건설교통 R&D 정책 · 인프라사업 최종 보고서

08TRPI-C051831-01

교량 및 지반보강을 위한 스마트텐던 기술의 사업화를 위한 추가기술개발 및 검증 연구보고서

2010. 02.

주관연구기관 / 한국유지관리(주)
협동연구기관 / 전남대학교

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

Land Transport and Maritime R&D Report

RP05066

제 출 문

국토해양부 장관 귀하

이 보고서를 "교량 및 지반보강을 위한 스마트 텐던 기술의 사업화를 위한 추가기술개발 및 검증에 관한 연구"과제의 보고서로 제출합니다.

2010. 02.

주관연구기관명 : 한국유지관리(주)
주관연구책임자 : 윤 종 구
연 구 원 : 강 형 구
" : 송 종 섭
" : 김 동 하
" : 백 종 호
" : 정 응 혁
" : 박 용 민
" : 허 윤
" : 박 은 천
" : 김 창 엽
" : 심 보 현

협동연구기관명 : 전남대학교 산학협력단
협동연구책임자 : 김 영 상
연 구 원 : 강 형 구
" : 김 재 민
" : 김 현 우
" : 성 현 종
" : 유 근 모
" : 김 진 원
" : 조 대 룡
" : 송 명 석
" : 강 경 오

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>08TRPI-C051831-01</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2008.12.29.
~2010.02.28.</td><td>단 계 구 분</td><td>(해당단계)/
(총 단 계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">건설교통기술연구개발과제</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">건설교통 R&D정책・인프라</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">교량 및 지반보강을 위한 스마트 텐던 기술의
사업화를 위한 추가기술개발 및 검증</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">윤 종 구</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 21명
내부 : 14명
외부 : 7명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부 :
200,000천원
기업 :
153,350천원
계 :
353,350천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 21명
내부 : 14명
외부 : 7명</td><td>총연구비</td><td>정부 :
200,000천원
기업 :
153,350천원
계 :
353,350천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국유지관리(주)</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">한국유지관리(주)
(주)삼우기초기술</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="2">상대국명 :</td><td colspan="3">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>공 동 연 구</td><td colspan="2">연구기관명 : 전남대학교 산학협력단</td><td colspan="3">연구책임자 : 김 영 상</td></tr>
<tr><td colspan="3">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">광섬유 센서가 내장된 스마트 텐던을 교량 및 어스앵커에 적용한 사업화를 위한 추가기술개발 및 검증</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">스마트 텐던, 스마트 앵커, 스마트 거더, 추가개발, 공정최적화</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Smart Tendon, Smart Anchor, Smart Girder, Additional Development, Process Optimization</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 교량 및 지반보강을 위한 스마트 텐던 기술의 사업화를 위한 추가기술개발 및 검증

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

PS 강연선은 토목 및 건축 구조물에 다양한 형태로 광범위하게 활용되고 있으며, PS 강연선의 사용이 증가함에 따라 이를 사용한 PSC(Prestressed Concrete) 교량 및 지반 보강용 앵커의 손상과 붕괴사고도 증가하고 있는 것으로 파악된다.

이에 본 연구는 광섬유 센서가 내장된 스마트 텐던을 교량 및 어스앵커에 적용하여 토목 및 건축 구조물 붕괴사고를 예방할 수 있는 스마트 텐던의 사업화를 위한 추가기술개발 및 검증연구를 수행함으로써 건설기술의 발전에 이바지하는 것을 최종목표로 한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

(1) 스마트 텐던의 원가절감 기술 개발
- FBG(Fiber Bragg Grating) 광섬유 센서 원가 절감을 위한 대량생산 방법 검토

(2) 스마트 텐던의 최적 공정 개발
- 중공튜브 연속공정 개발
- 광섬유 센서와 중공튜브 접합 공정 개발

(3) 스마트 텐던의 내구성 확보 기술 개발

(4) 스마트 텐던의 교량 활용을 위한 적용 기술 개발
- 스마트 텐던 제작 및 검증실험

(5) 스마트 텐던의 지반 구조물 활용을 위한 적용 기술 개발
- 인장형 스마트 앵커의 제작
- 스마트 앵커의 현장 검증 실험

(6) 장력 모니터링 통합 Software 개발

Ⅳ. 연구개발결과

스마트 텐던을 11.5m의 실대형 인장형 앵커에 적용한 결과, 자유장 FBG센서에서 측정된 변형률을 이용하여 스마트 텐던에 작용하는 긴장력을 간단히 추정할 수 있으며,

스마트 텐던의 자유장에서 측정된 변형률로부터 산정한 긴장력 추정값(Pestimated)은 앵커 두부의 로드셀에 의해 측정된 강연선의 긴장력(Pmeasured)과 비교한 결과 작용하중 10tonf 정도까지는 거의 일치하는 값을 제공하여 개발된 스마트 텐던의 장력측정 능력을 검증하였으며 현재 로드셀 형식으로 사용되고 있는 시험 앵커 장력 측정 방법의 대체 가능성을 확인하였다.

40m 이상의 장지간 거더에 적용 가능한 스마트 텐던을 제작하기 위해 40m 이상의 중공 킹케이블 제작기술 확보하였으며, 13bar 이상 중고압의 주입제 주입기술 및 접착성, 유동성과 지연성 등 효율이 높은 주입제(에폭시) 성능을 개선하였다. 또한 광섬유의 접합이 없는 센서 제작기술을 확보함으로서 광섬유센서의 계측성능을 개선하였다.

제안된 광섬유 센서를 이용한 스마트 텐던을 앵커에 적용하여 도심 굴착 및 영구 보강사면의 장력 모니터링에 활용할 경우 흙막이 토류벽 및 영구 보강사면의 안전관리 및 장기 모니터링에 매우 효과적이며, 자동화 유지관리 시스템 구축도 용이할 것으로 기대된다.

스마트 텐던을 이용한 교량의 실용화를 통하여 기대되는 효과는 PS 강연선을 이용한 교량의 장력의 효율적 계측과 관리, PS 강연선을 사용하는 교량 및 대형구조물의 프리스트레스 특성을 파악하고, 현재 시방서에서 사용되고 있는 마찰계수(파상마찰계수 & 곡률마찰계수) 기준 값의 타당성을 검증할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 스마트 텐던의 사업화를 통하여 고성능 시설물 안전관리 시스템을 실현으로 구조물의 피해예측분석 및 사전예방관리가 가능하고, 기존 선진국에서 시행되고 있는 보수 · 보강 및 보수보강재를 통한 계측 기술을 뛰어넘을 수 있는 핵심기술로써 토목계측, 보수보강 및 구조물 안전 모니터링 분야에서도 큰 기술력을 확보 할 수 있을 것으로 기대된다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

(1) 현장적용 방안

최근 국내의 경우 “급경사지 재해 예방에 관한 법률”에 제정되어 시행되고 있어, 지방자치단체장이 위험하다고 판단되는 급경사지에 대하여 의무적으로 모니터링을 수행해야 한다. 스마트텐던을 이용한 어스앵커는 자가 진단이 가능한 보강재로 활용할 수 있어 사면 보강재 시장으로 진출이 용이할 것으로 판단된다.

또한, 교량용 보수보강재로 현장에 적용하여 실적을 확보하면서 기존 거더 및 앵커 제작, 시공업체와의 전략적 제휴를 통해 신규제품에 적용할 계획이며, 지방자치단체나 한국건설기술연구원, 국립방재연구소 등의 수요기관들과 협력하여 시장의 요구사항을 만족시킬 수 있도록 중장기 성능검증을 수행하여, 시설물 모니터링 시장에 진입할 예정이다.

(2) 실용화·제품화 방안

스마트 텐던을 시설물의 모니터링에 활용하기 위하여 우선 가격 경쟁력을 갖추어야 한다. 본 연구를 통하여 스마트 텐던의 제작원가를 대폭 절감할 수 있었으나, 향후 추가적인 기술 개발 및 대량 생산기술 개발을 통하여 추가적인 원가절감 방안을 마련할 계획이다. 또한, FBG센서의 자체 생산과 중공 킹케이블 생산의 다각화 등을 통하여 안정적인 원재료 공급선 확보에 주력할 예정이다.

광섬유 센서를 이용한 구조물 계측용역 및 모니터링 시스템 구축 사업 분야를 확장하여 광섬유 복합 강연선(Smart Tendon) 기술을 사업화하고 모니터링 시스템을 옵션으로 제공하는 방식으로 사업화 추진 중에 있다.

스마트 텐던의 이상적인 사업화 모델로 설정한 기존 업체와의 전략적 제휴 방안을 모색하고 기존 PSC 교량용 거더(PSC I 거더 등)와 스마트 텐던을 결합한 스마트 거더, 기존 어스앵커와 스마트 텐던을 결합한 스마트 앵커 등의 신제품을 추가적으로 개발하여 제품화할 예정이다.

SUMMARY

Ⅰ. Advancement and Verification of the Smart-Tendon technology and its business development.

Ⅱ. Research objective and principle

PS strand is utilized variously in architecture and civil structure area, which most PSC bridge and ground support anchor use this material. This range of usage of PS strand in the field, it also increase accident and event caused by.

As this reason, our research focused on embedding a FBG(Fiber Bragg Grating) sensor on bridges and earth anchor in civil and architecture structure to prevent ground collapse. This research and development of Smart-Tendon would generate in various field of construction business.

Ⅲ. Research development and its range

(1) Developing of cost reduction plan in the Smart-Tendon
- Research on cost reduction plan for FBG sensor

(2) Develop optimum plan for producing the Smart-Tendon
- Developing continuous produce plan of the seamless type tube
- Developing conjunction processor of the FBG sensor and seamless tube

(3) Developing the durability of Smart-Tendon

(4) Develop application technique on bride with the Smart-Tendon
- Development and verification of the Smart-Tendon

(5) Develop application technique on ground-supported structure with the Smart-Tendon
- Producing the tension-type Smart-Tendon
- Verifying Smart-Tendon with field tests

(6) Develop an integrated software of Smart-Tendon's tension

Ⅳ. Research and development result

As the result of applying Smart-Tendon of 11.5m within tensioned anchor, it could effortlessly measure of strain(FBG1). With this measurement from the

Smart-Tendon, it compared to be compatible till 10ton between strain of unbonded length's estimated value(Pestimated) and embeded loadcell by earth anchor's measurement in strand's tension(Pmeasured). This shows feasibility and compatibility of Smart-Tendon with other existing method that could be a good investment for the next generation of anchor system.

To produce the practicable Smart-Tendon of over 40m gutter, procure the hollow cable production technique. With this hollow cable, acquiring the technique of the fiber optic sensor without conjugation, which improve the previous fiber optic sensor production method. Addition to this technique, injection and adhesion method was appended in over 13bar.

With this report, suggested fiber optic sensor; Smart-Tendon, utilized in excavation's retaining wall and reinforced slope would be effective when it created as a monitoring system created to maintain construction site.

Impact of using Smart-Tendon with PS strand on bridge, will be greatly effective on measurement and monitoring to maintain. Study on the structure like bridges, buildings that constructed by PS strand, and compare present coefficient of friction(curvature friction coefficient & wobble friction coefficient) value. In addition to make Smart-Tendon technology into the business, is to systemize structure maintenance system's method and prevention system scheme. With this research and development will improve previous measurement method into different level and have the core technology of civil and architecture part.

Ⅴ. Research and development plan

(1) Plan for the compatibility on the field.

First, develop a present gutter and anchor on bridge, which feasible on the field. And conjunct with a construction company to imply on brand new product by creating test bed and other related research institutes, KICT and other local government.

(2) Plan of producing the practical product

Develop a business model of fiber optic sensor measurement system and monitoring solution like Smart-Tendon.

With research of Smart-Tendon and its business development structure, will

create new strategy for PSC bridge gutter with Smart-Tendon to improve into new product and technology integrations.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction ····· 1

Sec 1. Research and development introduction ····· 1
1. The summary of development and study ····· 1
2. The goal of development and study ····· 2
a. Technical Part ····· 2
b. Economical Part ····· 3

Sec 2. The purpose of development and study ····· 3
1. The ultimate goal of developing and study ····· 3
2. The goal of study and content ····· 3

Chapter 2. Present domestic and overseas status on development of relevant technology ····· 9

1. Development of present technology ····· 9
a. Research on domestic and overseas status on development of relevant technology ····· 9
b. Fiber optics sensor technology ····· 18
c. Example of domestic and overseas usage of relevant technology ····· 24

Chapter 3. Development of Smart-Tendon technology ····· 29

Sec 1. Development of relevant technology on ground-structure ····· 29
1. Introduction of relevant technology on ground-structure ····· 29
a. Anchor type and characteristic ····· 29
b. Method of measurement on anchor tension ····· 30
2. Smart anchor ····· 32
a. Introduction of Smart-Tendon ····· 33
b. Development of Smart-Tendon ····· 34
c. Produce of practical sized Smart-Tendon ····· 35
3. Smart anchor field test ····· 44
a. Field installation of anchor and test tool ····· 44
b. Test method ····· 48
4. Test installation of anchor for monitoring slope ····· 59
a. Compression type anchor ····· 59
b. Tension type anchor ····· 62

Sec 2. Development of Smart-Tendon on bridges ····· 64

1. Development of fiber safety cap ····· 64
2. Development and test of Smart-Tendon ····· 67
a. Performance test of adhesive ····· 67
b. Development of resin injection kit and test ····· 70
3. Test of Smart-Tendon on bridges ····· 72
a. Test on Smart-Tendon's 60m PSC I-gutter ····· 72
b. Develop 64.0m lengthen Smart-Tendon ····· 75
c. Smart-Tendon's FBG sensor wavelength change ····· 76
d. Installation and measurement test of Smart-Tendon 60m I-gutter ····· 78
e. Sequence of tension by machine on 60m I-gutter ····· 79
f. Test result ····· 81
4. Test of Smart-Tendon 40m IPC I-gutter ····· 84
a. Specification of 40m PSC I-gutter ····· 84
b. FBG and sensor installation ····· 85
6 c. Sequence of tension by machine on 40m I-gutter ····· 86
8 d. Calculation on coefficient of friction ····· 88
e. Produce 43.0m Smart-Tendon ····· 92
f. 43.0m Smart-Tendon and measurement installation ····· 93
g. Test result ····· 96

Sec 3. Integrated Monitoring Software ····· 109

Sec 4.. Result ····· 116

Chapter 4. Achievement of objective and related field ····· 118

1. Achievement of objective ····· 118
a. Research objective and substance ····· 118
b. Research objective and outcome ····· 118
2. The contribution in the related field ····· 120
a. Cost reduction ····· 120
b. The contribution to co-related field ····· 126

Chapter 5. Utilizing the research result ····· 128

1. Utilizing plan for the research result ····· 128
a. Field compatibility plan ····· 128
b. Practical-manufacturing plan ····· 128
c. Other aspect ····· 128
2. Business plan for the research result ····· 129

a. Participating company's role ····· 129
b. Analysis of participating company ····· 130
3. Smart-tendon's business plan ····· 136
4. Product introduction ····· 136
5. Production plan ····· 136

Chapter 6. Overseas scientific technology information ····· 155

Referene ····· 161

Appendix ····· 163

목 차

제1장 연구개발 개요 ····· 1

제1절 연구개발의 필요성 ····· 1
1. 연구개발 개요 ····· 1
2. 연구개발의 필요성 ····· 1
가. 기술적 측면 ····· 1
나. 경제·산업적 측면 ····· 2
제2절 연구개발 목표 및 내용 ····· 3
1. 연구개발의 최종 목표 ····· 3
2. 연구개발의 내용 및 범위 ····· 3

제2장 국내외 기술개발 현황 ····· 9

1. 기술현황 ····· 9
가. 국내외 관련 시장조사 ····· 9
나. 광섬유 센서 기술 ····· 18
다. 국내·외 적용사례 ····· 24

제3장 스마트 텐던의 활용기술 개발 ····· 29

제1절 지반구조물 활용기술 개발 ····· 29
1. 지반구조물 활용기술 개발 개요 ····· 29
가. 앵커(Anchor)의 종류 및 특성 ····· 29
나. 앵커의 장력 측정방법 ····· 30
2. 스마트 앵커 ····· 32
가. 스마트 텐던의 개념 ····· 33
나. 스마트 텐던의 제작 ····· 34
다. 실대형 스마트 앵커의 제작 ····· 35
3. 스마트 앵커 현장 인발실험 및 시험시공 ····· 44
가. 앵커의 현장설치 및 인발실험 장비 ····· 44
나. 인발실험 방법 ····· 48
4. 사면 모니터링을 위한 앵커의 시험시공 ····· 59
가. 압축형 앵커 ····· 59
나. 인장형 앵커 ····· 62

제2절 스마트 텐던의 교량활용 기술개발 ····· 64
1. 보호정착구 개발 ····· 64
2. 장비제작 및 성능시험 ····· 67
가. 충진제 접착성능 ····· 67
나. 레진 주입장치제작 및 충진제 주입시험 ····· 70
3. 스마트 텐던의 교량적용 시험 ····· 72
가. 스마트 텐던의 60m PSC I-거더 적용시험 ····· 72
나. 길이 64.0m 스마트 텐던 제작 ····· 75
다. 스마트 텐던 제작 중 FBG센서 파장변화 ····· 76
라. 60m I-거더에 스마트 텐던 설치 및 계측준비 ····· 78
마. 길이 60m I-거더의 긴장장치를 이용한 긴장순서 ····· 79
바. 시험결과 ····· 81
4. 스마트 텐던의 40m IPC I-거더 적용시험 ····· 84
가. 40m PSC I-거더의 제원 ····· 84
나. FBG 및 계측센서 설치 ····· 85
다. 길이 40m IPC I-거더의 긴장장치를 이용한 긴장순서 ····· 86
라. 이론적 마찰손실량 계산 ····· 88
마. 길이 43.0m 스마트 텐던 제작 ····· 92
바. 43.0m 스마트 텐던 설치 및 계측기기 설치 ····· 93
사. 시험결과 ····· 96

제3절 통합 모니터링 Software ····· 109
1. 프로그램 개요 ····· 109
2. 통합 모니터링 구성 및 상세 사양 ····· 109

제4절 결 론 ····· 116

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 118

1. 목표달성도 ····· 118
가. 연구목표 및 주요 연구내용 ····· 118
나. 연구목표 및 연구성과 ····· 118
2. 관련분야에의 기여도 ····· 120
가. 원가절감 ····· 120
나. 타 산업에 미치는 효과 ····· 126

제5장 연구개발결과의 활용계획 ····· 128

1. 연구결과의 활용방안 ····· 128

가. 현장적용 방안 ····· 128
나. 실용화·제품화 방안 ····· 128
다. 기타 활용방안 ····· 128
2. 연구 성과의 기업 활용방안 ····· 129
가. 참여기업 역할 ····· 129
나. 참여기업의 현황분석 ····· 130
다. 기관 연계방안 ····· 134
3. 스마트텐던의 사업화 ····· 136
가. 사업 개요 및 필요성 ····· 136
나. 사업화 위험요소(Risk) 분석 ····· 148
다. 추가 기술개발 로드맵(TRM) 작성 ····· 140
라. 단계적 기술개발 계획 ····· 141
4. 스마트 텐던 제품소개 ····· 145
가. 인장형 스마트앵커 ····· 145
나. 압축형 스마트 앵커 ····· 145
5. 생산계획 및 생산설비 ····· 149
가. 생산계획 ····· 149
나. 생산인력 및 원부자재 조달 ····· 151

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 … 155

1. 광섬유센서를 이용한 국외 적용사례 ····· 155
2. 강연서 변형률 및 장력측정 국내·외 적용사례 ····· 159

제7장 참고문헌 ····· 161

부 록 ····· 163

표 목 차

표 2.1 전국 교량중 PSC 교량 현황 ····· 11
표 2.2 국내 PSC교량 형식별 분포 ····· 11
표 2.3 2003년 고속도로 건설 평균 단가(추정) ····· 13
표 2.4 2003년 PSC 교량 형식별 건설비(추정) ····· 14
표 2.5 어스앵커 시장규모 ····· 18
표 3.1 인장형 앵커 제원 ····· 37
표 3.2 압축형 앵커 제원 ····· 38
표 3.3 앵커의 설계하중(25tonf)까지의 하중재하 단계(a) ····· 50
표 3.4 앵커의 극한강도 확인을 위한 하중재하 단계(b) ····· 51
표 3.5 정착장 전체길이의 변형률 분포 회귀모델식-앵커 7 & 앵커 8 ····· 59
표 3.6 앵커 설치현황 ····· 61
표 3.7 압축형 앵커 가인장 하중 ····· 63
표 3.8 앵커 설치현황 ····· 64
표 3.9 Smart Tendon의 시험 개수 및 특징 ····· 68
표 3.10 FBG센서의 위치 및 초기파장(Passive End 기준) ····· 76
표 3.11 FBG센서의 파장변화 ····· 78
표 3.12 텐던의 긴장순서 ····· 81
표 3.13 IPC 거더 40m 3경간 1본당 수량 ····· 85
표 3.14 단계별 긴장순서 ····· 88
표 3.15 40m IPC 거더 긴장재위치(쉬스관중심) ····· 90
표 3.16 긴장재 거리별 각 변화량 ····· 91
표 3.17 각 쉬스관의 초기 프리스트레스력 ····· 92
표 3.18 Active측 장력도입 시간에 따른 외부 온도변화 ····· 97
표 3.19 Passive측 장력도입 시간에 따른 외부 온도변화 ····· 97
표 3.20 쉬스관 1번의 초기 프리스트레스력 이론치와 계측치 비교 ····· 99
표 3.21 쉬스관 1번의 다단계 긴장에 의한 탄성손실 결과 ····· 101
표 3.22 쉬스관 2번의 초기 프리스트레스력 이론치와 계측치 비교 ····· 103
표 3.23 쉬스관 3번의 초기 프리스트레스력 이론치와 계측치 비교 ····· 106
표 3.24 Active측 긴장완료 후 즉시손실 계측결과 ····· 108
표 4.1 연차별 연구목표 및 주요 연구내용 ····· 119
표 4.2 연차별 연구목표 및 주요연구성과 ····· 120
표 5.1 한국유지관리 일반 현황 ····· 132
표 5.2 경영상태 ····· 132
표 5.3 국가 및 공공기관 연구개발사업 참여 실적 ····· 133
표 5.4 삼우기초기술 일반현황 ····· 134
표 5.5 경영상태 ····· 134

표 5.6 기술보유 현황 ····· 135
표 5.7 연구기관의 연계방안 ····· 136
표 5.8 위험요인과 제거 및 저감 방법 ····· 140
표 5.9 시장니즈별 핵심요구기능 ····· 141
표 5.10 핵심요구기능별 주요 요소기술 ····· 142
표 5.11 1단계 주요 요소기술별 성능목표 ····· 143
표 5.12 2단계 주요 요소기술별 성능목표 ····· 144
표 5.13 스마트 텐던 예상 매출액 ····· 151
표 5.14 초기 투자 비용 ····· 151

그 림 목 차

그림 1.1 Phase Mask를 이용한 FBG 제조 방법 ····· 4
그림 1.2. Excimer Laser와 FBG Setup Image ····· 4
그림 1.3 광섬유 센서 삽입 공정 개념도 ····· 5
그림 1.4 그라운드 앵커의 적용(출처:www.swanchor.com) ····· 5
그림 1.5 그라운드 앵커의 분류 ····· 6
그림 1.6. 인장형 앵커의 하중전이 ····· 6
그림 1.7 스마트 앵커체 구조 및 상세도 ····· 8
그림 1.8 스마트 앵커체 및 긴장력 관리 모식도 ····· 9
그림 2.1 국내 프리스트레스 콘크리트(PSC)교량 ····· 10
그림 2.2 연도별 PSC교량 건설 현황 ····· 12
그림 2.3 PSC교량 형식별 건설비 추이 ····· 15
그림 2.4 PSC교량 전체 건설비 추이 ····· 15
그림 2.5 어스앵커 사용 예시 ····· 16
그림 2.6 로드셀을 이용하는 어스앵커 적용 모습 ····· 17
그림 2.7 변형률계(Strain Gauge) 제품 모습 ····· 18
그림 2.8 어스앵커 생산 규모 및 시장 규모 ····· 19
그림 2.9 광섬유 구조 ····· 20
그림 2.10 광섬유 전반사 ····· 20
그림 2.12 FBG센서의 파장변화 ····· 21
그림 2.14 광섬유를 이용한 교량 유지관리 시스템 ····· 25
그림 2.15 구조물 계측 시스템 ····· 26
그림 2.16 외국에서 개발된 FRP 보강근 및 긴장 케이블 ····· 28
그림 2.17 FBG 센서가 삽입된 FRP bars ····· 28
그림 2.18 Smart FRP-OFBG based bridge cable ····· 28
그림 2.19 FBG 센서를 삽입한 steel wire cable ····· 29
그림 2.20 FRP-OFBG Based cable 이 적용된 Erbine Bridge ····· 29
그림 3.1 그라운드 앵커의 적용(출처:www.swanchor.com) ····· 30
그림 3.2 그라운드 앵커의 분류 ····· 31
그림 3.3 인장형 앵커 ····· 32
그림 3.4 하중 집중형 앵커 ····· 32
그림 3.6 스마트 텐던의 개념도 ····· 34
그림 3.7 FBG 센서의 구조 및 측정원리 ····· 35
그림 3.8 스마트 텐던 제작과정 ····· 36
그림 3.9 스마트 앵커체 강연선 배치도 ····· 37
그림 3.10 앵커타입 2-point 온도보정 FBG센서 모식도 ····· 38
그림 3.11 인장형 앵커 센서 배치도 ····· 41

그림 3.12. 압축형 앵커 센서 배치도 ····· 43
그림 3.13 스마트 앵커(인장형) 제작과정 ····· 44
그림 3.14 스마트 앵커(압축형) 제작과정 ····· 45
그림 3.15 현장 인발실험용 앵커 설치(1) ····· 47
그림 3.16 현장 인발실험용 앵커 설치(2) ····· 48
그림 3.17 현장인발 장비 및 계측장비 ····· 48
그림 3.18 FBG 센서로 측정된 하중재하에 따른 시간-변형률(앵커 7) ····· 52
그림 3.19 FBG 센서로 측정된 하중재하에 따른 시간-변형률(앵커 8) ····· 52
그림 3.20 FBG센서 배치도(앵커 7) ····· 53
그림 3.21 앵커에 작용하는 긴장력 분포(앵커 7) ····· 53
그림 3.22 앵커에 작용하는 긴장력 분포(앵커 7) ····· 54
그림 3.23 FBG센서 배치도(앵커 8) ····· 54
그림 3.24 앵커에 작용하는 긴장력 분포(앵커 8) ····· 54
그림 3.25 앵커에 작용하는 긴장력 분포(앵커 8) ····· 55
그림 3.27 매입형 몰드 게이지 배치도(앵커 7) ····· 57
그림 3.28 그라우트에 작용하는 하중분포 (앵커 7) ····· 58
그림 3.29 그라우트에 작용하는 하중분포 (앵커 8) ····· 58
그림 3.30 텐던-그라우트 접촉면의 전단응력 분포 ····· 60
그림 3.31 사면 모니터링용 압축형 앵커 설치현황 ····· 62
그림 3.32 사면 모니터링용 인장형 앵커 설치현황 ····· 65
그림 3.33 Smart Tendon의 보호정착구 부분명칭 ····· 66
그림 3.34 Smart Tendon의 보호정착구 조립도 ····· 66
그림 3.35 Smart Tendon의 보호정착구 시제품 설계도 ····· 66
그림 3.36 Smart Tendon의 보호정착구 시제품 ····· 67
그림 3.37 실용화를 위한 보호정착구 개선안 및 제작 ····· 67
그림 3.38 Smart Tendon FBG센서 시험준비 ····· 69
그림 3.39 Loading-Unloading-Reloading 결과 ····· 69
그림 3.40 파괴시험(Breaking Test)결과 ····· 70
그림 3.41 주입장치의 모식도 ····· 71
그림 3.42 주입장치의 제작 완료사진 ····· 72
그림 3.43 주입장치를 이용한 스마트 텐던 시스템 모식도 ····· 72
그림 3.44 60m PSC I 거더 단면도 및 단부 상세도 ····· 74
그림 3.45 제작된 길이 60m PSC I-거더 ····· 75
그림 3.46 FBG센서 배치도 ····· 75
그림 3.47 스마트 텐던 제작 순서 ····· 76
그림 3.49 FBG센서 스펙트럼 ····· 78
그림 3.50 FBG센서 파장변화 모니터링 ····· 79
그림 3.51 스마트 텐던 설치 및 계측준비 ····· 80
그림 3.52 대기 온도변화 계측 ····· 82
그림 3.54 Passive측 긴장작업에 의한 계측결과 ····· 84

그림 3.55 40m IPC 거더 제원 ····· 85
그림 3.56 FBG센서의 배치도 ····· 86
그림 3.57 LVDT 및 콘크리트용 변형률게이지 배치도 ····· 87
그림 3.58 강연선의 긴장순서 및 설계 긴장력 ····· 87
그림 3.59 긴장력의 시간이력 ····· 88
그림 3.60 마찰로 인한 PS 인장력의 손실량()(정배근, 2000) ····· 89
그림 3.61 IPC 거더 긴장재 배치곡선 ····· 90
그림 3.62 길이 43.0m 스마트 텐던 제작 과정 ····· 93
그림 3.63 길이 40m IPC I-거더 현장제작 ····· 94
그림 3.64 스마트 텐던 설치 및 계측준비 ····· 95
그림 3.65 콘크리트용 변형률게이지 및 LVDT 설치 ····· 96
그림 3.66 쉬스관 1번의 Active측 긴장에 장력 변화 ····· 98
그림 3.67 쉬스관 1번의 Active측 단계별 장력 변화 ····· 98
그림 3.68 쉬스관 1번의 거리 및 단계별 계측 긴장력 ····· 99
그림 3.68 쉬스관 1번의 이론적 긴장력과 실측치 비교 ····· 100
그림 3.70 쉬스관 1번의 이론적 마찰손실량과 실측치 비교 ····· 100
그림 3.71 쉬스관 1번의 다단계긴장에 의한 탄성손실 결과 ····· 101
그림 3.72 쉬스관 2번의 Active측 긴장에 장력 변화 ····· 102
그림 3.73 쉬스관 2번의 Active측 단계별 장력 변화 ····· 102
그림 3.74 쉬스관 2번의 거리 및 단계별 계측 긴장력 ····· 103
그림 3.75 쉬스관 2번의 이론적 긴장력과 실측치 비교 ····· 104
그림 3.76 쉬스관 2번의 이론적 마찰손실량과 실측치 비교 ····· 104
그림 3.77 쉬스관 2번의 Active측 긴장에 장력 변화 ····· 105
그림 3.78 쉬스관 3번의 Active측 단계별 장력 변화 ····· 105
그림 3.79 쉬스관 3번의 거리 및 단계별 계측 긴장력 ····· 106
그림 3.80 쉬스관 3번의 이론적 긴장력과 실측치 비교 ····· 107
그림 3.81 쉬스관 3번의 이론적 마찰손실량과 실측치 비교 ····· 107
그림 3.82 40m IPC I-거더 수평방향 탄성단축 계측결과 ····· 109
그림 3.83 40m IPC I-거더 횡방향 변위계측결과 ····· 109
그림 3.84 40m IPC I-거더 솟음량 계측결과 ····· 110
그림 3.85. 프로그램 UI ····· 111
그림 3.86 프로젝트 개요 화면 ····· 112
그림 3.87 노드맵 화면 ····· 113
그림 3.88 실시간 계측 화면 ····· 114
그림 3.89 실시간 계측 값 ····· 114
그림 3.90 계측 이력 화면 ····· 115
그림 3.91 알람 이력 화면 ····· 115
그림 3.92 보고서 작성 화면 ····· 116
그림 3.93 환경설정 화면 ····· 116
그림 4.1 1차년도 사업과제에서 도출된 광섬유센서 제작 단가 협의 결과 ····· 121

그림 4.2 FBG 센서 견적 내역 ····· 122
그림 4.3 본 과제의 기획단계에서 조사된 FBG 광섬유센서 제작 단가 ····· 123
그림 5.1 연구성과물의 참여기업 활용방안 ····· 131
그림 5.2 PS 강연선 또는 텐던의 적용 분야 ····· 138
그림 5.3 PS 텐던을 사용한 교량의 손상 또는 붕괴 사례 ····· 138
그림 5.4 흙막이 공사현장 붕괴사례 ····· 139
그림 5.5 1단계 주요 기술개발 로드맵(TRM) ····· 145
그림 5.6 2단계 주요 기술개발 로드맵(TRM) ····· 145
그림 5.7 스마트텐던 설치 및 격자블록 배근 ····· 147
그림 5.9 스마트텐던의 PSCI거더 적용 예상도 ····· 149
그림 5.10 한국유지관리(주) 인력 현황 ····· 152
그림 5.11 스마트텐던 사업화를 위한 전담조직 ····· 154
그림 6.1광섬유센서를 교량 모니터링에 적용한 미국의 사례 ····· 157
그림 6.2 SOFO 광섬유시스템의 응용 모식도(Inaudi, 2004) ····· 157
그림 6.3 광섬유센서를 토목구조물 모니터링에 적용한 스위스의 사례 ····· 158
그림 6.4 광섬유센서를 토목구조물 모니터링에 적용한 중국의 사례 ····· 159
그림 6.5 강연선 긴장력 측정방법 ····· 160
그림 6.6 강연선의 변형률 계측 대표적인 응용사례 ····· 161

제1장 연구개발 개요

제1절 연구개발의 필요성

1. 연구개발 개요

본 연구에서는 스마트 텐던 기술을 이용하여 FBG센서 제작 원가 절감 기술 개발, 스마트 텐던 제작을 위한 중공튜브 제작 원가 절감 방안, 스마트 텐던의 최적 공정 개발, 스마트 텐던의 내구성 확보 기술 개발, 스마트 텐던의 지반 구조물로의 활용을 위한 적용기술 개발, 스마트 텐던의 활용한 장력 모니터링 통합 SW개발 등을 수행하였다.

본 연구는 광섬유센서가 내장된 스마트 텐던을 교량 및 어스앵커와 교량 긴장재의 장력 모니터링에 활용하기 위한 추가기술개발 및 검증연구를 수행함으로써 향후 스마트 텐던을 이용한 많은 제품들이 건설시장에 성공적으로 진입할 수 있는 기초 기술을 개발하고자 한다.

2. 연구개발의 필요성

가. 기술적 측면

(1) 신규 아이템의 사업화를 위해 적어도 2~3년 이상의 기반 기술개발이 필요하나 당해 사업을 바탕으로 한 기술이전 및 사업화 기획을 통한 체계적인 추가기술개발을 통해 제품 상용화 기간을 단축할 수 있을 것으로 기대된다.

(2) 스마트 텐던 기술의 사업화를 바탕으로 한 고성능 시설물 안전관리 시스템 실현은 과학적 시설물 피해 예측분석 및 사전예방관리 중심의 선진국형 시설물 안전관리체계 구축으로 범정부적 시너지 효과 창출하고, 시설물 피해 및 예측기술 개발로 인해 국가 기반시설물 건설 시 안전한 토지이용이 가능하며 기존 국가 주요시설물의 장수명화 가능하다.

(3) IT를 비롯한 다양한 분야에서 집약적인 연구개발을 통해 괄목할만한 기술발전을 이룩하여 선진국과의 기술 수준 격차를 많이 해소해왔지만 여전히 센서, 계측기, 구조물 안전성 진단 및 모니터링과 관련된 분야에서는 대부분 수입품에 의존하고 있으며 국내 개발 제품들의 경우 신뢰성 결여로 현장에서 사용 기피되고 있는 실정이다.

(4) 당해 사업화 기술이 스마트 텐던의 경우 기존 선진국에서 시행되고 있는 보수보강 및 보수보강재를 통한 계측 기술을 뛰어넘을 수 있는, 기술경쟁력을 확보할 수 있

는 핵심기술로써 토목계측, 보수보강 및 구조물 안전도 모니터링 분야에서도 선진국과의 기술수준 격차를 해소할 수 있는 밑거름이 될 수 있을 것으로 기대된다.

(5) 또한, 시설물 안전성 확보를 평가하기 위한 현장조사·점검기법 및 조사장비와 같은 하드웨어분야에 있어서는 미국이나 일본과 같은 선진국의 기술수준이 우리나라의 기술수준을 상회하는 것은 사실이나, 첨단 IT기술을 접목한 평가기법 및 시스템통합분야에서는 우리나라가 오히려 선진국을 추월하고 있다고 볼 수 있으므로 하드웨어 분야의 기술은 선진 외국에서 도입하고 여기에 국내 첨단 IT기술을 접목하여 시설물 안전관리 기술 분야에 적용함으로써 선진국에 비해 기술적 우위를 점할 수 있을 것으로 예상된다.

(6) 본 사업을 통해 기초기술을 바탕으로 한 추가기술개발을 수행하면서 다수의 지적재산권(개량 특허, 디자인권, 상표권 및 프로그램 등) 출원 및 등록이 가능할 것으로 기대되어 사업화를 위한 기술경쟁력 확보 및 후발업체의 시장진입, 혹은 기술 침해에 대한 방어 가능 할 것으로 예상된다.

나. 경제·산업적 측면

(1) 제품의 상용화를 통하여 연간 수십억원의 추가 매출을 달성할 수 있을 것으로 예상되고, 스마트 텐던의 기존 제품과의 융합을 통한 신규 시장을 개척할 경우 연간 백억원 이상의 매출이 가능할 것으로 기대된다.

(2) 본 추가기술개발을 통해 스마트 텐던 제작이 소요되는 원가를 절감하고 생산 공정기술의 최적화가 가능할 것으로 기대되고 생산인력의 숙련 과정을 통해 생산성을 향상시키고 비용을 절감하여 제품의 가격경쟁력을 확보할 수 있을 것이다.

(3) 토목계측, 구조물 안전정 모니터링, 보수보강 등의 분야에서 사용되는 센서, 계측기 등의 장비는 여전히 미국이나 일본 등의 기술선진국에 의존하고 있는 실정이지만 본 과제를 통한 스마트 텐던 기술의 상용화로 연간 수십~수백억원의 수입대체 효과뿐만 아니라 역으로 스마트 텐던 기술의 파생상품의 수출이 가능할 것으로 기대된다.

(4) 스마트 텐던 기술의 사업화를 바탕으로 한 고성능 시설물 안전관리 시스템 실현을 통해 국가 예산 낭비를 최소화 할 수 있으며 시설물 피해의 사전예측 및 최적 대응을 통한 사회간접비용의 최소화가 달성될 수 있을 것이다.

(5) 광섬유 센서를 이용하면 기존의 기술로는 센서의 동작이 불가능한 환경에서도 사용할 수 있으며, 이를 바탕으로 광섬유 센서는 지난 20여 년간 꾸준히 발전하였으며, 현재 군사용, 산업용, 그리고 의료용을 중심으로 사용이 비약적으로 증가함을 고려할 때, 앞으로 방대한 시장을 형성할 뿐 아니라 다른 산업에의 파급 효과도 매우 클 것으로 기대된다.

제2절 연구개발 목표 및 내용

1. 연구개발의 최종 목표

본 연구 목적은 광섬유 센서가 내장된 스마트 텐던을 교량 및 어스앵커에 적용한 사업화를 위한 추가기술개발 및 검증연구를 수행함으로써 향후 시장 진입을 위한 기초기술 개발이다.

2. 연구개발의 내용 및 범위

연구개발의 내용 및 범위는 다음과 같다.

(1) 스마트 텐던의 원가절감 기술 개발

○ FBG 센서 대량생산
- FBG 광섬유 센서 원가 절감을 위한 대량생산 방법 검토 :
  => FBG 제조용 Phase Mask를 이용한 최적의 FBG센서 제작 및 생산 방법 검토
- FBG 광섬유 센서 대량생산을 위한 설비(레이저 및 Set-up) 임대를 통한 초기 투자비용 절약 :
  => FBG 센서 전문제작 업체를 통한 안정적인 원재료 공급선 확보
- 대량 구매를 통한 원가절감 방안 모색

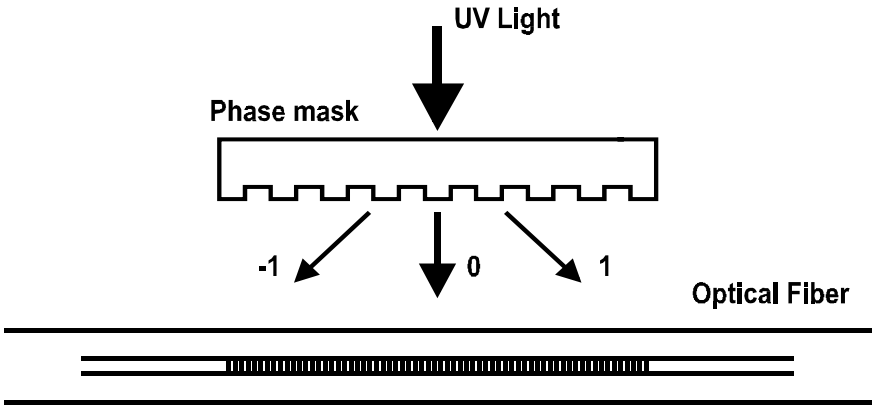


그림 1.1 Phase Mask를 이용한 FBG 제조 방법

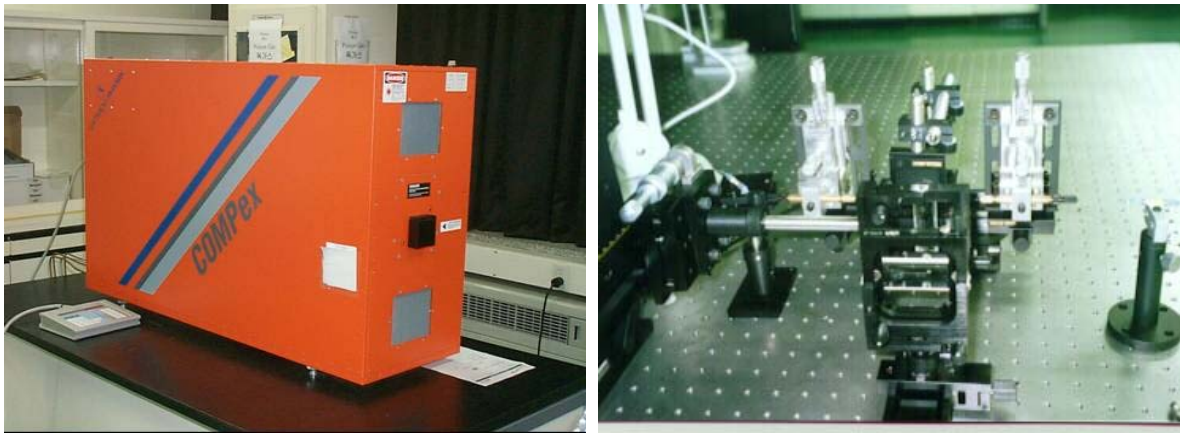


그림 1.2. Excimer Laser와 FBG Setup Image

(2) 스마트 텐던의 최적 공정 개발

○ 중공튜브 연속공정 개발
- 강재 튜브의 스플라이스 기술 개발
- 광섬유 센서와 중공튜브 접합 공정 개발
- 중공튜브 원가절감 방안

(3) 스마트 텐던의 내구성 확보 기술 개발

○ 스마트 텐던의 내구성 확보 위한 공정개발
- 광섬유 센서의 내구성 확보를 위한 연속 제조공정 개발

(4) 스마트 텐던의 교량 활용을 위한 적용 기술 개발

○ 스마트 텐던 제작 및 검증실험
- 스마트 텐던 제작 시스템 구축
- 길이 30m 스마트 텐던 제작
=> 30m 이상의 긴 스마트 텐던 제작을 위한 광섬유 센서 삽입 기술 개발

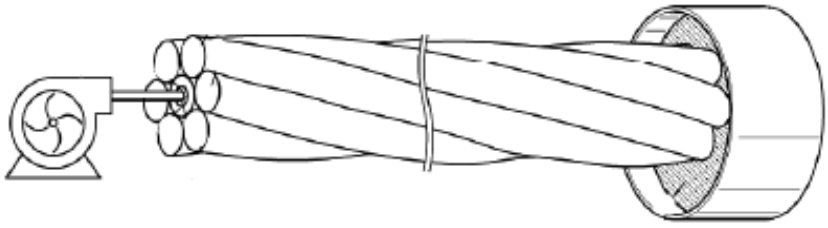


그림 1.3 광섬유 센서 삽입 공정 개념도

(5) 스마트 텐던의 지반 구조물로의 활용 위한 적용 기술 개발

앵커공법은 토목이나 건축의 구조물을 지반에 정착시키기 위하여 고강도 강재에 긴장력을 도입하여 주변지반의 변형을 최소화 할 수 있는 공법으로 아래 그림에 나타난 바와 같이 가설 토류벽의 지보공, 영구앵커 토류벽, 송전탑 기초, 댐의 보강, 지하구조물의 부력앵커, 사면 보강 등으로 널리 적용되고 있다.

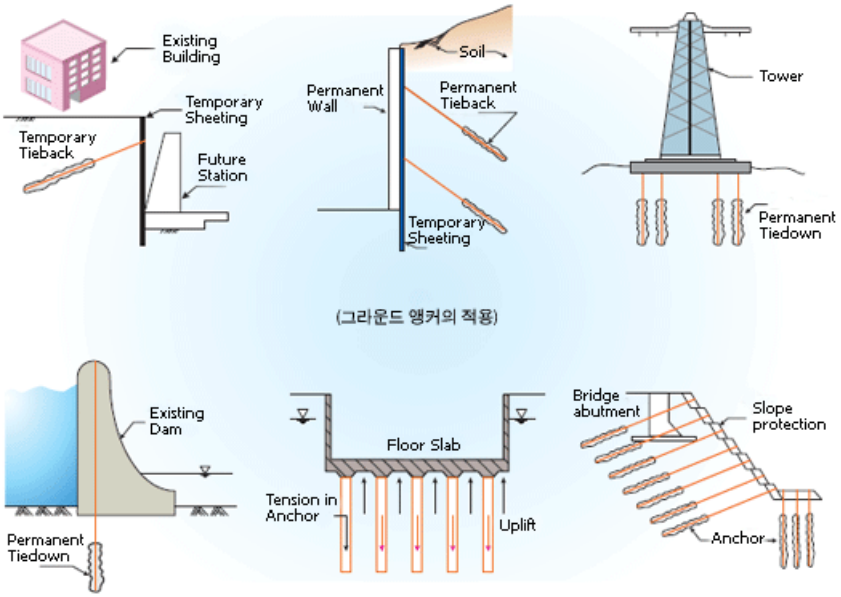


그림 1.4 그라운드 앵커의 적용(출처:www.swanchor.com)

한편 앵커는 지반의 종류, 설치되는 방향, 그라우트 방법, 사용기간, 지지방식 등에 따라 다양하게 분류될 수 있으며, 앵커가 정착되는 지반의 지지방식에 따라 그라우트와 지반의 마찰력으로 지지되는 마찰형 앵커, 지압판이나 파일 등을 사용하여 지반의 수동저항력으로 지지되는 지압형 앵커, 그리고 이들 두 방식이 복합된 복합형 앵커 등으로 분류할 수 있다. 이 중 광섬유센서를 이용한 모니터링에 가장 적합한 방식은 마찰형 앵커로 판단된다.

마찰형 앵커는 그라우트에 하중이 가해지는 방식에 따라서 인장형 앵커와 압축형 앵커로 분류할 수 있으며 압축형 앵커는 하중의 분포에 따라 다시 하중 집중형 앵커와 하중 분산형 앵커로 분류될 수 있다.

■ 그라운드 앵커의 분류

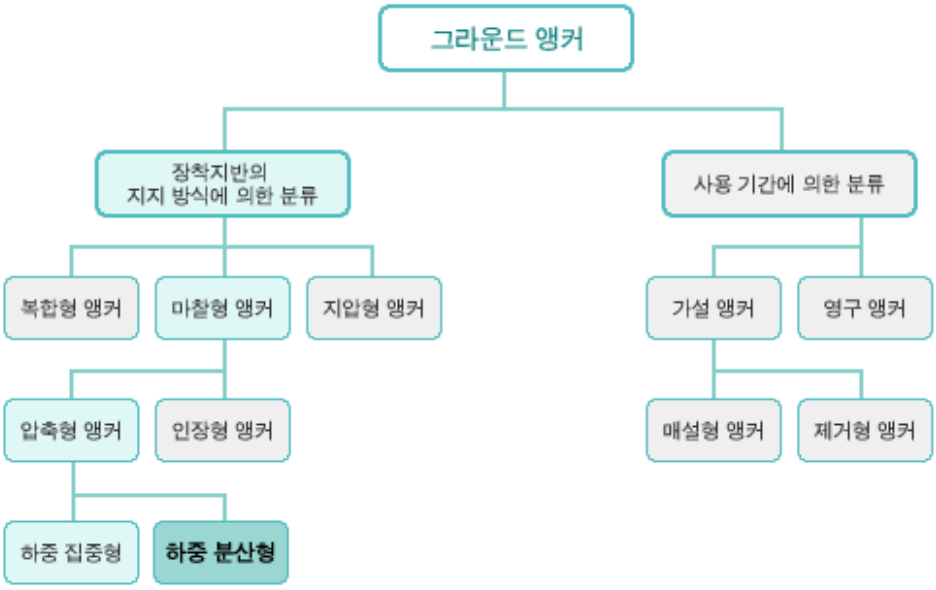
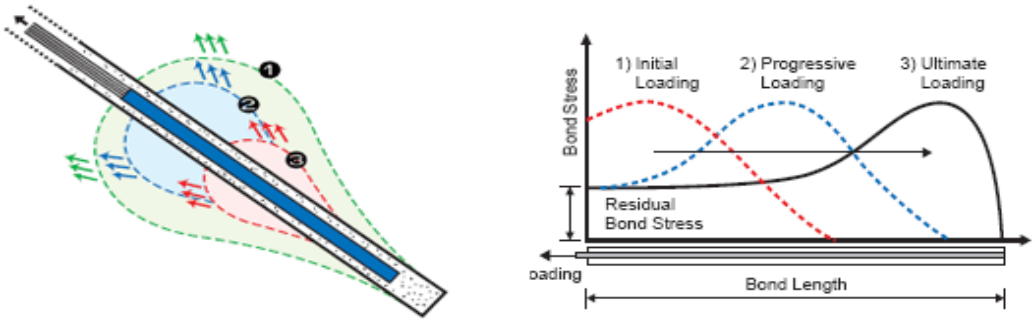


그림 1.5 그라운드 앵커의 분류

일반적으로 인장형 앵커는 그라우트 내의 인장 크랙(tension crack)과 하중집중으로 인한 크립(creep) 등으로 진행성파괴(progressive failure) 현상이 발생되며 하중의 감소가 큰 것으로 알려져 있다. 진행성 파괴에 따라서 재하 초기에는 아래 그림의 ❶과 같이 하중 전이 분포를 가지지만 시간의 경과에 따라 하중 집중으로 인한 국부 파괴로 인해 ❸과 같은 분포로 하중전이 형상이 변하게 된다. 이러한 하중전이 특성은 궁극적으로 앵커에 재하된 하중이 사용기간 동안 유지되지 못하여 심한 경우에는 파괴를 동반하게 되므로 앵커의 하중전이와 장력변화의 모니터링은 매우 중요하다.

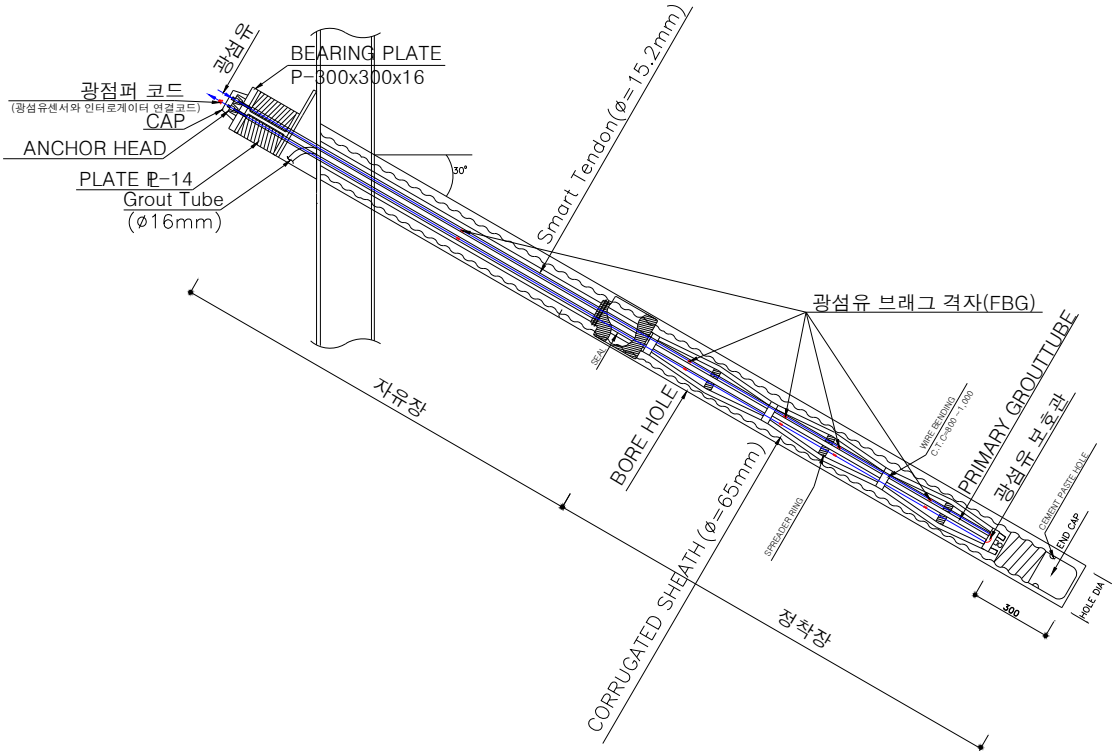


하중 변화도 (그림 1)　　주변 마찰 분포 그래프 (그림A)

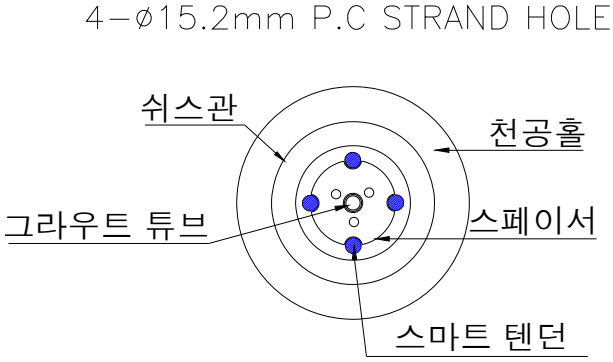
그림 1.6. 인장형 앵커의 하중전이

현재 사용되고 있는 압축형 앵커와 인장형 앵커의 하중전이를 효과적으로 측정할 수 있는 방법은 그리 많지 않으며 거의 유일한 방법이 앵커정착부에 로드셀을 설치하여 앵커의 최종적인 인장력변화만을 측정하는 방법이 있다. 그러나 이는 보통 4~10줄의 강연선의 종합적인 장력변화만을 측정할 뿐 응력의 집중에 의해 내부에서 발생하는 앵커력을 모니터링 할 수 없다. 그러나 제안된 스마트 텐던은 아래 그림과 같이 앵커를

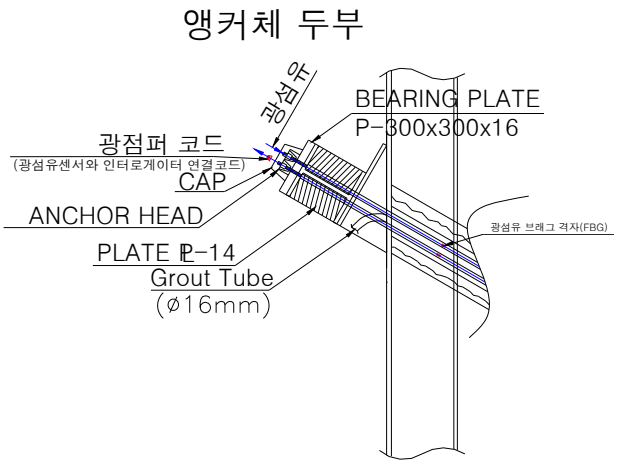
구성하는 모든 선에 FBG센서를 설치함으로써 각 강연선의 장력변화를 모니터링 할 수 있을 뿐 아니라 필요에 따라서는 하중전이를 측정할 수 있도록 다중점 측정(multiplexing)을 수행함으로써 보다 명확한 앵커의 관리가 가능하다. 따라서 스마트 텐던을 지반보강용 앵커에 활용할 경우 토류벽의 안전관리와 사면안정 모니터링에 매우 효과적이며, 향후 자동화 유지관리시스템 구축도 용이할 것으로 기대된다.



(a) 스마트 앵커체 구조

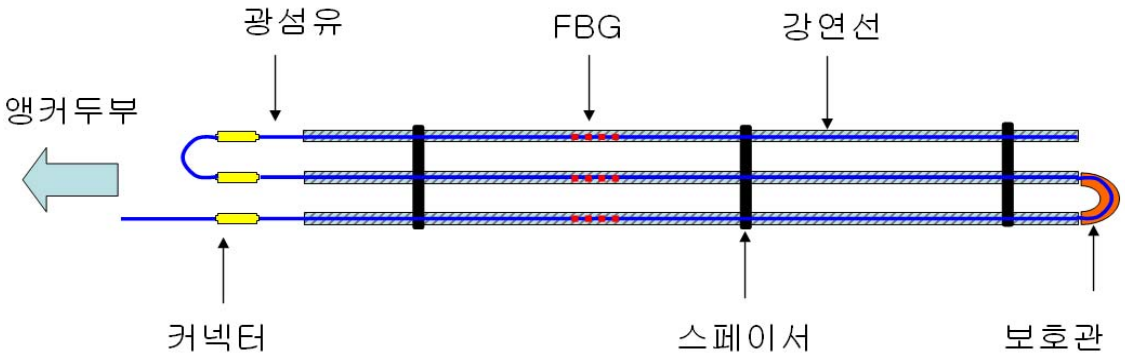


(b) 앵커체 단면 상세도

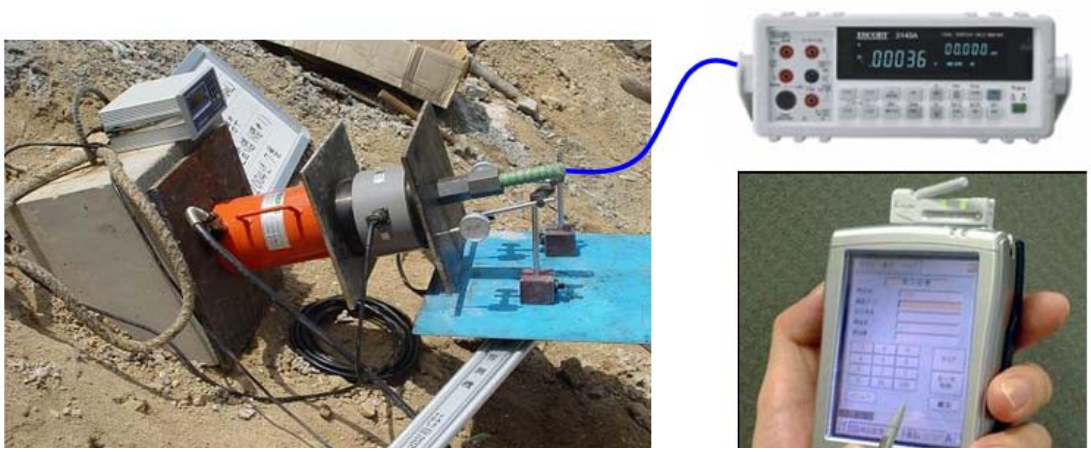


(b) 앵커체 두부 상세도

그림 1.7 스마트 앵커체 구조 및 상세도



(a) 스마트 앵커체 모식도



(b) 스마트 앵커 긴장력 도입 및 관리 모식도

그림 1.8 스마트 앵커체 및 긴장력 관리 모식도

본 세부연구 분야의 연구내용은 다음과 같다.

○ 인장형 스마트 앵커의 제작
○ 스마트 앵커의 현장 검증 실험
  - 스마트 인장형 앵커의 시험시공 및 하중전이 모니터링 검증
  - 인발실험, 크리프 실험, 장기거동실험

(6) 장력 모니터링 통합 Software 개발

○ PSC 교량 통합 SW 개발
○ 어스앵커 통합 SW 개발

제2장 국내외 기술개발 현황

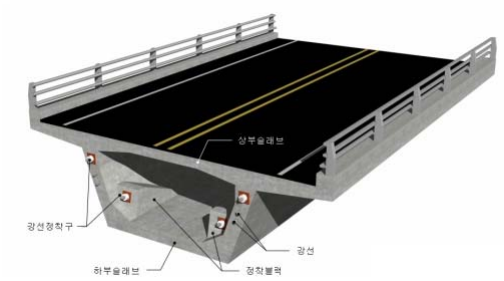
1. 기술현황

가. 국내외 관련 시장조사

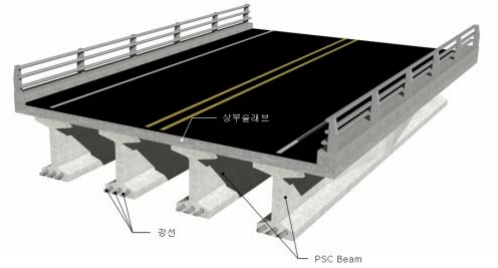
(1) PSC 박스거더교

(가) 프리스트레스트 콘크리트 교량 국내 현황

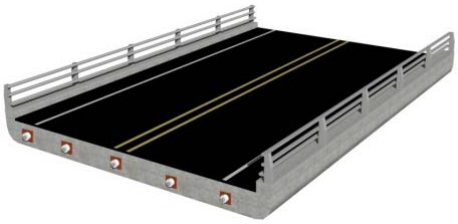
프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete, PSC) 교량은 프리스트레싱 긴장재를 적용하여 내하력을 보강한 콘크리트 교량을 말한다. PSC 교량은 경제적이고 유지관리가 용이하여 1980년대 이후 국내에 많이 적용되고 있는데 주로 PSC박스거더교, PSC거더교, PSC슬래브교 등이 보편적으로 사용되고 있다.



(a) PSC박스거더교



(b) PSC거더교



(c) PSC슬래브교

그림 2.1 국내 프리스트레스 콘크리트(PSC)교량

건설교통부 교량현황조서(2007)보고서에 따르면, 2006년 12월말 현재 총 24,361개의 국내 교량 중 4,746개가 PSC교량으로 전체 교량 중 19.5%를 점유하고 있다. PSC교량이 가장 많은 도로는 고속국도로 32.9%를 PSC교량이 차지하고 있다. 지방도나 시군도, 구도 등에는 적용실적이 저조한 것으로 나타나고 있는데, 이것은 국도에 비해 소규모 교량들이 많아 비교적 장지간에 적합한 프리스트레스트 콘크리트의 적용이 미진한데서 기인된 것으로 판단된다.

표 2.1 전국 교량중 PSC 교량 현황

구분	고속국도	일반국도	광역시도	국가지원지방도	일반지방도	시도	군도	구도	한강횡단교량	소계
교량수(A)	6596	5723	1164	963	3228	2414	3855	384	34	24361
PSC 교량(B)	2170	1382	233	119	295	290	228	21	8	4746
비율 (B/A)	0.329	0.241	0.200	0.124	0.091	0.120	0.059	0.055	0.235	0.195

아래 표 2.2는 형식별 분포를 보면 PSC 교량중에서 교량 개수 측면에서 PSC거더교가 82.6%로 절대 다수를 보이고 있고 바닥판 연면적(교량 연장 × 유효폭)은 PSC거더교가 60.7%, PSC박스거더교가 34.2%, PSC슬래브교가 5.1%를 점유하고 있다.

표 2.2 국내 PSC교량 형식별 분포

TYPE	PSC박스거더교	PSC거더교	PSC슬래브교	소계
개수	432	3,919	395	4,746
바닥판 연면적(m^2)	3,657,036.7	6,500,945.2	549,061.4	10,707,043.2

위 표를 살펴본 바와 같이 PSC박스거더교 개수는 전체 PSC교량의 9.1%에 불과하지만 교량 바닥판 연면적은 34.2%를 차지하고 있다. 그러므로 현재까지 건설된 PSC교량의 상세한 건설 물량을 알아보기 위해서는 교량 개수보다는 교량의 바닥판 연면적을 기준으로 하는 것이 합리적이라고 판단된다.

PSC교량 형식에 따른 연도별 바닥판 연면적의 건설 추이는 아래 그림과 같다. 여기서 1990년대 들어서 PSC박스거더교(PSCB)와 PSC거더교(PSCI)의 건설이 급격히 늘어나고 있으며 2000년 이후 경제적인 PSC거더교가 활발히 적용되고 있음을 알 수 있다. PSC슬래브교는 1990년대 초반에 반짝 적용되다가 이후 저조한 건설실적을 보이고 있다.

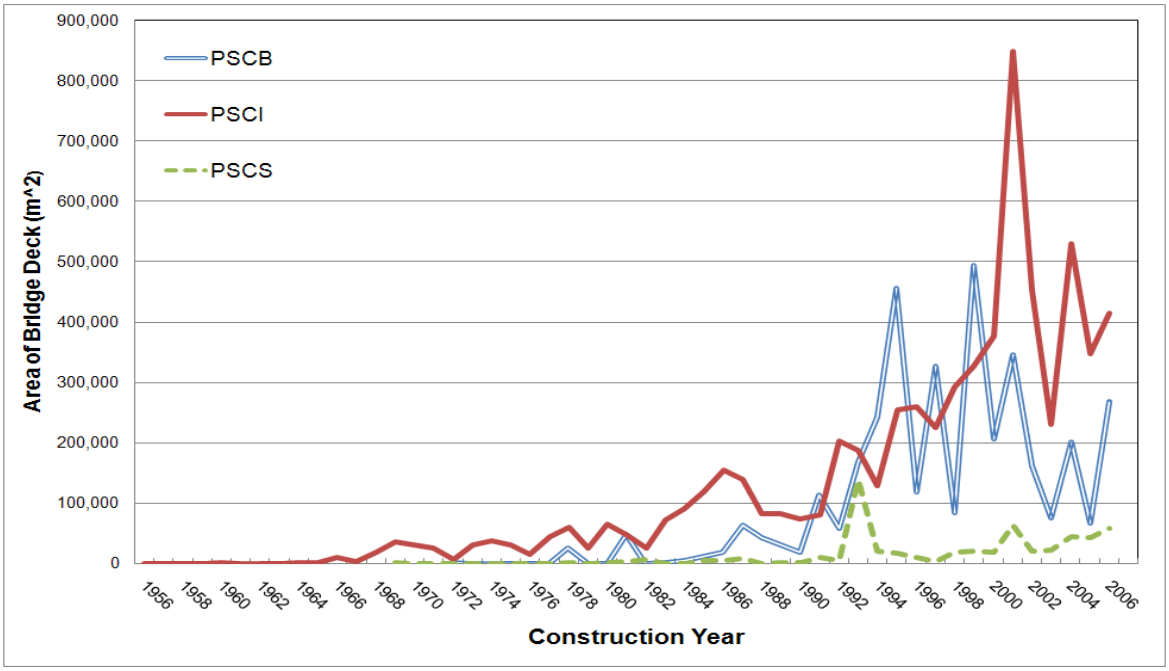


그림 2.2 연도별 PSC교량 건설 현황

(나) PSC교량의 시장 현황

PSC교량의 건설 공사비를 추정하기 위해 고속도로 설계 시 사용하고 있는 평균 단가를 활용하였다. 아래 표는 2003년에 고속도로 설계 시 참고자료로서 건설 시 공사비를 왕복 차로별로 나타나 있다. 여기서 교량 건설비를 살펴보면 교량 형식과 왕복 차로수에 따라 단위 길이 m당 또는 바닥판 단위 면적 m2당 평균 단가를 알 수 있다. 왕복 차로수가 증가할수록 적용 단가는 낮아지고 있으며, PSC거더교가 가장 저렴하고 PSC슬래브교, PSC박스거더교 순으로 단가가 높아지고 있다. PSC박스거더교에서는 가설 공법인 ILM(Incremental Launching Method), FCM(Free Cantilever Method), MSS(Movable Scaffolding System), FSM(Full Staging Method)에 따라 건설비가 달라지고 있다. 본 연구에서는 PSC교량의 시장현황을 추정하기 위해 최근 도로건설 추세를 반영하여 왕복 4차로를 적용하였으며, PSC박스거더교는 4가지 공법의 평균 단가를 활용하였다.

표 2.3 2003년 고속도로 건설 평균 단가(추정)

구 분		차로수	도 시 부 (IC, JCT 포함)			지 방 부 (IC, JCT 포함)			비 고
			계(억원)	공사비	용지비	계(억원)	공사비	용지비	
고속도로	신설	4	281	228	53	185	165	20	km당
		6	368	288	80	261	231	30	km당
		8	503	396	107	314	274	40	km당
	확장	4→6 (2차로확폭)	125	93	32	96	85	11	km당
		4→8 (2차로확폭)	174	109	65	122	101	21	km당
IC		트럼펫	268억(km당)						
JCT		직결형(4지)	428억(km당)						

아래 표 2.4는 PSC교량 형식별로 건설비를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 PSC거더가 PSC박스거더보다 교량 개수에서는 약 9배, 바닥판 연면적에서는 약 2배 이상 달하지만 건설비는 PSC박스거더교가 약 1.1배로 더 크게 나타났다. 이는 PSC박스거더교가 장지간을 가지고 있고 특수한 시공 공법을 사용하는데 기인한 것으로 판단된다. 아래 그림은 각 PSC교량 전체 건설비 추이를 나타낸 것으로 90년대 들어 국내 경제발전에 인프라 확충으로 교량 건설비가 대폭 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 이는 1994년에 있었던 성수대교 붕괴사고 이후로 노후 교량을 유지관리가 거의 필요 없는 PSC교량으로 교체한 것도 PSC교량 건설비 증가 요인 중 하나로 판단된다.

표 2.4 2003년 PSC 교량 형식별 건설비(추정)

단위 (천원)			왕복 2차로		왕복 4차로		왕복 6차로		왕복 8차로		비 고
			m 당	m^2 당	m 당	m^2 당	m 당	m^2 당	m 당	m^2 당	
교량	Slab	RC	10,051	1,546	33,955	1,750	47,466	1,505	61,028	1,576	
		PC	20,680	1,466	35,081	1,378	47,957	1,522	62,151	1,605	
	PSC-Beam		18,802	1,275	26,839	1,080	42,396	1,227	48,708	1,041	
	PSC Box	ILM	28,706	2,036	38,704	1,574	66,916	2,124	86,098	2,224	
		FCM	44,500	3,156	68,552	3,105	104,032	3,302	134,947	3,486	
		MSS	28,210	1,999	47,844	1,968	56,842	1,804	86,098	2,224	
		FSM	26,430	1,873	43,941	1,807	61,560	1,954	79,073	2,041	
	ST. Box		20,421	1,723	41,271	1,681	54,456	1,729	61,196	1,533	
	ST. Plate		31,527	2,236	52,405	2,052	73,610	2,337	94,352	2,437	
	R.C 라멘		34,822	1,850	44,199	1,689	50,841	1,578	55,501	1,330	
터널	NATM	2 차로	10,182 / m당								
		3 차로	17,715 / m당								

주) 제잡비 포함

PSC교량 건설비는 2001년 약 1조7천억원을 정점으로 약 5천억원에서 약 1조천억원 범위에서 변동하고 있음을 알 수 있다. 여기서 2구간의 이동 평균법을 적용하면 PSC 교량이 현재 약 8천4백억원 정도 건설되고 있다고 추정할 수 있다. 향후 PSC교량의 건설은 교량의 전체 생애주기 비용 감소와 전 세계적인 철강재 가격의 상승 추이를 감안하면 현재 건설되고 있는 물량보다 작지 않을 것으로 전망된다. 따라서 그 시장규모는 약 8천억원 정도는 충분히 가능할 것으로 예상되고 있다.

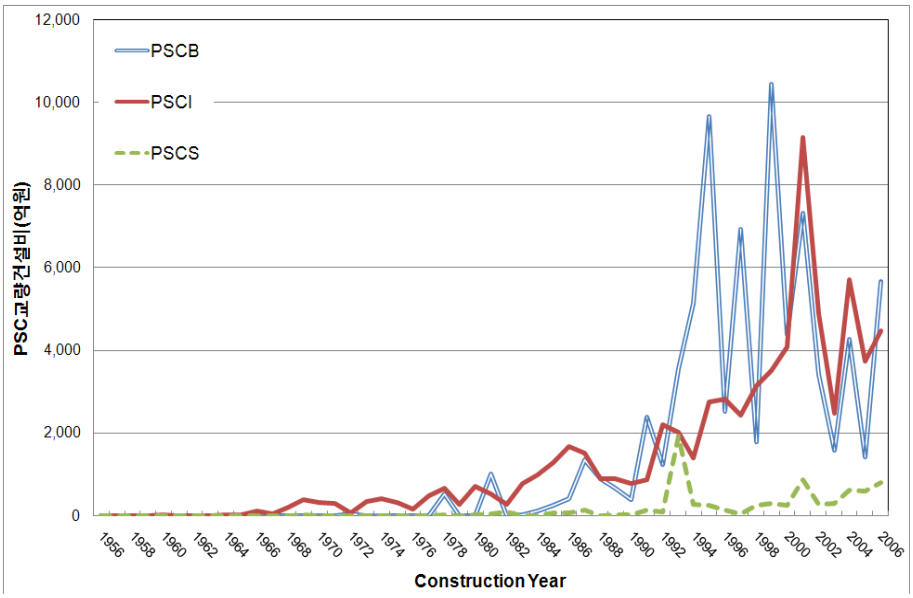


그림 2.3 PSC교량 형식별 건설비 추이

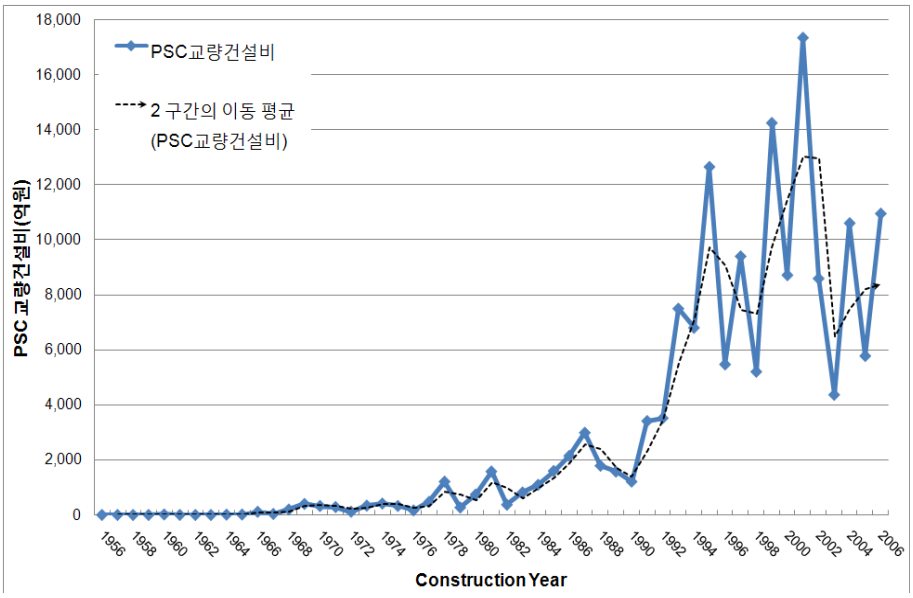


그림 2.4 PSC교량 전체 건설비 추이

(2). 어스앵커

(가) 앵커와 앵커시험

어스앵커 또는 그라운드 앵커란 강선이나 강봉을 사용하여 제작된 앵커체를 지중에 정착시키고 구조물의 전면에서 체결하여 구조물을 지지하는 공법이다. 그림 2.5는 앵커의 사용 예를 도시한 것이다.

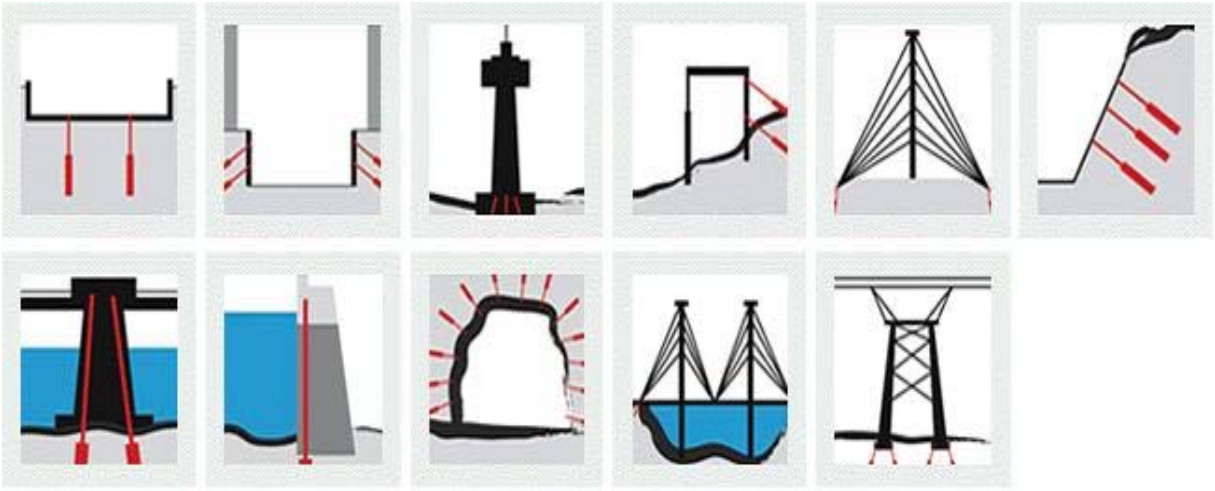


그림 2.5 어스앵커 사용 예시

앵커의 성능을 시험하기 위해 앵커시험이 수행되는데 현재 수행중인 모든 그라운드 앵커시험의 경우 동적변형률 측정기(DC-104R), 하중계(LoadCell), 변형률계(Strain gage)가 활용되고 있다. 하중계의 경우 앵커 선단부에 설치하여 시간별 앵커에 작용하중과 늘음량을 측정하여 앵커의 성능을 파악하는 방법으로 일반적인 앵커시험에서 많이 활용되고 있다. 반면에 앵커체에 직접 설치하는 변형률계는 앵커체 자체의 변형률을 측정하여 하중전이 현상을 규명할 수 있는 방법이나 설치가 복잡하고, 돌출된 상태에서 지중에 설치되므로 설치나 측정시 망실과 손상될 우려가 있다. 각각의 측정기기에 대해서 설명하면 다음과 같다.

① 로드셀

먼저 하중계의 경우 측정 정도가 낮은 편이라, 50ton 단위로 각 하중에 맞는 제품을 써야한다는 단점이 있고, 그 하중의 정확도도 다소 낮게 평가되고 있다. 아울러 간혹 접지 등의 문제로 인해 게이지 값이 튀는 현상을 나타내어 시험시 예상하지 못한 문제가 발생할 수도 있고, 로드셀 자체의 무게가 상당하므로 운반에 문제도 발생할 수 있다. 또한 앵커와의 접촉시 편심이 발생할 경우 측정값이 오차요인이 증가할 수 있는 문제점이 있다.



그림 2.6 로드셀을 이용하는 어스앵커 적용 모습

② 디지털 압력계

제품으로 개발되어 있는 디지털 압력계를 사용하는 방법이 있는데, 상당히 정밀한 측정기기로서 정확도가 우수하고 휴대성도 간편한 장점이 있는데 비해, 연결에 필요한 부품을 많이 챙겨야 하므로 그 도구들의 숫자가 많아질 수 있고, 또한 현장의 인장기의 형태에 따른 부착의 어려움이 있을 수 있다.

③ 변형률계(Strain gauge)

변위계 관련하여 현재 SPD-200이라는 변위계(측정가능변위20cm)를 사용 중이고 일반적인 용도에 무난한 성능을 보인다. 하지만 정도가 0.04mm 로 단기 크립 테스트 등에 필요한 정확도에 미치기 못하기 때문에, 보다 고성능(최소정도 0.01 mm)의 변위계로 교체해야할 필요성이 있다. 시중에 레이저 등을 이용한 변위계가 있지만, 가격이 고가이므로 현장 도입과의 타당성을 검토할 필요가 있다. 한편 일반적인 진동현식 매설형 변형률계(Vibrating Wire Embedment Strain gauge)는 구조물에 매설하여 변형률을 측정하는 방법으로 콘크리트와 같이 외부적 충격이나 변형정도가 낮은 상태에서는 효과적인 거동을 보이나, 어스앵커 시험과 같이 수mm에서 수 cm까지 변형이 발생하는 경우에는 손상의 위험이 있고, 측정 케이블이 다수 외부로 노출되어야 하므로 시험이 번거로울 수 있어 설치개수에 제한을 받게 된다.

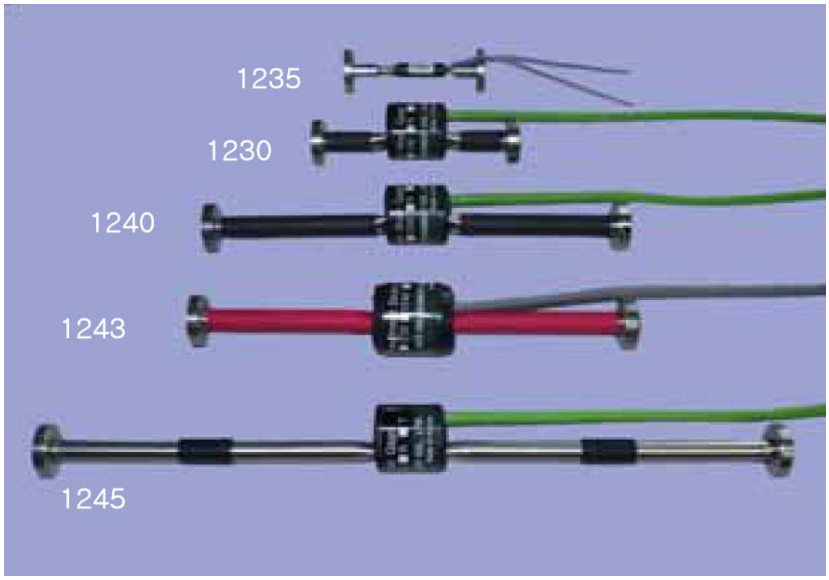


그림 2.7 변형률계(Strain Gauge) 제품 모습

④ 동적변형률 측정기

현재 사용 중인 DC-104R의 경우 휴대성과 적절한 성능을 겸한 좋은 장비라 할 수 있다. 꾸준하진 않지만 지속적인 펌웨어 업데이트로 인해 소프트웨어 자체의 성능도 좋아진 편이고, 필요한 경우 PC에 연결이 아닌 PDA에 연결도 할 수 있어 확장성이 우수하다고 판단된다.

(나) 앵커의 시장규모

굴착공사시 활용되는 가시설 구조물이나 영구구조물의 지지체로서 활용되는 어스앵커를 망라하여 시장규모를 파악하면 생산길이가 대략 3,600,000m 정도(2007년 기준)로 분석된다. 실제 현장에서 천공비, 자재비, 설치비 등을 포함한 m당 시공단가가 약 30,000원 정도이므로 시공규모로 볼 때에는 약 1000억 규모 이상으로 예상된다. 표 2.5와 그림 2.8은 최근 5년간 추정된 앵커의 생산규모이다.

표 2.5 어스앵커 시장규모

년도 / 구분	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년
생산길이 (m)	1,780,000	2,150,000	2,920,000	2,950,000	3,647,000
평균 시공단가	3만원/m				
시장(시공)규모 (백만원)	53,400	64,500	87,600	88,500	109,410

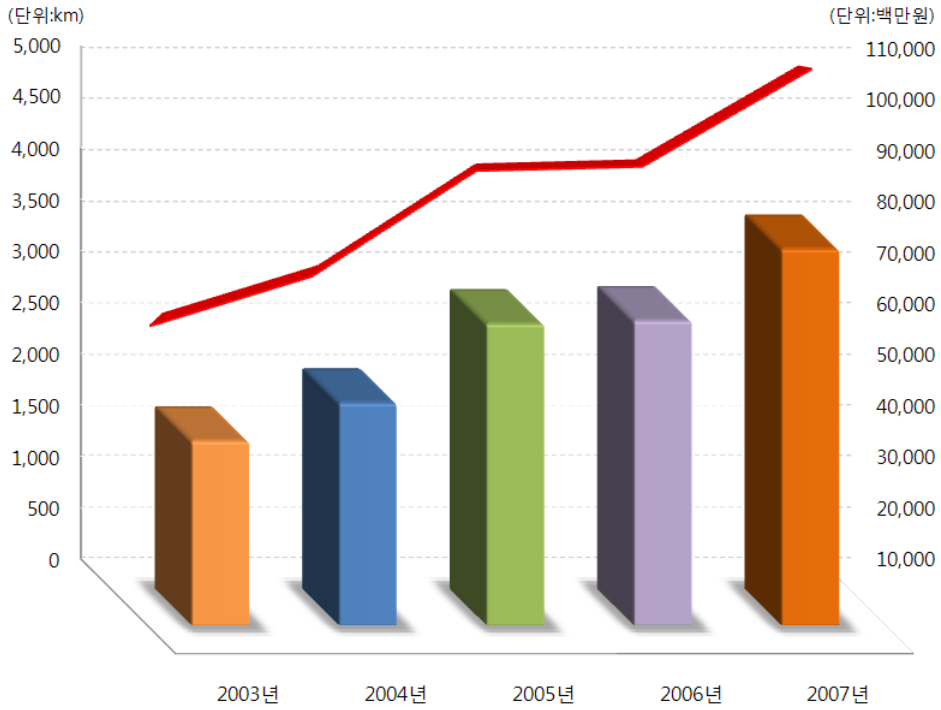


그림 2.8 어스앵커 생산 규모 및 시장 규모

나. 광섬유 센서 기술

(1) 광섬유(Fiber optic)의 기본이론

일반적인 광섬유(Fiber optic)의 구조는 그림 2.9와 같이 코어(core)와 코어를 둘러싸고 있는 클래딩(cladding), 외부 충격으로부터 코어와 클래딩을 보호하기 위한 코팅부(coating part)로 구성되어 있다. 크기는 사람의 머리카락보다도 얇으며 코어의 지름은 단일모드 경우의 $4\sim8\mu m$, 다중모드 $50\mu m$ 내외이다. 클래딩 지름은 단일모드 또는 다중모드에 상관없이 둘 다 $125\mu m$를 표준으로 사용하고 있다.

광섬유의 강도는 동일한 지름을 갖는다고 할 때 가장 단단한 물질은 스테인리스 철선이며, 구리선과 비교해 1km의 길이를 갖는 광섬유는 분쇄(breaking)되기 전까지 평방인치당 270kg이상의 인장력을 극복할 수 있다. 또한 벨연구소에서는 10m 길이의 광섬유는 70cm까지 신장되고, 다시 원래의 형태로 복귀될 수 있다고 연구한 바 있다.

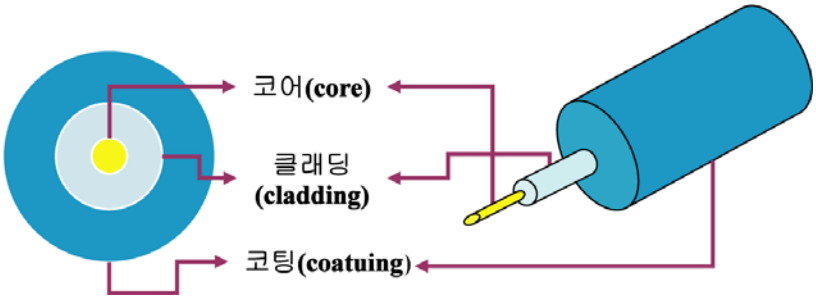


그림 2.9 광섬유 구조

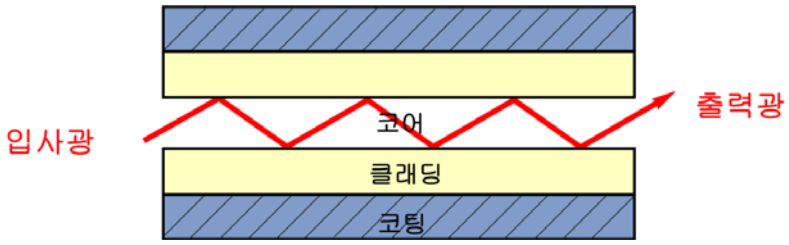


그림 2.10 광섬유 전반사

광섬유는 전반사의 원리를 이용하여 빛을 전달한다. 빛을 전달하는 매개체인 코어로 입사된 빛은 코어와 클래딩의 굴절률 차로 인하여 빛의 전반사가 일어나며, 클래딩을 통해 빛이 새어 나가지 않고 코어를 통해서만 빛이 전달되는 것이다. 특정한 전반사각을 가진 빛의 파를 전파모드(propagation mode)라고 하며, 각도가 작은 것부터, 0차 모드, 1차 모드, 2차 모드, 3차 모드라 부른다. 또한 하나의 모드만을 전파하는 단일모드(single mode) 광섬유와 수백 가지 모드를 동시에 전파할 수 있는 다중모드(multi mode) 광섬유로 분류 할 수 있다. 일반적인 광섬유의 구성요소별 재료와 직경을 표 2.6에 나타내었다.

표 2.6 광섬유의 구조, 재료 및 직경

구 분	재료(Material)	직경(Diameter(μm))
코어(core)	SiO_2, GeO_2	4~50
클래딩(cladding)	SiO_2	125
코팅(coating)	Polymer, Acrylate	250

(2) FBG(Fiber Gragg Grating)센서의 기본원리

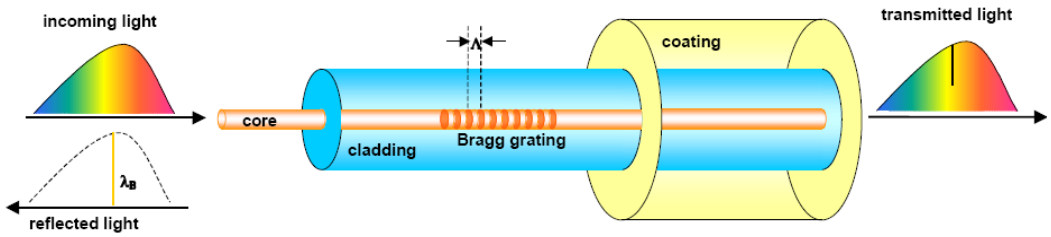


그림 2.11 FBG센서의 측정원리(Nellen et all. 1999)

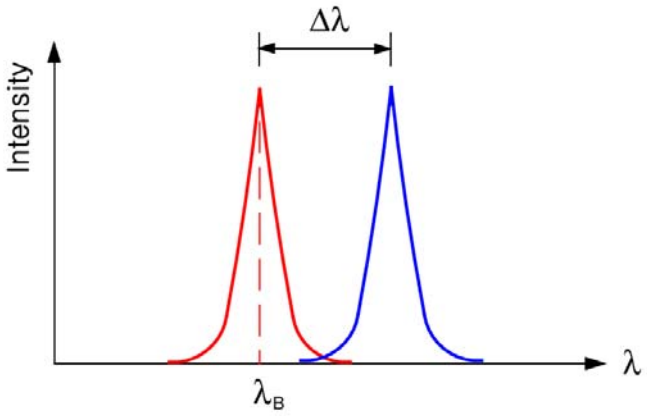


그림 2.12 FBG센서의 파장변화

그림 2.11은 FBG(Fiber Bragg Grating)센서의 원리를 도시한 것으로, 광대역의 광원을 광섬유에 입사시키면 식 (1.1)과 같이 브래그 조건(Bragg condition)을 만족하는 파장 λ_B은 반사하고, 그 외의 파장은 그대로 통과시키는 특징을 갖는다.

$$\lambda_B = 2n\Lambda \qquad \text{식 1.1}$$

여기서, λ_B : 브래그격자의 중심파장
n : 광섬유격자의 유효굴절률
Λ : 브래그격자의 간격

이러한 특성을 가지는 브래그 격자에 스트레인이 작용하면 격자의 간격이 변하게 되고, 스트레인광학 효과(strain optic effect)에 의하여 굴절률이 변화하여 반사파장이 즉각 반응 한다. 브래그파장의 변화를 측정함으로써 광섬유 격자에 가해진 물리량(온도, 변형률)을 정밀하게 계측할 수 있다. FBG센서에서 파장변화와 온도변화 및 변형률 사이의 관계는 다음과 같다.

식 1.1의 중심파장(λ_B)의 이동은 유효굴절률(n)과 격자 간격(Λ)의 변화로, 온도(T)와

변형률(ε)의 영향에 의해 변하게 된다.

$$\frac{\triangle\lambda_B}{\lambda_B}=\left(\frac{1}{n}\frac{\partial n}{\partial T}+\frac{1}{\Lambda}\frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\triangle T+\left(\frac{1}{n}\frac{\partial n}{\partial \varepsilon}+\frac{1}{\Lambda}\frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon}\right)\triangle\varepsilon \qquad \text{식 1.2}$$

식 1.2의 우변의 첫 번째 항은 광섬유의 온도에 대한 영향을 나타낸다. 두 번째 항은 변형률의 효과로써, 격자의 간격과 광탄성(Strain-optic)효과에 의한 굴절률 변화를 나타낸다.

$$\alpha=\frac{1}{\Lambda}\frac{\partial \Lambda}{\partial T},\quad \xi=\frac{1}{n}\frac{\partial n}{\partial T},\ P_e=[P_{12}-\nu(P_{11}+P_{12})]\frac{n^2}{2} \qquad \text{식 1.3}$$

여기서, α : 광섬유의 온도에 따른 팽창계수(thermal expansion coefficient)로서 실리카 유리의 경우 약 $0.510\times10^{-6}/℃$ 임.

ξ : 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학계수 (thermal-opticcoefficient)로 약 $8.310\times10^{-6}/℃$ 임.

P_e : 광탄성 상수(photo-elastic constant)이며, P_{11}과 P_{12}는 광탄성의 텐서 성분이고, ν는 Poisson's ratio이다. 보통 게르마늄 실리카 유리로 만들어진 광섬유의 경우 대략 0.22이고, 광섬유의 재질에 따라 조금씩 달라짐.

식 1.2에 식 1.3을 적용하여 정리하면 식 1.4와 같이 간략히 정리할 수 있다.

$$\triangle\lambda_B=\lambda_B[(\alpha+\xi)\triangle T+(1-P_e)\triangle\varepsilon] \qquad \text{식 1.4}$$

여기서, $\triangle\lambda_B$: 브래그격자의 파장 변화량

λ_B : 브래그격자의 중심파장

$\triangle T$: 온도변화(℃)

$\triangle\varepsilon$: 외벽에 의한 변형률(Strain)

먼저 온도변화에 대한 브래그 중심파장의 변화량 $\triangle\lambda_B$는 아래와 같다.

$$\triangle\lambda_B=\lambda_B(\alpha+\xi)\triangle T,\ \triangle T=\frac{\triangle\lambda_B}{\lambda_B}(\alpha+\xi) \qquad \text{식 1.5}$$

온도변화에 대한 브래그 파장의 변화는 식 1.5와 같이 굴절률 변화에 기인함을 알 수 있다. 또한 변형률에 대한 중심 파장의 변화는 아래 식 1.6과 같다.

$$\triangle\lambda_B = \lambda_B(1-P_e)\triangle\varepsilon\,,\ \triangle\varepsilon = \frac{\triangle\lambda_B}{\lambda_B(1-P_e)}$$ 식 1.6

그러므로 브래그격자의 중심파장 변화량을 측정함으로써 온도 및 변형률의 측정이 가능하다. 이 같은 FBG센서는 분해능이 매우 높고 거리에 따른 신호잡음(noise)이 매우 작으며 전자기에 의한 영형을 받지 않으므로 기존의 전기저항식 센서에 비해 정밀한 계측이 가능하다.

(3) 광섬유센서의 응용분야

접근성의 한계로 인해 순간적인 이상을 실시간으로 포착하기 어려운 대형 시설물 또는 사회기반 시설물 등의 중대한 결함이나 이상상태의 발생유무를 상시 또는 주기적으로 검사하여 파손에 의한 위험과 대형 재해를 사전에 방지할 수 있는 장점을 가지고 있으므로, 교량, 댐, 터널, 대형빌딩, 철도 구조물 등 다양한 사회기반시설의 모니터링에 활용 가능하다.



경기장 스텐드의 바닥보강



사면 안정 앵커



원자력 발전소 Dome 보강



굴착시 흙막이벽 앵커



사장교 케이블



통신 선로



PC 합성 거더교



철도선로 지지

그림 2.13 스마트 텐던 응용 분야

다. 국내·외 적용사례

(1) 국 내

첨단 구조 계측 시스템에 대한 관심과 실제 연구 및 적용사례가 최근 들어 활발해지고 있으나 아직 실제 구조물에 광범위하게 적용되지는 않고 있는데 그 원인 중의 하나가 계측시스템 자체가 갖는 계측결과의 신뢰성 문제와 비용 때문이라고 볼 수 있다.

대형 구조물에 대해서는 국내에서도 각종 비파괴 계측장비와 이를 바탕으로 구조물의 안전도를 분석하는 이론과 시뮬레이션이 성행하고 있으나, 광섬유 센서를 이용한 시설물 유지 관리 시스템은 선진국의 일부에서 항공기나 일부 토목시설물에서 제한적으로 사용되고 있는 실정이다.

국내의 경우 최근 들어 광섬유 계측기술에 대한 인식을 넓혀가고는 있지만 여러 가지 제약요인으로 인해 아직도 구조계측시스템을 전자식 또는 기계식 계측시스템에 크게 의존하고 있는 실정이다.

아래 그림은 일반적인 광섬유 센서를 이용한 전형적인 교량의 유지관리 시스템을 보여주고 있다.

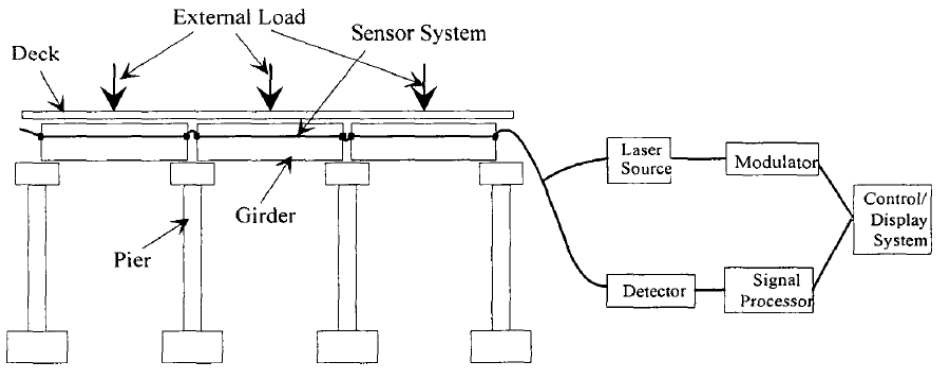


그림 2.14 광섬유를 이용한 교량 유지관리 시스템

현재 국내의 주요 교량에는 상시 계측 모니터링 시스템이 구축되어 있으며, 이를 통하여 구조물의 응력, 균열, 진동수 등의 상태를 파악하여 안전도 평가에 대한 객관성을 부여하고 대상구조물의 거동이력을 확보하고 있다.

그러나 여기에 사용된 계측기기와 계측용 센서는 주로 현재 상용화 되어 있는 전기저항식으로 이루어져 있어 부식, 전자기영향, 작업성 등 여러 가지 문제점들을 내포하고 있다. 이러한 전기 저항식센서 군이 가지고 있는 물리적인 여러 문제점들로 인해 근래에 들어 국내에서도 실구조물의 거동을 계속적으로 모니터링하기 위해서 내구성과 장기적인 안전성 그리고 작업성 등을 고려한 광섬유격자를 이용한 센서와 계측시스템(Structural Health Monitoring)이 각광을 받고 있다.

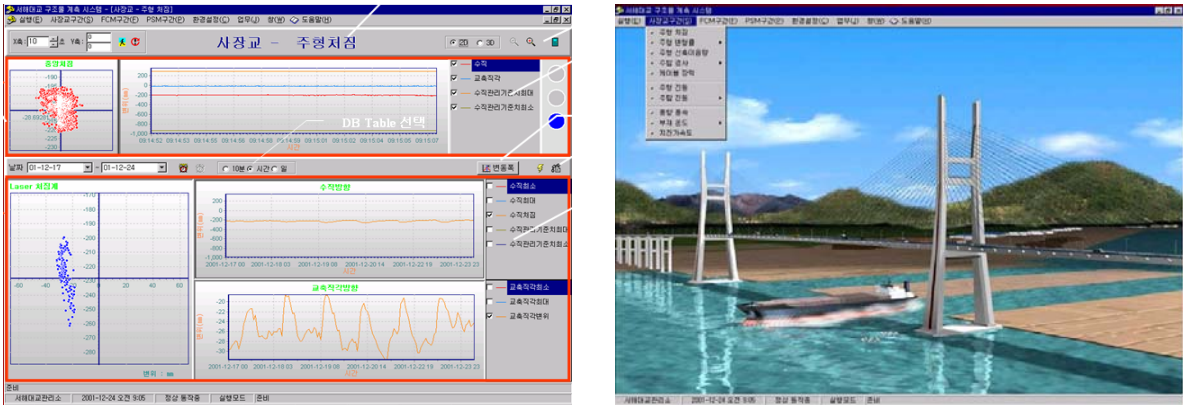


그림 2.15 구조물 계측 시스템

초기 광섬유격자 센서에 대한 국내의 연구 경향은 주로 광섬유를 이용한 센서의 제작과 이렇게 제작된 센서들의 성능 검증에 그 초점이 맞추어 졌다. 국내의 경우에는 (주)아이세스, 한국표준과학연구원, 한국과학기술연구원, 한국과학기술원 등을 중심으로 구조물의 변형률 측정에 적합한 광섬유센서의 개발에 중점을 두어 연구를 수행하였으며, 이를 검증하기 위한 각종 실험을 실시하였다.

최근 들어 실제 광섬유센서를 구조물, 특히 교량에 적용하는 분야에 대한 연구가 활발히 진행되어지고 있다. (주)아이세스의 경우 광섬유 센서를 이용한 On-Line 안전진단 시스템 구축 가능성 검토를 위하여 FBG센서를 축소 모형 강트러스 교량의 계측에 적용한 결과 우수한 분해능과 계측결과를 얻었으며, 탄소, 유리섬유와 강판 등으로 구조물을 보수 또는 보강시 부피가 작아 구조물의 내구성에 거의 영향이 없는 광섬유를 매설하여 실시간으로 모니터링함으로써 구조물의 건전성을 상시 감시하는 연구가 활발히 진행중이다.

한국표준과학원의 경우 광섬유센서를 매설한 3종류의 RC보를 제작하여 보의 휨실험을 수행하면서 변형률 및 파손 시점을 감지하는 연구를 수행한바 있으며, 한국과학기술원 항공공학과 복합재료 연구실에서는 복합재료에 외부 페브리-페롯 간섭형 광섬유센서를 적용하여 실험을 수행하였고, FBG 변형률 센서를 복합재료 구조물 내에 내장식 유지관리시스템을 구성하는 연구를 수행한 실적이 있다.

실제 공용 중인 구조물에 광섬유 센서를 이용한 계측의 경우 현대건설기술연구소에서 FBG 변형률 센서를 이용하여 하중재하 시 발생하는 수직 처짐을 추정하는 방안에 대한 연구를 강재 시험체와 남해대교를 대상으로 실험연구를 수행한 사례가 있다. 이러한 광섬유 센서의 구조물 적용을 위하여 최근에 가장 많이 사용되고 있는 광섬유격자 센서(Fiber Bragg Grating, FBG)를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내의 경우에는 (주)아이세스, 한국표준과학연구원, 한국과학기술연구원, 한국과학기술원 등을 중심으로 구조물의 변형률 측정에 적합한 광섬유 센서의 개발에 관한 연구가 이루어졌으며, 이를 검증하기 위한 각종 실험을 실시하였다.

(2) 국 외

1990년대 후반부터 본격적으로 수행되어 온 광섬유센서의 구조물 계측분야로써의 응

용은 2000년대에 오면서 미국, 유럽, 일본 등의 선진외국에서 활발하게 진행되고 있다. 미국의 경우 광섬유 전문 기업인 Blue Road Research, Innovative FBG등이 활동중이며, 유럽에는 스위스의 SmarTec SA, 벨기에의 FOSS 등이 활발하게 기술개발 및 응용에 전념하고 있다. 일본의 경우는 미국, 유럽에 비하여 늦게 광섬유센서 계측분야에 관심을 갖게 되었으나. 최근 기초분야인 센서의 제조와 이의 응용 기술 분야에서 다양한 연구결과를 제시하고 있다. 이와 같은 외국 동향은 구조물의 상시계측분야에 대한 필요성이 충분히 인식되어 있어 국내의 기술동향이나 수준보다는 한발 앞선 광섬유센서를 이용한 계측분야가 상업화의 단계에 진입했음을 알 수 있다.

캐나다의 경우 비교적 광섬유 센서를 교량 구조물에 활발하게 적용하여 계측을 수행하고 있으며, 그 예를 아래 간략하게 요약하여 나타내었다. 캐나다의 토론토대학의 연구그룹 등은 PSC형교의 주형 텐던에 FBG 변형률 센서를 매설하였다(Maaskant et al.-1994, Measures et al.-1994, 1995, Johann Meissener et al,-1997). 광섬유센서가 저항 할 수 있는 제한된 신장 변형률을 극복하기 위하여 광섬유센서는 긴장력이 가해진 후 텐던에 부착되었으며, 데이터는 정기적으로 계측 장비를 현장에 이동시켜 연결부에 접속하여 측정을 실시하였다.

PSC형교 주형 텐던의 변형률을 측정하기 위하여 실내 및 현장실험을 병행하여 실시하였으며, 교량 시공중에 발생할 수 있는 FBG 변형률 센서의 손상 방지를 위하여 6mm 직경내에 대상 센서와 특수 접착제, 그리고 채움재를 이용한 특수 보호장치를 제작하여 PSC형교의 시공단계에서부터 계측을 수행하였다.

콘크리트 구조물에 광섬유센서를 매설하여 가장 다양한 연구를 수행한 그룹은 Vermont 대학의 Fuhr, huston, Ambrose 등이며, 교량 구조물 외에도 고층건물, 그리고 댐 등의 진동을 계측하기 위하여 광섬유센서를 적용하였다. 광섬유센서를 콘크리트 외부 및 내부에 설치하는 경우 리드부는 손상이 발생되기 쉬우며, 센서의 보호를 위하여 플라스틱 또는 금속 튜브를 사용한다. 이러한 보호막 성능검증을 위하여 Masher 외 다수는 철근 표면에 대한 처리작업후 광섬유센서를 부착하거나, 광섬유를 설치할 부분에 홈을 제작하여 홈속에 광섬유 센서를 삽입하고 표면 처리하여 실험을 수행하였다. Masri 외 다수는 에폭시로 밀봉한 광섬유 센서 위에 실리콘 젤 방수층을 설치하여 실험을 실시하였다.

Prohaska 외 다수, 그리고 Guerin 외 다수는 콘크리트 내부에 매설하기 전에 추가적인 보호를 위하여 스테인레스 강재 튜브를 이용하여 광섬유센서의 표면보호를 하였으며, 측정결과의 신뢰성을 향상시키기 위하여 부착시 사용한 에폭시의 탄성계수를 이용하여 광섬유센서로부터 측정한 값을 보정하였다.

외국의 경우 FRP 재료의 토목부재로써 보수보강이나 기타 구조부재로서의 연구가 상당히 진척되었고. FRP를 이용한 다양한 토목부재의 적용이 상당수 이루어진 단계이다.

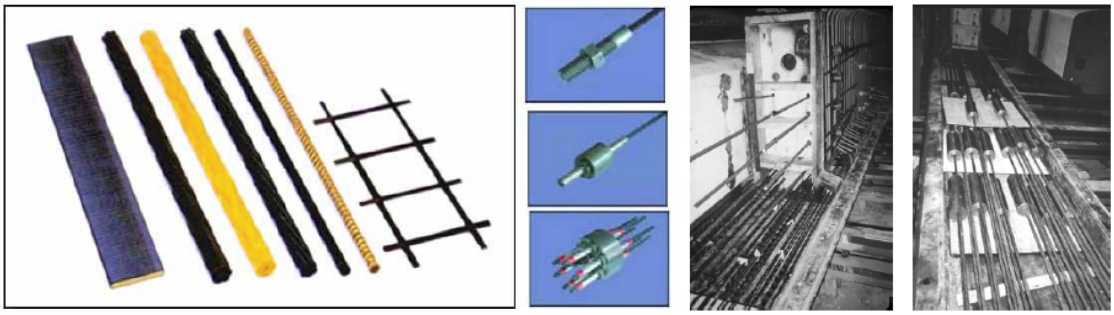
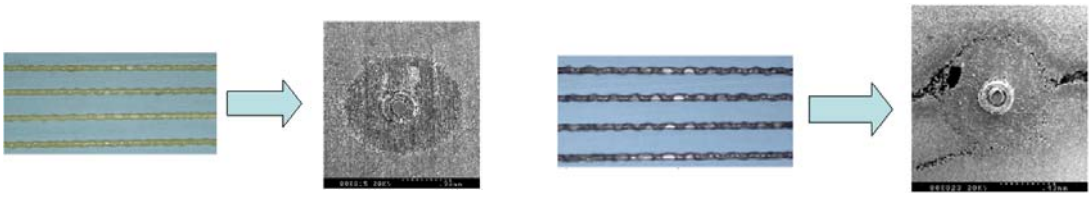


그림 2.16 외국에서 개발된 FRP 보강근 및 긴장 케이블

또한 FRP 내부에 FBG 센서를 삽입하여 그 효용성에 대한 연구가 이루어지고 있으며 이를 바탕으로 FRP 내부에 FBG 센서를 삽입한 FRP bar 와 FRP bar를 혼용하여 센싱기능을 가진 긴장재의 개발에 대한 연구가 이루어져 있다.



(a) OFBG-GFRP bars (b) OFBG-CFRP bars

그림 2.17 FBG 센서가 삽입된 FRP bars

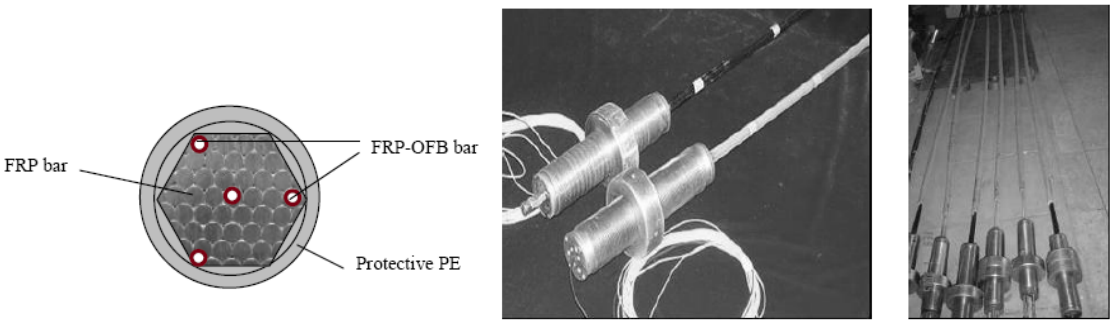


그림 2.18 Smart FRP-OFBG based bridge cable

또한 기존의 강연선을 이용한 교량구조용 케이블에 FBG 센서를 삽입하여 케이블을 설치한 이후에 측정을 위한 별다른 수고없이 게이블의 장력을 측정하기 위한 연구도 이루어 지고 있다.

국내에서는 아직 이에 대한 특별한 연구가 이루어 지지 않고 있으며 교량 케이블의 장력측정은 케이블 고정부의 로드셀이나 케이블에 가속도계를 설치함으로서 케이블의 장력을 추정하여 측정하고 있는 실정이다. 외국의 경우 bare 상태의 광섬유 센서를 케이블내에 삽입하거나 FRP내에 FBG 센서를 삽입한 재료를 활용하여 케이블에 센싱기능을 부여하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있고 일부 교량에 실제 적용된 사례가 있

다.

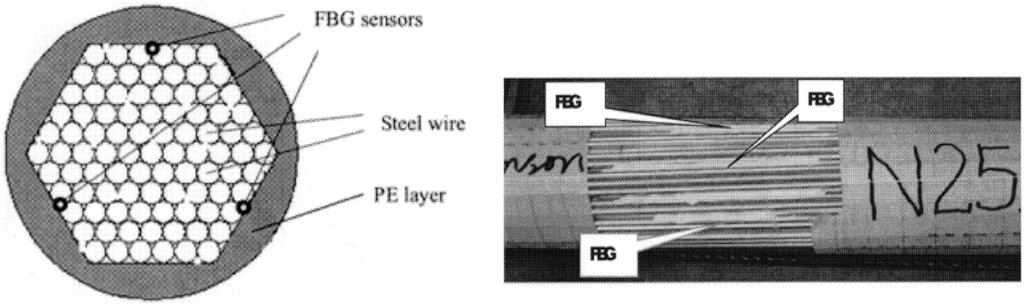


그림 2.19 FBG 센서를 삽입한 steel wire cable

FBG-FRP 를 기본으로한 센싱기능을 가진 smart cable 부재의 개발은 아직 국내에서는 그 필요성에도 불구하고 이루어 지지 않고 있으며 외국의 경우 국내 보다 앞선 FRP 부재에 대한 연구를 기반으로 현재 많은 연구와 실제 적용사례를 찾아 볼 수 있다.

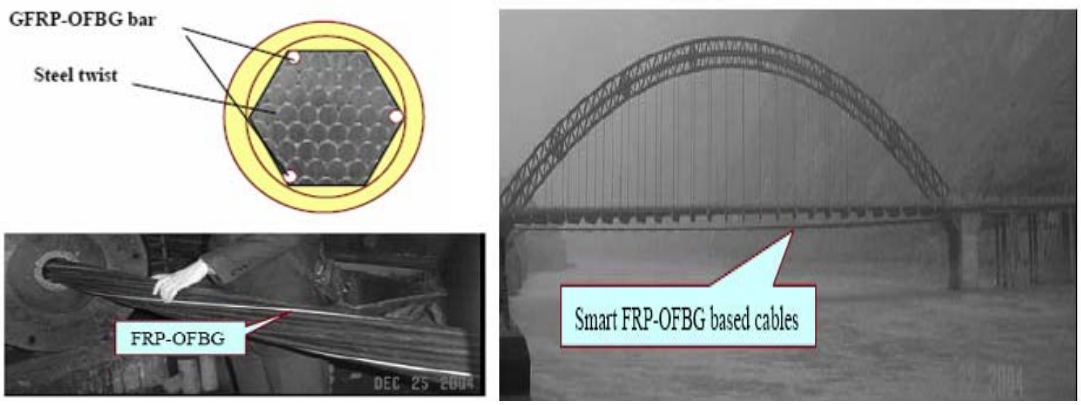


그림 2.20 FRP-OFBG Based cable 이 적용된 Erbine Bridge

제3장 스마트 텐던의 활용기술 개발

제1절 지반구조물 활용기술 개발

1. 지반구조물 활용기술 개발 개요

앵커공법은 토목이나 건축의 구조물을 지반에 정착시키기 위하여 고강도 강연선에 긴장력을 도입하여 주변지반의 변형을 최소화 할 수 있는 공법으로 아래 그림 3.1에 나타난 바와 같이 가설 토류벽의 지보공, 영구앵커 토류벽, 송전탑 기초, 댐의 보강, 지하구조물의 부력앵커, 사면 보강 등으로 널리 적용되고 있다.

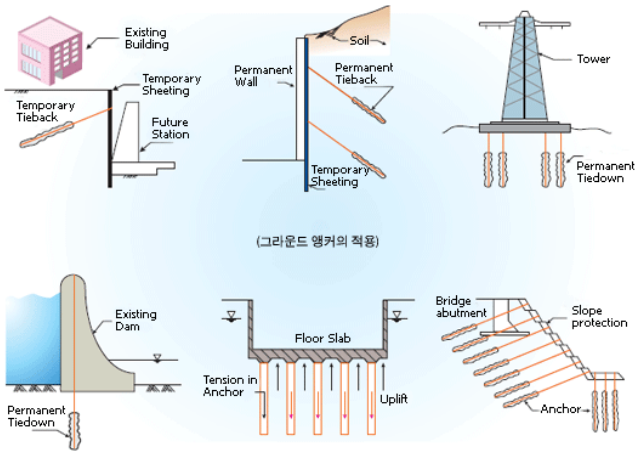


그림 3.1 그라운드 앵커의 적용(출처:www.swanchor.com)

한편 앵커는 지반의 종류, 설치되는 방향, 그라우트 방법, 사용기간, 지지방식 등에 따라 다양하게 분류될 수 있으며, 앵커가 정착되는 지반의 지지방식에 따라 그라우트와 지반의 마찰력으로 지지되는 마찰형 앵커, 지압판이나 파일 등을 사용하여 지반의 수동저항력으로 지지되는 지압형 앵커, 그리고 이들 두 방식이 복합된 복합형 앵커 등으로 분류할 수 있다.

마찰형 앵커는 그라우트에 하중이 가해지는 방식에 따라서 인장형 앵커와 압축형 앵커로 분류할 수 있으며 압축형 앵커는 하중의 분포에 따라 다시 하중 집중형 앵커와 하중 분산형 앵커로 분류될 수 있다.

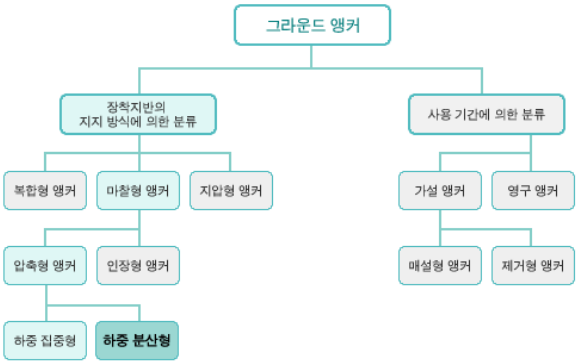


그림 3.2 그라운드 앵커의 분류

다중 강연선을 이용하는 앵커의 장력 모니터링에 사용되는 스트레인게이지 타입의 로드셀은 강연선 내부의 세부적인 변형율 측정이 불가능하며 장기모니터링에 한계가 있다. 또한 현재 앵커의 설계방법에서는 응력 분포를 무시하고 앵커에 작용하는 마찰저항이 깊이 방향으로 동일하게 분포한다고 가정하여 설계한다. 이를 개선할 수 있는 방안으로 개발된 스마트 텐던은 강연선 내부의 국부적인 변형까지 측정 가능하므로 부재와 센서로서의 기능을 동시에 수행할 수 있다. 본 연구에서는 광섬유(FBG)센서를 내장한 스마트 텐던을 상용화함으로써 앵커 시공시 및 유지관리시 긴장력 관리기술을 개발하고 스마트 텐던을 이용한 앵커의 국부변형 및 국부 저항력 모니터링 기술을 개발하기 위한 추가기술을 개발하고자 한다.

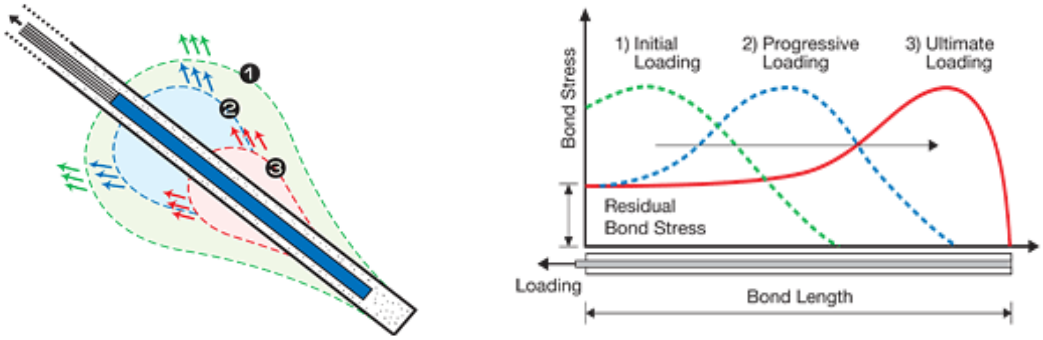
가. 앵커(Anchor)의 종류 및 특성

본 연구에서 스마트 텐던이 적용된 앵커는 (주)삼우기초기술에서 제작되고 판매되는 마찰형 앵커이다. 마찰형 앵커는 그라우트에 하중이 가해지는 방식에 따라서 인장형 앵커와 압축형 앵커로 분류할 수 있으며 압축형 앵커는 하중의 분포에 따라 다시 하중집중형 앵커와 하중 분산형 앵커로 분류될 수 있다. 앵커의 종류별 특성은 다음과 같다.

(1) 인장형 앵커

인장형 앵커는 그라우트 내의 인장 크랙과 하중 집중으로 인한 크립 등으로 진행성 파괴 현상이 발생되어 하중감소가 크다는 단점을 가지고 있다. 따라서 주변 마찰분포 그래프(그림 3.3(b))에서와 같이 하중이 재하되는 초기에는 곡선 1)과 같은 하중전이 분포를 가지지만 시간이 경과함에 따라 위와 같은 원인등으로 인해 3)과 같은 곡선으로 변화하며 이때 하중이 감소하게 된다. 또한 하중변화도(그림 3.3(a))에서 알 수 있듯이 그라우트체에 인장력을 주면 설계시 예상한 하중곡선 ①을 기대하지만 실제로는 하중 집중구간이 대상 지반의 극한 인발력을 상회하게 되므로 결국 ②의 하중곡선으로 이완되며 ③의 하중곡선에서 정착된다. 이러한 경우가 발생되는 주된 이유는 하중의

집중으로 인한 국부 마찰력의 저하 등이다.



(a) 하중변화도 (b) 주변 마찰 분포그래프

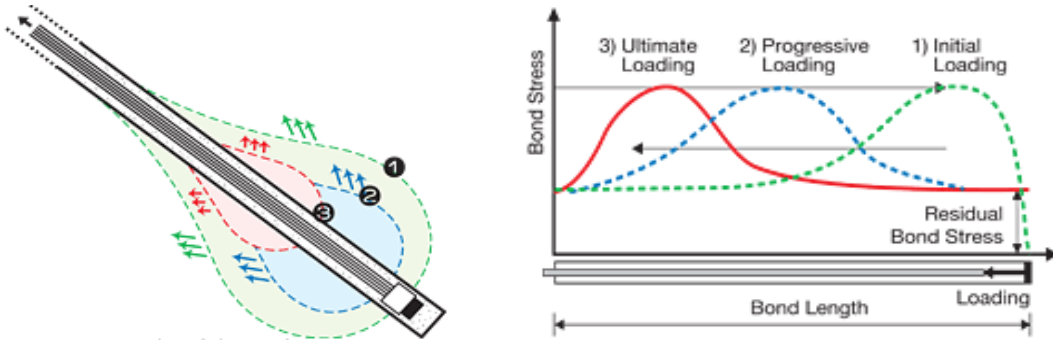
그림 3.3 인장형 앵커

(2) 압축형 앵커

(가) 하중 집중형 앵커

하중 집중형 앵커는 PE코팅된 P.C 강연선을 사용하여 별도의 정착체에 강연선을 구속시켜 그라우트에 압축력을 발생시킬 수 있다. 인장형 앵커에 비해 크립에 의한 하중감소는 적으나 고강도의 그라우트를 사용해야 하며 비교적 연약한 지반에서는 소정의 앵커력을 확보할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 또한 그라우트에 작용하는 압축력은 하중변화도(그림 3.4(a))에서 볼 수 있듯이 하중 집중이 선단부에 발생하게 되며 이러한 하중집중은 그라우트를 파괴시킬 수 있고 극한 마찰력을 상회하는 하중을 도입하고자 할 때는 천공경의 증가나 주변 구속압이 높은 암반에 정착시켜야 한다는 단점이 있다.

하중 집중형 앵커는 인장형 앵커의 경우와 마찬가지로 하중저감(하중변화도①→②→③)이 발생하고 압축파괴에 의한 갑작스런 하중저감이 발생할 수 있는 요인이 있다. 또한 주변 마찰 분포 그래프(그림 3.4(b))에서도 알 수 있듯이 하중 집중형 앵커의 경우 하중전이 분포는 1)에서 3)으로 변화하여 하중이 감소하게 된다.



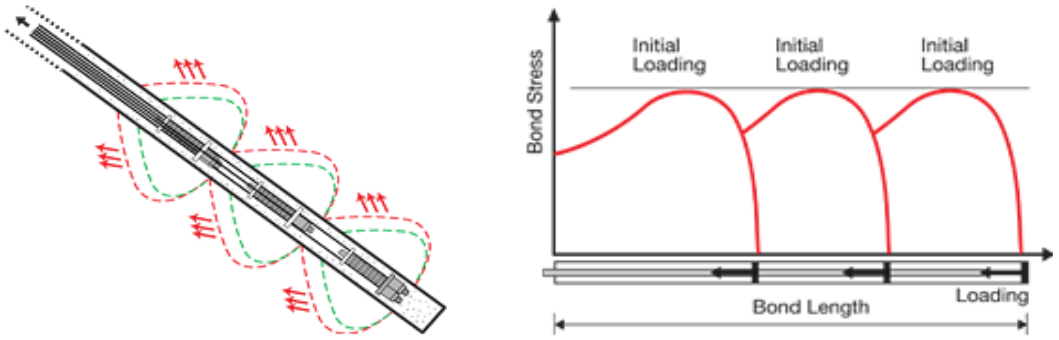
(a) 하중변화도 (b) 주변 마찰 분포그래프

그림 3.4 하중 집중형 앵커

(나) 하중 분산형 앵커

인장형 앵커와 하중 집중형 앵커의 단점을 보완하기 위해서는 정착지반 및 그라우트체에 극단적인 하중 집중이 발생하지 않아야 하며, 자유부의 구속이 발생하지 않는 PE 코팅된 P.C 강연선을 사용하여야 하고 지반조건에 따라 허용 앵커력을 적용하기가 용이하여야 한다. 이를 위하여 하중 분산형 압축앵커가 개발되어 사용되고 있으며 이 경우 하중이 앵커체 여러 부분에 분산되어 재하되므로 그라우트 강도에 영향이 적고 비교적 연약한 지반에서도 소정의 앵커력을 확보할 수 있으며 일반 토사 지반에서도 암반에서와 같이 고하중을 발휘할 수 있다.

하중 분산형 압축앵커는 하중분포도(그림 3.5(a)) 및 주변 마찰분포 그래프(그림 3.5(b))에서 볼 수 있듯이 하중이 분산되어 지반에 가해지므로 하중 감소가 지극히 적으며 시간에 관계없이 초기 하중분포를 유지하게 된다.



(a) 하중변화도 (b) 주변 마찰 분포그래프

그림 3.5 하중 분산형 앵커

나. 앵커의 장력 측정방법

흙막이 굴착지반 및 사면의 보강공법으로 많이 적용되고 있는 앵커의 장력 및 하중전이를 효과적으로 측정할 수 있는 방법으로 앵커 정착부에 로드셀을 설치하여 앵커의 최종적인 인장력 변화를 측정하는 방법이 있으며 스트레인게이지 타입의 계측기를 직접 강연선에 부착하여 앵커의 깊이방향 하중전이를 측정하는 방법이 있다. 이러한 방법은 보통 4~10줄의 강연선의 종합적인 장력변화만을 측정할 뿐 응력의 집중에 의해 내부에서 발생하는 앵커력을 모니터링할 수 없으며 스트레인게이지 타입의 계측방법은 측정시스템 내의 전자기장, 온도나 진동 등이 측정결과에 영향을 미치며 또한 하나의 게이지 마다 둘 이상의 케이블이 설치되기 때문에 관리상 어려움이 많고 측정 구간이 늘어날수록 증가하는 케이블의 부피로 인하여 구조물의 강도 저하 등에 문제가 발생될 수 있다. 특히 지중에 매설되고 장기간 계측이 요구되는 경우에는 계측 값에 대한 신뢰성이 급격하게 저하되는 단점이 있다. 따라서 이러한 앵커의 장력 모니터링

을 개선할 수 있는 방안으로 광섬유 센서를 이용한 스마트 텐던의 적용을 고려할 수 있다(김영상 등, 2009).

2. 스마트 앵커

스마트 앵커란 기존의 소일앵커 및 락앵커에 적용되는 앵커와 대비하여 장력을 관리함으로써 장기적인 안전성을 확보할 수 있도록 개발한 새로운 개념의 앵커로서, 장력의 관리를 위하여 광섬유센서(optical fiber sensor)를 이용하고 있어서 스마트 앵커(smart anchor)라 명명하고 있다. 본 연구에서는 스마트 앵커를 상업적으로 성공시키기 위한 다양한 현장 적용성을 검토하고 실제 적용해 봄으로써 현장 적용시 발생할 수 있는 다양한 문제들에 대한 대비책을 마련하기 위한 연구를 진행하였다. 이를 위하여 광섬유 센서를 탑재한 단선 스마트 텐던을 실제 판매되고 있는 상용 앵커제품의 일부 텐던과 교체하고 현장에 설치하여 인발실험과 장기모니터링 실험을 실시하였다.

가. 스마트 텐던의 개념

스마트 텐던은 김재민 등(2007), 김영상 등(2009)이 7연 강연선의 변형률 및 장력변화를 효과적으로 모니터링 할 수 있도록 강연선 중앙 케이블 내부에 FBG센서를 삽입하여 제작한 새로운 개념의 텐던이다. 스마트 텐던은 그림 2.6과 같이 강연선의 중앙 킹케이블을 중공 강제 튜브(ø1.0~2.0mm)로 교체한 후, 튜브 내부에 광섬유 센서를 삽입하고 접착제(폴리에스터레진+경화제)를 주입하여 케이블과 일체가 되도록 한 7연 강연선이다(김재민 등, 2007).

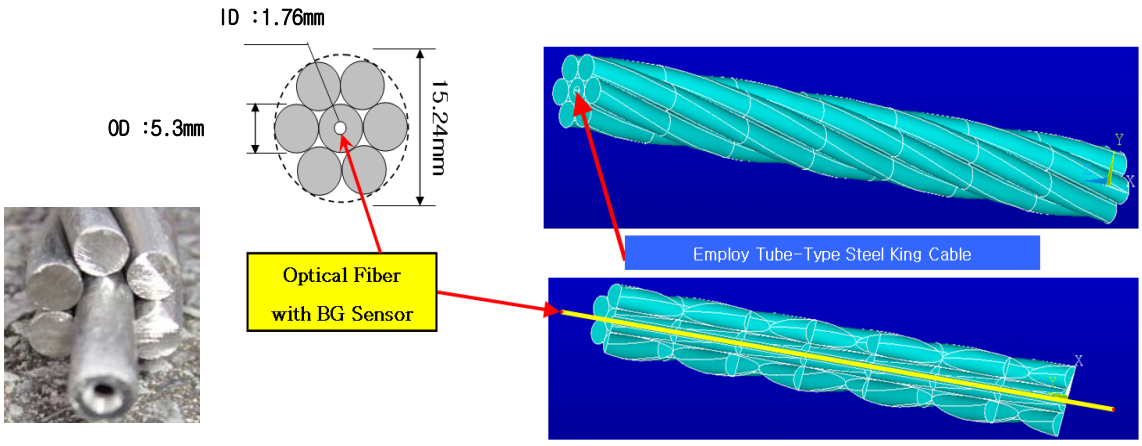


그림 3.6 스마트 텐던의 개념도

그림 3.7은 FBG 센서의 구조를 나타내며 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 브래그 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유 격자에 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다. FBG에 온도나 압력 등의 외부

물리량을 인가할 경우 브래그 파장이 달라진다. 그러므로 브래그 파장의 변화를 측정한다면 FBG에 가해진 물리량을 구할 수 있다. 온도와 변형률 변화에 대한 브래그 반사파장의 변화량($\Delta\lambda_B$)은 다음 식 3.1과 같다(Hill and Meltz, 1997).

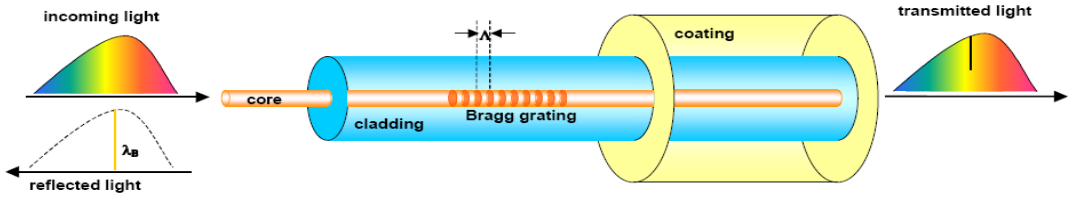


그림 3.7 FBG 센서의 구조 및 측정원리

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(1-P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha+\xi)\Delta T] \qquad (3.1)$$

여기서, α : 광섬유의 온도에 따른 팽창계수로 실리카의 경우 $0.55\times10^{-6}/℃$

ξ : 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열 광학계수로서 약 $8.30\times10^{-6}/℃$

P_e : 광탄성 상수로 게르마늄 실리카 유리의 경우 대략 0.22

$\Delta\varepsilon$: 광섬유 격자에 가해진 변형률 변화량

ΔT : 광섬유 격자에 가해진 온도 변화량

나. 스마트 텐던의 제작

상기에서 설명한 스마트 텐던 개념을 근거로 하여 일반 7연 강연선의 중앙 킹케이블을 중공의 스틸튜브로 교체한 후 스틸튜브 내부에 FBG센서를 삽입한 후 레진 및 경화제를 주입하여 FBG센서를 텐던과 완전히 일체화하여 스마트 텐던을 제작한다.

레진 및 경화제는 각각 2:1 배합비로 혼합하여 사용하였으며, 원활한 주입을 위해 본 연구기간 동안 주입장치를 개발하고, 주입시스템을 제안하였다. 이동식 에어콤프레셔를 이용하여 주입탱크에 압력을 가하고 충진제를 넣어 토출기로 주입하는 방법으로 구성된다. 이 주입장치의 최대압력은 10bar 이상이며, 충진제는 주입탱크 안에서 다른 용기에 담겨 충진제의 교체를 원활하도록 되어 있다.




(a)강연선 절단




(b) 강연선 해체 및 중공킹케이블 교체




(c)FBG센서 삽입



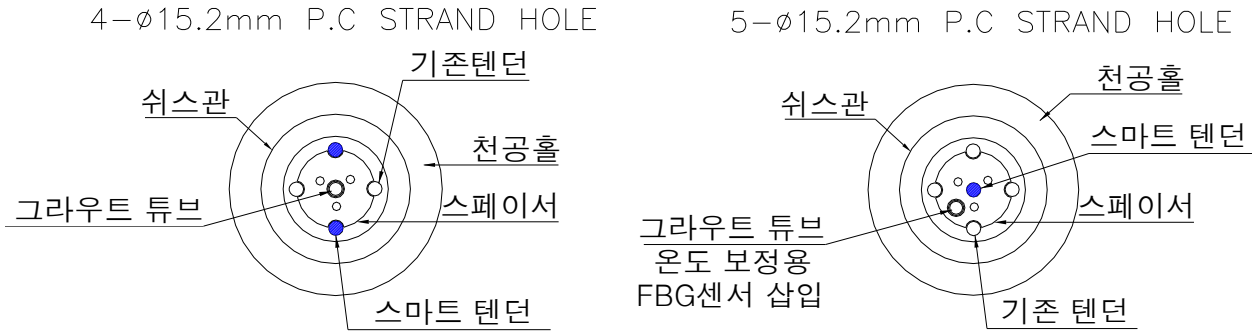

(d)레진 주입 (e)스마트 텐던 테스트

그림 3.8 스마트 텐던 제작과정

다. 실대형 스마트 앵커의 제작

(1) 스마트 앵커의 제원

스마트 앵커의 현장 인발실험 및 사면 모니터링을 위해 인장형 앵커 12개 및 압축형 앵커 5개를 계획하였다. 앵커의 정착장 및 자유장 길이는 국내의 일반적인 설계 기준인 자유장 4m이상, 정착장 3~10m를 근거로 하여 결정하였으며 스마트 앵커체의 강연선 배치도 및 제원은 다음과 같다.



(a) 강연선 배치(4가닥) (b) 강연선 배치(5가닥)

그림 3.9 스마트 앵커체 강연선 배치도

① 인장형 앵커

표 3.1 인장형 앵커 제원

앵커번호	목 적	앵커전장 (m)	천공장 (m)	정착장 (m)	자유장 (m)	강선수 (EA)	천공경 (mm)
1	현장 모니터링	10.5	9.5	5	5.5	4	120
2		10.5	9.5	6	4.5	4	120
3		10.5	9.5	5	5.5	5	120
4		10.5	9.5	4	6.5	4	120
5		10.5	9.5	3	7.5	4	120
6	현장 인발실험	11.5	10.5	7	4.5	4	105
7		11.5	10.5	5	6.5	5	105
8		11.5	10.5	4	7.5	4	105
9		11.5	10.5	4	7.5	4	105
10		11.5	10.5	4	7.5	4	150
A		11.5	10.5	6	5.5	4	105
B		11.5	10.5	3	8.5	4	105

② 압축형 앵커

표 3.2 압축형 앵커 제원

앵커번호	목 적	앵커전장 (m)	천공장 (m)	내하체 개소		내하체 간격 (m)	강선수 (EA)	천공경 (mm)
11	현장 모니터링	10.5	9.5	1	하중 집중형	-	3	120
12		10.5	9.5	2	하중 분산형	2	4	120
13		10.5	9.5	1	하중 분산형	-	4	120
14		10.5	9.5	1	하중 집중형	-	3	120
15		10.5	9.5	2	하중 분산형	4	4	120

(2) FBG센서의 배치 계획

앵커의 제원과 하중전이 측정목적을 고려하여 FBG 센서배치 계획을 수립하였으며 센서 배치 계획도는 다음과 같으며, 앵커에 배치되는 광섬유 센서는 앵커 전체 심도에서 미치는 온도에 대한 영향을 고려하기 위하여 2-point 온도보정용 FBG 센서조합을 사용하였다.

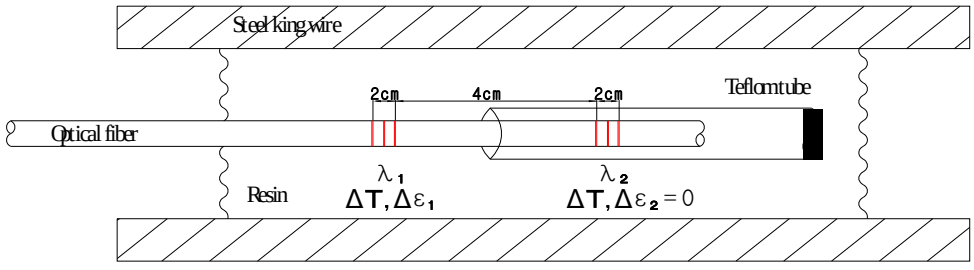


그림 3.10 앵커타입 2-point 온도보정 FBG센서 모식도

그림 3.10은 앵커타입 2-point 온도보정 FBG센서의 모식도로서, λ_{b2}의 파장을 가진 센서를 보호튜브 안에서 하중을 받지 않도록 하면서 온도변화에 대한 파장변화만을 측정하고$(\Delta\varepsilon_2 = 0, \Delta T \neq 0)$, λ_{b1}의 FBG센서는 온도+변형률을 측정 한다$(\Delta\varepsilon_1 \neq 0, \Delta T \neq 0)$.

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_{b2}} = (\alpha_{op} + \xi)\Delta T \qquad \text{식 3.2}$$

여기서, λ_{b2}: 광섬유 격자의 중심파장

$\Delta\lambda_2$: 광섬유 격자의 파장 변위량

α_{op}: 광섬유의 온도에 따른 팽창계수로 실리카 유리의 경우 약 $0.510\times10^{-6}/℃$ 이다.

ξ: 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수로 약 $8.310\times10^{-6}/℃$ 이다.

ΔT: 온도변화

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_{b1}} = (\alpha_{op} + \xi)\Delta T + (1-P_e)\Delta\varepsilon \qquad \text{식 3.3}$$

여기서, λ_{b1}: 광섬유 격자의 중심파장

$\Delta\lambda_1$: 광섬유 격자의 파장 변위량

α_{op}: 광섬유의 온도에 따른 팽창계수로 실리카 유리의 경우 약 $0.510\times10^{-6}/℃$ 이다.

ξ: 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수로 약 $8.310\times10^{-6}/℃$ 이다.

P_e: 광탄성 상수로 게르마늄 실리카 유리의 경우 대략 0.22이고 광섬유의 물성에 따라 값이 조금씩 달라진다.

$\Delta\varepsilon$: 광섬유 격자에 가해진 변형률

ΔT: 온도변화

그림 3.7과 같이 λ_{b1}의 브래그 파장변화를 이용한 변형률 계산에 있어 온도변화의 영향으로 오차가 발생함을 확인 할 수 있다. 이를 보정하는 방법으로 λ_{b2}의 온도변화 파장을 이용 λ_{b1}의 파장을 연산하여 실제 하중에 대한 변형률 측정이 가능하다. 즉 식 2.3에서 식 2.2를 연산함으로 아래와 같은 방법으로 간단하게 계산할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_{b2}} \\ \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_{b1}} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (\alpha_{op}+\xi) & 0 \\ (\alpha_{op}+\xi) & (1-P_e) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{Bmatrix} \qquad \text{식 3.4}$$

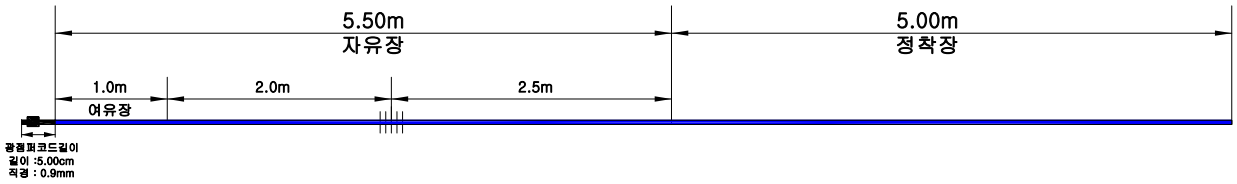
$$\begin{Bmatrix}\Delta T\\ \Delta\varepsilon\end{Bmatrix}=\frac{1}{(\alpha_{op}+\xi)(1-P_e)}\begin{bmatrix}(1-P_e) & 0\\ -(\alpha_{op}+\xi) & (\alpha_{op}+\xi)\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dfrac{\Delta\lambda_2}{\lambda_{b2}}\\ \dfrac{\Delta\lambda_1}{\lambda_{b1}}\end{Bmatrix} \quad \text{식 3.5}$$

$$\Delta T=\frac{1}{(\alpha_{op}+\xi)}\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_{b2}} \quad \text{식 3.6}$$

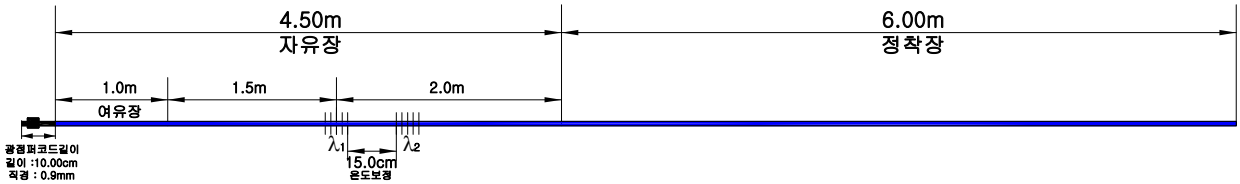
$$\Delta\varepsilon=\frac{1}{(1-P_e)}\left(\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_{b1}}-\frac{(\alpha_{op}+\xi)}{(\alpha_{op}+\xi)}\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_{b2}}\right) \quad \text{식 3.7}$$

그러므로 위 식 3.6에 의해 온도변화를 확인하고, 이를 이용 식 3.7과 같은 온도 보정된 변형률 값을 측정할 수 있다.

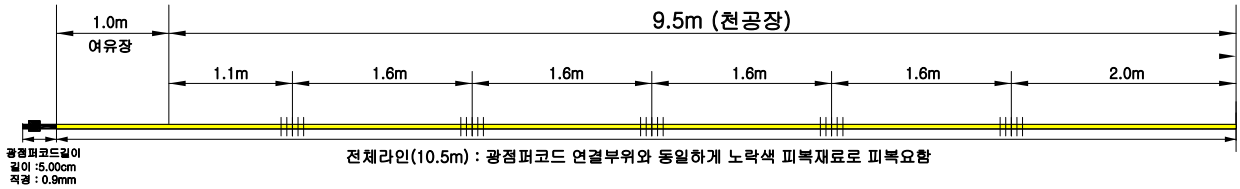
(가) 인장형 앵커 센서 배치도



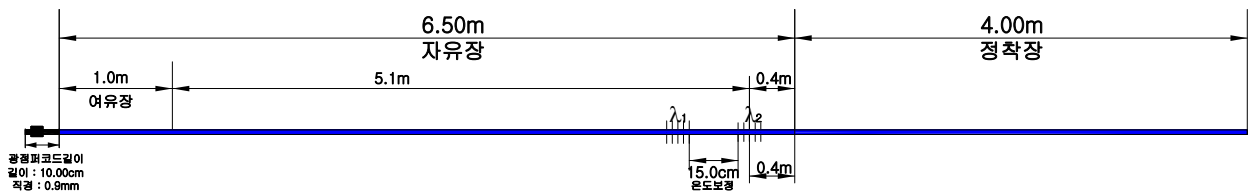
〈No. 1〉



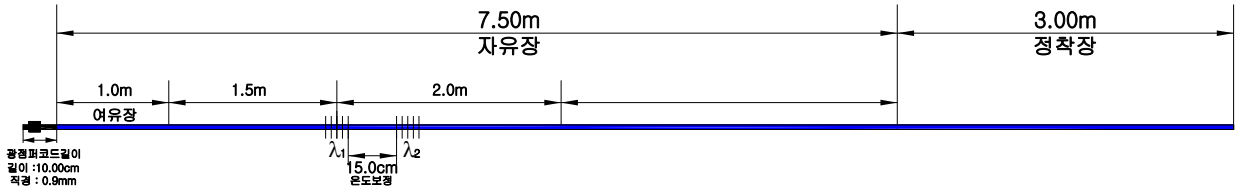
〈No. 2〉



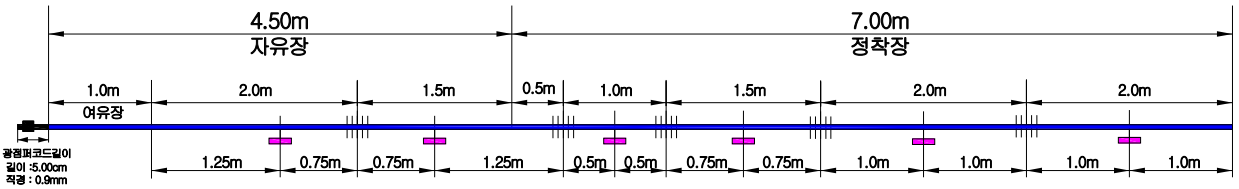
〈No. 3〉 온도 보정용 센서



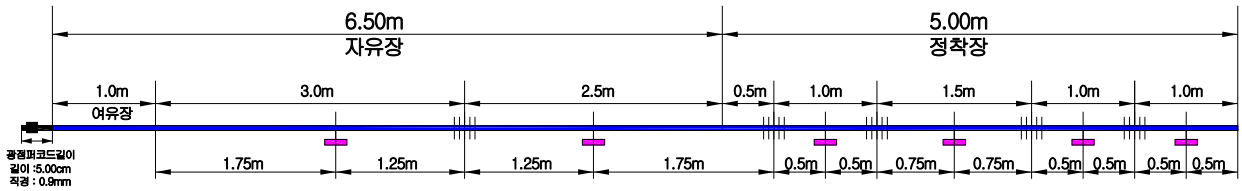
〈No. 4〉



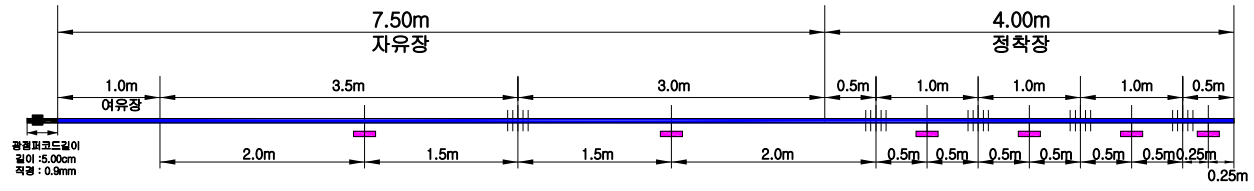
〈No. 5〉



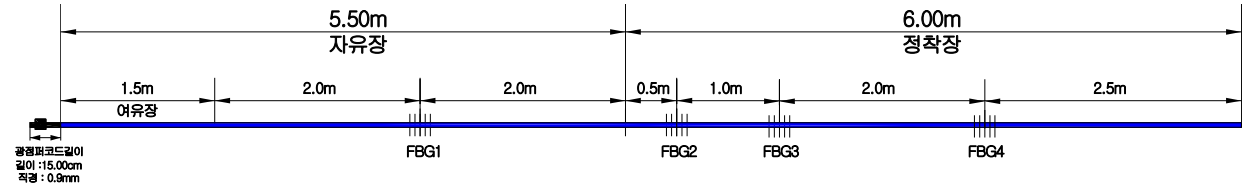
〈No. 6〉



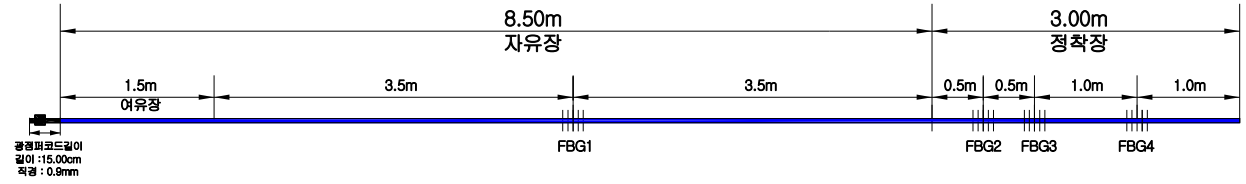
〈No. 7〉



〈No. 8, 9, 10〉



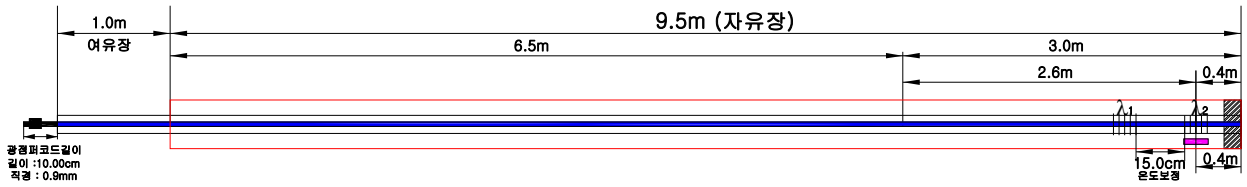
〈No. A〉



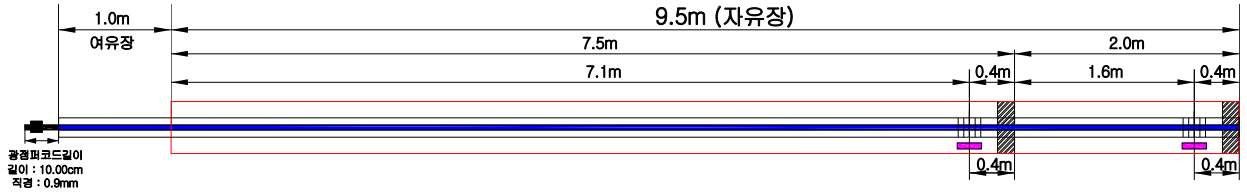
〈No. B〉

그림 3.11 인장형 앵커 센서 배치도

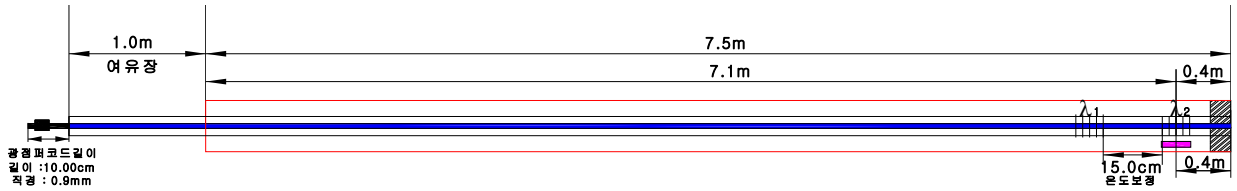
(나) 압축형 앵커 센서 배치도



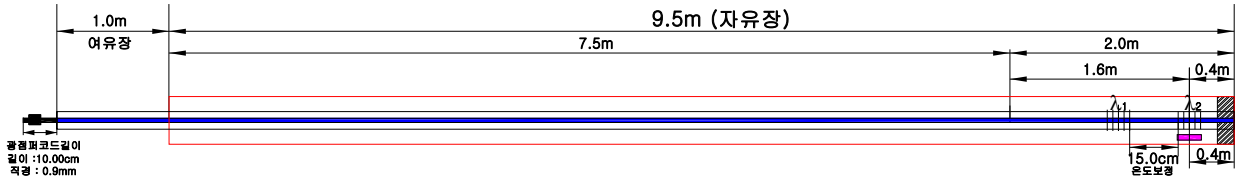
〈No.11〉 하중집중형



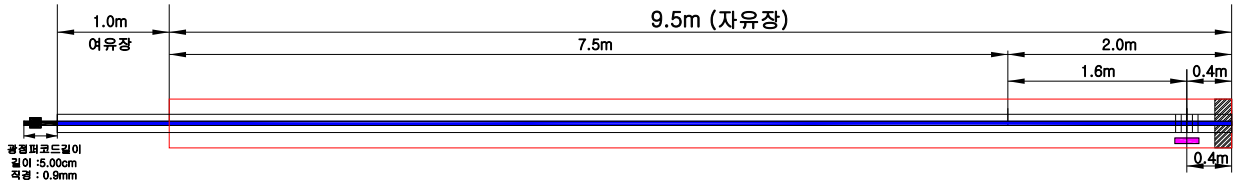
〈No.12〉 하중분산형



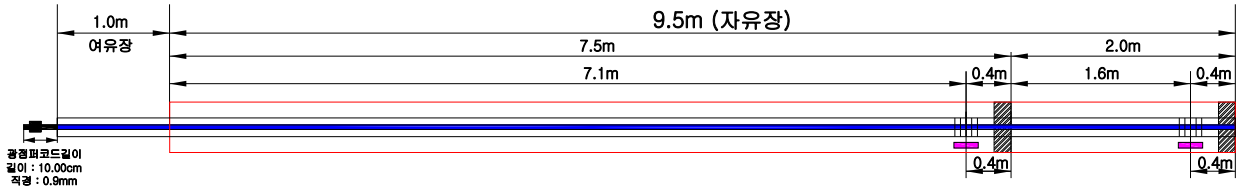
〈No.12-1-1〉



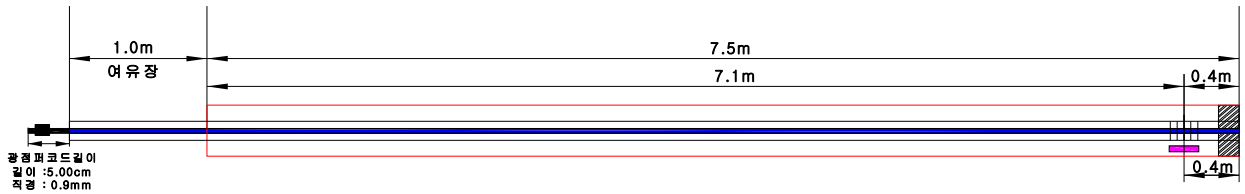
〈No.12-2-1〉



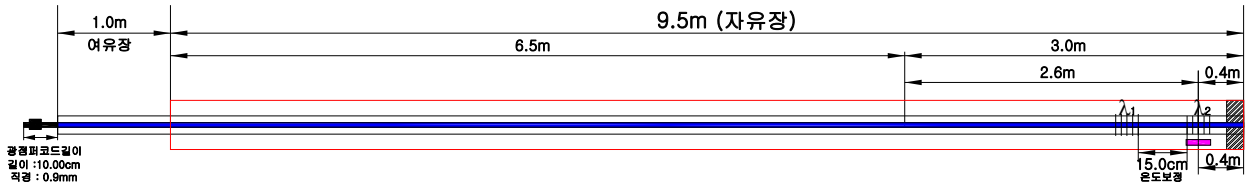
〈No.12-2-2〉



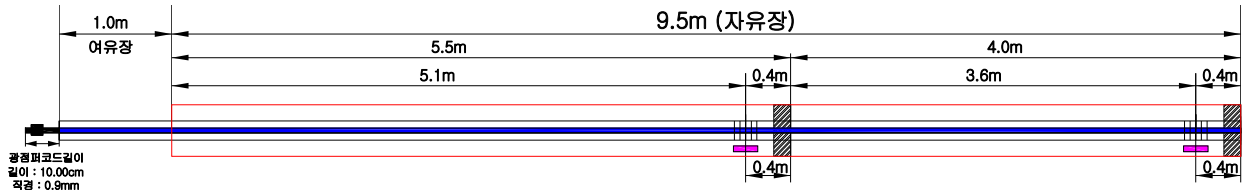
〈No.13〉



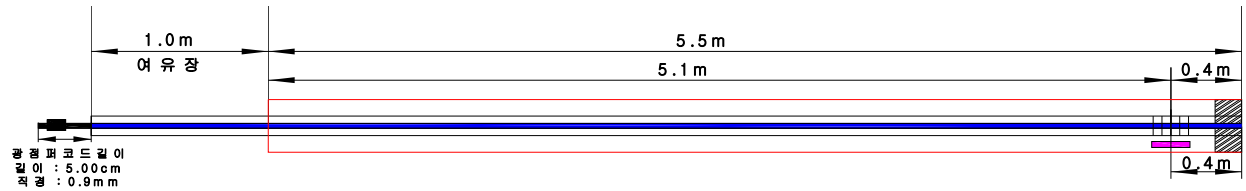
<No.13-1-2> 하중분산형



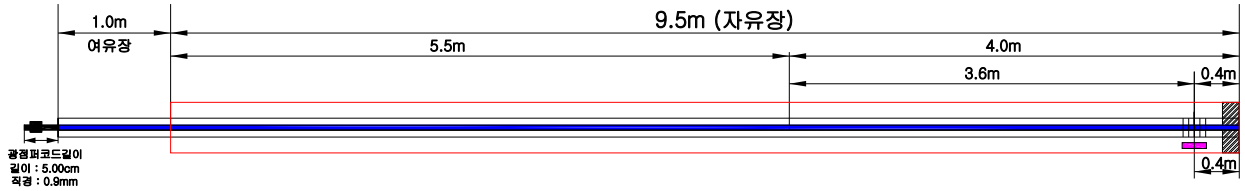
<No.14-2-1> 하중집중형



<No.15> 하중분산형



<No.15-1-2>



<No.15-2-2>

그림 3.12. 압축형 앵커 센서 배치도

(3) 스마트 앵커의 제작

스마트 앵커의 현장 검증 실험 및 시험시공을 위해 계획한 스마트 앵커는 (주)삼우기초기술에서 판매되고 있는 인장형 앵커 12개, 압축형 앵커 5개의 상용 제품에 스마트 텐던을 일부 텐던과 교체하여 제작하였으며, 그림 3.11 및 12과 같이 실대형의 스마트 앵커(L=11.5m)로 제작하였다.



(a)쉬스관 삽입



(b)앵커조립



(d)간격재 고정



(f)인장형 앵커

그림 3.13 스마트 앵커(인장형) 제작과정



(a) 선단재하판 준비



(b)선단재하판 삽입



(c)선단재하판 고정



(d)앵커조립



(e) 압축형 앵커



(f)스마트 앵커 테스트

그림 3.14 스마트 앵커(압축형) 제작과정

3. 스마트 앵커 현장 인발실험 및 시험시공

본 절에서는 스마트 텐던을 실대형(Prototype) 앵커(L=11.5m)에 적용하여 장력 모니터링 및 하중전이 계측에의 적용 가능성을 확인하기 위해 다양한 지반조건에서 현장 인발실험을 계획하였다. 실험을 위해 전남대학교 해양환경 시뮬레이션 실험시설 건설공사 현장 및 (주)삼우기초기술 김포 공장부지 원지반에 실대형(Prototype) 앵커(L=11.5m)를 설치하였다.

가. 앵커의 현장설치 및 인발실험 장비

(1) 전남대학교 해양환경 시뮬레이션 실험시설 건설공사 현장

실험이 수행된 지반의 지층은 지반조사 결과를 바탕으로 볼 때 상부로부터 매립층, 풍화토층, 풍화암층, 보통암층, 경암층 순으로 구성되었으며, GL(-)6.2m 이하는 경암층이 위치하고 있다. 현장 인발실험이 수행된 앵커의 정착장 구간은 GL(-)6.5~10.5m에 위치하므로 정착장 위치의 지반은 경암층 이상으로 확고한 정착이 이루어져 있을 것으로 판단된다. 실대형 앵커의 현장 인발실험을 수행하기 위해 연장 11.5m의

스마트 텐던을 제작하였으며 현장 인발실험에 사용된 앵커는 현재 상용되고 있는 제품의 스마트 텐던을 일부 텐던과 교체하여 실대형의 스마트 앵커(L=11.5m)로 제작하였으며, 그림 2.13와 같이 로타리 타입의 드릴오거로 천공 후 현장 원지반에 설치되었고 무가압으로 그라우트 되었다. 그라우트의 물-시멘트 비는 45%이고 28일 압축강도는 210kgf/cm2이다. 앵커에 적용된 스마트 텐던의 직경은 15.2mm이고 탄성계수는 200GPa이며 단면적은 1.39991cm^{2}이다.



(a)스마트 앵커 준비



(b)천공



(c)앵커 삽입




(d)앵커 삽입



(e)현장실험 앵커

그림 3.15 현장 인발실험용 앵커 설치(1)

(2) (주)삼우기초기술 김포 공장부지 현장

실험이 수행된 지반의 지층은 상부로부터 매립층, 전답토층, 풍화토층 순으로 구성되었으며, GL(-)5.0~10.0m 구간은 풍화토층이 위치하고 있다. 현장 인발실험이 수행된 앵커의 정착장 구간은 GL(-)4.0~7.0m에 위치하므로 정착장 위치의 지반은 풍화토층이 위치하고 있을 것으로 판단된다. 실대형 앵커의 현장 인발실험을 수행하기 위해 연장 11.5m의 스마트 텐던을 제작하였으며 현장 인발실험에 사용된 앵커는 현재 상용되고 있는 제품의 스마트 텐던을 일부 텐던과 교체하여 실대형의 스마트 앵커(L=11.5m)로 제작하였으며, 그림 3.16과 같이 로타리 타입의 드릴오거로 천공 후 현장 원지반에 설치되었고 무가압으로 그라우트 되었다. 그라우트의 물-시멘트 비는 45%이고 28일 압축강도는 210kgf/cm^{2}이다. 앵커에 적용된 스마트 텐던의 직경은 15.2mm이고 탄성계수는 200GPa이며 단면적은 1.39991cm^{2}이다.



(a)스마트 앵커 준비



(b)천공



(c)그라우팅



(d)현장실험 앵커

그림 3.16 현장 인발실험용 앵커 설치(2)

스마트 앵커의 현장 인발실험을 위해 사용된 인발장비 및 계측장비는 다음 그림과 같다.



(a) 인발 장비



(b) 계측장비

그림 3.17 현장인발 장비 및 계측장비

나. 인발실험 방법

(1) 전남대학교 해양환경 시뮬레이션 실험시설 건설공사 현장

현장 인발실험은 일반적인 인발 실험과 같이 유압펌프에 의해 하중을 가해 앵커 두부에 설치된 하중계 및 변위계에 의해 하중 재하에 따른 두부 변위를 측정하는 방법과 스마트 텐던에 내장된 FBG센서의 하중재하에 따른 변형률을 측정하는 방법으로 수행되었다. 하중 재하단계는 앵커의 설계하중까지의 하중단계와 극한강도 확인을 위한 하중단계로 나누어 수행하였다. 앵커의 설계하중까지의 하중단계는 5tonf의 초기하중에서부터 설계하중 25tonf까지 9단계이며, 극한강도 확인을 위한 하중단계는 16tonf의 초기하중에서부터 80tonf까지 5단계이다.

표 3.3 앵커의 설계하중(25tonf)까지의 하중재하 단계(a)

Step	Loading Cycle	Applied Load (tonf)	Total Movement
1	**Apply alignment load(AL=5tonf) : Cycle 1**		
2	Cycle 2	7.5tonf	δ
		AL(5tonf)	〃
3	Cycle 3	7.5tonf	〃
		10.0tonf	〃
		AL(5tonf)	〃
4	Cycle 4	7.5tonf	〃
		10.0tonf	〃
		12.5tonf	〃
		AL(5tonf)	〃
5	Cycle 5	7.5tonf	〃
		10.0tonf	〃
		12.5tonf	〃
		15.0tonf	〃
		AL(5tonf)	〃
:	:	:	:
9	Cycle 9	7.5tonf	〃
		10.0tonf	〃
		12.5tonf	〃
		15.0tonf	〃
		17.5tonf	〃
		20.0tonf	〃
		22.5tonf	〃
		25.0tonf	〃
		AL(5tonf)	〃

표 3.4 앵커의 극한강도 확인을 위한 하중재하 단계(b)

Step	Loading Cycle	Applied Load (tonf)	Total Movement
10	**Apply alignment load(AL=16tonf) : Cycle 1**		
11	Cycle 2	32.0tonf	δ
		AL(16.0tonf)	〃
12	Cycle 3	32.0tonf	〃
		48.0tonf	〃
		AL(16.0tonf)	〃
13	Cycle 4	32.0tonf	〃
		48.0tonf	〃
		64.0tonf	〃
		AL(16.0tonf)	〃
14	Cycle 5	32.0tonf	〃
		48.0tonf	〃
		64.0tonf	〃
		80.0tonf	〃
		AL(5tonf)	〃

다. 인발실험 결과

(1) 전남대학교 해양환경 시뮬레이션 실험시설 건설공사 현장

현장 인발실험을 수행하기 위해 5개의 인장형을 앵커를 설치하였으나 시공시 및 실험중 부주의로 스마트 텐던 두부의 FBG센서 광점퍼 코드 손실로 인해 본 연구에서는 앵커 7과 8에 대해서 인발하중에 의한 장력 모니터링을 수행하였다.

(가) FBG센서로 측정된 시간-변형률 분포

전 절에서 제시된 인발실험 장비 및 방법에 따른 인발실험 결과 스마트 텐던에 위치한 5개의 FBG 센서로 측정된 하중재하에 따른 시간-변형률 분포는 다음과 같다.

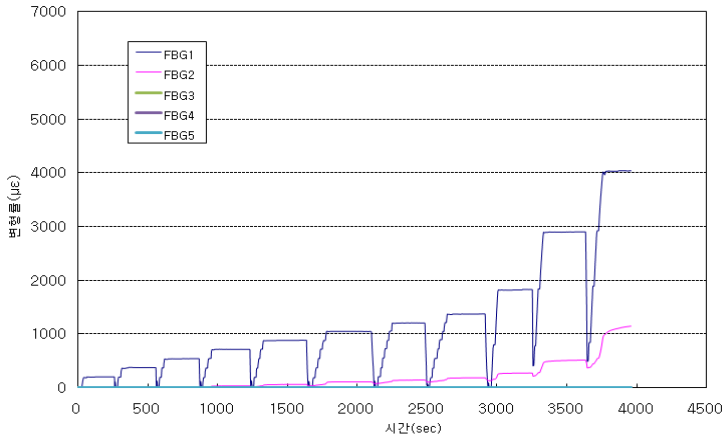


그림 3.18 FBG 센서로 측정된 하중재하에 따른 시간-변형률(앵커 7)

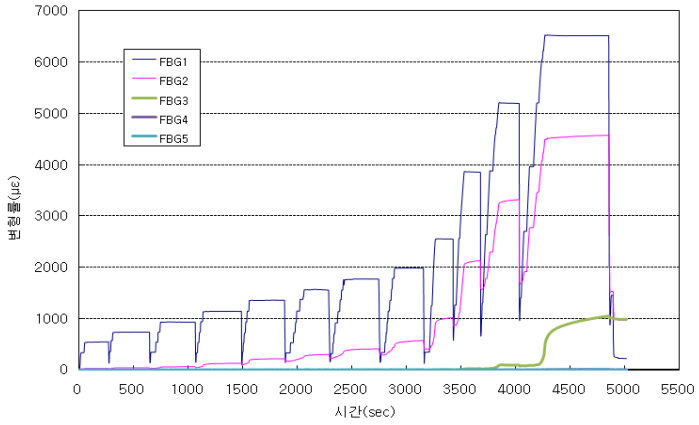


그림 3.19 FBG 센서로 측정된 하중재하에 따른 시간-변형률(앵커 8)

FBG센서로 측정된 하중재하에 따른 시간-변형률 분포는 앵커 7의 경우 FBG센서의 손실로 인해 최종하중 재하단계까지 변형률 분포를 나타내지 못했으며 앵커 8은 최종하중 재하단계까지 변형률 분포를 잘 나타내었다. 현장 정착장 부분의 지반은 경암층이 위치하므로 최종하중 이전 단계까지 5개 FBG 센서 중 자유장 및 정착장 두부 근처의 3개 지점에서는 효과적으로 변형률을 측정하고 단계하중별로 재하(Loading)와 제하(Unloading)를 잘 표현함을 알 수 있으며 정착장 하부의 나머지 2개지점은 거의 미소한 반응을 보이면서 앵커의 깊이 방향의 하중전이 분포를 확인하였다.

(나) 앵커에 작용하는 긴장력 분포 및 스마트 텐던의 장력측정 성능검증

현장 인발실험 결과 스마트 텐던의 항복하중(5tonf) 이전과 이후 하중단계에 각각의 FBG센서로 측정된 변형률(εFBG)을 아래 식 3.8에 대입하여 앵커에 작용하는 긴장력 분포를 확인하였다. 자유장 위치의 FBG센서에서 측정된 변형률로 산정한 긴장력 추정값(Pestimated)은 앵커 두부의 로드셀에 의해 측정된 긴장력(Pmeasured)값과 비교하여 스마트 텐던의 장력측정 성능을 검증하였다.

$$P_{measured} = A_t \times E_t \times \varepsilon_{FBG} \times n \qquad \text{식 3.8}$$

여기서, Pmeasured : 앵커에 작용하는 긴장력 추정값(tonf)

Et : 텐던의 탄성계수(= 200GPa=2039431.53kg/cm2)

At : 텐던의 단면적(= 1.39991cm2)

εFBG : FBG 센서로 측정된 변형률

n : 텐던 가닥수

① 앵커에 작용하는 긴장력 분포

앵커 두부에서 긴장력을 가한 후 앵커 내부에서 하중전이에 의한 긴장력 분포를 확인하기 위해 자유장 1개 지점 및 정착장 4개 지점에 FBG 센서를 배치하였다. .

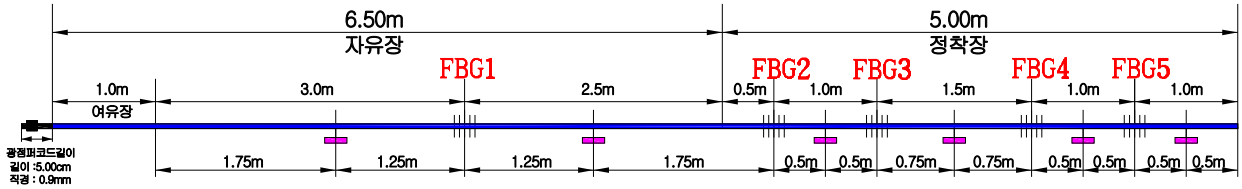


그림 3.20 FBG센서 배치도(앵커 7)

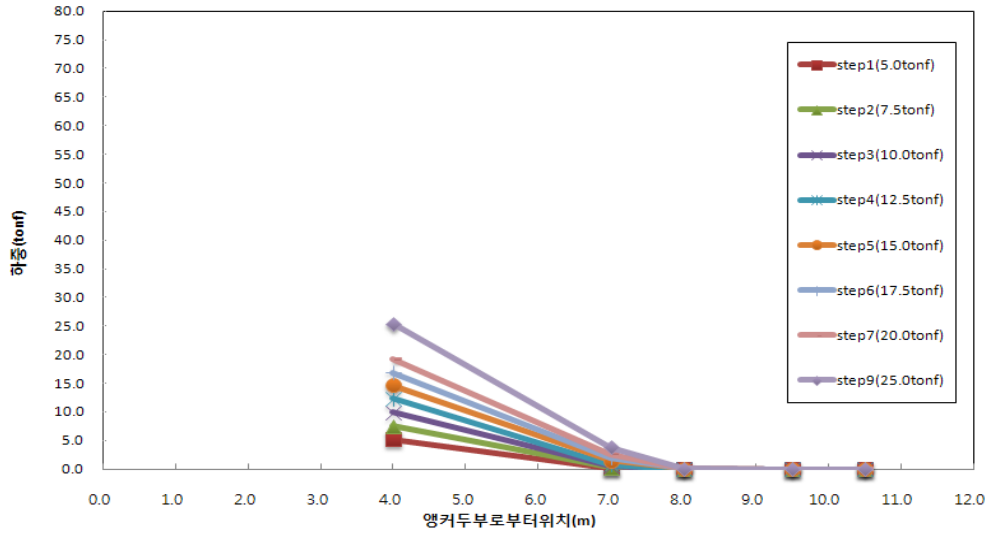


그림 3.21 앵커에 작용하는 긴장력 분포(앵커 7) - 스마트 텐던 항복하중(5tonf) 이전

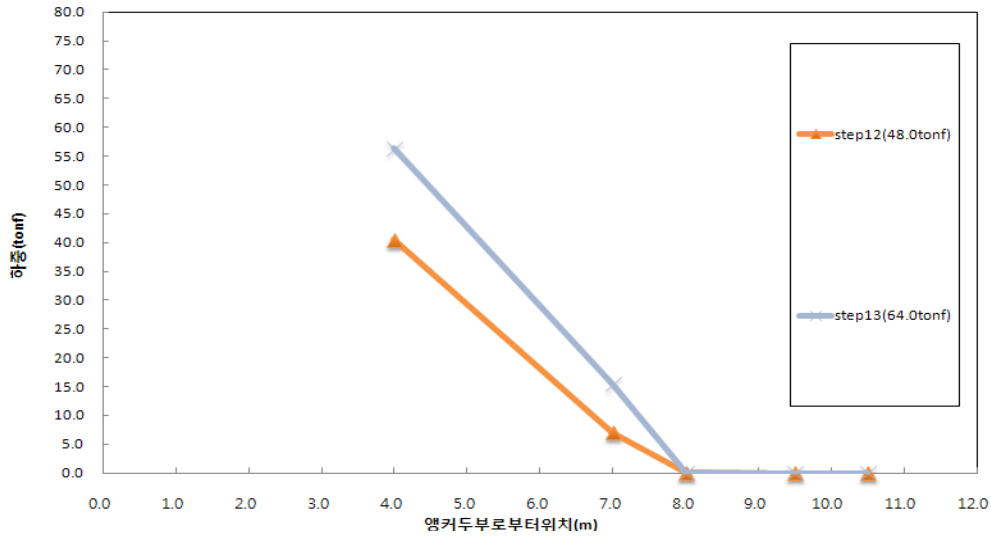


그림 3.22 앵커에 작용하는 긴장력 분포(앵커 7) - 스마트 텐던 항복하중(5tonf) 이후

앵커 7은 스마트 텐던의 항복하중(5tonf) 이전 단계에서는 1~9단계까지 앵커에 작용하는 긴장력 분포를 잘 나타내었지만 스마트 텐던의 항복하중(5tonf) 이후 단계에서는 12와 13단계의 긴장력 분포만을 나타내었다.

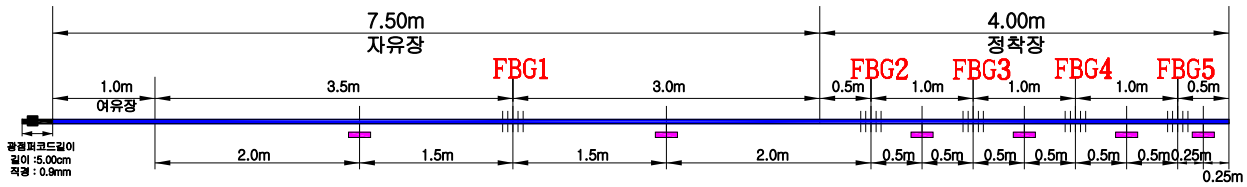


그림 3.23 FBG센서 배치도(앵커 8)

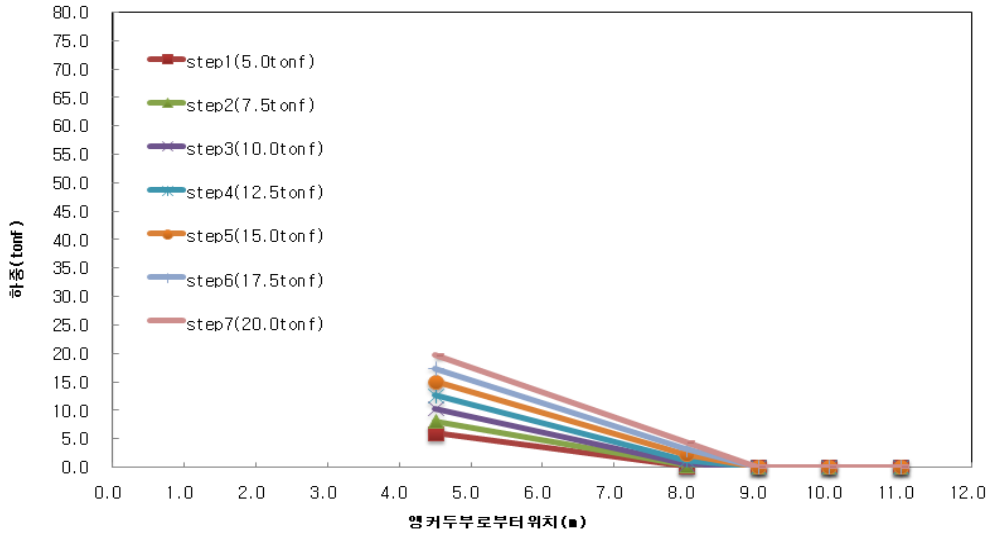


그림 3.24 앵커에 작용하는 긴장력 분포(앵커 8) - 스마트 텐던 항복하중(5tonf) 이전

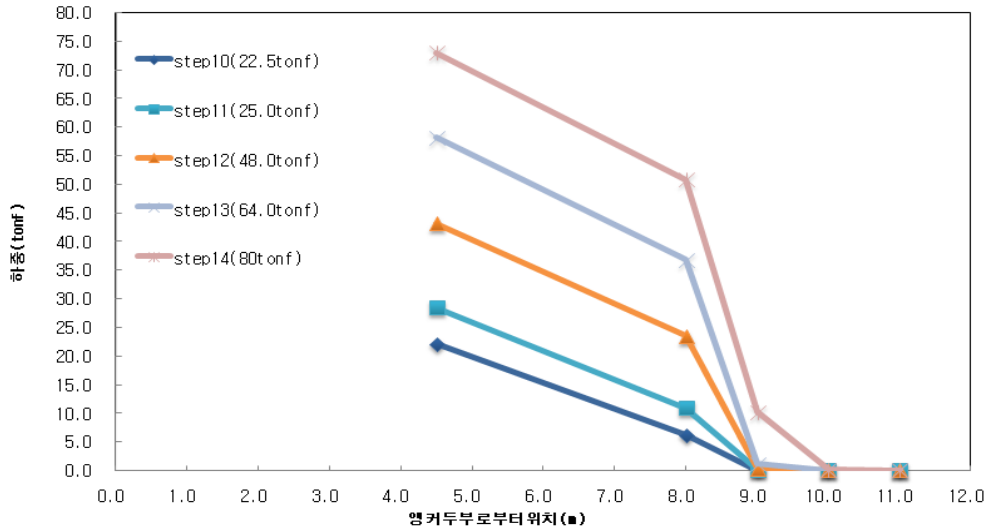


그림 3.25 앵커에 작용하는 긴장력 분포(앵커 8) - 스마트 텐던 항복하중(5tonf) 이후

앵커 8은 스마트 텐던의 항복하중(5tonf) 이전 단계에서는 1~7단계까지 앵커에 작용하는 긴장력 분포를 나타내었지만 스마트 텐던의 항복하중(5tonf) 이후 단계에서는 10~14단계까지 앵커에 작용하는 긴장력 분포를 잘 나타내었다.

FBG센서로 측정된 변형률로 산정한 앵커에 작용하는 긴장력 분포를 확인한 결과 스마트 텐던의 항복하중(5tonf) 이전 및 이후 단계에서 하중재하 단계에 따라 앵커의 깊이방향의 긴장력 분포를 잘 나타내고 있으며 자유장 부분에서는 앵커 두부의 긴장력이 효과적으로 전달되었다. 정착장 부분에서는 경암층이 위치하므로 일반 토사지반 보다 마찰저항력이 커서 긴장력 분포가 아주 미소한 반응을 보이면서 앵커의 깊이 방향의 하중전이 분포를 확인하였다.

② 스마트 텐던의 장력측정 성능검증

현장 인발실험 결과 앵커의 설계 하중(25tonf)까지의 하중단계와 극한강도 확인을 위한 하중단계에서 자유장에 설치된 FBG센서에서 측정된 변형률(εFBG1)로부터 다음 식 2.9를 이용하여 스마트 텐던에 작용하는 긴장력을 간단히 추정하였다.

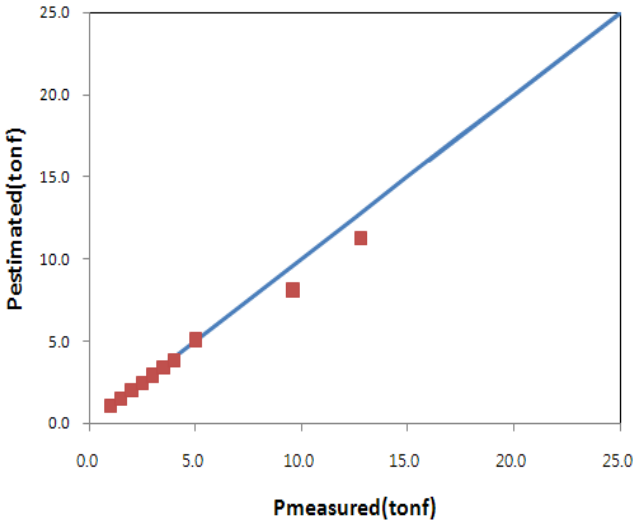
$$P_{estimated} = A_t \times E_t \times \varepsilon_{FBG1} \qquad \text{식 3.9}$$

여기서, Pestimated : 스마트 텐던에 작용하는 긴장력 추정값(tonf)

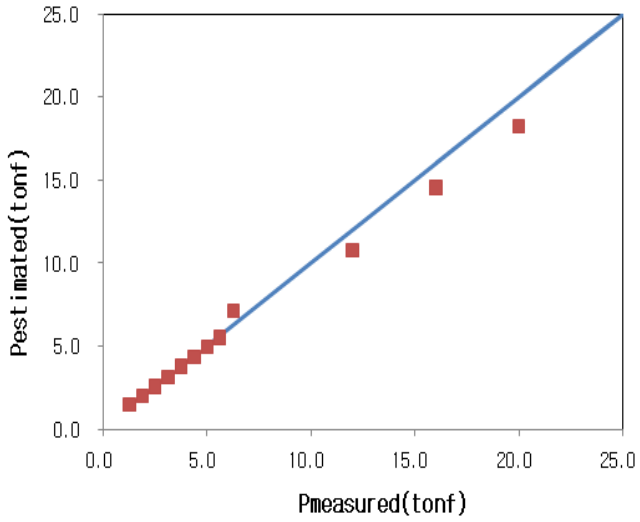
Et : 텐던의 탄성계수(= 200GPa=2039431.53kg/cm2)

At : 텐던의 단면적(= 1.39991cm2)

εFBG1 : 자유장에 설치된 FBG 센서로 측정된 변형률



(a) 앵커 7



(b)앵커 8

그림 3.26 FBG센서를 이용한 스마트 텐던의 긴장력 추정결과 비교

앵커 7은 자유장에서 측정된 변형률로부터 산정한 긴장력 추정값(Pestimated)과 앵커 두부의 로드셀에 의해 측정된 강연선의 긴장력(Pmeasured)과 비교한 결과 12.8tonf까지 범위에서 최대 1.5tonf의 오차가 발생하는 경우를 제외하고는 거의 일치하는 결과를 나타냈다.

앵커 8은 자유장에서 측정된 변형률로부터 산정한 긴장력 추정값(Pestimated)과 앵커 두부의 로드셀에 의해 측정된 강연선의 긴장력(Pmeasured)과 비교한 결과 20.0tonf까지 범위에서 최대 1.7tonf의 오차가 발생하는 경우를 제외하고는 거의 일치하는 결과를 나타냈다.

따라서 스마트 텐던의 자유장에서 측정된 변형률로부터 산정한 긴장력 추정값

(Pestimated)은 앵커 두부의 로드셀에 의해 측정된 강연선의 긴장력(Pmeasured)과 비교한 결과 작용하중 10tonf 정도까지는 거의 일치하는 값을 제공하여 개발된 스마트 텐던의 장력측정 능력을 검증하였으며 현재 로드셀 형식으로 사용되고 있는 시험 앵커의 장력을 측정 방법의 대체 가능성을 확인하였다.

(다) 매입형 몰드게이지로 측정된 변형률로 산정한 그라우트에 작용하는 하중분포

현장 인발실험 결과 각각의 매입형 몰드 게이지에서 측정된 변형률을 아래 식에 대입하여 그라우트에 작용하는 하중을 산정하여 하중 분포를 확인하였다.

$$Q_g = A_g \times E_g \times \varepsilon_g \qquad \text{식 3.10}$$

여기서, Qg : 그라우트체에 작용하는 하중(tonf)
Eg : 그라우트체의 탄성계수(= 217494.02kg/cm2)
Ag : 그라우트체의 단면적(π×D2/4 = 86.59cm2)
εg : 매입형 몰드게이지로 측정된 변형률

현장 인발실험 결과 앵커 7에 배치된 몰드게이지 2, 3, 4 및 앵커 8에 배치된 몰드게이지 4에서 변형률 분포가 매우 불규칙한 분포 형태를 나타내어 하중 산정시 제외하고 분석하였다.

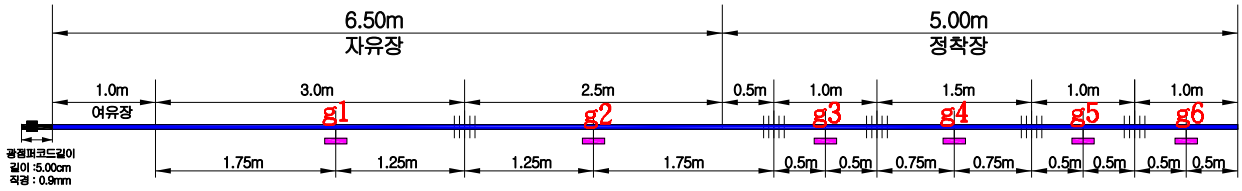


그림 3.27 매입형 몰드 게이지 배치도(앵커 7)

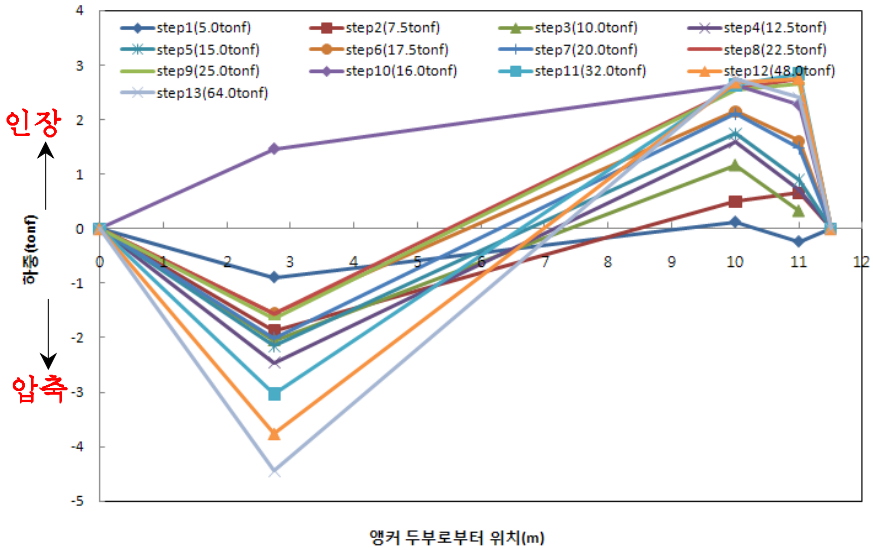
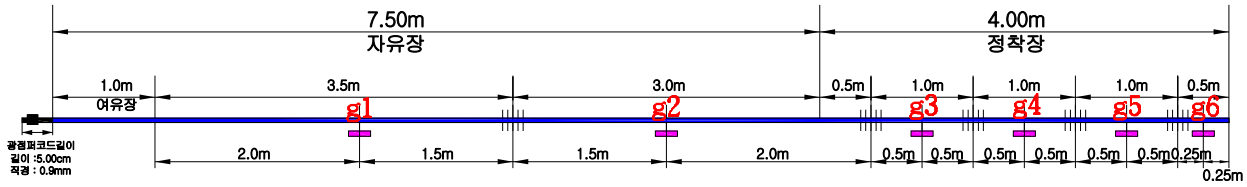


그림 3.28 그라우트에 작용하는 하중분포 (앵커 7)



매입형 몰드 게이지 배치도(앵커 8)

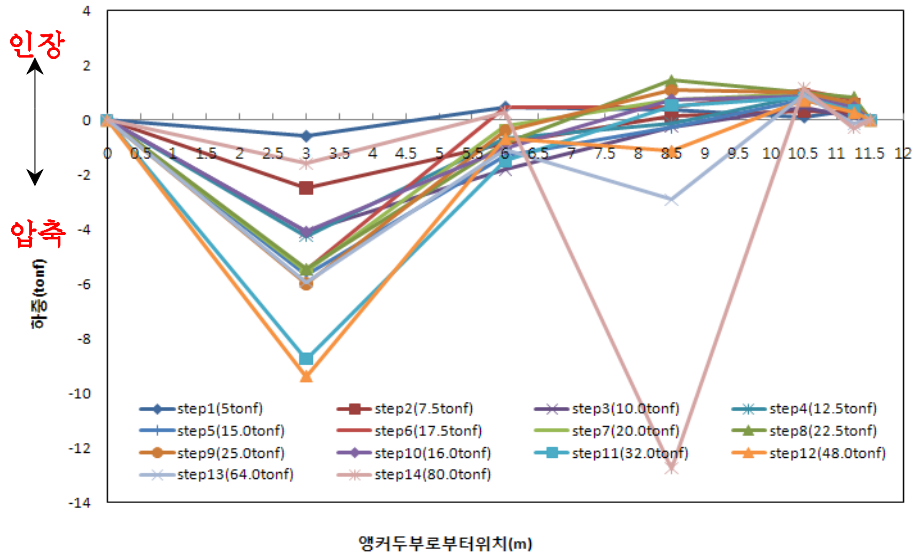


그림 3.29 그라우트에 작용하는 하중분포 (앵커 8)

분석 결과 자유장 부분에서는 압축력을 정착장 부분에서는 인장력 분포 형태를 나타내어 일반적인 앵커 그라우트에서 작용하는 하중분포 형태와 어느 정도 유사한 경향을 나타내었다.

(라) 앵커 정착장의 텐던-그라우트 접촉면의 전단응력 분포

스마트 텐던의 FBG 센서로 측정된 변형률은 모두 5개 지점으로 격자와 격자 사이의 간격이 비교적 크기 때문에 측정된 값에 대해서 표 3.5와 같이 각 하중 단계별로 회귀모델식을 이용한 회귀분석을 통해 연속함수 형태로 표현한 뒤 모든 깊이에서의 변형률을 추정하였다. 회귀모델식의 결정계수(R2)는 약 0.8 이상으로 나타났다.

표 3.5 정착장 전체길이의 변형률 분포 회귀모델식-앵커 7 & 앵커 8

구 분	작용하중(tonf)	회귀모델식	결정계수(R2)
앵커 7	5.0	y=-0.000006Ln(z)+0.000007	0.8032
	10.0	y=-0.00002Ln(z)+0.00002	0.7994
	25.0	y=-0.0001Ln(z)+0.0001	0.8068
	48.0	y=-0.0002Ln(z)+0.0003	0.8077
	64.0	y=-0.0005Ln(z)+0.0006	0.8060
앵커 8	5.0	y=-0.000008Ln(z)+0.000009	0.8876
	10.0	y=-0.00003Ln(z)+0.00002	0.8557
	25.0	y=-0.0005Ln(z)+0.0005	0.8381
	48.0	y=-0.001Ln(z)+0.0011	0.8408
	80.0	y=-0.002Ln(z)+0.0025	0.9389

※ 여기서, z : Depth(cm), y : strain(ε)

회귀모델식을 통해 추정된 정착장 모든 깊이에서의 변형률을 식 3.11에 대입하여 미소한 깊이 증가에 대하여 앵커 정착장의 텐던-그라우트 접촉면의 전단응력 분포를 산정하였다.

$$\tau_{tg} = \frac{E_t \cdot r_t}{2d} \cdot d\varepsilon \qquad \text{식 3.11}$$

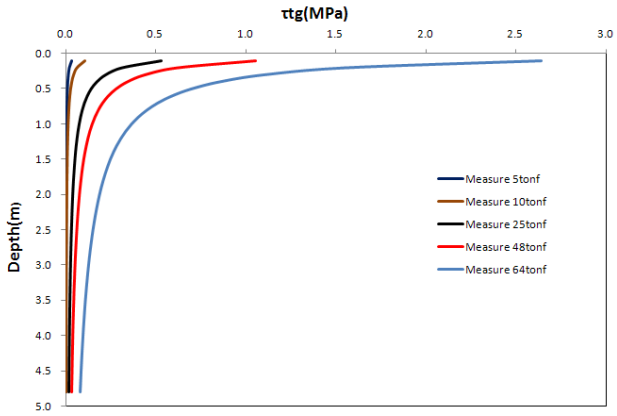
여기서, τ_{tg} : 두 변형률점 사이의 평균 전단응력(MPa)

d : 두 변형률점 사이의 거리(m)

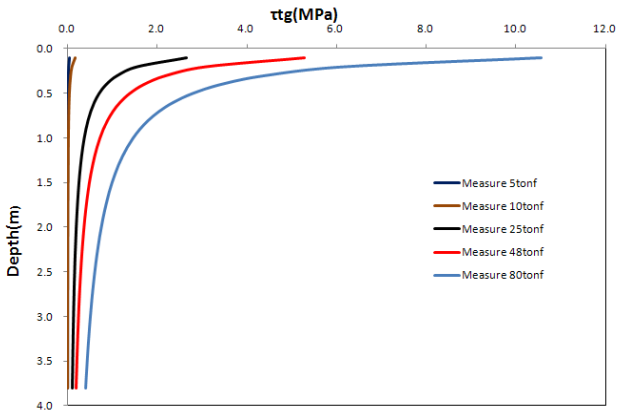
$d\varepsilon$: 두 변형률점에서 측정된 변형률 차이

Et : 텐던의 탄성계수(=200GPa)

rt : 텐던의 반경(=0.00762m)



(a) 스마트 텐던(앵커 7)



(b) 스마트 텐던(앵커 8)

그림 3.30 텐던-그라우트 접촉면의 전단응력 분포

전단응력 분포에 근거한 부착강도로부터 결정되는 앵커의 정착길이 설계시 앵커의 텐던과 그라우트의 실제 전단응력을 측정하여 적용한다면 현재 앵커 설계법에 비해 보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 사료된다.

4. 사면 모니터링을 위한 앵커의 시험시공

스마트 앵커의 사면에서 장기 모니터링 적용성을 확인하기 위해 실대형 사면에 10개(인장형5개+압축형 5개)의 스마트 앵커를 설치하였다. 앵커의 시험시공 현장 암반 사면은 법면 요철이 매우 심해 십자형 앵커 격자블럭을 가인장 상태로 설치한 후 격자블럭 배면 공극의 채움 작업에 의해 보강한 이후에 앵커의 최종 인장작업을 수행하였다.

가. 압축형 앵커

(1) 앵커 설치현황

사면에서 앵커의 장기 모니터링을 위해 그림 3.31과 같은 순서에 의해 실대형 사면에 5개의 압축형 앵커를 설치하였으며 본 연구에서는 앵커 12, 13 및 15에 대해서 장기 모니터링을 수행하였다.

표 3.6 앵커 설치현황

앵커번호	목 적	앵커전장 (m)	천공장 (m)	내하체 개소		내하체 간격 (m)	스마트 텐던/강선 수 (EA)	천공경 (mm)
12	현장 모니터링	10.5	9.5	2	하중 분산형	2	3/4	120
13		10.5	9.5	1	하중 분산형	-	1/4	120
15		10.5	9.5	2	하중 분산형	4	2/4	120



(a) 압축형 앵커



(b) 천공



(c) 앵커삽입



(d) 그라우팅



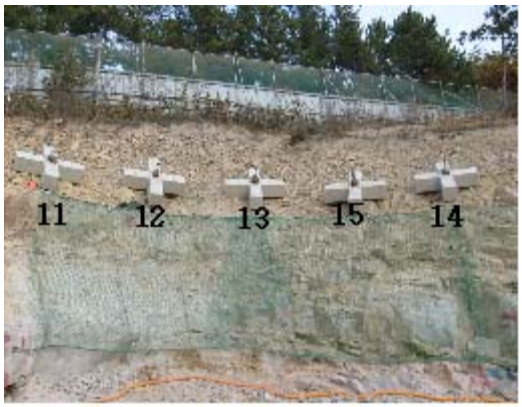
(e) 십자형 격자블럭 설치



(f) 앵커 가인장



(g) 블록 배면공극 채움



(i) 앵커설치 전경

그림 3.31 사면 모니터링용 압축형 앵커 설치현황

앵커 12, 13 및 15는 하중분산 압축형 앵커이며 현재 가인장의 하중을 가한 후 십자형 격자블럭의 배면 공극이 심해 모르타르로 채움을 한 상태이다. 가인장은 개별 인장기에 의해 일반텐던과 스마트 텐던에 각각 다른 하중을 가한 후 정착하였으며 압축형 앵커에 가한 가인장 하중은 표 3.7과 같다.

표 3.7 압축형 앵커 가인장 하중

<table>
<tr><th>앵커
번호
(No.)</th><th>앵커
전장
(m)</th><th>천공장
(m)</th><th colspan="2">내하체
개소</th><th>내하체
간격(m)</th><th>강선수</th><th>천공경
(mm)</th><th colspan="3">가인장
하중(Ton)</th></tr>
<tr><td rowspan="2">12</td><td rowspan="5">10.5</td><td rowspan="5">9.5</td><td rowspan="3">2</td><td rowspan="3">하중분산형</td><td rowspan="2">2</td><td rowspan="2">4</td><td rowspan="2">120</td><td>일반텐던
(1가닥)</td><td>5</td><td rowspan="2">9</td></tr>
<tr><td>스마트
텐던
(3가닥)</td><td>4</td></tr>
<tr><td rowspan="2">13</td><td rowspan="2">-</td><td rowspan="2">4</td><td rowspan="2">120</td><td>일반텐던
(3가닥)</td><td>7</td><td rowspan="2">10</td></tr>
<tr><td>스마트
텐던
(1가닥)</td><td>3</td></tr>
<tr><td rowspan="2">15</td><td rowspan="2">2</td><td rowspan="2">하중분산형</td><td rowspan="2">4</td><td rowspan="2">4</td><td rowspan="2">120</td><td>일반텐던
(2가닥)</td><td>7</td><td rowspan="2">10</td></tr>
<tr><td>스마트
텐던
(2가닥)</td><td>3</td></tr>
</table>

나. 인장형 앵커

(1) 앵커 설치현황

사면에서 앵커의 장기 모니터링을 위해 그림 3.32와 같은 순서에 의해 실대형 사면에 5개의 인장형 앵커를 설치하였으며 앵커 3은 변형률을 측정하기 위해 설치된 스마트 텐던은 손실된 상태이고 온도 측정을 위해 설치된 FBG센서만 위치하고 있다. 현재 5개의 십자형 격자블럭의 정착을 위한 가인장 작업까지 진행되었으며 격자블럭 배면 공극의 채움 작업에 의해 보강한 이후에 앵커의 최종 인장작업을 수행할 계획이다.

표 3.8 앵커 설치현황

앵커번호	목 적	앵커전장 (m)	천공장 (m)	정착장 (m)	자유장 (m)	스마트 텐던 /강선수 (EA)	천공경 (mm)
1	현장 모니터링	10.5	9.5	5	5.5	1/4	120
2		10.5	9.5	6	4.5	1/4	120
3		10.5	9.5	5	5.5	1/4	120
4		10.5	9.5	4	6.5	1/4	120
5		10.5	9.5	3	7.5	1/4	120



(a) 인장형 앵커



(b) 천공



(c) 앵커삽입



(d) 그라우팅



(e) 십자형 격자블럭 설치



(f) 앵커 가인장

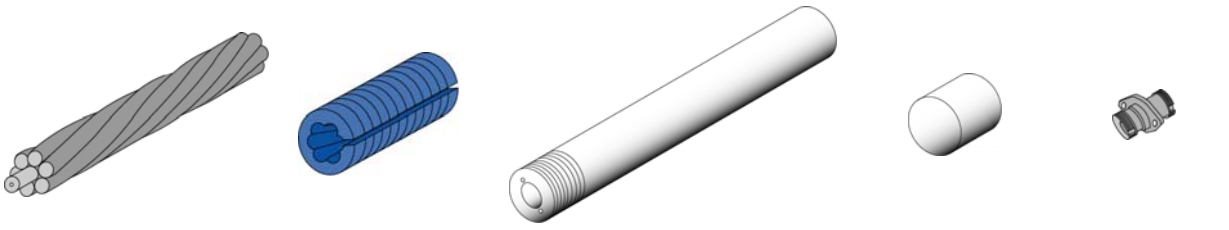
그림 3.32 사면 모니터링용 인장형 앵커 설치현황

제2절 스마트 텐던의 교량활용 기술개발

신설교량 시공에서 PS 강연선을 이용한 콘크리트 빔 전체 교량의 50% 이상을 차지하고 있다. 특히 품질관리와 시공의 용이성 때문에 프리캐스트 PSC 빔의 수요가 증가하고 있으며, 프리캐스트 PSC I 거더교는 국내 교량의 30%를 차지하여 왔다. 이러한 프리스트레스 콘트리트 거더는 PS 강연선을 긴장장비를 이용하여 긴장하여 정착하여야 하는데, 도입 중 또는 도입 후 프리스트레스의 손실이 발행하기 마련이다. 이렇게 프리스트레스를 도입할 때 일어다는 손실을 즉시손실이라 하며, 프리스트레스 도입 후 일어나는 손실을 시간적 손실이라 한다. 하지만 이러한 손실량을 측정하는 측정장비 및 센서들은 거의 전무한 상태이다. 이에 본 연구에서는 프리스트레스력을 효율적으로 측정할 수 있는 스마트 텐던을 개발하여, 이를 현장에 적용함으로 장력계측관리의 효율성과 적용 가능성등을 확인하고자 한다.

1. 보호정착구 개발

본 연구에서 보호정착구 개발은 광섬유센서 사용 간편성과 센서손실의 대책으로 필수적인 요소이다. 그림 3.33은 Smart Tendon의 보호정착구의 부분명칭 모식도이고, 그림 3.34는 보호정착구 조립 모식도이다. 그림 3.33(b) 정착클립은 플라스틱 재료로서 강연선과 완전결합 할 수 있도록 나선모형의 홈이 있으며, 외부에는 보호정착구와 결합할 수 있도록 나사선 형태로 구성된다. 그림 3.33(c),(d)보호정착구 몸통과 보호캡은 광점퍼코드의 보호의 보호역할을 하며, 그림3.33(e) FC어뎁터는 광점퍼코드의 연결을 위한 부분이다.



(a)PC강연선 (b)정착클립 (c)보호정착구 (d)보호캡 (e)FC어댑터

그림 3.33 Smart Tendon의 보호정착구 부분명칭

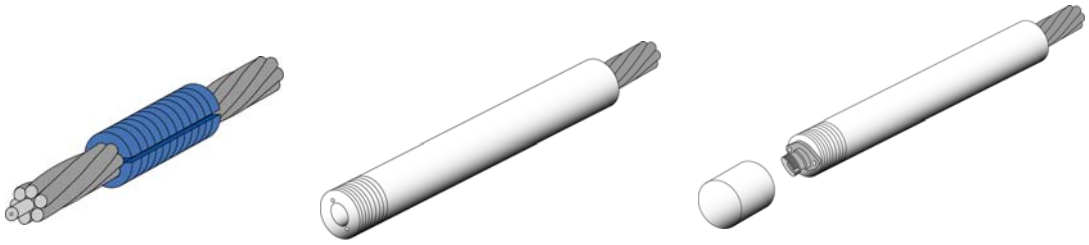


그림 3.34 Smart Tendon의 보호정착구 조립도

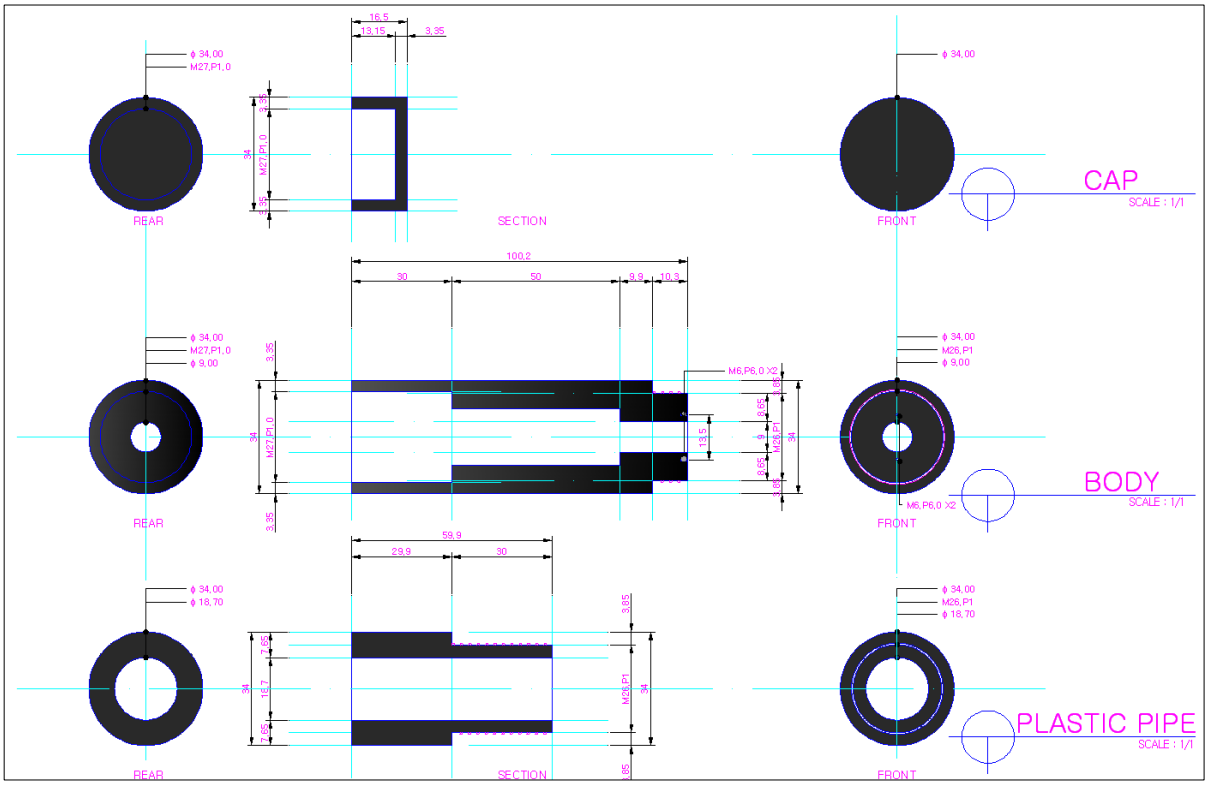
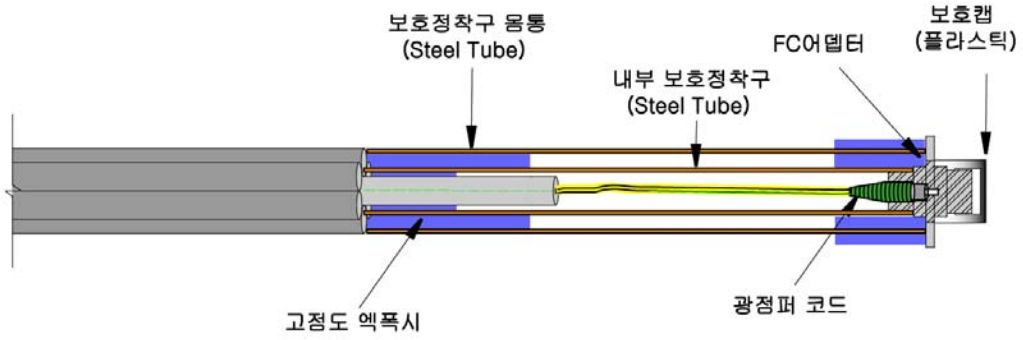


그림 3.35 Smart Tendon의 보호정착구 시제품 설계도



그림 3.36 Smart Tendon의 보호정착구 시제품

보호정착구 제작의 실용화를 위한 추가기술개발 및 실용화를 위한 방안으로 최소의 비용 및 제작의 단순화를 위해 추가 보호정착구를 제안하고 이를 적용하였다. 기존의 보호정착구는 제작에 있어 재료 및 제작비용에 있어 사업화에 대한 비용증가를 예상된다. 그림 3.37(a)는 개선된 보호정착구로서 두 개의 Steel Tube를 이용 광섬유를 보호하고 스마트 텐던과는 고점도 엑폭시를 이용 완전 일체화시키며, 선단에는 FC어텝터와 보호캡으로 제작이 된다. 그림 3.37(b) 실제 보호장착구 제작 모습이며, 본 연구에서 현장적용 스마트 텐던은 모두 이를 적용하였다.



(a) 보호정착구 모식도



(b) 보호정착구 장착

그림 3.37 실용화를 위한 보호정착구 개선안 및 제작

2. 장비제작 및 성능시험

가. 충진제 접착성능

기존의 스마트 텐던의 현장 적용성 및 제작에 있어 어려운 점이 있었다. 본 연구에서는 스마트 텐던은 기존 충진제인 폴리에스터 레진이 아닌 Epoxy 접착제 E-002 건식저점도 주입제를 이용하여 제작하였다. E-002 건식저점도 주입제는 기존의 주입제와 유사한 부착강도와 수축특성을 가지고 있으나, 사용성 측면(지연시간, 배합비율, 유동성, 경화열등,)에서 보다 우수한 측면이 있다. 이에 기존의 충진제 대신 Epoxy 주입제를 이용하여 스마트 텐던을 제작하고 성능시험을 실시하였다.

추가적인 시험으로 기존 FBG센서와 다르게 센서에 리코팅이 되면서 센서 보호측면을 확인하기 위해 시험을 준비 하였다. 현재까지의 센서 보호의 경우 FBG센서에 직접적인 충진제의 접착을 막고, 일정 구간(약 4~5cm)의 평균 변형률 변화를 측정하기 위한 작업이었다. 하지만 이번 센서들은 FBG센서에 리코딩이 되면서 안정성 및 내구성에 보다 증가하면서 기존의 제작방법에서 고려되는 센서보호 필요성을 확인하고, 이를 비교함으로 센서보호의 필요성을 확인하려고 한다.

표 3.9 Smart Tendon의 시험 개수 및 특징

Smart Tendon	시편 길이	강연선 외경	심선 외경	심선 내경	정착구 외경	보호 튜브	센서 종류	FBG 센서개수	센서 길이
SO#1	1.0m	15.2mm	5.3mm	1.76mm	40mm	1중	변형률	1	2cm
SO#2	1.0m	15.2mm	5.3mm	1.76mm	40mm	없음	변형률	1	2cm

※ SO(Strain Only) = 단일모드 센서로 변형률 측정 강연선



(a) Smart Tendon 거치







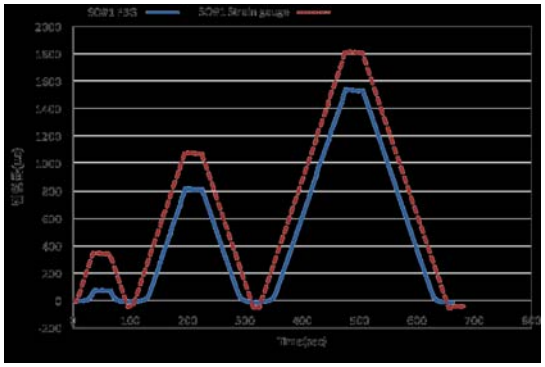


(b) 인터로게이터 및 무선 데이터로고 설치

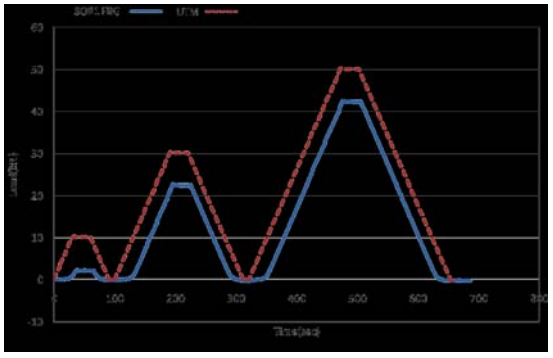


(c) 모니터링

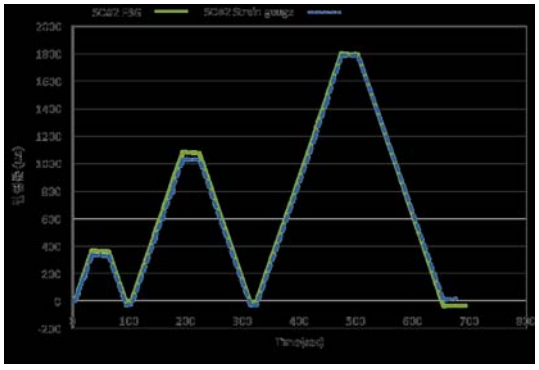
그림 3.38 Smart Tendon FBG센서 시험준비



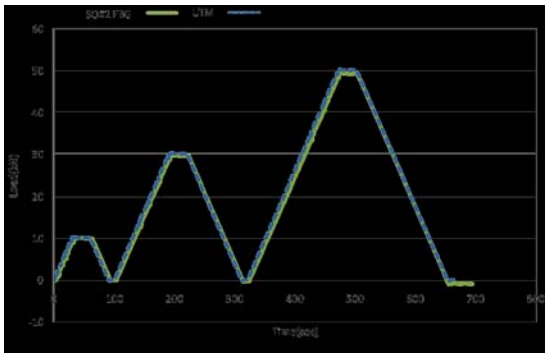
(a) SO#1 시간-변형률 비교 (FBG&Strain gauge)



(b) SO#1과 UTM 시간-하중 비교

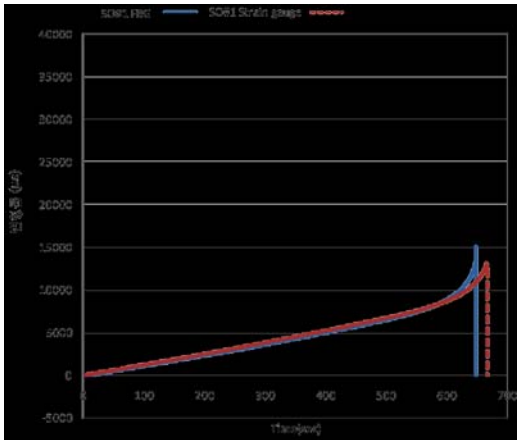


(c) SO#2 시간-변형률 비교 (FBG&Strain gauge)

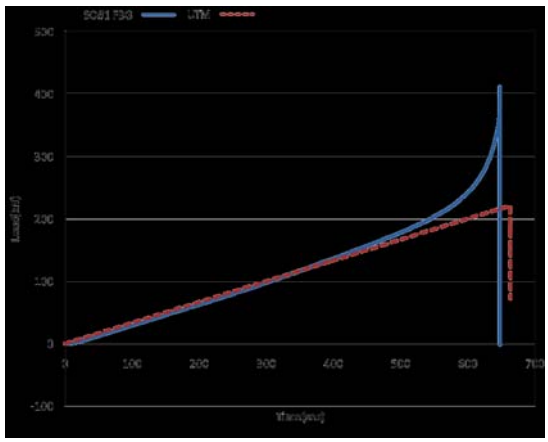


(d) SO#2와 UTM 시간-하중 비교

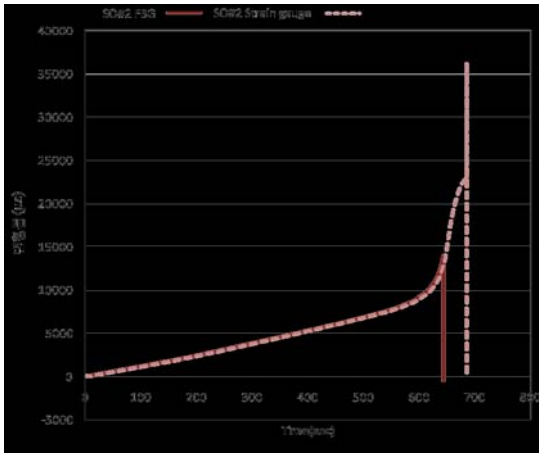
그림 3.39 Loading-Unloading-Reloading 결과



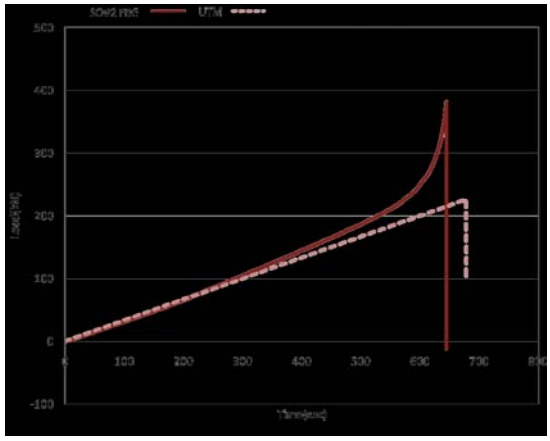
(a) SO#1 시간-변형률 비교
(FBG&Strain gauge)



(b) SO#1과 UTM 시간-하중 비교



(c) SO#2 시간-변형률 비교
(FBG&Strain gauge)



(d) SO#2와 UTM 시간-하중 비교

그림 3.40 파괴시험(Breaking Test)결과

시험결과를 정리하면 아래와 같다.

(1) 에폭시 주입제는 기존의 폴리에스터 레진 보다 제작 및 안정성면에서 우수성 확인
(2) 스마트 텐던의 최대 변형률 측정의 약 $6300\mu\varepsilon$에서 $13700\mu\varepsilon$의 성능개선 확인
(3) 센서 보호는 제작의 안정성을 향상시키기 위해 필요성 확인
(4) 보호튜브제작 있어 루스한 부분이 있을 경우 반응 지연이 생길 수 있으며, 장력을 유지 제작 필요
(5) 주입양, 주입속동 등 에폭시 주입제의 정밀 시공이 요구

나. 레진 주입장치제작 및 충진제 주입시험

스마트 텐던의 제작에 있어 주입시스템의 구성은 매우 중요한 부분이다. 점도가 100~200cps인 충진제를 30~40분 경화시간에 1~2mm 내경과 30.0m 이상의 길이를 가진 킹케이블에 충진해야 하므로 시간상 제약이 많다. 이를 개선하기 위해서는 주입장치를 개발 및 주입시스템의 개발은 필수적인 요소이다. 본 연구에서는 그림 3.41과 같은 주입장치를 개발하고, 그림 3.43과 같은 주입시스템을 제안하였다. 그림 3.41은 주입장치의 실제모형으로 이동식 에어콤프레셔를 이용하여 주입탱크에 압력을 가하고 충진제를 넣어 토출기로 주입하는 방법으로 구성된다. 이 주입장치의 최대압력은 10bar 이상이며, 충진제는 주입탱크 안에서 다른 용기에 담겨 충진제의 교체를 원활하도록 되어 있다.

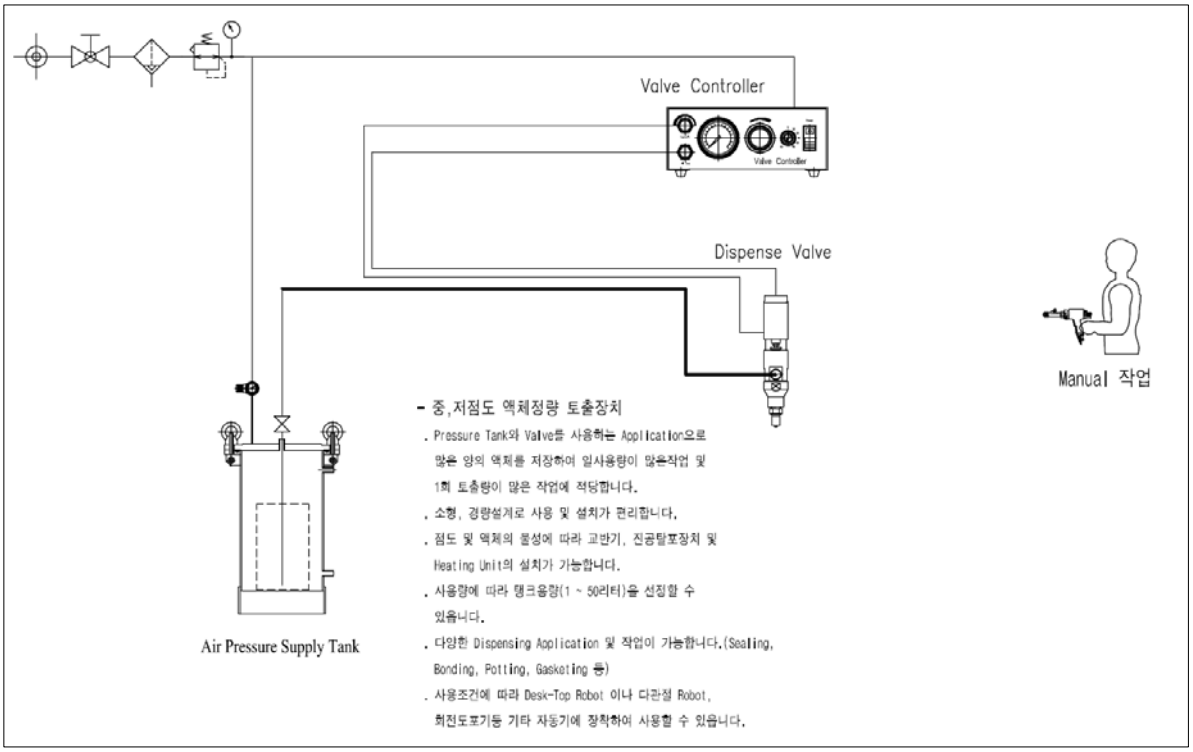


그림 3.41 주입장치의 모식도



(a) 에어콤프레셔



(b) 주입탱크



(c) 토출제어시스템



(d) 주입장치

그림 3.42 주입장치의 제작 완료사진



그림 3.43 주입장치를 이용한 스마트 텐던 시스템 모식도

3. 스마트 텐던의 교량적용 시험

본 연구에서는 제안된 스마트 텐던의 교량적용을 위해 실제 교량현장에서 적용하여 스마트 텐던의 성능검증을 실시하였다. PS 강연선을 이용한 교량에 적합하게 40m 이상의 스마트 텐던을 제작하여 적용하여 초기 프리스트레스력 도입에 따른 실제 거더 내부의 긴장력을 측정하고, 계측된 긴장력을 이용 거더의 프리스트레스력과 마찰계수의 특성을 비교하였다.

이 실험을 통하여 기대 되는 효과는 PS 강연선을 이용한 교량의 장력의 효율적 계측과 관리가 가능하며, IPC 거더의 프리스트레스 특성을 파악하고, 현재 시방서에서 사용되고 있는 마찰계수(파상마찰계수 & 곡률마찰계수)기준 값의 타당성을 검토할 수 있다고 사료된다.

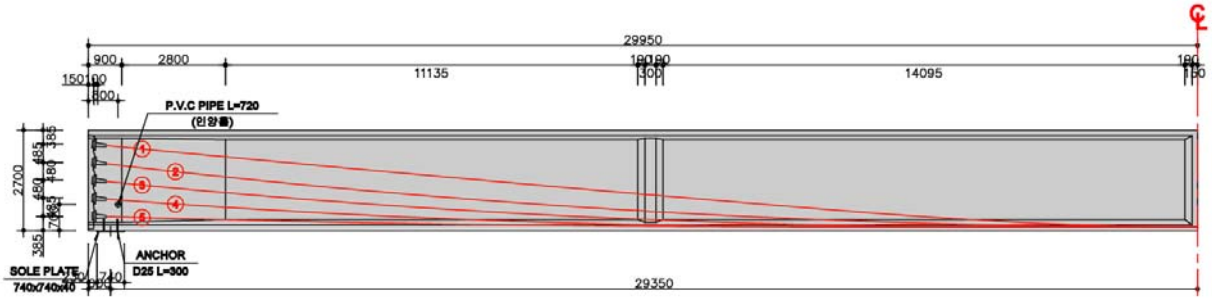
가. 스마트 텐던의 60m PSC I-거더 적용시험

(1) 60m PSC I-거더의 제원

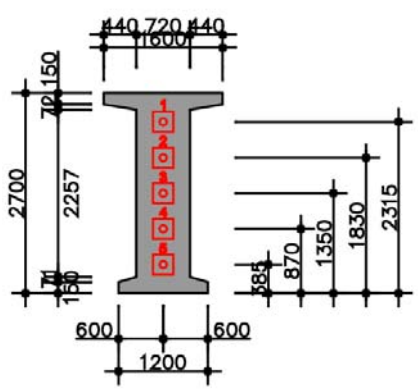
60m PSC I-거더의 시험은 한국도로공사에서 수행하는 연구과제(연구과제 명: 고강도 최적 PSC I 거더교의 시험시공 및 거동 평가 연구, 연구책임자 : 박영하 박사)의 진행과정에서 60m 장지간 PSC I-거더의 제작과 성능시험을 명지대학교 하이브리드구조실험센터에서 실시하고 있다. 이 연구에서는 한국도로공사와 하이브리드구조실험센터의 도움으로 본 연구과제(건설교통 R&D 정책 · 인프라 사업 : 스마트 텐던 기술 이전 및 사용화를 위한 추가기술 개발)의 스마트 텐던을 실대형 거더에 적용하는 시험을 실시하였다.

실대형 60m PSC I-거더는 명지대학교 하이브리드구조실험센터의 실외 부지에서 제작 되었으며, 그 제원은 아래와 같다.

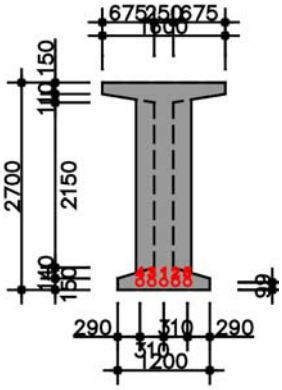
- 길이 : 60m, 높이 : 2.7m, 상부 플랜지폭 : 1.6m, 하부 플랜지폭 : 1.2m
- 사용 강연선의 제원 : 직경 0.6in. (15.24mm) PC Strand, 7연선
- 쉬스관 개수 : 5개 (하나의 쉬스관에 강연선 22개 삽입)



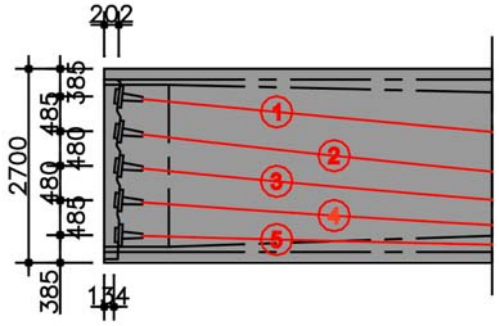
(a) 측면도



(b) 단부



(c) 중앙부



(d) 단부 상세도

그림 3.44 60m PSC I 거더 단면도 및 단부 상세도



그림 3.45 제작된 길이 60m PSC I-거더

(2) FBG센서 배치도

FBG센서의 배치는 그림 3.46과 같으며 Tendon-1~5의 센서 위치 및 초기파장은 표 3.10과 같다. Tendon-4는 계획하였으나, 스마트 텐던 제작 중 센서 파손으로 설치되지 못하였다.

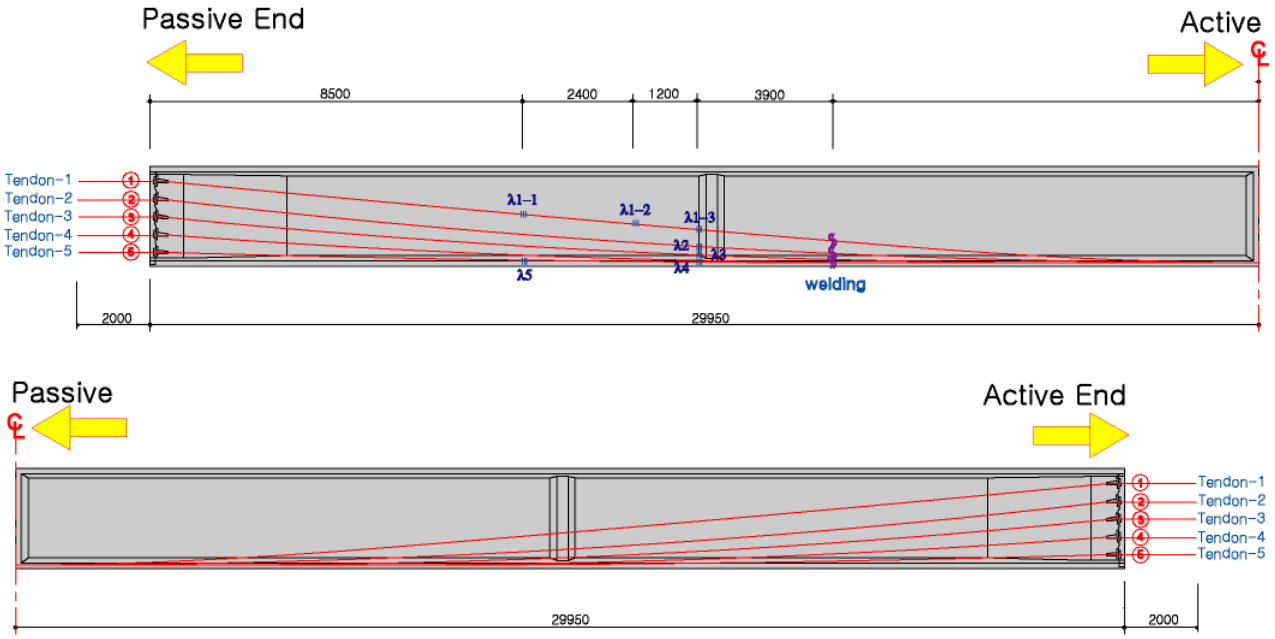


그림 3.46 FBG센서 배치도

(Tendon-4의 센서 λ4는 시험을 계획하였으나, 텐던 제작 중 센서 파손으로 설치되지 못하였음.)

표 3.10 FBG센서의 위치 및 초기파장(Passive End 기준)

텐던 구분	센서 개수	센서 구분	센서 위치(m)	초기파장 (대기온도:22.4℃)	비고
Tendon-1	3	$\lambda 1-1$	8.5	1555.508	
		$\lambda 1-2$	10.9	1550.312	
		$\lambda 1-3$	12.1	1545.252	
Tendon-2	1	$\lambda 2$	12.1	1534.992	
Tendon-3	1	$\lambda 3$	12.1	1539.860	
Tendon-4	1	$\lambda 4$	12.1	1561.380	제작 중 파손
Tendon-5	1	$\lambda 5$	8.5	1526.580	

나. 길이 64.0m 스마트 텐던 제작

64.0m 스마트 텐던의 제작은 그림 3.47과 같은 순서로 제작이 되며, 길이 64.0m 스마트 텐던 제작 특징은 아래와 같다.

- 64.0m 강연선 및 중공 킹케이블 18.0m 준비
- 중공 킹케이블에 센서 삽입 후 약 10m 접착제 충진(주입시간:약 11분)
- 중공 킹케이블과 강연선의 중앙 킹케이블 용접(Passive지점부에서 16m 지점)
- 2중 Steel Tube를 이용한 보호정착구 장착 FBG센서 배치도

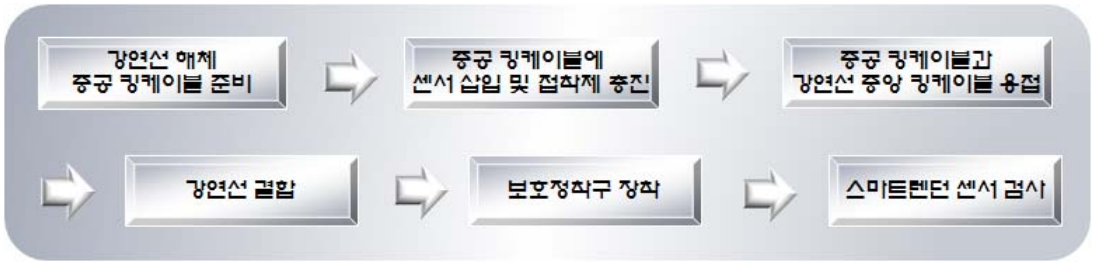


그림 3.47 스마트 텐던 제작 순서



(a) 강연선 해체



(b) 주입장치를 이용한 엑폭시 주입
(주입길이:약 10m, 주입시간:약 11분)



(c) 킹케이블 용접 및 보호
(Passive 지점부에서 16m 지점)



(d) 스마트 텐던 결합

그림 3.48 길이 64.0m 스마트 텐던 제작 과정

다. 스마트 텐던 제작 중 FBG센서 파장변화

FBG센서의 초기파장은 약 23℃의 온도에서 제작되어 외부하중이 없는 상태에서 파장이다. 하지만 스마트 텐던 제작 중에는 온도의 변화, 충진제의 접착 그리고 설치에 따른 외부하중에 의해 프리스트레스력 도입하기 전까지 파장의 변화가 발생한다. 이러한 파장변화는 실제 측정에 있어 장력오차의 발생할 수 있음으로 변화량 측정을 하였다.

측정결과는 초기 스마트 텐던 제작 전 온도에 의한 파장변화는 큰 영향이 없으며, 스마트 텐전 제작완료 후 파장의 변화는 감소하는 경향을 보이며, 거더 내부에 설치완료 후에도 감소하는 경향을 보였다.

표 3.11 FBG센서의 파장변화

텐던 구분	센서 개수	센서 구분	스마트 텐던 FBG센서 파장(nm)				비고
			제작 전 (대기온도:25.7℃)	제작 중 (대기온도:22.4℃)	텐던 제작완료 (대기온도:18.5℃) (2009. 10. 17)	거더에 설치완료 (대기온도:17.3℃) (2009. 10. 18)	
Tendon-1	3	$\lambda 1-1$	1555.508	1555.235	1555.097	1554.9656	
		$\lambda 1-2$	1550.312	1550.066	1549.921	1549.7821	
		$\lambda 1-3$	1545.252	1544.989	1544.858	1544.7190	
Tendon-2	1	$\lambda 2$	1534.992	1535.253	1534.981	1534.7418	
Tendon-3	1	$\lambda 3$	1539.860	1539.618	1539.556	1539.3396	
Tendon-4	1	$\lambda 4$	1561.380	-	-	-	제작 중 파손
Tendon-5	1	$\lambda 5$	1526.580	1526.681	1526.590	1526.4356	

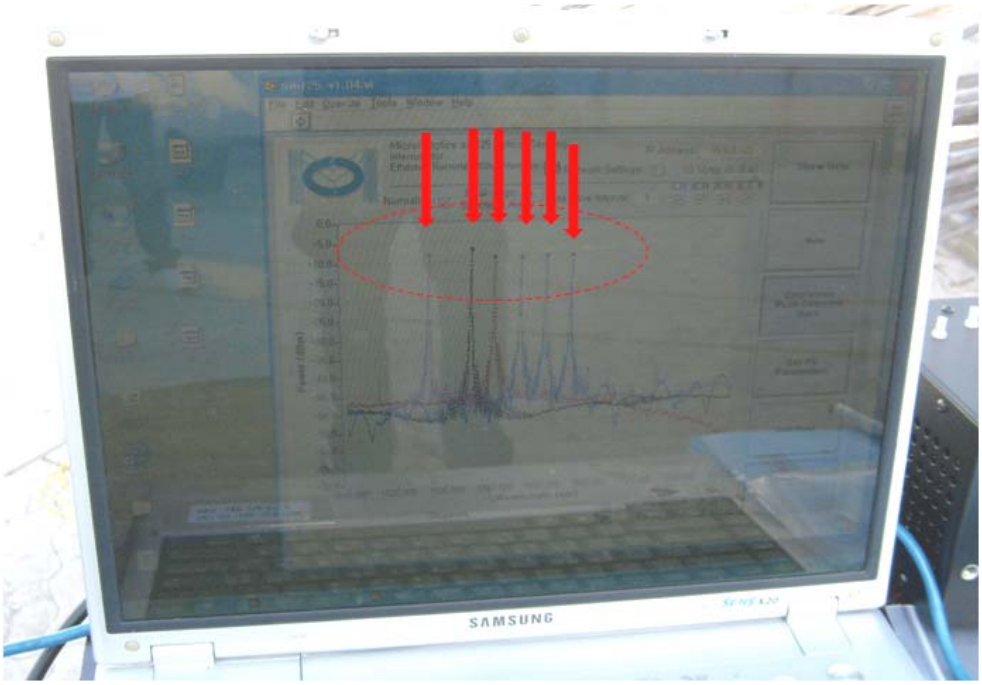


그림 3.49 FBG센서 스펙트럼

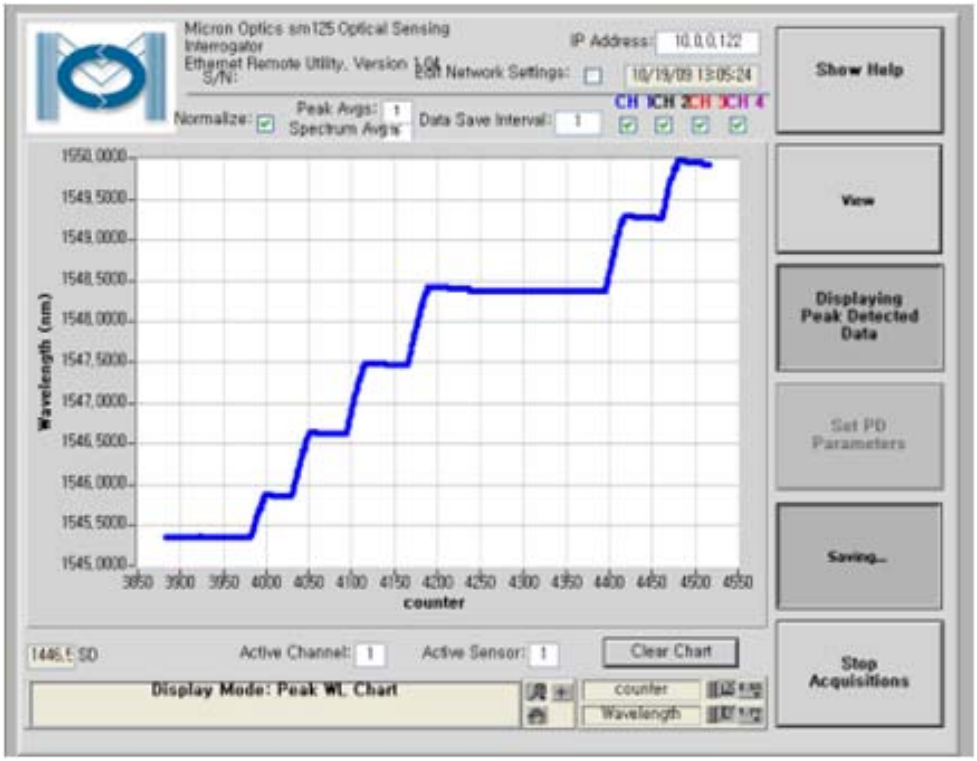


그림 3.50 FBG센서 파장변화 모니터링

라. 60m I-거더에 스마트 텐던 설치 및 계측준비

64m 스마트 텐던의 설치는 기존에 설치된 강연선 끝단에 용접을 하여 교체하였다. 스마트 텐던이 삽입된 각각의 쉬스관에는 강연선을 고정하기 위한 쐐기판을 설치하고 쐐기를 이용하여 완전고정 하였다. 모든 쉬스관에 쐐기판의 설치가 완료되면 초기 프리스트레스력을 도입하는 쉬스관에 긴장장치를 거치하고, 스마트 텐던의 긴장력 측정을 위한 초기파장을 측정으로 계측준비를 하였다.



(a) 기존 강연선과 용접



(b) 강연선과 스마트 텐던 교체



(c) 쐐기판 설치



(d) 긴장장치 거치





(e) 스마트 텐던 계측준비

그림 3.51 스마트 텐던 설치 및 계측준비

마. 길이 60m I-거더의 긴장장치를 이용한 긴장순서

긴장장치를 이용한 긴장순서는 시험은 Active 방향 최상단 1번 쉬스관부터 시작하였으며, 표 3.12와 같은 순서로 긴장력을 도입하였다. 도입에 있어 긴장장치는 압력단위 Bar단위를 사용하는 긴장장치 이며, 긴장장치의 제어는 압력 컨트롤번튼을 이용 직업 압력 계기판을 수동제어 방법으로 실시하였다.

표 3.12 텐던의 긴장순서

Active-1 (1번 쉬스관 긴장)		Active-2-1 (2번 쉬스관 긴장)		Active-3 (3번 쉬스관 긴장)		Active-2-2 (2번 쉬스관 긴장)		Active-5-1 (5번 쉬스관 긴장)	
bar	tonf	bar	tonf	bar	tonf	bar	tonf	bar	tonf
0	0			0	0				
70	88.4	0	0	50	88.4				
100	126.3	50	63.1	100	126.3				
150	189.4	100	126.3	150	189.4	250	315.73	0	0
200	252.5	150	189.4	200	252.5	300	78.8	50	88.4
250	315.7	200	252.5	250	315.7	337.5	425.0	100	126.3
300	378.8	250	315.7	300	378.8				
335	423.0			335	423.0				

Active-4 (4번 쉬스관 긴장)		Active-5-2 (5번 쉬스관 긴장)			Passive-1 (1번 쉬스관 긴장)		Passive-2 (2번 쉬스관 긴장)	
bar	tonf	bar	tonf		bar	tonf	bar	tonf
0	0				0	0	0	0
50	88.4				50	88.4	50	88.4
100	126.3	100	126.3		100	126.3	100	126.3
150	189.4	150	189.4	Passive 방향 긴장장치 이동	150	189.4	150	189.4
200	252.5	180	227.3		200	252.5	200	252.5
250	315.7	200	252.5		250	315.7	250	315.7
300	378.8	250	315.7		300	378.8	300	378.8
327.5	413.0				335	423.0	337.5	425.0

Passive-3 (3번 쉬스관 긴장)		Passive-4 (4번 쉬스관 긴장)		Passive-5 (5번 쉬스관 긴장)			Active-5-3 (5번 쉬스관 긴장)	
bar	tonf	bar	tonf	bar	tonf		bar	tonf
0	0	0	0	0	0		0	0
50	88.4	50	88.4	50	88.4		50	88.4
100	126.3	100	126.3	100	126.3		100	126.3
150	189.4	150	189.4	150	189.4	Active 방향 긴장장치 이동	150	189.4
200	252.5	200	252.5	200	252.5		200	252.5
250	315.7	250	315.7	250	315.7		250	315.7
300	378.8	300	378.8	300	378.8		300	378.8
335	423.0	327.5	413.0	317	400.0		317	400.0

바. 시험결과

(1) 대기 온도변화 측정

FBG센서를 이용한 물리량 측정에 있어 온도가 변하는 경우 온도보정이 필요하다. 정확한 온도보정을 위해서는 거더 내부의 FBG센서와 근접한 위치의 강연선 온도계측 자료가 필요하다. 하지만 이번 시험에서는 현장여건 등의 이유로 스마트 텐던의 단부에서 가장 근접한 대기온도를 측정하여 온도보정 하였다. 그림 3.52는 Active End측에 긴장력 도입 시작부터의 대기온도와 모든 쉬스관에 장력이 도입되기까지의 온도변화 계측결과이다.

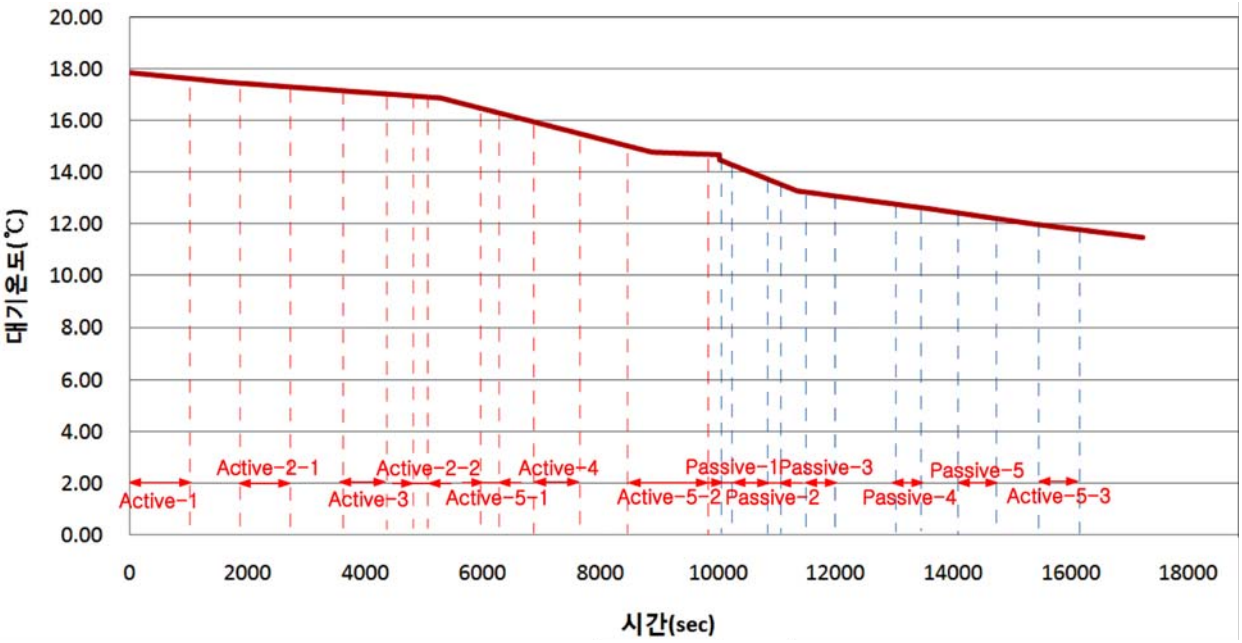


그림 3.52 대기 온도변화 계측

(2) FBG센서에 의한 긴장력 측정결과

그림 3.53은 Active측 긴장작업에 의한 계측결과이다. Active측은 긴장작업은 FBG센서가 있는 반대편에서의 프리스트레스력 도입이므로 마찰손실로 인해 도입 장력보다 작은 장력값의 계측기 예상되었다. 이에 실험 결과를 분석하면 아래와 같다.

- Active-1 423tonf의 긴장력에 의해 Passive측 $\lambda 1$센서에서는 274tonf를 장력계측 $(274/423 = 0.648)$
- Active-2-1 315tonf의 긴장력에 의해 $\lambda 2$센서에서는 270tonf를 계측하고, 최종 425tonf일 때 379tonf의 장력계측$(379/425 = 0.892)$
- Active-3 423tonf의 긴장력에 의해 $\lambda 3$센서에서는 318tonf를 계측하고, 센서 손실 $(318/423 = 0.752)$
- Active-5 126tonf의 긴장력에 의해 $\lambda 5$센서에서는 29tonf를 계측하고, 최종 315tonf일 때 98tonf의 장력계측$(98/315 = 0.311)$
- Tendon-5의 $\lambda 5$센서는 제작 또는 계측 오류로 판단됨

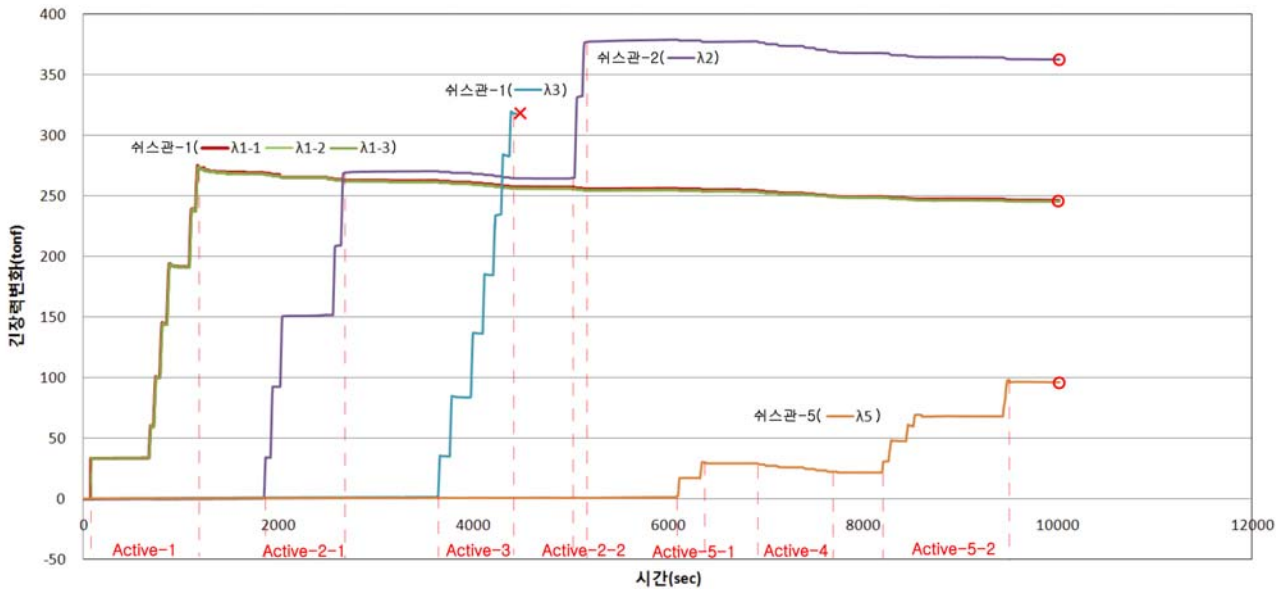


그림 3.53 Active측 긴장작업에 의한 계측결과

그림 3.54는 Passive측 긴장작업에 의한 계측결과이다. Active측은 긴장의 완료 후 Passive측 긴장작업은 양단긴장 작업이 아닌 다단 긴장으로 인한 프리스트레스력의 Passive측 긴장력 손실량에 대한 추가 장력을 도입하였다. 이에 결과를 분석하면 아래와 같다.

- Passive-1 423tonf의 장력에 의해 $\lambda 1$센서에서는 350tonf의 장력계측 $(350/423 = 0.827)$
- Passive-2 425tonf의 장력에 의해 $\lambda 2$센서에서는 433tonf의 장력계측, 센서 손실 $(433/425 = 1.019)$
- Passive-5 400tonf의 장력에 의해 $\lambda 5$센서에서는 172tonf의 장력측정$(172/400 = 0.43)$
- Active-5-3 400tonf 장력에 의해 $\lambda 5$장력의 변화는 거의 없었으며, $\lambda 1$ 센서 손실
- 프리스트레싱 직후 일어나는 즉시손실은 $\lambda 1$, $\lambda 5$센서에서 49, 48tonf의 장력 감소

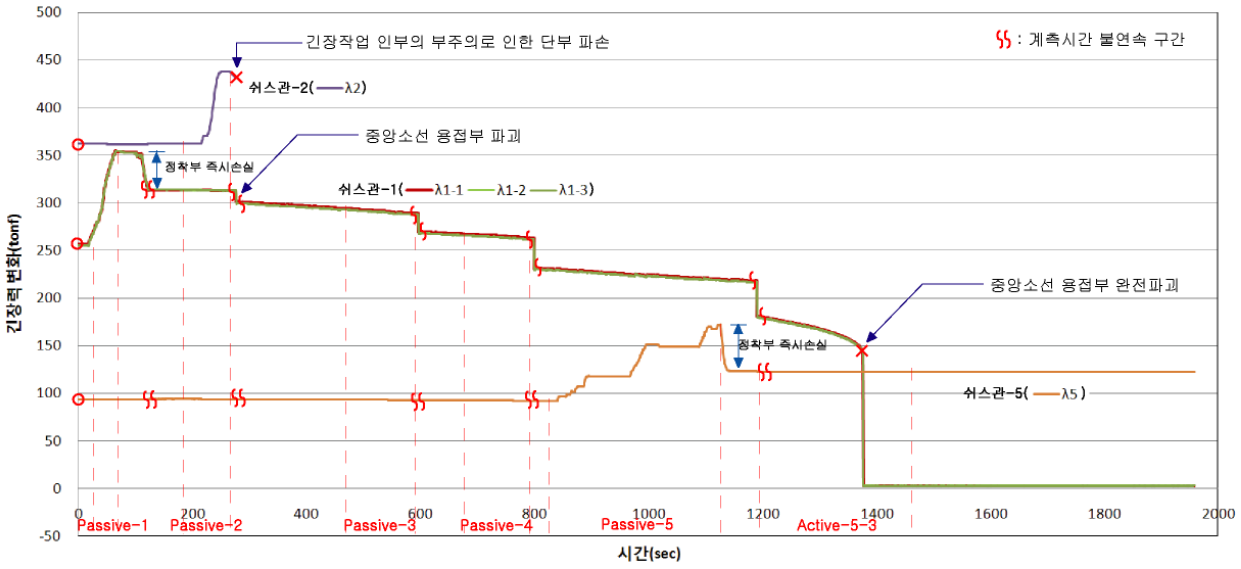


그림 3.54 Passive측 긴장작업에 의한 계측결과

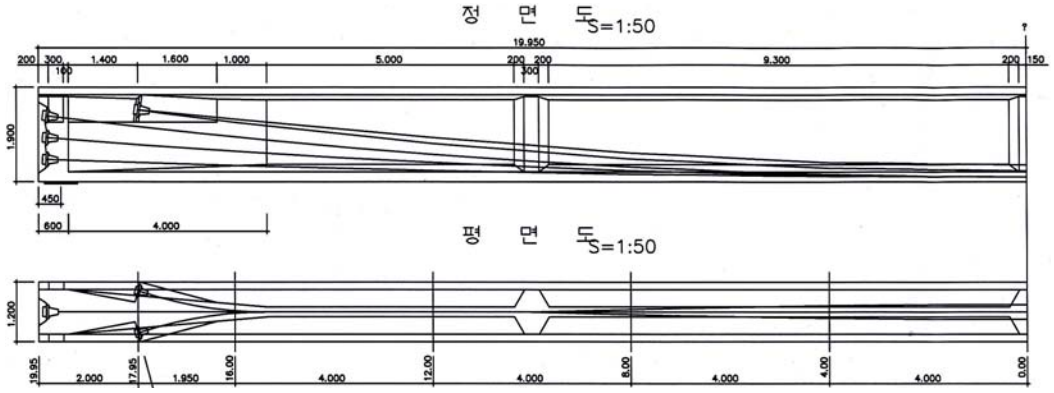
4. 스마트 텐던의 40m IPC I-거더 적용시험

가. 40m PSC I-거더의 제원

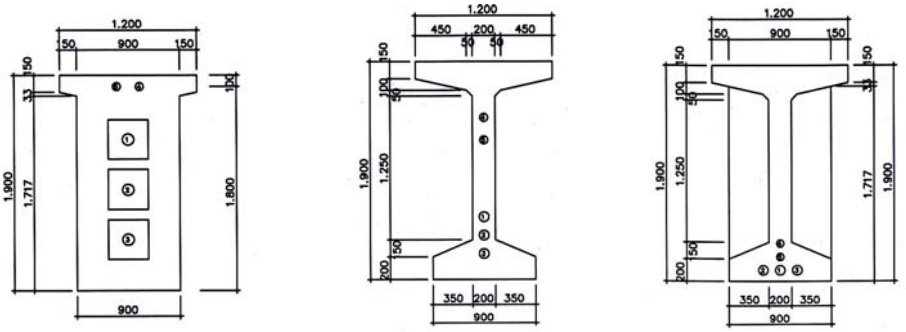
본 연구에서의 현장적용 IPC 거더는 고속국도 12호선 목포~광양간 건설공사 교량구간 현장이다. 1개의 스팬은 3경간으로 구성되며, 1경간의 길이는 40m, 45m로 제작된다. 이 연구에서의 적용 IPC 거더는 길이 : 40m, 높이 : 1.9m의 거더이며 그 제원은 표 3.13, 그림 3.55와 같다.

표 3.13 IPC 거더 40m 3경간 1본당 수량

품 명	규 격	단위	수량	비고
1차 쉬스관	80mm	m	128.630	
2차 쉬스관	80mm	m	82.353	
PC STRAND	15.2mm	ton	2.928	
U. B PC STRAND	15.2mm	ton	0.200	
1차 정착구	15각닥용	ea	6	양방향
2차 정착구	9각닥용	ea	4	양방향
1차 그리우팅	80mm	m	119.102	
2차 그리우팅	80mm	m	76.253	
SOLE PLATE	700×800	ea	2	



(a) 정면도 및 평면도



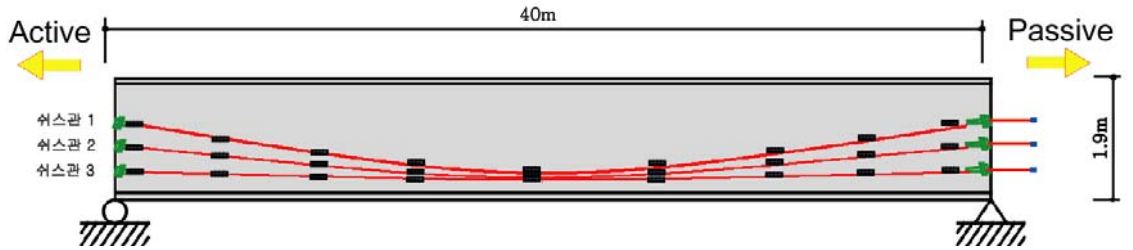
(b) 단부단면 (c) 1/5지점 단면 (d) 1/2지점 단면

그림 3.55 40m IPC 거더 제원

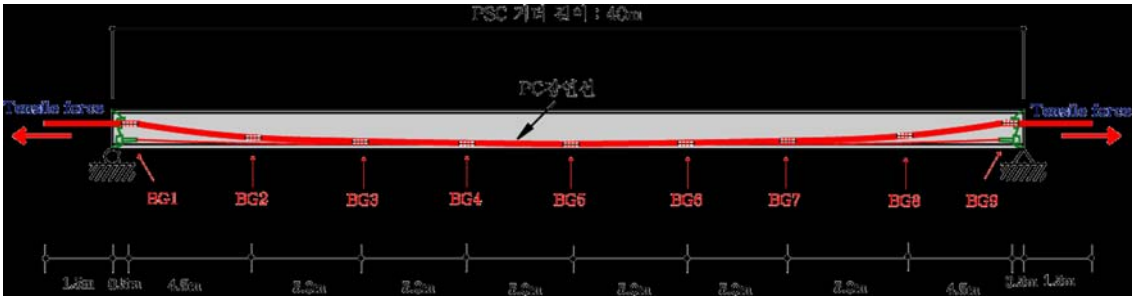
나. FBG 및 계측센서 설치

40m IPC I-거더의 실험은 3개의 쉬스관에 1개의 스마트 텐던이 설치되며, 1개의 스마트 텐던은 9Point FBG(Fiber Bragg Grating)센서로 약 5m 간격으로, 총 27개의 센서들이 배치되었다. 거더의 긴장단에서 가장 근접한 FBG센서는 긴장단에서 0.5m 이격된 위치에 배치하였으며, 스마트 텐던 제작은 긴장장치 설치를 위해 43.0m로 제작하였다. 그 외 설치된 센서들은 LVDT(Linear Variable Differential Transformer) 10개와 거더의 중앙에 콘크리트용 변형률 게이지가 5개 설치되었다.

- 각 쉬스관에 9Point FBG센서가 배치되며, 총 3본의 27개 센서들이 배치
- LVDT는 그림 3.56과 같이 10개의 위치에 배치
  - LVDT1~3 : 수직변위 측정
  - LVDT4~7 : 수평변위 측정
  - LVDT8~10 : 비틀림 변위 측정
- 콘크리트 스트레인 게이지는 거더의 중앙부에 설치

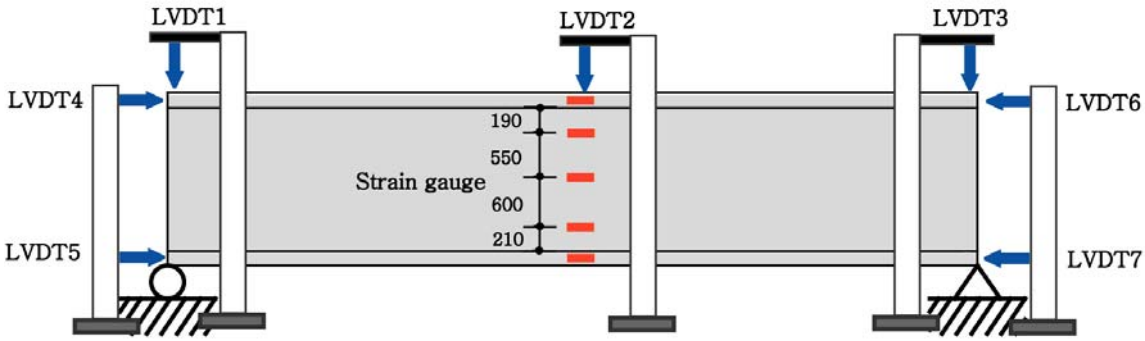


(a) 전체 배치도

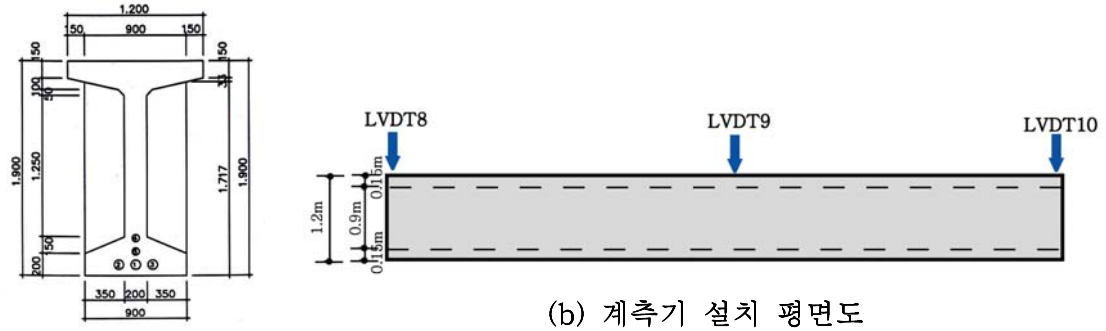


(b) 센서의 위치

그림 3.56 FBG센서의 배치도



(a) 계측기 설치 정면도

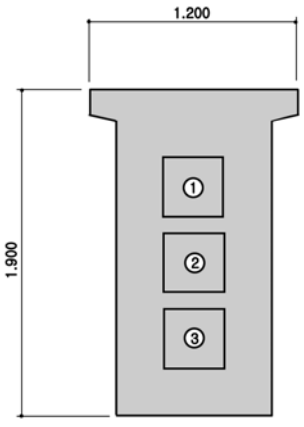


(b) 계측기 설치 평면도

그림 3.57 LVDT 및 콘크리트용 변형률게이지 배치도

다. 길이 40m IPC I-거더의 긴장장치를 이용한 긴장순서

긴장장치를 이용한 긴장순서는 시험은 그림 3.58과 Active 방향 최상단 1번 쉬스관부터 시작하였으며, 그림 3.59와 같은 순서로 긴장력을 도입하였다. 쉬스관의 긴장력은 표 3.14와 같이 총 5단계로 구분하여 긴장하였다.

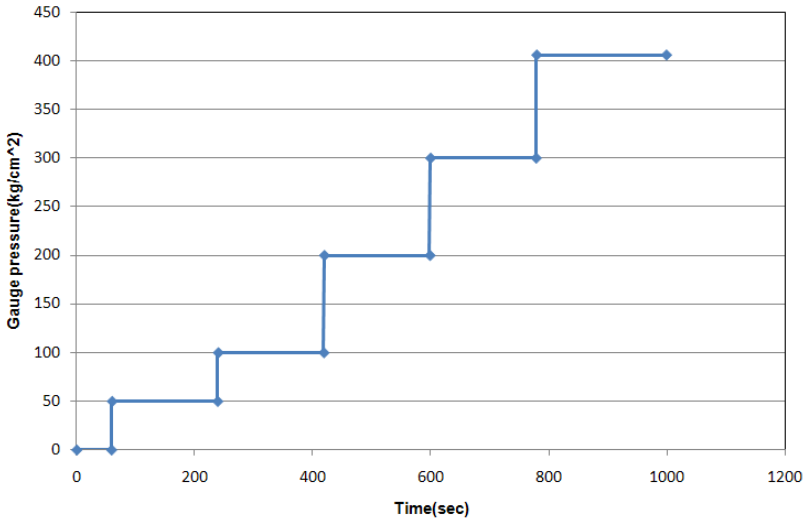


쉬스관 번호		순서	강연선 개수	유효면적 (cm^2)	최대압력 $(kgf/cm^2$	긴장력 $(tonf)$	신장량 (mm)
Active	①	1	15	663.29	406	269	247.8
	②	2	15	663.29	406	269	247.6
	③	3	15	663.29	406	269	248.5
Passive	③	4	15	663.29	406	269	247.8
	②	5	15	663.29	406	269	247.6
	①	6	15	663.29	406	269	248.5

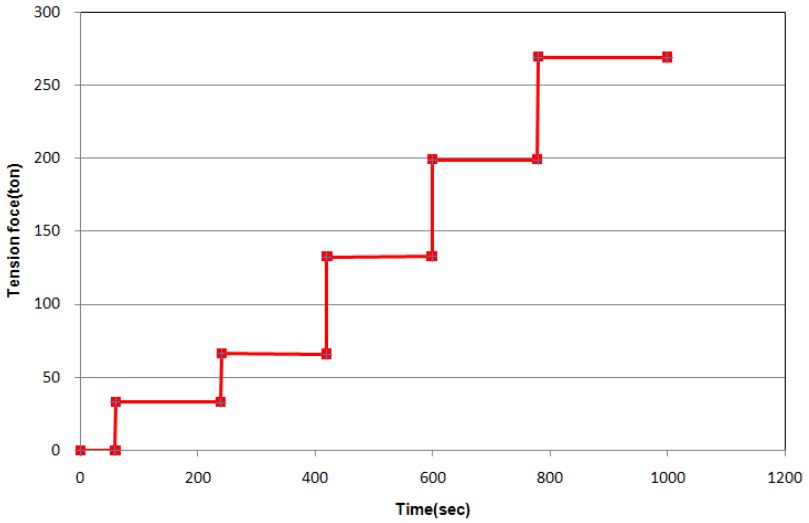
그림 3.58 강연선의 긴장순서 및 설계 긴장력

표 3.14 단계별 긴장순서

쉬스관 번호		순서	1단계		2단계		3단계		4단계		5단계	
			bar	tonf	bar	tonf	bar	tonf	bar	tonf	bar	tonf
Active	①	1	50	33	100	66	200	133	300	199	406	269
	②	2	50	33	100	66	200	133	300	199	406	269
	③	3	50	33	100	66	200	133	300	199	406	269
Passive	③	4	50	33	100	66	200	133	300	199	406	269
	②	5	50	33	100	66	200	133	300	199	406	269
	①	6	50	33	100	66	200	133	300	199	406	269



(a) 긴장장치 압력변화의 시간이력



(b) 1개 쉬스관($\phi 15.2mm$ 15가닥) 긴장력의 시간이력

그림 3.59 긴장력의 시간이력

라. 이론적 마찰손실량 계산

프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete; PSC)를 사용하는 대형 구조물과 교량 구조물의 프리스트레싱 도입 직후와 시간경과에 따라 긴장이 감소한다. 이러한 긴장력의 감소하는 현상은 프리스트레스의 손실이라고 하며, 프리스트레스를 도입 직후 일어나는 손실을 즉시손실(instaneous loss) 또는 즉시감소라고 하며, 콘크리트의 크리프로 인한 손실, 콘크리트의 건조수축으로 인한 손실, PS강재의 릴렉세이션(relaxation)으로 인한 손실 등과 같이 프리스트레스 도입 후에 일어나는 손실은 시간경과 후에 일어나므로 시간적 손실(time dependent loss) 또는 시간적 감소라고 한다(윤우현, 2007). 이러한 손실은 구조물의 사용성과 안정성에서 초기의 유효 프리스트레스력을 산정하기위해서는 매우 중요시 된다.

프리스트레스력의 손실 중 일방향 긴장력 도입 시 PS 강연선과 쉬스관 사이의 마찰로 인한 손실을 마찰에 의한 손실이라 한다. 이는 프리스트레스력을 도입하는 곳으로부터 멀어질수록 작아지며, 강연선의 길이 방향 영향으로 인한 파상마찰(wobble friction), 강연선의 곡률로 인한 곡률마찰(curvature friction)로 구분할 수 있다. 이러한 마찰손실의 계산은 도로교 설계기준(2005)에 의하면 식 3.12와 같이 산정할 수 있다.

$$P_x = P_o \cdot e^{-(\mu\alpha + kl_x)} \qquad \text{식 3.12}$$

여기서 P_x : 긴장단에서의 임의의 점 x에서의 긴장력

P_o : 긴장단에서의 긴장재 도입 긴장력

μ : 곡률 마찰계수(μ/radian)

α : 각변화(radian)

k : 파상마찰계수(k/radian)

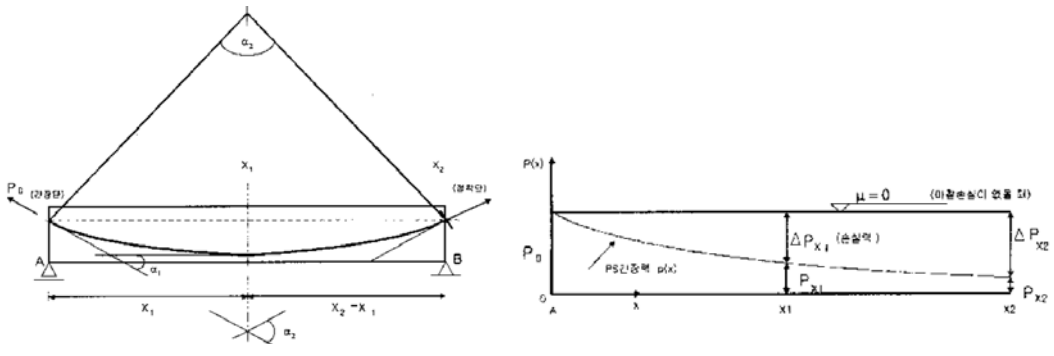


그림 3.60 마찰로 인한 PS 인장력의 손실량($\triangle P$)(정배근, 2000)

본 연구에서의 40m IPC I-거더 이론적 마찰손실량을 계산하기 위해 긴장재의 위치를 표 3.15에서 보여주고 있다. 다음 표에서 거더 중앙지점을 원점으로 하여 거더의 길이에 따른 강연선의 높이를 나타내고 있다.

표 3.15 40m IPC 거더 긴장재위치(쉬스관중심)

Y방향 좌표 값(정면도)			
번호 / 위치(cm)	①	②	③
0	10.0	10.0	10.0
400	15.1	13.2	11.4
800	30.2	22.9	15.8
1200	55.2	39.0	22.9
1600	90.3	61.6	32.9
1795	111.1	74.9	38.8
1985	133.0	89.0	45.0
정착구 각도	7.122°	4.574°	2.027°

Z방향 좌표 값(평면도)			
번호 / 위치(cm)	①	②	③
0	0.0	15.0	15.0
400	0.0	12.8	12.6
800	0.0	5.4	5.4
1200	0.0	0.0	0.0
1600	0.0	0.0	0.0
1795	0.0	0.0	0.0
1985	0.0	0.0	0.0
정착구 각도	0.0	0.0	0.0

PS 강연선의 배치곡선은 2차식으로 가정하여 긴장재의 위치를 그림 3.61과 같이 구하였다. 각 긴장재의 함수식을 정리하면 식 3.13과 같으며, 위 식을 이용 거리별 각 변화량을 정리하면 표 3.8과 같다.

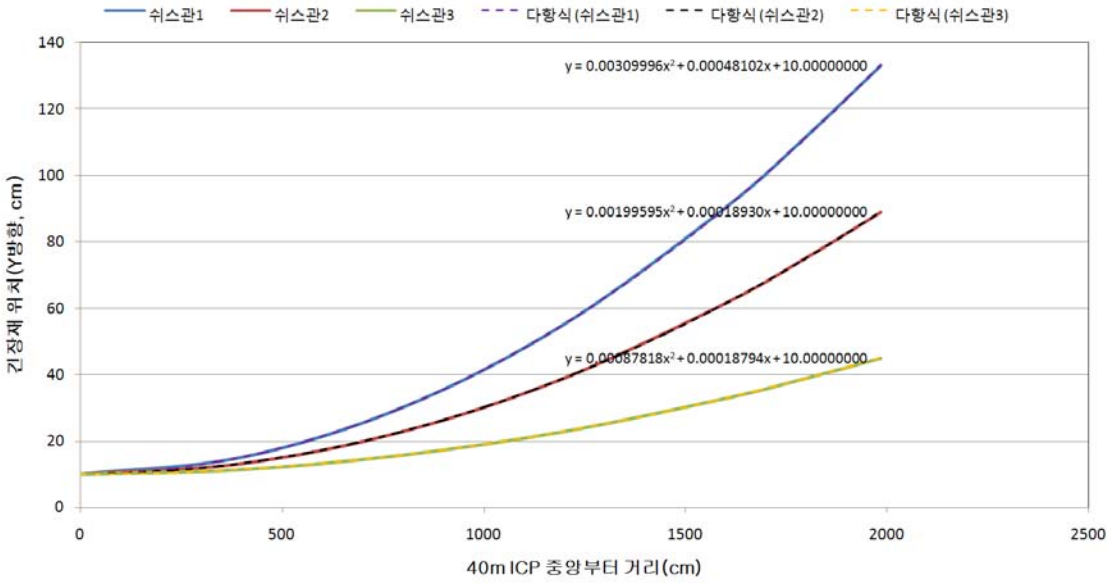


그림 3.61 IPC 거더 긴장재 배치곡선

①쉬스관 : $y = 0.00309996x^2 + 0.00481024x + 10.0, y' = 0.00619992x + 0.00481024$

②쉬스관 : $y = 0.00199595x^2 + 0.00189298x + 10.0, y' = 0.00399190x + 0.00189298$ 식 3.13

③쉬스관 : $y = 0.00087818x^2 + 0.00187940x + 10.0, y' = 0.00175636x + 0.00187940$

여기서 y : IPC 거더 하단에서 긴장재까지의 높이

x : 긴장단에서 부터의 거리

표 3.16 긴장재 거리별 각 변화량

쉬스관 번호 \ 거리(m)		20.0	17.5	15.0	12.5	10.0	7.5	5.0	2.5	0.0
①쉬스관	Degree	7.3802	6.4921	5.6040	4.7160	3.8279	2.9398	2.0518	1.1637	0.2756
	(00°00′00″)	(7°22′49″)	(6°29′32″)	(5°36′15″)	(4°42′58″)	(3°49′40″)	(2°56′23″)	(2°3′06″)	(1°9′49″)	(0°16′32″)
	Radian	0.1288	0.1133	0.0978	0.0823	0.0668	0.0513	0.0358	0.0203	0.0048
②쉬스관	Degree	4.6828	4.1110	3.5392	2.9674	2.3957	1.8239	1.2521	0.6803	0.1085
	(00°00′00″)	(4°40′58″)	(4°6′40″)	(3°32′21″)	(2°58′03″)	(2°23′44″)	(1°49′26″)	(1°15′07″)	(0°40′49″)	(0°6′30″)
	Radian	0.0817	0.0718	0.0618	0.0518	0.0418	0.0318	0.0219	0.0119	0.0019
③쉬스관	Degree	2.1203	1.8687	1.6172	1.3656	1.1140	0.8624	0.6108	0.3593	0.1077
	(00°00′00″)	(2°7′13″)	(1°52′07″)	(1°37′02″)	(1°21′56″)	(1°6′50″)	(0°51′45″)	(0°36′39″)	(0°21′33″)	(0°6′28″)
	Radian	0.0370	0.0326	0.0282	0.0238	0.0194	0.0151	0.0107	0.0063	0.0019

본 연구에서의 실측 긴장력값과 비교하기 위해 식 3.12와 표 3.16의 각변화량과 각 쉬스관에 따른 마찰계수(곡률&파상)를 이용하여 이론 긴장력값을 긴장단에서 부터 거리와 긴장 단계로 정리하면 표 3.17과 같다.

표 3.17 각 쉬스관의 초기 프리스트레스력

쉬스관 번호	장력 단계	마찰계수		Active측에서 거더 중심까지 거리(m)								
		곡률	파상	0.5	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
①쉬스관	1단계	0.25	0.005	31.68	31.68	31.41	31.14	30.87	30.61	30.34	30.08	29.82
	2단계			63.75	63.36	62.82	62.28	61.74	61.21	60.69	60.16	59.65
	3단계			128.46	127.68	126.58	125.50	124.42	123.35	122.29	121.24	120.20
	4단계			192.21	191.04	189.40	187.77	186.16	184.56	182.98	181.40	179.85
	5단계			259.83	258.24	256.02	253.82	251.64	249.48	247.34	245.21	243.11
②쉬스관	1단계	0.20	0.0033	32.41	32.26	32.06	31.86	31.66	31.47	31.27	31.07	30.88
	2단계			64.82	64.53	64.12	63.72	63.33	62.93	62.54	62.15	61.76
	3단계			130.63	130.03	129.22	128.41	127.61	126.82	126.02	125.24	124.46
	4단계			195.45	194.55	193.34	192.13	190.94	189.75	188.56	187.39	186.22
	5단계			264.20	262.99	261.35	259.72	258.10	256.49	254.89	253.30	251.72
③쉬스관	1단계	0.15	0.0015	32.79	32.72	32.62	32.51	32.41	32.31	32.21	32.11	32.02
	2단계			65.59	65.43	65.23	65.03	64.83	64.63	64.43	64.23	64.03
	3단계			132.16	131.86	131.45	131.04	130.64	130.24	129.83	129.43	129.03
	4단계			197.75	197.29	196.68	196.07	195.47	194.86	194.26	193.66	193.06
	5단계			267.31	266.69	265.86	265.04	264.22	263.41	262.59	261.78	260.98

마. 길이 43.0m 스마트 텐던 제작

길이 43.0m 스마트 텐던의 제작은 기존과 같은 방법으로 제작하였으며, 겨울철 온도의 급격한 저하로 인한 경화지연을 방지하기 위해 보온작업을 추가 실시하였다.



(a) 강연선 해체



(d) 중공강연선 제작



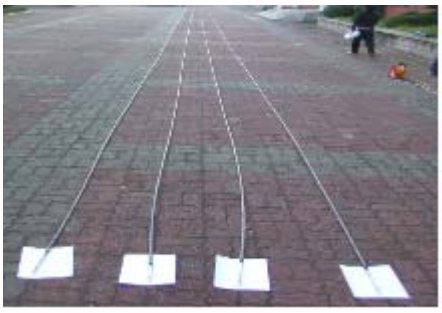
(c) 센서삽입 및 엑폭시 주입



(d) 보호정착구 장착



(e) 엑폭시 고화를 위한 보온



(f) 길이 43.0m 스마트 텐던 제작완료





(g) 스마트 텐던의 센서 테스트

그림 3.62 길이 43.0m 스마트 텐던 제작 과정

바. 43.0m 스마트 텐던 설치 및 계측기기 설치

길이 43.0m 스마트 텐던의 설치는 용접을 이용하여 기존강연선과 교체하였으며, LVDT와 콘크리트용 변형률게이지는 그림 3.65와 같이 설치하였다.



그림 3.63 길이 40m IPC I-거더 현장제작



(a) 기존 강연선과 용접



(b) 강연선과 스마트 텐던 교체

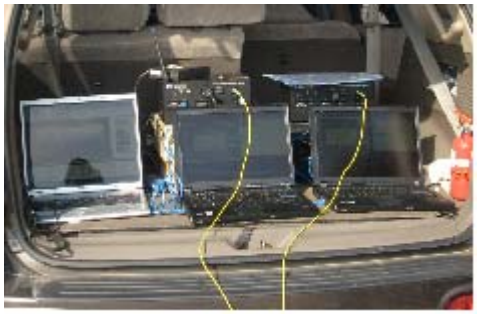


(c) 쐐기판 설치



(e) 긴장장치 거치





(e) 스마트 텐던 계측준비

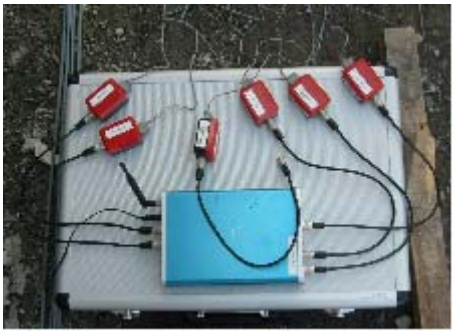
그림 3.64 스마트 텐던 설치 및 계측준비



(a) Strain gauge 설치



(b) Strain gauge 설치



(c) 무선 데이터로거 연결



(e) LVDT1,7 설치



(e) LVDT6 설치



(f) 온도계

그림 3.65 콘크리트용 변형률게이지 및 LVDT 설치

사. 시험결과

(1) 대기 온도변화 측정

대기 온도의 변화 측정결과는 표 3.18 및 3.19와 같으며, 실험중의 최대 온도변화는 0.7℃로 온도변화에 대한 파장변화로 인한 장력의 오차는 크지 않음을 알 수 있다.

표 3.18 Active측 장력도입 시간에 따른 외부 온도변화

쉬스관 번호	구분	Base	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	비고
1	온도(℃)	6.8	6.4	6.4	6.4	6.2	6.2	
	시간	14:20	14:29	14:30	14:31	14:34	14:36	
2	온도(℃)	6.8	6.1	6.2	6.2	6.3	6.3	
	시간	14:20	14:41	14:42	14:43	14:47	14:49	
3	온도(℃)	6.8	6.4	6.4	6.3	6.3	6.4	
	시간	14:20	14:56	14:57	14:59	15:02	15:04	

표 3.19 Passive측 장력도입 시간에 따른 외부 온도변화

쉬스관 번호	구분	Base	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	비고
3	온도(℃)	6.7	6.7	6.7	6.7	6.8	6.7	
	시간	15:21	15:24	15:25	15:25	15:25	15:26	
2	온도(℃)	6.7	6.5	6.5	6.4	6.4	6.4	
	시간	15:30	16:12	16:13	16:14	16:14	16:15	
1	온도(℃)	6.4	6.4	6.4	6.3	6.3	6.3	
	시간	16:20	16:25	16:26	16:27	16:28	16:29	

(2) FBG센서에 의한 긴장력 측정결과

본 연구에서 40m IPC I-거더 실험방법은 Active측 긴장 후 Passive측 긴장으로 일방향 양단 긴장을 실시하였다. 하지만 스마트 텐던을 이용한 장력계측은 Activec측 긴장에서 거의 모든 센서들의 손실로 인해 Passive측 장력계측은 수행하지 못하였다. 이는 레진주입의 불충분 그리고 중앙 중공킹케이블의 재료적 특성으로 인해 손실 Active측 장력 도입후 손실 된 것으로 사료된다. 이에 본 보고서에서는 Active측 긴장에 대한 장력변화를 검토하였다.

(가) 쉬스관 1번 긴장력 측정결과

IPC 거더의 최상단의 쉬스관 1번의 Active측 긴장력 도입시 장력 측정결과는 그림 3.66과 3.67과 같으며, 결과를 살펴보면 아래와 같다.

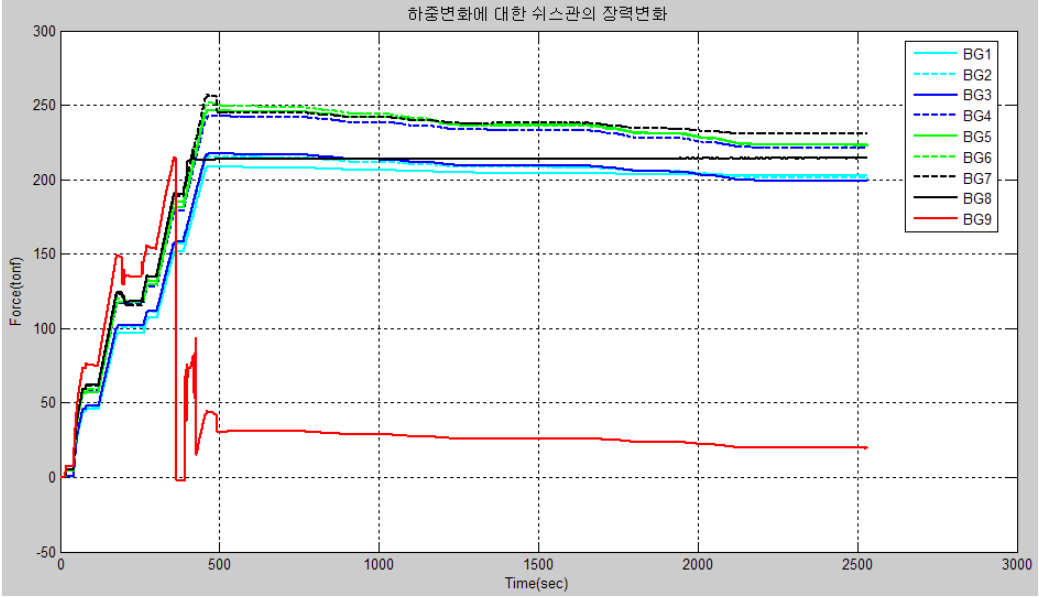
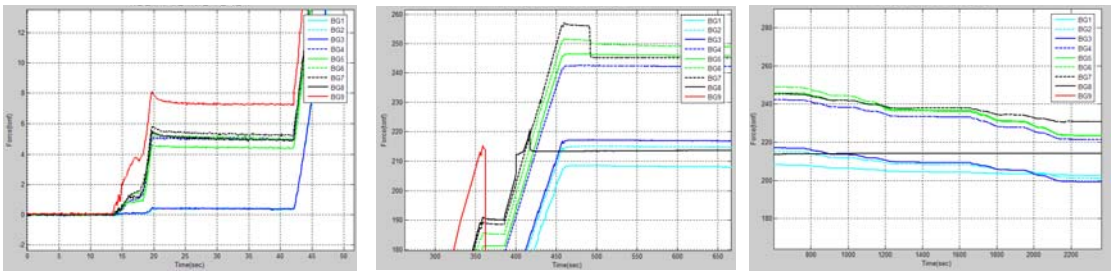


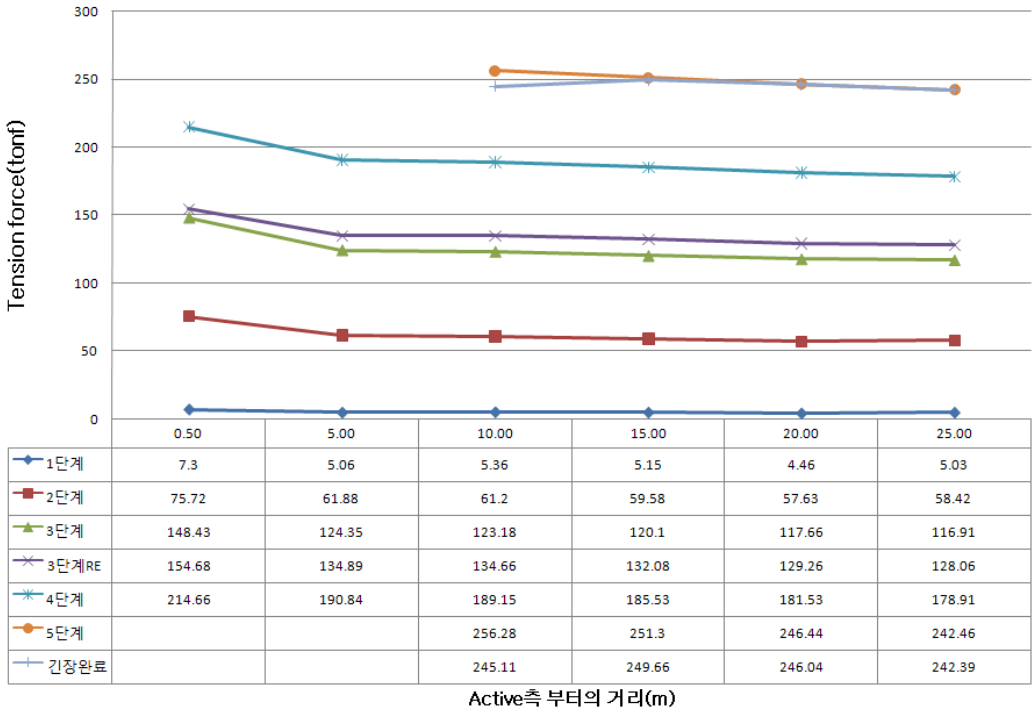
그림 3.66 쉬스관 1번의 Active측 긴장에 장력 변화



(a) 1단계 장력 변화 (b) 4~5단계 장력 변화 (c) 쉬스관2,3 긴장력 도입 후장력 변화

그림 3.67 쉬스관 1번의 Active측 단계별 장력 변화

그림 3.68은 IPC 거더의 Active측을 기준하여 긴장력 도입시 각 긴장 단계별 그리고 거더 단부에서 부터 거리에 따른 계측 장력값이다. 표 3.20은 일반향 긴장으로 발생하는 이론 긴장력과 계측값을 비교한 결과이다.



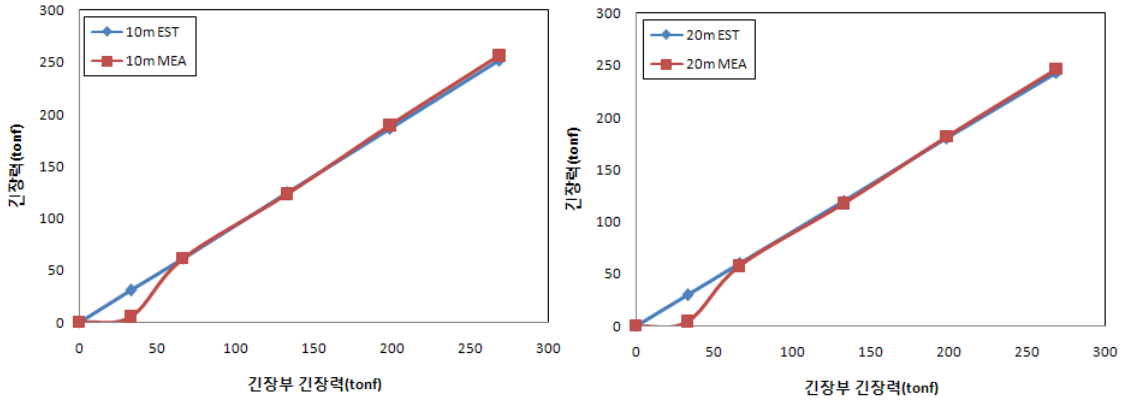
	0.50	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00
1단계	7.3	5.06	5.36	5.15	4.46	5.03
2단계	75.72	61.88	61.2	59.58	57.63	58.42
3단계	148.43	124.35	123.18	120.1	117.66	116.91
3단계RE	154.68	134.89	134.66	132.08	129.26	128.06
4단계	214.66	190.84	189.15	185.53	181.53	178.91
5단계			256.28	251.3	246.44	242.46
긴장완료			245.11	249.66	246.04	242.39

그림 3.68 쉬스관 1번의 거리 및 단계별 계측 긴장력

표 3.20 쉬스관 1번의 초기 프리스트레스력 이론치와 계측치 비교 (단위:tonf)

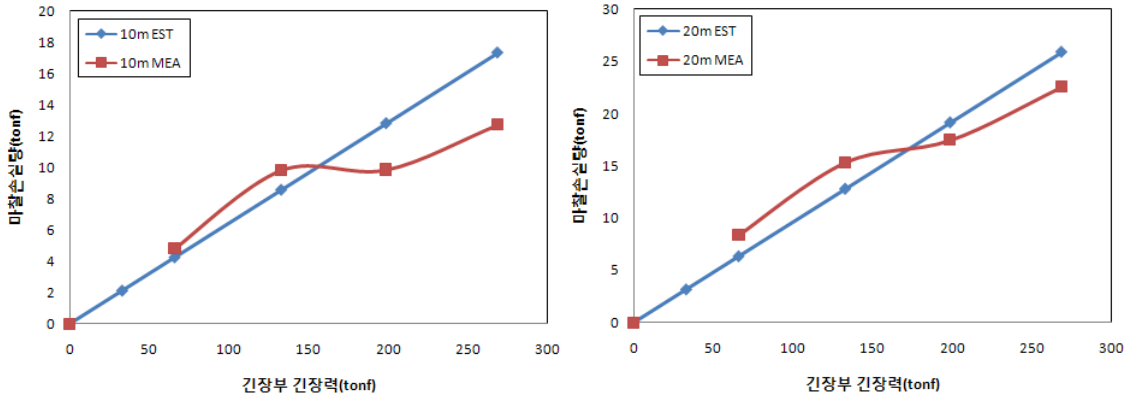
쉬스관 번호	장력 단계	Active측에서 거더 중심까지 거리(m)									
		0.5		5.0		10.0		15.0		20.0	
		이론치	계측치	이론치	계측치	이론치	계측치	이론치	계측치	이론치	계측치
① 쉬스관	1단계	31.68	7.30	31.41	5.06	30.87	5.36	30.34	5.15	29.82	4.46
	(손실량)	1.32	25.7	1.59	27.94	2.13	27.64	2.66	27.85	3.18	28.54
	2단계	63.75	75.72	62.82	61.88	61.74	61.20	60.69	59.58	59.65	57.63
	(손실량)	2.25	-9.72	3.18	4.12	4.26	4.8	5.31	6.42	6.35	8.37
	3단계	128.46	148.43	126.58	124.35	124.42	123.18	122.29	120.10	120.20	117.66
	(손실량)	4.54	-15.43	6.42	8.65	8.58	9.82	10.71	12.9	12.8	15.34
	3단계RE	128.46	154.68	126.58	134.89	124.42	134.66	122.29	132.08	120.20	129.26
	(손실량)	4.54	-21.68	6.42	-1.89	8.58	-1.66	10.71	0.92	12.8	3.74
	4단계	192.21	214.66	189.40	190.84	186.16	189.15	182.98	185.53	179.85	181.53
	(손실량)	6.79	-15.66	9.6	8.16	12.84	9.85	16.02	13.47	19.15	17.47
	5단계	259.83	-	256.02	-	251.64	256.28	247.34	251.3	243.11	246.44
	(손실량)	9.17		12.98		17.36	12.72	21.66	17.7	25.89	22.56

그림 3.68은 쉬스관 1번의 Active측에서 거더 중앙으로 10m 지점과 중앙의 이론적 긴장력과 FBG센서를 이용한 긴장력의 실측치를 비교한 결과이다. 그림 3.70은 이론적 마찰손실량과 실측치 손실량을 비교한 결과이다.



(a) 10m 지점 (b) 20m 지점

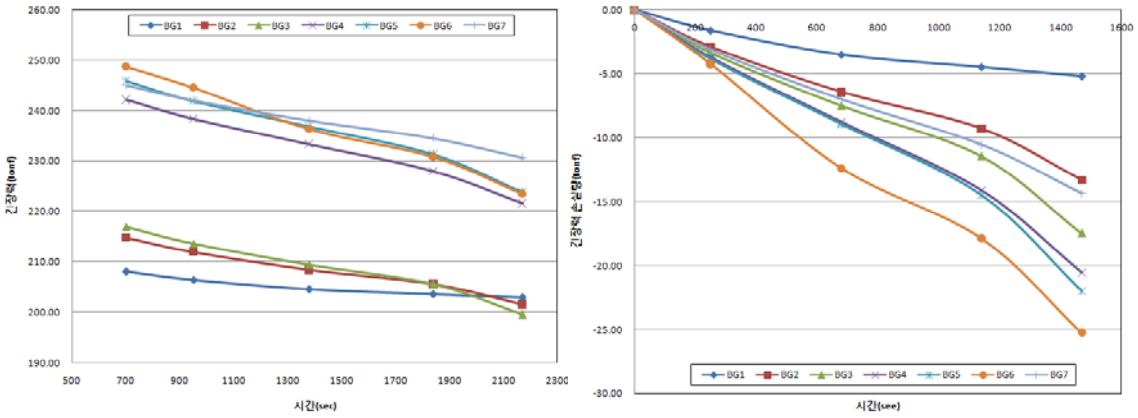
그림 3.68 쉬스관 1번의 이론적 긴장력과 실측치 비교



(a) 10m 지점 (b) 20m 지점

그림 3.70 쉬스관 1번의 이론적 마찰손실량과 실측치 비교

그림 3.71과 표 3.21는 쉬스관 1번 긴장력 도입완료 후 쉬스관2, 3번 긴장력 도입시에 발생하는 탄성손실량 계측 결과이다.



(a) 장력변화 계측결과 (b) 탄성 손실량

그림 3.71 쉬스관 1번의 다단계긴장에 의한 탄성손실 결과

표 3.21 쉬스관 1번의 다단계 긴장에 의한 탄성손실 결과 (단위:tonf)

센서 / 구분	BG1	BG2	BG3	BG4	BG5	BG6	BG7	BG8	BG9
①쉬스관 긴장완료 손실전	208.00	214.80	216.94	242.12	245.77	248.74	245.04	-	-
②쉬스관 3단계완료 1차손실	206.38 (0.8)	211.90 (1.3)	213.57 (1.6)	238.40 (1.5)	241.91 (1.6)	244.49 (1.7)	241.93 (1.3)	-	-
②쉬스관 긴장완료 2차손실	204.50 (1.7)	208.38 (3.0)	209.44 (3.5)	233.34 (3.6)	236.81 (3.6)	236.35 (5.0)	238.05 (2.9)	-	-
③쉬스관 3단계완료 3차손실	203.53 (2.1)	205.52 (4.3)	205.50 (5.3)	228.00 (5.8)	231.27 (5.9)	230.88 (7.2)	234.52 (4.3)	-	-
③쉬스관 긴장완료 4차손실	202.82 (2.5)	201.50 (6.2)	199.47 (8.1)	221.57 (8.5)	223.77 (9.0)	223.49 (10.2)	230.71 (5.8)	-	-

(나) 쉬스관 2번 긴장력 측정결과

IPC 거더의 중앙의 쉬스관 2번의 Active측 긴장력 도입시 장력 측정결과는 그림 3.40과 3.41과 같다. 쉬스관 2번의 시험시에는 5단계의 장력도입 후 모든 센서가 망실되었다.

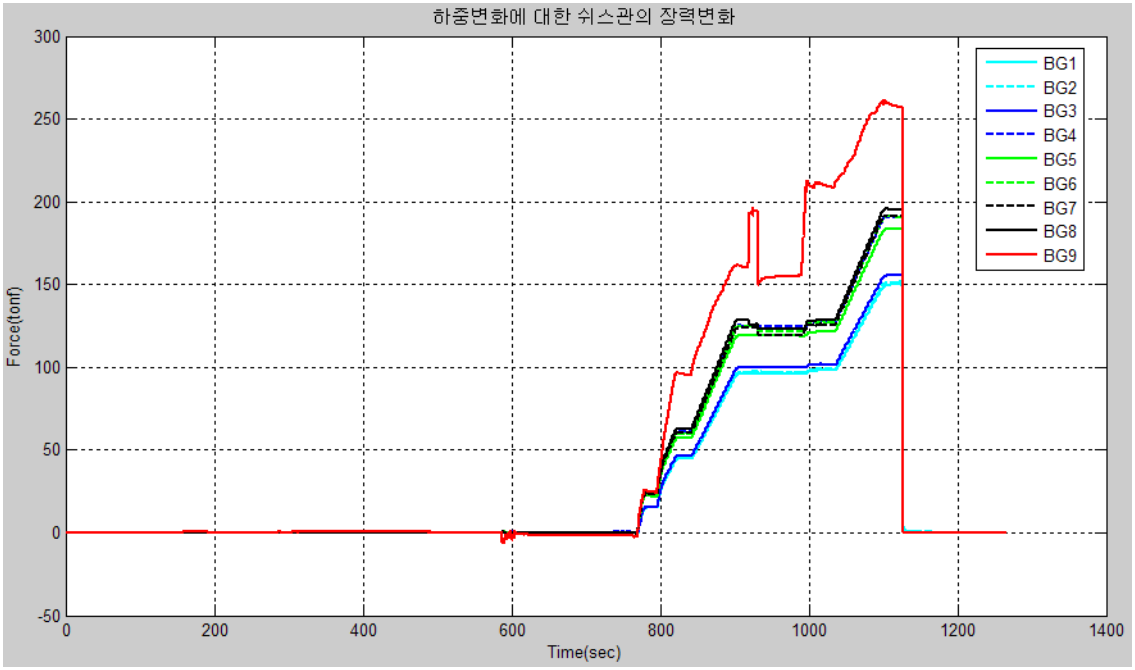
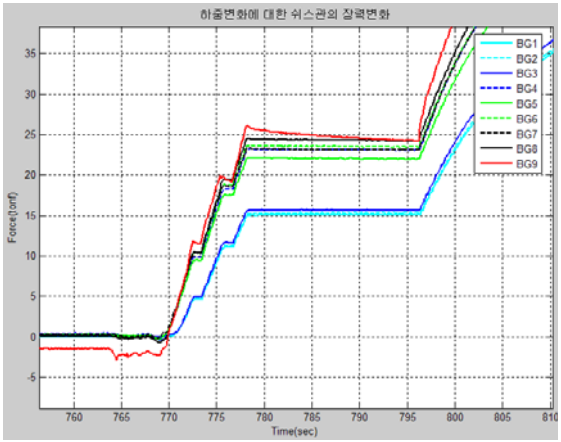
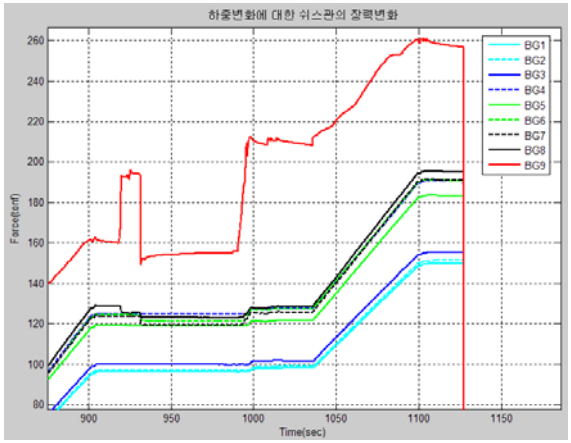


그림 3.72 쉬스관 2번의 Active측 긴장에 장력 변화



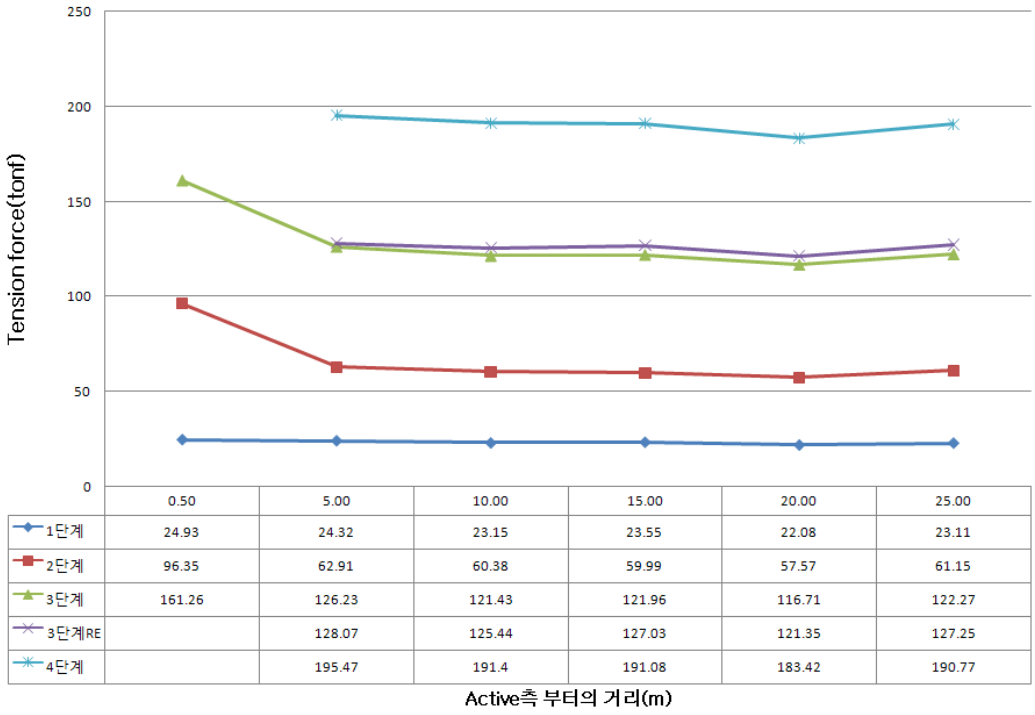
(a) 1단계 장력 변화



(b) 4~5단계 장력 변화

그림 3.73 쉬스관 2번의 Active측 단계별 장력 변화

그림 3.74는 쉬스관 2번의 Active측을 기준하여 긴장력 도입시 각 긴장 단계별 그리고 거더 단부에서 부터 거리에 따른 계측 장력값이다. 표 3.22는 일반향 긴장으로 발생하는 이론 긴장력과 계측값을 비교한 결과이다.



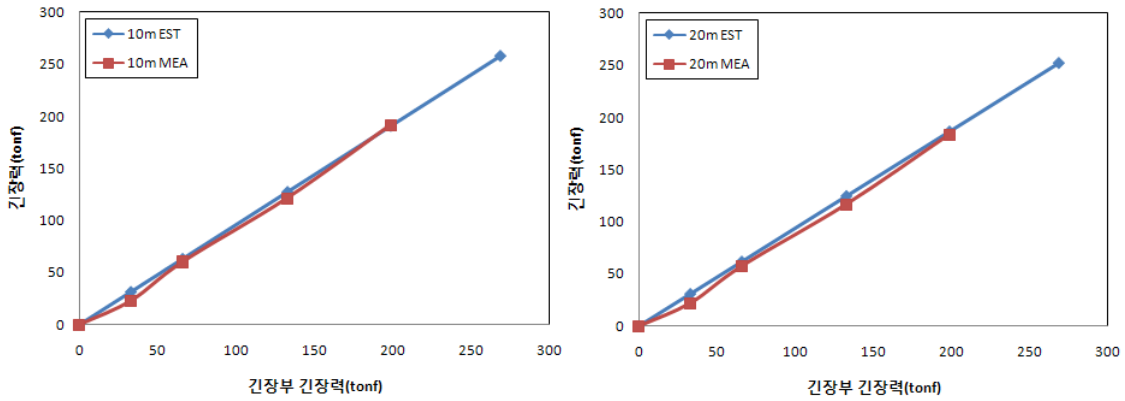
	0.50	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00
1단계	24.93	24.32	23.15	23.55	22.08	23.11
2단계	96.35	62.91	60.38	59.99	57.57	61.15
3단계	161.26	126.23	121.43	121.96	116.71	122.27
3단계RE		128.07	125.44	127.03	121.35	127.25
4단계		195.47	191.4	191.08	183.42	190.77

그림 3.74 쉬스관 2번의 거리 및 단계별 계측 긴장력

표 3.22 쉬스관 2번의 초기 프리스트레스력 이론치와 계측치 비교 (단위:tonf)

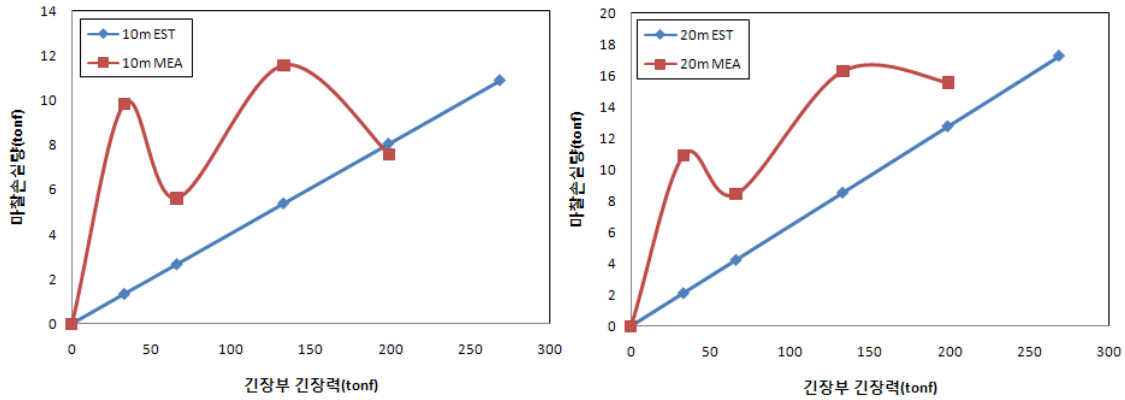
쉬스관 번호	장력 단계	Active측에서 거더 중심까지 거리(m)									
		0.5		5.0		10.0		15.0		20.0	
		이론치	계측치	이론치	계측치	이론치	계측치	이론치	계측치	이론치	계측치
②쉬스관	1단계	32.41	24.96	32.06	24.32	31.66	23.15	31.27	23.55	30.88	22.08
	(손실량)	0.59	8.04	0.94	8.68	1.34	9.85	1.73	9.45	2.12	10.92
	2단계	64.82	96.35	64.12	62.91	63.33	60.38	62.54	59.99	61.76	57.57
	(손실량)	1.18	-30.35	1.88	3.09	2.67	5.62	3.46	6.01	4.24	8.43
	3단계	130.63	161.26	129.22	126.23	127.61	121.43	126.02	121.96	124.46	116.71
	(손실량)	2.37	-28.26	3.78	6.77	5.39	11.57	6.98	11.04	8.54	16.29
	3단계RE	130.63	-	129.22	128.07	127.61	125.44	126.02	127.03	124.46	121.35
	(손실량)	2.37		3.78	4.93	5.39	7.56	6.98	5.97	8.54	11.65
	4단계	195.45	-	193.34	195.47	190.94	191.4	188.56	191.08	186.22	183.42
	(손실량)	3.55		5.66	3.53	8.06	7.6	10.44	7.92	12.78	15.58
	5단계	264.20	-	261.35	-	258.10	-	254.89	-	251.72	-
	(손실량)	4.80		7.65		10.9		14.11		17.28	

그림 3.75는 쉬스관 2번의 Active측에서 거더 중앙으로 10m 지점과 중앙의 이론적 긴장력과 FBG센서를 이용한 긴장력의 실측치를 비교한 결과이다. 그림 3.76은 이론적 마찰손실량과 실측치 손실량을 비교한 결과이다.



(a) 10m 지점 (b) 20m 지점

그림 3.75 쉬스관 2번의 이론적 긴장력과 실측치 비교



(a) 10m 지점 (b) 20m 지점

그림 3.76 쉬스관 2번의 이론적 마찰손실량과 실측치 비교

(다) 쉬스관 3번 긴장력 측정결과

IPC 거더의 중앙의 쉬스관 3번의 Active측 긴장력 도입시 장력 측정결과는 다음과 같다. 쉬스관 3번의 스마트 텐던 제작에 있어 주입관의 문제로 인하여 실제 충진제의 주입이 원활 하지 못하였다. 그 결과 BG9의 센서의 불안전한 경향을 보였으며, 그림 3.78(a)와 같이 BG1, 2, 3, 4센서의 긴장력이 작게 계측이 되었다.

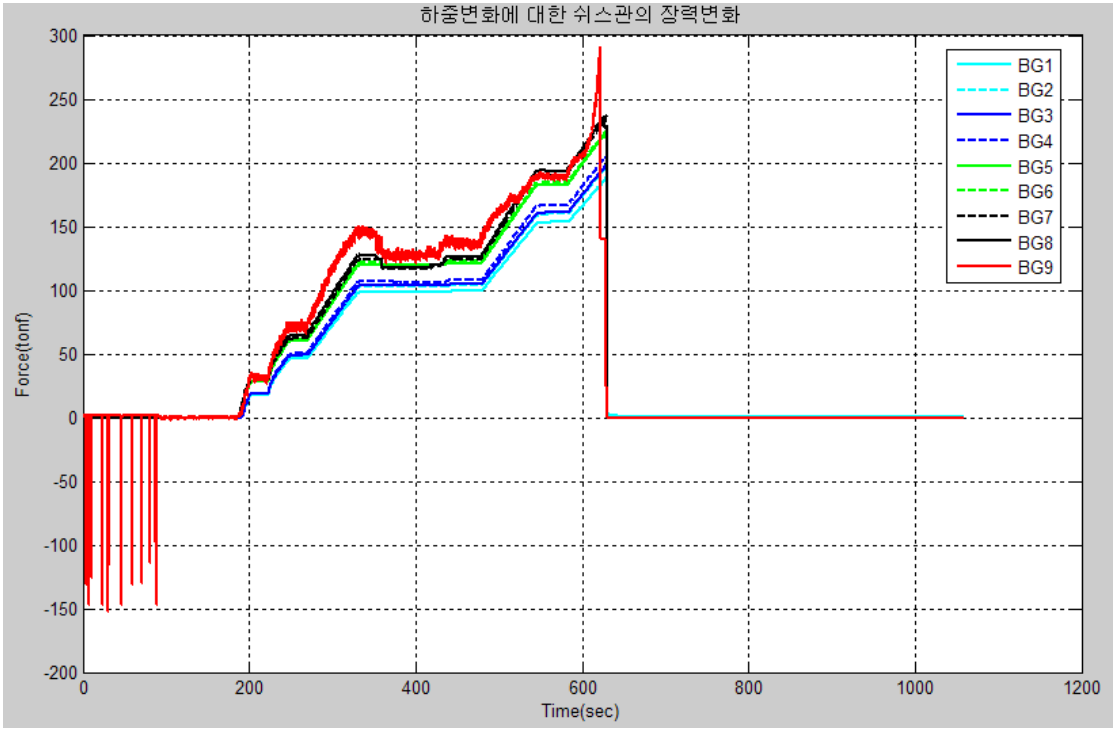
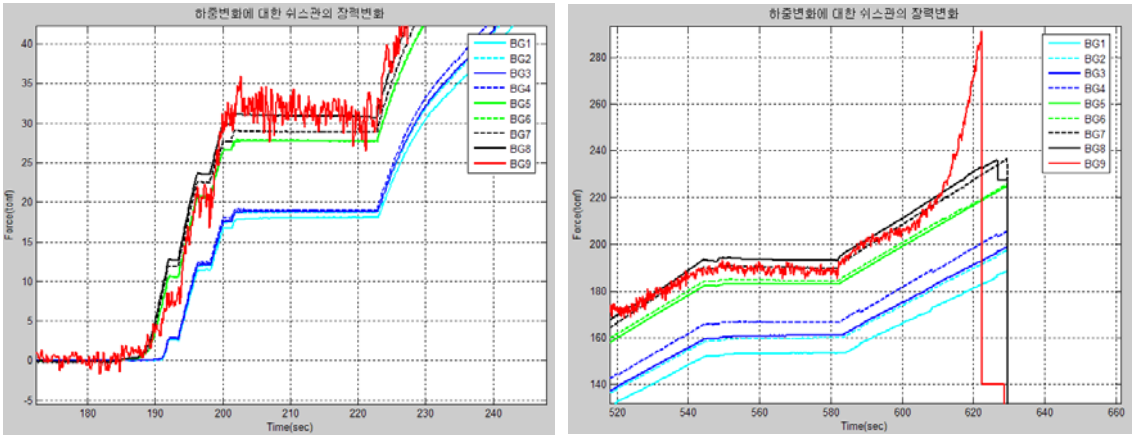


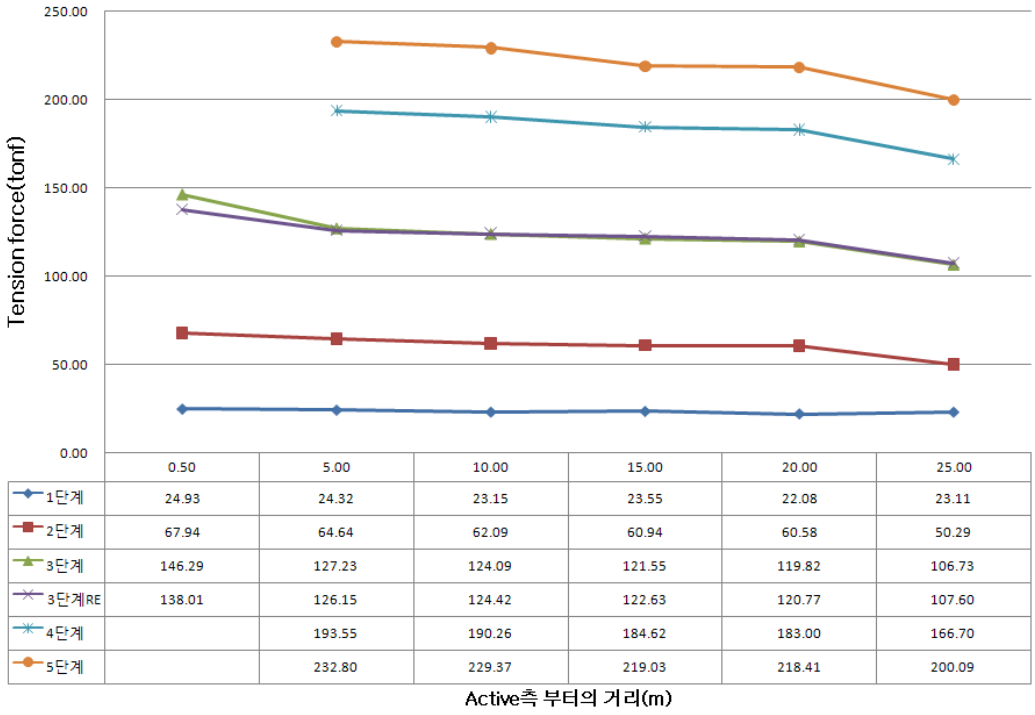
그림 3.77 쉬스관 2번의 Active측 긴장에 장력 변화



(a) 1단계 장력 변화 (b) 4~5단계 장력 변화

그림 3.78 쉬스관 3번의 Active측 단계별 장력 변화

그림 3.79는 쉬스관 3번의 Active측을 기준하여 긴장력 도입시 각 긴장 단계별 그리고 거더 단부에서 부터 거리에 따른 계측 장력값이다. 표 3.23은 일반향 긴장으로 발생하는 이론 긴장력과 계측값을 비교한 결과이다.



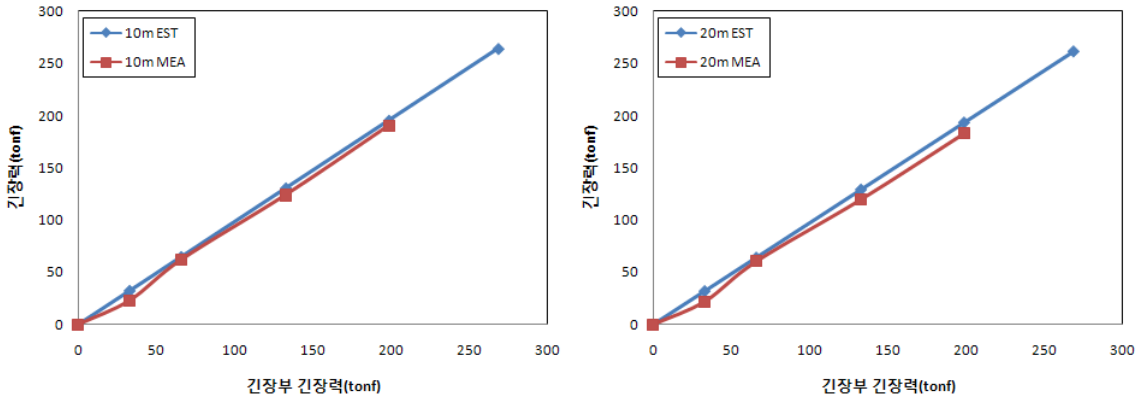
	0.50	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00
1단계	24.93	24.32	23.15	23.55	22.08	23.11
2단계	67.94	64.64	62.09	60.94	60.58	50.29
3단계	146.29	127.23	124.09	121.55	119.82	106.73
3단계RE	138.01	126.15	124.42	122.63	120.77	107.60
4단계		193.55	190.26	184.62	183.00	166.70
5단계		232.80	229.37	219.03	218.41	200.09

그림 3.79 쉬스관 3번의 거리 및 단계별 계측 긴장력

표 3.23 쉬스관 3번의 초기 프리스트레스력 이론치와 계측치 비교 (단위:tonf)

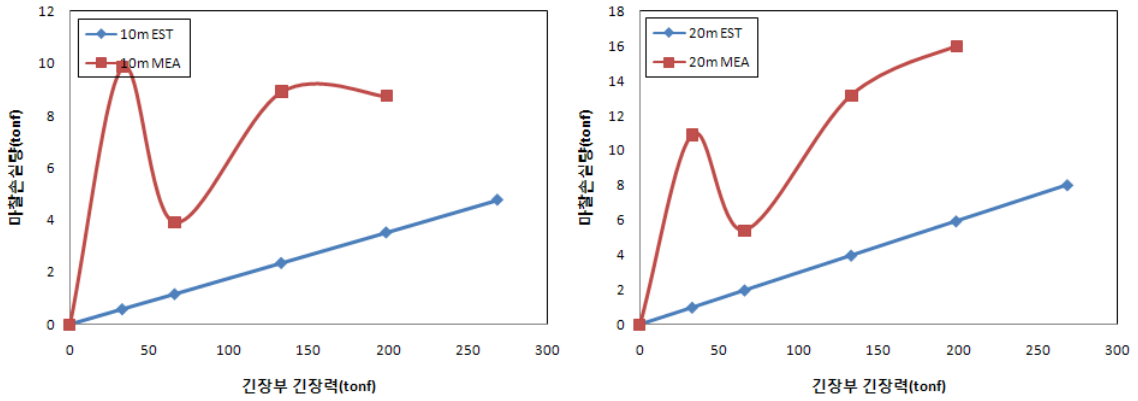
쉬스관 번호	장력 단계	Active측에서 거더 중심까지 거리(m)									
		0.5		5.0		10.0		15.0		20.0	
		이론치	계측치	이론치	계측치	이론치	계측치	이론치	계측치	이론치	계측치
③쉬스관	1단계	32.79	24.93	32.62	24.32	32.41	23.15	32.21	23.55	32.02	22.08
	(손실량)	0.21	8.07	0.38	8.68	0.59	9.85	0.79	9.45	0.98	10.92
	2단계	65.59	67.94	65.23	64.64	64.83	62.09	64.43	60.94	64.03	60.58
	(손실량)	0.41	-1.94	0.77	1.36	1.17	3.91	1.57	5.06	1.97	5.42
	3단계	132.16	146.29	131.45	127.23	130.64	124.09	129.83	121.55	129.03	119.82
	(손실량)	0.84	-13.29	1.55	5.77	2.36	8.91	3.17	11.45	3.97	13.18
	3단계RE	132.16	138.01	131.45	126.15	130.64	124.42	129.83	122.63	129.03	120.77
	(손실량)	0.84	-5.01	1.55	6.85	2.36	8.58	3.17	10.37	3.97	12.23
	4단계	197.75	_	196.68	193.55	195.47	190.26	194.26	184.62	193.06	183.00
	(손실량)	1.25		2.32	5.45	3.53	8.74	4.74	14.38	5.94	16.00
	5단계	267.31	_	265.86	232.80	264.22	229.37	262.59	219.03	260.98	218.41
	(손실량)	1.69		3.14	36.2	4.78	39.63	6.41	49.97	8.02	50.59

그림 3.80은 쉬스관 3번의 Active측에서 거더 중앙으로 10m 지점과 중앙의 이론적 긴장력과 FBG센서를 이용한 긴장력의 실측치를 비교한 결과이다. 그림 3.81은 이론적 마찰손실량과 실측치 손실량을 비교한 결과이다.



(a) 10m 지점 (b) 20m 지점

그림 3.80 쉬스관 3번의 이론적 긴장력과 실측치 비교



(a) 10m 지점 (b) 20m 지점

그림 3.81 쉬스관 3번의 이론적 마찰손실량과 실측치 비교

(라) Active측 긴장력 도입완료 후 즉시손실 측정결과

표 3.24는 Active측에서 긴장력 도입완료 후 즉시손실 계측결과이다. 각 쉬스관의 긴장력 도입완료 직후의 긴장력과 긴장장치의 제거 후 정착단의 활동과 같은 손실로 발생하는 장력 손실량이다. 현재 긴장부의 0.5m 위치한 BG9센서는 평균 9%의 손실량을 보이고 있으며, 5.0m 위치의 BG8센서는 평균 6%손실을 보이고 있으며, 거더 중앙으로 갈수록 그 영향을 작은 것으로 측정되었다.

표 3.24 Active측 긴장완료 후 즉시손실 계측결과 (단위:tonf)

쉬스관 번호 \ 센서번호			BG1	BG2	BG3	BG4	BG5	BG6	BG7	BG8	BG9
①쉬스관	3단계	제거 전 (A)	97.0	100.6	101.9	116.9	117.7	120.2	123.3	124.5	148.7
		제거 후 (B)	97.1	100.6	101.9	116.8	117.6	118.4	115.2	118.1	135.0
		즉시 손실량 (C)	-0.1 (-0.1%)	0.0 (0.0%)	0.0 (0.0%)	0.1 (0.1%)	0.1 (0.1%)	1.8 (1.5%)	8.1 (6.5%)	6.3 (5.1%)	13.7 (9.2%)
	5단계	제거 전 (A)	208.5	215.0	217.3	242.5	246.4	251.3	256.3	-	-
		제거 후 (B)	208.5	215.1	217.3	242.5	246.2	249.9	245.2	-	-
		즉시 손실량 (C)	0.0 (0.0%)	-0.1 (-0.1%)	0.0 (0.0%)	0.0 (0.0%)	0.3 (0.1%)	1.4 (0.6%)	11.1 (4.3%)	-	-
②쉬스관	3단계	제거 전 (A)	96.1	97.1	99.8	125.0	119.4	124.6	124.0	129.0	161.6
		제거 후 (B)	96.3	97.1	99.8	124.8	119.0	121.4	119.3	123.2	154.2
		즉시 손실량 (C)	-0.2 (-0.2%)	-0.1 (-0.1%)	0.0 (0.0%)	0.2 (0.2%)	0.4 (0.3%)	3.2 (2.6%)	4.7 (3.8%)	5.8 (4.5%)	7.4 (4.6%)
③쉬스관	3단계	제거 전 (A)	98.4	102.8	103.6	106.7	119.8	121.5	124.1	127.2	146.3
		제거 후 (B)	98.5	102.8	103.6	106.3	119.5	120.0	116.8	117.6	126.3
		즉시 손실량 (C)	-0.1 (-0.1%)	0.0 (0.0%)	0.0 (0.0%)	0.4 (0.4%)	0.3 (0.3%)	1.6 (1.3%)	7.3 (5.9%)	9.6 (7.5%)	20.0 (13.7%)

※ 즉시 손실량(C)={(제거 전(A)-제거 후(B))/(제거 전(A)}*100

(마) LVDT를 이용한 변위 계측 결과

LVDT를 설치하고 IPC 거더의 변위를 측정하였다. 그림 3.82는 거더 단부의 수평방향의 변위로 긴장력에 의한 거더의 탄성단축을 측정 결과이다. 그림 3.83은 거더의 횡방향 비틀림을 측정하기위한 변위 계측결과이다.

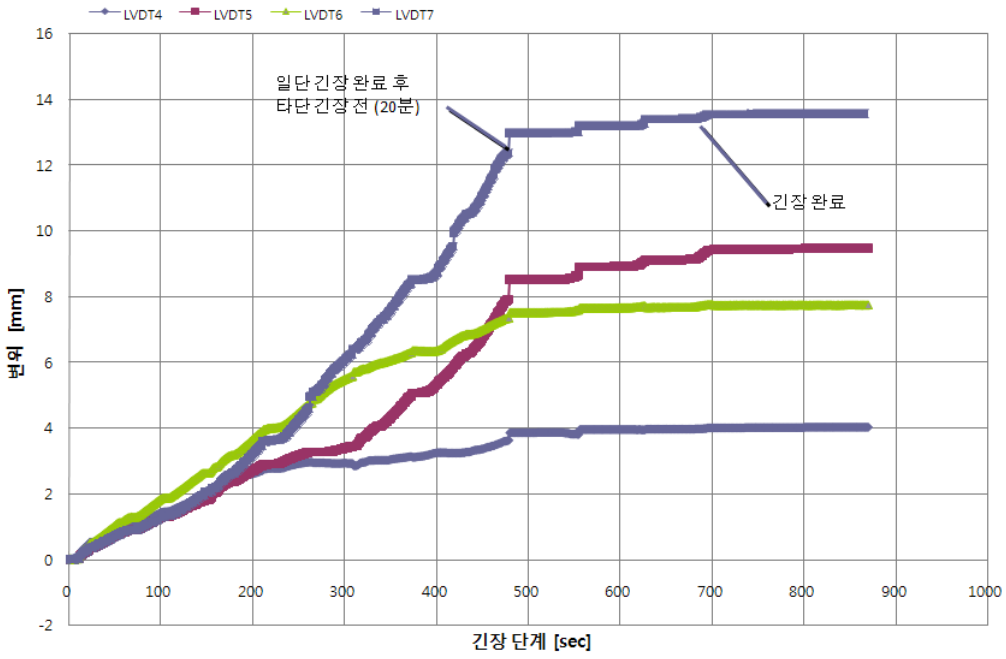


그림 3.82 40m IPC I-거더 수평방향 탄성단축 계측결과

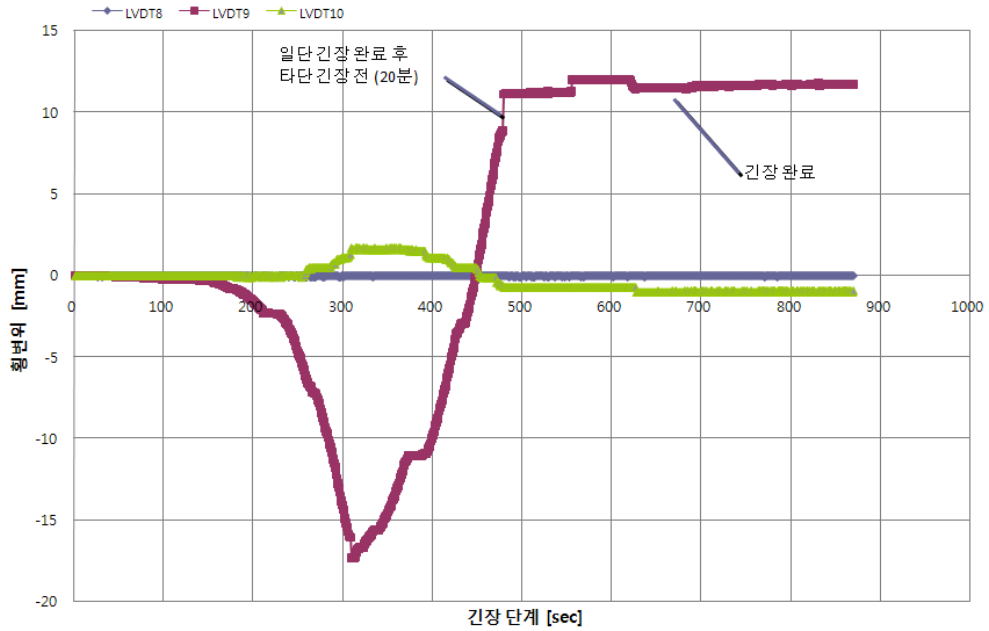


그림 3.83 40m IPC I-거더 횡방향 변위계측결과

그림 3.84는 거더의 단위 상단에 설치된 LVDT를 이용한 솟음량 계측결과이다. 양단에서는 약 6~9mm의 처짐을 보였으며, 중앙부에서는 약 40mm의 솟음을 측정하였다.

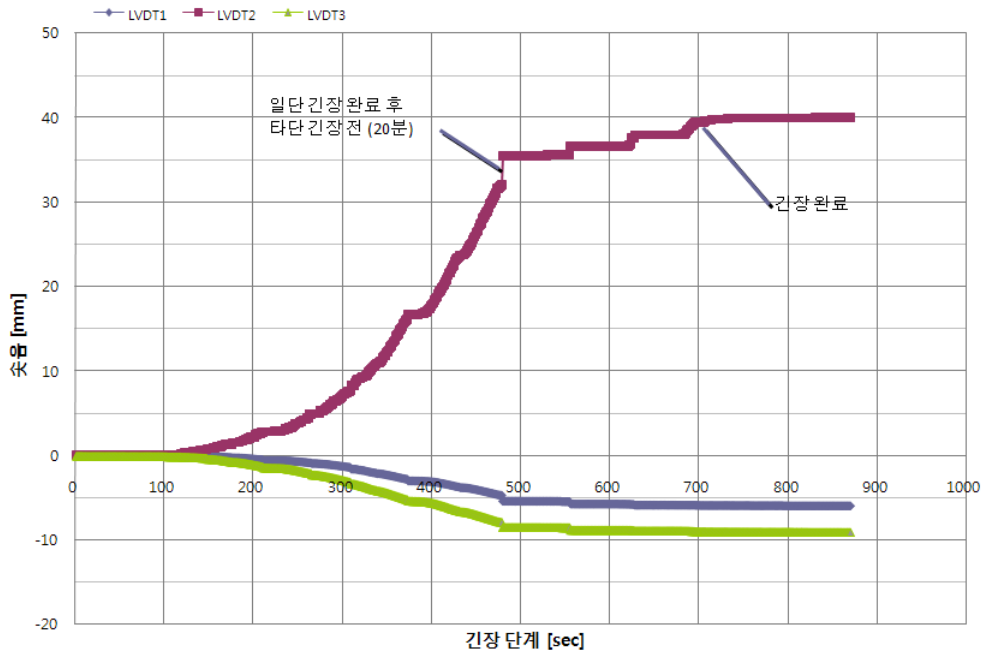


그림 3.84 40m IPC I-거더 솟음량 계측결과

제3절 통합 모니터링 Software

1. 프로그램 개요

프로그램은 서버 프로그램과 클라이언트 프로그램으로 구성되며 두 프로그램은 기본적으로 동일한 기능을 제공한다. 서버 프로그램은 구조물의 현정에 서버 컴퓨터에 설치되며, 센서와 직접적으로 통신을 수행하고 데이터 베이스를 관리한다. 클라이언트 프로그램은 네트워크 망을 통하여 서버 프로그램으로부터 전송된 데이터를 모니터링한다.

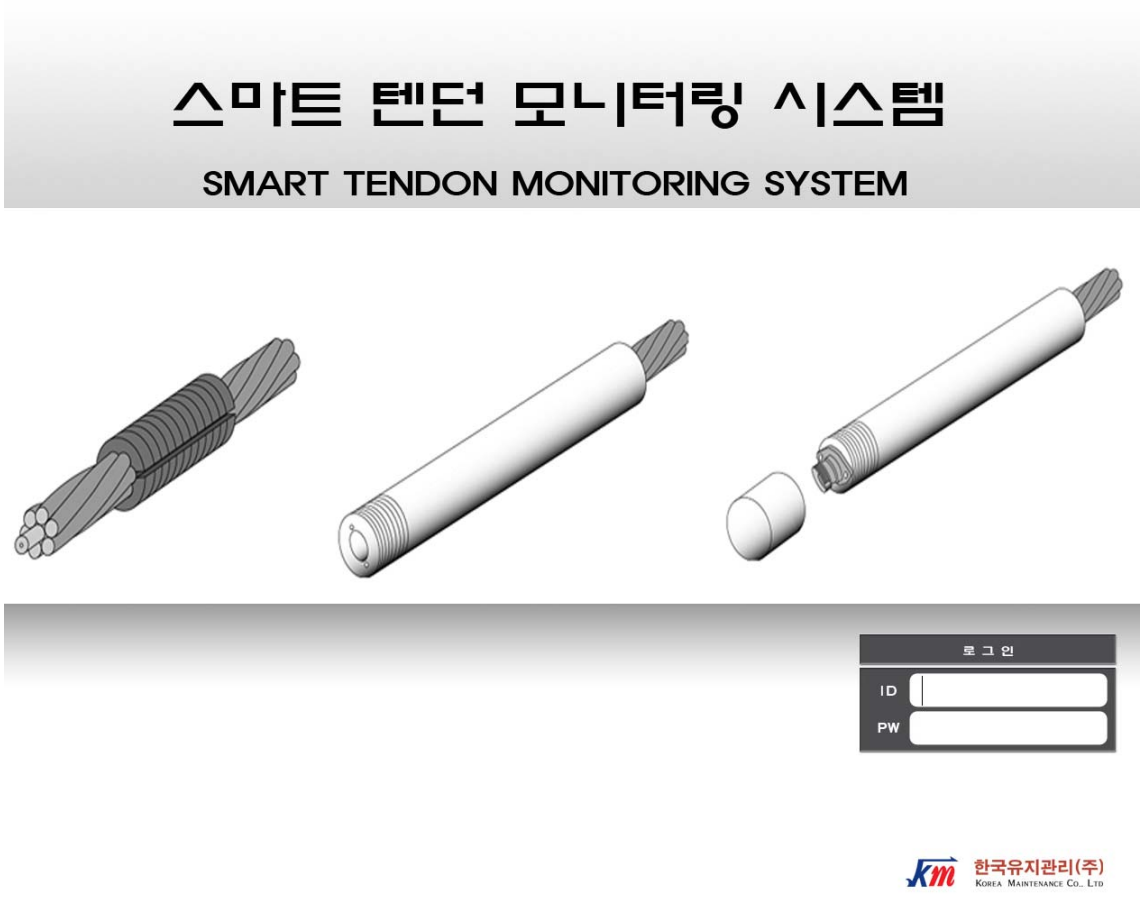


그림 3.85. 프로그램 UI

2. 통합 모니터링 구성 및 상세 사양

통합 모니터링 Software의 구성 및 상세 사양은 다음과 같다.

① 프로젝트 개요

계측 시스템이 설치된 구조물의 제원과 같은 정보들을 표시하고 계측 시스템의 설명 및 관련 사진 정보를 표시한다.

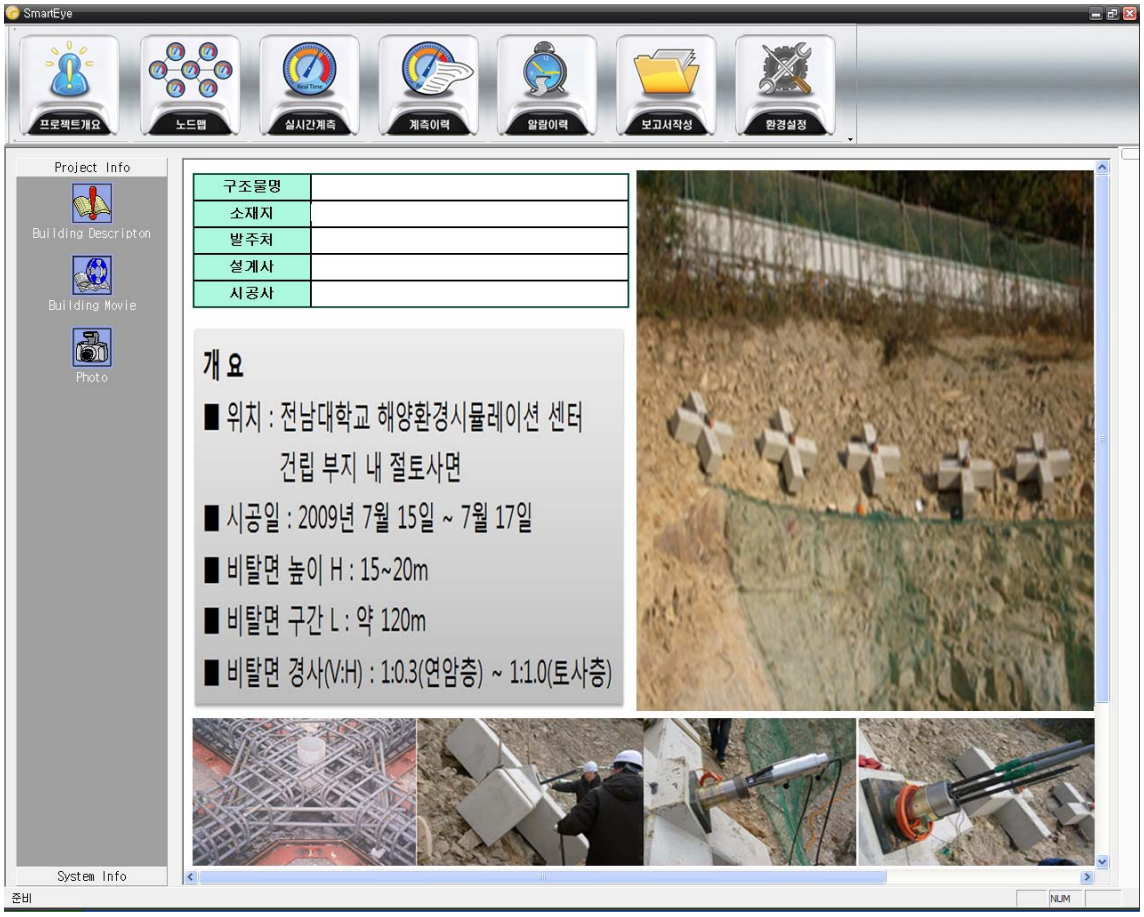


그림 3.86 프로젝트 개요 화면

② 노드맵

센서들의 위치 표시 및 실시간 계측 데이터 창을 표시하고 각 센서들의 동작상태를 표시한다.

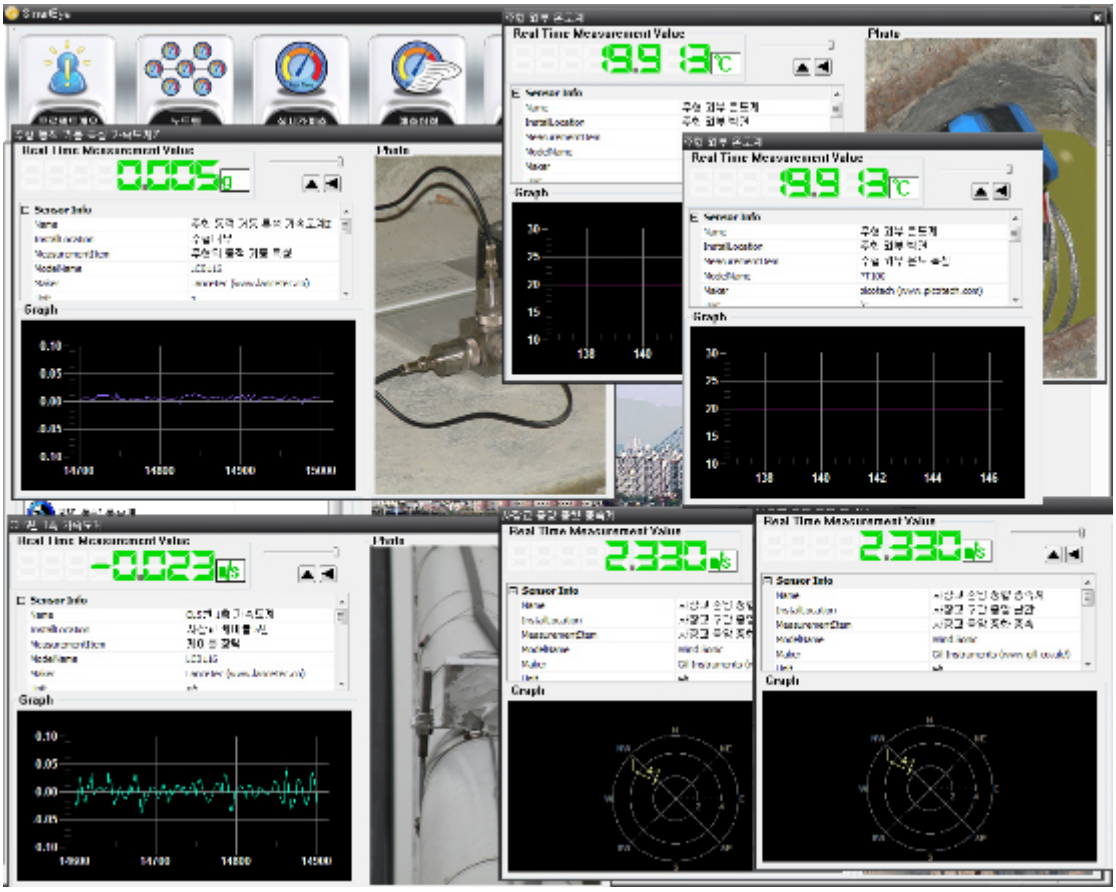


그림 3.87 노드맵 화면

③ 실시간 계측(그래프 뷰, 센서리스트)

좌측 상단에 선택된 센서들의 정보가 출력되고, 센서의 종류와 샘플링률이 동일한 센서를 선택할 경우 한 그래프에 해당 센서들의 값이 동시에 출력된다. 1번 센서를 선택할 경우 실시간 FFT 값이 출력되며 상단의 두 번째 FND 값이 활성화되어 주파수를 실시간으로 출력한다.



그림 3.88 실시간 계측 화면

구조물에 설치된 모든 센서들의 실시간 값을 표시한다.

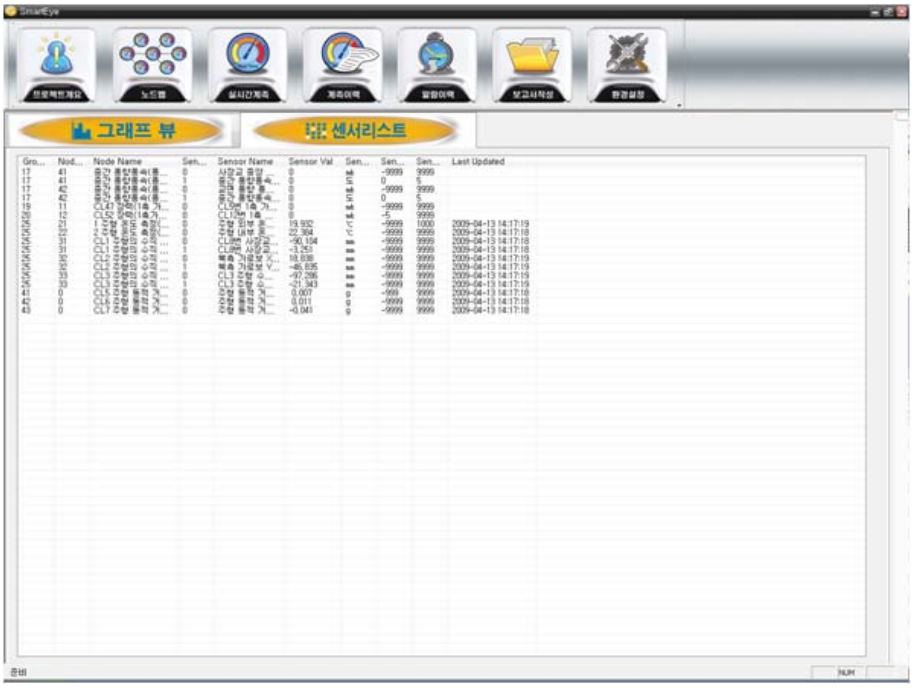


그림 3.89 실시간 계측 값

④ 계측이력

이전의 계측 값들을 날짜, 시단 단위로 확인할 수 있으며 좌측 상단의 달력과 시간 컨트롤로 확인하고 싶은 날짜와 시간의 범위를 입력하고 좌측 하단의 센서들을 선택한 후 'Refresh Graph' 버튼을 클릭하면 계측 데이터가 출력된다.

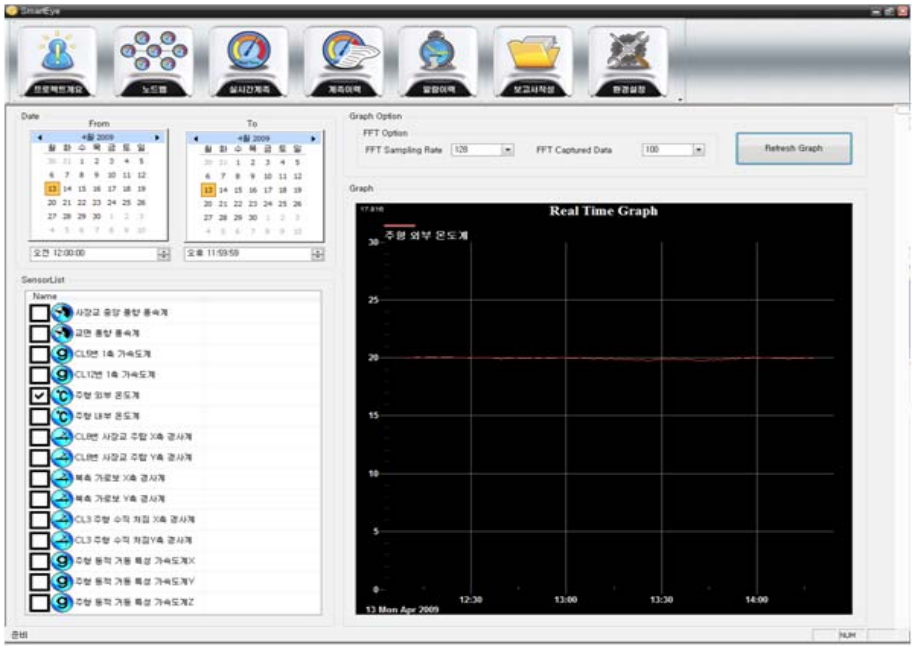


그림 3.90 계측 이력 화면

⑤ 알람이력

센서 값이 '주의' 또는 '위험' 범위를 벗어나 경고 창이 발생한 날짜를 표시한다.

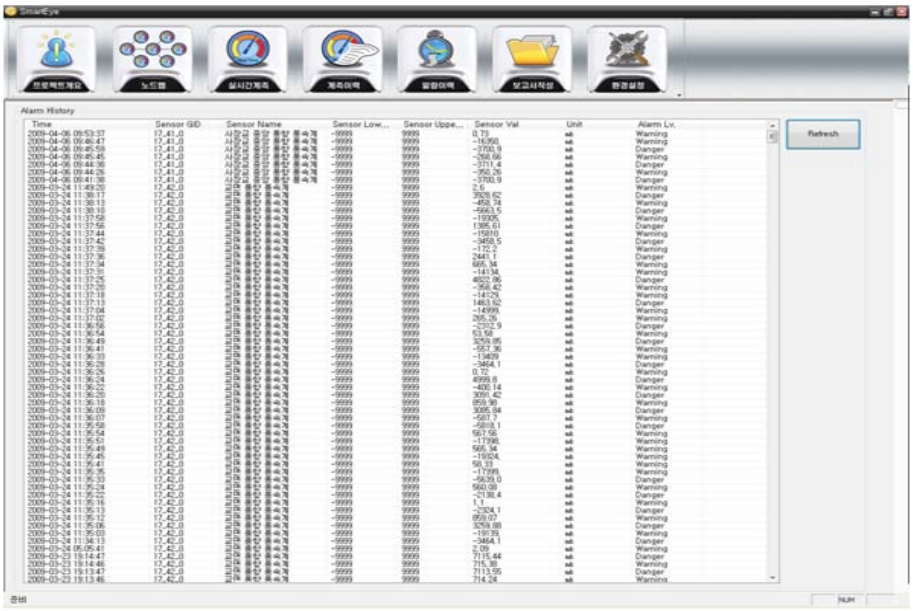


그림 3.91 알람 이력 화면

⑥ 보고서 작성

각 센서들에 대한 간략 보고서를 자동으로 작성한다.

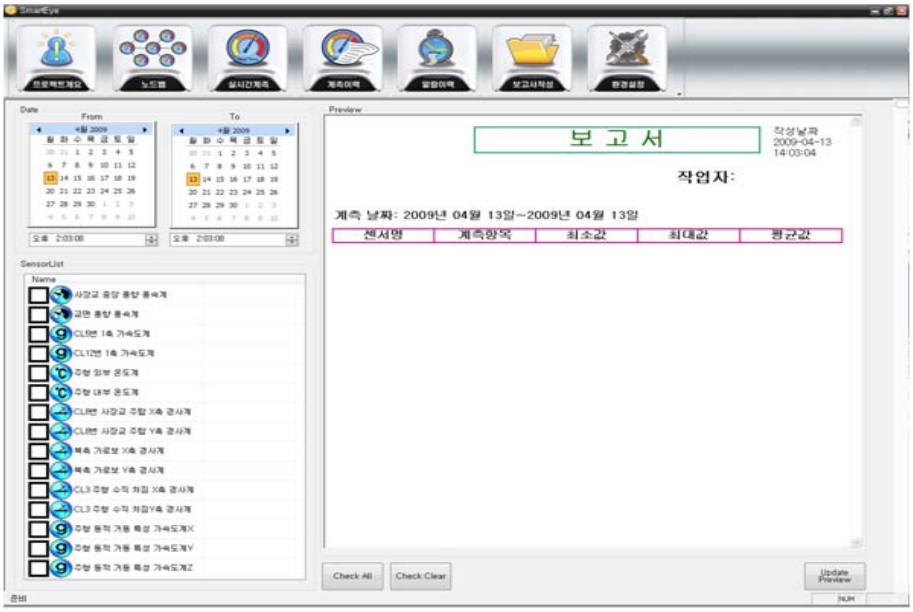


그림 3.92 보고서 작성 화면

⑦ 환경설정

각 센서들의 하드웨어 환경을 설정한다.



그림 3.93 환경설정 화면

제4절 결 론

본 연구에서는 광섬유(FBG)센서를 내장한 스마트 텐던을 적용한 앵커 및 교량의 시공 시 긴장력 유지관리기술을 상용화하기 위한 연구를 수행하였으며, 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 스마트 앵커의 현장 적용성을 검증하기 위해 기존 연구결과 개발된 단선 스마트 텐던을 현재 판매되고 있는 상용 제품의 일부 텐던과 교체하여 실대형의 스마트 앵커(L=11.5m)를 제작하였다.

(2) 스마트 텐던을 11.5m의 실대형 인장형 앵커에 적용한 결과, 자유장 FBG센서에서 측정된 변형률(ε_{FBG1})을 이용하여 스마트 텐던에 작용하는 긴장력을 간단히 추정할 수 있으며, 스마트 텐던의 자유장에서 측정된 변형률로부터 산정한 긴장력 추정값($P_{estimated}$)은 앵커 두부의 로드셀에 의해 측정된 강연선의 긴장력($P_{measured}$)과 비교한 결과 작용하중 10tonf 정도까지는 거의 일치하는 값을 제공하여 개발된 스마트 텐던의 장력측정 능력을 검증하였으며 현재 로드셀 형식으로 사용되고 있는 시험 앵커 장력 측정 방법의 대체 가능성을 확인하였다.

(3) 40m 이상의 장지간 거더에 적용 가능한 스마트 텐던 제작하기 위해 40m 이상의 중공킹케이블 제작기술 확보하였으며, 13bar 이상 중고압의 주입제 주입기술 및 접착성, 유동성과 지연성의 효율이 높은 엑폭시 주입제를 확보하였다. 또한 광섬유의 접합이 없는 센서 제작기술을 확보함으로서 광섬유센서의 계측성능을 개선하였다.

(4) 40m 이상의 스마트 텐던을 제작 기술을 이용하여 실대형 교량의 긴장력 계측을 시험하였다. 계측결과 초기 프리스트레스 도입에 의한 긴장력은 이론치와 거의 같은 결과 얻었다. 일방향 긴장력 도입시에 발생하는 이론 마찰손실량과 계측 마찰손실량의 비교결과 초기 계측 마찰손량의 크게 나타났으며, 도입 긴장력이 증가할수록 마찰손실량이 감소하는 경향을 보였다. 또한 즉시손실 계측결과 단부에서 중앙으로 갈수로 점차 감소를 하였으며, 긴장장치의 가장 근접부에서는 평균 9%의 감

소, 5m 지점에서는 6% 감소를 보였다.

현재 현장 절취사면에 인장형 및 압축형 앵커가 시공중이고 향후 장기 모니터링을 실시할 예정이다. 제안된 광섬유 센서를 이용한 스마트 텐던을 앵커에 적용하여 도심 굴착 및 영구 보강사면의 장력 모니터링에 활용할 경우 흙막이 토류벽 및 영구 보강사면의 안전관리 및 장기 모니터링에 매우 효과적이며, 자동화 유지관리 시스템 구축도 용이할 것으로 기대된다.

스마트 텐던의 교량의 실용화를 위해서는 몇몇 추가연구가 필요할 것으로 판단된다. 첫째, 중공 킹케이블의 강도개선 문제이다. 현재의 중공 킹케이블을 이용한 스마트 텐던의 적용은 초기 프리스트레스력의 측정은 가능하다고 생각되나, 장기 모니터링을 위해서는 스마트 텐던 40% 이하로 단일 장력을 취해야 측정이 가능하다. 하지만 강도개선을 할 경우 초기의 프리스트레스력의 도입과 동이세 장기모니터링의 적용 가능하다고 생각된다. 둘째, 주입속도의 제어로서 40m 이상의 스마트 텐던의 제작에 있어 주입속도를 개선할 방법이 필요하다고 생각된다. 마지막으로 센서의 융착 즉 광섬유 및 FBG센서들과의 연결로 인한 강도저하 문제이다. 이는 이번 실험에서 센서 손실이후 광섬유센서를 확인한 결과 모든 센서들 간의 연결 부위에서 손상된 것으로 확인되었다. 이에 광섬유의 연결로 인한 강도개선이 필요할 것으로 판단된다.

스마트 텐던을 이용한 교량의 실용화를 통하여 기대 되는 효과는 PS 강연선을 이용한 교량의 장력의 효율적 계측과 관리, PS 강연선을 사용하는 교량 및 대형구조물의 프리스트레스 특성을 파악하고, 현재 시방서에서 사용되고 있는 마찰계수(파상마찰계수 & 곡률마찰계수) 기준 값의 타당성을 검토할 수 있다. 또한 스마트 텐던의 사업화를 통하여 고성능 시설물 안전관리 시스템을 실현으로 구조물의 피해 예측분석 및 사전예방관리 가능하고, 기존 선진국에서 시행되고 있는 보수 · 보강 및 보수보강재를 통한 계측 기술을 뛰어넘을 수 있는 핵심기술로써 토목계측, 보수보강 및 구조물 안전 모니터링 분야에서도 큰 기술력을 확보 할 수 있을 것으로 기대된다.

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1. 목표달성도

가. 연구목표 및 주요 연구내용

연구개발 계획 단계에서 수립한 연차별 연구목표 및 주요 연구성과는 다음과 같다.

표 4.1 연차별 연구목표 및 주요 연구내용

연 차	연구목표	주요연구내용
1차년도	▪ 스마트 텐던의 원가절감 기술 및 방안	▪ FBG센서 원가절감 방안 ▪ 중공튜브 원가절감 방안/공정 ▪ 산학연간 기술지원
	▪ 스마트 텐던의 교량 활용기술 개발	▪ 길이 30m 스마트 텐던 시제품 제작 ▪ 중공 튜브 스플라이스 시제품 제작 및 실험
	▪ 스마트 텐던의 지반구조물 활용기술 개발	▪ 인장형 앵커 시제품 제작 ▪ 스마트 앵커 적용실험
2차년도	▪ 스마트 텐던의 원가절감 기술 및 방안	▪ 중공튜브 연속차 공정 개발 ▪ 신기술, 신제품 인증 신청 ▪ 산학연간 기술지원
	▪ 스마트 텐던의 교량 활용기술 개발	▪ 경간장 30m PSC I 거더 시제품 제작 ▪ 경간장 30m PSC I 거더 시제품 실험
	▪ 스마트 텐던의 지반구조물 활용기술 개발	▪ 압축형 앵커 시제품 제작 ▪ 어스앵커 시제품 실험
	▪ 스마트 텐던을 활용한 장력모니터링 통합 SW 개발	▪ PSC 교량 통합 SW 개발 ▪ 어스앵커 통합 SW 개발 ▪ 프로그램 등록 출원

나. 연구목표 및 연구성과

FBG 제조용 Phase Mask를 이용한 최적의 FBG센서 제작 및 생산 방법 도출,

중공튜브 연속공정 개발, 광섬유 센서와 중공튜브 접합 공정 개발, 등으로 스마트 텐던의 원가절감 기술 및 방안을 마련하였다.

스마트 텐던의 교량 및 지반구조물 적용 기술 개발에 있어서는 길이 30m 스마트 텐던 제작 및 60m 스마트텐던 검증 실험을 실시 하였으며, 인장형 스마트 앵커의 제작 등의 추가 성과를 달성하였다.

성과지표별 목표 달성도는 다음과 같다.

표 4.2 성과지표별 목표 달성도

성과지표	목표치	실적치	성과물 명칭
FBG센서 원가절감 방안	2건	1건	원가 절감 보고서
중공튜브 원가절감 방안/공정	1건	1건	원가 절감 보고서 중공튜브 제작공법
산학연간 기술지원 건수	2건	2건	자문회의
신기술, 신제품 인증 신청	1건		
길이 30m 스마트텐던 시제품 제작	2건	2건	스마트텐던 시제품
경간장 30m PSC I 거더 시제품 제작	1건	1건	경간장 30m PSC I 거더 시제품
중공튜브 스플라이스 시제품 제작 및 실험	2건	2건	중공튜브 스플라이스 시제품 현장 실험
경간장 30m PSC I 거더 시제품 실험	1건	1건	현장 실험
인장형 앵커 시제품 제작	10건	10건	인장형 앵커 시제품 압축형 앵커 시제품
어스앵커 시제품 실험	10건	10건	현장 실험
PSC 교량 통합 SW 개발	1건	1건	통합 Software
어스앵커 통합 SW 개발	1건		
프로그램 등록 출원	1건	1건	프로그램 등록증
현장적용을 통한 비용절감		1건	스마트텐던 모니터링 시스템의사면 적용
학술발표		1건	한국방재학회 2010 학술발표대회

2. 관련분야에의 기여도

가. 원가절감

○ FBG 센서 대량생산을 통합 원가 절감 방안 (SJ포토틱스와 협상 결과)

- FBG 광섬유센서 전문생산 기업인 (주)SJ포토닉스(대표이사 백세종, 광주광역시)와 협의하여 대량생산시 FBG 광섬유센서의 제작 단가를 낮출 수 있는 방안을 도출하였다.

- (주)SJ포토닉스와 협의 한 결과, 낱개로 주문할 경우 기존의 개당 150,000원 수준에서 개당 6만원 수준으로 가격을 인하할 수 있었고, 1회에 1,000개 이상 주문시 FBG 광섬유센서의 생산단가를 개당 30,000원 수준까지 협상 결과를 도출해냈다.

- 따라서, 향후 스마트 텐던의 제작비용을 획기적으로 절감할 수 있는 방안을 도출하였다.

1차년도 2차년도 사업과제에서 도출된 광섬유 센서 제작 단가 협의 결과 및 견적 내역은 각 각 다음과 같다.

Price List for Fiber Bragg Gratings (March in 2009)

QTY	Prime (₩)	Standard Unit price (₩)	Margin(%)	Specifications of Standard type
1		60,000		Center wavelength : C-band Reflectivity : 50~90% Bandwidth : 0.22~0.3 No Recoating No connecting Pigtail : 2,000mm/2,000mm Grating lehgth : < 100mm
2~9		55,000		
10~49		50,000		
50~99		40,000		
100~199		30,000		
200~999		25,000		
>1000		20,000		

Additional charge

Fiber type	SMF-28	UV Fiber	PM Fiber	980 Fiber	1060 Fiber	Polyimide Fiber	Special Fiber
Additional ratio	0	+ 20%	+ 120%	+ 0.5%	+ 0.5%	+ 100%	Depend on
Center Wavelength[nm]	C-band	S-band	L-band	~1300nm	~980nm	~1060nm	Special Wavelength
Additional ratio	0	+ 20%	+ 20%	+ 20%	+ 20%	+ 20%	Depend on
Reflectivity[%]	<90	<95	<99	<99.9	<99.95	99.99	Special reflectivity
Additional ratio	0	+ 20%	+ 40%	+ 70%	+ 100%	+ 140%	Depend on
Bandwidth[nm]	0.22~0.3	0.3 ~ 0.5	0.5 ~ 0.8	1			Special bandwidth
Additional ratio	0	+ 10%	+ 30%	+ 50%			Depend on
Recoating	Nonexistence	Acrylic recoaing					Special recoating
Additional ratio	0	+ 5,000					Depend on
Connecting + Jacketing	None	SC/PC	SC/APC	FC/PC	FC/APC		Special conneting
Additional ratio	0	18,000	22,000	18,000	22,000		Depend on
Pigtail length[mm]	2,000/2,000	2,000 ~ 50,000	50,000~100,000				Special length (< 100,000)
Additional ratio	0	5,000	10,000				Depend on
Delivery time	~ 4 weeks	< 3 week	< 2 week				Special delivery
Additional ratio	0	+ 10 %	+ 20%				Depend on
Array type	2~5	6~10	11~20	21~50			Special spacing
Additional ratio	+ 10 %	+ 20%	+ 30%	+ 40%			Depend on

그림 4.1 1차년도 사업과제에서 도출된 광섬유센서 제작 단가 협의 결과, 2009년

3월>

No. SJP-QUT-0097-3-09

QUOTATION

SJ Photonics

수 신 : 전남대학교 여수캠퍼스
참 조 : 김현우 박사님
Tel :010-9877-6905 /e-mail :khw8113@nate.com
작 성 일 : 2009년 12 월 31 일
유효기간 : 2주

사업자 등록 번호 : 409-86-06938			
상 호	㈜에스제이포토닉스	대 표 자	백세종
주 소	광주광역시 북구 용봉동 300 전남대학교 산학협력관 204호		
전 화	062-530-0772	팩 스	062-530-0773
E-mail	sales@sjphotonics.com		

합 계 금 액: 일금 사백일십오만팔백오십 원정 (VAT포함)

No	품 명	규 격	수량	납기	단 가	금 액
1	FBG(#1) Array type	*Central wavelength:1511/1517/1523/1529/1535/1541/1547/1553/1559 ±0.3 [nm]*Bandwidth: 0.2~0.3 [nm]*Reflectivity: >10 [dB]*Recoating: Acrylate*Pigtail: 44.2 [m] / 첨부파일 참조	1	3주	754,700	754,700
2	FBG(#2) Array type	*Centralwavelength: 1512/1518/1524/1530/1536/1542/1548/1554/1560 ±0.3 [nm] * 이하스펙 상동	1	3주	754,700	754,700
2	FBG(#3) Array type	*Centralwavelength: 1513/1519/1525/1531/1537/1543/1549/1555/1561 ±0.3 [nm] * 이하스펙 상동	1	4주	754,700	754,700
2	FBG(#4) Array type	*Centralwavelength: 1514/1520/1526/1532/1538/1544/1550/1556/1562 ±0.3 [nm] * 이하스펙 상동	1	5주	754,700	754,700
2	FBG(#5) Array type	*Centralwavelength: 1515/1521/1527/1533/1539/1545/1551/1557/1563 ±0.3 [nm] * 이하스펙 상동	1	6주	754,700	754,700
					공 급 금 액	3,773,500
					부 가 세 액	377,350
					합 계 금 액	4,150,850

상기와 같이 견적합니다.

담 당	김 훈
승인	백 세 종

은행계좌 : 100-025-028180 (신한은행)
예 금 주 : 에스제이포토닉스 ㈜ 백세종

그림 4.2 FBG 센서 견적 내역

견 적 서

No.

2008년 09월 26일 전남대학교산학협력단 귀하 담당: 남계춘 아래와 같이 견적 합니다.	공급자	등록번호	409-15-88584		
		상 호	온빛테크	대표성명	황정섭
		사업장주소	광주 북구 일곡동 894-5		
		업 태	도소매,제조업,서비스	종 목	광응용기기 및 부품,발
		전화번호	011-644-7736		

합 계 금 액 (공급가액 + 세액)	一金 삼십삼만원	(₩330,000)

품 명	규 격	수 량	단 가	금 액	비 고
광섬유 다중격자센서제작	의뢰서	2	150,000	300,000	
공급 가액				₩300,000	
부 가 세				₩30,000	
합 계				₩330,000	
비 고					

그림 4.3 본 과제의 기획단계에서 조사된 FBG 광섬유센서 제작 단가, 2008년 9월

○ Seamless type 중공튜브 생산 단가 절감(풍성정밀관과의 협상 결과)

- 스마트 텐던에 사용할 수 있는 고강도 강관을 sealess type의 중공튜브로 이용하기 위한 제작 전문 업체 조사 및 연락을 하였으나, 대부분 배관용 파이프를 생산하거나, 구조물의 긴장재로 사용할 수 있는 고강도 강연선에 대한 생산은 불가능하다는 답변을 받음

- 2009년 3월 3일 풍성정밀관(경상남도 김해시)과의 업무 협의를 통하여 답변을 받은 결과 고강도 강관의 생산이 가능하다는 답변을 받음

- 중공 튜브와 PS강선의 재료적 특성 및 품질차이가 최소화 될 수 있도록 재료물성을 조사, 검토

- 그러나, 초기 견적에서는 11m 기준으로 개당 427,500원(부가세 별도)와 20m 기준으로 개당 1,100,000원(부가세 별도)의 생산 단가를 제시 받음 (견적서 첨부)

- 위 금액으로는 스마트 텐던 사업 자체를 진행할 수 없는 수준

- 따라서, 본 과제 수행팀은 여러 가지 아이디어를 제공하고 생산 방식에 대한 협의 및 생산량을 조절하여, 2009년 4월 19일에 최종 견적으로 34m 길이의 sealess type의 중고튜브를 137,500원의 생산 단가를 제시 받음, 이는 4,044원/m로 기존의 생산단가보다 획기적으로 낮아 스마트 텐던 사업화의 초석을 마련할 수 있었음 (견적서 첨부)

- 향후 스마트 텐던 사업화를 위하여 풍성정밀관 측과 전략적인 제휴를 통하여 대량생산 및 생산량 단계적 조절 방식으로 생산 단가를 낮추기로 합의 함

풍 성 정 밀 관
(Pungsung Precision Tube Co., Ltd.)

경남 김해시 한림면 안하리 2002-6
2002-6 Anha-ri, hallim-myeon, Kimhae-city, Gyeong nam, Korea
Web page : www.pungsung.com
Tel: 82-55-338-8245~7
Fax: 82-55-338-8248
E-mail : jig9633@hanafos.com

^^^

15/04 2009 WED 20:48 FAX 0553388248 pungsung 001/001

풍 성 정 밀 관

Pungsung Precision Tube Co.

경남 김해시 한림면 안하리 2002-6 (2002-6 Anha-ri, hallim-myeon, Kimhae-city, Gyeong nam, Korea)
Tel: +82-55-338-8245~7 Fax: 82-55-338-8248 Web : www.pungsung.com E-mail : jig9633@hanafos.com

Ref. 090184-21 Date 2009.04.15

Consignee : 한국유지관리 Seller : 풍성정밀관
Attention : 윤종구 실장님 The person in charge : 김삼종과장
Subject : 튜브관련 견적의 건

1. 귀사의 일익 번창하심을 앙축드리옵니다.
2. 의뢰하신 건으로 아래와 같이 견적을 제출하오니 확인하시고 회신 부탁드립니다.

Quatation

강종	외경	내경	TYPE	LENGTH	Qty.	kg/PCS	총중량(kg) total weight	단가/본 unit price / pc	총 금액 total price
STKM17종	5.2	2~2.4	재품 열처리	34m이상	200	3.55	530	137,500원	27,500,000

▶ 납기 :
▶ 가격조건 : 공장 상차도, VAT 별도
▶ 결재방식 : 발주시 50%, 출고시 잔금
▶ 견적유효기간 : 견적서 발송일로부터 20일이내
▶ 본 견적서에 명시되지 아니한 사항은 별도 협의

Remark

1)재질 특성상 제품 두께가 두꺼워질 경우 작업성이 현저히 떨어짐으로 부득이 샘플 작업 단가 인상이 불가피합니다, 이점 양해바랍니다.
제품 난이도가 있는 작업인 관계로 가능하시다면 샘플 수량을 유지해 주셨으면 합니다.
2)제품은 일괄적으로 34m이상 최장기장으로 진행할 예정이며 5월초순에 초두물량이 입고 ' 수 있도록 최선을 다하겠습니다.
3)기타 문의사항있으시면 언제라도 연락바랍니다.

풍성정밀관

그림 4.5 중공튜브 견적 내역(한국유지관리 수신)

나. 타 산업에 미치는 효과

본 과제에서 제시한 광섬유격자센서 기반 스마트 텐던 기술의 상용화를 통해 교량을 비롯한 대부분의 건축물 및 구조물에 사용할 수 있을 것으로 예상됨에 따라 타 산업에 다음과 같은 효과를 미칠 것으로 예상된다.

(1) 산·학간 연계 활성화를 통해 기초연구의 핵심기술을 이전

(2) 고부가가치 진단기술의 상용화를 촉진, 관련 산업체의 경영수지를 개선

(3) 차세대 사회기반 시설물에 대한 국제경쟁력을 갖춘 보수보강 및 계측이 가능한 안전관리 시스템 확보

(4) 계측기술의 기술선점 및 특허를 통하여 국외 기술의 침투에 대한 대응 및 수출효과

(5) 시공과 동시 매설 계측으로 효율적인 운용관리를 통하여 인건비 절감 효과

(6) 복합구조물의 상시관측에 적용하여 안전사고의 예방

(7) 기술의 사업화시 기술료 및 사후 관리를 통한 경제적 이득

(8) 접촉식 계측 시 발생할 수 있는 인재 및 산재 사고를 예방하여 보상 및 보험료 사회간접 비용 절감

(9) 광센서 기술의 기업이전으로 인한 산업분야에의 파급효과 기대

(10) 토목 연구 인력의 양성

(11) 광기술 및 부재와 광센서의 일체화 기술을 타 응용범위에도 확대 적용가능

(12) 스마트 거더, 스마트 앵커 등 기존 제품과의 융합을 통한 신규 제품 개발로 토목설계 및 시공, 계측분야 산업의 활성화에 기여.

(13) 대학이나 연구소에서 보유하고 있는 기술을 이전받아 당해 과제를 통한 사업화 성공은 세계적인 경기 불황 속에서도 중소기업의 경쟁력 및 안전성을 강화시켜 중소기업의 활성화시키고 이를 바탕으로 대기업 중심의 산업구조 개선에 기

여.

(14) 당해 과제의 성공적인 사업화 사례를 바탕으로 산학연간의 기술이전 및 교류가 활발해질 수 있으며 산업 전반에 걸쳐 활력소가 될 수 있을 것으로 기대됨.

제5장 연구개발결과의 활용계획

1. 연구결과의 활용방안

가. 현장적용 방안

(1) 최근 국내의 경우 “급경사지 재해 예방에 관한 법률”에 제정되어 시행되고 있어, 지방자치단체장이 위험하다고 판단되는 급경사지에 대하여 의무적으로 모니터링을 수행해야 한다. 스마트텐던을 이용한 어스앵커는 자가 진단이 가능한 보강재로 활용할 수 있어 사면 보강재 시장으로 진출이 용이할 것으로 판단된다.

(2) 또한, 교량용 보수보강재로 현장에 적용하여 실적을 확보하면서 기존 거더 및 앵커 제작, 시공업체와의 전략적 제휴를 통해 신규제품에 적용할 계획이며, 지방자치단체나 한국건설기술연구원, 국립방재연구소 등의 수요기관들과 협력하여 시장의 요구사항을 만족시킬 수 있도록 중장기 성능검증을 수행하여, 시설물 모니터링 시장에 진입할 예정이다.

(3) 스마트 텐던 제품의 경우 Test bed 구축 등에는 현실적인 어려움이 있으므로 1차적으론 교량용 보수보강재로 현장에 적용하여 실적을 확보하면서 기존 거더 및 앵커 제작, 시공업체와의 전략적 제휴를 통해 신규제품에 적용할 계획이다.

(4) 지방자치단체나 한국건설기술연구원 등의 기관을 통해 Test bed 구축을 통한 현장 적용 방안 강구 한다.

나. 실용화·제품화 방안

(1) 스마트 텐던을 시설물의 모니터링에 활용하기 위하여 우선 가격 경쟁력을 갖추어야 한다. 본 연구를 통하여 스마트 텐던의 제작원가를 대폭 절감할 수 있었으나, 향후 추가적인 기술 개발 및 대량 생산기술 개발을 통하여 추가적인 원가절감 방안을 마련할 계획이다. 또한, FBG센서의 자체 생산과 중공 킹케이블 생산의 다각화 등을 통하여 안정적인 원재료 공급선 확보에 주력할 예정이다.

(2) 광섬유 센서를 이용한 구조물 계측용역 및 모니터링 시스템 구축 사업 분야를 확장하여 광섬유 복합 강연선(Smart Tendon) 기술을 사업화하고 모니터링 시스템을 옵션으로 제공하는 방식으로 사업화 추진 중에 있다.

(3) 스마트 텐던의 이상적인 사업화 모델로 설정한 기존 업체와의 전략적 제휴

방안을 모색하고 기존 PSC 교량용 거더(PSC I 거더 등)와 스마트 텐던을 결합한 스마트 거더, 기존 어스앵커와 스마트 텐던을 결합한 스마트 앵커 등의 신제품을 추가적으로 개발하여 제품화할 예정이다.

(4) 광섬유 센서를 이용한 구조물 계측용역 및 모니터링 시스템 구축 사업 분야를 확장하여 광섬유 복합 강연선(Smart Tendon) 기술을 사업화하고 모니터링 시스템을 옵션으로 제공하는 방식으로 사업화를 추진한다.

다. 기타 활용방안

(1) 시설물 안전관리 기술분야의 고도화 추진 및 국가경쟁력 향상을 위한 기술집약적 고부가가치 산업 분야로의 진출에 토대로 활용한다.

(2) 기술보유기관인 전남대학교 산학협력단 및 한국과학기술원으로부터 기술이전 및 실시계약 체결할 계획이다.

(3) 기존 PSC I 거더, IPC 거더 등 거더 제작업체, 어스앵커 제작 업체 및 시공업체와의 전략적 제휴 및 기술실시 계약을 체결하고 제품을 공급할 예정이다.

2. 연구 성과의 기업 활용방안

가. 참여기업 역할

(1) 한국유지관리(주)

- 기존 광섬유 센서를 이용한 구조물 모니터링 기술을 적용하여 보수보강과 동시에 구조물 안전도를 모니터링할 수 있는 스마트 텐던을 우선적으로 보수보강재로 상품화하여 매출 다각화

- 참여기업인 주식회사 삼우기초기술과 연계하여 앵커분야로 스마트 텐던을 적용하여 고부가가치 실현

- 본 과제의 연구 성과물로 예상되는 스마트 앵커를 기반으로 하여 기존 거더 업체와의 협력을 통해 거더 분야로의 시장 확장을 위한 스마트 거더 신규 상품 개발 및 상품화

- 해상 시설물을 고정하기 위한 Mooring Cable의 경우 바닷물의 염분에 의해 녹이 슬면서 파손되고 풍랑에 끊어지는 경우가 많아 고가의 해상 시설물의

안전한 관리를 위해 케이블 상태를 모니터링하기 위한 기술이 필요한 데, 스마트 텐던의 신규시장으로 해상시설물용 케이블로 활용할 계획임.

(2) (주)삼우기초기술

- 당해 과제의 성과물인 스마트 텐던을 적용한 앵커 기술을 이용하여 NET 및 NEP 등의 인증을 획득하여 매출 극대화에 기여

- 스마트 텐던에서 계측된 데이터를 분석하여 의사결정을 도울 수 있는 지표를 설정

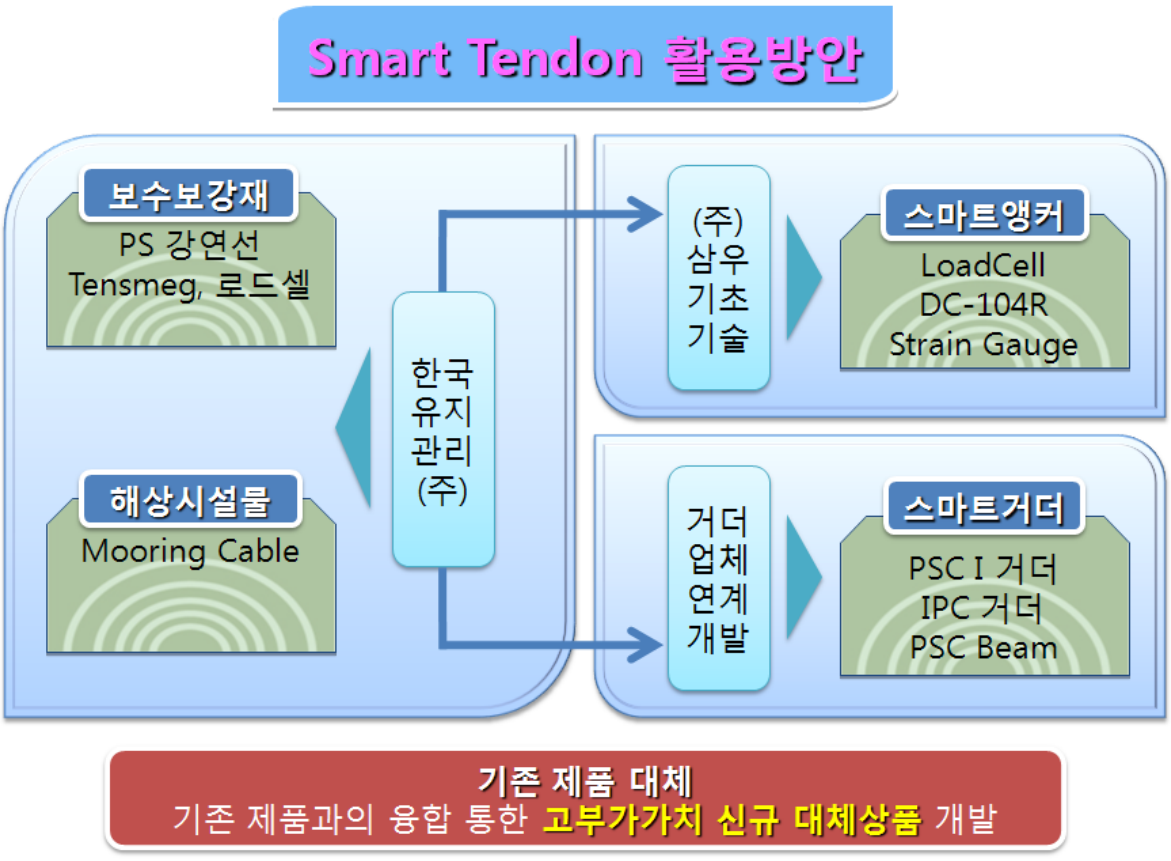


그림 5.1 연구성과물의 참여기업 활용방안

나. 참여기업의 현황분석

(1) 한국유지관리(주)

(가) 일반현황

표 5.1 한국유지관리 일반 현황

업체명	한국유지관리(주)					
대표자	최준성					
설립일자	2003년 01월 16일		종업원수	29 명		
법인등록번호 (사업자등록번호)	110111-2696833 (113-81-81967)					
본사	서울시 구로구 구로5동 103-7 혜림빌딩 3층					
개발부서	서울시 구로구 구로5동 103-7 혜림빌딩 5층					
공장현황	용도지역	상업	대지	169㎡	공장	153㎡
주 생산품	무선계측기, 산업시설물유지보수관리, 설계 및 컨설팅			매출액		3,562백만원

(나) 경영상태 (결산재무제표 기준)

표 5.2 경영상태

구 분	내 용
자본금	250백만원
자기자본비율 (부채+자본계-부채계)/총자본*100	35.9%
매출액증가율 (당기-전기/전기)*100	29.2%
유동비율 (유동자산/유동부채*100	168.8%
차입금의존도 (장단기+유동성장기+사채)/총자본*100	49.8%
총자본순이익율 (당기순이익/총자본)*100	15.3%
수출액	0
R&D투자금액	1,043백만원
품질인증/규격획득 (ISO, KS, JIS, UL, QS, GQ, Q, IT, ERP, PL, 형식승인, KT, NT, EM 등)	ISO, MIC형식승인
산업 및 지적재산권 등록현황 (등록일)	특허 23건, 프로그램 등록 3건 (별첨 1 참조)

(다) 국가 및 공공기관 연구개발사업 참여 실적 (최근 3년간)

표 5.3 국가 및 공공기관 연구개발사업 참여 실적

주관부처	사 업 명	연도	주관, 참여	개발과제명	수행결과 (성공/실패) (참여제한)
건설교통부	산학연 공동연구 개발사업	2003 ~2006	참여	교량의 건전성 평가를 위한 IT기반 스마트 계측 및 모니터링 시스템의 개발	성공
산업자원부	공통핵심기술 개발사업	2005 ~2007	주관	스마트 프리캐스트 콘크리트 패널 및 이를 이용한 한국형 조립식 포장공법의 개발에 관한 연구	성공
중소기업청	중소기업혁신 기술개발사업	2006 ~2007	주관	Traffic monitoring을 위한 In-pavement FBG 센서시스템 개발	성공
건설교통부	첨단융합건설 기술개발사업	2005 ~2008	참여	웹기반 실시간 통합 모니터링 프로그램 개발	진행중
건설교통부	도시재생사업	2007 ~2008	참여	최적 모니터링 시스템 구축 기법 개발	진행중
건설교통부	건설기술 혁신사업	2006 ~2008	참여	광섬유센서를 활용한 교량부재계측기술개발	진행중
건설교통부	미래철도기술 개발사업	2007 ~2009	참여	실시간 궤도이상개소 평가시스템의 시작품 개발	진행중
중소기업청	중소기업기술 혁신개발사업	2004 ~2005	주관	폴리에스터를 이용한 노후 콘크리트 포장의 덧씌우기 재료 개발	성공
한국도로공사	중소기업기술 개발지원사업	2006 ~2007	참여	고속도로 급속보수 현장적용을 위한 폴리에스터 콘크리트의 개발	성공
건설교통부	건설기술 혁신사업	2006~2009	참여	U-중차량 무인 과적 단속 시스템	진행중

(2) (주)삼우기초기술

(가) 일반현황

표 5.4 삼우기초기술 일반현황

업체명	(주)삼우기초기술		
대표자	김정열		
설립일자	1993년 10월 22일	종업원수	45 명
법인등록번호 (사업자등록번호)	110111-1162661 (107-81-50625)		
본사	서울 영등포구 양평동4가 241번지 삼우빌딩 4층		
개발부서	서울 영등포구 양평동4가 241번지 삼우빌딩 4층		
공장현황	경기도 김포시 통진읍 귀전리 641-1		
주 생산품	그라운드 앵커체	매출액	16,195백만원

(나) 경영상태 (결산재무제표 기준)

표 5.5 경영상태

구 분	내 용
자본금	350백만원
자기자본비율 (부채+자본계-부채계)/총자본*100	2.6
매출액증가율 (당기-전기/전기)*100	20.63%
유동비율 (유동자산/유동부채*100	134.72%
차입금의존도 (장단기+유동성장기+사채)/총자본*100	46.73%
총자본순이익율 (당기순이익/총자본)*100	4.50%
수출액	533백만원
R&D투자금액	1,133백만원
품질인증/규격획득 (ISO, KS, JIS, UL, QS, GQ, Q, IT, ERP, PL, 형식승인, KT, NT, EM 등)	ISO9001
산업 및 지적재산권 등록현황 (등록일)	특허 11건

(다) 기술보유 현황

표 5.6 기술보유 현황

기술의 명칭	특허등록번호
그라운드의 앵커용 정착제	10-296881
그라운드 앵커용 피복호스 조립장치 및 방법	10-296884
영구 그라운드 앵커용 앵커체	10-336474
인장재 제거형 그라운드앵커용 내부 정착제	10-411567
소일네일링 공법용 제거형 네일장치	10-484021
인장재 정착 및 제거혀 그라운드앵커	10-412035
그라운드앵커의 피복인장재 제조기용 강연선 가이드와 강연선 삽입 안내장치	10-524555
인장재 제거형 그라운드 앵커의 내부 정착체용 후크	10-641314
그라운드 앵커용 피복인장재 제조기의 튜부공급장치	10-641315
인장재 제거형 그라운드앵커용 내부 정착제	10-435069
인장재 제거형 그라운드앵커용 내부 정착제	10-435070

다. 기관 연계방안

(1) 연구기관과의 연계방안

표 5.7 연구기관의 연계방안

번호	기업명	과제에 대한 기업 관심영역	연계방안								
			기업활용	장비활용	교육연계	기술상담	정보제공	기술지도	기술이전	공동연구	창업지원
1	한국유지관리(주)	o 스마트 텐던 제작 o 원가절감 및 최적화된 공정 기술 o 교량 및 앵커 적용 기술 o 데이터 분석 기술 및 원격 모니터링 시스템 o 모니터링 S/W	V				V	V	V	V	
2	(주)삼우기초기술	o 스마트 텐던의 앵커 적용기술 o 데이터 분석 기술 및 원격 모니터링 시스템 o 모니터링 S/W	V	V			V	V		V	
합계			V	V			V	V	V	V	

(2) 정부 정책과의 연계 방안

○ 당해 기술의 성공적인 사업화를 통해 제품 출시 후에 세일즈를 통한 영업은 기업의 리스크를 증대시킬 것으로 예상되므로 당사의 경우 과제 수행기간을 비롯해 사업화 진행 중에 사전 홍보를 통해 제품의 필요성을 관련 담당자들에게 인식시켜나갈 예정임.

○ 당해 스마트 거더 및 스마트 앵커 제품은 설계 과정에서 사용여부가 반영되고 이를 토대로 토목 건설 현장에서 사용되기 때문에 법, 제도의 제정 및 개정을 통해 스마트 텐던 기술을 적용한 스마트 거더 및 스마트 앵커 사용을 의무화함.

○ NET, NEP인증을 확보하고 설계 및 시공업체와의 전략적 제휴를 통해 제품을 사용할 수 있도록 적극적으로 홍보함.

○ 당사 회장님으로 계시면서 소방방재분야 등의 사업기획 및 영업을 담당하시는 소방방재청 초대 청장으로 근무하셨던 권 오 전청장님을 통한 정부 및 관련 공공기관과의 협조방안 검토 및 제품 홍보하고, 시범사업을 추진하여 제품의 사용 실적을 확보하고자 함.

(3) 관련 후속연구개발의 전망

○ 당해과제를 통해 사업화 예정인 스마트 텐던의 PSC Beam 및 거더, 어스앵커와의 융합 과정에서 파생되는 추가 기술을 개발하고 현장 적용 실험 및 시범사업등의 추진을 통한 성능 검증 연구를 수행할 예정임.
○ 등부표, 기상관측용 부이 등 수억원에 이르는 고가의 해상시설물을 고정하는데 사용하는 Mooring Cable은 바닷물 속에 오래도록 존재하여 녹이 슬기도 하고 태풍이나 해일 등에 의해 부이가 심하게 요동치는 과정에서 끊어지기도 하는데, 이를 모니터링 할 수 있는 스마트 텐던의 적용 기술을 개발하여 시장을 확장함.
○ 스마트 텐던의 생산 공정을 자동화 할 수 있는 생산 장비에 대한 연구개발을 수행하여 생산성을 향상시키고 원가 절감을 통한 가격경쟁력을 확보할 수 있도록 공정기술에 대한 추가적인 연구를 수행할 예정임.

3. 스마트텐던의 사업화

가. 사업 개요 및 필요성

PS 강연선 또는 텐던은 아래 그림과 같이 현재 토목 및 건축 구조물에 다양한 형태로 긴장재로 많이 적용되고 있다. 그러나 PS 강연선 또는 PS 텐던의 사용이 증가함에 따라 이를 사용한 PSC 교량 및 지반보강용 앵커의 손상과 붕괴사고도 증가하는 것으로 파악되고 있다. 아래 사례에서 미국과 중국의 사례로서 교량에 사용되는 PS 강연선의 유지관리 필요성을 알 수 있으며, 최근 국내의 지반굴착공사시 붕괴 사례로서 지반보강용 앵커의 관리기술 도입이 시급함을 알 수 있다.



(a) 경기장의 스탠드 및 바닥 보강



(b) 원자력 발전소 돔(dome) 보강



(c) 사장교 케이블



(d) PC 합성 거더교



(e) 사면안정 앵커

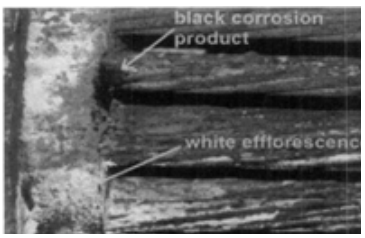


(f) 굴착시 흙막이벽 앵커

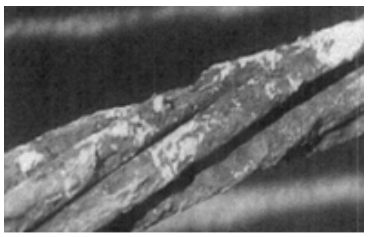
그림 5.2 PS 강연선 또는 텐던의 적용 분야



(a) 중국 텐퐝타이 교량붕괴, 2004



(b) 심각한 패임 부식



(c) 심각한 국부 부식

그림 5.3 PS 텐던을 사용한 교량의 손상 또는 붕괴 사례



(a) 여의도 국제금융센터 신축공사현장



(b) 경의선 가좌역 건설현장



(c) 부산 제2롯데월드 건설현장



(d) 경기도 동탄 오피스텔 신축공사현장

그림 5.4 흙막이 공사현장 붕괴사례

나. 사업화 위험요소(Risk) 분석

현재 스마트텐던의 사업화 과정에서 발생할 수 있는 위험요인에 대한 분석을 수행하면서 사업화에 영향을 미칠 수 있는 위험요인을 설정하였고 이를 사전 파악하고 제거한다.

표 5.8 위험요인과 제거 및 저감 방법

위험요인	제거 및 저감 방법
1. 경쟁 상품에 대한 가격 경쟁력 확보	• 광섬유센서 제작 원가 절감 - FBG 광섬유센서를 전문적으로 생산하는 전략적인 제휴를 통하여 광섬유센서 생산 단가를 낮춤 - Phase Mask 방법을 이용한 대량생산 - 1차년도에 수행하였던 제조 원가 절감 수준에서 추가적인 제조 원감 절감 달성 • 중공튜브 생산 원가 절감 - 현재 5천원/m 수준에서 추가적인 원가 절감 달성 • 생산 인력의 숙련도 높여 불량률 최소화 • 공정 자동화 통한 생산단가 낮춤
2. 현장 적용시험 안됨	• 현장에서 사용되는 것과 동일한 시험체 (PSC I 거더 및 어스앵커 등) 제작 및 실험 - 1차년도 연구과제를 통해 기반기술 확보 - 2차년도에서 실규모 시험을 통하여 현장 시공 및 성능검증 수행 예정
3. 기초기술의 성능검증 부족	• 공인기관 통한 성능시험 수행 - 2차년도에서 실규모 시험을 통하여 현장 시공 및 성능검증 수행 예정
4. 유사 경쟁기술과의 차별성 부족	• 통합 S/W 및 UI 개발로 사용자 편의성 증대 • 시공기술 개발 통한 설치 용이성 확보 • 가격 경쟁력 확보 • NET, NEP 인증 통한 제품 우수성 입증
5. 업종전환 및 사업 확장에 따른 위험	• 업종전환 및 사업 확장에 따른 위험도를 줄이기 위한 최적 BM 개발 - 전문 생산업체와 전략적 제휴를 통해 사업초기 단계 위험 회피 - 스마트거더 및 스마트앵커는 기존 업체와 제휴 통해 사업 및 시장 확장
6. 시설 등에 대한 초기 투자 규모 큼	• 전문기업과의 전략적 제휴 추진 - FBG 광섬유센서 전문 생산업체와 전략적 제휴 추진 - 사업화 단계별로 분할 투자 방안 모색

다. 추가 기술개발 로드맵(TRM) 작성

(1) 기술적 목표

(가) 시장니즈와 핵심요구기능(Critical System Requirement)

스마트텐던 기술의 사업화와 관련된 보수보강재 관련 시장의 대표적인 요구사항은 다음과 같다.

① 노후 시설물에 대한 보수보강 및 계측이 동시에 가능한 스마트 보수보강재
- 노후 시설물에 대한 보수보강과 동시에 계측이 가능한 스마트 보수보강재를 위해서는 기존 또는 새로운 보수보강재와 계측 센서와의 결합이 필요하며 당사에서 사업화 하고자 하는 스마트텐던을 보수보강재로 활용하기 위한 기술 개발의 필요성이 절실한 실정.

② 시스템의 제조 및 시공단가 인하
-구조물 안전성 모니터링 시스템의 제조 및 시공단가 인하를 위해서는 원가절감 기술 및 제조 공정의 최적화에 대한 연구가 필요함.

③ 장기 모니터링 위한 솔루션 제공
-구조물의 평균수명이 장기화됨에 따른 계측 시스템의 장기 모니터링은 필수불가결하며 이를 위해서는 광섬유 센서를 사용하는 스마트텐던의 내구성 향상 및 확보가 요구됨.

④ 긴장재 상태 파악 기능
-모니터링 시스템 및 보수보강재의 자가진단 기능에 대한 니즈가 증대됨에 따라 긴장재 상태 파악이 필요하며 이를 위해서는 스마트텐던의 보수보강재로의 활용 및 통합 소프트웨어 개발이 요구됨.

표 5.9 시장니즈별 핵심요구기능

시장니즈	핵심요구기능
스마트 보수보강재	•스마트텐던의 보강재 활용기술 개발
제조 및 시공 단가 인하	•스마트텐던의 원가 절감
	•스마트텐던의 공정 최적화
장기 모니터링	•센서의 내구성 확보
	•교량 및 앵커 적용 기술 개발
긴장재 상태 파악	•스마트텐던의 보강재 활용기술 개발
	•통합 소프트웨어 개발

(2) 핵심요구기능별 주요요소기술

- 스마트텐던의 사업화를 위해 시장니즈에 대한 핵심요구기능을 충족시켜야 하며 이를 위해서는 스마트텐던의 원가 절감 기술 및 공정 최적화 기술개발, 내구성 확보를 위한 기술 개발이 필요함.

표 5.10 핵심요구기능별 주요 요소기술

핵심요구기능	주요요소기술
스마트텐던의 원가 절감	• 스마트텐던의 원가 절감 기술 및 공정 개발
스마트텐던의 공정 최적화	• 스마트텐던의 최적화된 공정기술 개발
센서의 내구성 확보	• 스마트텐던의 내구성 확보 기술 개발
교량 및 앵커 적용 기술 개발	• 스마트텐던의 교량 활용을 위한 적용기술 개발
	• 스마트텐던의 지반 구조물로의 활용 위한 적용기술 개발
스마트텐던의 보강재로 활용	• 스마트텐던의 교량 보강재 활용기술 개발
통합 소프트웨어 개발	• 스마트텐던의 활용한 장력 모니터링 통합 SW 개발

- 스마트텐던의 보수보강재로 활용하기 위한 추가 기술 개발과 더불어 교량 및 지반 구조물로의 활용을 위한 적용기술에 대한 연구개발이 필요하며 최종적으로 계측 데이터를 분석하고 원격으로 모니터링하기 위한 통합 모니터링 프로그램의 개발이 필요함.

라. 단계적 기술개발 계획

스마트텐던의 실용화를 위해서는 FBG 광섬유 센서 대량생산을 위한 설비 구축과 중공 강재 튜브의 원가절감 방안이 필수적으로 이루어져야 한다.

스마트텐던의 교량, 지반구조물, 교량 보강재 활용을 위해서는 기술 검증이 필수적이다. 한국도로공사의 PSC I거더교의 최적설계 및 표준화 연구에서 제시하는 중저가형 및 최저형고형의 최적단면으로 프리캐스트 I 거더(PSCI거더) 길이 20m~30m의 실험체를 제작하여 기술 검증이 이루어져야 하며, 지반구조물의 적용은 스마트앵커 구조체를 개발 지반보강용 앵커에 적용하여 기술 검증이 이루어져야 한다. 교량 보강재는 교량의 거더 및 교각의 외부에 적용 가능한 구조체를 개발하고 기존의 교량의 보강공사에 적용함으로서 기술 검증이 이루어져야 한다.

스마트텐던을 활용한 장력 모니터링 통합 SW 시스템 기본적으로 동적 측정이 가능하여야 하며 하나의 시스템으로 언제 어디서나 실시간 모니터링 가능한 시스템이 필요하다.

단계적 주요 요소기술별 성능목표는 다음과 같다.

표 5.11 1단계 주요 요소기술별 성능목표

주요요소기술	종류	기술목표	수행기관
스마트텐던의 원가 절감 기술 개발	FBG센서 대량생산	• Phase Mask 이용한 FBG센서 제작 • FBG 제작용 고가장비 보유한 전문기업과 전략적 제휴 추진(구두 협의) • 대량 구매를 통한 원가절감 방안	한국유지관리
스마트텐던의 최적 공정 개발	중공튜브 연속공정 개발	• 강재 튜브의 스플라이스 기술 개발 • 광섬유 센서와 중공튜브 접합 공정 개발	전남대
		• 중공튜브 원가절감 방안	한국유지관리
스마트텐던의 내구성 확보 기술 개발	내구성 확보 위한 공정개발	• 광섬유 센서의 내구성 확보를 위한 공정 개발	한국유지관리
스마트텐던의 교량 활용을 위한 적용 기술개발	스마트텐던 제작 및 검증실험	• 스마트텐던 제작 시스템 구축 • 30m 스마트텐던 제작	전남대
스마트텐던의 지반 구조물로의 활용을 위한 적용기술 개발	– 스마트앵커 설계 – 스마트앵커 제작 및 검증실험	• 인장형 스마트앵커 제작 • 스마트앵커 현장 검증 및 실험	한국유지관리

표 5.12 2단계 주요 요소기술별 성능목표

주요요소기술	종류	기술목표	수행기관
스마트텐던의 최적 공정 개발	중공튜브 연속공정 개발	• 강재 튜브의 스플라이스 기술 개발 • 광섬유 센서와 중공튜브 접합 공정 개발	전남대
		• 중공튜브 원가 추가 절감 방안	한국유지관리
스마트텐던의 내구성 확보 기술 개발	내구성 확보 위한 공정개발	• 열경화 방법을 적용하여 레진을 이용한 광섬유 센서와 중공튜브 접합기술 개발	한국유지관리
스마트텐던의 교량 활용을 위한 적용 기술개발	스마트거더 제작 및 검증실험	• 20~30m 스마트거더 시험체 제작 • 20~30m 스마트거더 구조실험	한국유지관리
		• 거더 시험결과 분석	전남대
스마트텐던의 지반 구조물로의 활용을 위한 적용기술 개발	- 스마트앵커 설계 - 스마트앵커 제작 및 검증실험	• 압축형 스마트앵커 제작 • 스마트앵커 현장 검증 및 실험	전남대
스마트텐던의 교량 보강재 활용기술 개발	- 스마트 외장보강재 설계 - 스마트 외장보강재 제작 및 검증시험	• 온도보정이 가능한 스마트텐던 제작기술 고도화	전남대
		• 스마트 보강재 시험적용 및 기술검증	한국유지관리
스마트텐던의 활용한 장력 모니터링 통합 SW개발	- 교량 통합 SW개발 - 앵커 통합 SW개발	• 교량 모니터링 Dynamic SW 개발 • 앵커 모니터링 Dynamic SW 개발 • 통합 실시간 모니터링 시스템구축	한국유지관리

또한 스마트텐던 주요 기술개발 로드맵(TRM)은 다음과 같다.



그림 5.5 1단계 주요 기술개발 로드맵(TRM)



그림 5.6 2단계 주요 기술개발 로드맵(TRM)

4. 스마트 텐던 제품소개

가. 인장형 스마트앵커

인장형 앵커는 선단부에 강선과 그라우트를 부착시킨 정착장과 쉬스관을 이용한 그라우트와 정착장의 비정착 구역인 자유장으로 구분되며, 앵커 헤드에 가해진 하중은 정착장을 통해 지반에 인장력으로 작용된다. 따라서 인장형 앵커는 지반과 그라우트의 마찰력과 그라우트와 강연선의 부착력으로 저항력을 발휘하게 된다.

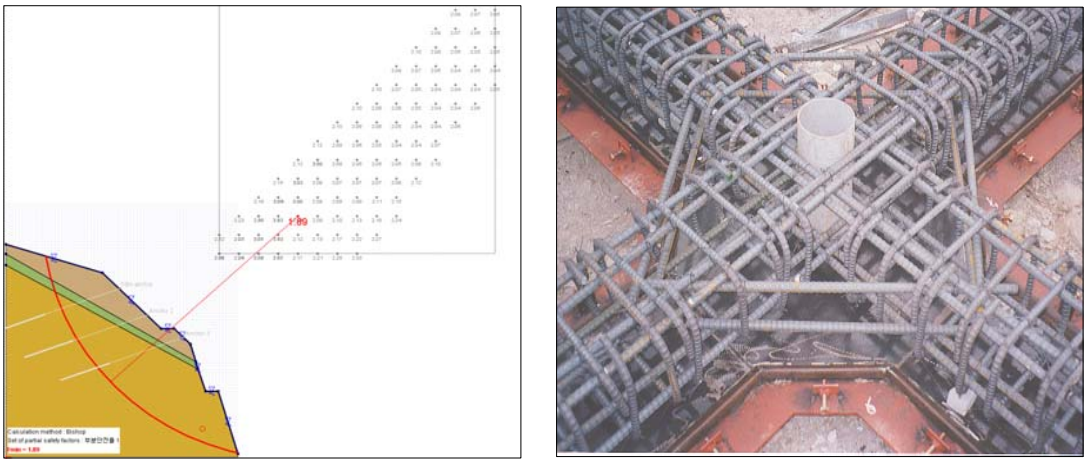
- 장력재하 시 앵커 두부의 로드셀(Load Cell) 및 변위계(LVDT)에서 측정된 하중-변위 관계와 지중 앵커 속에 설치된 FBG센서에서 측정된 하중-변위 관계를 비교
- 2-point FBG센서를 이용한 온도보정
  FBG센서 2개 중 하나는 레진속에 고정되어 변형률과 온도에 의한 영향을 받고, 다른 하나는 열수축 튜브로 보호하여 튜브속에서 고정되지 않은 상태로 온도에 의한 영향만을 고려함으로써 온도보정
- 5-point FBG 센서를 이용한 깊이방향으로의 하중전이 모니터링 및 온도모니터링
- 광섬유 한 라인에 서로 다른 파장 대역의 FBG 센서를 다양한 간격으로 5개소 배치하여, 인장 재하 후 하중의 전이과정을 모티터링하거나 재하하지 않고 매립하여 온도 보정 실시

나. 압축형 스마트 앵커

압축형 앵커는 강선에 쉬스관을 씌워 앵커의 전장이 자유장으로 작용하게 되고 앵커 선단에 강선을 고정하는 선단 재하판을 이용하여 앵커 헤드의 하중이 직접 앵커 선단에서 압축력을 발휘하도록 구성되어 있다. 즉 그라우트의 압축력이 앵커의 저항력에 크게 영향을 미치는 인자가 된다.

- 인발하중에 의해 앵커 두부의 로드셀에서 측정된 하중값과 각각의 강연선에 설치한 FBG(광섬유)센서 및 그라우트체에 설치한 매입형 센서에서 측정된 변형률로 산정한 하중값을 비교하여 하중전이 효과를 비교 검증
- 각각 개별인발과 동시인발을 실시하였을 때 각각의 내하체 근처 4가닥의 강연선에 설치한 FBG(광섬유)센서 및 그라우트체에 설치한 매입형 센서에서 측정된 변형률로 산정한 하중값을 비교 검증
- 강연선에 설치된 FBG(광섬유)센서 및 그라우트체에 설치된 매입형 센서에 의해 하중 집중 및 하중 분산 압축형 앵커의 내하체 간격 및 개소에 따른 하중 분산 효과를 확인

- 2-point FBG센서를 이용한 온도보정
  FBG센서 - 2개 중 하나는 레진속에 고정되어 변형률과 온도에 의한 영향을 받고, 다른 하나는 열수축 튜브로 보호하여 튜브속에서 고정되지 않은 상태로 온도에 의한 영향만을 고려함으로써 온도보정
- 5-point FBG 센서를 이용한 깊이방향으로의 온도모니터링
- 광섬유 한 라인에 서로 다른 파장 대역의 FBG 센서를 다양한 간격으로 5개소 배치하고 재하하지 않고 매립하여 온도 보정 실시



(a) 스마트앵커 설치 예상도　　(b) 현장타설격자블록(십자형)배근도

그림 5.7 스마트텐던 설치 및 격자블록 배근



(a) 강연선 절단



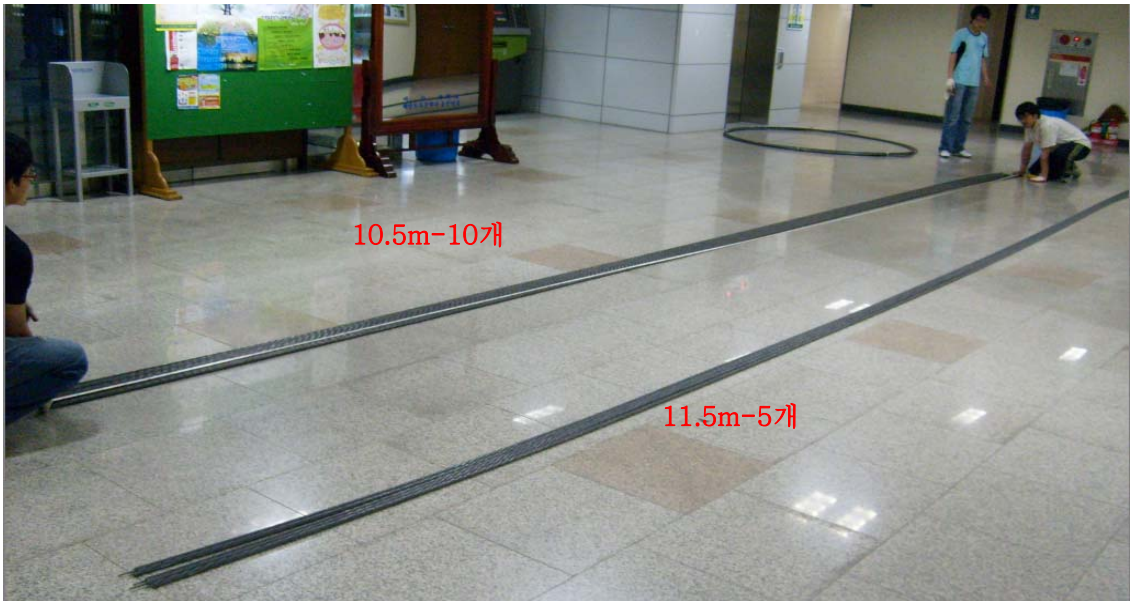
(a) 강연선 절단



(b) 강연선 해체

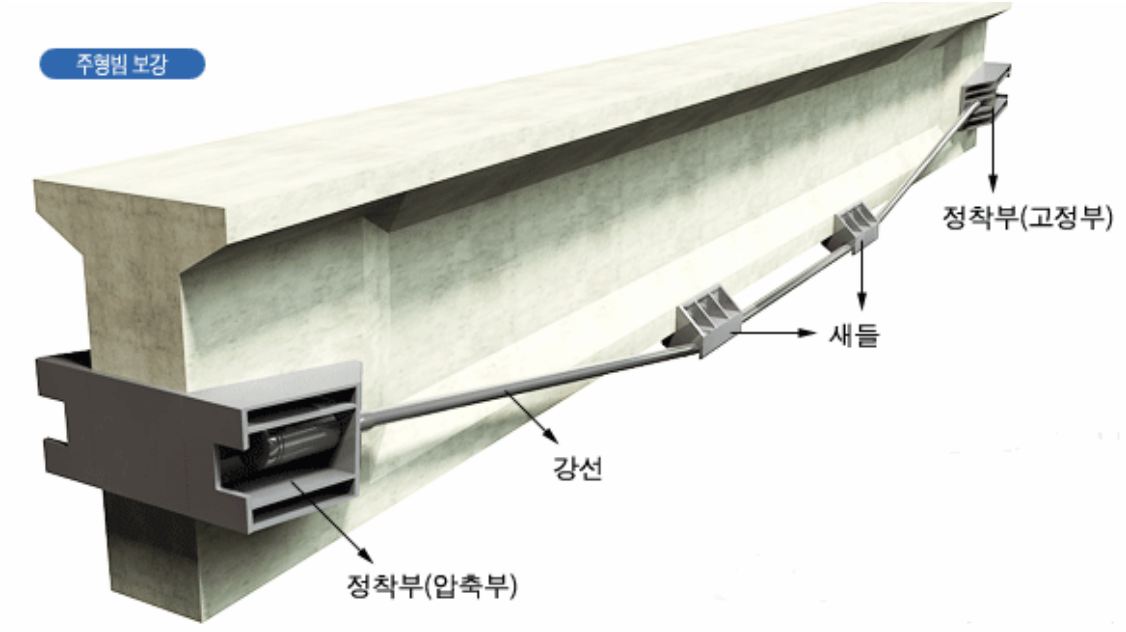


(c) 중공 킹이블 교체



(d) 제작 완료된 스마트앵커

그림 5.8 스마트 앵커 제작 과정



(a) 교량의 외장형 스마트텐던 개념도



(b) 교량의 외장형 스마트텐던 설치 예상도

그림 5.9 스마트텐던의 PSCI거더 적용 예상도

5. 생산계획 및 생산설비

가. 생산계획

현재 스마트텐던의 사업화 과정은 크게 단기적인 사업계획, 중장기적인 사업계획 등 두 단계로 나누어 진행할 계획이다. 단기적인 사업계획(2012년도까지)으로 스마트텐던 사업화를 위한 핵심 기술사업인 FBG 광섬유센서 제작, seamless type의 중공튜브 생산의 경우 외부 전문 기업을 활용할 계획이다. 따라서, 단기적인 사업년도인 2012년도까지는 외부 전문 기업의 생산시설을 활용할 계획이다.

중장기적인 사업으로 2012년 이후 부터는 FBG 광섬유센서 제작부분은 한국유지관리(주)에서 자체적으로 생산할 예정이고, seamless type의 중공튜브는 외부 전문 기업을 활용할 계획이다.

단기 사업계획년도(~2012년)에는 스마트텐던 생산에 필요한 원자재는 외부 전문 기업에 대한 위탁생산을 하기 때문에 부품 재료에 대한 생산 시설은 필요하지 않다. 따라서, 단기 사업계획년도에는 스마트텐던의 조립시설에 대한 투자가 필요하다. 조립시설은 충청북도 증평에 위치한 한국유지관리(주)의 방재연구소에 설치할 계획이며, 공장시설이 이미 확보되어 있어 추가적인 부지 조성에 따른 투자비용은 필요 없다. 그러나, 스마트텐던 조립 및 가공을 위한 시설투자가 이루어져야 한다. 또한, 사업 시작년도인 2010년에는 전문 생산인력 2인이 필요한 것으로 판단되며, 2011년도 이후에는 4명의 전문 생산인력이 필요한 것으로 판단된다.

사업 시작년도인 2010년도에는 시장점유율이 기존 어스앵커의 테스트 앵커를 고려하여 0.5%로 목표를 설정하였다. 조사결과 국내에서 2009년 기준으로 연간 약 70만개의 어스앵커가 생산되고 있는 것으로 나타났다. 교량의 경우 기존 교량 5천개(약 4700여개)에 대하여 각각의 교량이 10개의 PSCI거더가 있다고 가정하였고, 초기 시장 점유율은 0.5%로 가정하였다. 어스앵커의 판매가격은 로드셀과 경쟁력이 있는 수준인 개당 300,000원으로 책정하였고, 교량의 경우 30m의 스마트텐던과 부대비용을 포함하여 개당 1,200,000원에 판매 계획을 수립하였다. 따라서, 단기 사업년도 2012년까지의 예상매출액은 다음과 같다.

표 5.13 스마트 텐던 예상 매출액

년 도	구 분	시장 규모 (개)	점유율 (%)	생산개수 (개)	단가 (천원)	금액 (천원)
2010년	어스앵커	700,000	0.50	3,500	300	1,050,000
	교량	50,000	0.50	250	1,200	300,000
2011년	어스앵커	800,000	1.00	8,000	300	2,400,000
	교량	50,000	1.00	500	1,200	600,000
2012년	어스앵커	850,000	2.00	17,000	300	5,100,000
	교량	50,000	5.00	2,500	1,200	3,000,000

사업 시작년도인 2010년도에는 초기 생산 비용이 발생하고, 2011년 이후에는 이전 사업년도의 수익을 바탕으로 추가 투자 여부를 결정할 예정이므로, 초기 투자 비용은 아래와 같다.

표 5.14 초기 투자 비용 (단위, 억원)

구분	2010년	2011년	2012년
인력투자	0.8	2.0	2.0
생산시설 투자	0.3	0.2	-
출하관리 시스템투자	0.2	-	-
사업 초기 생산 비용	5.0	-	-
합계	6.3	2.2	2.0

사업 시작년도인 2010년도의 초기투자비용은 6.3억원이 소요될 것으로 판단된다. 초기투자비용 6.3억원 중 생산인력 2인의 경우 일시불 지급이 아닌 월급 개념의 급여에 해당한다. 따라서, 사업의 시작 시점에 필요한 자금이 아닌 것으로 판단된다.

생산시설투자 자금 0.3억원과 출하관리를 위한 S/W 개발 비용인 0.2억원의 경우 2010년 사업 시작시기에 투자를 해야 한다.

초기 생산 비용의 경우 매출이 발생하지 않는 시점에서 주문에 의해 생산하기 때문에 투자비용이 마련되어야 한다. 본 사업팀에서는 초기 생산을 1천개로 가정하여 FBG 광섬유센서 제작비용 0.6억, seamless type의 중공튜브 길이 15m 1천개 제작비용 0.75억 등 총 1.35억이 소요될 것으로 판단된다.

따라서, 2010년도 사업의 시작을 위해 총 1.85억의 시설투자, 출하관리 시스템 구축 및 초기 생산 비용이 필요하다.

한국유지관리(주)는 스마트텐던 사업화에 회사 자체 자금을 이용하여 투자를 할 계획이다. 이는 한국유지관리(주)가 회사 설립이후 모든 사업년도에서 흑자를 달성하였기 때문에, 자체 투자할 여력과 계획을 이미 확보하고 있다.

나. 생산인력 및 원부자재 조달

(1) 생산인력 및 인적 인프라 확보

스마트텐던 기술의 사업화를 위해서는 광섬유 센서와 센서의 계측 데이터를 모니터링하고 분석하는 프로그램 개발 등을 위한 IT 분야 전문 연구인력, 적용대상인 교량, 옹벽, 지반 등에 적용하고 계측 데이터를 토목공학 관점에서 물리량으로 분석하고 대응할 수 있는 토목 및 건설환경 분야 전문 연구인력 그리고 현장 설치를 보다 용이하게 하기 위한 지그 및 브라켓, 기타 기구적인 개발을 위한 기계공학 분야의 전문 인력 등을 확보해야 한다.

본 과제의 주관연구기관인 한국유지관리(주)는 R&D인력은 석박사급 위주의 고급연구인력으로 토목/건축, 건설환경, 기계공학, 정보통신(광섬유공학 등), 전기전자제어 등 다양한 분야의 인력을 고루 확보하고 있어 스마트텐던의 사업화를 위한 인적 인프라를 확보하였다.

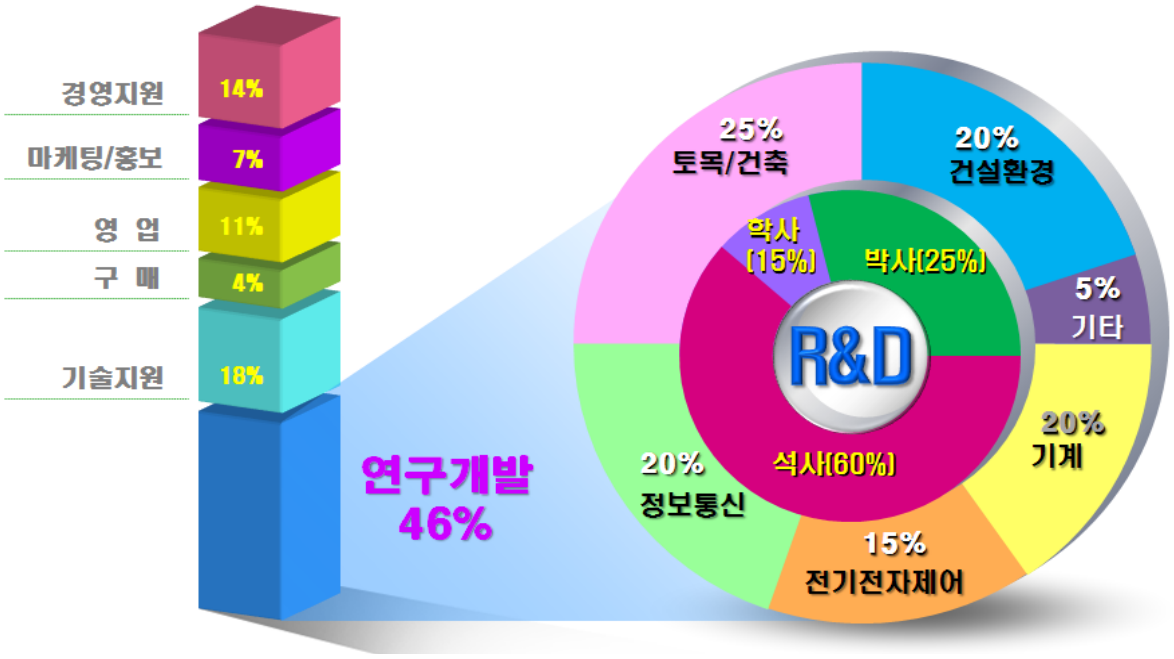


그림 5.10 한국유지관리(주) 인력 현황

(2) 사업 전담조직 구성

시장의 니즈를 파악한 이후에는 사업화를 위한 조직이 필요하다. 즉, 사업부서가 필요하다. 마케팅은 분석된 타겟 고객과 예상 시장 점유율을 위한 영업 방안 등을 수립하는 단계이다. 실제로 이를 매출로 이어지게 하는 행위는 세일즈(영업)이다. 흔히 마케팅과 영업이 같은 것으로 오해할 수 있으나, 마케팅과 세일즈는 전혀 다른 업무이고, 서로 다른 조직이 필요하다.

본 기술이 성공적으로 개발되어 사업화를 위한 제품개발이 완료될 경우, 주관연구기관인 한국유지관리(주)에서는 스마트텐던을 이용한 교량 및 앵커에 적용하는 신규 사업부서를 신설할 계획이다. 교량과 사면의 경우 전문분야가 다르기 때문에 각각 다른 전문가가 필요할 것으로 판단된다. 신규 사업부서는 기존 교량의 보수·보강 및 신규 교량에 적용할 사업팀, 사면에 적용할 어스앵커 제작을 할 수 있는 사업팀과 통합 모니터링 시스템을 구축할 수 있는 전산지원팀을 구성할 계획이다.

사업팀은 기술개발 및 현장 적용성 향상을 위한 연구팀, 스마트텐던 제작을 위한 제작팀, 그리고 현장에서 교량 및 앵커에 시공하는 시공팀으로 구성된다. 연구팀의 경우 협동연구기관인 전남대학교 산학협력단에서 기술개발과 현장 적용성 향상을 위한 연구 및 지원을 꾸준히 수행할 계획이다. 사업팀의 경우 현재 한국유지관리(주)에서 보유하고 있는 인력과 예상 매출 및 매출 성과를 바탕으로 적재적소에 필요 인력을 충원할 방침이다.

한편, 신규 사업을 시작할 때 중요한 요소 중의 하나는 전문가 또는 전문인력을 보유한 기존의 회사와 협업이 중요하다. 협업의 형태는 전문분야에 대한 아웃소싱(위탁 또는 하청), 자문, 협력 및 공동투자, 마지막으로 사업권 이관 후 기술료(로열티)를 징수하는 등 여러 가지가 있다.

전술한바와 같이 협동연구기관과 한국유지관리(주)에서는 기술개발과 사업화를 위한 마케팅을 실시하고, 스마트텐던 제작기술을 확보하여 이를 상용화하는 것이 주요한 역할이다. 그러나 성공적인 시장 진입을 위해서는 business partner와 협력이 잘되어야 한다. 특히, 본 사업의 경우 전술한 바와 같이 기존 시장을 대체하는 대체 기술에 해당하기 때문에, 기존 시장에서 의미있는 시장 점유율을 가지고 있는 기업, 전문기업과 협력하는 것이 최선의 방법이다.

따라서 한국유지관리(주)와 전남대학교 산학협력단에서는 전략적인 방법으로 사업을 추진하고자 한다. 스마트 텐던을 이용한 사업 영역은 어스앵커제작 및 현장시공(스마트앵커), PSC거더 제작 및 현장 시공(스마트거더), 기존 보수·보강 시장(스마트 외장형 보강기술)로 크게 구분할 수 있다. 한국유지관리(주)와 전남대학교 산학협력단에서는 이러한 아웃라인을 바탕으로 전문기업에 아웃소싱 및 전문기업과 협력을 통하여 시장 진입을 위한 시행착오를 최소한으로 줄이고, 시장에서 자리매김할 수 있는 사업화 전략을 추진할 계획이다.

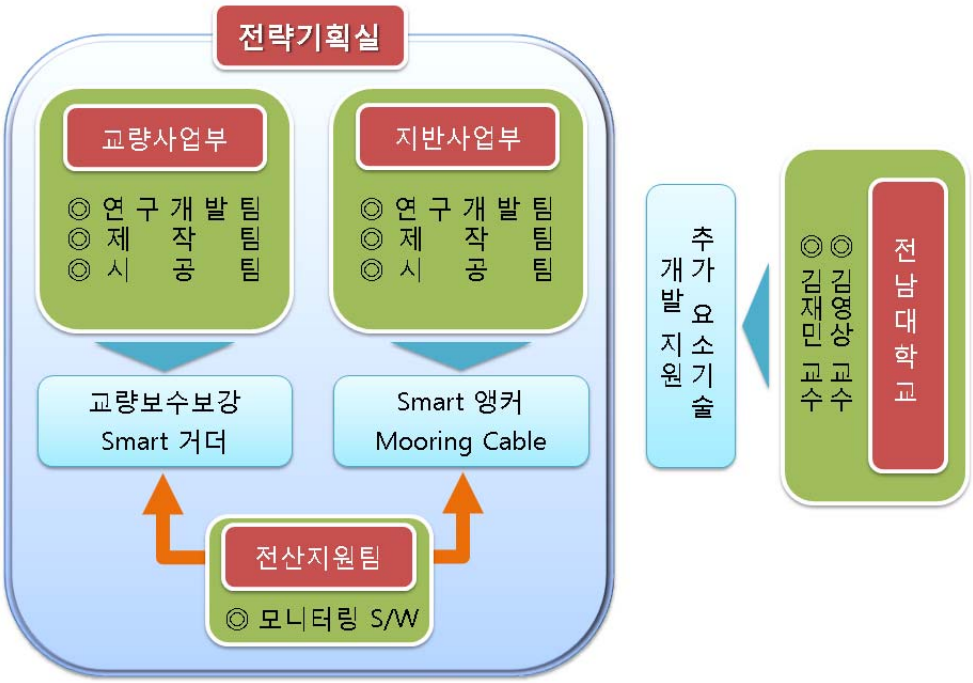


그림 5.11 스마트텐던 사업화를 위한 전담조직

(3) 원부자재 조달 방법 및 확대생산 계획

스마트텐던은 FBG 광섬유센서 부분, 중공튜브 부분, PS강연선 또는 PS텐던 부분, 보호 정착부 부분 등으로 구성된다. 따라서, 각 부분에 대한 원자재 조달 방법과 제작 방법이 모두 다르며, 다음과 같이 사업화를 진행할 계획이다.

(가) FBG 광섬유센서 조달 방법

FBG 광섬유센서는 광섬유에 광섬유센서를 격자형태로 레이저를 이용하여 제작한다. 이 부분은 고가의 레이저 장비와 파장대역별로 센서를 제작하기 위한 Phase mask를 보유해야 한다. 그러나 사업화 초기 단계에서 FBG 센서를 제작하기 위하여 고가의 제작장비를 보유하는 것은 사업의 위험관리 측면과 비용면에서 비효율적이다.

본 사업화 과제에서는 FBG 광섬유센서 제작을 위하여 전문 제작업체와 전략적인 제휴를 통하여 광섬유센서를 제작하고자 한다. 국내에 FBG 광섬유센서를 제작하는 업체는 현재 2개의 업체가 있는 것으로 조사되었다. 또한, 해외에서 수입할 수도 있으나 현재 국내 전문업체의 품질과 가격경쟁력 측면에서 충분하다고 판단되어 해외에서 광섬유센서를 제작하는 것은 제외하였다.

1차년도 추가기술개발 과제에서 FBG 광섬유센서 제작업체는 광주광역시에 위치한 (주)SJ포토닉스이며, 이 업체와 전략적인 제휴과 대량생산 계획으로 FBG 광

섬유센서 부분의 원자재를 조달할 계획이다.

(나) 중공튜브 생산 부분

지반보강용 스마트앵커 제작을 위해서는 최소 15m의 중공튜브가 필요하고, 교량 보강용 스마트거더를 제작하기 위해서는 30m 이상의 중공튜브가 필요하다. 중공튜브는 강관 파이프 제작 공정과 동일하다. 특히, 스마트텐던과 같이 구조물의 긴장재로 사용하기 위해서는 고강도의 강연선이 필요하고, 중공튜브 또한 강연선의 일부이기 때문에 고강도의 재질을 사용해야 한다.

이러한 강관 파이프 생산시설은 초기 투자비용이 막대하게 들어가기 때문에, 스마트텐던을 위한 별도의 강관생산시설을 갖추는 것은 사업적인 측면에서 매우 비효율적이다. 따라서, 본 과제 수행팀은 1차년도 기간 동안 국내 고강도 강관 생산업체에서 생산하는 것이 합리적인 것으로 판단하였다.

본 과제 수행팀은 국내에서 고강도 강관을 생산하는 여러 업체와 접촉하여 스마트텐던을 위한 seamless type(용접이음매 부분이 없는 형태)의 중공튜브를 생산할 수 있는지 문의하였다. 그러나 대부분의 업체는 seamless type의 강관을 생산하지 않거나, 생산을 해도 일반적인 배관 목적의 파이프만 생산하고 구조물의 긴장재로 사용할 수 있는 강연선은 생산 불가하다는 통보를 받았다. 그러나, 본 과제 수행팀은 최종적으로 고강도 seamless type의 강관을 생산할 수 있는 (주)풍성정밀관과 협의하여 길이 34m의 스마트텐던용 중공튜브를 생산하는데 성공하였다.

현재 2차년도 추가기술개발을 위한 중공튜브는 모두 생산하여 본 과제에서는 추가생산이 필요없으나, 향후 본격적인 시장진입을 위한 사업화 단계에서 (주)풍성정밀관에서 추가 생산을 할 계획이다.

중공튜브는 대량생산시 원가를 절감할 수 있다. 향후 사업화 단계에서는 1회 생산시 길이 50km 이상의 대량생산을 통해 원가를 추가적으로 절감할 계획이다.

(다) PS강연선 또는 PS텐던 생산부분

PS강연선 또는 PS텐던은 기존의 제품을 그대로 이용할 수 있기 때문에 별도의 생산이 필요없고, 필요시 전문 생산업체에서 구입할 계획이다.

(라) 보호 정착부 부분

자체 설계 및 제작하여 향후에도 이용할 계획이다.

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. 광섬유 센서를 이용한 국외 적용사례

선진국의 토목기술자들은 광섬유센서의 여러 장점 때문에 실용화 되면서부터 이를 이용하여 국가주요시설물인 댐·교량·터널·사면·철도 등에 안전성을 확보하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

미국은 Vermont 대학의 Fuhr, Huston, Ambrose등은 교량 구조물 외에도 고층 건물, 그리고 댐등의 진동을 계측하기 위하여 광섬유센서를 적용하였다. 초기의 시도(1989)는 교량의 재포장과 확장 중 다중모드 광섬유를 표면에 부착한 실험이었으며, 3시간 동안의 실험에서 트럭하중과 잭햄머로 인한 진동, 그리고 풍하중으로 인한 광섬유 리드선의 진동에 대한 검출이 가능하였다. 또한 계측되는 철도교 상판에 광섬유센서를 매설하여 교량에 대한 계측을 수행하였다. Vermont 연구그룹에 의해 수행된 가장 큰 구조물 중의 하나는 Winooski One hydroelectric 댐(Fuhr et al. 1994)으로 접근이 어려운 구역은 다절점 광섬유센서를 적용하였으며, 진동과 압력을 동시에 감지할 수 있는 다목적 광섬유센서, 진동과 광이미지를 동시에 전송할 수 있는 광섬유센서를 개발하고 매설하였다(한국건설기술연구원, 2002). 최근에는 "Structural Health Monitoring Systems"개념이 도입되면서 광섬유센서를 교량 구조물에 적용하는 사례가 증가하고 있다. 그 대표적인 예로 그림 1.3과 같으며 (a)는 표면 부착식 광섬유 센서로 교량 하부·측면에서 부착하여 변형률과 응력등을 모니터링 하고 있다. (b)는 5채널 FBG센서 32개를 콘크리트 내의 케이블과 일체화 시켜 시공한 교량이다.



(a) East 12^{th} St, Bridge over I-235 in Des Moines, Ia.(Hemphill, 2004)

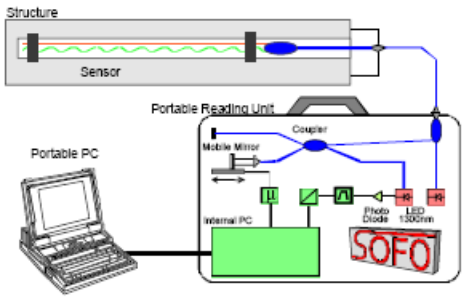


(b) Taylor Bridge (Cheng et al., 2003)

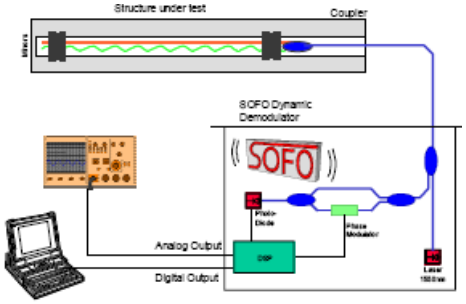
그림 6.1광섬유센서를 교량 모니터링에 적용한 미국의 사례



(a) SOFO시스템의 측정



(b) SOFO시스템의 정적 측정 모식도



(c) SOFO시스템의 동적 측정 모식도

그림 6.2 SOFO 광섬유시스템의 응용 모식도(Inaudi, 2004)

스위스는 스마트 구조물의 개념(Smart Structure Concept)을 적용하면서 정부 지원 아래 광섬유센서를 이용한 구조물 모니터링 연구가 가장 활발하게 진행되는 나라이다. 최근 SMARTEC회사에서 높은 공간 해상도와 고정밀도에 의한 구조물 내부에서의 자동화된 영구계측이 가능한 SOFO 시스템(그림 1.4)을 개발하면서 터널, 교량, 콘크리트 구조물 등의 중요 국가시설물에 적용하고 있다. SOFO센서 이용한 구조물의 대표적인 사례를 정리하면 그림 1.5와 같다. :(a) 교량의 하부기초로 강연선의 긴장력관리를 위해 변형률을 측정, (b) 교량의 내부 박스에 광섬유센서를 설치 곡률 변화를 측정하여 연직처짐 계측, (c) FBG센서가 내장된 직경 3, 8, 22mm, 길이 3~5m GFRP 록볼트를 제작하여 변형률 1.6%까지 측정, (d) FBG센서가 내장된 직경 5mm, 길이 56m, CFRP 케이블를 제작하여 변형률 0.8%까지 측정, (e) 무선통신을 이용하여 실시간 변형률과 온도 모니터링, (f) 터널의 막장 붕괴와 내공변위의 계측.



(a) Emosson dam(Inaudi et al., 1996)



(b) Lutrive Bridge(Vurpillot et al., 1996)



(c) Sargans Tunnel(Nellen et al., 1999)



(d) Emmen bridge(Nellen et al., 1999)



(e) Colle Isarco bridge(Inaudi, 2004)



(f) Gotthard tunnel(Inaudi, 2004)

그림 6.3 광섬유센서를 토목구조물 모니터링에 적용한 스위스의 사례

중국의 경우 최근 중국정부 지원 아래 국가유지시설물에 모니터링 시스템이 적용되고 있다. 특히 교량 부분에서 많은 적용과 성과를 보이고 있으며 지속적인 연구활동이 진행되고 있다. 최근 대표적인 사례는 다음 그림 1.6과 같다. :(a) 40개의 FBG센서를 행거 케이블, 트러스 사재에 설치하여 온도와 응력을 측정, (b) 철도의 레일과 열차의 바퀴에 FBG센서를 부착하여 열차의 운행속도, 위치, 무게등을 실시간으로 모니터링, (c) 강케이블과 FRP-FBG 케이블 결합, 행거 케이블에 적용, (d) 96개의 상용화된 FBG센서를 교량의 거더의 내부와 케이블에 설치하여 변형률과 온도를 모니터링, (e) 직경 0.2mm, 길이 71m, OTDR센서 2본을 제작하여 댐의 콘크리트 표면에 매설 균열 모니터링.

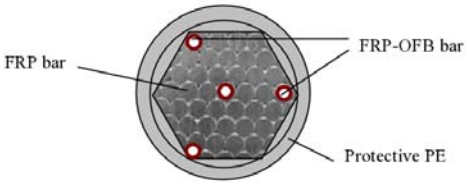


(a) TsingMa bridge
(Tam et al., 2005)



(b) Kowloon-Canton Railway
(Tam et al., 2005)

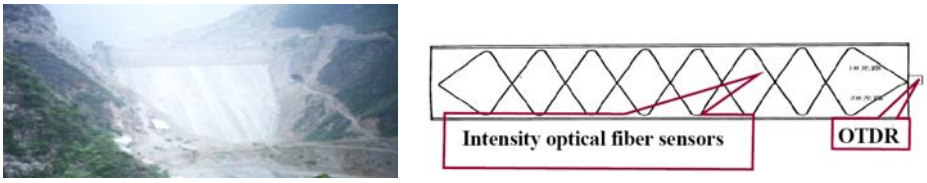




(c) Erbian Bridge(Zhou et al., 2005)



(d) Shandong Binzhou Yellow River Highway bridge(Li et al., 2006)



(e) Gudongkou dam(Cai, 1998)

그림 6.4 광섬유센서를 토목구조물 모니터링에 적용한 중국의 사례

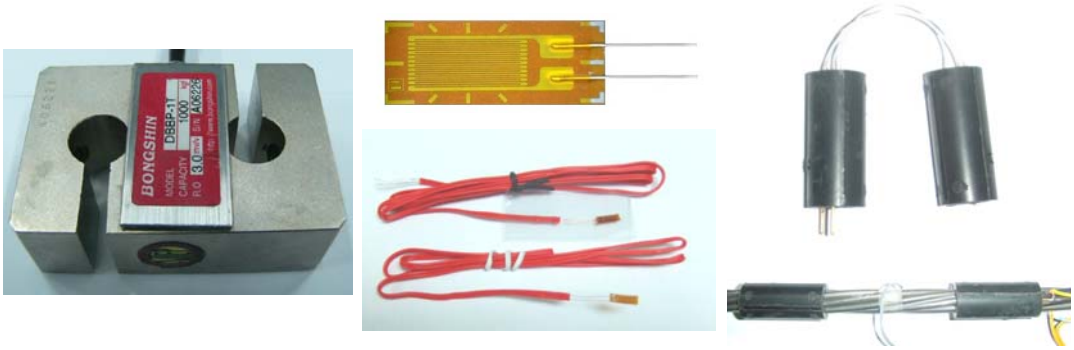
2. 강연선 변형률 및 장력측정 국내·외 적용사례

일반적인 강연선의 긴장 방법은 여러 가지 방법이 있으나, 실제 현장에서는 기계적인 방법인 유압젝을 이용하여 재킹(jacking)하는 방법을 가장 많이 쓰고 있다. 인장장비의 긴장력 측정방법은 장비안의 유압에 걸리는 힘을 유압계를 이용하여 측정하는 방법이 사용되고 있다(그림 3.4). 하지만 이 방법은 유압에 걸리는 힘을 이용하므로 오차 범위가 크며, 인장 도입 이후의 긴장력 측정은 어렵다는 단점이 있다. 또 다른 방법으로는 로드셀(Load Cell)을 긴장단에 설치하여 측정하는 방법, 전기저항식 방법인 스트레인게이지를 부착하여 변형률을 측정 인장응력으로 환산하는 방법, Tensmeg(Tension Measuring gauge)를 이용하여 하나의 강연선에 걸리는 하중을 측정방법 있다(그림 3.5). 하지만 이러한 긴장력 측정은 일회성에 그치며, 장기적인 모니터링이 어렵고 시공성이 불편하다는 단점 때문에 현장 적용이 힘들다.



(a) 인장장비 거치 (b) 인장장비

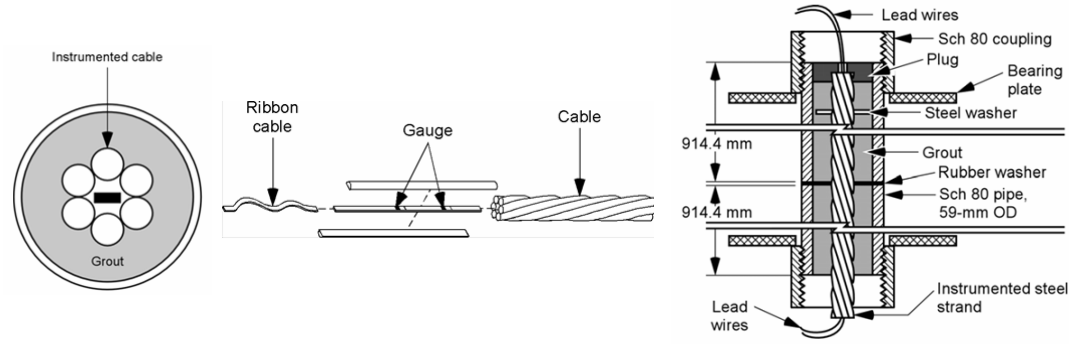
그림 3.4 현장에서의 강연선 긴장력 측정



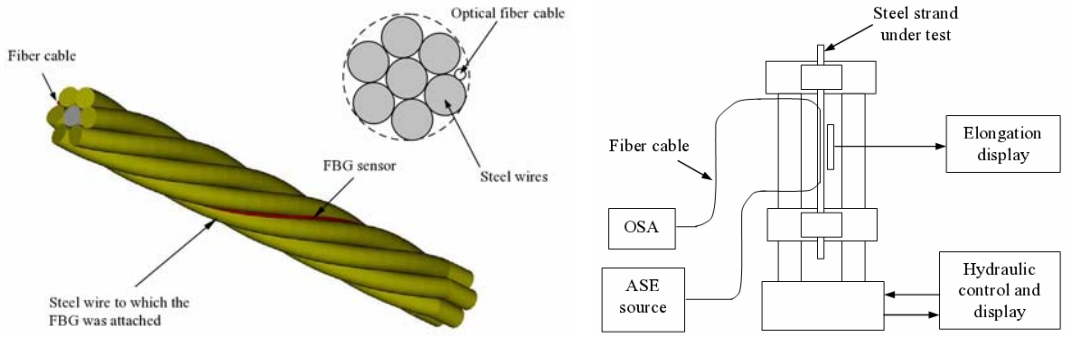
(a) 로드셀 (b) 스트레인게이지 (c) Tensmeg

그림 6.5 강연선 긴장력 측정방법

위와 같은 단점을 보완한 강연선의 장력을 효율적인 계측과 관리를 위한 몇몇 연구가 진행되어 졌다. 대표적인 강연선 변형률 계측의 대표적인 사례는 그림 3.6과 같다: (a) 강연선의 중앙심선을 제거하고 얇은 철판에 스트레인게이지를 부착하고 이를 중앙에 삽입하여 그라우트로 일체화하였으며, 변형률을 측정하여 긴장력을 예측하였다, (b) 강연선의 소선과 소선사이에 FBG센서를 에폭시수지로 일체화하였으며, 반사파장의 변화를 이용 강연선의 변형률을 최대 $6260\mu\varepsilon$ 측정하였다. 하지만 이러한 강연선의 모니터링 방법은 강연선의 부재력 감소, 측정을 위한 리스선 관리 어려움, 센서 자체 부식의 위험, 센서 손실의 우려등 적용성면에서 거친 건설현장에서 사용되기에는 번거로운 요소들을 해결되지 못하였다고 볼 수 있다.



(a) 스트레인게이지를 이용한 강연선의 변형률 측정(Martin et al., 2004)



(b) FBG센서를 이용한 강연선의 변형률 측정(Enbang et al., 2005)

그림 6.6 강연선의 변형률 계측 대표적인 응용사례

제7장 참고문헌

1. 김영상, 서동남, 김재민, 성현종 (2009), FBG센서가 내장된 스마트 텐던을 이용한 7연 강연선의 인발 하중전이 특성, 한국방재학회논문집, 제9권 5호, pp. 79~86.
2. 김재민, 김현우, 김영상, 김진원, 윤정방 (2008), 광섬유센서가 내장된 강연선을 이용한 교량의 장력 모티너링 방법, 전산구조공학회 논문집, 제21권 제3호, pp. 287~294.
3. 김영상, 서동남, 김재민 (2008), FBG센서를 내장한 스마트 앵커의 개발과 적용, 한국지반공학회 봄학술발표회논문집, pp. 393~398.
4. 김재민, 김영상, 김현우, 서동남, 윤정방 (2007), FBG 센서를 내장한 스마트 강연선 개발, 전산구조공학회 학술대회 논문집, pp. 33~38.
5. 김두기, 구기영, 서형렬 (2004), 포스트텐션 교량의 텐던 부식, 한국구조물진단학회 학술지, 제 8권 제 3호, pp. 91~97.
6. 윤우현 외 9명 (2007), 프리스트레스트 콘크리트의 설계와 시공, 동화기술.
7. 정배근, 한경봉, 박선규 (2000), PS 긴장재의 마찰손실량에 관한 실험적 연구, 대한 토목학회 논문집, 제20권 제5-A호, pp. 797~804.
8. 양인환, (2006), 비선형 회귀분석기법을 이용한 콘크리트 교량 프리스트레스의 장기 예측, 콘크리트학괴 논문집, 제 18권 제4호, pp. 507~515.
9. 김장호, 문도영, 지광습, 김규선 (2008), 긴장재 절단에 따른 프리텐션 부재의 동적 거동 고찰, 대한 토목학회 논문집, 제 28권 제5A호, pp. 747~756.
10. 한국건설기술연구원, (2002), 광섬유센서를 이용한 교량안전진단 기술 개발 연구보고서, 건설교통부.
11. Zhang W., Gao J., Shi B., Cui H., (2006), Health monitoring of rehabilitated concrete bridges using distributed optical fiber sensing, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 21, pp. 411~424.
12. 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.
13. Hill, K. O. and Meltz, G., (1997), Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview, IEEE J. Lightwave Technol. 15(8), pp. 1263~1276.
14. 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.
15. Li, E., Xi, J., Chicharo, J., Liu, T., Li, X., Jiang, J., Li, L., Wang, Y., and Zhang, Y., 2005. The experimental evaluation of FBG sensor for strain

measurement of prestressed steel strand, SPIE Proceedings, 5649, pp. 463~469.

16. Tam, H. Y., Liu, B. O., Guan, B. O., Chung, W. H., Chan H. T., Cheng, L. K., 2005. Fiber Bragg Grating Sensors for Structural and railway applications, SPIE Proceedings, Vol. 5634, pp. 85~97.
17. Inaudi, D., and Casanova, N., 2000. Geo-structural monitoring with long-gage interferometer sensors, SPIE Proceedings, 3995, pp. 164~174.
18. Inaudi, D., 2003. State of the Art in Fiber Optic Sensing Technology and EU Structural Health Monitoring Projects, Proceedings of the First Intemational Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokyo, Japan, pp. 191~198.
19. Inaudi, D., 2004. SOFO Sensor for Static and Dynamic Measurements, 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, United Kingdom, pp 1~10.
20. 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.
21. S. Vurpillot, D. Inaudi, J. M. Ducret, 1996. Bridge monitoring by fiber optic deformation sensors: design, emplacement and results, Smart Structures and materials, San Diego February, SPEI Vol. 2719, pp. 16.
22. Cai, D. S., 1998. Monitoring technical researches of crack in dam using optical fibre and stability analysis of dam foundation, Postdoctoral Research Report, Harbin Institute of Technology, P. R. China.
23. Lewis Martin, Doug Miline, Marc Ruest, and Rimas Pakalnis, 2004. Evaluation of Instrumented Cable Bolts in Cement Grout to Determine Physical and Numerical Modeling Properties, Report of Investigations 9662, Department of Health and Human Services.
24. Li Enbang, Xi Jiangtao, Chicharo Joe F., Liu Tiegen, Li Xin, Jiang Junfeng, Li Lina, Wang Yunxin, Zhang Yimo, 2005. The experimental evaluation of FBG sensors for strain measurement of prestressed steel strand, Smart Structures Devices and Systems II. Edited by Al-Sarawi, Said F. Proceedings of the SPIE, Volume 5649, pp. 463-469.

부 록

[부록1] 시험성적서
[부록2] 스마트텐던 재료 특성 검토표

[부록1] 시험성적서

KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE

한국화학시험연구원
150-038 서울특별시 영등포구 영등포동 8가 88-2
Tel : 02-2164-0011 Fax : 02-2634-0016

시 험 성 적 서

우 404-817 인천광역시 서구 가좌3동 539-8 TEL (032)5709-700 FAX (032)575-5613

접수번호 : TAS-021964
대 표 자 : 김선구
업 체 명 : 에폭시산업
주 소 : 경기 부천시 소사구 소사본동 175-6

접 수 일 자 : 2008년 06월 11일
시험완료일자 : 2008년 06월 20일

시 료 명 : 건식 저점도 주입제시편(E-002)

시 험 결 과

시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
인장강도	N/㎟		68.3	KS M 3015 : 2003
굽힘강도	N/㎟		84.1	KS M 3015 : 2003
압축강도	N/㎟		83.6	KS M 3015 : 2003(시험편수:3개)
인장전단접착강도	N/㎟		13	KS M 3734 : 2006(시험편수:2개)

용 도 : 품질관리용

비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

Yong-Su Kim
시험원 : 김용수
Tel : 032-570-9668

Hyeong-Geun Park
기술책임자 : 박형근
E-mail : sungjae@ktr.or.kr

2008년 06월 20일

한국화학시험연구원장

[부록2] 스마트텐던 재료 특성 검토표

표 1. 탄소강 강관(KS D 3517, JIS G 3445) 기계적 성질

종 류		기 호	인장시험			
			인장강도 kg/㎟ (MIN)	항복점 kg/㎟ (MIN)	연신율 (%) (MIN)	
					11호 시험편 12호 시험편 종방향	5호 시험편 횡방향
17종	A	STKM17A	56 이상	35 이상	20 이상	15 이상
	C	STKM17A	66 이상	49 이상	10 이상	5 이상

표 2. PS 강재 기계적 성질

기 호	호 칭 명	인 장 시 험			릴랙세이션시험	
		0.2% 영구 연신율에 대한 하중 kg f(kN)	인 장 하 중 kg f(kN)	연신율 (%)	릴랙세이션값 (%)	
					N	L
SWPC 7A	(7연선 6.2㎜)	3,450{33.8} 이상	4,100{40.2} 이상	3.5 이상	8.0 이하	2.5 이하
	(7연선 7.9㎜)	5,600{54.9} 이상	6,600{64.7} 이상	3.5 이상	8.0 이하	2.5 이하
	7연선 9.3㎜	7,700{75.9} 이상	9,050{88.8} 이상	3.5 이상	8.0 이하	2.5 이하
	7연선 10.8㎜	10,400{102} 이상	12,200{120} 이상	3.5 이상	8.0 이하	2.5 이하
	7연선 12.4㎜	13,900{136} 이상	16,300{160} 이상	3.5 이상	8.0 이하	2.5 이하
	7연선 15.2㎜	20,800{204} 이상	24,500{240} 이상	3.5 이상	8.0 이하	2.5 이하
SWPC 7B	7연선 9.5㎜	8,850{86.8} 이상	10,400{102} 이상	3.5 이상	8.0 이하	2.5 이하
	7연선 11.1㎜	12,000{118} 이상	14,100{138} 이상	3.5 이상	8.0 이하	2.5 이하
	7연선 12.7㎜	15,900{156} 이상	18,700{183} 이상	3.5 이상	8.0 이하	2.5 이하
	7연선 15.2㎜	22,600{222} 이상	26,600{261} 이상	3.5 이상	8.0 이하	2.5 이하

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 건설교통 R&D 정책·인프라 사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 건설교통 R&D 정책·인프라 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.