제품 제작	100	시제품 제작	시제품 제작 여부	4.30
			②	스마트 텐던 단부 보호장치 개선	스마트 텐던 단부 보호장치 제작 및 시공	100	시제품 제작	논문, 특허출원 여부	3.76
2-4		개량형 PSC 거더에 스마트 텐던 적용 가이드라인 개발	①	스마트 텐던 단부 보호장치 제작	FBG 센서를 내장한 스마트 텐던 단부 보호장치 완성	100	직경 19mm 이내의 단부 보호장치 제작여부	직경 19mm 이내의 단부 보호장치	4.30
			②	스마트 텐던 품질관리 가이드라인 개발	개량형 PSC 거더의 스마트 텐던 품질관리 가이드라인 개발	100	FBG센서 계측오차 5%이내의 품질관리를 위한 가이드라인 개발 여부	실험 결과 보고서, 가이드라인	1.08
			③	스마트 텐던 유지관리 가이드라인 개발	개량형 PSC 거더의 스마트 텐던의 유지관리 가이드라인 개발	100	유지관리 가이드라인 개발 여부	가이드라인	1.08
3-1		선행연구 사례조사	①	EM 센서를 이용한 간장력 계측 센서의 장단점 비교	최근 5년간 개발된 EM 센서 관련 논문 검토 및 비교	100	장단점 비교 보고서	보고서 작성 여부	1.08
응용	3-2	PSC텐던 간장력 모니터링을 EM 센서 및 알고리즘 최적화	①	PS 간장력 모니터링을 EM 센서 설계	PSC 거더 정하중 및 연속하중 모니터링을 위한 EM 센서 설계	100	설계도면/특허출원	설계 도면 작성 여부/특허출원여부	2.15
			②	PS 간장력 상대간장력 손실률 계측 알고리즘 개발	EM 센서 계측 데이터를 이용한 상대간장력 손실률 계측 알고리즘 개발	100	알고리즘 코드/소스코드	알고리즘 유무/소스코드유무	2.15
			③	PS 간장력 모니터링을 EM 센서 시제품 제작	간장력 모니터링을 EM 센서 시제품 제작	100	EM 센서 시제품	시제품 제작 유무	3.76
	3-3	EM 센서 성능 검증 및 PSC 거더 시제품에의 적용	①	EM센서 시제품 성능 평가 및 적용성 검증	실험실 수준의 실험을 통한 시제품 성능 평가 및 적용성 검증	100	적용성 검증 보고서	보고서 작성 여부	2.15
			②	간장력 손실률 계측 알고리즘 성능평가 및 수정보완	실험실 수준의 실험을 통한 시제품 성능 평가	100	성능평가 보고서	보고서 작성 여부	2.69
			③	PSC 거더 시제품 매립을 EM센서 시제품 제작 및 적용	PSC 거더 시제품에 매립 설치를 위한 EM센서 시제품 제작 및 적용	100	EM 센서 시제품	시제품 제작 유무	3.23
	3-4	EM센서를 이용한 간장력 모니터링 기법의 PSC 거더 적용성 검증 및 가이드라인 개발	①	EM센서를 이용한 PSC 거더 간장력 손실률 모니터링 기법의 적용성 검증	실제 현장 모사 수준의 실험을 통한 시제품 성능 평가 및 적용성 검증	100	EM센서를 이용한 간장력 추정 오차를 5% 이내	실험 결과 보고서	4.30
			②	EM 센서 품질관리 및 유지관리 가이드라인 개발	PSC 거더의 EM 센서 품질관리 및 유지관리 가이드라인 개발	100	계측 가이드라인 개발 여부	가이드라인	2.15

2. 관련 분야 기여도

가. FBG 광섬유 센서를 이용한 PSC 거더교량에서의 긴장재 성능 관리 분야

(가) 광섬유를 이용한 PS 긴장재 긴장력 및 마찰계수 측정 기법 개발

- ☐ PS 긴장재 내부 광섬유 센서를 이용한 PS 긴장재 긴장력 측정 기법의 적용 가능성 검증
- ☐ FBG 내장 스마트 텐던의 내구성 향상 기술을 개발하여 최대 변형률 측정 범위 1%로 개선
- ☐ 광섬유 센서 측정 데이터를 이용한 마찰계수 측정 알고리즘을 개발

(나) 광섬유/EM 센서 측정 알고리즘 개발 및 실제 현장 적용을 위한 광섬유 센서 제작

- ☐ 광섬유센서를 이용한 PS 긴장재의 긴장력을 측정하는 알고리즘을 개발
- ☐ 온도와 습도에 의한 측정 파장의 변화를 파악하고 온도 습도 보상 알고리즘 개발
- ☐ 실내 실험용 소형 PS 긴장재 시험체 제작
- ☐ PS 긴장재 긴장력 측정 오차 범위 5% 이내
- ☐ 실제 PS 긴장재 적용을 위한 FBG 센서 내장 스마트 텐던 20m 시편 제작

(다) 실제 현장 모사 환경에서 PS 긴장재 측정 기법 신뢰성 검증

- ☐ FBG 센서 내장 스마트 텐던의 시편 및 측정 알고리즘을 이용한 실제 모사환경 실험 실시

나. EM 센서를 이용한 PSC 거더교량에서의 긴장재 모니터링 분야

- ☐ 본 연구에서 개발한 매립형 EM 센서를 이용한 긴장력 추정 기법은 국내외에서 처음 시도되는 기법으로 PSC 교량의 긴장력 측정 기법 개발에 있어 그 기여가 크다고 할 수 있음
- ☐ 기존 PSC 교량의 긴장력 측정을 위한 비파괴 검사 기법은 외부에 노출되어 있는 케이블이나 비부착식 PSC에는 적용이 가능하나 시공 완료 후 외부로 노출되는 부분이 없는 부착식 PSC의 긴장력은 시공이 완료된 이후에는 측정이 불가능함
- ☐ 본 연구는 실제 현장에서 손쉽게 설치가 가능하도록 쉬스관과 조인트 형태로 조립되는 매립형 EM센서를 개발하고 개발된 EM 센서를 실험실 단계에서 실제 현장까지 적용성 검증을 실시함으로써 개발 및 검증을 완료하였음
- ☐ 이를 통하여 PSC 거더의 긴장력 관리 기법을 보다 실증적으로 개발함으로써 해당 기법의 상용화에 큰 기여를 하였으며 이를 토대로 실제 사업화를 준비 중에 있음

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 연구개발성과의 활용방안

- (가) 생애주기 동안에 설계 긴장력 및 긴장력 분포의 직접 계측이 가능하고 거더 보강을 위한 재긴장 시기의 선제적 선택 및 소요 보강량의 최적화 결정이 가능한 블록아웃 PSC 거더 시스템 개발 및 사업화
- (나) 구조물 유지관리 기업으로의 기술확산을 통해 PSC 거더의 긴장력 관리 사업 실용화
- (다) 센서/계측기기 업체로의 기술확산을 통한 PS 긴장재 긴장력 계측 센서 제품화
- (라) PS 긴장재 긴장력 계측의 선진기술 선점으로 미래 원천기술 확보
- (마) 블록아웃 공법을 이용한 PSC 거더의 원천기술 확보
- (바) FBG 광섬유센서 및 EM 센서를 이용한 PS 긴장재 긴장력 계측 기법의 국내외 특허권 획득으로 미래기술선점 및 무형자산 확보
- (사) PS 긴장재 유지관리 시스템의 현수교/사장교 케이블 유지관리로의 활용 가능
- (아) PS 긴장재 긴장력 계측 산업, 블록아웃 PSC 거더 시공 및 유지관리 산업 등 신산업 창출

2. 기대효과

가. 기술적 측면

- ① PSC 거더의 생애주기 전반에 걸친 긴장력의 직접확인을 통한 관리로 PSC 거더 교량의 안전성과 내구성을 증대하고 고품질의 최적화된 거더 설계 및 제작 기술을 확보함.
- ② 본 연구결과로 도출되는 성과는 SCI급 저널과 권위있는 학회논문집에 게재되어 관련 분야의 연구에 파급 효과를 나타낼 것으로 판단되며, 이 분야의 선도자가 되는 데 밑거름이 될 것으로 기대됨.
- ③ 건설 신기술 관련 R&D인력 양성 및 학부 또는 대학원 심화교육에 응용하여 건설 기술 발전에 큰 기여를 할 것으로 기대됨.

나. 경제적 · 산업적 측면

- ① 기존 PSC 거더 대비 PS 긴장재의 배치 및 프리스트레싱 작업의 효율성이 증진되어 시공 및 유지관리 비용 절감이 가능함.
- ② 신뢰성 높은 긴장력 관리로 PSC 거더의 공용수명을 증가시킴으로써 PSC 거더 철거 및 재설치에 따른 사회적 비용 발생 절감이 가능함.
- ③ PSC 거더 지능형 유지관리 기법의 선진 기술 개발을 통해 국가 위상 증진 및 해외 시설물 건설 수주 가능성 증대가 기대됨.
- ④ 광섬유 및 EM 센서를 이용한 PS 긴장재의 긴장력 유지관리 기법 원천기술 확보를 통해 기술 및 제품의 수출 가능함.

다. 사회적 측면

- ① 광섬유 및 EM 센서를 이용한 PS 긴장재의 긴장력 계측 센서 시장 창출 및 현수교/사장교 케이블, 지반 앵커 등으로의 시장 확대가 가능함.
- ② 생애주기비용을 고려한 교량의 공용수명 증진에 대한 기술력 축적은 물론 고성능, 고품질, 고효율 유지에 따른 건설산업의 활성화가 기대됨.
- ③ 보다 안전하고 효율적인 PSC 거더의 유지관리로 발생 가능한 사고를 미연에 방지하며 이를 통해 국민 안전 증대 및 사회적 불안감 감소가 기대됨.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. FBG 광섬유 센서 관련 해외 논문 및 연구 내용

- Esselman 등(2012)은 대부분의 기존 전자 감지 시스템과 달리 전자파에 대한 면역이 가능한 광섬유 센서를 이용하여 복합 재료, 항공 우주, 토목 공학, 오일 및 가스 및 기타 재료 및 구조물의 비파괴 검사를 위한 광섬유 센서의 작동 원리, 센서 유형, 이점 및 응용 분야를 검토함
- Hill & Meltz(1997)은 FBG 센서의 파이버 격자 제작의 기본 기술, 그 특성 및 파이버 격자의 기본 특성이 설명하고, 섬유 회절 기술의 많은 응용 프로그램 설명함
- Kim 등(2015)은 PC 강연선의 프리스트레스 힘을 정확하고 효과적으로 평가할 수 있는 방법을 제안하고 실제 콘크리트 구조물에 대한 제안된 방법의 적용 가능성을 검증함
- Ou & Li(2010)은 광섬유 감지 기술, 파 전파 기반 압전 세라믹 (PZT) 감지 기술, 스마트 시멘트 기반 감지 기술 및 부식 감지 기술과 같은 첨단 감지 기술 및 센서 개발에 대해 설명하고, 감지 기술 및 SHM 개발의 과제와 향후 동향을 제시함
- Rizkalla & Tadros(1994)은 탄소 섬유를 이용하여 캐나다의 Beddington Trail/Centre Street에 적용하여 센서 시스템으로 모니터링한 사례임
- Zhou(2003)은 FBG 센서를 이용하여 SHM에 적용할 수 있는 제조기술을 소개하고, 실용적으로 시설물에 센서를 적용할 수 있는 해결책을 제시함

2. EM 센서 관련 해외 논문 및 연구 내용

- Lin(1963)은 구조물의 긴장력 손실이 구조적 강성에 변화를 준다는 것을 증명하였으며, Saiidi et al.(1994)과 Miyamoto et al.(2000)은 긴장력 손실과 구조물의 진동특성과의 관계를 정적으로 연구함
- Civjan 등(1995)은 손상된 PSC 구조물의 잔류 긴장력 평가 방법을 제시하였으며, Pessiki 등(1996)은 수십년의 공용기간이 경과한 PSC 거더의 긴장력 추정 연구를 수행함
- Burns 등(1991)은 비부착된 연속보에서의 긴장력 손실 연구를 수행하였고 Tassi와 Rozsa(1992)는 캔틸레버 방식으로 가설되는 교량의 긴장력 힘 산정 방법을 제안한 바 있으며 Sharif(1993)은 PSC 합성보에서의 시간에 따른 긴장력 손실 연구를 하였으며, Naaman과 Hamza(1993)는 부분 긴장된 고강도 콘크리트 보에서의 긴장력 손실 연구를 수행함
- Saiidi(1996)는 긴장력 시간에 따른 손실에 관한 연구를 수행하였으며 Pessiki(1996)는 수십년의 공용기간이 경과한 PSC거더의 긴장력의 추정 연구를 하였고, 또한, Wollmann 등(1996)은 외부 강선에 의해 긴장되는 콘크리트 박스 거더 교량의 현장 계측 연구를 수행함
- Al-Omaishi(2001)는 프리텐션 고강도 콘크리트 거더교에서 긴장력 손실에 관한 연

구에서 NCHRP-1807방법을 소개하였으며 즉시손실과 장기손실에 관한 시간단계 해석을 수행하였음

- Ahlborn 등(2000)은 고성능 콘크리트 프리스트레스 거더교의 장기거동과 휨거동에 관하여 연구를 수행하였고 Huo(1997)는 거더교에 고성능 콘크리트의 적용과 시간의존해석을 수행함.
- Huo 등(2001)은 고성능 콘크리트의 탄성계수와 크리프, 건조수축에 관한 연구를 수행하였으며 Stallings 등(2003)은 고성능 거더교의 긴장력 손실과 쏏음에 관한 연구에서 고성능 프리캐스트 콘크리트 거더교의 긴장력 손실과 쏏음의 과대평가는 장기간으로 설계하는 교량의 효율성이 감소된다는 것에 대해 연구를 진행함.
- Gilbertson 과 Ahlborn(2004)은 긴장력 콘크리트 부재에서 긴장력 손실의 방법에 대해 비교하고 또한 긴장력 콘크리트 부재의 특성과 프리스트레싱 힘의 손실은 부재의 쏏음과 장기처짐에 직접적인 영향을 미친다는 것에 관해 연구를 진행함

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		O
결정 사유	「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의4제1항에 따른 분류에 따라 일반과제로 분류됨	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천 원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
성균관 대학교	Miniature Pulsed Nd:YAG Laser System	U0532E055R0 20LN	1	2011.02.11.	31,488	큐빅레이저 (032-325-45 44)	성균관대학교 자연과학캠퍼 스	NFEC-2012-04- 160545

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책

□ 과제의 수행 중에 프리스트레스 콘크리트 부재의 제작 및 실험이 포함되어 있으며, 이러한 과정 중에 발생할 수 있는 위험요소들은 PS긴장 과정에서 발생할 수 있는 돌발적인 위험 상황과 실험 중에 발생할 수 있는 위험 상황 등이 있다. 따라서, 연구책임자와 모든 참여 연구원들은 이러한 위험 상황이 발생하지 않도록 최선의 준비를 할 것이며, 실험 전 안전교육을 통하여 이에 대하여 충분히 숙지하고 위험 발생시에도 피해를 최소한으로 줄일 수 있도록 준비할 것이다. 또한, 실험시에는 안전 모와 안전화 등 기본적인 보호장구는 반드시 착용하도록 조치할 것이다.

□ 구체적으로 부경대학교에는 안전관리와 관련한 위원회에서 「부경대학교 실험실 안전관리 규정」을 마련해 두고 있으며, 본 연구책임자를 비롯한 연구원들은 아래의 체계적인 연구실 안전조치 관련 사항을 준수하여 연구를 수행할계획이다.

(1) 연구실 안전 점검

- ① 담당부서 : 본교 사무국 시설과
- ② 점검대상 : 교내 전체 연구실
- ③ 점검방법 : 한국산업안전공단 등 전문기관대행을 통해 화공, 가스, 전기, 위생, 기계 등 정기 점검을 매년 1회 실시

(2) 연구실 일일 안전 점검

- ① 담당부서 : 연구실(연구책임자)
- ② 점검대상 : 개별 연구실(실험실)
- ③ 점검방법 : 점검항목에 대한 실험실 안전점검일지 작성
- ④ 점검항목 : 개인보호구, 화학물질보관, 폐기물처리, 표시와 라벨, 안전관련문서, 교육, 응급장비 등

(3) 실험실 정밀안전진단 실시

- ① 점검대상 : 연구개발활동에 유해화학물질 관리법 제2조 7호에 따른 유해화학물질을 취급하는 연구실, 산업안전보건법 제39조에 따른 유해인자를 취급하는 연구실, 과학기술부령이 정하는 독성 가스를 취급하는 연구실
- ② 실시 : 2년마다 1회 전문기관 대행을 통해 실시

(4) 연구실 안전 교육 훈련

- ① 목적 : 「부경대학교 실험실 안전관리 규정」 제14조에 의거 연구 또는 실험·실습을 하는 연구활동 종사자에게 안전관리에 관한 정보 제공, 안전사고 미연방지
- ② 교육대상 : 각 실험실별 안전관리 책임자 및 안전관리 담당자, 연구활동 종사자
- ③ 교육방법
본교 사무국 시설과 주최 개별 실험실별 주최
- ㉠ 실시 : 연 2회, 한국소방안전협회 강사 등 초빙
- ㉡ 교육내용 : 안전법령, 사고사례, 화재안전교육 등

-
- ㉔ 실험실별 안전관리 책임자와 안전관리 담당자를 지정하여 통보하고, 안전관리 책임자와 안전관리 담당자 중 1인 이상 반드시 참석토록 하며, 불참 실험실은 실험실 안전보험 보상내용을 축소하는 등 참석 의무화함
 - ㉕ 실험실 안전교육일지 작성
 - ㉖ 매월 1시간 이상 실험실별 자체 안전교육 실시한 후 1주일 이내 일지 작성, 일지는 3년 이상 보관
 - ㉗ 정기교육은 매월 1시간 이상 실시, 특별교육은 신규 과제 및 신규 연구활동종사자 등 교육

(5) 보험 가입 현황

- ① 시설과 : 학부생, 대학원생 대상으로 사망 및 휴유장애 1억원, 부상 1천만원 이내 실비 보상
- ② 학생지원과 : 학부생 등 보험 지원
- ③ 교무과 : 교원 대상, 생명상해보험 5천만원/인, 의료시설보험 입원 1천만원/인, 통원 15만원/인 지원

(6) 연구활동 종사자 건강 검진

- ① 개요 : 학교보건법에 따라 매년 신입생, 재학생을 대상으로 무료건강검진을 춘계, 추계로 실시, 학생들의 신체질병 및 기타 결함을 발견하고 예방하며, 간이 치료, 건강 증진 하도록 함.
- ② 주최 : 보건진료소

(7) 추가 이행 계획

- ① 학교 차원에서 국가연구개발사업 연구과제 수행 시 필요한 연구실 안전 확보를 위한 추가적인 지원을 위한 내부 기준을 마련하여 쾌적하고 안전한 실험실 환경을 조성할 계획임. (개인 안전보호구, 안전용품)

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허	PSC 거더 정착구-쉬스관 연결형 EM 센서	부경대 학교 산학협 력단	주관	한국		16.08.30		등록
2	현장시 험 및 검증	FBG 및 EM 센서 융합 블록아웃 PSC거더의 생애주기 하중단계별 구조성능 검증실험	부경대 학교 산학협 력단	주관	한국		17.08.01		명지대학교 하이브리드 구조실험센 터
3	논문	Construction Condition and Damage Monitoring of Post-Tensioned PSC Girders Using Embedded Sensors	부경대 학교 산학협 력단	주관	Sensors	2.677	17.08.10		SCI
4	논문	Enhanced Strain Measurement Range of an FBG Sensor Embedded in Seven-Wire Steel Strands	전남대 학교 산학협 력단	공동	Sensors	2.677	17.07.18		SCI
5	논문	Development of Embedded EM Sensor for Estimating Tensile Force of PSC Girder Bridges	성균관 대학교 산학협 력단	공동	Sensors	2.677	17.08.31	중복사사	SCI

제11장. 참고 문헌

1. Ahlborn, T.M., French, C.E., and Shield, C.K.(2000), "High-Performance Concrete Prestressed Bridge Girders: Long Term and Flexural Behavior", Report 2000-32, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN, p.91.
2. Al-Omaish, N.(2001), "Prestress Losses in Pretensioned High-Strength Concrete Bridge Girders", Ph. D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Nebraska, Lincoln, NE.
3. Burn, N.H., Helwig, T. and Tsujimoto, T. (1991), "Effective Prestress Force in Continuous Post-Tensioned Beams with Unbonded Tendons", ACI Structural Journal, 88(1), 84-90.
4. Chen, H.L. Wissawapaisal, K., "Measurement of Tensile Forces in a Seven-Wire Prestressing Strand Using Stress Waves", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.127, No.6, pp.590-606.
5. Choi, K.S., Son, J.Y., Kim, G.J., Lee, K.S., Yong, J., Baik, S.J., Im, K., Kim, J.M., and Kim, Y.S. (2008), "Enhancement of FBG multiplexing capability using a spectral tag method", IEEE Photonics Letters, Vol. 20, No. 23, pp. 1013-2015.
6. Civjan, S.A., Jirsa, J.O., Carrasquillo, R.L. and 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.
7. Gilbertson, C.G. and Ahlborn, T.M.(2004), "A Probabilistic Comparison of Prestress Loss Methods in Prestressed Concrete Beam," PCI Journal, 9(5), 52-69.
8. Haiabe U.B., Chen, R.H.L. (1995), "Conceptual Design of a Monitoring System for Maglev Guideways" Natural Hazards Mitigation, pp.1028-1034.
9. Huo, X.S.(1997), "Time-Dependent Analysis and Application of High Performance Concrete in Bridges," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Nebraska, Lincoln, NE.
10. Huo, X.S., Al-Omaishi, N., and Tadros, M. K.(2001), "Creep, Shrinkage and Modulus of Elasticity of High Performance Concrete", ACI Materials Journal, 98(6), 440-449.
11. Inaudi, D., and Casanova, N. (2000), "Geo-structural monitoring with long-gage interferometer sensors", SPIE Proceedings, 3995, pp. 164-174.
12. Kim, J.M., Kim, H.W., Park, Y.H., Yang, I.H., and Kim, Y.S. (2012), "FBG sensors encapsulated into 7-wire steel strand for tension monitoring of a prestressing

-
- tendon", *Advances in Structural Engineering*, Vol. 5, No. 6, pp. 907–917.
13. Kim, Y.S., Sung, H.J., Kim, H.W., and Kim, J.M. (2011), "Monitoring of tension force and load transfer of ground anchor by using optical FBG sensors embedded tendon", *Smart Structures and Systems*, Vol. 7, No. 4.
 14. Lauzon R.G., DeWolf J.T. (1995), "Full-Scale Bridge Test to Monitor Vibrational Signatures", *Natural Hazards Mitigation*, pp.1089–1094.
 15. Lin, T.Y. (1963). *Design of Prestressed Concrete Structures*, John Wiley & Sons, USA.
 16. Meltz, G. (1996), "Overview of fiber grating based sensors", *SPIE Proceedings*, 2838, pp. 2–22.
 17. Miyamoto, A., Tei, K., Nakamura, H. and Bull, J.W.(2000), "Behavior of Prestressed Beam Strengthened with External Tendons", *Journal of Structural Engineering*, 126(9), 1033–1044
 18. Moss R. (1995), "In-Service Monitoring of Structures", *IABSE Symposium*, San Francisco, Vol.73/2, pp.905–910.
 19. Nellen, P.M., Bronnimann, R., Frank, A., Mauron, P., and Sennhauser, U. (1999), "Structurally embedded fiber Bragg gratings: Civil engineering application", *SPIE Proceedings*, 3860, pp. 44–54.
 20. Pessiki, S., Kaczinski, M. and Wescott, H.H.(1996), "Evaluation of Effective Prestress Force in 28-Year-Old Prestressed Concrete Bridge Beams", *PCI Journal*, 41(6), 78–89.
 21. Ren, L., Li, N-H., Sun, L., Li, D-S. (2005), "Development of tube-packaged FBG strain sensor and application in the vibration experiment of submarine pipeline model", *SPIE Proceedings*, 5770, pp. 199–204.
 22. Rostam S. (1987), "Bridge Monitoring and Maintenance Strategy", *US-European Workshop on Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation*, pp. 146–158.
 23. Rücker W.F., Sai S., Rohrmann R.G., Schmid, W. (1995), "Continuous Load and Condition Monitoring of a Highway Bridges", *IABSE Symposium*, San Francisco, Vol.73/2, pp.1105–1110.
 24. Saiidi, M. S., Shields, J., O'Connor, D. and Hutchens, E.(1996), "Variation of Prestress Force in a Prestressed Concrete Bridge During the First 30 Months," *PCI Journal*, 41(5), pp.66–72.
 25. Seunghye Park, Ju-Won Kim, Minjun Nam, Jongjae Lee (2013), "Magnetic Flux Leakage Sensing-based Steel Cable NDE Technique Incorporated on a Cable Climbing Robot for Bridge Structures", *Advances in Science and Technology*,
-

26. Seunghye Park, Ju-Won Kim, Minjun Nam, Jongjae Lee (2014), "Magnetic Flux Leakage Sensing-Based Steel Cable NDE Technique", Shock and Vibration, Vol.2014, Article ID 929341, pp.1-8
 27. Shin, K.J., Kim, Y.Y. and Lee, H.W. (2014) "Frictional Loss of Prestress Caused by Deflected Tendon", Applied Mechanics and Materials, Vol. 513-517, pp. 2599-2602.
 28. Stallings J. M., Barnes R. W. and Eskildsen S.(2003), "Camber and Prestress Losses in Alabama HPC Bridge Girders", PCI Journal, 48(5), 90-104.
 29. Tassi, G. and Rozsa, P.(1992), "Forces in Prestressed Concrete Bridges Constructed by Free Cantilevering", Periodica Polytechnica Civil Engineering, 36(3), 355-361.
 30. Wang, M.L., and 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, Vol. 3995, pp. 492-500.
 31. Wollmann, C.L., Arrellaga, J.A., Breen, J.E. and Kreger, M.E.(1996), "Field Measurement of Prestress Losses in External Tendons", ACI Structural Journal, 93(5), 595-601.
 32. Zhou, Z., Zhang, Z., Deng, N., Zhao, X., Li, D., Wang, C., and Ou J. (2005), "Applications of FRP-OFBG sensors on bridge cables", SPIE Proceedings, 5765, pp. 668-677.
 33. 김기수 (2007), "미래의 토목공학 : 광섬유 센서를 이용한 사회기반시설 구조물의 스마트 모니터링 기법", 대한토목학회지 자연과 문명의 조화, Vol. 55. No. 4. pp. 81~91.
 34. 김윤용, 박용진, 방진욱, 신경준, 이환우 (2013), "블록-아웃을 이용한 연속화 거더의 긴장 손실 감소", 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표회 논문집, Vol. 18, No. 2. pp.409-410.
 35. 김재민, 김영상, 김현우, 서동남, 윤정방 (2008), "광섬유센서가 내장된 강연선을 이용한 교량의 장력 모니터링 방법", 한국전산구조공학회 논문집, 21(3), pp. 287~294.
 36. 김주원, 남민준, 박승희, 이종재 (2011), "Elasto-Magnetic 센서를 이용한 강재 케이블 국부 단면 감소 손상 탐지", 한국 비파괴검사학회 논문집, Vol.31, No. 4, pp. 360-366
 37. 김현우, 김재민, 김영진, 김영상 (2011), "스마트강연선을 이용한 UHPC 가로보의 횡방향 긴장력 계측", 한국전산구조공학회 정기학술대회 논문집.
 38. 문제길, 이재형 (1997), "PS 콘크리트 구조물에서 마찰손실을 고려한 긴장력 결정에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, Vol.17, No.1-1, pp. 88~99.
 39. 박영하, 강형택 (2003), "PS 강재의 인장관리를 위한 마찰평가법 적용 기준", 대한토목
-

40. 박승희, 김주원, 이창길, 이종재, 길홍배 (2012), “다채널 자속누설 센서를 이용한 강케이블의 북부 단면손상 검색”, 한국전산구조공학회 논문집, Vol.25, No. 4, pp. 287-292
41. 전세진, 박종철, 박인교, 심 별 (2009), “실측값에 근거한 마찰계수의 추정”, 대한토목학회 논문집, Vol.29, No.5A, pp. 487~494.
42. 정근배, 한경봉, 박선규 (2000), “PS 긴장재의 마찰손실량에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 학회지, 20(5), pp. 797~804.
43. (주)성환이앤씨, 추태현.(2011) “단부돌출블록 및 연속지점부 상단공간부를 이용한 다경간 피에스씨 거더교 시공방법”, 대한민국 특허 등록 제 10-1080945 호
44. (주)성환이앤씨, 추태현.(2011) “단부돌출블록을 이용한 다경간 피에스씨 거더교 시공방법”, 대한민국 특허 등록 제 10-1080944 호