

16CTA
P-C11
7149-
01-00
0000

보안 과제(), 일반 과제(○)/공개(○), 비공개()발간등록번호()
국토교통 기술촉진 연구사업 제3차 연도 최종 보고서

R&D / 16CTAP-C117149-01-000000

반작용 PS힘 싱크로나이즈장치를 활용한 흙막이공사 제어, 예측, 조정 정보화시공 통합관리 시스템 개발 최종보고서

2019.07.05.

주관연구기관 / (주)효광엔지니어링
공동연구기관 / 고려대학교 산학협력단
(주)동성엔지니어링

2019.
07.05.

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

반작용 PS힘 싱크로나이즈장치를 활용한 흙막이공사 제어,
예측, 조정 정보화시공 통합관리 시스템 개발 최종 보고서

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘반작용 PS힘 싱크로나이즈장치를 활용한 흙막이공사 제어, 예측, 조정 정보화시공 통합관리 시스템 개발’ (연구개발 기간 : 2016.10.24~2019.04.27) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 07. 05.

주관연구기관명 :	(주)효광엔지니어링	진 영 란 (인)
공동연구기관명 :	고려대학교 산학협력단	허 준 (인)
	(주)동성엔지니어링	김 형 철 (인)

주관연구기관책임자 : 채 규 봉
공동연구기관책임자 : 홍 대 희
공동연구기관책임자 : 이 승 훈

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	16CTAP-C117 149-01-0000 00	해당 단계 연구 기간	2016.10.24 ~ 2019.04.27 (30 개월)	단계구분	(3단계)/ (총3단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	반작용 PS힘 싱크로나이즈장치를 활용한 흙막이공사 제어, 예측, 조정 정보화시공 통합관리 시스템 개발			
연구책임자	채 규 봉	해당단계 참여연구원 수	총: 16명 내부: 3명 외부: 13명	해당단계 연구비	정부: 169,000천원 민간: 57,000천원 계: 226,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 48명 내부: 9명 외부: 39명	총 연구비	정부: 590,000천원 민간: 98,700천원 계: 788,700천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)효광엔지니어링			공동연구기관명 : 고려대학교 산학협력단 (주)동성엔지니어링	
국제공동연구	해당사항 없음			해당사항 없음	
위탁연구	해당사항 없음			해당사항 없음	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	
-------------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

보고서 면수

〈 요약 문 〉

연구의 목적 및 내용	국내·외 종래기술의 문제개선과 니즈 반영하여 흠막이 시공시 단계별 예측과 문제에 대한 적기 대응 제어·조정하는 반작용 PS힘 싱크로나이즈장치를 개발한다. 흠막이공사의 제어·예측·조정 정보화시공관리 통합시스템을 건설, IT, 기계를 융합하여 개발하고, 현장 적용을 통해 건설신기술을 신청한다. 연구 내용 - 순탄소성해석 프로그램 개발 - 역해석 프로그램 개발 - 장경간 무지보 공법 개발 - 정보화시공 통합시스템 연계 - 계측센서시스템 설계 및 제작 - 유압제어시스템 설계 및 제작 - 통합제어시스템 현장적용 시험 지원 - 시공 및 유지관리 가이드라인 개발 - 제품생산 및 현장적용 - 건설신기술 신청				
연구개발성과	1. 흠막이 공사의 반작용 PS힘 싱크로나이즈 장치 및 공법 개발 2. 계측센서시스템 및 유압제어시스템, 통합제어시스템 개발 3. 순탄소성해석 및 역해석 프로그램 개발 4. 실용화 및 사업화				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	지반굴착 흠막이 공사에서 예측과 적기대응 조정으로 안전성과 경제성을 동시 확보할 수 있어서 흠막이 공사에 폭넓게 활용될 것으로 기대된다. 지반굴착 흠막이 구조체의 실시간 위험상태 예측과 적기대응 조정 및 제어하는 시스템 개발로 건설, IT, 기계가 융합하는 인공지능 사업 등의 신성장 동력 창출에 기여할 것으로 기대된다. 최종성과물에 의한 사업화로 자재, 장비사용, 노동력을 줄일 수 있고 공사기간 단축으로 유류 소비와 CO₂ 발생을 감축하여 의해 지구온난화 대책 전략에 부합할 수 있다. 안전한 시공으로 인하여 재해사고가 감소 할 수 있다.				
핵심어 (5개 이내)	흠막이공사	정보화시공	역해석	싱크로나이즈	

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	The purpose of this study is to develop “Reaction Prestressed Force Synchronize Equipment” which adjust and control that is possible for prediction at each stage and resolution of issues at the right time reflecting need and improving problem of existing technology in domestic and foreign, and “Realtime Construction Information Management System” which adjust, predict and control retaining structures through technological convergence of construction, information technology, machine technology, etc. Furthermore, this study is to put “Reaction Prestressed Force Synchronize Equipment” and “Realtime Construction Information Management System” to practical use through the field application and new technology in construction. Main studies are as below. – Development of Elastic–Plastic Analysis Program – Development of Inverse Analysis Program – Development of Long–span Unsupported Beam Method – Connection to Realtime Construction Information Management System – Design and Manufacture of Measuring Sensor System – Design and Manufacture of Hydraulic Control System – Test Support for Field Application of Integrated Control System – Development of Guideline for Construction and Management – Product Production and Field Application – Application of New Technology in Construction				
Results	1. Development of Elastic–Plastic Analysis and Inverse Analysis Program 2. Development of Equipment and Method for Reaction Prestressed Force Synchronize of Retaining Structures 3. Development of Measuring Sensor System, Hydraulic Control System and Integrated Control System 4. Practical use				
Expected Contribution	The Application of our study to the ground excavation and retaining structures works will be increased because it can secure stability and economics through prediction and adjustments on the above–mentioned works. It is expected to contribute to national policy securing stability of nation and creation of new growth engine such as artificial intelligence business converging machine and IT in construction by development of method and system which can predict, adjust and control real–time conditions of ground excavation and retaining structures. With this study’s practical use, it is expected to contribute to global warming by reducing oil consumption and Co2, and disaster accident reduction in construction, etc. through reduction of materials, manpower, equipment, and construction period.				
Keywords	Retaining Structures	Realtime Construction Control	Inverse Analysis	Synchronize	

< CONTENTS >

1. Outline of R & D project	- 1 -
2. Current status of domestic and overseas technology development	- 2 -
3. Content and achievement of research performance	- 11 -
4. Objective achievement degree and related field contribution	- 126 -
5. Conjugation plan of R & D achievements	- 129 -
6. Overseas science technology information acquired in the course of research	- 129 -
7. Security rating of R & D achievement	- 129 -
8. Current status of research facility and equipment registered to the national science technology comprehensive information system	- 129 -
9. Performance of safety measures by R & D project facilitation in lab and etc.	- 130 -
10. Representative research performance of R & D project	- 130 -
11. Other information	- 131 -
12. References	- 132 -

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	- 1 -
2. 국내외 기술 개발 현황	- 2 -
3. 연구수행내용 및 성과	- 11 -
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	- 126 -
5. 연구개발성과의 활용 계획	- 129 -
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	- 129 -
7. 연구개발성과의 보안등급	- 129 -
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	- 129 -
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	- 130 -
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	- 130 -
11. 기타 사항	- 131 -
12. 참고 문헌	- 132 -

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 흙막이공사에서 국내·외 종래기술의 문제점을 개선하여 단계별 예측과 문제 발생 시 적기에 대응하여 제어·조정하는 반작용 PS힘 싱크로나이즈장치를 개발한다. 건설기술과 IT기술의 융합으로 흙막이공사를 제어·예측·조정하는 정보화시공관리 통합시스템을 개발하여 흙막이 가시설 공사에서의 모델의 불확실성에 따른 실제 현장과의 갭을 줄여 안전성, 시공성, 경제성을 향상시킨다.

2. 연구개발의 필요성

- 도심지에서 건물이나 대규모 산업시설이 밀집한 지역에서 구조물을 축조하기 위해서는 흙막이 가시설이 필수적인 공법 중에 하나이다. 효율적인 용지활용 측면과 기존의 인접시설물의 안전을 확보하기 위해서 다양한 흙막이 공법이 시공되고 있다.
- 그러나 넓고 깊게 점점 대형화하는 구조물을 구축하기 위한 지하 흙막이공사의 안전성은 무엇보다 중요함에도 불구하고 임시 시설이라는 선입견으로 타 분야에 비하여 정보화 시공이 가장 늦어 첨단 IT를 활용하지 못하고 있다. 굴착에 따라 수시로 변하는 지반의 특성을 반영하지 못해 항상 위험이 따르며, 주변시설에 피해가 발생하기도 하고 이에 따라 대형사고가 빈번히 발생하고 있다. 따라서 지반의 상황을 수시로 반영하면서 공사기간에 영향을 주지 않고 안전하면서 본체구조물에 따른 시공 간섭을 최소화할 수 있는 IT를 융합한 첨단 흙막이 공법의 개발이 필요하다.

3. 연구개발 범위

- 순탄소성해석 프로그램 개발
 - 역해석 프로그램 개발
 - 장경간 무지보 공법 개발
 - 정보화시공 통합시스템 연계
 - 계측센서시스템 설계 및 제작
 - 유압제어시스템 설계 및 제작
 - 통합제어시스템 현장적용 시험 지원
 - 시공 및 유지관리 가이드라인 개발
 - 제품생산 및 현장적용
 - 건설신기술 신청
-

1. 흠막이 공법

1-1. 기존기술의 현황 및 문제점

- 흠막이는 일반적으로 흠막이 벽체, 띠장, 지보내 등의 각 부재로 구성된다. 기존의 흠막이 공법 중 일반적으로 적용되어지고 있는 지보형식으로는 버팀보 공법, 어스앵커 공법, 소일네일링 공법 등이 있으며, 이중 어스앵커 공법과 소일 네일링 공법은 도심지 공사에서 인접부지를 침범하여 부지공간의 제약이 있고 민원발생 및 동의를 필요하므로 도심지 흠막이 공사에는 적용성이 많이 떨어진다.
- 다음 그림과 같이 띠장재의 휨강도 부족으로 버팀보 수평 간격이 촘촘하게 시공되어야 한다.

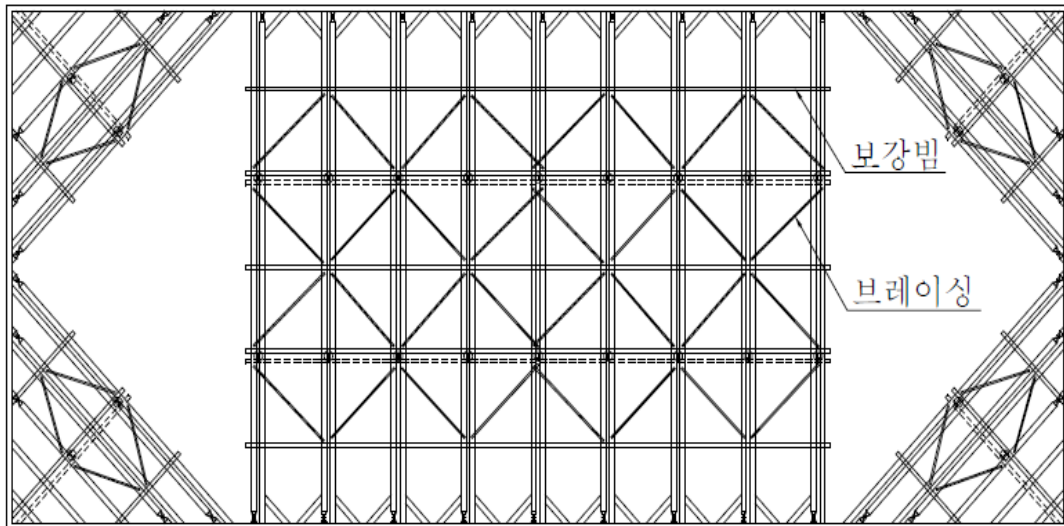


그림 1-1. 기존 흠막이 공법

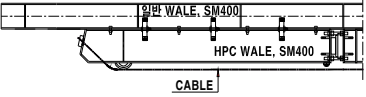
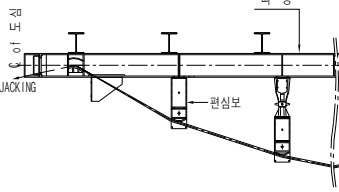
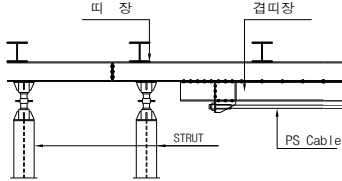
- H-형강 버팀보는 강축과 약축이 존재하는 단면특성으로 약축에 대한 보강(브레이싱)이 필요하며, 설치가 복잡하여 공사기간의 장기화, 굴착공간에 설치될 구조물의 시공성 저하와 해체의 번거로움 및 용접과 천공으로 인한 부재 단면력 손실 및 자재 손실이 많이 발생한다.

1-2. 국내외 기술동향

- 국내외 가시설 기술은 공사비 절감, 공사기간의 단축을 목적으로 기술개발이 이루어지고 있다. 근래에는 구조적으로 성능이 향상된 띠장 및 버팀보의 개발을 통해 작업의 효율성 및 경제적인 효과를 나타내고 있다.
- 가시설 공법으로는 재래식 공법, IPS 공법, PS-S 공법 등이 있다.
재래식 공법의 경우, H-형강 띠장과 버팀보로 구성되어 있는데, 굴착 깊이의 제한을 받지 않으나 많은 강재의 사용과 시공성 저하로 인해 경제성 나쁘고 공사기간 증가된다는 단점이 있다.
IPS 공법의 경우, H-형강 받침대와 띠장 및 강선으로 구성되어있다. 확대된 내부공간으로 시공성과 편의성이 향상된다는 장점이 있다. 그러나 케이블과 띠장 및 수직재 등과의 간섭이 발생될 수 있으며, 비합벽 구조물 시공 시 돌출 띠장에 의해 굴토 면적이 증가되고, IPS 설치를 위한 굴착면이 길어짐에 따라 지보공 설치 전 초기 변위량이 과다하게 발생된다는 단점이 있다.
PS-S 공법의 경우, 변 단면 H-형강 띠장 및 강선으로 구성되어있다. 띠장 설치 시 초기 변위를 최소화할 수 있으며, 띠장재 길이가 규격화 되어 있어 규격화된 공장제품으로 시공성 및 보급성이 뛰어나다는 장점이 있으나 지보공 설치 후 현장변화에 대한 대처가 용이하지 않다는 단점이 있다.

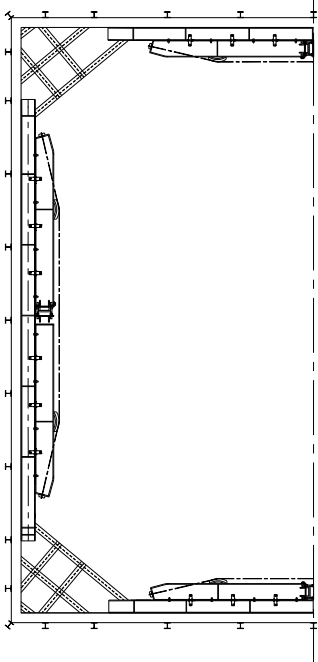
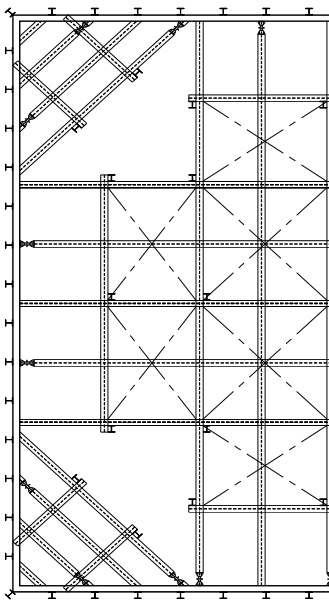
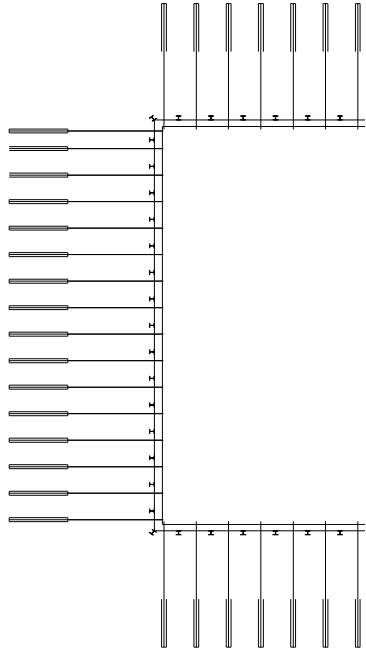
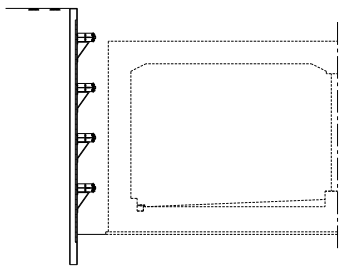
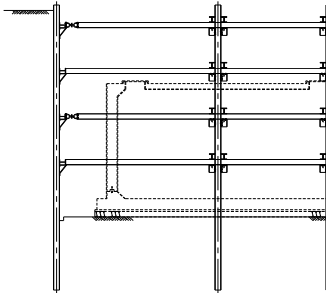
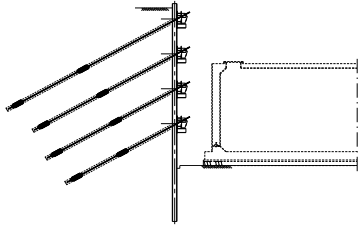
1-3. HiCT 공법의 특수 공법과의 비교

표 1-3. HiCT 공법과 특수 공법 비교

공 법	HiCT공법 (정보화 장경간 무지보 흙막이 공법)	I P S 공법 (프리스트레스 가시설 공법)	P S 공법 (버팀보 절약형 프리스트레스 WALE공법)
개념도 및 개 요			
적용 경간	6.0M ~ 15.0M (25.0M)	6.0M ~ 26.0M	4.0M ~ 8.0M
저항기구	• 프리스트레스로 응력상쇄, 변위 회복 • 토압변화 적기대응, 토압예측 : 능동적 저항	• PS힘 + 편심 포물선모멘트-토압 휨모멘트 : 상쇄	• PS힘 + 편심 수평모멘트-토압 휨모멘트 : 상쇄
정보화 시공	• 외력거동 관측 → 스트로크 연동 조정 ; 예측, 경제성 최적화, 안전성 최고	• 재긴장 곤란 및 정보화 시공 미흡으로 수동적 대처	• 재긴장 곤란 및 정보화 시공 미흡으로 수동적 대처
구조적 안전성	• 정보화시공 · 적기 조정으로 안정성 최고 • 전단면 탄성응력, 2중 합성단면강성으로 안전성 최고	• 토압 대응 PS힘 재조정 곤란 • 1열 띠장으로 안전성 저하	• 토압 대응 PS힘 재조정 곤란 • 겹편심 안전성 증대
시공성, 구조간섭	• STRUT 간섭 최소화 • 본체 구조시공 편의성 양호 • 방수능력 양호	• STRUT 간섭 없음 • 구조물 시공 편의성 확보 • PS힘 긴장 정착용 장치 중량화 구조 복잡	• STRUT과 중간파일 간섭 보통 • 본체구조 시공편의성 보통
경 제 성	• 일반 강재 사용, 강재량 감소로 경제적 • 공사기간 단축	• 특수강재사용으로 경제성 보통 • 공기 단축 보통	• 적용 경간장 제한으로 강재량 증가, 경제성 보통 • STRUT 및 중간PILE 간섭으로 공기 증가
토공물량	• 일반공법 동일 이격거리, 토공량 동일	• 일반공법보다 이격거리 및 토공량 증가	• 일반공법 동일 이격거리, 토공량 동일

1-4. HiCT 공법의 일반공법과의 비교

표 1-4. HiCT 공법과 일반 공법의 비교

공 법	HiCT공법 (정보화 장경간 무지보 흠막이 공법)	STRUT 공법	EARTH ANCHOR 공법
평 면 도			
단 면 도			
공법개요	• 수직PILE 근입 • 단계별 굴착, HiCT 시스템 제작 및 설치 • 외력·설계관리치 피드백 정보화 시공	• 수직PILE 및 중간PILE 근입 • 단계별 굴착, 띠장, STRUT설치 • BRACING 설치	• 수직파일 근입 • 단계별 굴착 및 E/A 천공 • E/A 근입, GROUTING, 긴장 정착
공법특징	• 외력거동 상쇄·회복으로 안전성 최고 • 장경간, 토압예측 정보화 시공	• 수직Pile에 설치된 띠장을 Strut 지지로 토압 저항	• 수직Pile 배면속에 Anchor 설치로 Anchor의 마찰저항으로 인장력을 저항시키는 공법
적용경간	6.0 ~ 15.0 M (25.0M)	3.0 M 내외	3.0 M 내외
본체구조 시공 간섭여부	• 본체 구조시공간섭 최소화 시공편의성 제공	• 중간파일, STRUT등 본체구조 간섭 최대	• 본체구조 시공과 무관
정보화 시공	• 계측, 설계관리치 피드백 정보화 시공	• 정보화시공 시스템 없음	• 정보화시공 시스템 없음
구조적 안전성	• HiCT시스템 적기조정과 전단면 탄성응력유지 및 2중합성단면	• 풍부한 시공실적	• E/A 정착부 토질 불확실한 경우 안전성 위험

	강성으로 안전성 최고		
경제성	• 일반강재 사용, 수직파일 및 강재량 감소로 경제성 최고	• STRUT, 중간파일수량 증가로 경제성 저하	• E/A설치로 경제성 보통
공사기간	• 본체 구조시공과 최소화로 공사기간 단축	• STRUT 및 중간PILE 간섭으로 공기 증가	• E/A시공에 따른 공사기간 보통
주변지반 침하	• 배면 변위 회복으로 주변 지반침하 감소	• 토압에 대한 대응이 결여로 주변 침하 우려	• 벽체변위 변동폭이 크고, 지하수위 유출로 지반침하 우려

2. 흠막이 시공에서의 계측센서시스템 및 유압제어시스템, 통합제어시스템

2-1. 흠막이 공사 유비쿼터스 시스템 구축 연구 (고려대학교) [1]

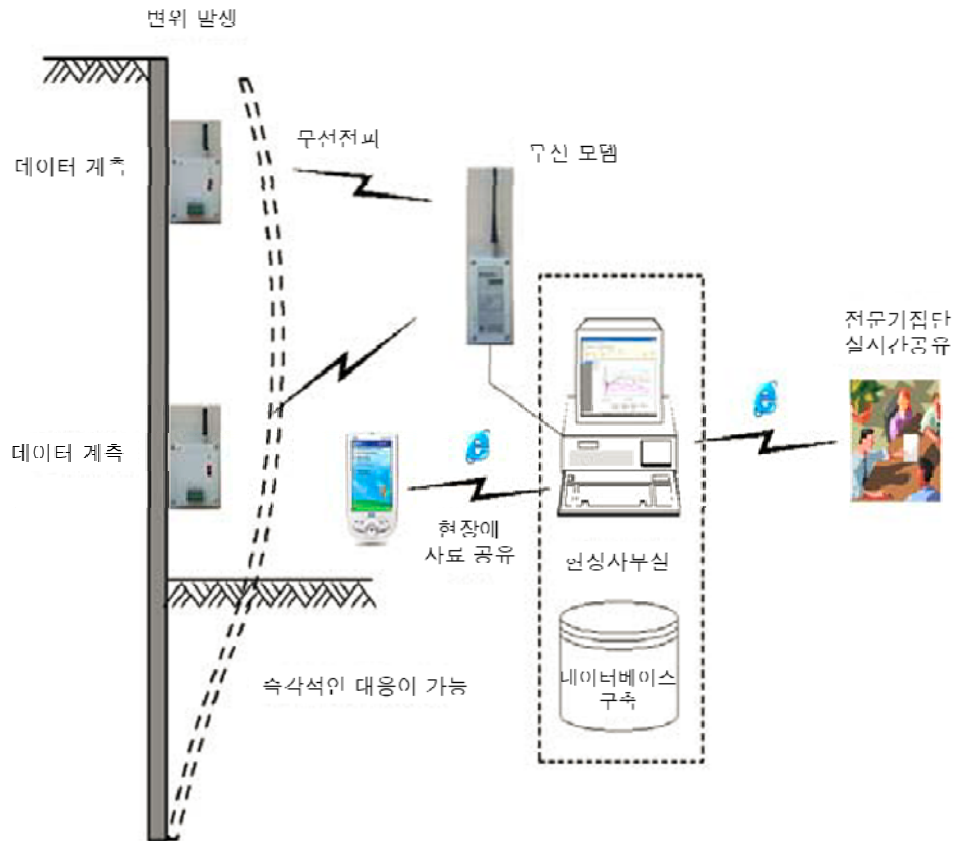


그림 2-1. 흠막이 공사 유비쿼터스 시스템 (고려대학교)

- 흠막이 공사에 유비 쿼터스 개념을 적용하는 것에 대한 개념 설계에 대한 연구로 2004년 한국 건축 시공학회 학술대회에 발표되었다. 흠막이 구조체에 설치된 센서의 계측 데이터를 무선통신을 통하여 현장 사무실의 서버에 전송하고 이 값을 개인 단말기를 통하여 현장 시공자에 전달함으로써 흠막이 구조체의 변위 발생에 대하여 즉각적인 대응이 가능하도록 유비 쿼터스 시스템을 설계 하였다. 흠막이 공사의 정보화 시공으로 안전성이 확대 될 수 있다. 개념 설계만 진행 되었으며 실제 시스템의 제작 및 실용화는 진행되지 않았다.

2-2. 흠막이 공사 통합 계측 관리 시스템 구축 연구(고려대학교) [2]

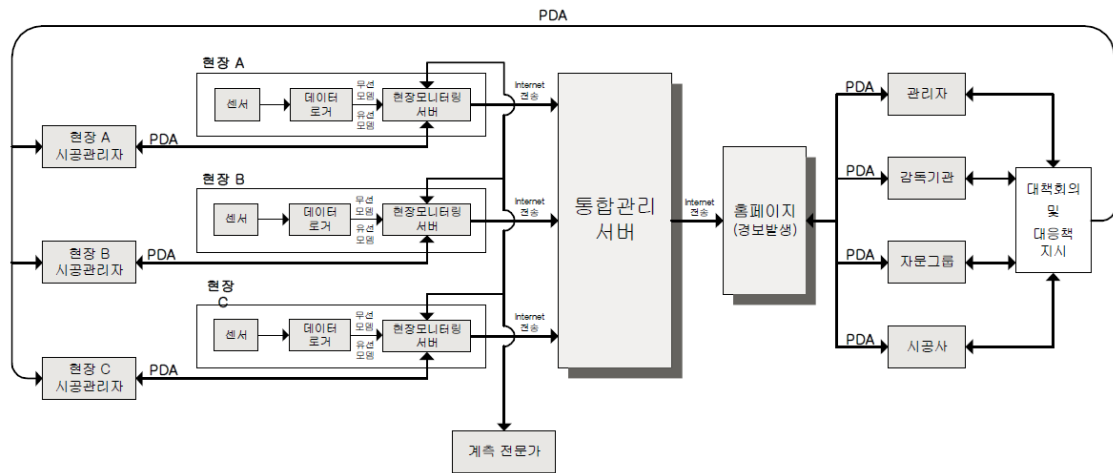


그림 2-2. 흠막이 공사 통합 계측 관리 시스템 (고려대학교)

- 흠막이 공사에 IT 기술을 적용한 연구로 2005년 대한 건축학회논문집 구조계에 출판되었다. 여러개의 여러개의 현장의 계측 정보를 인터넷이나 PDA를 통해 계측 정보유하는 시스템에 대한 연구이다. 계측 과정 중 위험 요소 발생시 관련자들간 실시간 의사 결정이 가능하도록 하였고 신축 공사 현장에 적용하여 타당성 검토하였다.

2-3. 흠막이 공사 무선 계측 시스템 (연세대학교) [3]



그림 2-3. USN 무선경사계 (연세대학교)

- 흠막이 공사에서 무선 계측 시스템을 개발하는 것에 대한 연구로 2009년 한국 건축시공학회 학술대회에 발표되었다. 기존 지중 경사계는 필요할 때 마다 측정자가 직접 계측하므로 비용 부담이 크기 때문에 USN (Ubiquitous Sensor Network) 이라는 무선경사계를 개발하여 자동으로 계측하는 시스템을 구축하여 흠막이 벽의 동적 움직임을 실시간 모니터링 하였다. 이를 흠막이 현장에 적용하여 실현 가능성을 검증하였다.

2-4. 흠막이 공사 무선 계측 시스템 (부산대학교) [4]

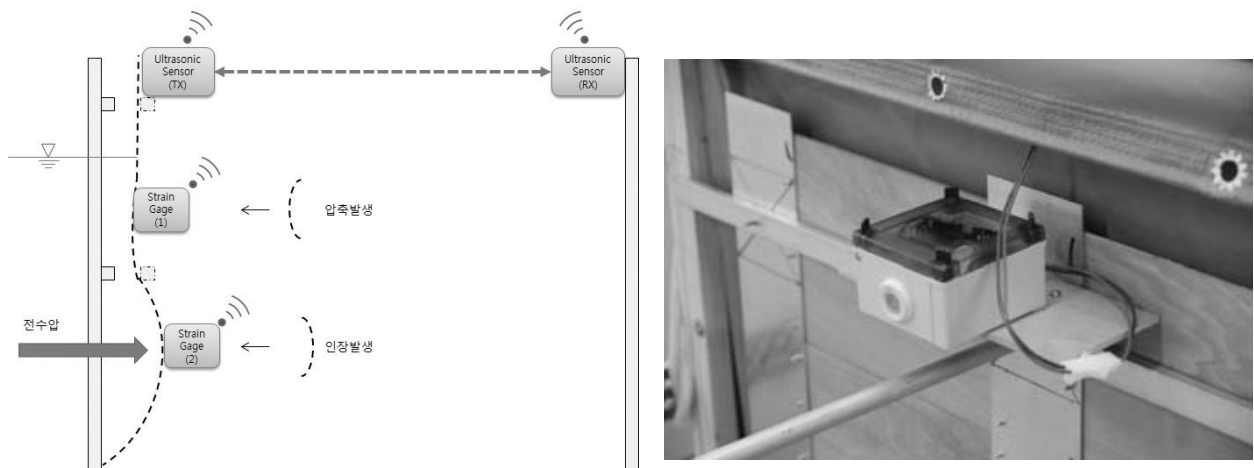


그림 2-4. USN 무선경사계 (연세대학교)

- 흠막이 구조체의 변위를 분석하기 위한 USN 기반 초음파 센서를 개발 하는 연구로 2011년 한국건설 관리학회 논문집에 발표되었다. USN 기술을 이용하여 흠막이 벽체의 변화 상태를 지속적으로 관측할 수 있다. USN 기반의 데이터 수집 시스템을 설계하고 이를 테스트베드에 적용하여 흠막이 시공시 안전성을 향상시킬 수 있는 가능성을 제시 하였다.

2-5. IPS 흠막이 공사 현장 계측 (써포텍) [5-7]

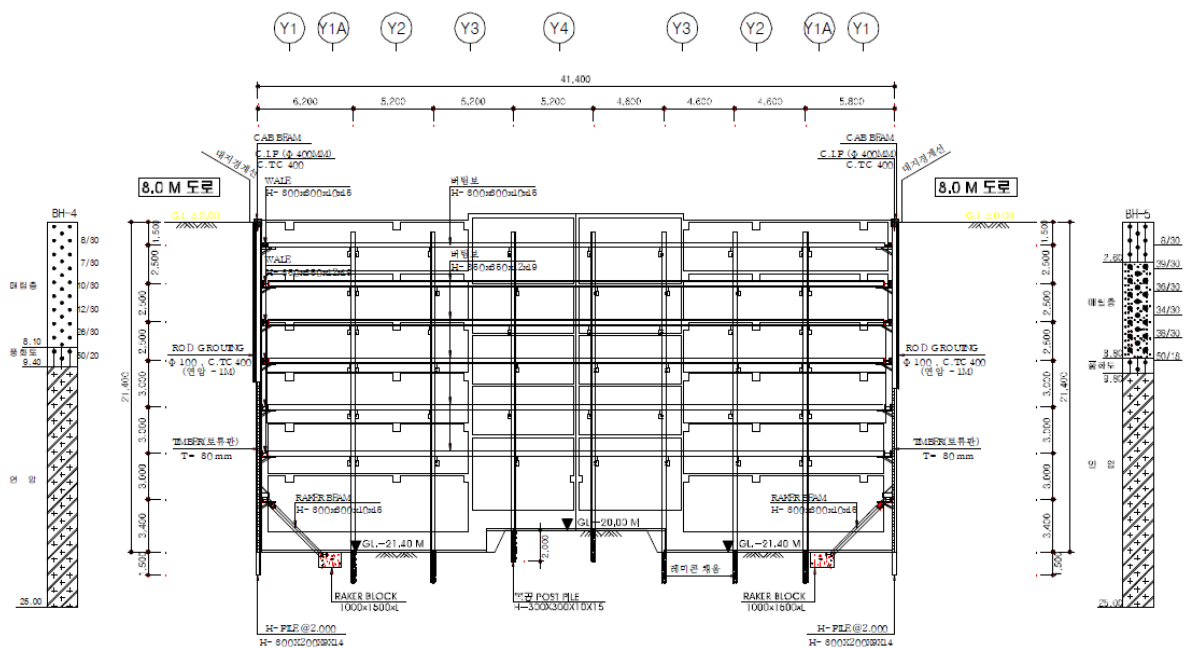


그림 2-5. IPS 흠막이 공법 (췌췌포텍)

- (주) 췌췌포텍에서 개발한 IPS 흠막이 공법으로 가시설 공법을 검증하기 위해 실제 건축현장의 각 부재에 계측기(지중 경사계, 지하수위계, 변형률 게이지)를 설치하여 강선 긴장에 따른 지반의 상호 작용을 계측할 수 있다. 계측 데이터를 바탕으로 띠장에 프리스트레스를 발생시켜 띠장의 처짐을 복원시키는 원리이다. 다수의 현장 시험 적용과 실제 상용화에 성공하였다.

2-6. ROSE 흠막이 공법 (우경건설) [8]



그림 2-6. ROSE 흠막이 공법 (㈜우경건설)

- 우경 건설에서 개발한 ROSE 공법으로 다수의 유압잭을 이용하여 띠장에 프리스트레스를 생성하는 구조이다. 유압 제어와 게이지 센서를 통한 변위계측을 실시간으로 제어가 가능하며 LCD 화면을 통한 GUI 로 사용자가 전체 띠장 상태를 관측 할 수 있다. 최대 120개의 유압잭을 동시에 제어 가능하다.

2-7. PS-S 공법 (피에스테크) [9]



그림 2-7. ROSE 흠막이 공법 (㈜우경건설)

- (주)피에스테크에서 개발한 PS-S 공법으로 PS 띠장과 사각강관버팀보를 사용한다. 기존의 버팀보 방식 대신 프리스트레스를 이용하기 때문에 버팀보 설치간격이 넓어 작업공간 확보에 유리하다. 버팀보가 줄어들어 공사비 및 공기 절감이 가능하다.

2-8. 버팀대 선행하중잭 (스마트 엔지니어링) [10]



그림 2-8. 선행하중잭 (쥬스마트 엔지니어링)

- (쥬스마트 엔지니어링에서 개발한 선행하중잭으로 지반공사 버팀대에 프리스트레스를 유압잭으로 생성하여 흙막이 벽체 강성을 증가시키는 원리이다. 설치와 해체가 간편하고 추가 하중 재하가 용하나 계측 시스템과의 연계되어 있지 않고 핸드 펌프로 가압하기 때문에 사용자의 경험에 의존해야 한다.

제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 흙막이 공사의 반작용 PS힘 싱크로나이즈 장치 및 공법개발

1-1. 국내외 유사형식 기술 및 문헌조사 (제2장에 작성)

1-2. 제안기술의 시공단계별 개념설계



(1) 수직파일 설치



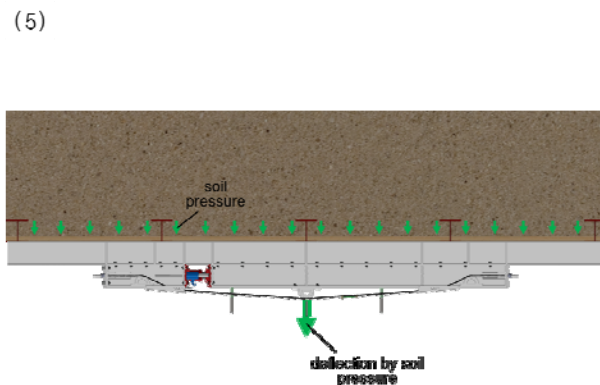
(2) 터파기



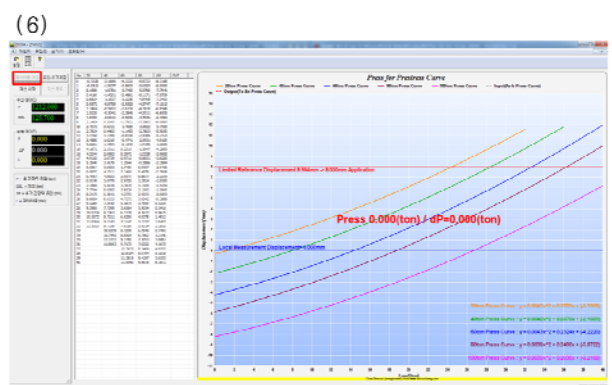
(3) 프리스트레스 재하



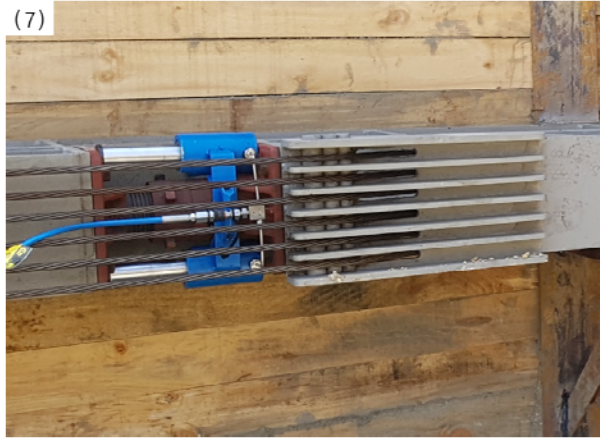
(4) HiCT 띠장 거치



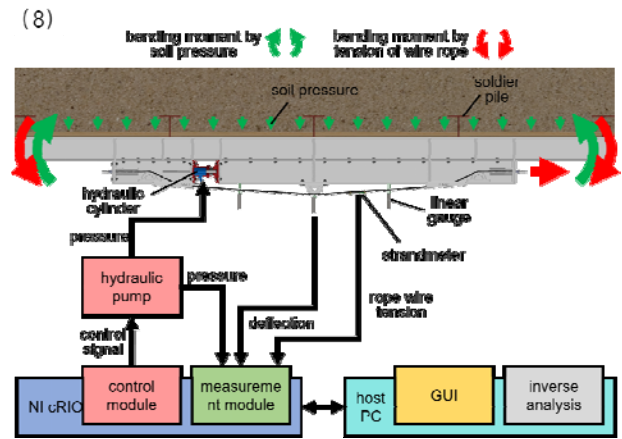
(5) 수평 변위 기준 이상 발생



(6) 역해석



(7) 프리스트레스 유압 제어



(8) 피드백을 통한 정보화 시공

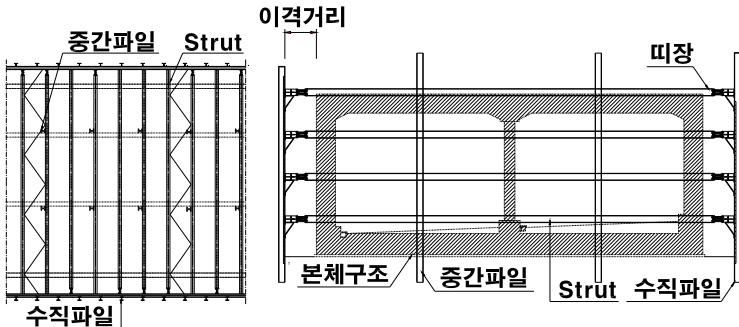
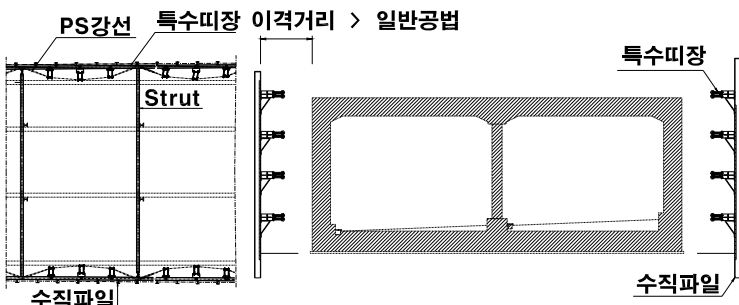
- HiCT 공법은 다음과 같은 순서로 시공 한다.

- (1) 수직파일 설치 - 터파기에 앞서 수직 파일을 설계값에 따라 일정 간격으로 삽입 설치 한다.
- (2) 터파기 - 설계값에 따른 일정 깊이의 터파기를 한다.
- (3) 프리스트레스 재하 - 띠장 설치 위치에서의 설계값으로 프리스트레스를 재하 한다.
- (4) HiCT 띠장 설치 - 띠장을 설치한다.
- (5) 수평 변위 기준 이상 발생 - 터파기가 진행됨에 따라 토압이 변경되고 그에 따른 수평방향 처짐을 계측하여 안전 기준 이상의 처짐이 발생하는지 계측한다.
- (6) 역해석 - 역해석 프로그램을 통하여 안전 기준 이하로 복원되는 유압 실린더 힘을 계산한다.
- (7) 프리스트레스 유압 제어 - 띠장의 수평방향 처짐이 안전 기준 이하가 되도록 유압 실린더를 제어한다.
- (8) 피드백을 통한 정보화 시공 - 띠장의 처짐은 실시간 주기적으로 계측하여 띠장의 수평방향 처짐이 발생시 (5)~(7)을 반복한다.

1-3. 장경간 무지보 공법개발

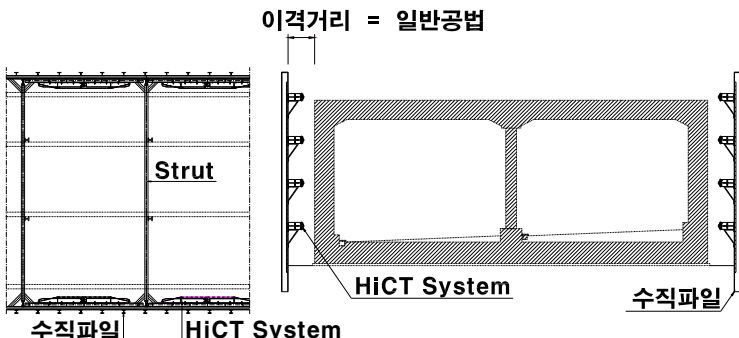
1-3-1. 기존 기술의 문제점

표 1-3-1. 기존 공법의 문제점

구분	평 면 도 · 단 면 도	문 제 점
일반 공법		• STRUT간격 2.5~3.0m • STRUT · 중간파일 강재 증가 • 공사비, 공사기간 증가 • 본체구조물 시공간섭 최대 • 본체구조물 품질 저하 • 정보화시공 미확보
장지간 기존 기술		• STRUT간격 6.0~20.0m • 이격거리 증가 ⇒ 토공 · 용지 증가 • 특수강종사용, 공사비 증가 • 본체구조물 시공간섭 최소 • 토압변화 재간장 곤란 • 정보화시공 미확보, 안전성저하

1-3-2. HiCT 공법의 착안사항

표 1-3-2. HiCT 공법의 착안사항

구분	평 면 도 · 단 면 도	착 안 사 항
HiCT 공법		• STRUT간격 6.0~25.0m • 이격거리 일반공법과 동일 • 공사비 · 공사기간 축소 • 본체구조물 시공간섭 최소 • 토압변화 재간장과 예측 • 정보화시공 시스템 구축, 안전성 높음 • 일반강재 사용 · 범용성

1-3-3. HiCT 공법 기본 원리

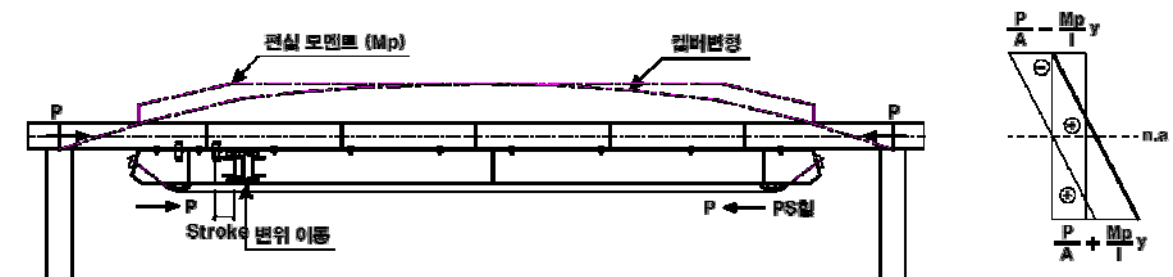


그림 1-3-3(1). 초기 프리스트레스 도입

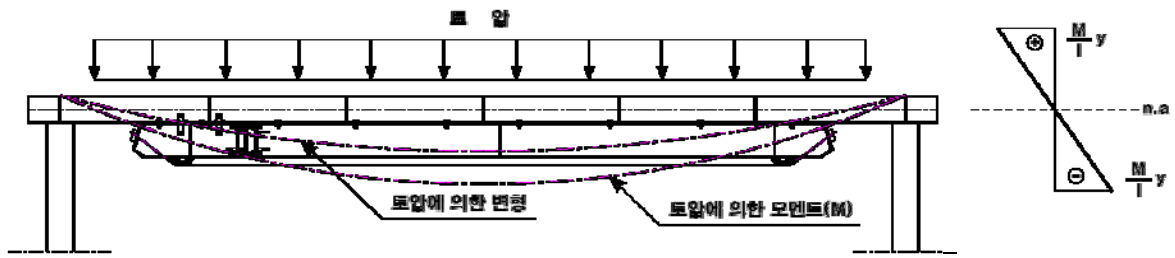


그림 1-3-3(2). 토압에 의한 처짐 발생

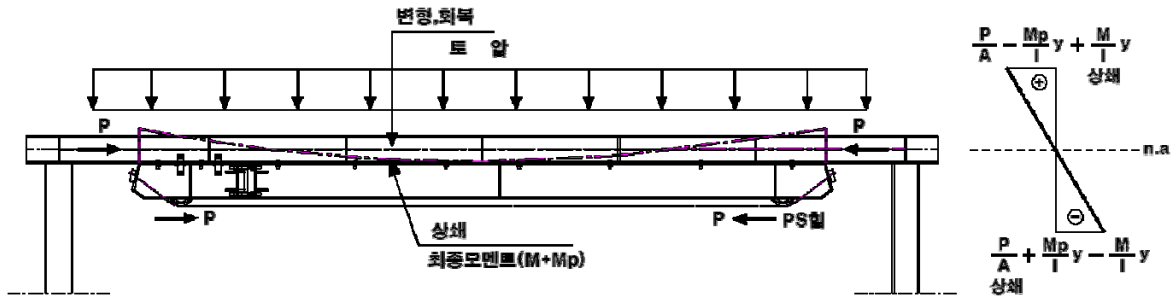


그림 1-3-3(3). 추가 긴장력 도입으로 토압에 의한 처짐 상쇄

- HiCT 공법의 기본 원리는 설계값에 의하여 프리스트레스를 발생시킨 띠장을 센서시스템으로 띠장의 변화를 주기적으로 계측하다가 토압에 의한 띠장의 변화량이 일정 안전 기준 이상이 되었을 경우 유압 제어 시스템을 통하여 HiCT 띠장에 PS 힘에 의한 편심 모멘트를 발생시켜서 토압에 상쇄되는 변위를 발생시키는 것이다.

1-3-4. 시공 조건에 따른 HiCT 공법 종류

○ SYSTEM- I (일반적인 구간 적용)

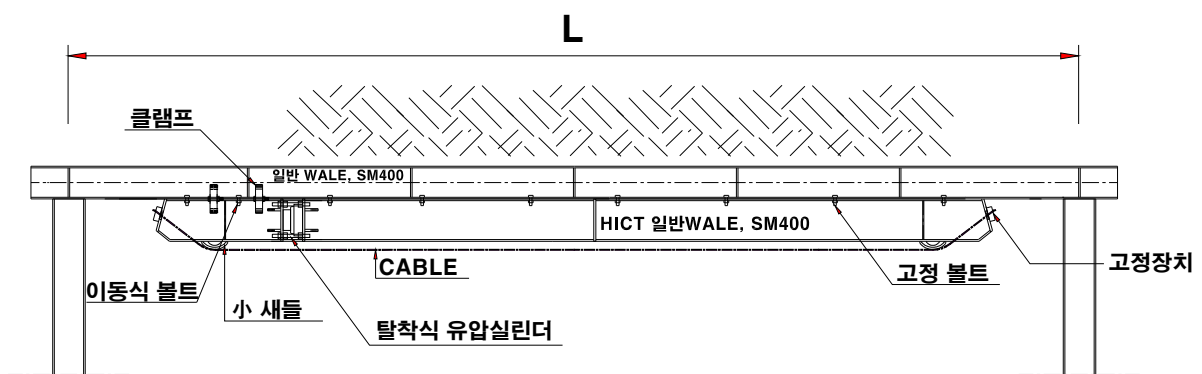


그림 1-3-4(1). 일반 구간에 적용하는 SYSTEM- I

○ SYSTEM-II (변단면이 있는 구간 적용)

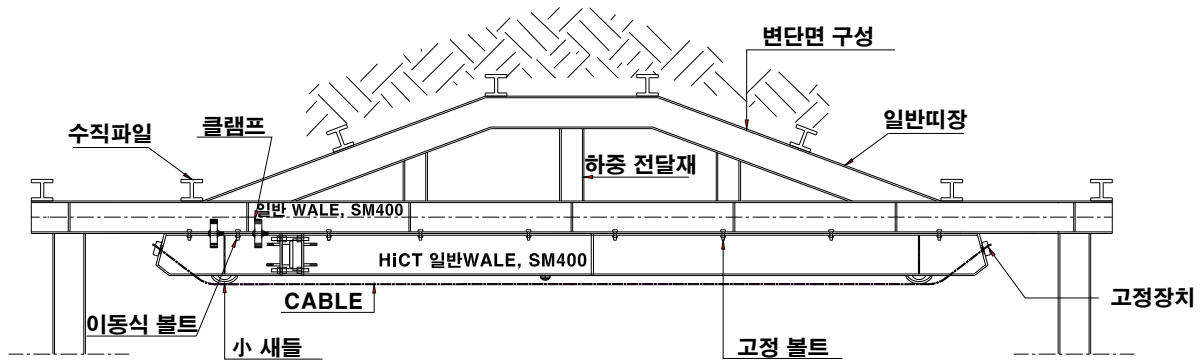


그림 1-3-4(2). 변단면에 적용하는 SYSTEM-II

○ SYSTEM-III (버팀보 간격이 15m 이상인 구간 적용)

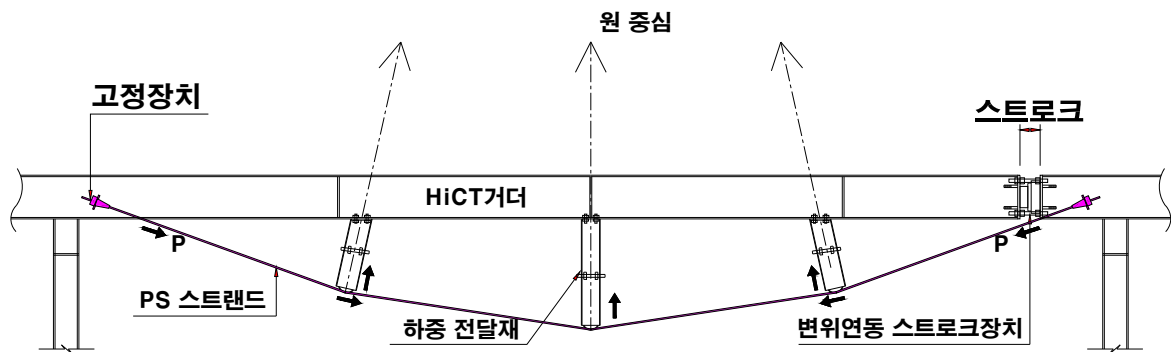


그림 1-3-4(3). 버팀보 간격이 15m 이상인 구간에 적용하는 SYSTEM-III

○ SYSTEM-IV (소규모 굴착공사, 완전 무지보)

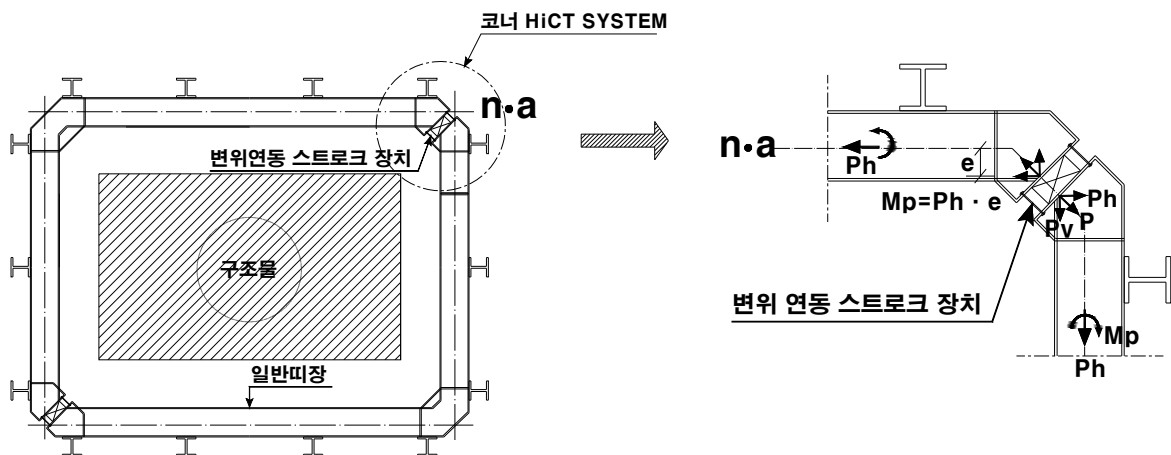


그림 1-3-4(4). 소규모 굴착공사에 적용하는 SYSTEM-IV

1-3-5. 수동윙리머판에 의한 장경간 H-PILE

표 1-3-5. 수동윙리머판에 의한 장경간 H-PILE

구 분	HiCT 공법	기 존 공법
간 격	2.5~3.0 m	2.0 m
수직 PILE	H-300X200X9X14	H-300X200X9X14
정면도		
수동 영역	약 1.0 ~ 1.2 m	약 0.5 ~ 0.6 m
두 께	60 ~ 100 mm	60 ~ 150 mm
토 류 판 간 격	1.45 m 전 후	1.9 m
공사비 공기	수직 파일 천공 0.65 (기존공법비율) 수직 파일 설치 0.65 (“) 토 류 판 설치 0.90 (“)	수직 파일 천공 1.0 (기존공법비율) 수직 파일 설치 1.0 (“) 토 류 판 설치 1.0 (“)

1-4. 실내 시험체 제작

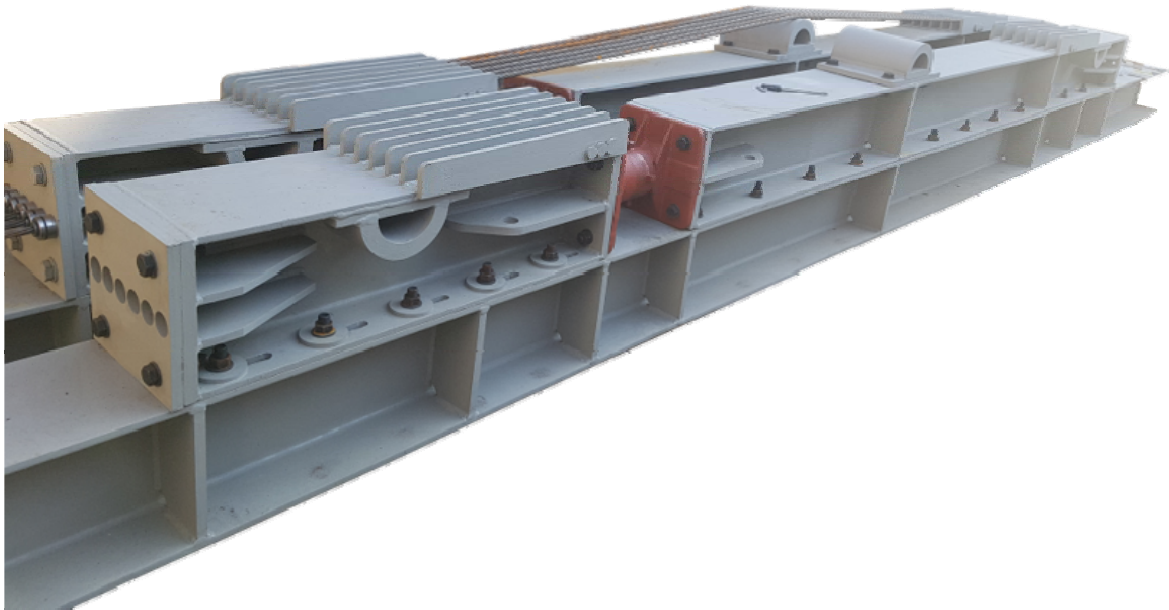


그림 1-4. 실내 시험체 제작

- HiCT 띠장의 파일럿 테스트를 위한 실내 시험체는 8m 경간으로 공동연구기관인 동성엔지니어링의 구조계산을 토대로 설계·제작되었다. 8m 경간 토압 40kN/m의 외력이 작용했을 시에 초기 긴장력과 강연선의 개수, 빔 체결에 필요한 볼트의 전단력 검토를 통해서 필요 볼트수를 산정하였다.

1-5. 장경간 무지보 공법장치 개발

1-5-1. H빔 내부 강연선 가이드 장치



그림 1-5-1. H빔 내부 강연선 가이드 장치

- H빔 외부뿐 아니라 내부에도 강연선의 위치를 잡아주는 가이드장치를 제작하였다. 가이드 장치는 강연선을 정착구에 빔과 평행으로 위치할 수 있게 해줌으로써 모노 스트랜드 책을 이용한 초기 긴장을 용이하게 해준다. 또한 취약부인 H빔 끝단부의 보강판 설치시 강연선의 간섭을 없애준다.

1-5-2. 강연선 통과 장공부분 강봉 결합 보강판

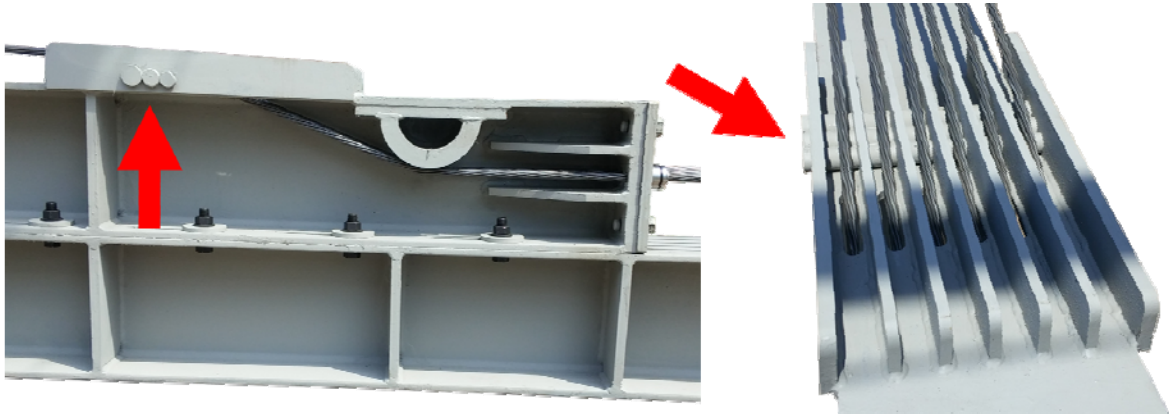


그림 1-5-2. 강연선 통과 장공부분 강봉 결합 보강판

- 강연선이 수월하게 통과하기 위해 H빔 상부를 장공으로 설계하였고 그에 따라 압축응력에 저항하는 빔 강성이 저하할 것으로 예상되어 보강을 하였다. 보강부에 강봉을 결합하여 하단의 가이드 장치와 상단의 보강부 강봉과 각도를 크게 함으로써 수평 긴장력이 수직 분배되는 힘이 더 커지도록 하였다. 즉, 강선의 긴장력에 따른 수평방향 처짐의 복원정도가 더 높아지도록 하였다.

1-5-3. 반력식 선행하중책을 이용한 추가 긴장 도입

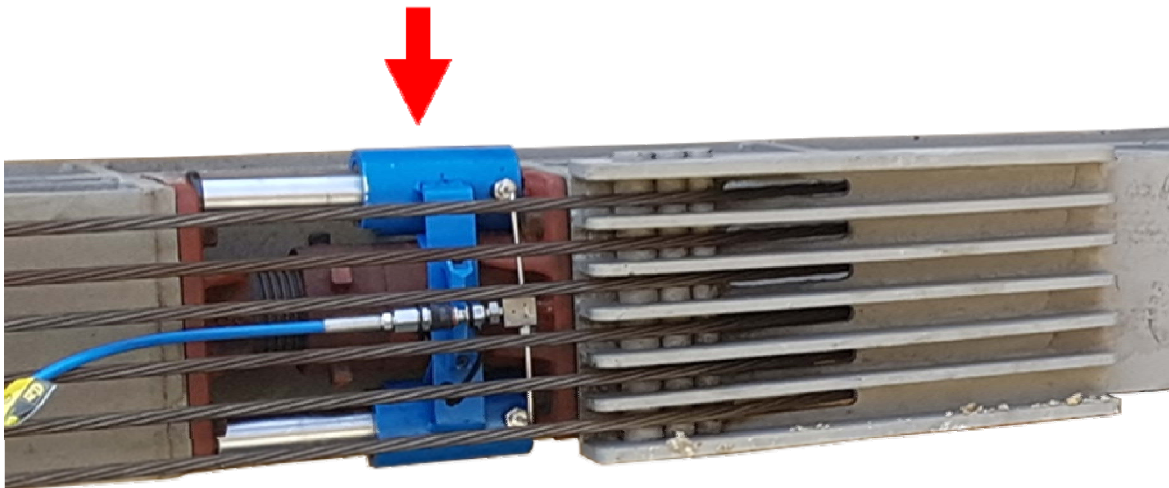


그림 1-5-3. 반력식 선행하중책

- 띠장의 설치 위치에 따른 설계값으로 초기긴장력을 도입한 상태에서 띠장을 설치하지만 실제 굴착 과정에서는 설계치에서 벗어날 수 있다. 토압의 변화에 따라 띠장이 안전기준을 넘어 변형이 되면 유압 실린더가 스크루 잭을 밀어서 추가적인 긴장력을 도입할 수 있게 하였다.

1-6. 정보화시공 통합시스템 연계

1-6-1. 흙막이 공법의 정보화시공 필요성

- 설계조건에서 가정한 토질조건의 변화로 실제 토류벽의 거동과 주변 지반 변형이 설계결과와 다를 수 있다. 현장의 토류벽이 예기치 못한 원인 등에 의하여 이상 거동을 할 경우 신속하게 손쉽게 대처할 수 있는 시스템이 필요하다. 즉, 토질조건, 토류벽 거동, 주변 지반침하등에 따른 종합분석과 예측하는 시스템과 이상 발생시 대처하여 안전 범위 내로 복원할 수 있는 시스템이 필요하다.

1-6-2. 흠막이 공법의 정보화시공

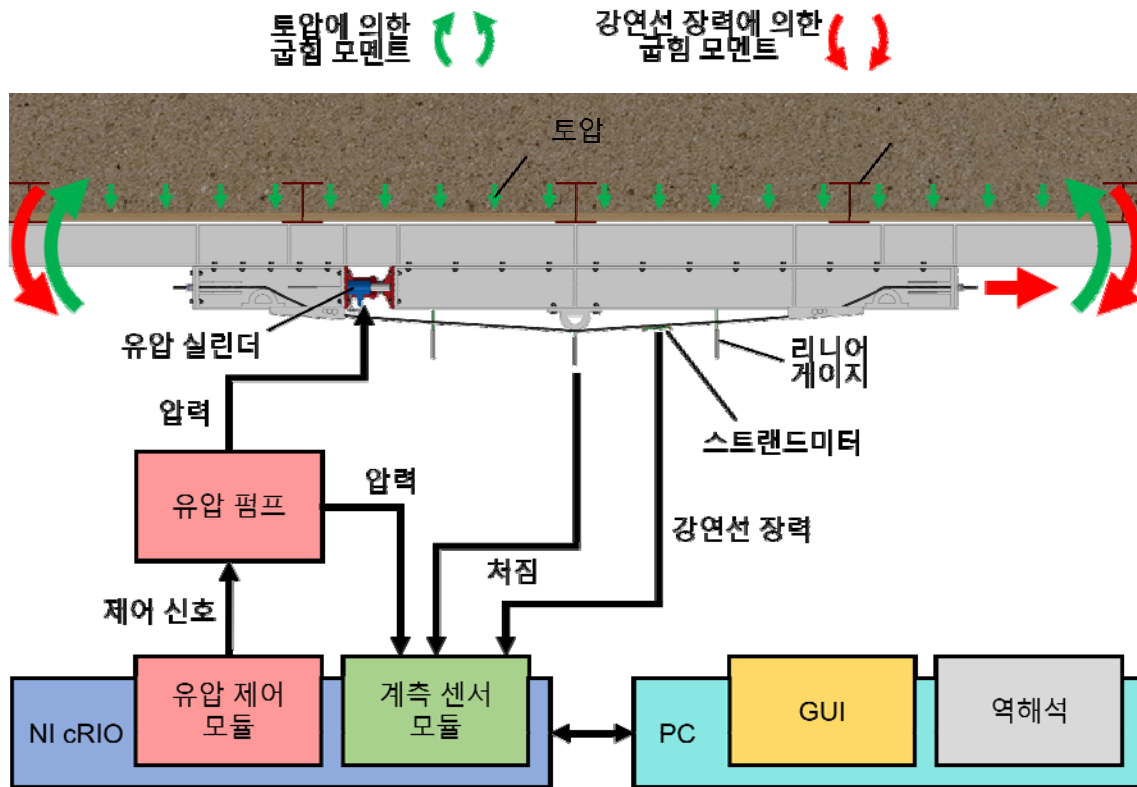


그림 1-6-2(1). HiCT 공법 개념도

- HiCT 흠막이 공법은 구조체와 계측·제어 시스템, 역해석이 통합되어 있는 정보화 시공법이다. 띠장은 설치 환경에 따라 설계값에 따라 프리스트레스가 도입된 상태에서 설치가 되지만 토질조건, 지반 침하 등 주변 환경 변화에 따라 설계값과 다른 토압을 받게 될 수 있다. 설계값과 다른 토압에 따른 띠장의 이상 거동은 계측 시스템에 의하여 주기적으로 계측 가능하다. 띠장이 기본 설치시에 도입된 프리스트레스에서 벗어난 하중을 받게되어 안전 기준 이상 변형이 발생하면 역해석 프로그램을 통하여 띠장이 다시 안전 기준 내로 복원이 되는 유압 실린더 힘을 산출하고 이 값을 유압 제어 시스템을 이용하여 제어함으로써 기존 설계치에서 벗어났을 경우의 피드백 제어를 할 수 있다. 이 과정을 순서도로 나타내면 다음과 같다.

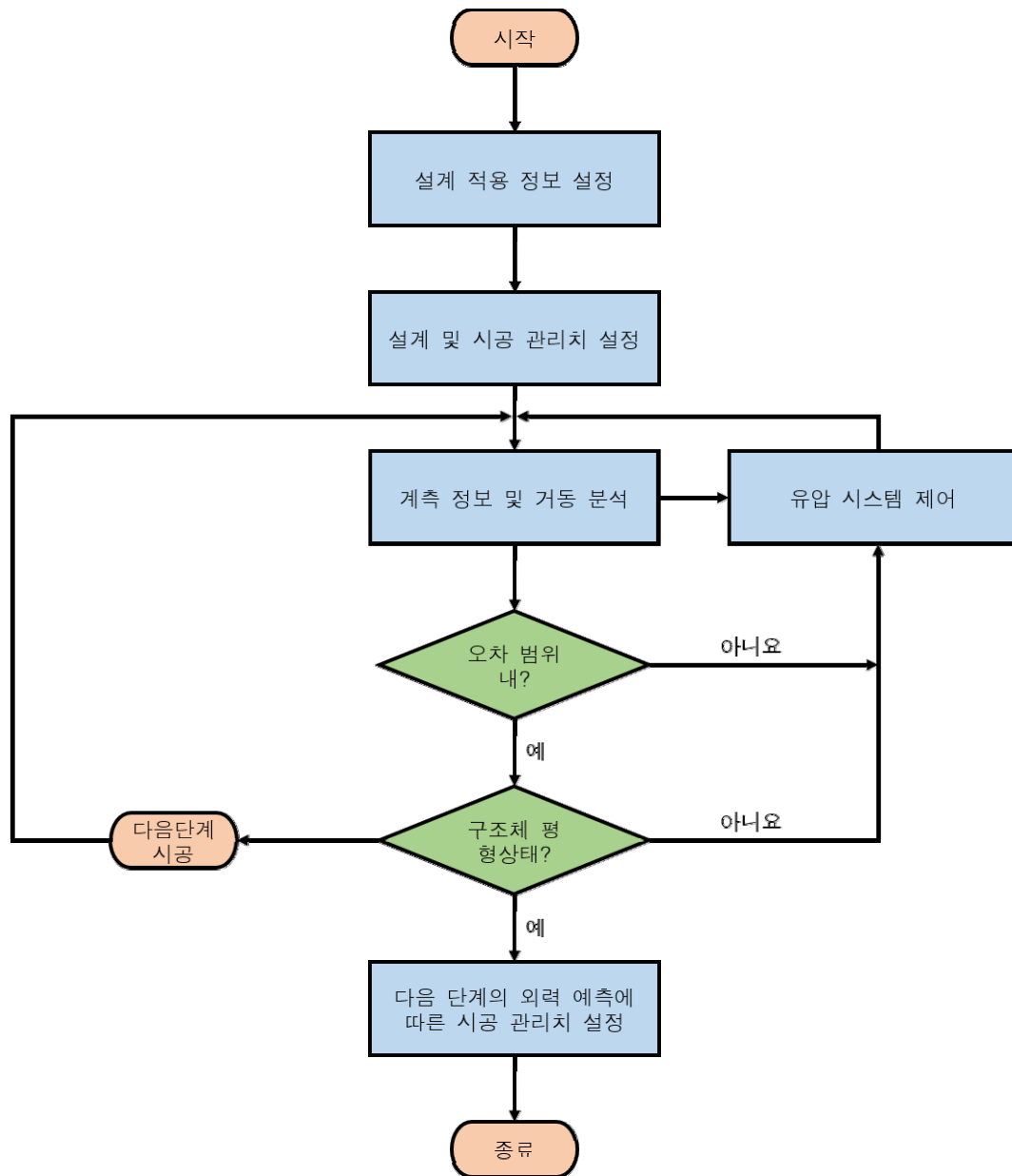


그림 1-6-2(2). HiCT 공법 알고리즘

1-7. 현장 시험 시공 및 디버깅



그림 1-7. 모노 스트랜드잭을 이용한 강연선 초기 긴장 순서

-
- HiCT 띠장은 모두 6개의 강연선을 이용하여 띠장에 프리스트레스를 발생시키며 초기 긴장 도입 시 설계값에 따른 장력을 모노 스트랜드잭을 이용하여 각 강연선을 하나씩 도입한다. 장력을 도입하는 강연선은 모노 스트랜드잭에 의하여 목פות값으로 도입이 되지만 다른 강연선의 장력은 기존에 도입되었던 장력보다 줄어들게 된다. 이는 실외 파일럿 테스트를 진행할 때 스트랜드미터를 이용한 강연선 장력 측정으로 발견된 문제이다. 이를 해결 하기 위하여 각 강연선의 모노 스트랜드잭을 이용한 장력 도입 시 같은 목פות값에 대하여 6개의 강연선의 장력을 교차하여 여러 번 반복하여 도입함으로써 모든 강연선에 균일한 초기 목פות 장력이 도입 되도록 한다. HiCT 띠장의 각 강연선은 나란히 거치되어 있기 때문에 한 번 균일한 초기 장력이 도입되어 있으면 유압 실린더를 이용한 추가 장력 도입 시 균일한 장력이 도입 된다고 가정할 수 있다.

1-8. 시공 및 유지관리 가이드라인 개발(초안) (p.97 4-2에 작성)

2. 계측센서시스템 및 유압제어시스템, 통합제어시스템 개발

2-1. 국내외 유사형식 기술 및 문헌조사 (p.6 제2장에 작성)

2-2. 계측센서 시스템 설계 및 제작

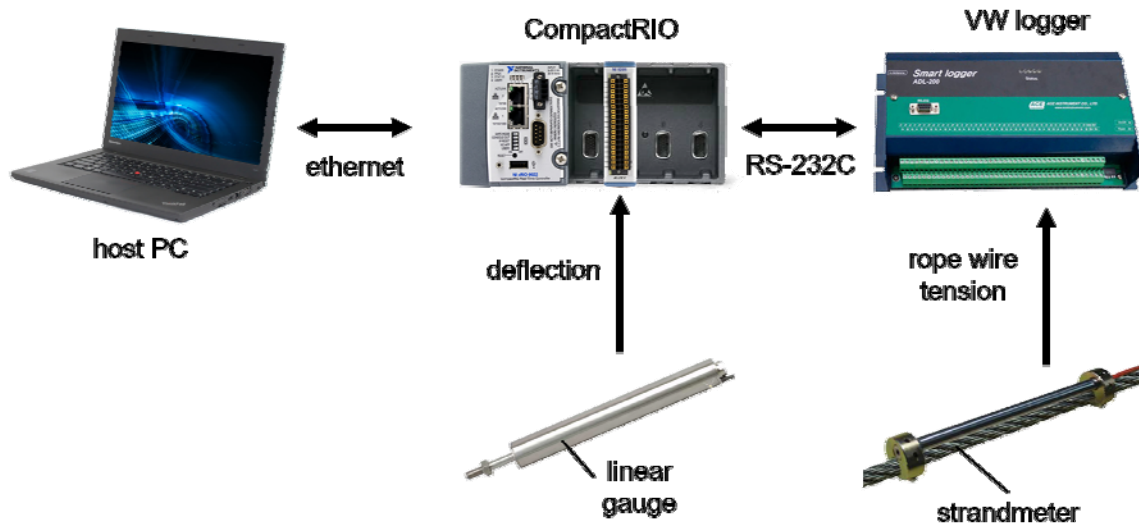


그림 2-2. 계측 센서 시스템 구성도

- 띠장의 처짐을 측정하기 위하여 리니어 게이지, 강선의 변형률을 측정하기 위하여 스트랜드미터를 설치하고 각 센서들의 데이터를 수집 하기 위한 계측 센서시스템을 설계 및 제작 하였다.

2-2-1. 계측 센서

○ 스트랜드미터 (strandmeter)

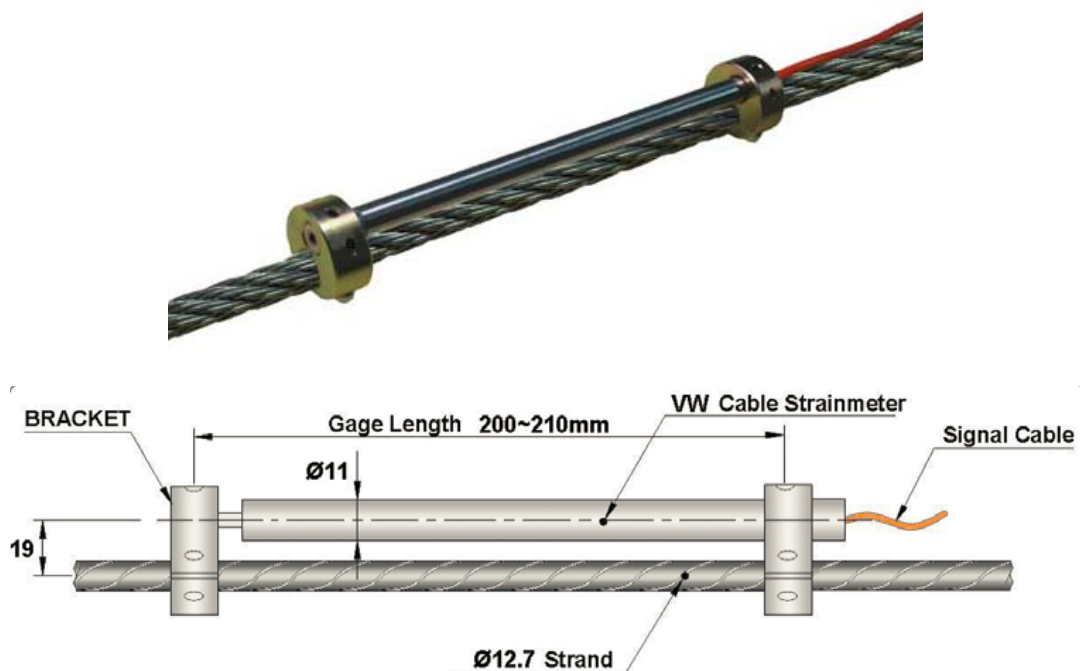


그림 2-2-1(1). 스트랜드미터 (주에이스 인스트루먼트)

- (쥬에이스 인스트루먼트(ACE Instrument)의 진동현(vibrating wire) 센서로 강선의 변형률을 측정한다. 브라켓을 이용하여 강선과 평행하게 설치하여 강선의 변형에 따라 스트랜드미터도 같이 변형이 된다. 방수 능력은 50 mH2O로 토목 계측 현장에서 수분과 분진에 노출되어 사용되는 것이 검증 되었다.
- 모델명 1315
- 측정범위 30,000 $\mu\epsilon$
- 분해능 $\pm 0.025\%$ FSR
- 정확도 $\pm 0.1\%$ FSR

○ 리니어 게이지 (linear gauge)



그림 2-2-1(2). 리니어 게이지 (Omega Engineering)

- 오메가 엔지니어링(omega engineering)의 LVDT 타입 센서로 띠장의 처짐을 측정한다. 방진등급은 IP67로 작은 먼지도 통과할 수 없고, 1m 깊이의 물에 침수 가능하다.
- 모델명 LD620-50
- 측정범위 ± 50 mm
- 선형성 $< 0.2\%$ FS0
- 출력리플전압 0.02% FS0

2-2-2. 계측 센서측정 모듈

○ 스트랜드미터 측정 모듈

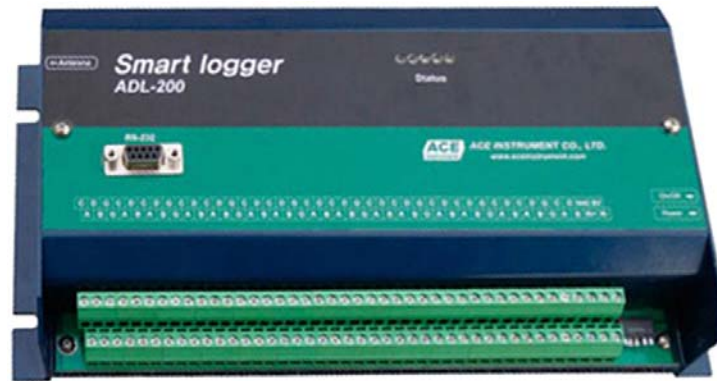


그림 2-2-2(1) 스트랜드미터 측정 모듈 ADL-200 스마트로거 (쥬에이스 인스트루먼트)

- 에이스 인스트루먼트의 스트랜드미터를 측정하기 위한 로거로 진동현 타입의 센서를 가진 입력하여 센서의 상태 변화에 따른 진동수를 측정할 수 있다. 측정된 진동수는 CompactRIO로 RS-232C 통신을 통하여 전달한다.
- 열가변저항기(thermistor)가 포함 된 16개의 채널

○ 전압 입력 모듈

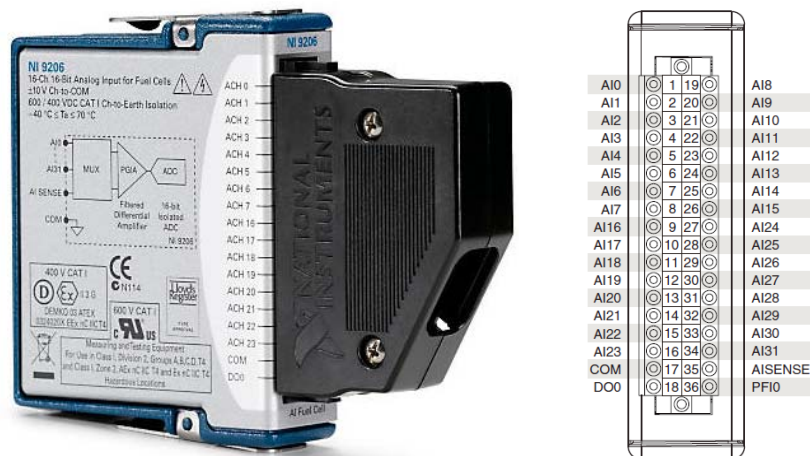


그림 2-2-2(2). 전압 입력 모듈 NI 9206 (National Instrument)

- 리니어 게이지로부터 나오는 전압을 측정하기 위하여 통합제어기인 내쇼날 인스트루먼트의(National Instrument)의 CompactRIO 용 전압 입력 모듈을 사용한다.
- 모델명 NI 9206
- 16개의 차동 아날로그 입력
- 분해능 16bit
- ± 200 mV, ± 1 V, ± 5 V 및 ± 10 V 프로그램 가능한 입력 범위

2-3. 유압제어 시스템 설계 및 제작

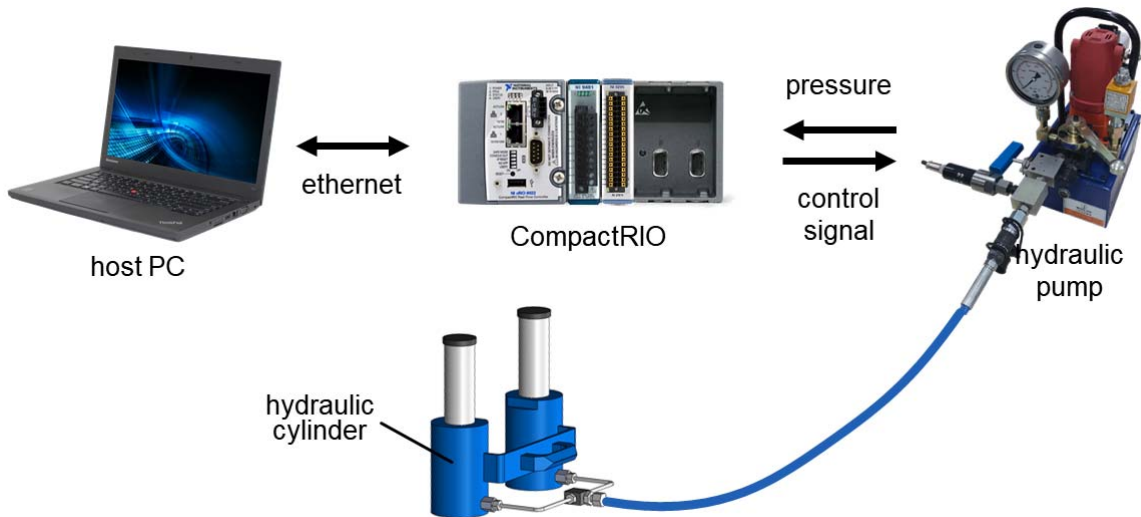


그림 2-3. 유압 제어 시스템 구성도

- 띠장에 토압에 의한 처짐이 발생하였을 때 프리스트레스를 발생시키기 위한 유압제어 시스템을 설계 및 제작 하였다. 통합 제어기인 CompactRIO가 유압 펌프로부터 압력은 피드백 받아서 유압 펌프의 ON/OFF 신호를 제어하여 실린더의 목표 압력을 제어한다.

2-3-1. 유압 제어 시스템 하드웨어

○ 단동 이중 실린더

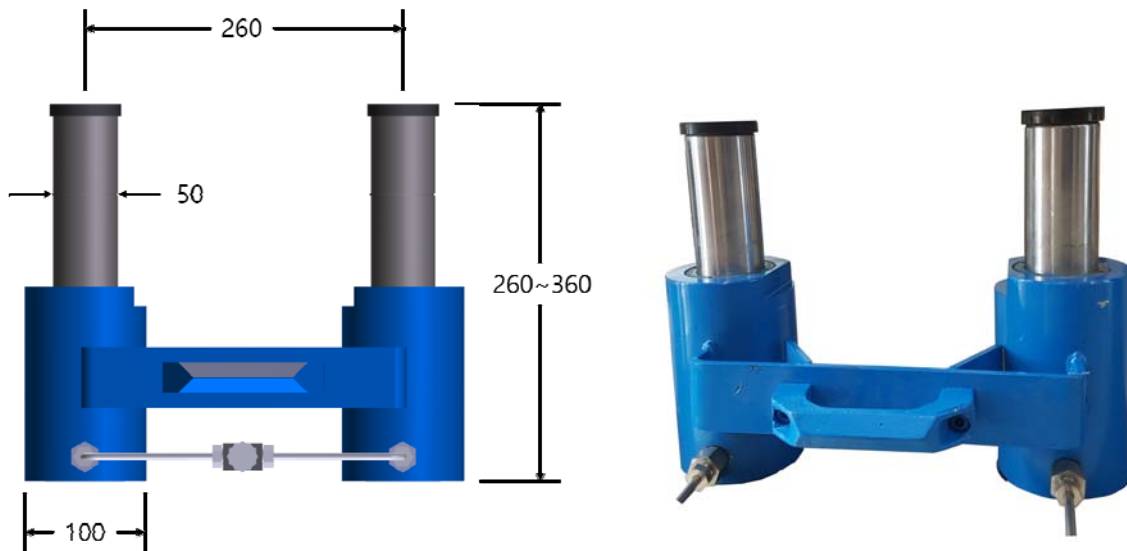


그림 2-3-1(1). 단동 이중 실린더

- ㈜스마트 엔지니어링의 선행하중재를 이용하여 띠장에 프리스트레스를 발생시킨다. 스마트 엔지니어링의 선행하중재는 단동 이중 실린더와 핸드 펌프로 구성되어 있다. 본 연구에서는 핸드 펌프를 전동 펌프와 압력 센서를 포함한 유압 제어 시스템으로 대체하여 프리스트레스를 정밀하게 발생시킬 수 있도록 시스템을 구축하였다.
- 모델명 SPJ-3 반력식 선행하중재

- 구동범위 100 mm
- 최소/최대길이 310/410 mm
- 단동 실린더 두 개가 하나의 펌프로부터 유량을 받는 구조
- 최대 구동 압력 1500 bar
- capacity 실린더 하나당 50 tf - 이중 실린더로 전체 100 tf

○ 고압 전동 펌프



그림 2-2-1(4). 고압 전동 펌프

- 일반적인 토목 현장에서 사용하는 유압 실린더의 전동펌프 구동 압력은 700 bar 이지만 본 연구에서 사용하는 유압 실린더의 구동 압력은 1500 bar로 같은 크기에 두배 이상의 힘을 발생할 수 있다.

○ 압력 센서



그림 2-2-1(3). 압력 센서 PMSK2500KAA (SENSYS)

- 전동 펌프의 출력단에 압력센서를 부착하여 실린더의 압력을 측정하고 이를 피드백 하여 유압 실린더가 일정 압력을 유지하도록 한다.
- 모델명 PMSK2500KKAA (SENSYS)
- 측정범위 2500 bar
- 출력 4 wire 0~10V
- 정밀도 $\pm 0.5\%FS(RSS)$

○ 전동 펌프 제어 모듈

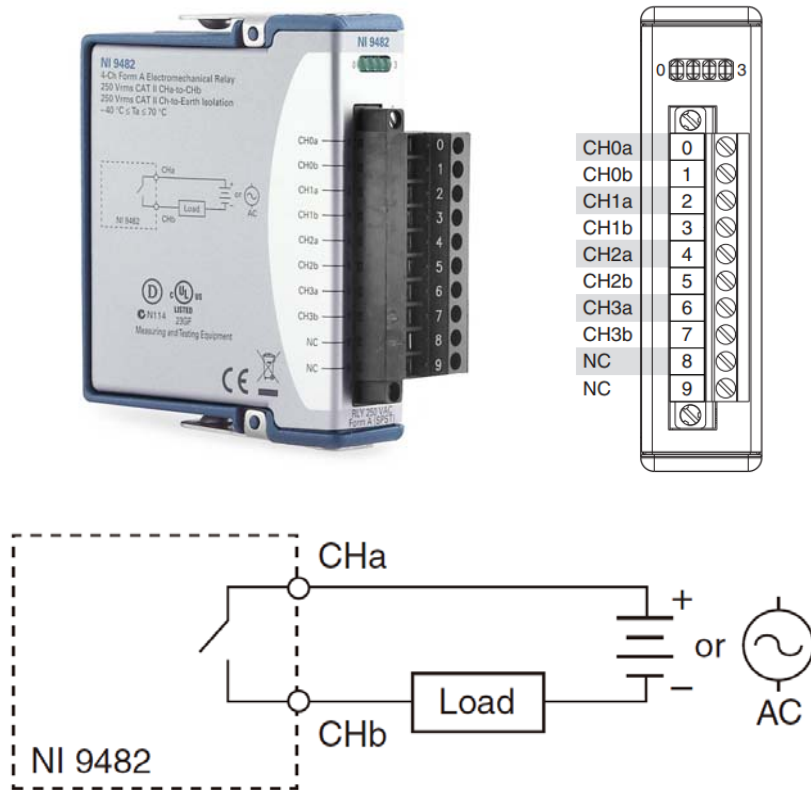


그림 2-2-1(4). 전동 펌프 제어 모듈 NI 9482 (National Instrument)

- 유압 펌프를 ON/OFF 하기 위하여 통합 제어 시스템인 National Instrument의 CompactRIO용 릴레이 모듈을 사용하였다. 릴레이가 ON 되었을 때 펌프에 전력이 공급되어 실린더가 전진하게 되고 OFF 시에는 유압을 유지한채로 정지해 있다.
- 모델명 NI 9482 (National Instrument)
- 최대 구동 전압 250 V

2-3-2. 유압 제어 알고리즘

○ 유압 제어 알고리즘 - dead band ON/OFF control

- 유압 힘이 목표 힘 보다 작을 때 작동을 하고 유압 힘이 목표 힘 보다 클 때는 작동을 멈추는 제어 기법은 유압 힘이 목표 힘 부근에서 ON/OFF를 반복하기 떨림(chattering)이 발생한다. (일반적인 ON/OFF control) 일반적인 dead band control ON/OFF control도 특정 범위(band) 근처에서 ON/OFF가 반복되기 때문에 떨림이 발생할 수 있다. 떨림을 보완하기 위하여 기존의 dead band ON/OFF control에서 목표 값에 도달 했던 것에 대한 기록을 나타내기 위하여 flag boolean 변수를 설정하여 다음과 같은 알고리즘을 적용하였다.

- flag = 1 이고 유압 힘 < 목표 힘 일 때에만 유압 펌프를 작동 시킴
- flag = 0 이고 유압 힘 < 목표 힘 일 때에는 유압 펌프를 작동 시키지 않음
- 유압 힘이 목표힘에 도달하게 되면 flag = 0 이 되었다가 유압 힘이 특정 범위를 벗어나게 되면 flag = 1
- 초기 조건(flag=1, high)에서 유압 힘 < 목표 힘 이기 때문에 유압 펌프 작동
- 유압 힘이 목표 힘에 도달하게 되면 유압 펌프의 작동을 멈추고 flag=0 설정 (flag = 0, 유압 힘 < 목표 힘인 경우)
- 유압 힘이 특정 범위 내에 머물러 있는 경우 유압 펌프를 작동시키지 않음 (flag = 0, 유압 힘 < 목표 힘인 경우)
- 유압 힘이 목표 힘에 대한 특정 범위(목표값의 0.5% 이내)를 벗어나는 경우 목표 힘에 도달 할 때 까지 유압 펌프를 작동 시킴(ON) (flag = 1, 유압 힘 < 목표 힘인 경우)
- 유압 힘이 목표 힘에 도달하게 되면 유압 펌프의 작동을 멈추고 flag=0 설정 (flag = 0, 유압 힘 < 목표 힘인 경우)
- 위의 제어를 반복하여 수행

2-4. 통합 제어 시스템 H/W 설계

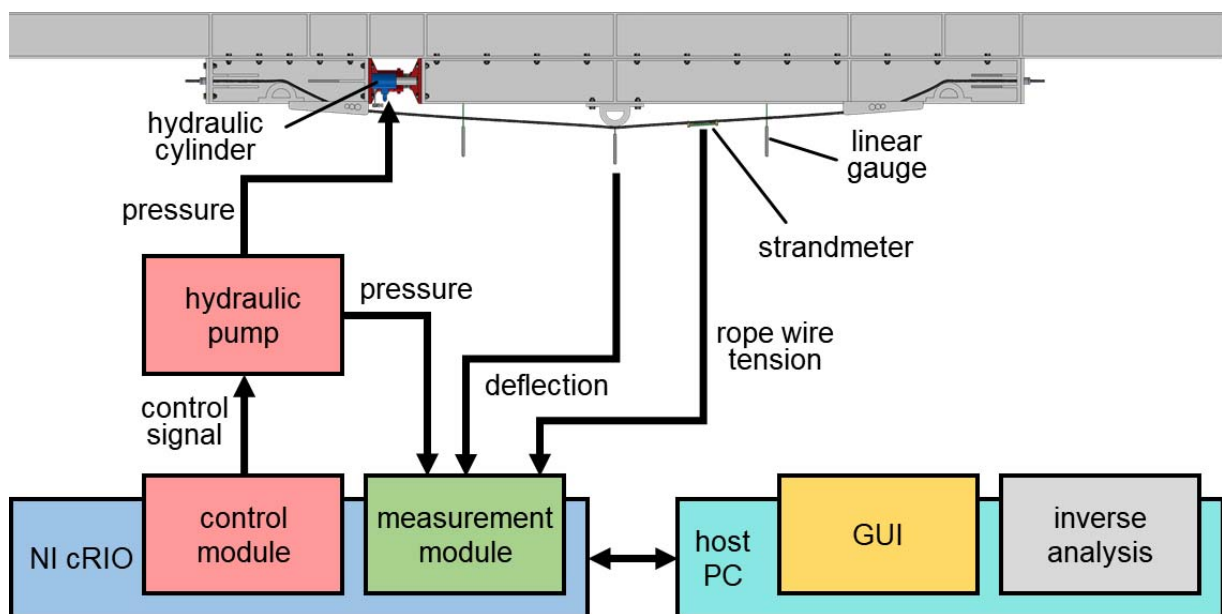


그림 2-4(1). 통합 제어 시스템 구성도

- 계측 제어 시스템과 유압 제어 시스템을 하나의 제어기(NI cRIO, National Instrument)로 통합하여 사용자는 PC의 GUI를 통하여 사용자가 계측 데이터와 유압 제어 상태를 실시간으로 확인할 수 있다. 계측 센서 시스템의 각 센서들이 수집한 값을 바탕으로 PC의 역해석 프로그램이 유압 실린더가 발생 시켜야 할 힘을 계산하고 유압 제어 시스템이 목표힘 값으로 제어를 함으로써 토압으로 인하여 발생된 띠장의 처짐을 프리스트레스로 복원시킨다.

○ 통합 제어기 - NI CompactRIO



그림 2-4(2). 통합 제어기 NI CompactRIO

- 통합 제어기는 National Instrument의 CompactRIO를 사용하여 계측 센서 시스템과 유압 제어 시스템을 통합하였다.

○ 통합 제어 S/W - GUI

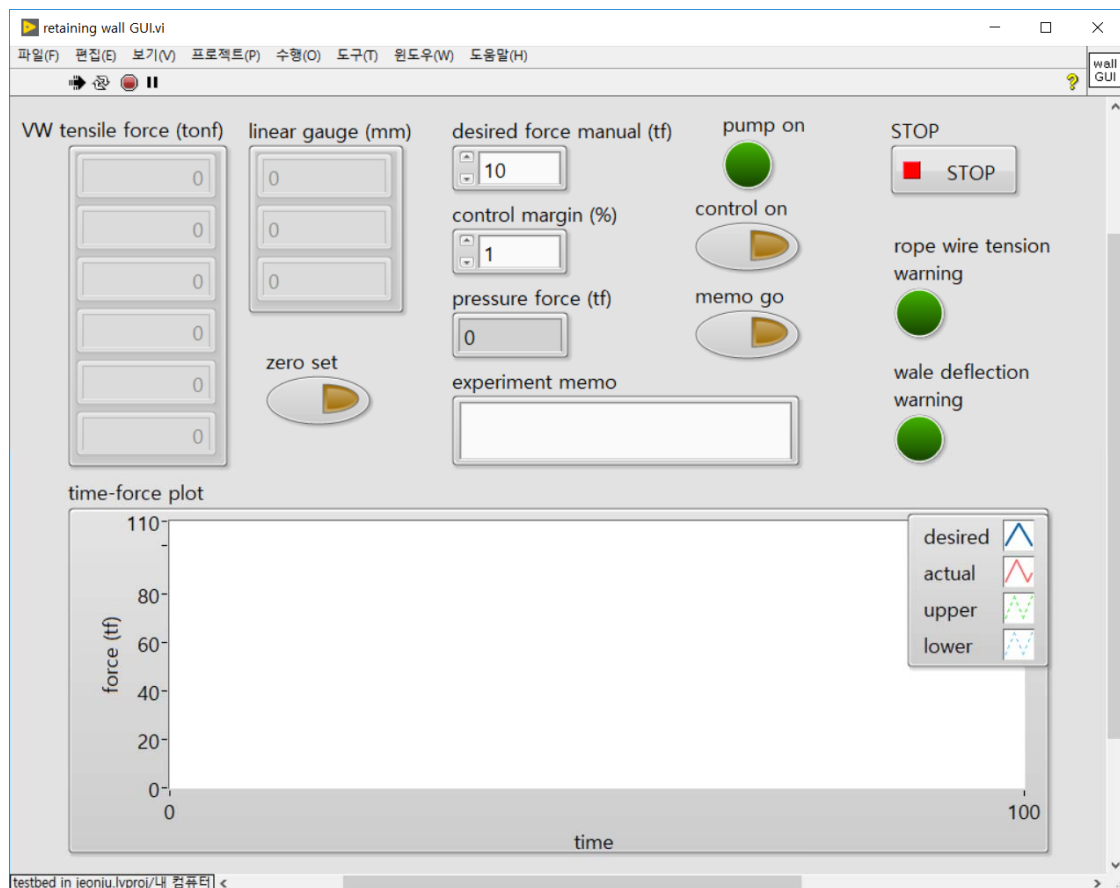


그림 2-4(3). 통합 제어 시스템 GUI

- 사용자는 LabVIEW GUI를 통해 PC에서 락의 처짐 상태와 각 강연선에 걸리는 장력, 유압 제어 상황을 모니터링 할 수 있다.

2-5. 계측센서시스템 강구조 및 test bed 시험

2-5-1. 강연선 장력 - 띠장 처짐

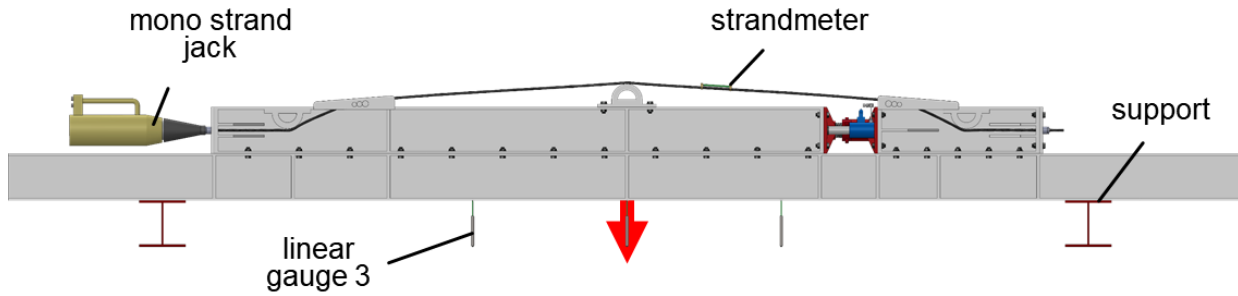


그림 2-5-1(1). 강연선 장력 - 띠장 처짐 측정 시험 개략도

- 토압에 의한 외력이 작용하지 않는 상황에서 합성 띠장의 구조적 물성을 이론값과 비교하기 위하여 강연선에 걸리는 프리스트레스 대한 처짐량을 계측하였다. 전체 6개의 강연선을 각 강연선당 재하 힘을 모노잭을 이용하여 3 tonf씩 증가 시키면서 합성 띠장의 처짐량(숫음량)과 빔의 변형 측정하였다.



그림 2-5-1(2). 강연선 장력 - 띠장 처짐 시험

○ 계측 센서

표 2-5-1(1). 강연선 장력-띠장 처짐 실험에 사용한 계측 센서

measurement data	sensor	raw data	symbol
H빔의 deflection	linear gauge	displacement (mm)	LG-1 ~ LG-3 (3개)
강연선 의 strain	strandmeter	frequency (Hz)	VWS-1 ~ VWS-6 (6개)

○ 시험 순서

표 2-5-1(2). 강연선 장력-띠장 처짐 실험 순서

내용	내용	비고
1	각 강연선 초기 긴장 3 tonf	 mono jack 은 VW sensor naming 기준으로 4-3-5-2-6-1 순서로 jaking 초기 긴장에 따른 linear gauge 솟음량 고려
2	센서 영점 조정	초기 긴장 시 각 강연선 사이의 간섭으로 인해 18 tonf 보다 낮은 15 tonf로 설정
3	각 강연선 6 tonf 하중 재하	전체 36 tonf
4	각 강연선 9 tonf 하중 재하	전체 54 tonf
5	각 강연선 12 tonf 하중 재하	전체 72 tonf
6	각 강연선 15 tonf 하중 재하	전체 90 tonf
7	각 강연선 18 tonf 하중 재하	전체 108 tonf
8	데이터 저장 확인 및 마무리	

표 2-5-1(2). 강연선 장력-띠장 처짐 실험 계측 값

VW-total (tonf)	초기 긴장 15 tonf 포함 VW-total	linear gauge (mm)			비고
		LG-1	LG-2	LG-3	
-0.02	14.98	-0.001	-0.003	-0.002	초기 긴장 완료
13.09	28.09	1.647	1.602	1.32	각 강연선 6 tonf 재하
29.06	44.06	3.494	3.435	2.824	각 강연선 9 tonf 재하
40.88	55.88	5.171	5.117	4.205	각 강연선 12 tonf 재하
54.99	69.99	7.004	6.976	5.722	각 강연선 15 tonf 재하
69.41	84.41	8.767	8.808	7.202	각 강연선 18 tonf 재하

2-5-2. 강연선 장력 - UTM 하중 띠장 처짐

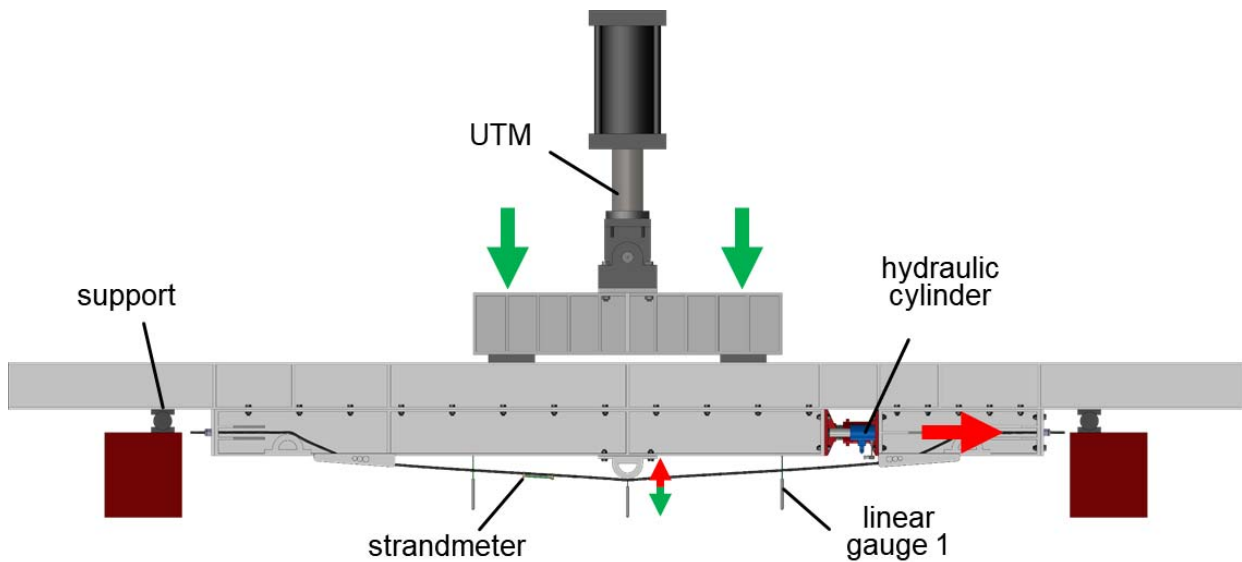


그림 2-5-2(1). 강연선 장력 - UTM 하중 띠장 처짐 시험 개략도

- 토압을 모사한 외력이 작용하는 상황에서 합성 띠장의 구조적 물성을 이론값과 비교하기 위하여 강연선에 프리스트레스가 걸린 상태에서 토압을 모사하는 UTM 으로 합성 띠장을 수직방향으로 힘을 재하 하였을 경우의 처짐량과 빔의 변형을 계측하였다. 유압 실린더를 이용하여 합성 띠장에 프리스트레스를 재하하여 솟음이 발생한 상태에서 토압을 모사하는 수직 방향 UTM 힘을 재하 하였을 경우 프리스트레스에 의한 솟음이 상쇄 되면서 띠장의 처짐이 발생하는 것을 계측하였다.



그림 2-5-2(2). 강연선 장력 - UTM 하중 띠장 처짐 시험

○ 계측 센서

표 2-5-2(1). 강연선 장력 - UTM 하중 합성 띠장 처짐실험에 사용한 계측 센서

measurement data	sensor	raw data	symbol
H빔의 deflection	linear gauge	displacement (mm)	LG-1 ~ LG-3 (3개)
블록 displacement	linear gauge	displacement (mm)	LG-4 (1개)
강연선 의 strain	strandmeter	frequency (Hz)	WVS-1 ~ WVS-6 (6개)

○ 시험 순서

표 2-5-2(2). 강연선 장력 - UTM 하중 띠장 처짐 실험 순서

내용	비고
1 각 강연선 초기 긴장 3 tonf	강연선끼리의 장력에 의한 간섭을 최소화 하기 위해 같은 강연선에 돌아가면서 2~3회 초기 긴장을 하고 간섭을 최소화 했으므로 초기 긴장으로 인한 프리스트레스 18 tf 설정
2 센서 영점 조정	
3 UTM 하중 5 tonf 재하	1 mm/min 으로 UTM 하중 재하
4 UTM 하중 제거	
5 유압 실린더 하중 20 tonf 재하	
6 UTM 하중 10 tonf 재하	1 mm/min 으로 UTM 하중 재하
7 UTM 하중 제거	
8 유압 실린더 하중 40 tonf 재하	
9 UTM 하중 15 tonf 재하	1 mm/min 으로 UTM 하중 재하
10 UTM 하중 제거	
11 유압 실린더 하중 60 tonf 재하	
12 UTM 하중 20 tonf 재하	1 mm/min 으로 UTM 하중 재하
13 UTM 하중 제거	
14 유압 실린더 하중 80 tonf 재하	
15 UTM 하중 25 tonf 재하	1 mm/min 으로 UTM 하중 재하
16 UTM 하중 제거	
17 유압 실린더 하중 100 tonf 재하	
18 UTM 하중 30 tonf 재하	1 mm/min 으로 UTM 하중 재하
19 UTM 하중 제거	
20 데이터 저장 확인 및 마무리	

표 2-5-2(3). 강연선 장력 - UTM 하중 띠장 처짐 실험 계측 값

VW- total (tonf)	초기 긴장 18 tonf 포함 VW-total	cylinder force (tonf)	linear gauge (mm)				강연선 늘음양 (mm)	비고
			LG-1	LG-2	LG-3	LG-4		
0.09	18.09	0	0.031	0.010	0.010	0.013	0.028	가력 시작
0.40	18.40	0	1.881	1.465	1.246	0.184	0.129	하중 05 tonf 재하
0.17	18.17	20	0.025	0.085	0.060	0.033	0.055	하중 05 tonf 제거
4.83	22.83	20	-0.635	-0.584	-0.438	1.968	1.557	유압 20 tonf 재하
7.46	25.46	20	3.167	2.679	2.256	2.132	2.402	하중 10 tonf 재하
2.98	20.98	20	0.192	0.005	-0.017	1.794	0.961	하중 10 tonf 제거
17.31	35.31	40	-2.429	-2.546	-1.942	10.050	5.577	유압 40 tonf 재하
20.88	38.88	40	2.469	2.132	1.917	10.128	6.727	하중 15 tonf 재하
17.20	35.20	40	-1.396	-1.727	-1.374	9.869	5.543	하중 15 tonf 제거
34.32	52.32	60	-4.242	-4.393	-3.406	17.763	11.056	유압 60 tonf 재하
38.00	56.00	60	2.370	2.167	1.979	17.652	12.242	하중 20 tonf 재하
32.39	50.39	60	-2.766	-3.184	-2.554	17.343	10.436	하중 20 tonf 제거
48.26	66.26	80	-5.965	-6.218	-4.793	23.595	15.549	유압 80 tonf 재하
53.87	71.87	80	2.852	2.523	2.298	23.177	17.355	하중 25 tonf 재하
46.44	64.44	80	-3.929	-4.462	-3.573	23.040	14.962	하중 25 tonf 제거
64.66	82.66	100	-8.353	-8.567	-6.583	31.630	20.832	유압 100 tonf 재하
70.66	88.66	100	1.682	1.521	1.710	31.338	22.764	하중 30 tonf 재하
62.70	80.70	100	-5.915	-6.480	-5.115	30.944	20.203	하중 30 tonf 제거

2-5-3. UTM 하중 - 유압 힘 제어 띠장 복원 성능 시험

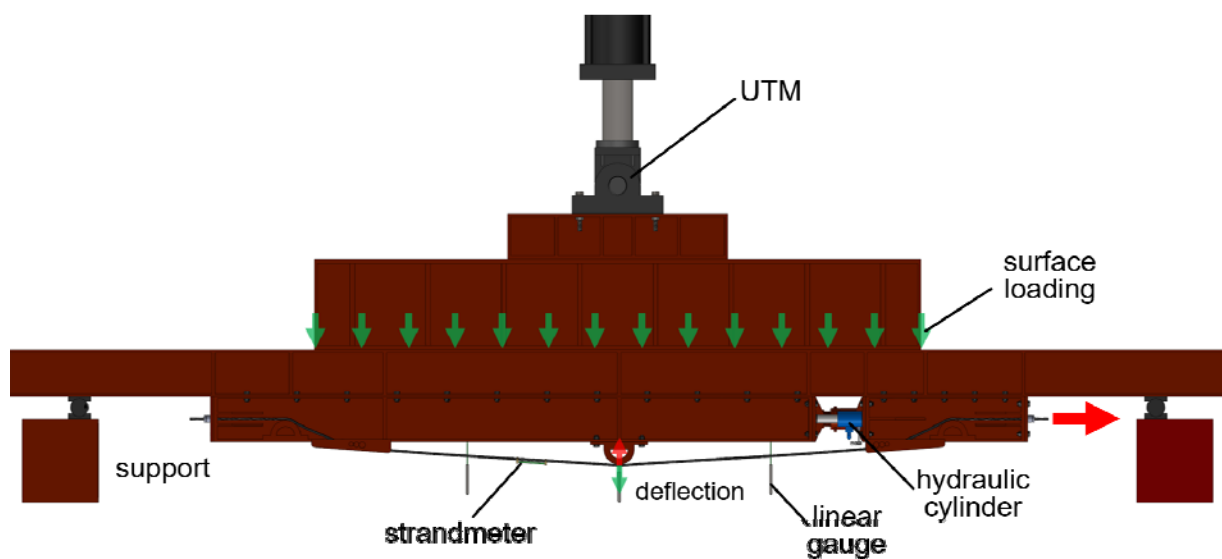


그림 2-5-3(1). UTM 하중 - 유압 힘 제어 띠장 복원 성능 시험 개략도

- 토압을 모사하는 UTM 면압 하중에 대한 띠장의 처짐과 유압 힘에 따라 띠장 처짐의 복원 성능을 시험하기 위하여 띠장의 처짐량과 강연선의 장력, 그리고 유압 실린더의 힘을 계측하였다.

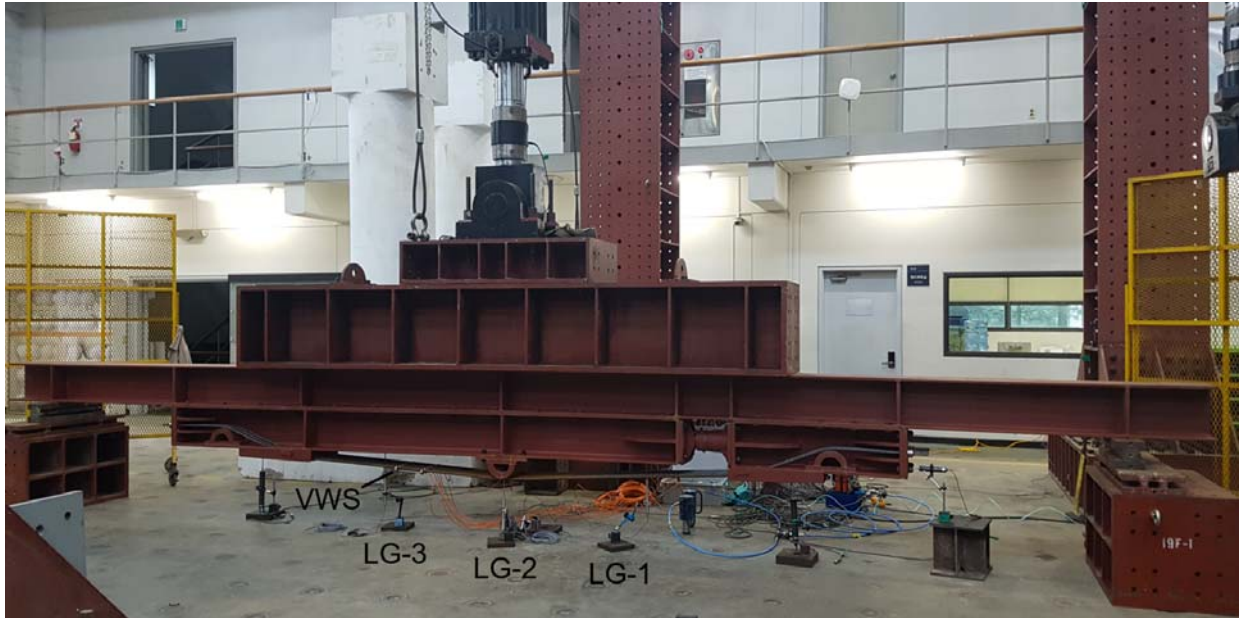


그림 2-5-3(2). UTM 하중 - 유압 힘 제어 띠장 복원 성능 시험

○ 계측 값

표 2-5-3(1). UTM 하중 - 유압 힘 제어 띠장 복원 성능 시험 계측 센서

measurement data	sensor	raw data	symbol
H빔의 처짐	linear gauge	displacement (mm)	LG-1 ~ LG-3 (3개)
강연선 의 변형률	strandmeter	frequency (Hz)	VWS-1 ~ VWS-6 (6개)
유압 실린더의 압력	pressure gauge	voltage (V)	P (1개)

○ 시험 순서

표 2-5-3(2). UTM 하중 - 유압 힘 제어 띠장 복원 성능 시험 순서

순서	내용	비고
1	각 강연선 초기 긴장 4 tf 띠장 구조체의 장력 24 tf 추정	강연선끼리의 장력에 의한 간섭을 최소화 하기 위해 같은 강연선에 돌아가면서 2~3 회 초기 긴장을 하고 간섭을 최소화 했으므로 초기 긴장력 24 tf 추정
2	센서 영점 조정	구조체의 자중에 의한 변형이 포함 강연선의 초기 긴장 24 tf 포함
3	UTM 100 kN 가력	
4	UTM 150 kN 가력	1 mm/min 의 속도로 위치제어를 통하여 가력
5	유압 실린더 50 tf 힘제어	유압 실린더의 힘제어 동안 UTM 은 일정 위치를 유지하다가 유압 실린더 힘 제어가 끝나면 UTM 의 위치제어를 통하여 UTM 가력 힘 목표값으로 다시 제어
6	UTM 200 kN 가력	
7	유압 실린더 70 tf 힘제어	
8	UTM 250 kN 가력	
9	유압 실린더 90 tf 힘제어	
10	UTM 300 kN 가력	
11	유압 실린더 99 tf 힘제어	
12	UTM 330 kN 가력	
13	UTM 가력 힘 제거	1 mm/min 의 속도로 위치제어를 통하여 가력힘 제거
14	유압 실린더 힘 제거	
20	데이터 저장 확인 및 마무리	

○ 계측 값

표 2-5-3(3). UTM 하중 - 유압 힘 제어 띠장 복원 성능 시험 계측 값

wire tension (tf)	LG-1 (mm)	LG-2 (mm)	LG-3 (mm)	UTM force (kN)	cyliner control (tf)
24.00	0.00	0.00	0.00		24 tf
25.79	8.74	8.08	6.10	UTM 100	
27.49	13.35	12.85	10.36	UTM 150	
49.34	11.40	10.84	8.77		50 tf
50.23	14.89	14.28	11.99	UTM 200	
66.90	13.41	12.80	10.78		70 tf
67.39	16.94	16.18	13.95	UTM 250	
85.46	15.50	14.77	12.82		90 tf
86.86	18.97	18.14	16.00	UTM 300	
92.82	18.89	18.10	15.99		99 tf
95.66	21.15	20.22	18.00	UTM 330	
83.07	-7.37	-6.83	-0.67	UTM 0	유압 85 tf
40.22	-0.10	0.37	0.34	UTM 0	유압 20 tf

2-6. 유압제어시스템 강구조 및 test bed 시험 지원

2-6-1. UTM 하중 - 유압 힘 제어 띠장 복원 성능 시험

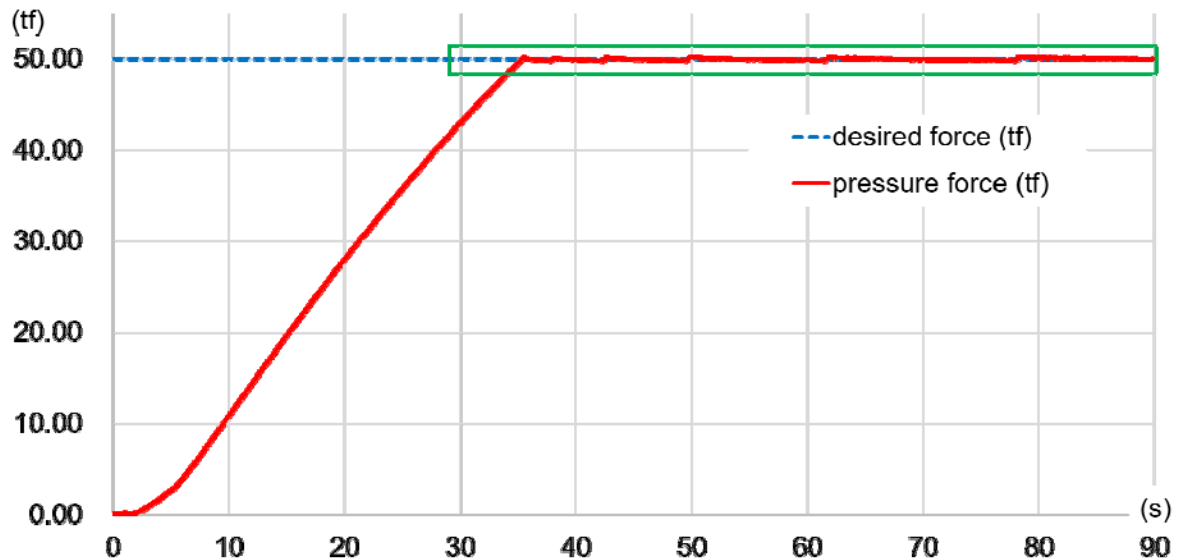


그림 2-6-1(1). 유압 힘 제어 목표값 50 tf

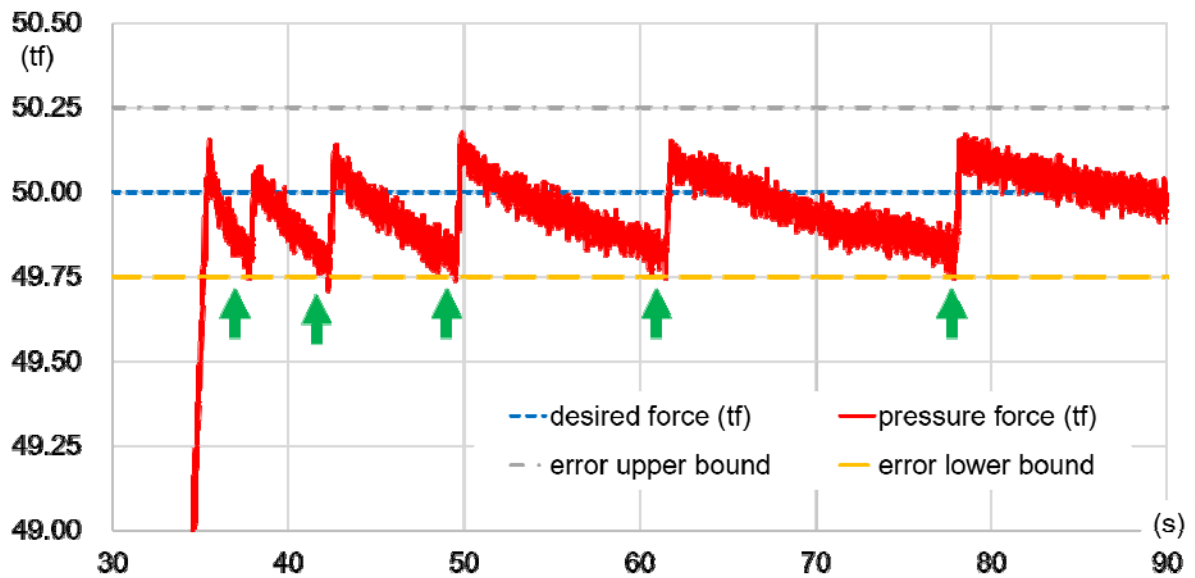


그림 2-6-1(2). 유압 힘 제어 목표값 50 tf(확대)

- 유압 제어 목표값이 50 tf 인 경우를 오차 범위를 목표값의 0.5 % 로 설정 하여(상한값 : 50.25 tf, 하한값 : 49.75 tf) 힘 제어 목표값인 50 tf 에 도달 하게 되면 유압 펌프 “OFF” 한다. 이 때 유압의 특성상 유압 호스의 확장에 의하여 압력이 줄어들게 되거나 외부 구조물의 변형 등으로 유압 힘이 하한값인 49.75 tf 아래로 내려가게 되면 유압 펌프 “ON” 시킨다. 유압 펌프는 다시 목표값인 50 tf 에 도달할 때까지 “ON” 을 유지하다가 목표값인 50 tf 에 도달 하게 되면 “OFF” 한다. 유압의 특성상 50 tf에서 유압 펌프를 “OFF” 하더라도 약간의 초과응답(overshoot) 은 발생하나 이 값이 상한값인 49.75 tf를 초과하지는 않는다.

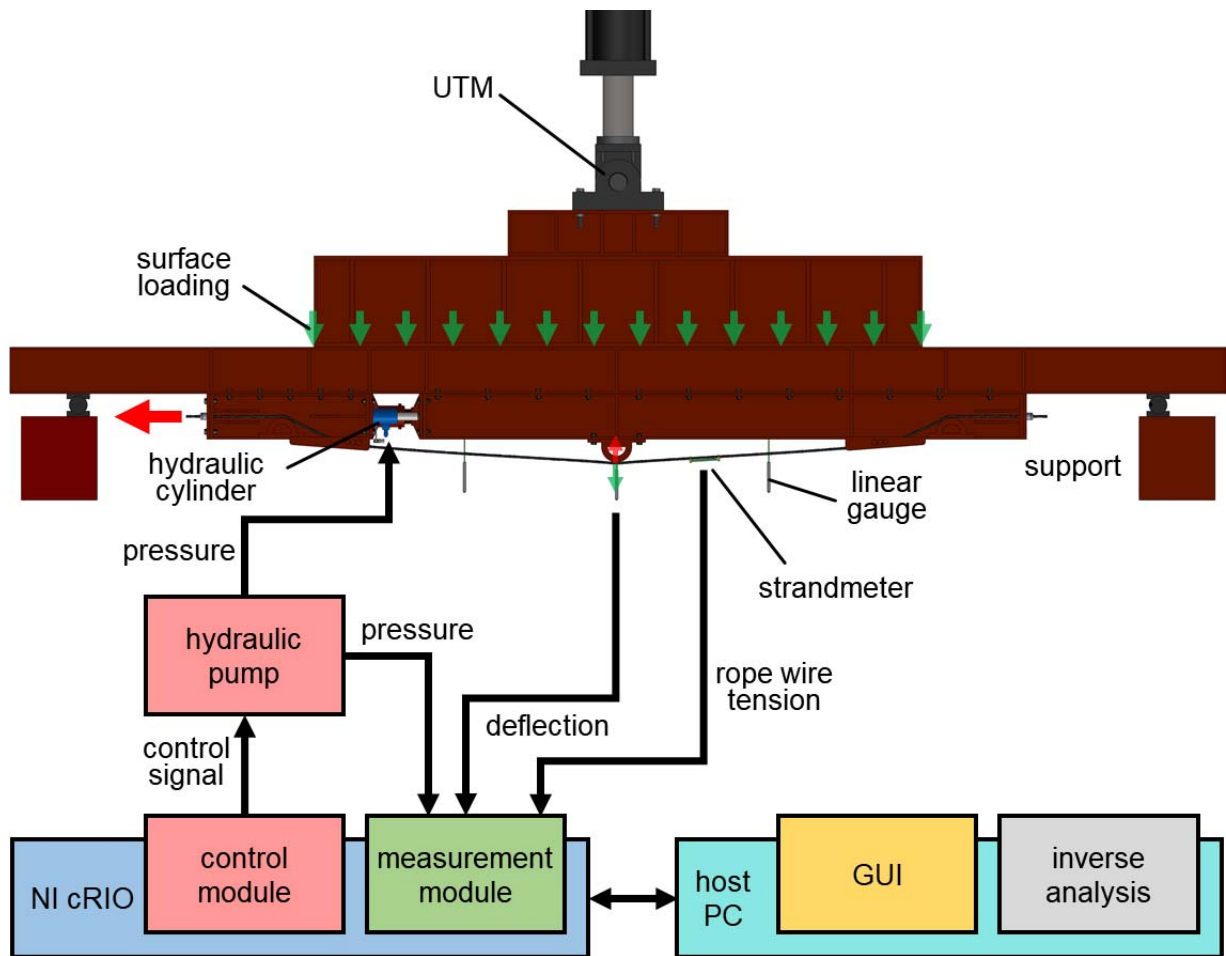


그림 2-7(1). 통합 제어 시스템 강구조 및 test bed 시험 지원 개략도

- 강구조 test bed 시험에서 계측 제어 시스템과 유압 제어 시스템을 하나의 제어기(NI cRIO, National Instrument)로 통합하여 사용자는 PC의 GUI를 통하여 사용자가 계측 데이터와 유압 제어 상태를 실시간으로 확인할 수 있다. 계측 센서 시스템의 각 센서들이 수집한 값을 바탕으로 PC의 역 해석 프로그램이 유압 실린더가 발생시켜야 할 힘을 계산하고 유압 제어 시스템이 목표힘 값으로 제어를 함으로써 토압으로 인하여 발생한 띠장의 처짐을 프리스트레스로 복원시킨다.

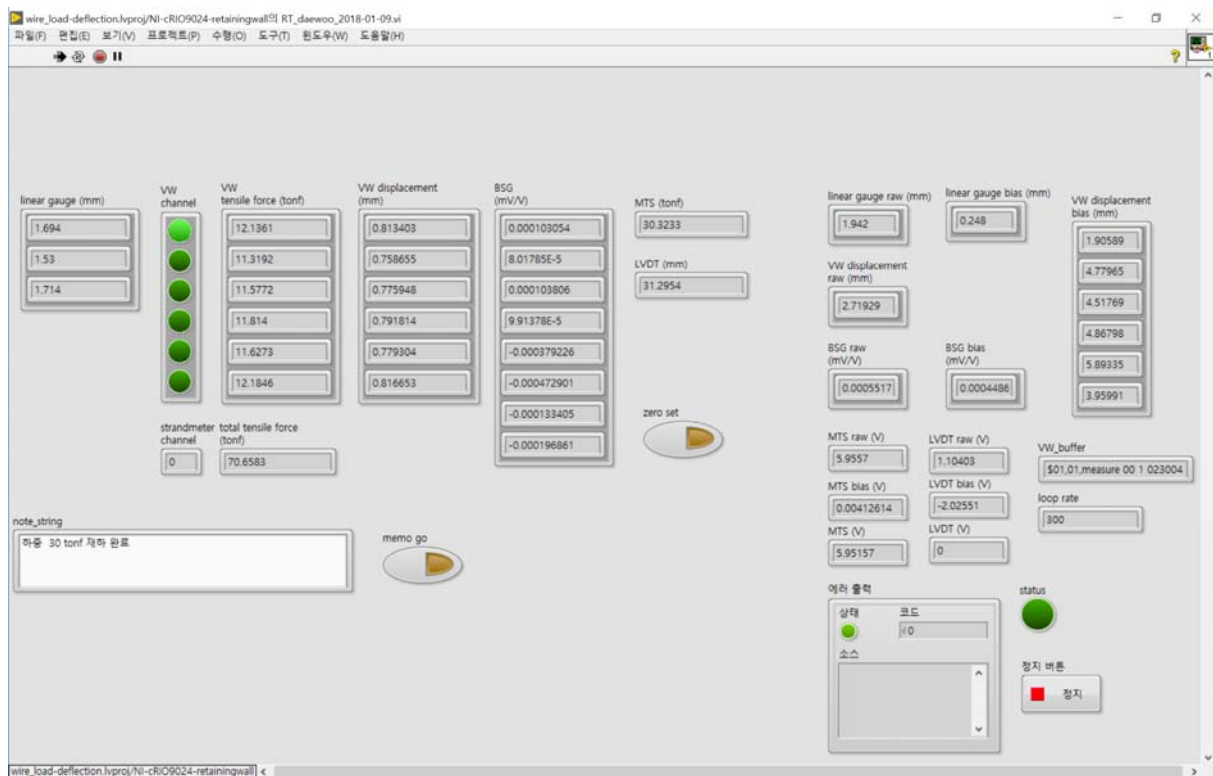


그림 2-7(2). 통합 제어 시스템 강구조 및 test bed 시험 GUI

2-8. 계측 센서 시스템 내환경 강화 방법 연구

표 2-8. 계측 센서의 방수 방진

센서 종류	스트랜드미터 (strandmeter)	리니어 게이지 (linear gauge)
사진		
모델명	1315	LDS620-100
제조사	Ace Instrument	OMEGA Engineering
방수능력	50mH ₂ O	IP67
설명	토목 계측 현장에서 수분과 분진에 노출되어 사용검증 되어 있는 센서	작은 먼지도 통과 할 수 없음 1m 깊이 물에 침수 가능

- 토목 현장에서 계측 센서들은 야외에서 장시간 노출되어 데이터를 수집해야 하기 때문에 수분과 분진에 대한 대책이 필요하다. 이를 위하여 수분과 분진에 대한 저항이 가능한 센서류를 선정하였다.

2-9. 유압 제어 시스템 시험기관 성능시험 계획

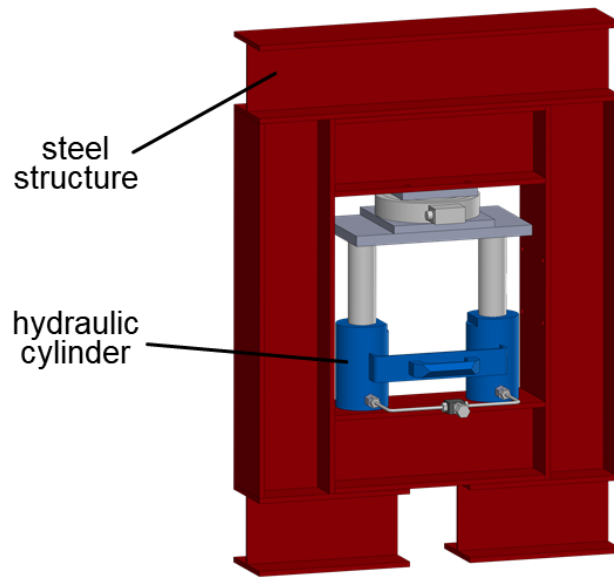


그림 2-9. 유압 제어 시스템 시험기관 성능시험 계획

- 유압 제어 시스템의 힘 제어 성능을 시험 인증 기관으로부터 인증 받기 위하여 계획을 수립하였다. 실험실 내 구조에서 유압 실린더가 일정한 힘으로 구조를 밀 수 있는지를 평가하는 실험을 진행한다. 유압 실린더의 최대 허용 힘인 100 tonf 의 70%를 최고 값의 기준으로 설정유압 제어 시스템을 통해 유압 실린더가 정해진 힘의 범위에서 10% 이내에 머무르도록 제어 되는 것을 평가한다. 10 tonf ~ 100 tonf 까지 10 tonf 간격으로 모두 10 단계에 대하여 반복성을 평가를 위해 각 단계당 3 회 반복 하여 수행한다.

2-10. 유압제어시스템 시험기관 성능시험

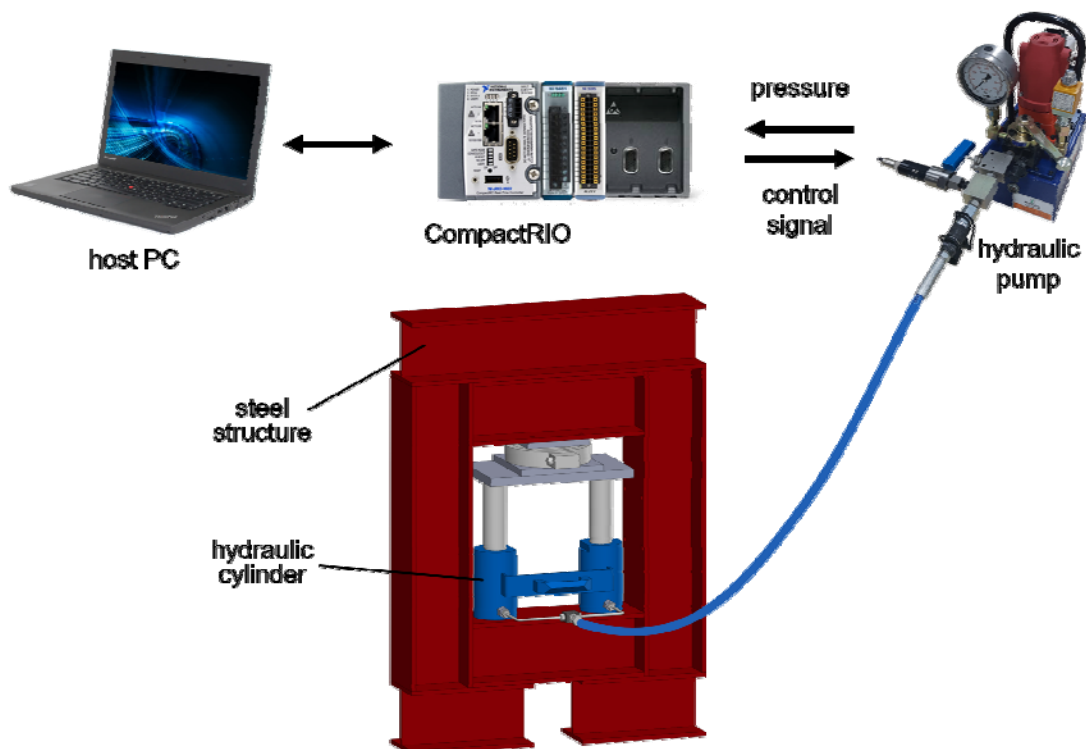


그림 2-10(1). 유압 제어 시스템 시험기관 성능시험

- 철골 구조를 이용하여 유압 실린더가 반력을 받을 수 있도록 철골 구조물을 구성하고 고압 펌프에 부착된 압력 센서를 이용하여 유압 실린더 내부의 압력을 피드백 제어함으로써 유압 실린더 힘 제어를 하였다.

○ 시험 순서

표 2-10. 유압 제어 시스템 시험기관 성능시험 순서

순서	내용	비고
1	유압 실린더를 철골 구조물에 설치	
2	유압 실린더 힘 목표값을 설정	초기 목표값 10 tf
3	유압 실린더 힘 제어 시작	
4	유압 실린더 힘이 목표값에 도달한 후 1분 이상 목표값의 일정 범위 내에서 제어	목표값의 0.5 % 이내에서 머무르도록 제어
5	데이터 저장 및 확인	
6	유압 실린더 힘 목표값을 변경하여 3~5를 반복 수행	10 tf 간격으로 10 tf ~ 100 tf

○ 시험 결과



그림 2-10(2). 유압 제어 시스템 시험기관 성능시험 실제 사진

표 2-10. 유압 제어 시스템 시험기관 성능시험 결과

desired force (tf)	session	force max. (tf)	% error of force max. (%)	force min. (tf)	% error of force min. (%)	RMSE (tf)	% of RMSE (%)
10	1	10.34	3.38	9.91	0.87	0.07	0.70
	2	10.43	4.30	9.92	0.76	0.12	1.17
	3	10.34	3.38	9.92	0.76	0.09	0.88
20	1	20.28	1.38	19.88	0.60	0.06	0.30
	2	20.28	1.38	19.88	0.58	0.06	0.31
	3	20.22	1.08	19.88	0.60	0.06	0.30
30	1	30.19	0.63	29.82	0.60	0.06	0.19
	2	30.24	0.81	29.81	0.64	0.06	0.21
	3	30.17	0.56	29.82	0.59	0.06	0.20
40	1	40.19	0.47	39.77	0.56	0.08	0.21
	2	40.16	0.39	39.75	0.63	0.08	0.21
	3	40.26	0.65	39.78	0.54	0.08	0.21
50	1	50.14	0.29	49.69	0.63	0.11	0.23
	2	50.18	0.35	49.71	0.58	0.09	0.19
	3	50.20	0.40	49.74	0.52	0.11	0.22
60	1	60.28	0.46	59.67	0.54	0.14	0.23
	2	60.24	0.39	59.69	0.52	0.14	0.23
	3	60.28	0.46	59.69	0.52	0.12	0.21
70	1	70.20	0.29	69.61	0.55	0.17	0.24
	2	70.21	0.30	69.62	0.54	0.16	0.23
	3	70.26	0.37	69.64	0.51	0.16	0.23
80	1	80.17	0.22	79.58	0.53	0.19	0.23
	2	80.20	0.24	79.57	0.53	0.19	0.24
	3	80.16	0.20	79.57	0.53	0.19	0.23
90	1	90.17	0.19	89.51	0.54	0.23	0.25
	2	90.22	0.25	89.52	0.53	0.24	0.27
	3	90.31	0.35	89.54	0.51	0.20	0.22
100	1	100.26	0.26	98.51	1.49	0.95	0.95
	2	100.12	0.12	99.46	0.54	0.26	0.26
	3	100.26	0.26	98.89	1.11	0.62	0.62

- 유압 실린더 힘을 10 tf 부터 100 tf 까지 10단계로 나누어 각 단계별로 3회씩 제어 성능을 평가 하였을 때, 모든 시험에서 힘 제어 오버슈트(overshoot) 이 목표값의 5 % 이내에 있음을 확인하였다. 모든 시험에서 평균 제곱근 편차 (Root mean square error) 가 목표값의 2% 이내에 있음을 확인 하였다.

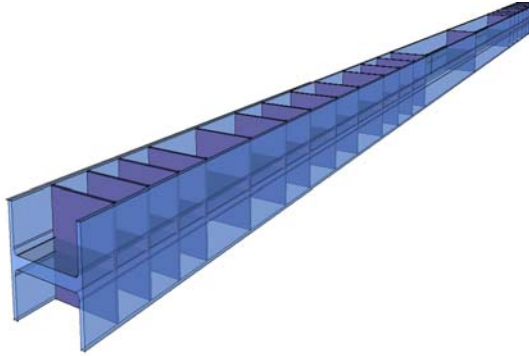
3. 순탄소성해석 및 역해석 프로그램 개발

3-1. 국내외 유사형식 기술 및 문헌조사 (제2장에 작성)

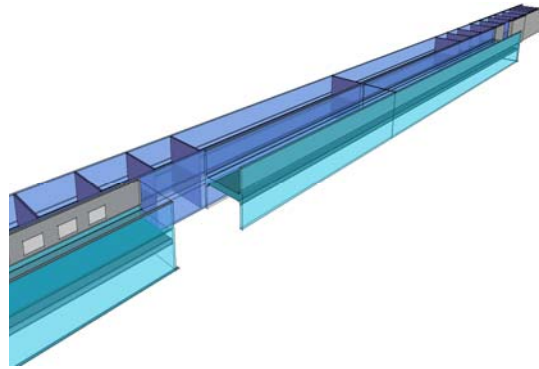
3-2. 제안기술의 시공단계별 디지털 Mock-up

- 본 연구개발 HiCT공법 시공단계별 디지털 Mock-up은 다음과 같다.

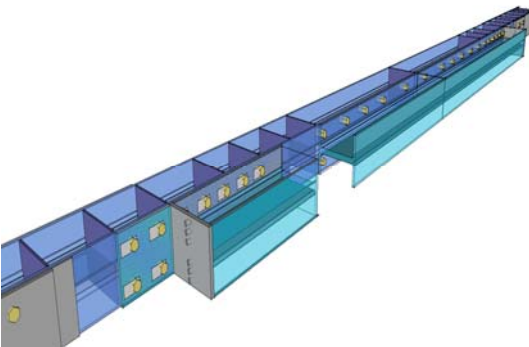
표 3-2. HiCT공법 시공단계별 디지털 Mock-up



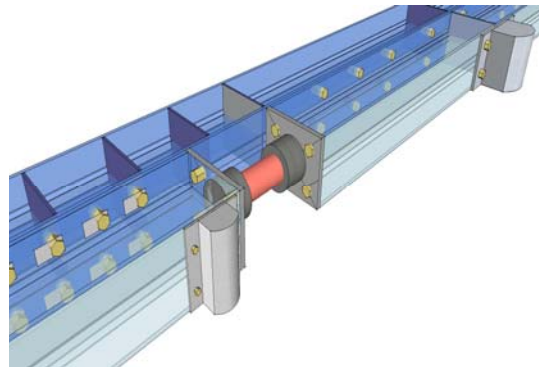
1단계 : 기본 형강에 보강판 설치



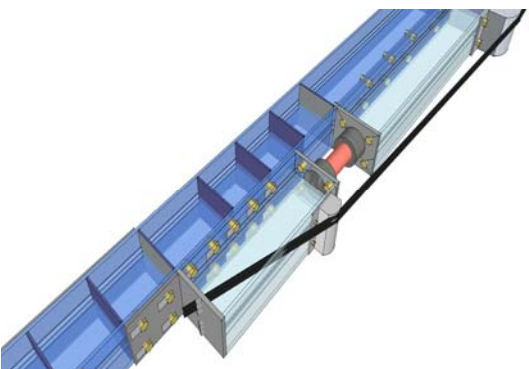
2단계 : 형강 추가 및 보강판 설치



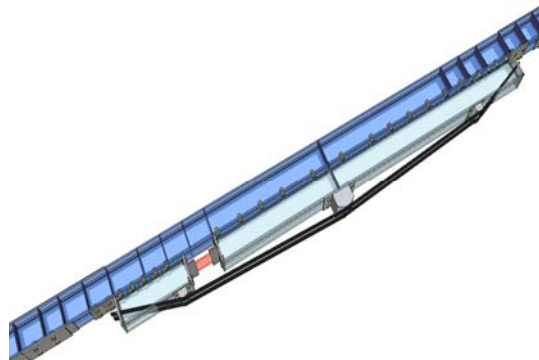
3단계 : 볼트체결



4단계 : 장치 설치



5단계 : 긴장력 도입



6단계 : 긴장력 제어

3-3. 순탄소성해석을 위한 이론정립

○ 탄소성보법

- 각 단계별 굴착완료 및 지지구조 설치후의 토압분포는 흙막이벽의 안정에 필수적인 것이지만 보다 불리한 경우는 다음단계 지지구조를 설치하기 위하여 굴착을 진행 중인 과정이다. 이 경우의 토압분

포는 추정하기가 어려울 뿐 아니라, 벽체의 변위에 지배되므로 벽체의 해석방법에 따라 다르게 된다. 이와 같은 횡토압을 고려하여 굴착단계별로 해석하는 대표적인 방법은 탄소성지반상 연속보 해석법으로 일률적인 하중 형태보다는 실제상황을 현실적으로 적용시킬 수 있으므로 보다 실제적인 해석방법으로 간주된다.

- 현재 사용하고 있는 탄소성보법으로는 굴착 모사과정에서 볼 때 크게 야마가타(Yamagata)의 확장법과 모리시게(Morishige)의 탄소성해석법이 있다. 이 탄소성해석법(beam on elasto-plastic foundation analysis)은 지반을 굴착함에 따라 단계적으로 변하는 응력이나 변위 및 토압 등을 비교적 충실하게 계산할 수 있어 많은 전산 프로그램이 이 원리에 따라 개발되어 설계에 적용되고 있다.

○ 기본 구조 모델

- 탄소성보법은 다음 그림과 같이 흙막이 벽체는 탄성보, 지보공은 탄성스프링, 지반은 탄소성스프링으로 모델링한다. 초기토압(P_i)을 가하여 발생하는 변위를 계산 후 그 변위에 상응하는 지반의 탄소성상태를 판단하고 토압을 보정하며 다시 변위를 계산하는 이러한 반복 과정을 통하여 흙막이 벽체의 변위, 응력 및 지보공의 반력을 계산하는 해석법이다. 하중과 변형에 대한 기본식은 다음과 같다.

$$EI \frac{d^4 x}{dy^4} + \frac{A \cdot E_s}{L} \cdot x = P_i \pm K_s \cdot x$$

여기서, E : 흙막이벽체의 탄성계수

I : 흙막이벽체의 단면 2차모멘트

A : 지보공의 단면적

E_s : 지보공의 탄성계수

L : 지보공의 길이

P_i : 초기토압(주로 정지토압이 사용됨)

K_s : 수평지반반력계수로 구한 지반스프링 강성계수

x : 깊이 y 지점에서의 벽체의 x 방향 변위

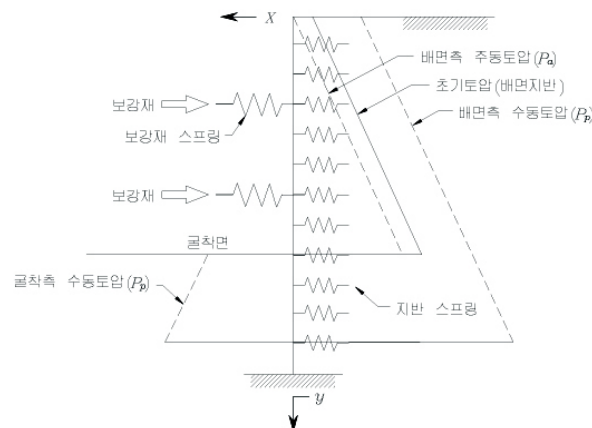


그림 3-3(1). 탄소성보법의 기본구조 모델 (基礎工, 1985)

○ 탄소성 해석법의 변위에 따른 토압적용

- 벽체의 변위에 따른 토압의 크기는 소성변위 적용여부에 따라 큰 차이를 보이므로, 흙막이 벽체의 소성변위를 고려한 벽체의 변위와 토압관계 곡선을 이용하여 실제 기존 지반의 거동을 적절히 반영할 수 있도록 하여야 한다. 벽체의 변위 산정을 위하여 벽체전면과 배면부의 지반거동을 변위와 토압의 관계곡선을 이용하여 모델링하고 벽체의 변위에 따른 지반반력계수와 토압을 변위와 토압의 관계곡선으로부터 산정한다.

- 지반반력 계수와 변위관계는 비선형이나, 지반의 성질에 따라 매개변수 등을 합리적으로 Modeling 하 기에는 어렵기 때문에 다음 그림과 같이 단순화시켜 선형 비례하는 것으로 가정한 것이다.

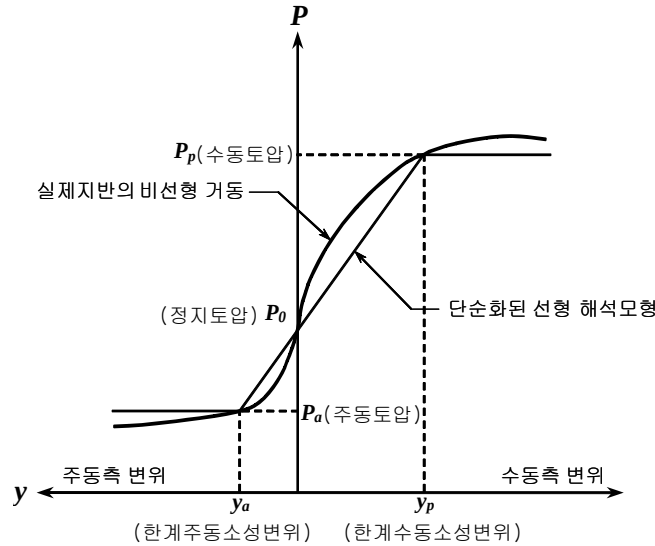


그림 3-3(2). 벽체의 변위와 토압의 관계곡선

- 벽체의 변위가 증가하여 주동측의 한계소성변위를 초과할 경우 벽체에 작용하는 토압은 주동토압으로 일정하게 작용하며 소성변위가 발생한다. 이때 보강재의 설치 등의 외력이 작용하여 수동측으로의 변위가 발생할 경우 토압관계곡선은 점선을 따라 거동하도록 모델링한다. 마찬가지로 수동측의 한계소성변위를 초과할 경우 벽체에 작용하는 토압은 수동토압으로 일정하게 작용하며 소성변위가 발생한다. 이 상태에서 외력이 작용하여 주동측으로의 변위가 발생할 경우에는 토압관계곡선이 실선을 따라 거동하는 것이 아니라 일점쇄선을 따라 거동하도록 모델링하여 소성변위를 고려하는 것이다. 소성변위를 고려하지 않게되면 다음 그림에서 실선을 따라 거동하여 이때 토압의 증가는 없게 된다. 따라서, 소성변위의 고려 여부에 따라 흙막이 벽체 및 보강재에 작용하는 응력과 부재력 등에 큰 영향을 미치게 되는데, 소성변위를 고려하는 경우가 실제로 더 근접하는 거동을 나타낸다.

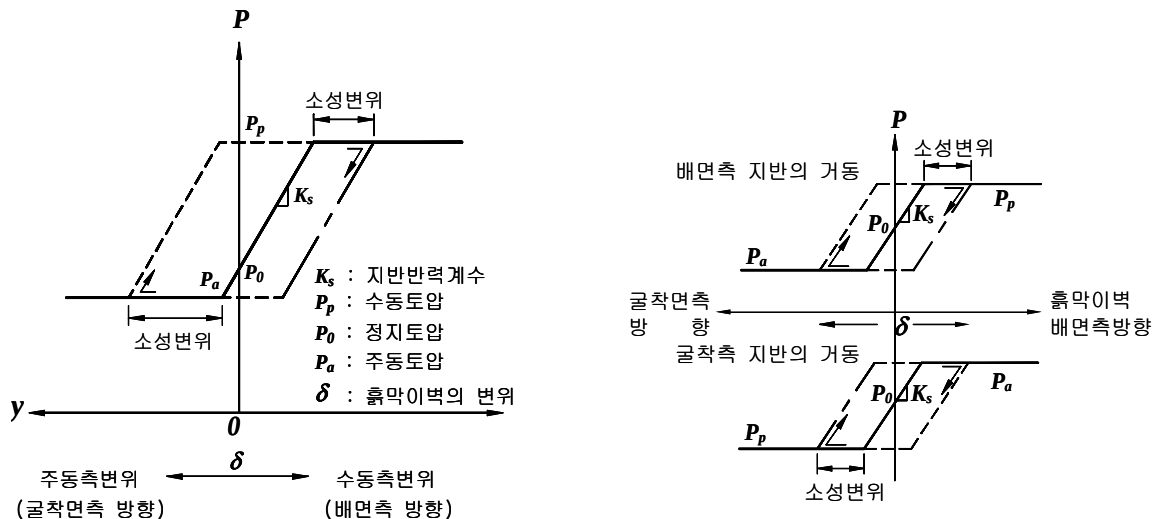


그림 3-3(3). 탄소성해석법의 변위에 따른 토압적용 (좌:굴착면 이상부분, 우: 굴착면 이하부분)

○ 가상지점법

- 지반 및 시공 조건에 따라서 흙막이벽의 근입부분 혹은 그 아래쪽에 지점을 상정하고, 흙막이벽이 이 가상지점과 버팀대지점에 있어서 지지되는 단순보로 가정하고 굴착공사의 각 단계마다에 흙막이벽의 변형 및 응력을 구하는 근사해법이다. 각 단계의 변형과 응력은 그 이전 단계의 것을 순차적으로 누가해 가며, 기본적인 가정은 아래와 같다.

- (1) 버팀대가 없는 1차 굴착시에 대한 흙막이벽의 변형, 휨모멘트 등은 Broms식 혹은 Chang식 등에 의해 계산된다.
- (2) 2차 굴착 시의 하중은 지표면에서 굴착 바닥까지의 삼각형분포를 취한다.
- (3) 3차 굴착 이후의 하중은 각 단계의 최하단 버팀에서 굴착 바닥까지 사이의 토압분포를 취한다.
- (4) 굴착 바닥은 보통 각 굴착 시의 것을 그대로 취하나 지반이 연약한 경우나 굴착바닥이 교란되었을 때는 그 보다 아랫쪽에 굴착 바닥을 상정한다.
- (5) 가상지점 위치의 휨모멘트는 그 위치의 지반과 흙막이벽의 강성에 따라서 0.2~0.5의 고정도를 고려하여 산정한다.
- (6) 가상지점은 $N > 10$ 의 양질지반을 취하나, 굴착의 앞 단계에서 채용한 지지점이 뒷 단계에 있어서 굴착된 때에는 다시 그 심부에 뒷 단계의 지지점을 상정한다. 뒷 단계 사용되는 측압은 앞 단계에서의 가상지점에서 받은 반력을 가한 것이다.

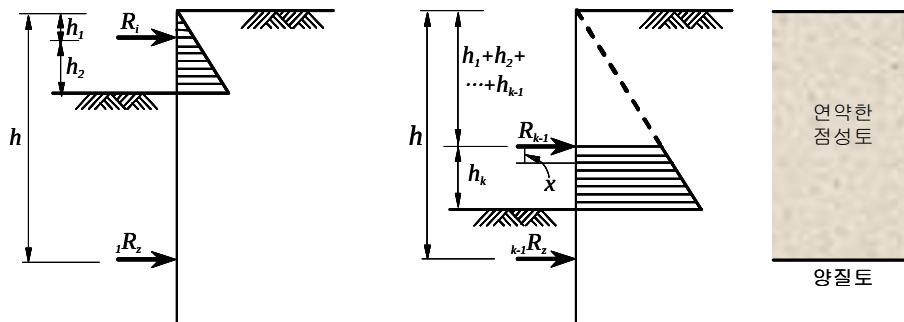


그림 3-3(4). 가상지점법

○ 탄소성보법에 의한 굴착단계별 흙막이벽의 해석 프로그램

① 탄소성보법에 의한 흙막이벽의 모델링

- 본 연구에서는 탄소성보법을 사용하여 흙막이 벽체는 탄성보, 지보공은 탄성 스프링, 그리고 지반은 탄소성 스프링으로 모델링 한 뒤, 초기 토압을 가하여 발생하는 변위를 계산하고 그 변위에 상응하는 지반의 탄소성 상태를 판단하고 토압을 보정하여 다시 변위를 계산하는 반복과정을 통하여, 흙막이 벽체의 변위, 응력 및 지보공의 반력을 계산하는 해석법을 적용하고자 한다.
- 탄소성 해석에서의 기본원칙과 가정은 다음과 같다.
 - (1) 지보공 설치지점의 수직벽에는 지보공의 수평간격($Space$), 단면적(A), 길이(L), 설치각도(θ) 및 재료의 탄성계수(E)로부터 구해지는 탄성스프링 지점이 부가된다. 다음 식은 이러한 관계를 나타낸 것이다.

$$K_{support} = \frac{A \cdot E}{L \cdot Space} x \cdot \cos \theta$$

- (2) 지보공에 대한 탄성지점은 지보공이 설치될 때 발생되었던 변위량에 해당하는 선행변위를 가지는 것으로 고려된다.
- (3) 각 굴착단계에서 작용토압은 계산초기에 정지토압을 작용시키고 토류벽체의 변위에 1차 비례하여 수정된다. 그러나 다음과 같은 한계를 넘지 않는다.

초기토압 : P_i

수정토압 : $P_i \pm K_{soil} \cdot x$

한계토압 : 주동토압 $\leq$ 토압 $\leq$ 수동토압

- 위의 범위를 벗어나는 조건에서의 토압은 한계토압이 되며, 이러한 경우 지반의 스프링 상수는 0이 된다. 다음 그림은 흙막이 구조에서 발생한 변위와 보정된 토압 관계를 보여준다.

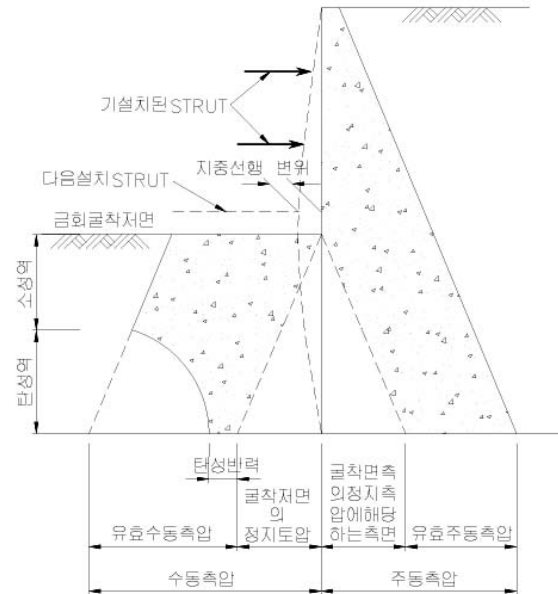


그림 3-3(5). 탄소성법에서의 변위와 토압 (基礎工, 1985)

② 벽체의 변위에 의존하는 토압

- 본 연구에서 개발한 프로그램은 흙막이 벽체를 설치한 지반의 거동을 적절히 반영할 수 있도록 하였다. 또한, 벽체의 변위 산정을 위하여 벽체전면과 배면부의 지반거동을 변위와 토압의 관계곡선을 이용하여 모델링하고 벽체의 변위에 따른 지반반력계수와 토압을 변위와 관계곡선으로부터 산정하였다.

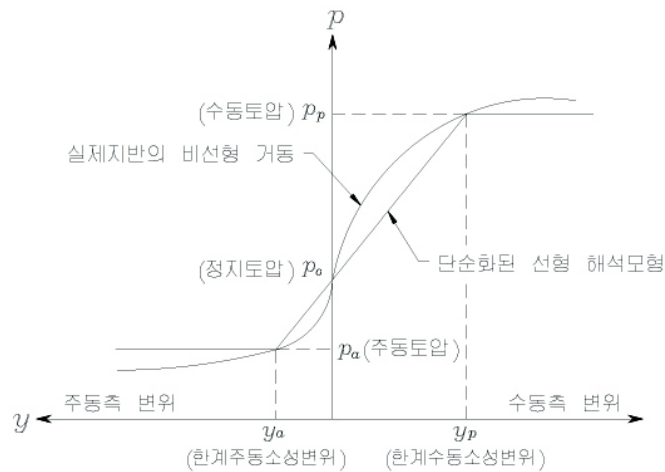


그림 3-3(6). 벽체의 변위와 토압의 관계곡선

- 지반반력계수와 변위 관계는 $k = f(\delta)$ 의 비선형이나 지반의 성질에 따라 매개변수 등을 합리적으로 모델링하기는 어렵기 때문에 위 그림과 같이 단순화시켜 선형 비례하는 것으로 가정하였으며, 소성 변위를 고려하는 경우가 실제로 더 근접하는 거동을 나타내므로 본 연구에서 개발한 프로그램은 소성변위를 고려하도록 모델링하였다

○ 반복 해석 과정

- 탄소성보법에 의한 흙막이 해석 프로그램의 실제의 반복계산과정은 다음 그림과 같다.

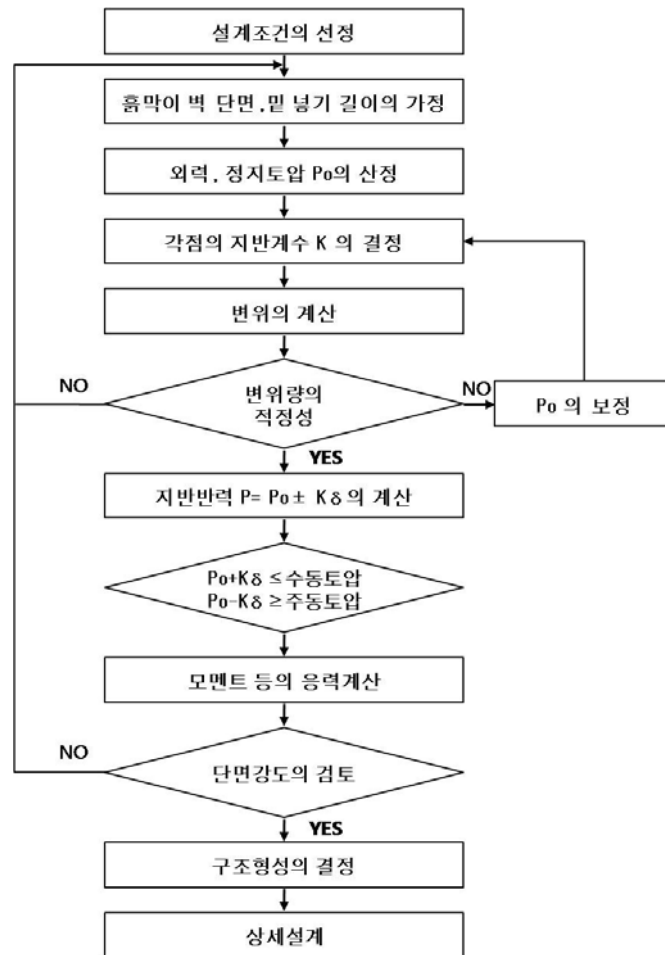


그림 3-3(7). 탄소성보법에 의한 해석순서도

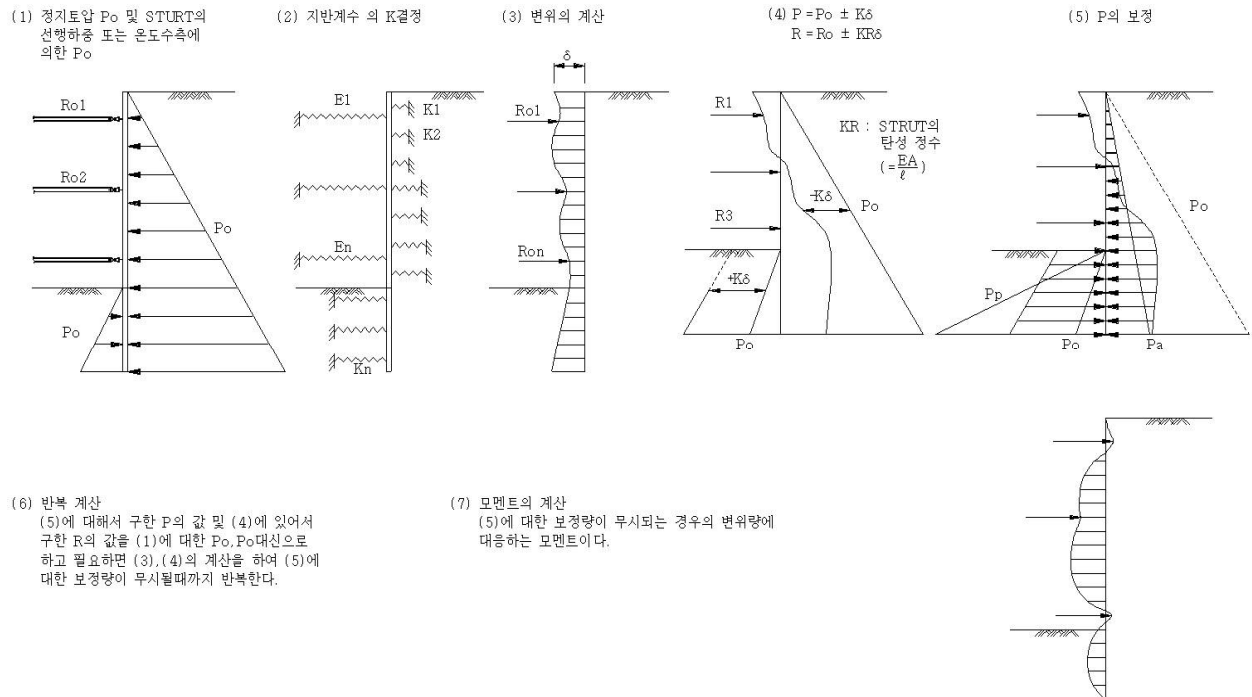


그림 3-3(8). 탄소성보법에 의한 해석과정

- 본 연구에서는 탄소성보법에서 Yamagata 확장법과 Morishige의 방법을 모두 고려하면서, 기능을 확장하고 사용성을 개선한 SUNEX 프로그램을 사용하였으며 프로그램의 특징은 다음과 같다.

- (1) 같은 토층 내에서도 깊이별로 물성의 변화가 가능하다(c, ϕ, K_u)
- (2) 굴착측과 배면측 지반의 물성이 달라도 가능하다.
- (3) 굴착깊이, 토층의 수, 굴착단계의 수, 지보공의 수, 부재의 분할 수 등에 제한이 없다.
- (4) 다양한 과재하중과 축압의 적용이 가능하다.
- (5) 정수압뿐만 아니라 특수한 형태의 수압의 적용이 가능하다.
- (6) Rankine, Peck 토압 및 임의의 토압 적용이 가능하다.
- (7) 지반이 수평이 아닌 경사진 경우를 계산할 수 있으며, 벽체와 지반과의 마찰을 고려할 수 있다.
- (8) 토압의 최소치를 규정할 수 있다.
- (9) 지보공의 설치시는 그 전 단계에서의 변위를 초기변위로 하여 다음 단계 계산에 적용된다.
- (10) 스트럿(Strut)에 가하는 초기하중(Jack 압축력) 적용방법이 개선되었다.
- (11) 반복계산에 의하여 지반의 소성상태 여부를 체크하여 토압 및 스프링 상수를 보정한다.
- (12) 흙막이 벽에 대하여 최대 저항 소성 모멘트(M_{yield})를 입력하면 반복계산에 의하여 흙막이벽에 대해서도 탄·소성 해석을 수행한다.
- (13) 지반의 소성변위가 고려된다(Option).
- (14) 굴착 후 벽체 및 슬라브(Slab)의 타설, 지보공의 해체 과정도 계산할 수 있다.
- (15) 지표면의 침하가 Caspe방법으로 계산된다.
- (16) 입력 Data는 특별한 서식에 구애받지 않는다(Free Format).
- (17) 해석단계마다 계산결과 토압, 변위, 전단력 및 모멘트가 화면에 그래프로 나타나므로 계산과정을 체크할 수 있으며, 필요에 따라서는 계산을 중지시킬 수 있다.
- (18) 계산결과 매 단계별 토압, 변위, 전단력 및 모멘트 그래프를 프린터로 출력할 수 있다.

3-4. 순탄소성해석 프로그램 알고리즘 개발

3-4-1. HiCT 띠장의 설계흐름도

- HiCT 띠장의 가시설 단면설계는 허용 응력설계법을 적용하였으며, 흐름도는 다음 그림과 같다.

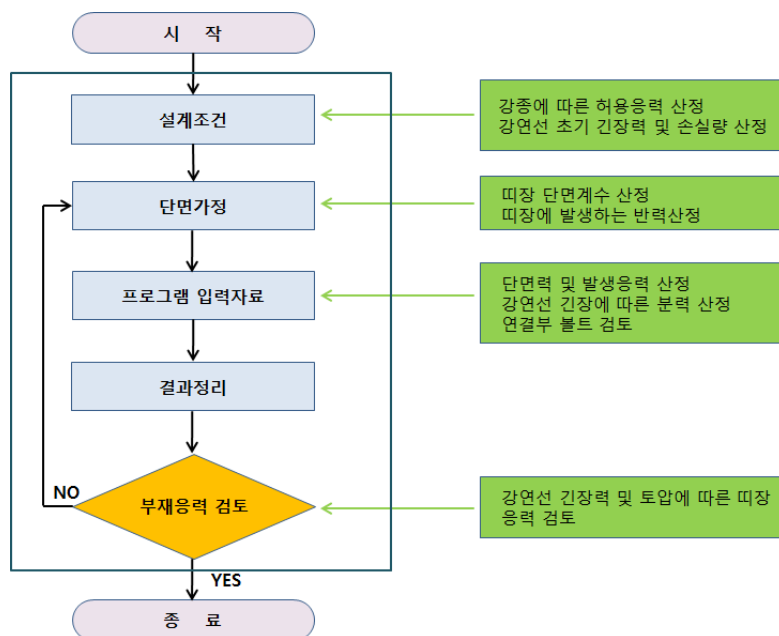
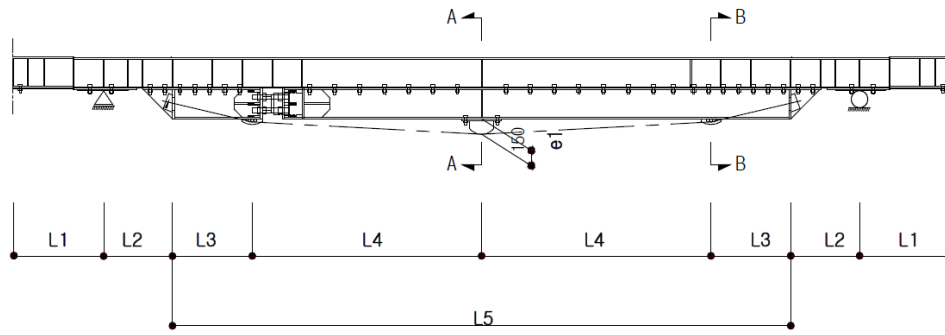
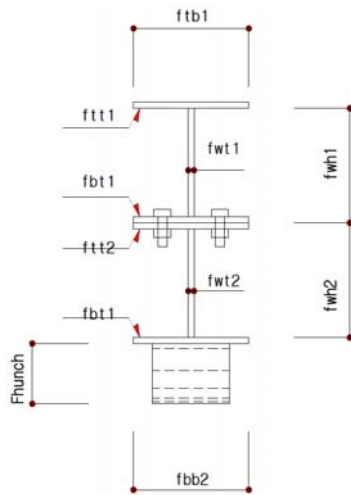


그림 3-4-1. HiCT 띠장 설계흐름도

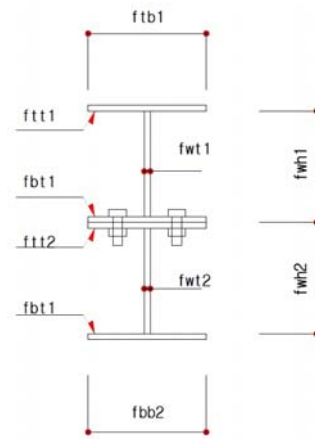
3-4-2. HICT 띠장 제원 및 단면형상



(1) 평면도



(2) A-A 단면



(3) B-B 단면

그림 3-4-2. HiCT 띠장 제원 및 단면형상

3-5. 순탄소성해석 프로그램 설계

3-5-1. 운영 조건

- 운용 OS는 Window 기반 IBM호환 컴퓨터로 한다.
- 개발언어는 C++, 개발도구는 MS의 비주얼스튜디오(MFC)를 사용한다.
- 복잡한 설치과정을 생략한다.

3-5-2. 설계 조건

- Project별로 별도 관리하고, 한번 설정한 데이터는 저장되어야 한다.
- 버팀보, 사보강, 까치발, 측면말뚝, 띠장, 흙막이에 한해 개발한다.
- 일부변수는 TOT 파일을 읽어서 자동 설정한다.
- 사용강재, 사용볼트, 사용목재 등의 제원은 파일DB로 구성하여 선택만으로 입력되게 한다.
- 각 항목별로 일치되는 변수가 있어도 개별적으로 동작 가능하게 입력창을 분리한다.
- 리스트 및 그리드는 해당 컬럼 선택후 직접 입력가능한 모듈(MFC_Grid)을 사용한다.
- 계산 완료후 파일 출력이 가능하게 한다.
- 엑셀 프로그램과 연동시켜 출력물을 확인하거나 프린트하게 한다.

3-5-3. 설계 흐름도

- 순탄소성해석 프로그램의 설계 흐름도는 다음 그림과 같다.

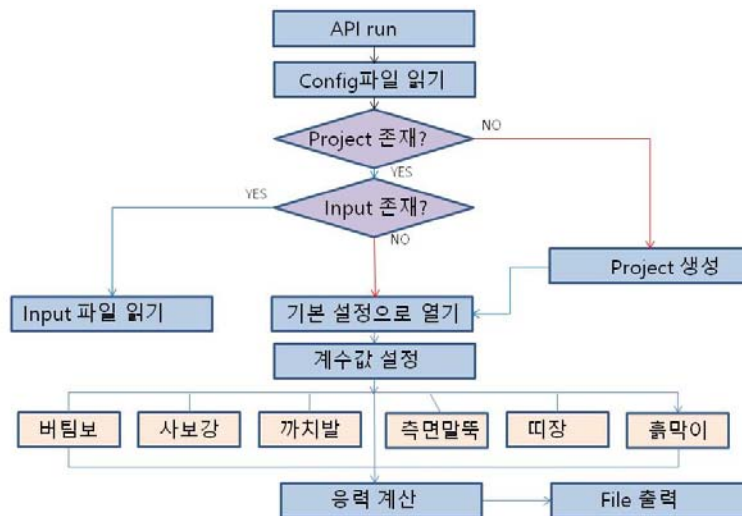


그림 3-5-3. 순탄소성해석 프로그램의 설계 흐름도

3-6. 순탄소성해석 프로그램 개발

○ 초기화면

- 기본화면은 트리메뉴와 뷰화면으로 구성되어있으며, 트리에는 입력메뉴와 출력물 보기 기능이 구축되어있으며, 프로젝트 생성 또는 기존 프로젝트를 열 수 있다.
- 초기화면은 다음 그림과 같다.

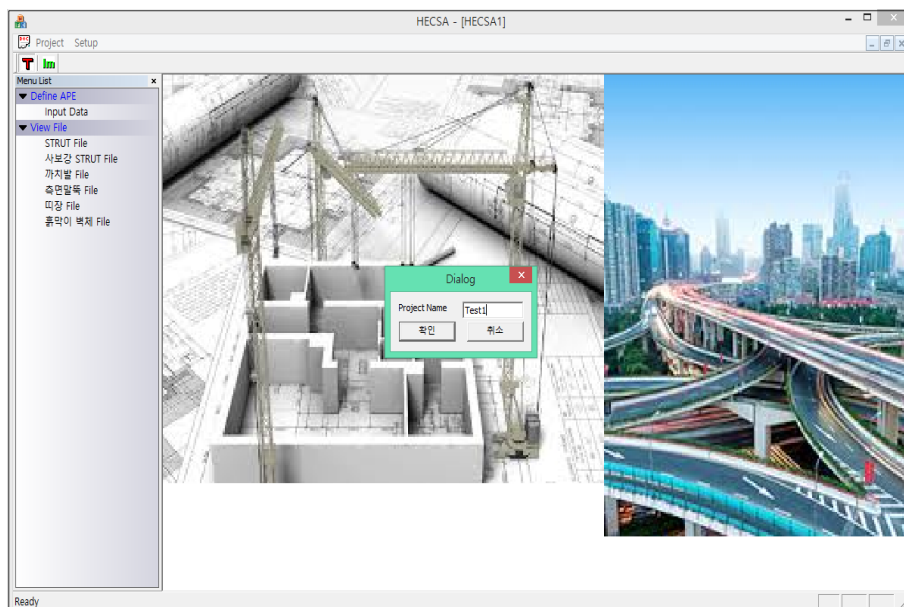


그림 3-6(1). 순탄소성해석 프로그램 초기 화면

- 프로젝트 정보와 각 입력변수는 다음 그림과 같이 INI 파일 형태로 저장된다.

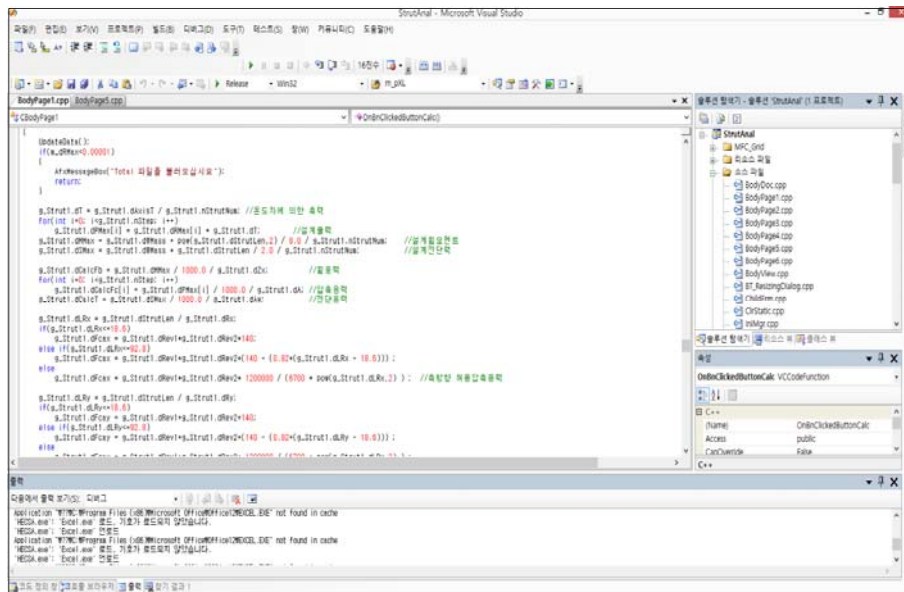
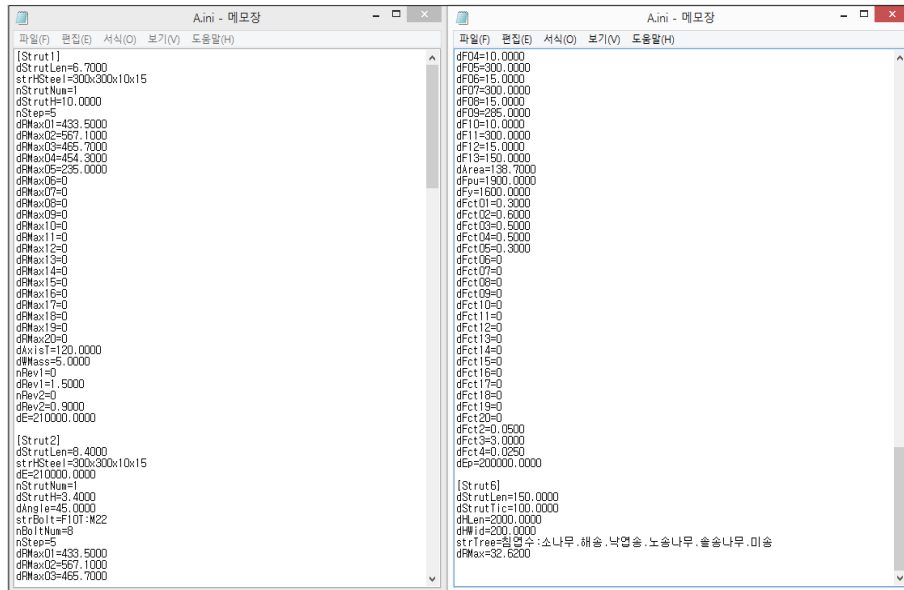


그림 3-6(2). 순탄소성해석 프로그램 설정

○ TOT 입력화면 및 기본 파일 DB

- 다음 그림과 같이 Tot 파일을 로딩하여 기본 변수를 자동 설정한다.

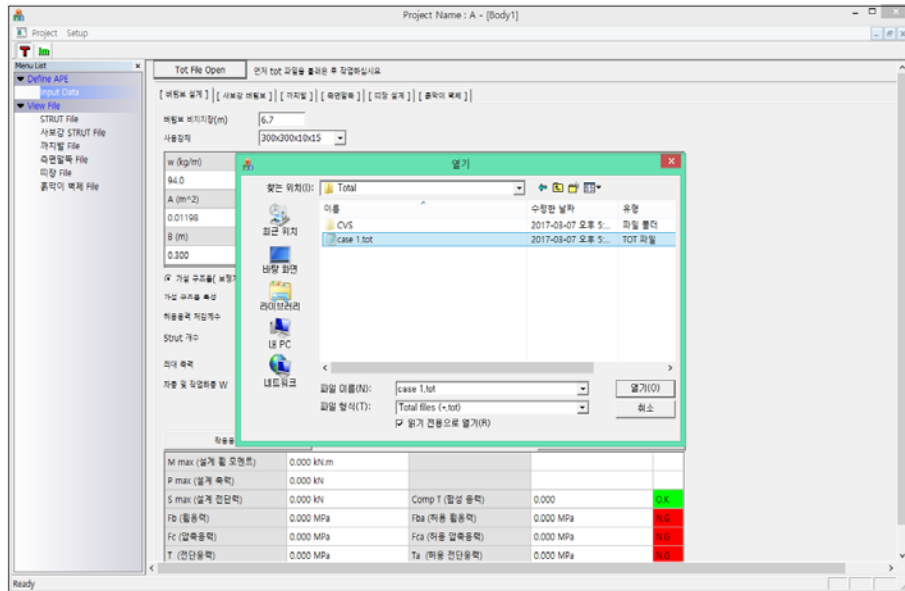


그림 3-6(3). 순탄소성해석 프로그램 기본 변수 설정

- 다음 그림과 같이 사용강재, 사용볼트, 사용목재를 위한 파일 DB를 제작한다.

HSteel.csv - Microsoft Excel

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	[H.Steel]													
2	단면치수=H	B	ft	tz	r	A	Aw	W	Ix (m ⁴)	Iy (m ⁴)	Rx(m)	Ry(m)	Zx(m ³)	Zy(m ³)
3	100x100x6x8=100	100	6	8	10	0.00219	0.0005	17.2	0.000004	1.3E-06	0.0418	0.0247	0.000077	0.000027
4	125x125x6.5x7=125	125	6.5	7	10	0.00303	0.0007	23.8	0.000008	2.9E-06	0.0529	0.0311	0.000136	0.000047
5	150x75x5x7=150	75	5	7	8	0.00179	0.00068	14	0.000007	5E-07	0.0611	0.0166	0.000089	0.000013
6	148x100x6x9=148	100	6	9	11	0.00268	0.00078	21.1	0.000001	1.5E-06	0.0617	0.0237	0.000138	0.00003
7	150x150x7x10=150	150	7	10	11	0.00401	0.00091	31.5	0.000016	5.6E-06	0.0639	0.0375	0.000219	0.000075
8	198x99x4.5x7=198	99	4.5	7	11	0.00232	0.00083	18.2	0.000016	1.1E-06	0.0826	0.0221	0.00016	0.000023
9	200x100x5.5x8=200	100	5.5	8	11	0.00272	0.00101	21.3	0.000018	1.3E-06	0.0824	0.0222	0.000184	0.000027
10	194x150x6x9=194	150	6	9	13	0.0039	0.00106	30.6	0.000027	5.1E-06	0.083	0.0361	0.000277	0.000068
11	200x200x8x12=200	200	8	12	13	0.00635	0.00141	49.9	0.000047	0.000016	0.0862	0.0502	0.000472	0.00016
12	200x204x12x12=200	204	12	12	13	0.00715	0.00211	56.2	0.00005	0.000017	0.0835	0.0488	0.000498	0.000167
13	208x202x10x16=208	202	10	16	13	0.00837	0.00176	65.7	0.000065	0.000022	0.0883	0.0513	0.000628	0.000218
14	248x124x5x8=248	124	5	8	12	0.00327	0.00116	25.7	0.000035	2.6E-06	0.104	0.0279	0.000285	0.000041
15	250x125x6x9=250	125	6	9	12	0.00377	0.00139	29.6	0.000041	2.9E-06	0.104	0.0279	0.000324	0.000047
16	244x175x7x11=244	175	7	11	16	0.00562	0.00155	44.1	0.000061	9.8E-06	0.104	0.0418	0.000502	0.000113
17	244x252x11x11=244	252	11	11	16	0.00821	0.00244	64.4	0.000088	2.94E-05	0.103	0.0598	0.00072	0.000233
18	248x248x13x248	248	8	13	16	0.00847	0.00178	66.5	0.000099	3.35E-05	0.108	0.0629	0.000801	0.000269
19	250x250x9x14=250	250	9	14	16	0.00922	0.002	72.4	0.000108	3.65E-05	0.108	0.0629	0.000867	0.000292
20	250x255x14x14=250	255	14	14	16	0.01047	0.00311	82.2	0.000115	3.88E-05	0.105	0.0609	0.000919	0.000304
21	298x149x5.5x8=298	149	5.5	8	13	0.00408	0.00155	32	0.000063	4.4E-06	0.124	0.0329	0.000424	0.000059
22	300x150x6.5x9=300	150	6.5	9	13	0.00468	0.00183	36.7	0.000072	5.1E-06	0.124	0.0329	0.000481	0.000068
23	294x200x8x12=294	200	8	12	18	0.00724	0.00216	56.8	0.000113	0.000016	0.125	0.0471	0.000771	0.00016
24	298x201x9x14=298	201	9	14	18	0.00834	0.00243	65.4	0.000133	0.000019	0.126	0.0477	0.000893	0.000189
25	294x302x12x12=294	302	12	12	18	0.01077	0.00324	84.5	0.000169	5.52E-05	0.125	0.0716	0.001115	0.000365
26	298x299x9x14=298	299	9	14	18	0.01108	0.00243	87	0.000188	6.24E-05	0.13	0.075	0.00127	0.000417
27	300x300x10x15=300	300	10	15	18	0.01198	0.0027	94	0.000204	6.75E-05	0.131	0.0751	0.00136	0.00045
28	300x305x15x15=300	305	15	15	18	0.01348	0.00405	106	0.000215	0.000071	0.126	0.0726	0.00144	0.000466

Bolt.csv - Microsoft Excel

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	[Bolt]													
2	F8T:M20=100	36000												
3	F8T:M22=100	36000												
4	F8T:M24=100	36000												
5	F10T:M20=125	48000												
6	F10T:M22=125	48000												
7	F10T:M24=125	48000												

Tree.csv - Microsoft Excel

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	[Tree]									
2	참엽수·소나무·해송·낙엽송·노송나무·솔송나무·미송=13.5	1.05								
3	진엽수·상나무·가문비나무·미상나무·전나무=10.5	0.75								
4	활엽수·참나무=19.5	2.1								
5	활엽수·참나무·느티나무·출렁나무·너도밤나무=15.0	1.5								

그림 3-6(4). 순탄소성해석 프로그램 DB 파일

○ 변수 입력화면 및 계산

- 각 작업에 따른 변수를 입력한다.

HECSA - [Body1]
File Edit View Window Help

Menu List

- File
- Edit
- View
- Window
- Help

STRUT File

사양강 STRUT File

가장자리 File

곡면철근 File

파장 File

결구치 배치 File

Project Setup

Menu List

- File
- Edit
- View
- Window
- Help

STRUT File

사양강 STRUT File

가장자리 File

곡면철근 File

파장 File

결구치 배치 File

Total File Open

현재 tot 파일을 불러온 후 작업하십시오

[하단벽 설계] [사방강 배설보] [바닥보] [축관철보] [지대 설계] [결구치 배치]

바탕보 위치지름(m)

사방강지름

W (kg/m)	Ix (m ⁴)	Zx (m ³)	rx (m)	Iy (m)
94.0	21.00000	0.0002040	0.001360	0.131
A (m ²)	Aw (m ²)	ly (m ⁴)	Zy (m ³)	ry (m)
0.01198	0.0027	0.0000675	0.000450	0.075
B (m)	H (m)			
0.300	0.300			

α 강압 강도계 (보정계수: 1.5) γ 강도 계수 (보정계수: 1.25)

가장 강도계 계수

강도계 계수 α γ

Strut 계수 Strut 수평간격 (m)

최대 축력 단 온도 차에 의한 축력

가장 보 하중치 W

보교사 철근

강도계 계수		보교사 철근	
M max (압력 및 인장력)	28.056 kN/m		
P max (압력 축력)	553.500 kN		
S max (압력 전단력)	16.750 kN	Comp T (전단 축력)	0.589
Pσ (압축력)	20.630 MPa	Fσa (전단 압축력)	129.389 MPa
Fσ (압축력)	46.202 MPa	Fσa (전단 압축력)	110.830 MPa
T (전단력)	6.204 MPa	Ta (전단 전단력)	108.000 MPa

HECSA - [Body1]
File Edit View Window Help

Project Setup

Menu List

- Surface Area
- Local Data
- View File
- STRUT File
- 사보간 STRUT File
- 가치별 File
- 속성값별 File
- 미장 File
- 출력 및 복제 File

Tot File Open 현재 tot 파일을 불러온 후 작업하십시오

[비행복 설계] [사보간 비행복] [가치별] [속성값별] [미장 설계] [출력 및 복제]

속성값별 설치간격(m) 2

사보간치 300x300x10x13

w (kg/m)	E (Mpa)	Is (mm ⁴)	Zx (mm ³)	rx (mm)	ty (mm)
94.0	210000.0	0.0002040	0.001360	0.131	0.010
A (mm ²)	Aw (mm ²)	Iy (mm ⁴)	Zy (mm ³)	ry (mm)	tz (mm)
0.01198	0.0027	0.0000675	0.000450	0.075	0.015
B (mm)	H (mm)				
0.300	0.300				

☒ 가설 구조물 (보강계수: 1.5)
 ☐ 영구 구조물 (보강계수: 1.25)

가설 구조물 계수 1.5
 하중률계 차감계수 0.9
 ☒ 0.9
 ☐ 1.0

속성값별 차중 13.227313

비행복 차중 0

미장 차중 100

지중층 차중 50

속성값별 길이 (m) 14.33

최대 유전력 36.4

최대 전단력 31.9

보강의 출력

이동중력 차중			
M max (일계 휨 모멘트)	72.800 kN.m	Fs (근장강 강력)	0.000
P max (일계 휨 축력)	163.227 kN		
S max (일계 전단력)	63.800 kN	Comp T (합성 축력)	0.370
Fb (휨응력)	53.529 MPa	Fba (하중 휨응력)	182.053 MPa
Fc (압축응력)	13.625 MPa	Fca (하중 압축응력)	180.110 MPa
T (전단응력)	23.630 MPa	Ta (하중 전단응력)	108.000 MPa

HECSA - [Body1]

Project Setup

Menu List

Software APP

Input Data

View File

STRUT File

사보갈 STRUT File

가치값 File

수출입력 File

피장 File

물막이 벽체 File

Tot File Open

현재 tot 파일을 불러온 후 저장하십시오

[배치된 물막이] [사보갈 배치된] [가치값] [수출입력] [피장 물막이] [물막이 벽체]

사보갈치 300x300x10x15

Input 계수(mm)

L1 900.000

L2 700.000

L3 800.000

L4 2300.000

L5 6200.000

el 150.000

피장 벽체 432.5

1 인

최대 강도 계수 136.7

No 계수

계수 안전 계수 1600

fy (MPa)

0.05

02 0.60

03 0.50

04 0.50

05 0.30

Relax. 수축계수 0.025

피장 (도) 45

물막이 벽체 두께 F1.0TH22

20 EA

저장할 파일

보여줄 물막이

Input 계수(mm)

Fb1 300.000

Fb1 15.000

Fw1 285.000

Fw1 10.000

Fb1 300.000

Fb1 15.000

Fb2 300.000

Fb2 15.000

Fw2 285.000

Fw2 10.000

Fb2 300.000

Fb2 15.000

Fhunch 150.000

AT (압입 유력) 0.546

ATa(아용 압입 유력) 1.0

FD1(압입 유력) 89.015 MPa

FDa(아용 압입 유력) 119.805 MPa

Fb2(압입 유력) 14.746 MPa

Fb2(단면변위 유력) -40.455 MPa

Fb2(중요부 유력) 46.373 MPa

Fc (축방향 압입 유력) -33.344 MPa

Fca(아용 압입 유력) 118.154 MPa

T (단면변위) 61.011 MPa

Ta (아용 단면변위) 108.000 MPa

MPa(물막이 전단 유력) 27651.687 N

MPa(물막이 아용 전단) -48000.000 N

Nonq(물막이 유력) 8.32 ea

EA (물막이 유력) 20 ea

가설 구조물 계수 1.5

가설 구조물 계수 (보정계수 1.5)

가설 구조물 계수 (보정계수 1.25)

물막이 계수 0.9

0.9

1.0

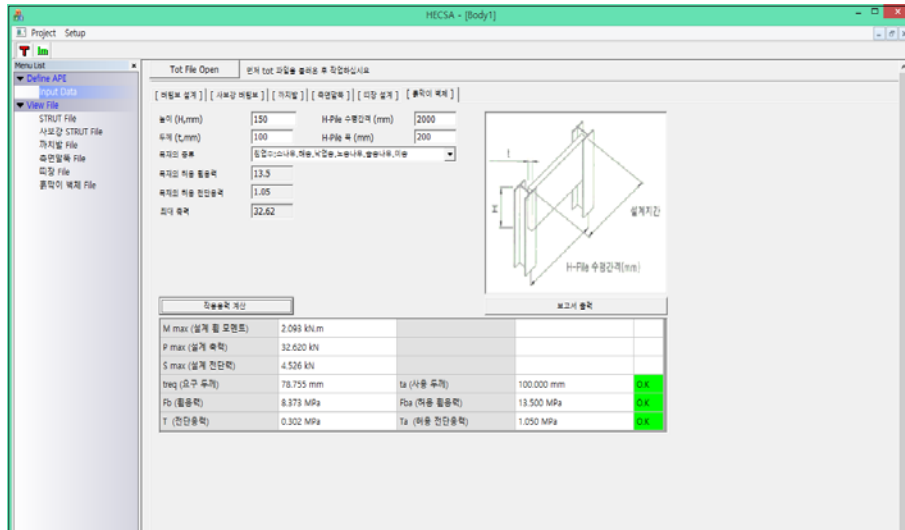
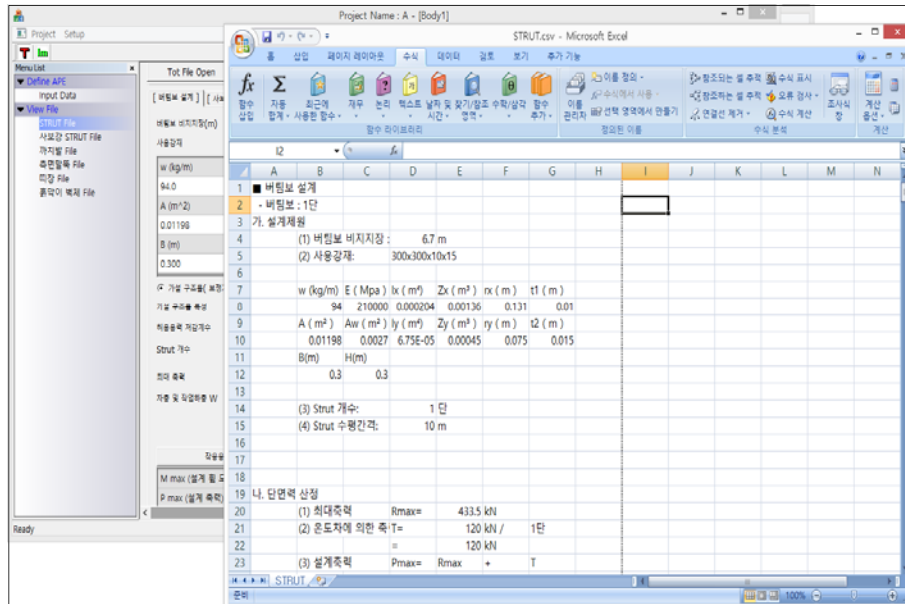


그림 3-6(5). 순탄소성해석 프로그램 변수 입력

○ 계산결과 파일 출력

- 계산한 결과를 CSV파일로 출력한다.
- 출력파일을 트리메뉴에서 선택해 엑셀 프로그램에서 열어볼 수 있다.



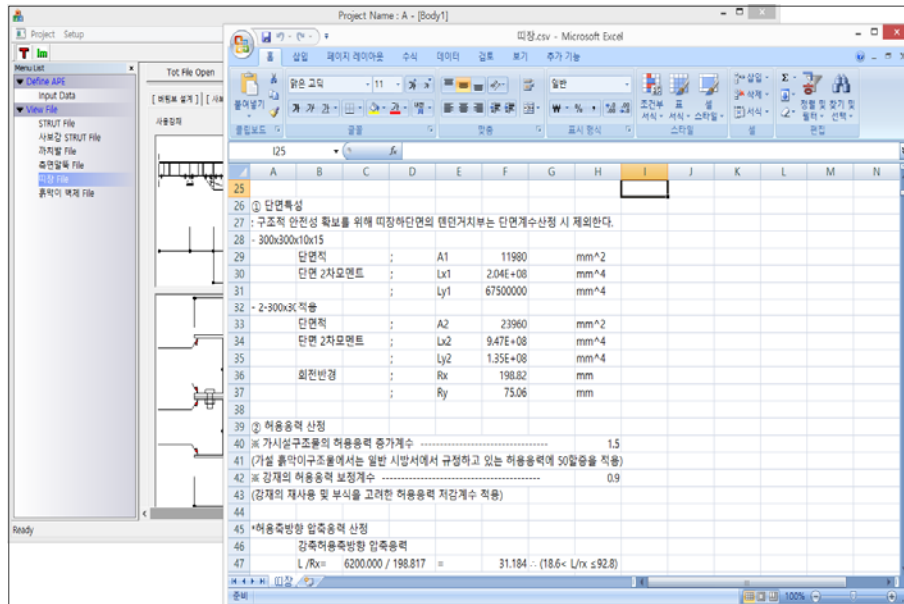


그림 3-6(6). 순탄소성해석 프로그램 출력 파일

○ 계산결과 프린트 출력

- 계산한 결과를 엑셀에서 띄워 프린트로 출력한다.

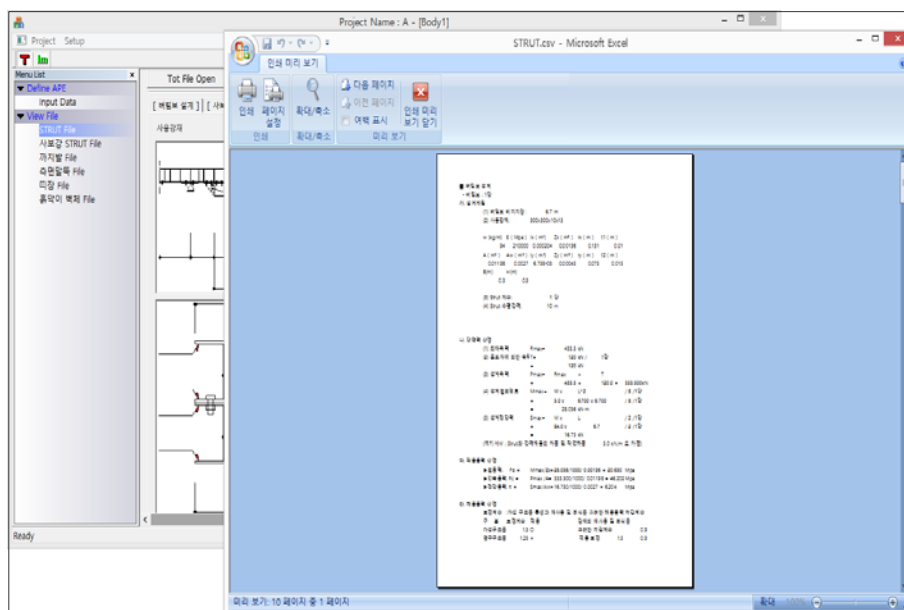


그림 3-6(7). 순탄소성해석 프로그램 계산 결과 출력

3-7. 역해석을 위한 이론정립

3-7-1. 역해석 개요

- 역해석이란 일반적인 순해석에 반대되는 개념으로 모니터링 결과를 이용하여 모델링 매개변수 및 수치해석 모델의 적정성을 평가하는데 유용하여 연구목적으로 많이 활용되고 있다. 역해석은 모델의 검증과 조사가 불충분했던 문제에도 유용하게 활용 될 수 있다.
- 순해석은 설정된 초기조건, 지반물성을 바탕으로 외부하중 등에 의한 변위, 응력 혹은 변형률을 구하는 반면, 역해석은 측정된 변위, 응력, 변형률로부터 초기 응력, 지반물성 및 경계조건 등을 구하는 해석방법으로 수치해석 결과가 현장 계측결과에 일치하도록 수치해석 모형의 미지 매개변수를 구하는 과정을 역해석이라 할 수 있다. 즉, 순해석은 설계변수가 주어진 상태에서 응답변수를 구하는 과정이며, 역해석은 응답변수에서 설계변수를 추정하는 과정으로 순해석에 근거하여 수행된다(지반

- 순해석은 설정된 초기조건, 지반물성을 바탕으로 외부하중 등에 의한 변위, 응력 혹은 변형률을 구하는 반면, 역해석은 측정된 변위, 응력, 변형률로부터 초기 응력, 지반물성 및 경계조건 등을 구하는 해석방법으로 수치해석 결과가 현장 계측결과에 일치하도록 수치해석 모형의 미지 매개변수를 구하는 과정을 역해석이라 할 수 있다. 즉, 순해석은 설계변수가 주어진 상태에서 응답변수를 구하는 과정이며, 역해석은 응답변수에서 설계변수를 추정하는 과정으로 순해석에 근거하여 수행된다(지반



그림 3-7-1. 순해석과 역해석의 관계도

- 일반적으로, 역해석은 두 단계로 진행되며, 다음과 같다.
 - 1 단계 : 문제의 응력, 변형률과 변위의 분포를 결정하기 위한 응력해석 단계
 - 2 단계 : 현장에서 측정된 값과 응력해석으로부터 얻어진 값의 차이를 오차로 해석하고 비선형 오차함수를 최소화시키는 최적화 단계
- 역해석 기법은 크게 역산법, 직접법으로 구분할 수 있다. 역해석은 별도의 역해석 전용 프로그램을 사용하거나, 기존 순해석 프로그램을 활용할 수 있다. 순해석 프로그램을 이용할 경우 시행 착오법으로 해를 구할 수 있으나 많은 시간이 소요되어 비효율적이다(지반역공학II).

3-7-2. 역해석 기법

- 역해석 기법에는 해를 구하는 방법에 따라 정해석의 결과치인 변위나 응력으로부터 설계정수를 구하는 역산법(inverse method)과 정해석을 이용하여 설계 변수를 조정하면서 설계정수를 찾는 직접법(direct method)이 있다. 직접법에는 해를 찾아가는 방법에 따라 결정론적 방법과 확률론적 방법으로 나누게 된다(김병찬, 2017). 본 연구에서는 역해석 기법 중의 하나인 역산법을 적용하여 프로그램을 개발하고자 하였다.

① 역산법

- 역산법은 변위 등 계측자료가 존재할 경우 순해석 지배방정식을 역으로 전개하여 대상지반에 대한 설계변수를 구하는 방법이다. 탄성문제에만 적용 가능하고 비선형이나 점탄성 문제에 적용할 수가 없으므로 대부분 비선형이고, 비가역적인 지반문제에는 역산법을 적용함에 있어 무리가 있다.
- 역산법은 Sakurai(1981)가 직접 변형률 해석기법으로 지속적인 연구가 진행되었다. Sakurai(1983)는 현장시험 결과로부터 지반의 허용 변형률을 산출하고 이를 이용하여, 공동주변 변형률과 한계 변형률을 비교하여 구조물의 안정성을 평가할 수 있는 방법이다. 또한 현장 계측결과로부터 역해석을 수행하여 지반정수 및 초기응력을 구하고, 이를 바탕으로 순해석을 수행하여 공동주변의 변형률 분포를 계산하는 방법을 제안하였다(Sakurai, 1997).

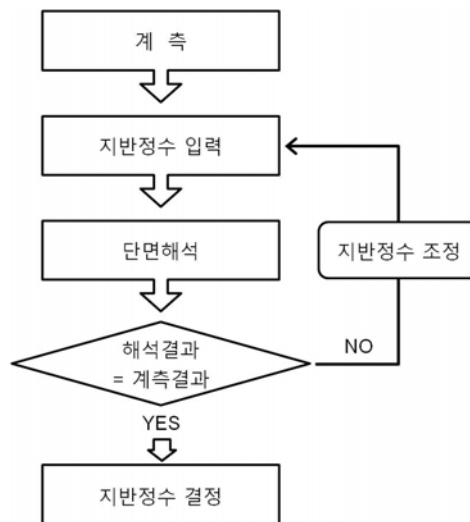


그림 3-7-2. 역산법 절차(Sakurai)

② 직접법

- 직접법은 응답변수인 변위, 응력 등의 계측결과와 해석결과를 비교하여 그 차이가 허용범위 내에 있도록 수치해석을 이용한 반복계산을 통하여 역해석 대상의 매개변수를 구하는 방법이다. 이 기법은 순해석 과정과 계측결과와 해석결과와의 차이인 오차함수를 최소화하는 과정을 포함하며 설계변수의 오차가 허용범위에 수렴할 때까지 반복 계산한다. 이러한 반복계산에 의해 시간이 오래 걸리며, 해의 유일성이 보장되지 않으나 비선형 등 다양한 문제에 적용할 수 있다.
- 대표적인 직접법에는 목적함수의 미분을 사용하지 않는 무작위 탐색법, Simplex법, Complex법과 미분을 이용하는 Powell 방법, 공액구배방법, quasi-Newton 방법, 2차 미분을 사용하는 Newton 방법 등이 있다.

③ 통계학적 방법

- 통계학적인 방법은 계측치의 질적인 오차를 보완하기 위한 방법으로써 통계를 이용한 Bayesian 법에 연구, Kalman filter를 적용한 연구가 있다.

3-8. 역해석 프로그램 알고리즘 개발

3-8-1. 개요

- 본 연구에서는 HiCT공법의 적용 가능한 역해석 알고리즘 및 적용 프로그램 개발을 위해 실험체를 제작하여 띠장의 긴장력과 재하하중에 따른 처짐량의 상관관계 분석을 위한 실험을 수행하였다. 실험결과를 적용하여 긴장력 유압과 재하하중(외력)에 따른 띠장의 처짐량 상관관계를 분석하고, 문제 예측 시 긴장력 유압 조절을 통해 변형량을 상쇄·회복하여 적기 대응 가능토록 지원하는 프로그램을 개발하고자 한다.
- 계측된 처짐량이 허용 처짐량 범위를 초과하였을 경우, 최종 띠장의 처짐량이 허용 처짐량 범위 내에 들어오도록 필요한 최소 추가 긴장력 유압을 산출하여 현장에서 즉시 긴장력 유압 조절을 통해 변형량을 상쇄·회복에 대한 조정 가능토록 지원하는 기술로써, 실시간으로 변화하는 흙막이 구조물의 현 상태의 안전성을 평가하고 현장여건 변화에 적기 대응할 수 있다. 역해석 프로그램 개발을 위해 역해석 기법 중 역산법을 적용하였다.

3-8-2. 역해석에 의한 띠장 검토

- 역해석에 의한 토압의 증가 또는 현장 계측장치를 통해 띠장의 허용 변위량(허용응력 이내 변위) 이상 발생할 경우 띠장의 구조 안전성 검토를 수행하여야 한다. 본 연구에서 개발한 HiCT공법은 강연선 긴장으로 구조 안전성을 확보하는 시공 공법으로 외력에 의해 발생한 변위를 강연선의 긴장을 통해 제어하여야 하므로 이론식과 실제거동의 유사성에 대한 검증이 필요하다.
- 이를 위해 “이론식을 통해 산출된 강연선 긴장력 도입에 따른 띠장의 변위값”과 “실제 강연선에 긴장력을 도입한 후 발생하는 변위값”의 비교·검토를 위한 실험을 실시하였으며, 실험결과 분석을 통해 외력(토압)에 의한 띠장 변형량에 대응하기 위해 강연선 긴장력을 산정할 수 있는 역해석 알고리즘 및 적용 프로그램을 개발하였다.

○ 띠장의 허용처짐 산정

① 띠장 허용처짐 산정 조건

- 띠장은 H-Beam($300 \times 300 \times 10 \times 15$)을 볼트로 연결한 구조로 합성 및 비합성 단면으로 구분하여 검토하였으며, 설계제원에 대한 허용처짐 산정 조건은 다음 표와 같다.

표 3-8-2(1). 허용 처짐량 산정 조건

구 분	300×300×10×15(1ea) 기 준	300×300×10×15(2ea) < 비합성 단면 >	2-300×300×10×15 < 합성 단면 >
강종	SS 400	SS 400	SS 400
탄성계수	20,5000 MPa	20,5000 MPa	20,5000 MPa
A(mm ²)	11,980	23,960	23,960
I약축(mm ⁴)	67,500,000	135,000,000	135,000,000
I강축(mm ⁴)	204,000,000	408,000,000	947,100,000

- 강재의 허용응력 산정 중 구조 안전성을 고려하여 최소 허용응력을 적용한다.

: 허용 휨 인장응력 = 140 MPa

: 가설 시 허용 휨 인장응력 $1.5 \times 0.9 \times 140 = 189$ MPa

: 가시설구조물의 허용응력 증가계수 = 1.5

: 강재의 허용응력 보정계수 = 0.9 (강재의 재사용 및 부식을 고려한 허용응력 저감계수 적용)

: 항복응력 = 235 MPa

a. 휨 모멘트 산정

- 휨 모멘트 산정 식

$$f = \frac{M \cdot y}{I} \Rightarrow M = \frac{f \cdot I}{y}$$

- 합성단면일 경우 휨모멘트

$$f = \frac{M \cdot y}{I} \Rightarrow M = \frac{f \cdot I}{y} = \frac{140 \times 947,100,000}{300} = 442,000,000 \text{ N.mm}$$

- 비합성단면 일 경우

$$f = \frac{M \cdot y}{I} \Rightarrow M = \frac{f \cdot I}{y} = \frac{140 \times 408,000,000}{300} = 190,400,000 \text{ N.mm}$$

b. 허용 처짐량 산정

- 허용 처짐량 산정 식

$$\delta = \frac{5 \cdot w \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{40 \cdot M \cdot l^2}{384 \cdot E \cdot I}$$

- 합성 단면 일 경우

$$\delta = \frac{5 \cdot w \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{40 \cdot M \cdot l^2}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{40 \times 442,000,000 \times 6,020^2}{384 \times 205,000 \times 947,000,000} = 8.594 \text{ mm}$$

- 비합성 단면 일 경우

$$\delta = \frac{5 \cdot w \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{40 \cdot M \cdot l^2}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{40 \times 190,400,000 \times 6,020^2}{384 \times 205,000 \times 408,000,000} = 8.594 \text{ mm}$$

-
- 허용 처짐량 산정 결과, 합성 단면과 비합성 단면의 처짐량 모두 8.594mm 로 동일하게 나타났으므로, 역해석 프로그램에서 띠장의 허용 처짐량 기준은 8.594mm로 적용하여 검토한다.

○ 강연선 긴장에 따른 띠장 처짐량 실험

① 띠장 실험체 제작

- 띠장의 실물 제작을 통해 이론값과 강연선 긴장력에 따른 처짐 결과를 비교하였다. 띠장에는 각 강연선의 신장량 검측을 위한 Vibrating Wire-Sensor(tonf)(이하, VW) 6개, 띠장의 처짐량 측정을 위해 Linear Gauge(mm)(이하, LG) 3개를 부착하였다.

② 띠장 처짐 실험

- 1단계 : 띠장에 강연선을 느슨하지 않게 위치시키기 위하여 각 강연선 당 3tonf(≒30kN)의 긴장력을 재하 하였다. 이 과정에서 초기 긴장력 도입으로 1.4mm의 솟음이 발생하였다.
- 2단계 : 초기 긴장력 도입에 의한 계측값이 실험결과에 반영되지 않도록 하기 위하여 VW(tonf)와 LG(mm)를 영점 조정하였다. 즉, 각 강연선마다 3tonf(≒30kN)씩 jacking 후 영점 조정하였으므로 처짐량인 LG 측정 결과에는 1.4mm 솟음이 포함되어 있지 않다.
- 3단계 : 각 강연선에 긴장력 도입을 위한 유압하중(긴장력 유압)을 6tonf(≒60kN) 재하(2차), 9tonf(≒90kN) 재하(3차), 12tonf(≒120kN) 재하(4차), 15tonf(≒150kN) 재하(5차), 18tonf(≒180kN) 재하(6차)로 순차적으로 증가시키면서, 각 VW와 LG의 값을 계측하였다.

③ 띠장 처짐 실험 결과

- 실험 결과는 다음 표와 같으며, 총 긴장력 유압은 각 강연선에 초기 긴장력 3tonf(≒30kN)를 포함하여 산정하였다.
-

표 3-8-2(2). 강연선 긴장에 따른 띠장 처짐량 실험 결과

구 분		긴장력 유압(kN)	긴장력 유압 총합(kN)	구분	처짐량 (mm)	최대처짐량 (mm)	비고
1차	VW-1	0	149.8	LG-1	-0.001	-	각 강연선에 약 30kN(3tonf)의 긴장력 유압 도입 후 영점조정
	VW-2	0					
	VW-3	0		LG-2	-0.003		
	VW-4	0					
	VW-5	-0.2		LG-3	-0.002		
	VW-6	0					
2차	VW-1	24.5	280.7	LG-1	1.647	1.647	각 강연선에 약 60kN(6tonf)의 긴장력 유압 도입
	VW-2	27.1					
	VW-3	20.8		LG-2	1.602		
	VW-4	17.7					
	VW-5	21.4		LG-3	1.320		
	VW-6	19.4					
3차	VW-1	52.8	440.4	LG-1	3.494	3.494	각 강연선에 약 90kN(9tonf)의 긴장력 유압 도입
	VW-2	53.7					
	VW-3	49		LG-2	3.435		
	VW-4	47.1					
	VW-5	47.6		LG-3	2.824		
	VW-6	40.4					
4차	VW-1	72.2	558.6	LG-1	5.171	5.171	각 강연선에 약 120kN(12tonf)의 긴장력 유압 도입
	VW-2	80.2					
	VW-3	69.8		LG-2	5.117		
	VW-4	68.8					
	VW-5	56.5		LG-3	4.205		
	VW-6	61.3					
5차	VW-1	98.7	699.7	LG-1	7.004	7.004	각 강연선에 약 150kN(15tonf)의 긴장력 유압 도입
	VW-2	99.2					
	VW-3	97.4		LG-2	6.976		
	VW-4	92.3					
	VW-5	79.8		LG-3	5.722		
	VW-6	82.5					
6차	VW-1	121.7	843.9	LG-1	8.767	8.808	각 강연선에 약 180kN(18tonf)의 긴장력 유압 도입
	VW-2	124.7					
	VW-3	122.4		LG-2	8.808		
	VW-4	116.1					
	VW-5	121.7		LG-3	7.202		
	VW-6	87.5					

○ 띠장 이론 산정식 검토

- 이론 산정식을 통해 긴장력 유압에 의한 처짐량 검토 시, 띠장 중앙부에 긴장력 유압에 의한 수직분력이 작용하여 처짐량이 발생하는 것으로 가정하며, 이론 산정식과 긴장력에 의한 분력산정은 다음과 같다.

① 이론 산정식

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

여기서, E = 200,000 MPa
I(비합성) = 408,000,000 mm⁴
I(합성) = 947,100,000 mm⁴
L = 6,020 m

② 긴장력에 의한 분력산정 (α = 6.650°)

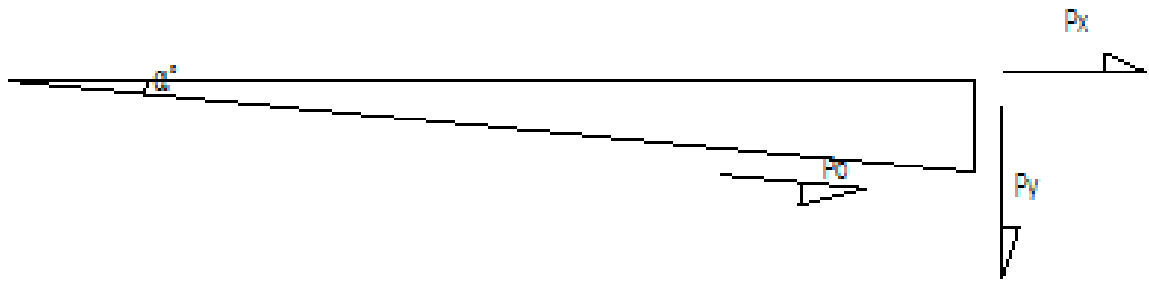


그림 3-8-2(1). 분력 산정 개념도

표 3-8-2(2). 긴장력에 의한 분력

구 분	긴장력(kN)	수평분력(kN)	수직분력(kN)	비 고
2차	280.7	278.8	32.5	각 강연선에 약 60kN(6tonf)의 긴장력 재하
3차	440.4	437.4	51.0	각 강연선에 약 90kN(9tonf)의 긴장력 재하
4차	558.6	554.8	64.7	각 강연선에 약 120kN(12tonf)의 긴장력 재하
5차	699.7	695.0	81.0	각 강연선에 약 150kN(15tonf)의 긴장력 재하
6차	843.9	838.2	97.7	각 강연선에 약 180kN(18tonf)의 긴장력 재하

- 비합성 단면 특성을 고려한 처짐량 산정

표 3-8-2(3). 비합성 단면을 적용한 처짐량 검토

구 분	수직분력(kN)	이론수치 처짐량(mm)	실험수치 처짐량(mm)	실험-이론 차이 처짐량(mm)
2차	32.506	1.811	1.647	-0.164
3차	50.999	2.841	3.494	0.653
4차	64.687	3.603	5.171	1.568
5차	81.026	4.513	7.004	2.491
6차	97.725	5.443	8.808	3.365

※ 처짐량에 대한 검토는 “수직분력”을 적용하였다.

- 합성 단면특성을 고려한 처짐량 산정

표 3-8-2(4). 합성 단면을 적용한 처짐량 검토

구 분	수직분력(kN)	이론수치 처짐량(mm)	실험수치 처짐량(mm)	실험-이론 차이 처짐량(mm)
2차	32.506	0.780	1.647	0.867
3차	50.999	1.224	3.494	2.270
4차	64.687	1.552	5.171	3.619
5차	81.026	1.944	7.004	5.060
6차	97.725	2.345	8.808	6.463

※ 처짐량에 대한 검토는 “수직분력”을 적용하였다.

○ 띠장 전산해석 검토

- 띠장에 강연선 설치형태와 동일하게 모델링을 한 후, 실내 실험과 같이 단위 긴장력 유압을 재하하여 수직분력 성분을 산정하였다. 산정된 수직분력은 띠장 모델링에 수직성분 하중으로 재하하여 해

석하였다. 전산해석에 사용된 프로그램은 공용해석프로그램인 MIDAS-Civil 프로그램을 사용하였으며, 6자유도를 가진 Frame 요소를 적용하였다.

① 강연선 단위하중에 의한 수직분력 산정

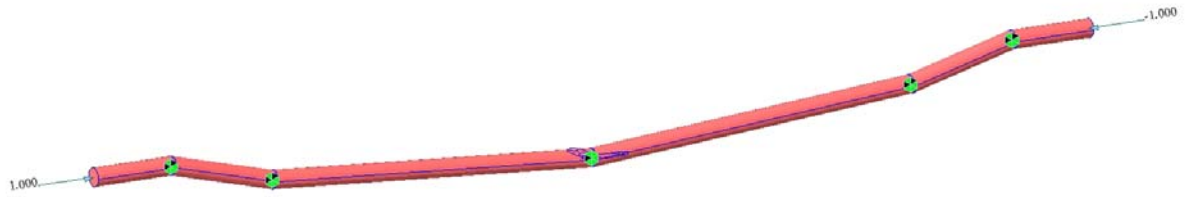


그림 3-8-2(2). 강연선 모델링

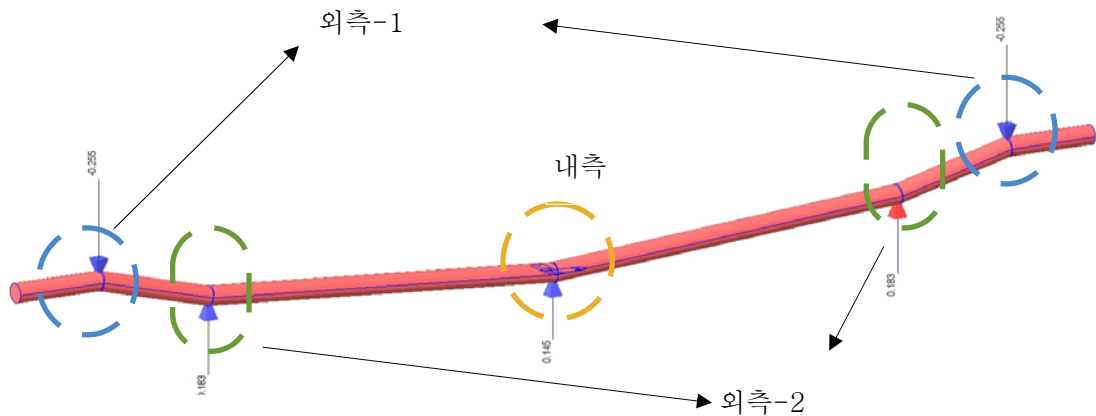


그림 3-8-2(3). 강연선 수직분력

② 전산해석에 의한 수직분력 및 처짐량 산정

- 긴장력 분력 산정 하였다. “+” 는 상향력, “-” 는 하향력을 나타내며, 처짐량 검토는 수직분력을 적용하였다.

표 3-8-2(5). 긴장력에 의한 수직분력 산정

구 분	긴장력(kN)	단위 수직분력(kN)			긴장력에 의한 수직분력(kN)			비 고
		외측-1	외측-2	내측	외측-1	외측-2	내측	
2차	280.7				-71.579	51.368	40.702	
3차	440.4				-112.302	80.593	63.858	
4차	558.6	-0.255	0.183	0.145	-142.443	102.224	80.997	
5차	699.7				-178.424	128.045	101.457	
6차	843.9				-215.195	154.434	122.366	

a. 수직분력을 적용한 처짐량 검토

띠장 모델링 전산 데이터에 수직분력을 재하하고, 모델링은 비합성 단면과 합성 단면 각각 검토하였다.

표 3-8-2(6). 비합성단면 및 합성단면의 모델링

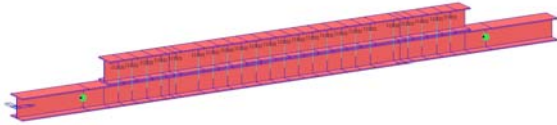
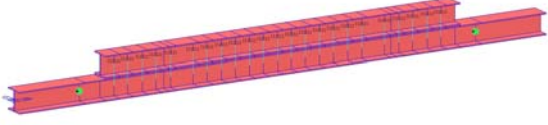
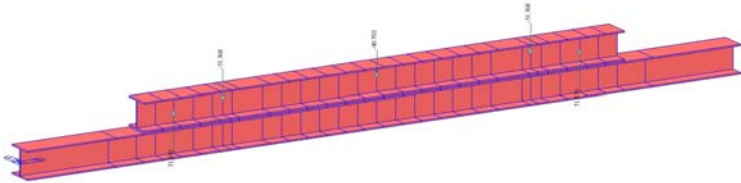
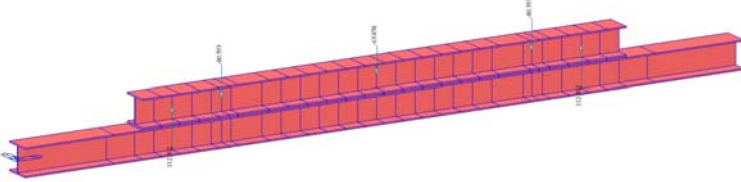
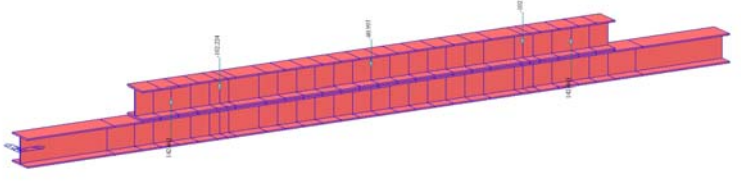
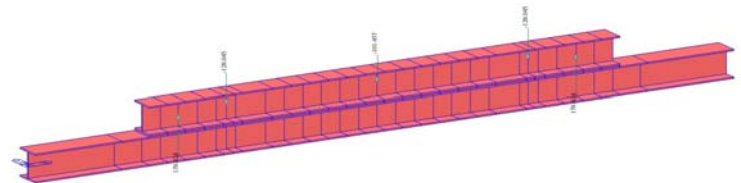
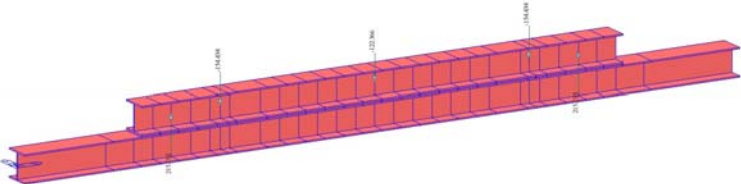
비합성단면	합성단면
 · Rigid Link 적용 및 Link 자유도 적용 시 하중은 전달되고, 모멘트는 전달되지 않도록 선정하여 Beam을 연결함.	 · Rigid Link 적용 및 Link 자유도 적용 시 하중과 모멘트가 전달되도록 선정하여 Beam을 강결함.

표 3-8-2(7). 긴장력에 의한 수직분력 재하

구 분	긴장력에 의한 수직분력 재하
2차	
3차	
4차	
5차	
6차	

b. 비합성 단면특성을 고려한 처짐량 산정 및 검토

표 3-8-2(8). 비합성 단면을 적용한 처짐량 검토

구 분	수직분력 (kN)			전산해석	실험	실험-전산해석
	외측-1	외측-2	내측	처짐량(mm)	처짐량(mm)	처짐량(mm)
2차	-71.579	51.368	40.702	3.248	1.647	-1.601
3차	-112.302	80.593	63.858	4.885	3.494	-1.391
4차	-142.443	102.224	80.997	6.096	5.171	-0.925
5차	-178.424	128.045	101.457	7.542	7.004	-0.538
6차	-215.195	154.434	122.366	9.019	8.808	-0.211

c. 합성 단면특성을 고려한 처짐량 산정 및 검토

표 3-8-2(9). 합성 단면을 적용한 처짐량 검토

구 분	수직분력(kN)			전산해석	실험	실험-전산해석
	외측-1	외측-2	내측	처짐량(mm)	처짐량(mm)	처짐량(mm)
2차	-71.579	51.368	40.702	1.143	1.647	-0.504
3차	-112.302	80.593	63.858	1.719	3.494	-1.775
4차	-142.443	102.224	80.997	2.145	5.171	-3.026
5차	-178.424	128.045	101.457	2.654	7.004	-4.350
6차	-215.195	154.434	122.366	3.173	8.808	-5.635

○ 띠장 이론 산정식과 전산해석 결과

① 띠장 이론 산정식과 실험 데이터 적용 처짐량 비교

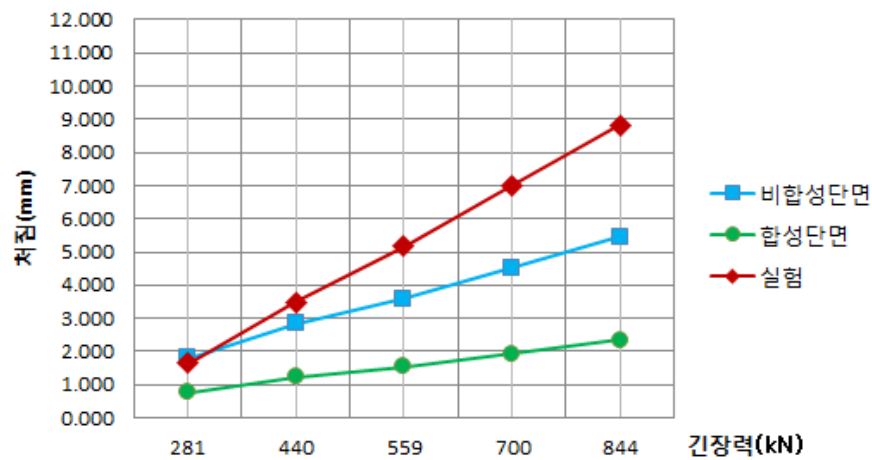


그림 3-8-2(4). 긴장력과 처짐 상관 그래프(이론 산정식 적용)

② 띠장 전산해석과 실험 데이터 적용 처짐량 비교

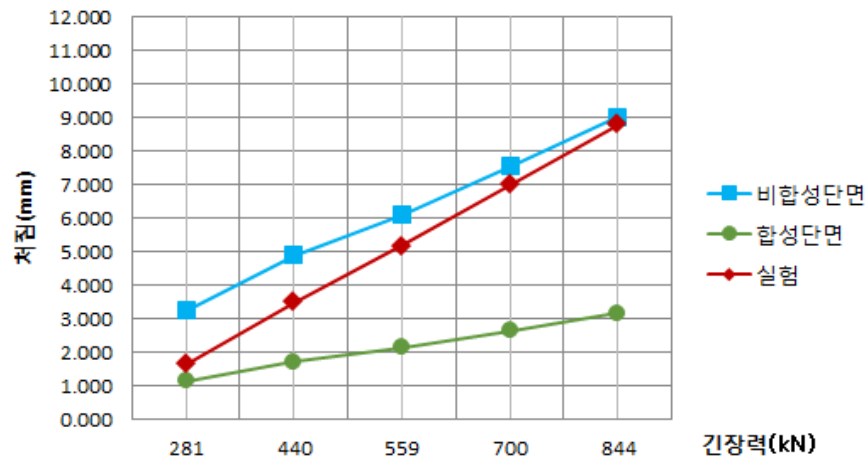


그림 3-8-2(5). 긴장력과 처짐 상관 그래프(전산해석 적용)

③ 실험 결과 분석

- 이론 산정식과 실험결과를 검토한 결과, 비합성 단면을 적용한 2차 긴장력 유압 6tonf(≒60kN) 재하 시 처짐량은 실험결과와 유사하나, 이후 긴장력 유압이 추가되면서 처짐량의 차이가 점점 증가됨을 알 수 있으며, 합성 단면의 처짐량이 비합성 단면보다 처짐량의 차이가 더 크게 나타나는 것으로 검토되었다.

- 전산해석과 실험결과를 검토한 결과, 이론 산정식보다 처짐량의 차이가 적은 것을 알 수 있다. 그러나 이론 산정식과는 반대로 2차 긴장력 유압 재하 시 처짐량의 차이가 가장 컸으며 추가 긴장력 유압을 도입 할수록 차이가 작아지는 것을 확인 할 수 있었다. 전산해석 결과 역시 이론 산정식 결과와 마찬가지로 합성 단면의 처짐량이 비합성 단면보다 처짐량의 차이가 더 크게 나타나는 것으로 검토되었다.
- 본 연구에서는 이론 산정식 결과, 전산해석 결과와 실험결과가 서로 상이하게 나타났으며, 이러한 결과는 실험체의 연결부(Bolt) 불량, 긴장 시 정착부의 탄성수축에 의한 긴장력 손실 등에 의한 오차로 인해 발생한 것으로 판단된다. 본 실험결과 분석에서는 실험체의 강연선 긴장력에 따른 처짐 관계만을 참고하고자 한다.

○ 강연선 긴장력과 외력에 따른 띠장 처짐 실험

① 띠장 실험체 제작

- 띠장 실물 제작을 통해 이론값, 강연선 긴장력과 재하하중에 따른 결과를 분석하고자 하였다. 이전 실험에서는 긴장력과 띠장의 처짐량에 대한 상관관계를 분석하였다면, 본 실험에서는 강연선 긴장과 MTS 장비를 이용하여 하중 재하를 함께 적용함으로써 강연선의 긴장력, 외력에 반응하는 띠장의 처짐량에 대한 실험을 수행하고자 한다.
- 띠장에는 각 강연선에 강연선 신장량 검측을 위한 VW(tonf) 6개, 띠장의 처짐량 측정을 위해 LG(mm) 3개를 부착하였으며, LG의 위치는 다음 그림과 같다.



그림 3-8-2(6). 긴장력과 외력에 따른 띠장 처짐 실험 전경 및 Linear Gauge 부착 위치

② 긴장력과 외력에 따른 띠장의 처짐량 측정 실험

- 띠장에 강연선을 느슨하지 않게 위치시키기 위하여 각 강연선 당 3tonf(≒30kN)의 긴장력을 재하하였다. 이 과정에서 초기 긴장력 도입으로 1.1mm의 솟음이 발생하였으며, 초기 긴장력 도입에 의한 계측값이 실험결과에 반영하지 않도록 하기 위하여 VW(tonf)와 LG(mm)를 영점 조정하였다.
- 실험은 “긴장력 재하→하중재하→하중제거”를 한 사이클로 긴장력과 재하하중을 증가시키며 6번 반복 실험 하였으며, 각 긴장력·하중 재하 및 제거 시 VW와 LG를 측정하였다. MTS 하중 재하 속도는 1mm/min 이다. 단계별 실험순서는 다음과 같다.

- 1차 : 3tonf(초기긴장력)→VW/LG 영점조정→5tonf(하중 재하)→VW/LG 측정→하중 제거→VW/LG 측정→
- 2차 : 20tonf(긴장력재하)→VW/LG 측정→10tonf(하중 재하)→VW/LG 측정→하중 제거→VW/LG 측정→
- 3차 : 40tonf(긴장력재하)→VW/LG 측정→15tonf(하중 재하)→VW/LG 측정→하중 제거→VW/LG 측정→
- 4차 : 60tonf(긴장력재하)→VW/LG 측정→20tonf(하중 재하)→VW/LG 측정→하중 제거→VW/LG 측정→
- 5차 : 80tonf(긴장력재하)→VW/LG 측정→25tonf(하중 재하)→VW/LG 측정→하중 제거→VW/LG 측정→
- 6차 : 100tonf(긴장력재하)→VW/LG 측정→30tonf(하중 재하)→VW/LG 측정→하중 제거→VW/LG 측정→

③ 실험 결과

- 실험 결과는 다음 표와 같으며, 긴장력 유압 총합은 초기 긴장력 유압(180kN = 30kN x 6개)을 포함한다.

표 3-8-2(10). 긴장력과 재하하중에 따른 처짐량 결과

구분	긴장력 유압(kN)						총 긴장력 유압	처짐량(mm)			최대 처짐량(mm)		비 고
	VW-1	VW-2	VW-3	VW-4	VW-5	VW-6		LG-1	LG-2	LG-3	긴장 처짐	하중 재하 처짐	
2차	5.0	6.8	2.0	23.4	4.3	7.0	228.5	-0.635	-0.584	-0.438	-0.635	-	긴장력 200kN
	-	-	-	-	-	-	-	3.167	2.679	2.256	-	3.167	하중 100kN
3차	31.0	29.9	28.1	26.9	26.9	30.3	353.1	-2.429	-2.546	-1.942	-2.546	-	긴장력 400kN
	-	-	-	-	-	-	-	2.469	2.132	1.917	-	2.469	하중 150kN
4차	60.9	55.7	53.1	54.9	56.4	62.3	523.3	-4.242	-4.393	-3.406	-4.393	-	긴장력 600kN
	-	-	-	-	-	-	-	2.370	2.167	1.979	-	2.370	하중 200kN
5차	87.5	77.1	76.2	79.2	80.5	82.2	662.7	-5.965	-6.218	-4.793	-6.218	-	긴장력 800kN
	-	-	-	-	-	-	-	2.852	2.523	2.298	-	2.852	하중 250kN
6차	108.2	104.5	108.0	108.1	106.4	111.3	826.5	-8.353	-8.567	-6.583	-8.567	-	긴장력 1,000kN
	-	-	-	-	-	-	-	1.682	1.521	1.710	-	1.710	하중 300kN

④ 실험 결과 분석

a. 긴장력 유압과 재하하중에 의한 처짐량 분석



그림 3-8-2(7). 긴장력 유압과 재하하중에 의한 처짐량 분석

- 처짐량이 “+” 기호인 구간은 하중 재하로 인해 처짐이 발생함을 의미하며, “-” 구간은 긴장력 유압을 도입하여 반대로 솟음이 발생함을 의미한다. 실험결과, 하중이 재하되었을 때는 처짐량이 증가하였다가 제거하였을 때는 다시 이전 상태로 되돌아오고, 긴장력 유압을 도입하였을 경우 솟음이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다.
- “긴장력 도입 시 처짐량” 과 “긴장력 및 하중재하가 동시에 적용되었을 때 처짐량” 의 분석 결과, 일부구간에서 실험결과의 오류가 발생한 것으로 사료되나, 전체적인 실험결과에는 큰 영향을 미치지 않고, 분석에는 이상이 없는 것으로 판단되어 실험의 신뢰성은 높은 것으로 판단된다.
- "A" 구간의 처짐량 측정 결과, 다른 구간의 처짐 양상과 다른 원인은 초기 긴장력 도입 후 하중재하 시 발생하는 실험체 제작오차(볼트 체결구간, 강연선 정착구 구간의 초기 변형 등)에 의하여 발생한 오류로 판단되며, 초기 긴장력 도입으로 인한 일부 실험결과의 오류는 전체 실험 결과 분석에 미치는 영향이 미비하여 문제가 없을 것으로 판단된다.
- LG의 위치에 따라 처짐량이 서로 상이한 원인은 띠장의 강성차이(유압장치 위치에 따른 강성감소), 중앙부와 측면부 위치에 따른 처짐량의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

b. 재하하중과 처짐량 상관관계

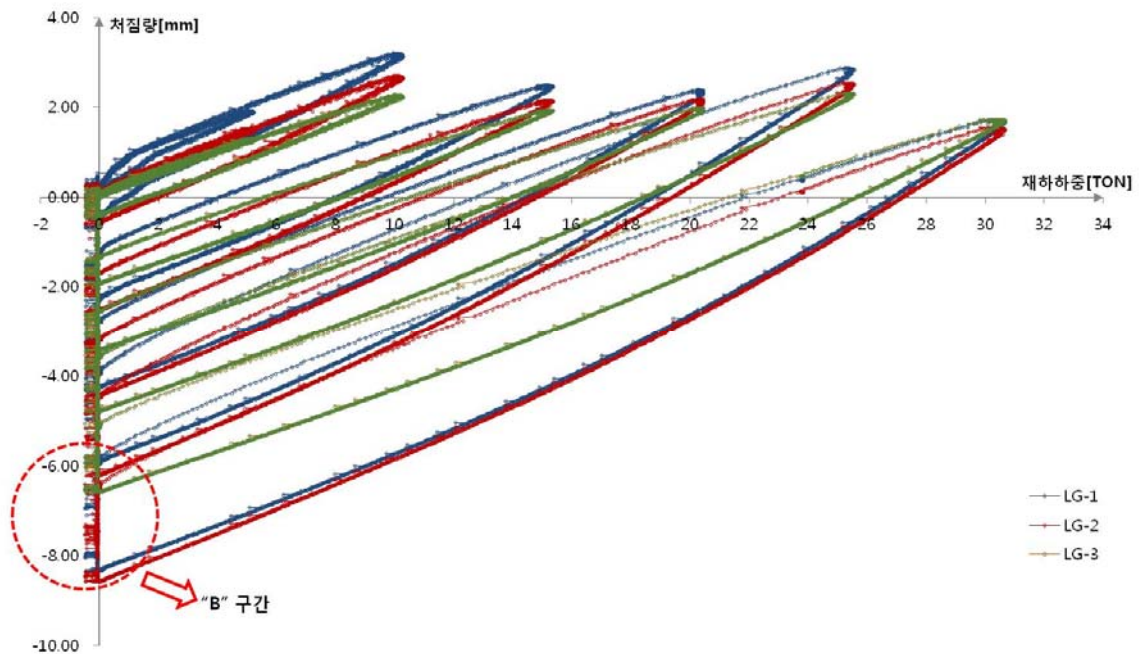


그림 3-8-2(8). 재하하중- 처짐량 상관관계 분석

- 재하하중과 처짐량의 상관관계를 분석하였다. 재하하중이 증가함에 따라 처짐량도 증가되었으며, 하중 제거 시 처짐량이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.
- "B"구간과 같이 하중을 제거한 구간에서의 처짐량은 탄성구간 이내에 존재할 경우 하중재하 직전의 처짐량(긴장력에 의한 처짐량은 보존됨)으로 복구되어야 하나, 하중재하 직전의 상태로 복구되지 못하고 잔류 변형량이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 실험체 제작 시 볼트와 볼트 홀의 유격과다, 유압장치의 유압손실로 인한 긴장력 손실이 사유인 것으로 판단되며, 처짐량의 탄성복원을 제외한 긴장 시와 하중재하 시 처짐량의 문제점은 없는 것으로 판단된다.

c. 재하하중/긴장력 유압에 대한 ‘하중-처짐량’ 상관관계

- 작용하중에 따른 각 처짐량 확인을 통해 계측장치의 신뢰도를 분석하고자 한다.
- 재하하중 5tonf(50kN), 초기 긴장력 유압에 대한 재하하중-처짐량 상관관계

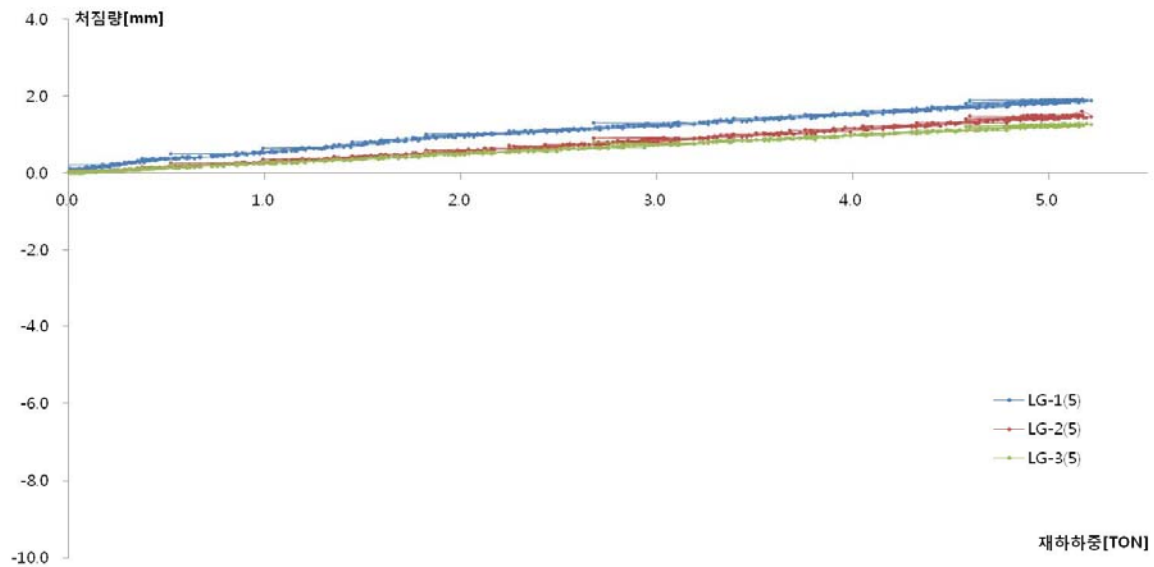


그림 3-8-2(9). 재하하중-침하량 분석(재하하중 5tonf(50kN), 초기 긴장력 유압)

- 재하하중 10tonf(100kN), 긴장력 유압 20tonf(200kN)에 대한 재하하중-침하량 상관관계

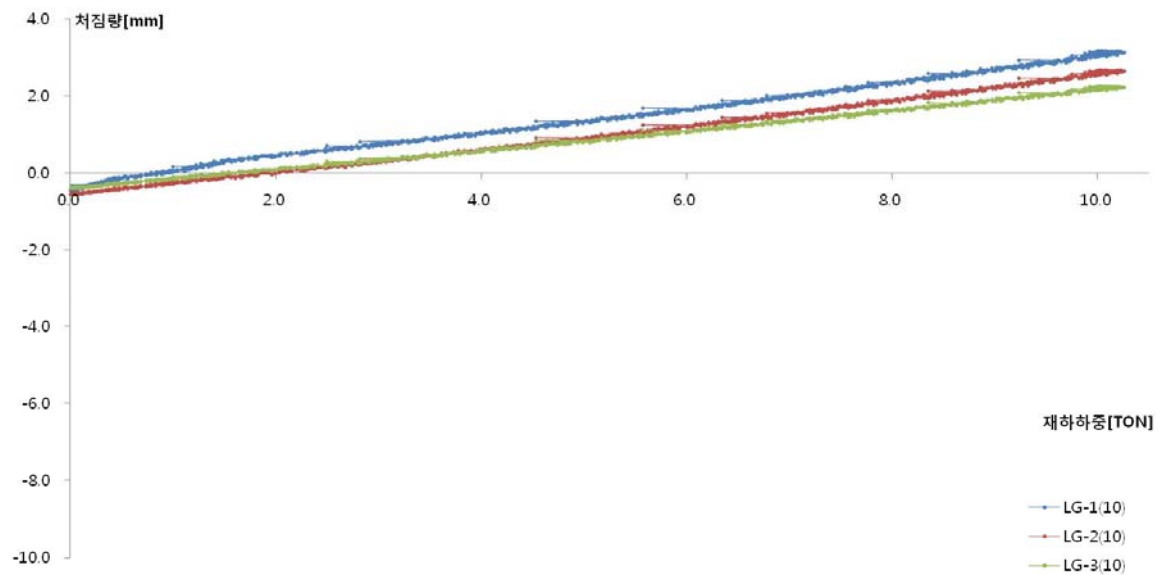


그림 3-8-2(10). 재하하중-침하량 분석(재하하중 10tonf(100kN), 긴장력 유압 20tonf(200kN))

- 재하하중 15tonf(150kN), 긴장력 유압 40tonf(400kN)에 대한 재하하중-침하량 상관관계

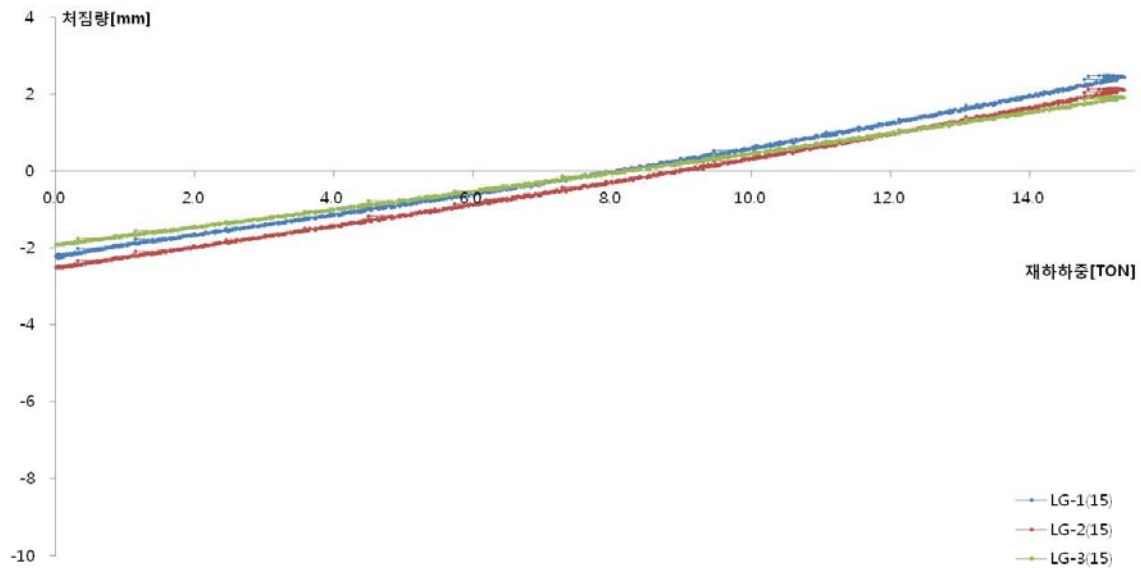


그림 3-8-2(11). 재하하중-처짐량 분석(재하하중 15tonf(150kN), 긴장력 유압 40tonf(400kN))

- 재하하중 20tonf(200kN), 긴장력 유압 60tonf(600kN)에 대한 재하하중-처짐량 상관관계

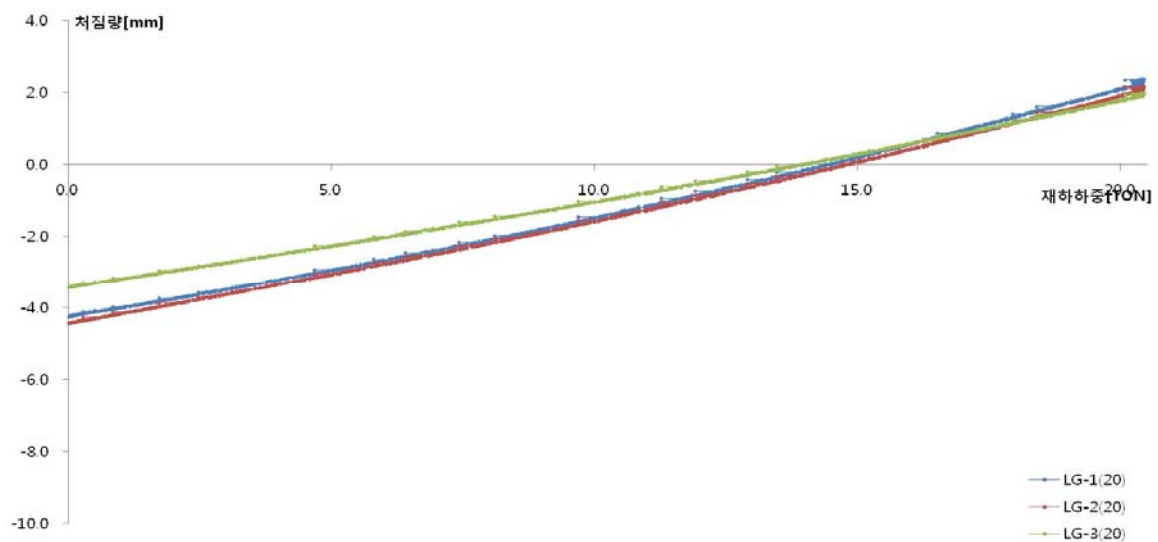


그림 3-8-2(12). 재하하중-처짐량 분석(재하하중 20tonf(200kN), 긴장력 유압 60tonf(600kN))

- 재하하중 25tonf(250kN), 긴장력 유압 80tonf(800kN)에 대한 재하하중-처짐량 상관관계

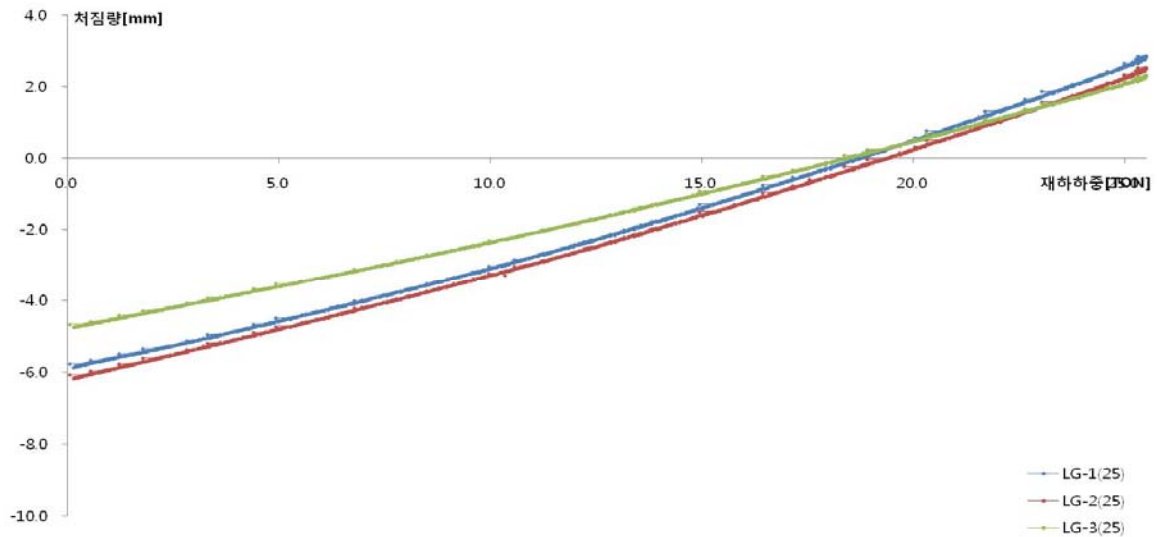


그림 3-8-2(13). 재하하중-처짐량 분석(재하하중 25tonf(250kN), 긴장력 유압 80tonf(800kN))

- 재하하중 30tonf(300kN), 긴장력 유압 100tonf(1,000kN)에 대한 재하하중-처짐량 상관관계

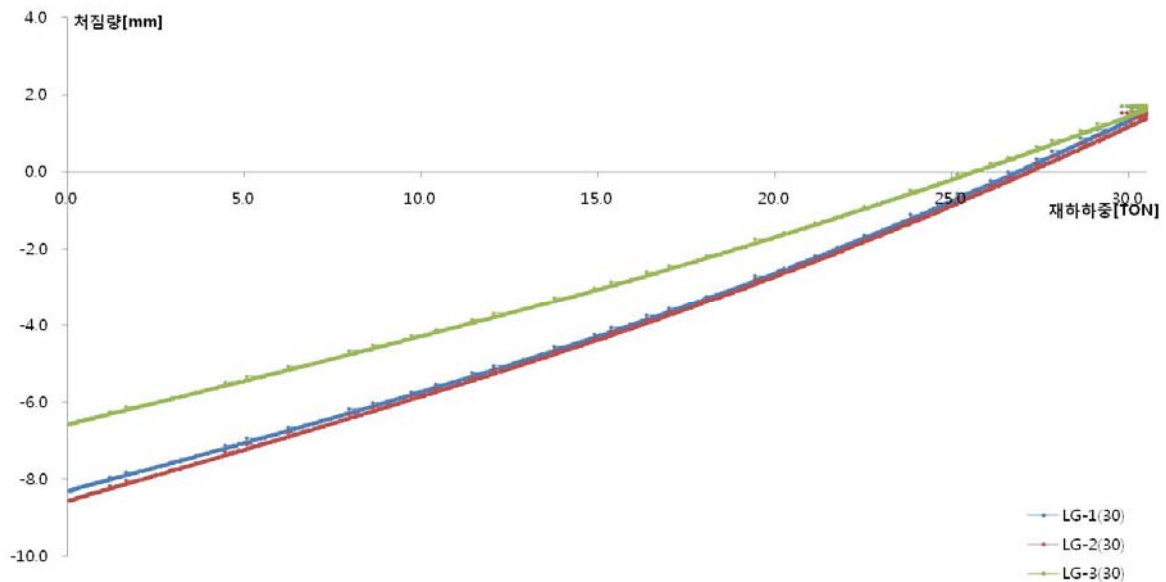


그림 3-8-2(14). 재하하중-처짐량 분석(재하하중 30tonf(300kN), 긴장력 유압 100tonf(1,000kN))

- LG-1, LG-2는 유사한 형태의 그래프를 나타냈으며, 각 단계별로 유사한 패턴을 확인하였다.
- LG-3의 경우엔 LG-1,2와 비교, 분석한 결과 긴장력에 따른 “-” 처짐(숫음)이 작고, 하중재하에 따른 “+” 처짐(처짐량)이 커지는 결과가 나타나 실험결과의 신뢰성이 부족하다고 판단되어 LG-3의 결과는 분석에서 제외하였다.

d. 재하하중/긴장력 유압에 대한 하중-처짐량 상관관계 분석

- 재하하중/긴장력 유압에 대한 분석을 통해 재하하중과 처짐량에 대한 방정식을 유도하였으며, 실험결과와 방정식 추세선을 비교하여 신뢰도(R2)를 분석하였다. 실험결과에 따라 LG-3 실험결과의 신뢰성이 다소 부족하다고 판단되었으므로, 신뢰도 평가는 LG-1과 LG-2에 대하여 분석하였다. 분석결과 LG-1, LG-2 모두 R2 값이 0.99 이상으로 매우 유사하게 나타나 방정식의 신뢰도가 매우 높은 것을 확인 할 수 있었다.

- LG-1 추세선 분석

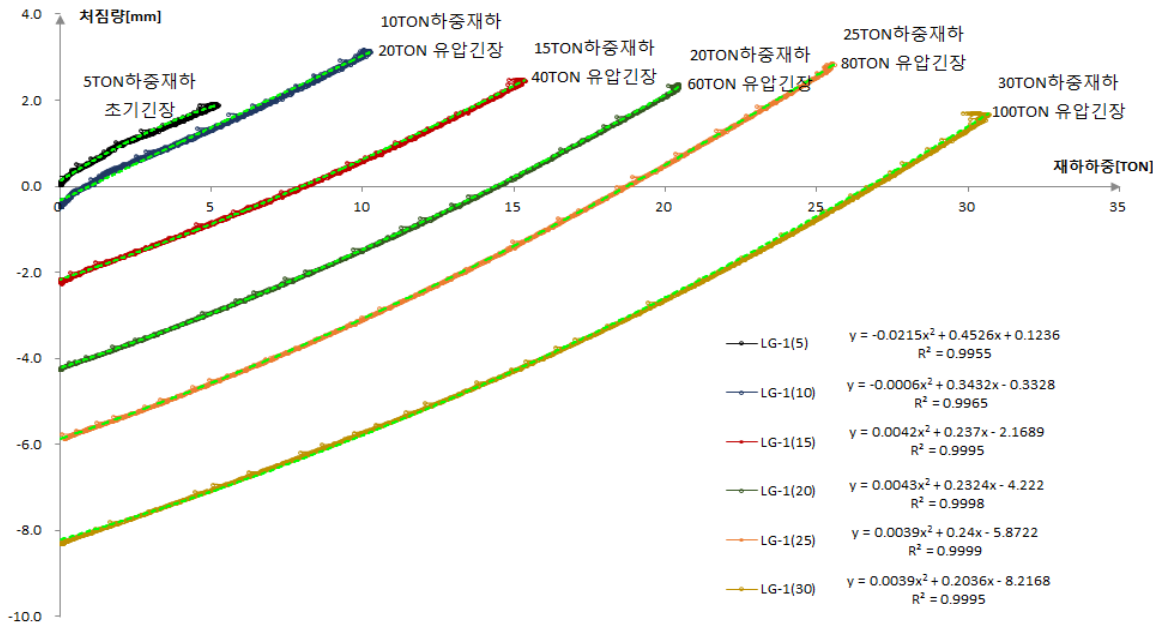


그림 3-8-2(15). LG-1 실험결과-추세선 비교분석

- LG-2 추세선 분석

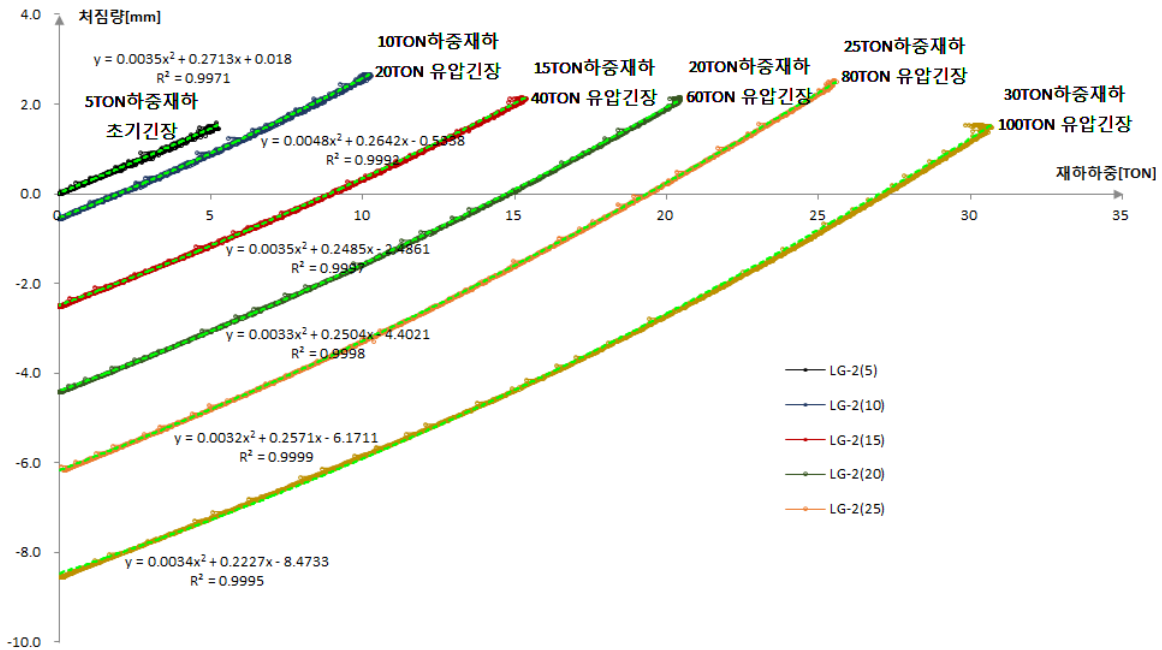


그림 3-8-2(16). LG-2 실험결과-추세선 비교분석

e. 긴장력 유압-초기 처짐량 상관관계 분석

- 긴장력 유압 도입에 따른 초기 처짐량(숫음)을 검토하여 긴장력 유압에 대한 처짐량을 분석하였다.

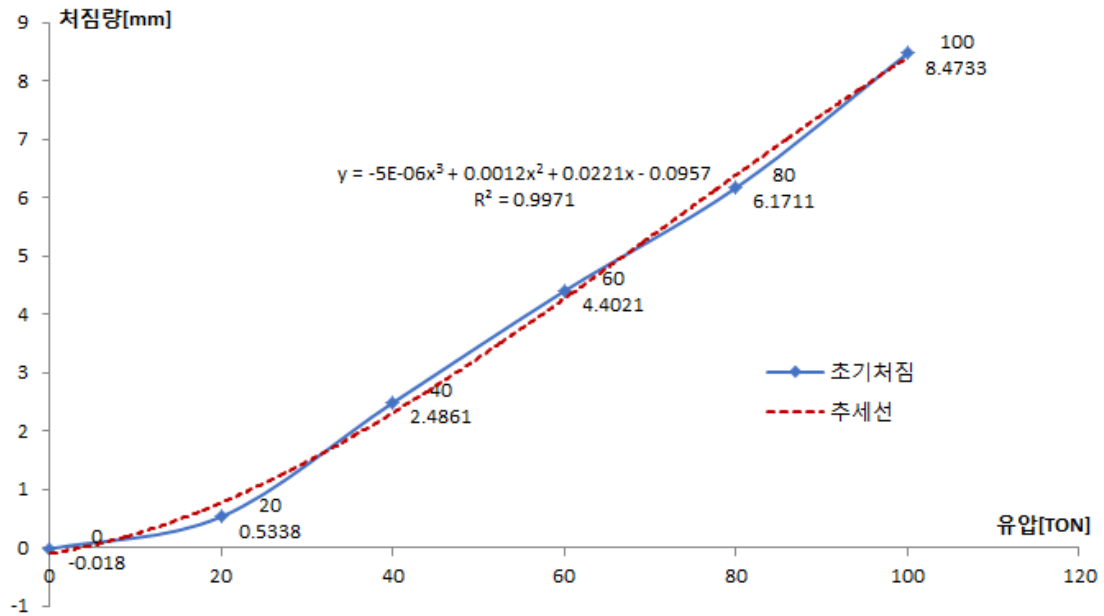


그림 3-8-2(17). 긴장력 유압-초기 처짐량 상관관계 분석

- 실험결과와 추세선의 신뢰도 분석결과 R2가 0.99 이상으로, 방정식의 신뢰도는 매우 높은 것으로 나타났다.
- 초기 긴장력 유압 0~20tonf 구간의 처짐량은 정착구의 탄성변형과 긴장재 늘음에 따른 긴장량 손실로 인해 초기 처짐량의 신뢰성이 부족하다 판단되어 분석에서 제외하였다. 분석 결과를 통해 처짐량과 긴장력 유압의 상관관계식을 도출하였으며, 이를 이용하여 띠장에서 발생한 처짐량에 대응하는 유압하중의 크기를 유추 가능할 것으로 판단된다.

○ 띠장 이론 산정식 방법

- 긴장력에 의한 처짐량 검토 시 띠장 중앙부에 긴장력에 의한 수직분력에 의하여 처짐량이 발생하는 것으로 가정한다. 이론 산정식과 긴장력에 의한 분력산정은 다음과 같다. 이론 산정식을 적용한 검토는 “강연선 긴장에 따른 띠장 처짐 실험”의 “띠장 이론 산정식 검토”와 같은 방법으로 수행하였다.

① 긴장력에 의한 분력산정

표 3-8-2(11). 긴장력에 의한 분력

구 분	긴장력(kN)	수평분력(kN)	수직분력(kN)	비 고
2차	228.5	227.0	26.5	긴장력 유압 200kN 도입, 재하하중 100kN 재하
3차	353.1	350.7	40.9	긴장력 유압 400kN 도입, 재하하중 150kN 재하
4차	523.3	519.8	60.6	긴장력 유압 600kN 도입, 재하하중 200kN 재하
5차	662.7	658.2	76.7	긴장력 유압 800kN 도입, 재하하중 250kN 재하
6차	826.5	820.9	95.7	긴장력 유압 1,000kN 도입, 재하하중 300kN 재하

② 비합성 단면특성을 고려한 처짐량 산정 및 검토

표 3-8-2(12). 비합성 단면을 적용한 처짐량 검토

구분	재하하중 (kN) ①	수직분력 (kN) ②	재하하중 이론처짐량(mm) ③	긴장력 유압 이론처짐량(mm) ④	재하하중-긴장력 유압 이론처짐량(mm) ③-④	실험 처짐량(mm) ⑤	실험-이론 처짐량(mm) ⑤-(③-④)
2차	100	26.461	5.570	1.474	4.096	3.167	-0.929
3차	150	40.890	8.355	2.278	6.077	2.469	-3.608
4차	200	60.599	11.140	3.375	7.765	2.370	-5.395
5차	250	76.742	13.925	4.275	9.651	2.852	-6.799
6차	300	95.710	16.710	5.331	11.379	1.710	-9.669

※ 처짐량에 대한 검토는 “수직분력”을 적용하였다.

③ 합성 단면특성을 고려한 처짐량 산정 및 검토

표 3-8-2(13). 합성 단면을 적용한 처짐량 검토

구분	재하하중 (kN) ①	수직분력 (kN) ②	재하하중 이론처짐량(mm) ③	긴장력 유압 이론처짐량(mm) ④	재하하중-긴장력 유압 이론처짐량(mm) ③-④	실험 처짐량(mm) ⑤	실험-이론 처짐량(mm) ⑤-(③-④)
2차	100	26.461	2.400	0.635	1.765	3.167	1.402
3차	150	40.890	3.599	0.981	2.618	2.469	-0.149
4차	200	60.599	4.799	1.454	3.345	2.370	-0.975
5차	250	76.742	5.999	1.841	4.157	2.852	-1.305
6차	300	95.710	7.199	2.297	4.902	1.710	-3.192

※ 처짐량에 대한 검토는 “수직분력”을 적용하였다.

○ 띠장 전산해석 검토

- 띠장에 강연선 설치형태와 동일하게 모델링을 한 후, 실내 실험과 같이 단위 긴장력 유압을 재하하여 수직분력 성분을 산정하였다. 산정된 수직분력은 띠장 모델링에 수직성분 하중으로 재하하여 해석하였다. 전산해석에 사용된 프로그램은 공용해석프로그램인 MIDAS-Civil 프로그램을 사용하였으며, 6자유도를 가진 Frame 요소를 적용하였다. 전산해석을 적용한 검토는 “강연선 긴장에 따른 띠장 처짐 실험”의 “띠장 전산해석 검토”와 같은 방법으로 수행하였다.

① 전산해석

- 긴장력 분력 산정 하였다. “+”는 상향력, “-”는 하향력을 나타내며, 처짐 검토는 수직분력을 적용하였다.

표 3-8-2(14). 긴장력에 의한 수직분력 산정

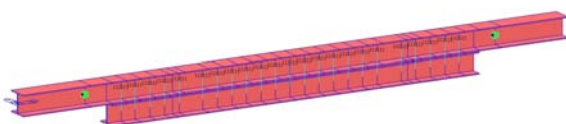
구 분	긴장력 유압 (kN)	단위 수직분력(kN)			긴장력 유압에 의한 수직분력(kN)		
		외측-1	외측-2	내측	외측-1	외측-2	내측
2차	228.5				-58.268	41.816	33.133
3차	353.1				-90.041	64.617	51.200
4차	523.3	-0.255	0.183	0.145	-133.442	95.764	75.879
5차	662.7				-168.989	121.274	96.092
6차	826.5				-210.758	151.250	119.843

② 전산해석에 의한 수직분력 및 처짐량 산정

a. 수직분력을 적용한 처짐량 검토

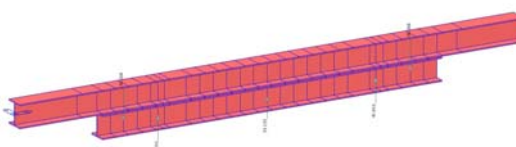
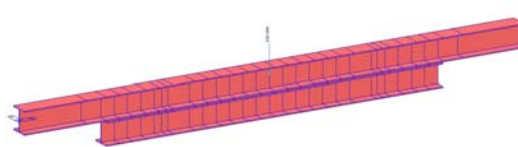
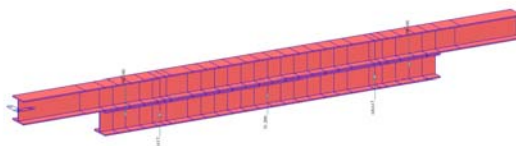
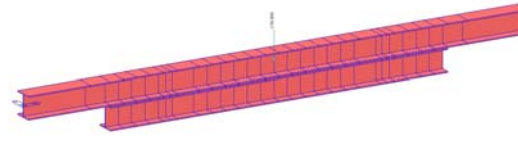
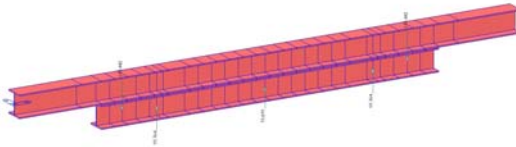
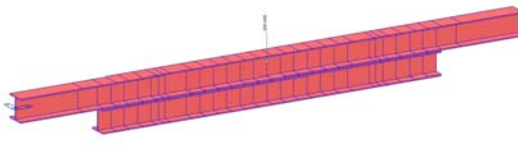
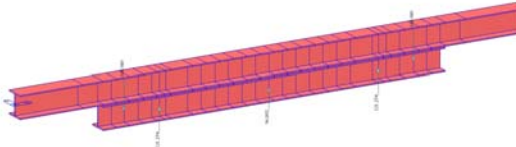
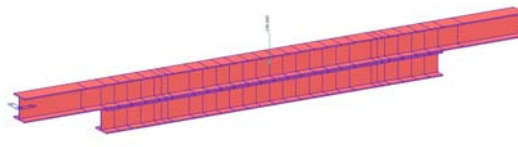
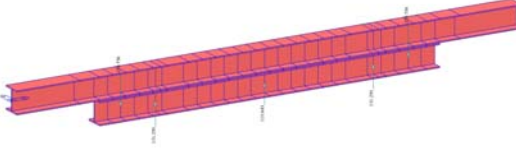
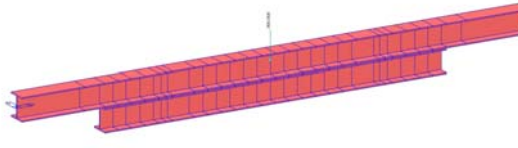
- 띠장 모델링 전산 데이터에 수직분력을 재하하고, 모델링은 비합성 단면과 합성 단면으로 분리하여 각각 검토하였다.

표 3-8-2(15). 강연선 모델링

비합성단면	합성단면
 · Rigid Link 적용 및 Link 자유도 적용 시 하중은 전달되고, 모멘트는 전달되지 않도록 선정하여 Beam을 연결함.	 · Rigid Link 적용 및 Link 자유도 적용 시 하중과 모멘트가 전달되도록 선정하여 Beam을 강결함.

b. 수직분력 및 하중재하

표 3-8-2(16). 긴장력에 의한 수직분력 및 하중재하

구분	긴장력에 의한 수직분력 재하	하중재하
2차		
3차		
4차		
5차		
6차		

③ 비합성 단면특성을 고려한 처짐량 산정 및 검토

표 3-8-2(17). 비합성 단면을 적용한 처짐량 검토

구 분	수직분력(kN)			전산해석 처짐량(mm)	실험 처짐량(mm)	실험-전산해석 처짐량(mm)
	외측-1	외측-2	내측			
2차	-58.268	41.816	33.133	3.426	3.167	-0.259
3차	-90.041	64.617	51.200	5.034	2.469	-2.565
4차	-133.442	95.764	75.879	6.173	2.370	-3.803
5차	-168.989	121.274	96.092	7.629	2.852	-4.777
6차	-210.758	151.250	119.843	8.834	1.710	-7.124

④ 합성 단면특성을 고려한 처짐량 산정 및 검토

표 3-8-2(18). 합성 단면을 적용한 처짐량 검토

구 분	수직분력(kN)			전산해석 처짐량(mm)	실험 처짐량(mm)	실험-전산해석 처짐량(mm)
	외측-1	외측-2	내측			
2차	-58.268	41.816	33.133	1.244	3.167	1.923
3차	-90.041	64.617	51.200	1.828	2.469	0.641
4차	-133.442	95.764	75.879	2.249	2.370	0.121
5차	-168.989	121.274	96.092	2.780	2.852	0.072
6차	-210.758	151.250	119.843	3.223	1.710	-1.513

○ 이론 산정식과 전산해석 결과

① 띠장 이론 산정식과 실험 데이터 적용 처짐량 그래프 비교

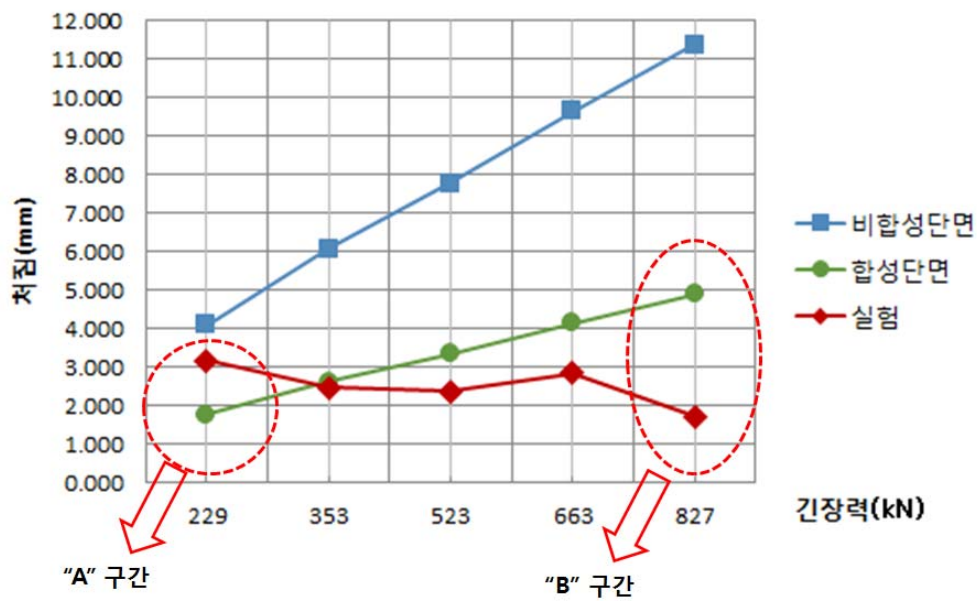


그림 3-8-2(18). 긴장력과 처짐 상관 그래프(이론 산정식 적용)

② 띠장 전산해석과 실험 데이터 적용 시 처짐 그래프 비교

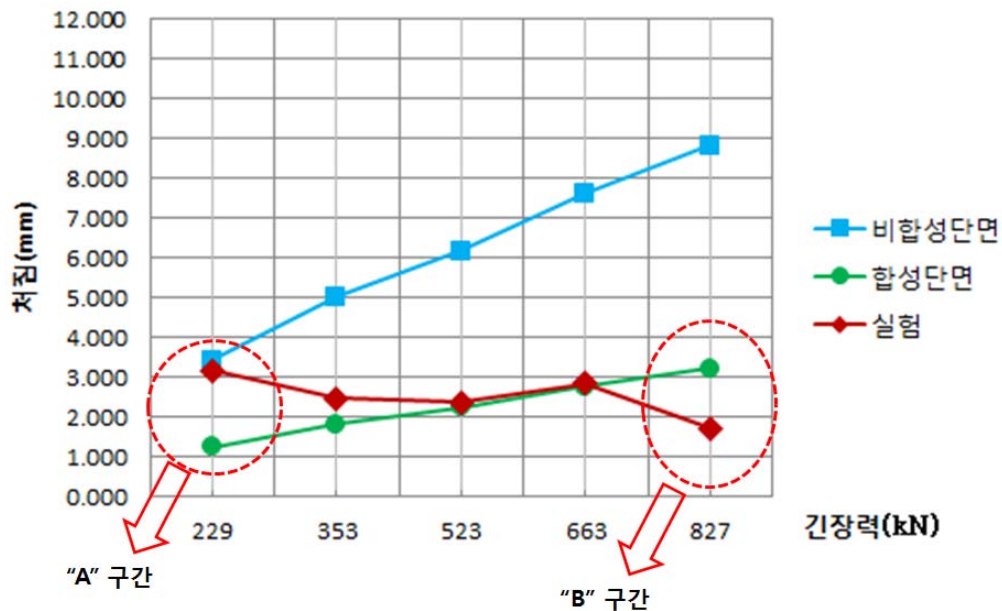


그림 3-8-2(19). 긴장력과 침 상관 그래프(전산해석 적용)

③ 실험 결과 분석

- 실험결과 "A" 구간의 경우 긴장력의 손실(정착구 탄성변형, 강연선의 긴장력 손실, 연결 볼트의 유격에 의한 손실)로 인해 차이가 발생한 것으로 판단되며, "B"구간의 경우 실험 수행 시 원인을 알 수 없는 다양한 원인으로 인해 이상 처짐이 발생한 것으로 판단되어 결과 분석에서 제외하였다.
- 이론산정식과 전산해석과 실험결과의 비교 분석 결과, 비합성 단면보다 "합성단면"으로 분석한 결과가 실험결과와 유사한 형태를 보이고 있으므로, 띠장은 합성거동을 하는 것으로 판단된다.

○ 실험결과를 활용한 띠장 전산해석과 실험 데이터 비교 추가검토

- 실험결과와 전산해석결과를 비교·검토한 결과, 합성 단면(Rigid-Type) 검토 조건에서 실험결과와 유사한 형태로 나타났으므로, 합성 단면 조건을 적용하여 추가 검토를 수행하였다.
- 긴장력이 없는 상태에서의 재하하중만 10tonf~30tonf 증가 시키며 측정된 처짐량에 대하여 검토하였으며, 긴장력 유압을 20tonf~60tonf 도입 후, 재하하중 증가에 따른 처짐량을 검토하였다.

① 재하하중만 증가시킬 경우

a. 하중재하 시 처짐량 산정 및 검토

- 실험 데이터의 긴장 시 솟음(“-” 처짐량)과 하중재하 시 처짐량을 이용하여 긴장력 유압이 없을 때의 재하하중에 따른 순수 처짐값이 필요하며, 이는 재하하중 처짐량과 강연선 긴장력 유압 도입 시 처짐량의 차로 산정할 수 있다.(재하하중에 따른 처짐량 - 긴장력 유압 도입 시 처짐량 = 순수 처짐량)

표 3-8-2(19). 하중재하에 따른 처짐량 산정

구 분	재하하중 (kN)	전산 해석 처짐량(mm)	실험 처짐량(mm)_최댓값			실험-전산 처짐량 (mm)
			긴장력 유압	재하 하중	하중재하 처짐량- 긴장력 유압 처짐량	
2차	100.0	2.068	-0.635	3.167	3.802	1.734
3차	150.0	3.101	-2.546	2.469	5.015	1.914
4차	200.0	4.135	-4.393	2.370	6.763	2.628
5차	250.0	5.169	-6.218	2.852	9.070	3.901
6차	300.0	6.203	-8.567	1.710	10.277	4.074

b. 작용하중과 처짐 그래프

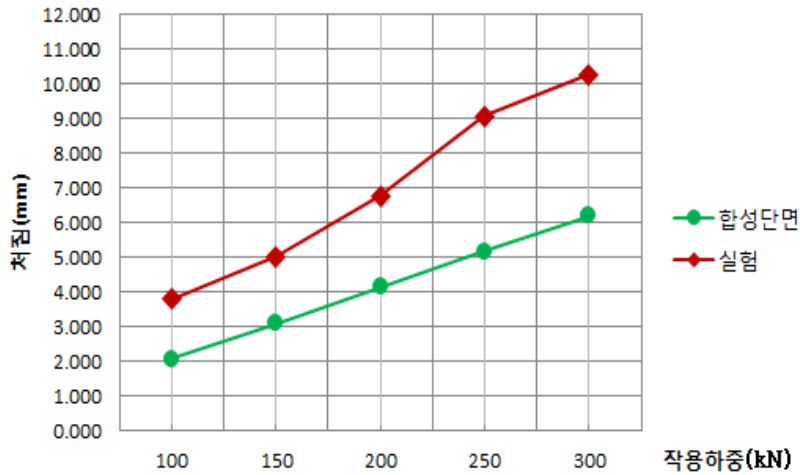


그림 3-8-2(20). 하중만 재하할 경우 작용하중과 처짐 상관 그래프

② 강연선 긴장력 유압 20~60tonf 까지 도입 후, 재하하중을 증가시킬 경우

- 긴장력 유압 20tonf~60tonf 도입(초기 긴장력 유압 18tonf 포함)하고, 재하하중을 증가시켰을 경우 처짐량을 검토하고자 하였다. 2차~6차의 재하하중 처짐량은 “긴장력 유압이 없을 때의 재하하중에 따른 순수 처짐량”으로 재하하중 처짐량과 강연선 긴장력 유압 도입 시 처짐량의 차로 구할 수 있다.

a. 긴장력 유압 20tonf, 재하하중 증가에 따른 처짐량 산정 및 검토

표 3-8-2(20). 긴장력 유압 20tonf, 하중재하에 따른 처짐량 산정

구분	재하하중(kN)	수직분력(kN)			전산해석 처짐량(mm)	실험 긴장력 유압	실험 처짐량(mm)_최댓값		실험-전산 (mm)
		외측-1	외측-2	내측			재하하중	하중재하+긴장력 유압 처짐량	
2차	100.0	-58.268	41.816	33.133	1.244	-0.635	3.802	3.167	1.923
3차	150.0	-58.268	41.816	33.133	2.278	-0.635	5.015	4.380	2.102
4차	200.0	-58.268	41.816	33.133	3.311	-0.635	6.763	6.128	2.817
5차	250.0	-58.268	41.816	33.133	4.345	-0.635	9.070	8.435	4.090
6차	300.0	-58.268	41.816	33.133	5.379	-0.635	10.277	9.642	4.263

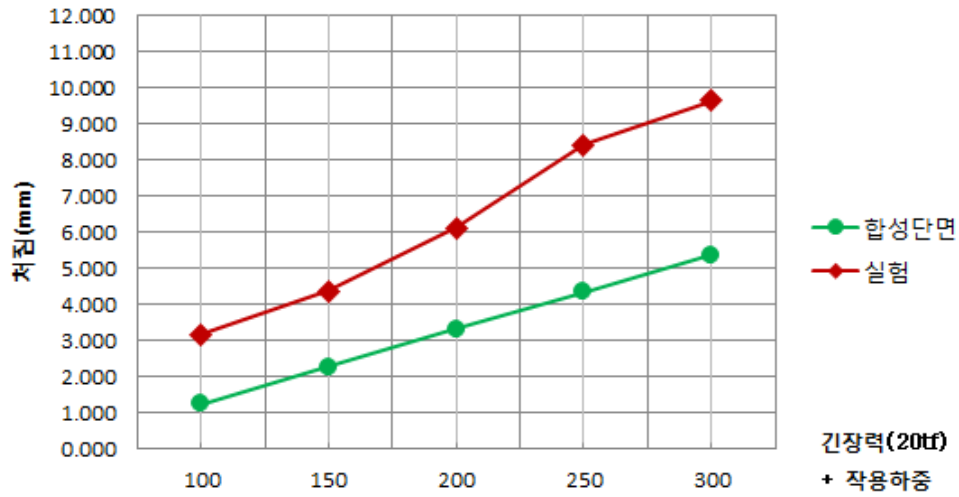


그림 3-8-2(21). 2차 긴장력 유압 및 재하하중과 처짐량 상관 그래프

b. 긴장력 유압 40tonf, 재하하중 증가에 따른 처짐량 산정 및 검토

표 3-8-2(21). 긴장력 유압 40tonf, 하중재하에 따른 처짐량 산정

구분	재하하중 (kN)	수직분력(kN)			전산해석 처짐량 (mm)	실험 처짐량(mm)_최댓값			실험-전산 (mm)
		외측-1	외측-2	내측		긴장력 유압	재하 하중	하중재하+긴장력 유압 처짐량	
2차	100.0	-58.268	41.816	33.133	1.244	-0.635	3.802	3.167	1.923
3차	150.0	-90.041	64.617	51.200	1.828	-2.546	5.015	2.469	0.641
4차	200.0	-90.041	64.617	51.200	2.862	-2.546	6.763	4.217	1.355
5차	250.0	-90.041	64.617	51.200	3.896	-2.546	9.070	6.524	2.628
6차	300.0	-90.041	64.617	51.200	4.930	-2.546	10.277	7.731	2.801

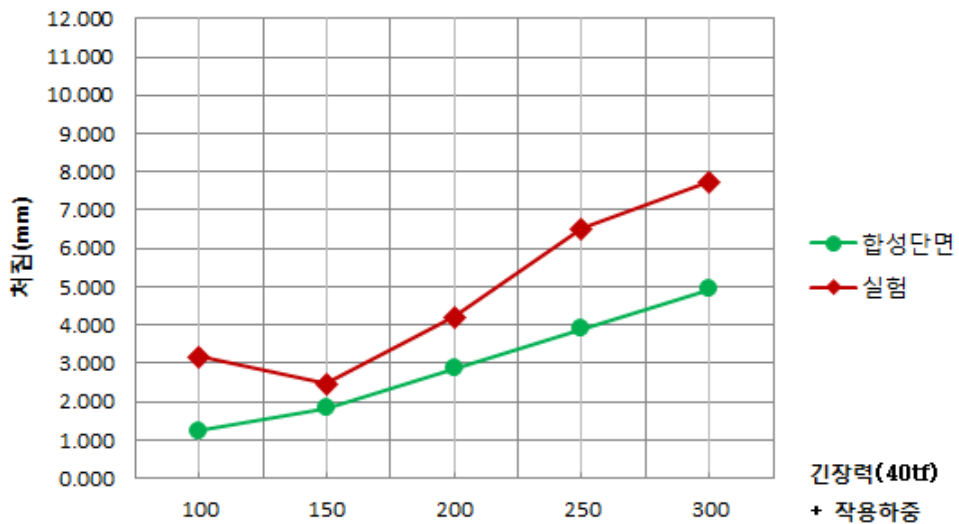


그림 3-8-2(22). 3차 긴장력 유압 및 재하하중과 처짐 상관 그래프

c. 긴장력 유압 60tonf, 재하하중 증가에 따른 처짐량 산정 및 검토

표 3-8-2(22). 긴장력 유압 60tonf, 하중재하에 따른 처짐량 산정

구분	재하 하중 (kN)	수직분력(kN)			전산해석 처짐량 (mm)	실험 처짐량(mm)_최댓값			실험-전산 (mm)
		외측-1	외측-2	내측		긴장력 유압	재하 하중	하중재하+긴장력 유압 처짐량	
2차	100.0	-58.268	41.816	33.133	1.244	-0.635	3.802	3.802	3.167
3차	150.0	-90.041	64.617	51.200	1.828	-2.546	5.015	5.015	2.469
4차	200.0	-133.442	95.764	75.879	2.249	-4.393	6.763	6.763	2.370
5차	250.0	-133.442	95.764	75.879	3.282	-4.393	9.070	9.070	4.677
6차	300.0	-133.442	95.764	75.879	4.316	-4.393	10.277	10.277	5.884

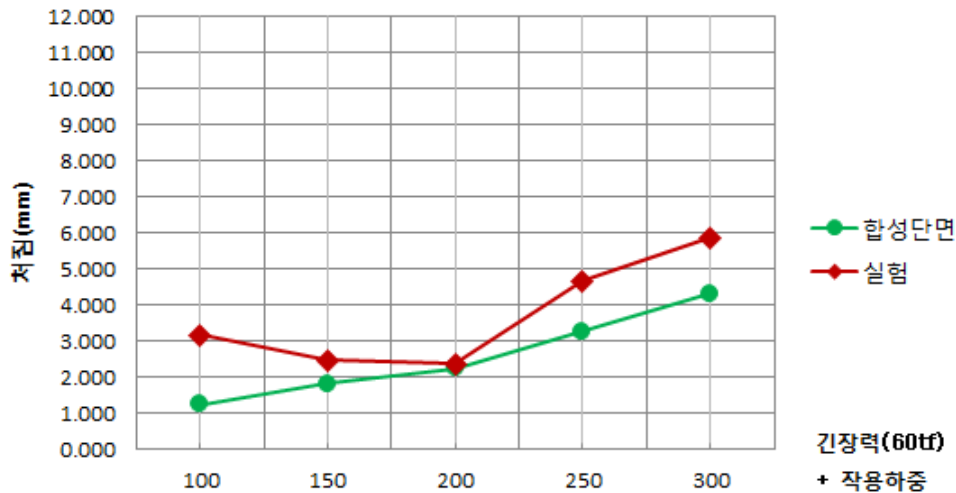


그림 3-8-2(23). 4차 긴장력 유압 및 재하하중과 처짐 상관 그래프

③ 추가 검토 결과

- 긴장력이 없는 상태에서의 전산해석과 실험 데이터의 비교 결과, 실험 데이터의 변형량이 최대 약 4mm로 크게 나타났다. 이는 실험체와 전산해석의 단면계수 및 연결 접합부의 특성값이 일부 상이한 것으로 판단된다.
- 강연선 긴장을 고려한 데이터 분석에서는 긴장력 유압이 도입된 구간의 처짐량의 차이가 전산해석과 실험의 차이가 유사한 것으로 분석되었으며, 이는 강연선 긴장에 따른 처짐량 감소가 유사하게 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 추가 검토를 통해 전산해석에서 적용한 강연선에 의한 수직분력 산정을 통한 검토와 실험 데이터는 신뢰도가 양호한 것으로 판단되며, 추후 현장 계측실험을 통해 보완이 필요하다.

3-8-3. 재하하중-긴장력 유압하중-처짐량 상관관계 분석을 통한 알고리즘 개발

- 현장에서 수신 가능한 데이터는 띠장에 긴장력 도입을 위한 “긴장력 유압”과 계측된 “띠장의 처짐량”이다. 따라서 역해석 프로그램을 통해 긴장력 유압과 처짐량을 분석하고, 현재 상태에서 처짐량이 허용 처짐량 범위 내에 들어올 수 있도록 추가 긴장력 유압 산출이 가능해야 한다.
- 이를 위해 실험 데이터를 이용하여 재하하중/유압하중에 대한 “하중-처짐량”의 상관관계를 분석하였으며, 상관관계 방정식을 산출하였다. 산출된 방정식은 실험 결과와 비교·검토하였을 때 R2가 0.99 이상으로 매우 높은 신뢰도를 보였으므로 각 방정식을 분석하여 처짐량이 허용처짐 범위를 초과하였을 경우, 처짐량이 허용 처짐량 범위 내에 들어오도록 추가 긴장력 유압을 도출해 내는 프로그램을 개발하고자 한다. 프로그램 개발은 하중 재하 시 가장 처짐량이 큰 LG-1을 기준으로 하였다.
- 초기긴장으로 인한 결과는 탄성변형, 긴장재 늘음에 따른 긴장량 손실로 인해 초기 처짐량의 데이터의 신뢰성이 부족하다는 문제점이 제기되어 분석에서 제외하였다.

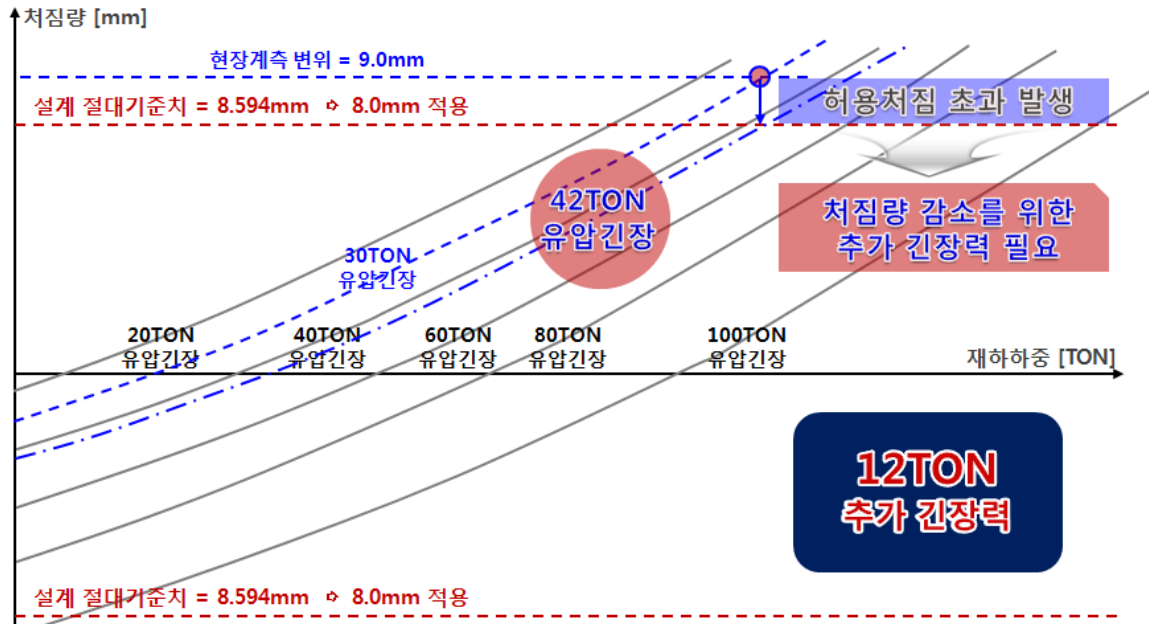


그림 3-8-3(1). 역해석 프로그램 알고리즘 예시

○ 역해석 프로그램 알고리즘 순서도

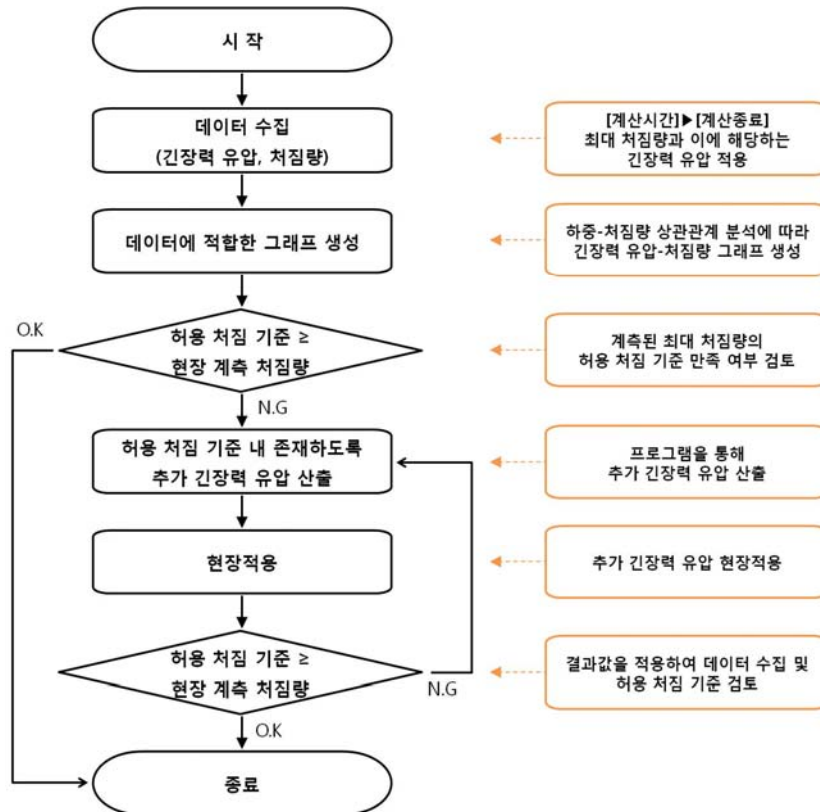


그림 3-8-3(2). 역해석 프로그램 알고리즘 순서도

3-9. 역해석 프로그램 설계

3-9-1. 역해석 프로그램 개요

- 역해석 프로그램은 환경여건 변화에 따른 토압변화에 의해 발생한 실제 처짐량을 측정하고, 현 흙막이 공법의 계측을 통한 유지관리 문제점을 개선하기 위해 측정된 처짐량이 허용 처짐량(설계 절대기준치)을 초과하였을 경우 처짐량 감소를 위해 HiCT 흙막이 공법 긴장력 조절을 위한 추가 긴장력 유압을 계산하여 처짐량이 설정한 기준 범위 내에 있도록 결과값을 산정해주는 프로그램이다.

- 운용 OS는 Window 기반 IBM호환 컴퓨터로 한다. (WindowXP, Window7, Window8, Window10)
- 개발언어는 C++, 개발도구는 MS의 비주얼스튜디오(MFC)를 사용한다.
- 사용방법 : 시리얼 통신에 연결 후 데이터가 수신되면 [계산시작] 버튼을 눌러 데이터를 수집하고 [계산 종료] 버튼을 누르면 통신포트로 최대 처짐량에 대하여 허용 처짐량(설계 절대기준치)을 초과하였는지에 대한 여부를 검토하여 초과하였을 경우 처짐량이 설정한 기준 범위 내에 있도록 계산하여 최소압력 결과값(총 긴장력 유압, 추가 긴장력 유압, 재하 하중)을 출력해준다.

3-9-2. 역해석 프로그램의 특징

- 본 연구에서 개발하고자 하는 역해석 프로그램의 특징은 다음과 같다.
- (1) 실험 결과 분석을 통해 얻은 방정식 계수값은 현장여건에 따라, 분석결과에 따라 사용자가 변경 및 개선 가능하다.
 - (2) 각 실험 데이터 분석을 통해 실험하지 않은 다른 긴장력 유압에 대한 곡선방정식을 유추해 낼 수 있다.
 - (3) 긴장력 유압과 처짐량을 수신 받아 데이터에 적합한 곡선에 대하여 도식화 가능하다.
 - (4) 예측된 처짐량이 허용 처짐량 범위를 초과하였을 경우 허용 처짐량 범위 내에 존재하도록 곡선 방정식을 수직 평행 이동하여 허용 처짐량까지 도달하기 위한(처짐량 감소를 위한) 총 긴장력 유압과 추가 긴장력 유압 산출이 가능하다. 허용처짐 범위는 합성 단면과 비합성 단면의 처짐 검토 결과 모두 8.594mm 로 동일하게 나타났으므로, 역해석 프로그램 개발을 위해 피장의 처짐 기준은 $\pm 8.594\text{mm}$ 이내로 적용한다.
 - (5) 허용처짐 기준은 프로그램 내에서 변경 가능하다.
 - (6) 계산 시작버튼과 계산 종료 버튼을 통해 데이터를 수집하는 시간 조정이 가능하다.
 - (7) 수집된 데이터 중 처짐량은 가장 큰 것 적용하고 유압하중은 최대 처짐량에 해당하는 유압하중을 적용하여, 계산 수행 후 시리얼포트로 출력한다.

3-9-3. 역해석 프로그램의 주요 기능 및 모듈

① INI 파일 처리 모듈

- 사용자가 변경하고자 하는 데이터를 [Option.ini] 파일에 긴장력 유압과 처짐량을 입력하는 위치에 작성하여 저장하고, 역해석 프로그램을 실행할 때 저장한 데이터를 적용하여 해당 변수들을 자동으로 설정하기 위해 필요한 파일 파싱 모듈이다.
- 현장에서 수신된 데이터를 적용하여 자동으로 역해석이 가능하며, 현장 데이터 수신이 불가능한 현 단계에서 프로그램 개발 검증을 위해 사용자가 직접 파일[Option.ini]에 긴장력 유압과 처짐량을 저장하여 프로그램 구동가능 여부를 확인할 수 있다.

② 시리얼 통신 모듈

- 시리얼 케이블을 통해 현재 긴장력 유압과 처짐량을 수집하고, 최대 처짐량이 허용 처짐량(설계 절대기준치)을 초과하였을 경우 처짐량이 설정한 기준 범위 내에 있도록 필요한 최소압력 결과값을 시리얼 통신포트로 전송하기 위한 모듈이다.

③ 그래프 모듈

- 재하하중-처짐량 그래프와 유압-초기 처짐량 그래프를 도식화하기 위한 모듈로 포인트-라인 그래프, 2차 방정식 그래프, 3차 방정식 그래프 형식에 대하여 구현 가능하다.
- 재하하중-처짐량 상관관계 분석 그래프에서 세 종류의 그래프에 대하여 구현 가능하다. 실험결과 분석을 통해 도출한 방정식을 적용하여 작성된 기준 그래프, 수집한 데이터(최대 처짐량, 해당 긴장력

유압)를 적용한 현장 상태의 그래프 그리고 현장에서 수신한 최대 처짐량이 허용 처짐량(설계 절대 기준치)을 초과하였을 경우 허용 처짐량 기준 내에 존재하기 위해 필요한 최소압력 결과값을 분석하여 나타내는 최종 그래프에 대하여 구현 가능하다.

- 유압-초기 처짐량 상관관계 분석 그래프에서는 실험결과를 분석하여 도출한 방정식에 대한 그래프를 수식화 하였다.

④ 리스트 컨트롤

- 그래프 결과값을 볼 수 있도록 리스트 컨트롤로 표현하였다.

⑤ 경보 발령 기능

- 일정 시간간격으로 시리얼 포트 접속 상태를 확인하며 연결이 끊어졌을 때 경보를 발령해주는 기능이다.

3-9-4. 최소 압력 결과값 분석

- 1단계: 실내실험을 수행한 20tonf, 40tonf, 60tonf, 80tonf, 100tonf에서의 재하하중, 긴장력 유압과 처짐량 상관관계 분석을 통해 도출한 방정식을 입력한다.
- 2단계: 현장에서 시리얼 통신으로 수신된 긴장력 유압을 적용하여 1단계에서 입력한 방정식을 기준으로 가상의 2차 방정식을 유추한다.

double ratio, dA, dB, dC;

```
if (dlnPress<20 || dlnPress> 100)
return false
else if (dlnPress >= 20 && dlnPress < 40)
{
ratio = (dlnPress - 20) / 20.0
dA = (g_option.dA3 - g_option.dA2)*ratio + g_option.dA2;
dB = (g_option.dB3 - g_option.dB2)*ratio + g_option.dB2;
dC = (g_option.dC3 - g_option.dC2)*ratio + g_option.dC2;
}
else if (dlnPress >= 40 && dlnPress < 60)
{
ratio = (dlnPress - 40) / 20.0
dA = (g_option.dA4 - g_option.dA3)*ratio + g_option.dA3;
dB = (g_option.dB4 - g_option.dB3)*ratio + g_option.dB3;
dC = (g_option.dC4 - g_option.dC3)*ratio + g_option.dC3;
}
else if (dlnPress >= 60 && dlnPress < 80)
{
ratio = (dlnPress - 60) / 20.0
dA = (g_option.dA5 - g_option.dA4)*ratio + g_option.dA4;
dB = (g_option.dB5 - g_option.dB4)*ratio + g_option.dB4;
dC = (g_option.dC5 - g_option.dC4)*ratio + g_option.dC4;
}
else if (dlnPress >= 80 && dlnPress <= 100)
```

```

{
ratio = (dlnPress - 80) / 20.0
dA = (g_option.dA6 - g_option.dA5)*ratio + g_option.dA5;
dB = (g_option.dB6 - g_option.dB5)*ratio + g_option.dB5;
dC = (g_option.dC6 - g_option.dC5)*ratio + g_option.dC5;
}

```

```

g_option.dIA = dA;
g_option.dIB = dB;
g_option.dIC = dC;

```

- 3단계: 시리얼 통신으로 수신된 처짐량을 적용하여 2단계에서 계산한 2차방정식을 역산하여 적합한 재하하중(X)값을 찾는다.

```

bool CDataView::BisectX(double dlnPress, double dlnY, double* dX)
{
double dError = 999999, dGap=0.01, dCX, dCY;
dCX = 20

for (int i = 0 i < 100000 i++)
{
if (dError < dGap || dCX>g_option.nMaxXP)
{
*dX = dCX;
bFind = true
break
}

dCY = g_option.dIA*dCX*dCX + g_option.dIB*dCX + g_option.
dIC;
dError = fabs(dlnY - dCY);

dCX = dCX + 0.001
}
return bFind;
}

```

- 4단계: 수신된 현장 계측 처짐량이 허용 처짐량 기준을 초과하였을 경우 기준 범위 내에 있도록 필요한 최소압력 결과값(총 긴장력 유압, 추가 긴장력 유압, 재하 하중)을 산출해야 한다. 결과값을 산출하기 위해 수만 번의 루프문을 거치면서, 각각의 방정식에 의해 계산된 처짐량과 허용 처짐량의 차이가 오차범위(0.01로 책정)안에 들어오는 방정식을 찾는다.

```

bool CDataView::BisectPress(double dlnPress, double dlnDist, double dlnX, double* dPress,
    double* dY)
{
    bool bFind = false
    double ratio, dError=999999,dGap=0.01,dPress2,dY2, dA, dB, dC;
    dPress2 = dlnPress

    for (int i = 0 i < 100000 i++)
    {
        if (fabs(dError) < dGap || dPress2 < 20 || dPress2> 100)
        {
            *dPress = dPress2;
            *dY = dY2;
            g_option.d0A = dA;
            g_option.d0B = dB;
            g_option.d0C = dC;
            bFind = true
            break
        }

        if (dPress2<20 || dPress2> 100)
            break
        else if (dPress2 >= 20 && dPress2 < 40)
        {
            ratio = (dPress2 - 20) / 20.0
            dA = (g_option.dA3 - g_option.dA2)*ratio + g_option.dA2;
            dB = (g_option.dB3 - g_option.dB2)*ratio + g_option.dB2;
            dC = (g_option.dC3 - g_option.dC2)*ratio + g_option.dC2;
        }
        else if (dPress2 >= 40 && dPress2 < 60)
        {
            ratio = (dPress2 - 40) / 20.0
            dA = (g_option.dA4 - g_option.dA3)*ratio + g_option.dA3;
            dB = (g_option.dB4 - g_option.dB3)*ratio + g_option.dB3;
            dC = (g_option.dC4 - g_option.dC3)*ratio + g_option.dC3;
        }
        else if (dPress2 >= 60 && dPress2 < 80)
        {
            ratio = (dPress2 - 60) / 20.0
            dA = (g_option.dA5 - g_option.dA4)*ratio + g_option.dA4;
            dB = (g_option.dB5 - g_option.dB4)*ratio + g_option.dB4;
            dC = (g_option.dC5 - g_option.dC4)*ratio + g_option.dC4;
        }
        else if (dPress2 >= 80 && dPress2 <= 100)
        {

```

```

ratio = (dPress2 - 80) / 20.0
dA = (g_Option.dA6 - g_Option.dA5)*ratio + g_Option.dA5;
dB = (g_Option.dB6 - g_Option.dB5)*ratio + g_Option.dB5;
dC = (g_Option.dC6 - g_Option.dC5)*ratio + g_Option.dC5;
}

dY2 = dA*dlnX*dlnX + dB*dlnX + dC;

dError = dY2 - g_Option.dLimit;
if (dError>0)
dPress2 = dPress2 + 0.001
else if (dError < 0)
dPress2 = dPress2 - 0.001
}
return bFind;
}

```

- 5단계: 산출된 최종 최소압력 결과값(총 긴장력 유압, 추가 긴장력 유압, 재하 하중)을 시리얼 통신으로 출력하고 그래프에 표시한다.

3-10. 역해석 프로그램 개발

3-10-1. 초기설정

- [Option.ini] 파일에서 역해석 프로그램 가상작동 모드(데모)의 사용/미사용을 결정해야 한다. 데이터를 수신 없이 가상으로 프로그램을 구동시키기 위해서는 IsDemo 항목을 1, 미사용 상태인 경우에는 0으로 설정한다. InitP 에 초기 긴장력 유압값(tonf), InitY에는 처짐량(mm)을 입력한다.

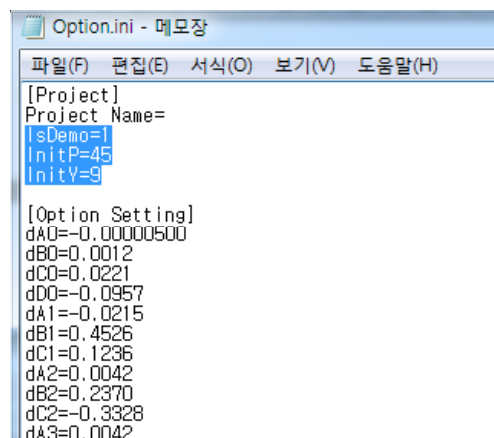


그림 3-10-1. Option.ini 파일에서 초기설정

3-10-2. 초기화면

- 아래 그림과 같이 [계산시작], [계산종료] 버튼을 통해 시리얼 통신으로 데이터 수집 시작과 종료를 사용자의 편의에 따라 조절 가능토록 하였다. 계산종료와 동시에 최대 처짐량과 해당하는 긴장력 유압을 적용하여 최소압력 결과값(총 긴장력 유압, 추가 긴장력 유압, 재하 하중) 산출을 위한 계산이 수행된다.
- 수신데이터는 총 긴장력 유압과 처짐량이며, 계산 종료 후 송출 데이터는 프로그램을 통해 계산이

완료된 총 긴장력 유압, 추가 긴장력 유압과 재하하중이다.

그림 3-10-2(1). 시리얼 통신데이터 수집 조절기능

- 역해석 프로그램에서는 “재하하중-처짐 상관관계 그래프”와 “유압-초기처짐 상관관계 그래프” 두 종류의 그래프에 대하여 도식화 하였다.

① 재하하중-처짐 상관관계 그래프

- 실험결과를 분석하여 산출된 방정식과 방정식에 따른 기준 그래프 그리고 허용처짐 기준선에 대한 정보가 나타나도록 하였다. 허용 처짐량의 경우 사용자가 8.594mm 이내 범위에서 적합한 값을 설정할 수 있다. 분석을 통해 산출된 허용 처짐량은 8.594mm 이므로 기준을 제시해 주고, 적용한 허용 처짐량은 기준 옆에 별도 제시해 주도록 설정하였다.

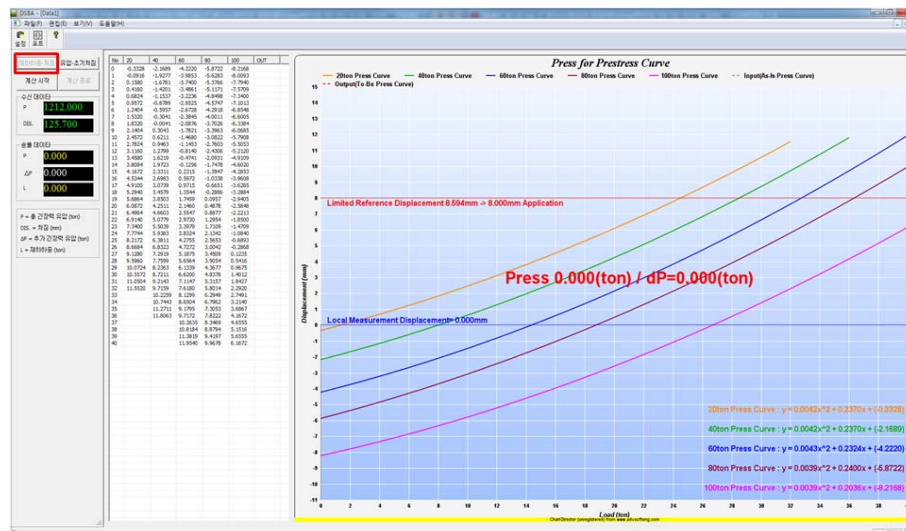


그림 3-10-2(2). 프로그램 초기화면(재하하중-처짐상관관계 그래프

② 유압-초기처짐 상관관계 그래프

- 실험결과를 분석하여 산출한 방정식과 방정식에 따른 기준 그래프를 나타낸다. 수신 데이터에 의해 변화되는 그래프는 아니며, 유압과 초기처짐의 상관관계 분석결과에 대한 정보제공을 목적으로 한다.

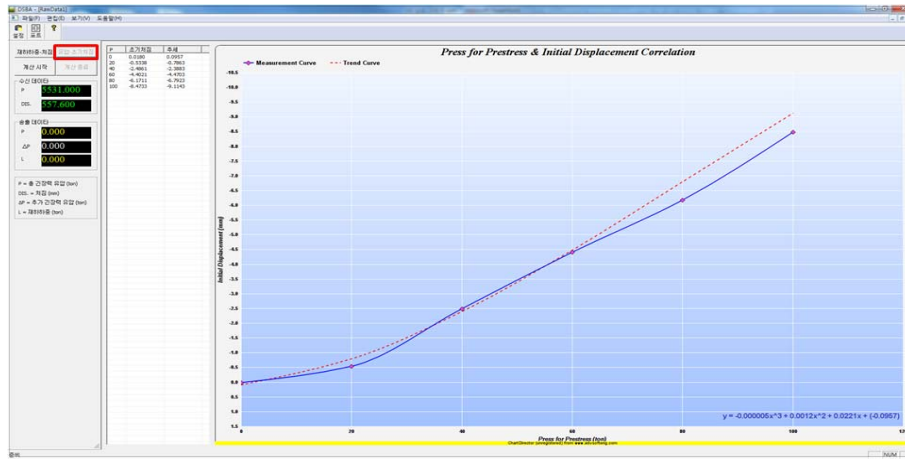


그림 3-10-2(3). 프로그램 초기화면(유압-초기 처짐량 상관관계 그래프)

3-10-3. 포트설정

- [편집]/[포트설정] 메뉴에서 시리얼 통신 컴포트를 설정한다.

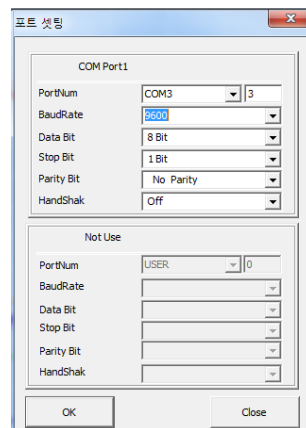


그림 3-10-3. 포트설정

3-10-4. 옵션 설정

- [보기]/[옵션 보기] 메뉴 또는 툴바의 [설정]버튼을 눌러 옵션창을 실행시킨다. 옵션에서는 재하하중-처짐량 상관관계 그래프와 유압-초기처짐 상관관계 그래프의 방정식 계수값 수정이 가능하며, 최대 재하하중과 제한처짐(허용 처짐량) 설정이 가능하다.

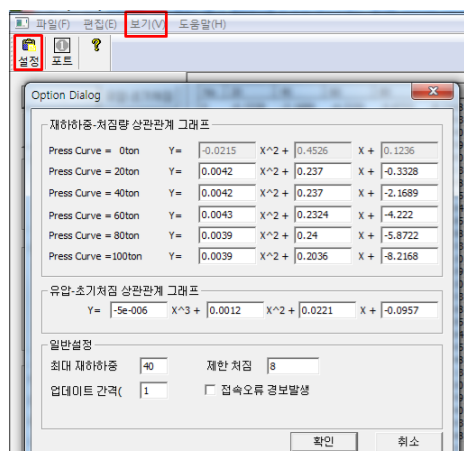


그림 3-10-4. 옵션 설정

- 재하하중-처짐량 상관관계 그래프 : 실험결과 분석을 통해 도출한 유압하중(Press Curve) 20ton~100ton까지의 방정식 계수를 입력 한다.
- 유압-초기처짐 그래프 : 실험결과 분석을 통해 산출된 방정식 계수값을 입력한다.

- 최대 재하하중 : 그래프의 X축인 재하하중의 최댓값을 설정하여 범위를 사용자가 정할 수 있다. 최대 재하하중은 수신된 현장계측 처짐량에 대하여 재하하중 계산 수행 시 최댓값으로 사용된다.
- 제한처짐(허용처짐량) : 분석을 통해 산출된 허용 처짐량은 8.594mm 이내 적합한 값을 입력한다.
- 시리얼 통신포트 끊김을 체크할 시간 간격을 입력한다.
- 시리얼 연결 미연결시 경고를 발생할지 여부를 선택한다.

3-10-5. 프로그램 작동

- 시리얼 포트를 연결하고 계산시작 버튼을 누르면 데이터 창에 수신 데이터가 표시되고, 계산종료 버튼을 누르면 수신된 데이터 중 최대 처짐량과 해당 긴장력 유압을 적용하여 허용 처짐량 기준 초과 시 즉시 처짐량 감소를 위한 적정 긴장력 유압값을 계산하여 데이터창과 그래프에 표시한다.



그림 3-10-5. 역해석 프로그램 작동 예시

- 파란 선은 측정된 최대 처짐량을 나타낸 것이며, 회색 점선 그래프는 수신된 데이터(긴장력 유압, 처짐량)를 적용하여 기준 방정식을 활용하여 프로그램을 통해 유추한 그래프 이다.
- 예시와 같이 측정된 최대 처짐량이 허용 처짐량을 초과하였을 경우, 현 상태에서 처짐량 감소를 위한 최소 추가 긴장력 유압, 총 긴장력 유압 산출이 필요하며, 프로그램을 통해 계산된 최종 결과는 붉은 점선 그래프로 나타내도록 하였다.
- 예시의 경우, 허용 처짐량 범위 기준을 만족하기 위하여 최소 필요한 추가 긴장력 유압은 26.562ton, 총 긴장력 유압은 58.562ton 이 적용되어야 한다. 그리고 산출된 계산값이 정상적으로 출력되면 시리얼 포트를 통해 데이터를 송신한다.

4. 실용화 및 사업화

4-1. 제안기술의 경제성 및 사업성 기초조사

4-1-1. 시장성 분석

- 본 연구를 통해 개발된 HiCT 공법은, PS 띠장에 센서를 부착하여 시공 중 발생하는 구조거동을 모니터링하고, 적기대응 및 조정하기 위해 강연선에 프리스트레스(긴장력)를 도입하는 방법으로 긴장력 제어·조정 장치를 적용하여 띠장의 변형량과 응력을 상쇄·회복시킴으로써 토압이 실시간으로 변동되어도 능동적인 저항을 통해 높은 안전성을 확보 할 수 있는 시공 공법이다.
- 본 연구에서는 국내·외 시장현황 및 전망, 시장 트렌트 등을 분석하여 HiCT 공법의 시장성 및 경쟁력을 검토하였다.

4-1-2. 국내 시장 현황 및 전망

○ 국내 시장 수급 현황

- HiCT 공법은 지반굴착 공정을 포함하는 토목, 건축, 산업설비, 조경공사와 같은 다양한 건설공사에 활용 가능하므로, 국내 시장 현황 및 전망을 분석하기 위해 최근 5년 동안의 각 분야에 대한 건설공사 규모를 분석하였다. 대한전문건설협회의 통계연보에 따르면 2017년 국내 건설시장 규모는 총 93조원 수준이며, 다음 표와 같이 2017년 전체 건설공사 대비 토목분야와 건축분야, 산업설비, 조경분야가 각각 17.6%, 72.5%, 6.0%, 3.9%를 차지하는 것으로 나타났다.

표 4-1-2(1). 국내 건설시장 변화 추이

공종별 구분	(단위: 백만원)						연평균 증가율
	2013년	2014년	2015년	2016년	2017년		
토목	17,613,139	14,430,417	16,685,783	16,049,881	16,539,792	17.6%	-1.6%
건축	45,107,398	47,705,841	56,634,823	65,527,480	68,105,251	72.5%	10.8%
산업설비	6,249,034	6,286,494	5,290,681	6,504,266	5,654,950	6.0%	-2.5%
조경공사	3,247,696	3,893,262	3,079,543	3,478,595	3,688,805	3.9%	3.2%
총 계	72,217,267	72,316,015	81,690,831	91,560,223	93,988,798	100%	6.8%

<출처 : 통계연보: 시도별 세분공종별 계약실적(2014~2018), 대한전문건설협회>

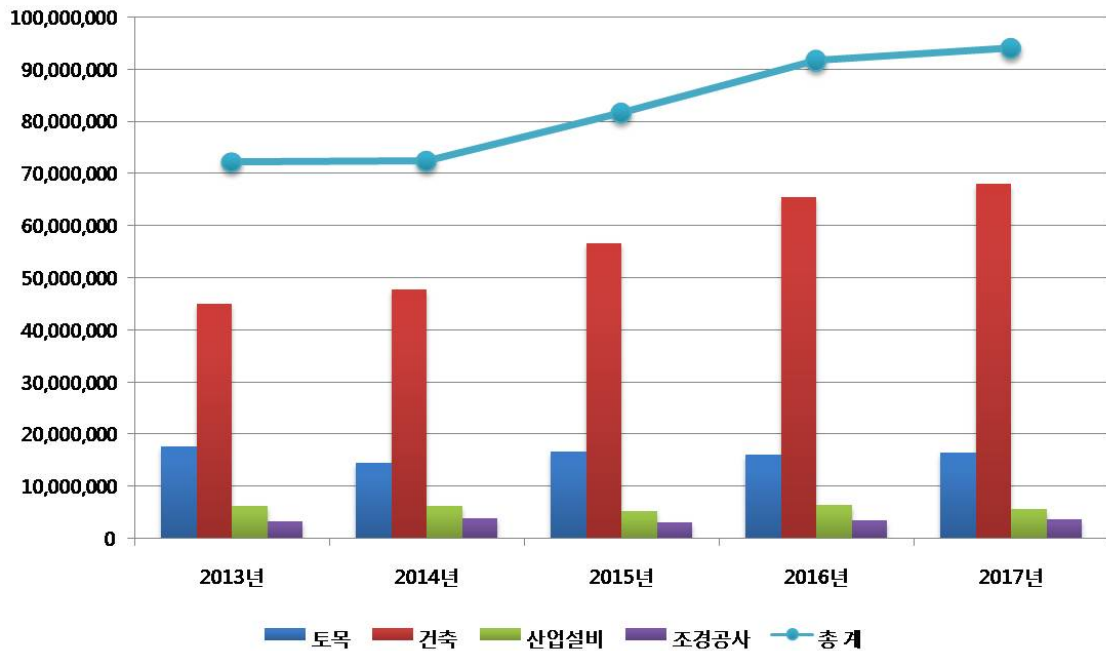


그림 4-1-2(1). 국내 건설 시장 동향

- 건설공사 시장규모는 매년 증가하고 있는 추세이다. 전체적으로 건축분야는 매년 증가하고 있는 추세이며, 토목분야, 산업설비, 조경공사의 경우 일정한 규모를 지속하고 있는 것으로 나타났다.
- 흙막이 공사의 경우, 전체적으로는 국내 건설시장 규모의 약 1%에 해당하는 비용이 흙막이 공사에 투입되는 것으로 나타났으며, 최근 5년간의 흙막이 공사 시장규모는 다음 표와 같다.

표 4-1-2(2). 흙막이 가설공사 국내 시장 변화 추이

(단위 : 백만 원, %)

공종별 구분		2013년	2014년	2015년	2016년	2017년	5년 동안 증감현황
	토목	73,493	60,213	69,623	66,970	69,014	94%
흙막이 가설공사	건축	485,664	513,641	609,777	705,523	733,278	151%
	산업설비	105,951	106,586	89,703	110,279	95,879	90%
	소 계 ㉠	665,108	680,440	769,103	882,772	898,170	135%
건설공사	총 계 ㉢	72,217,267	72,316,015	81,690,831	91,560,223	93,988,798	130%
흙막이 가설공사 비율	㉠/㉢ (%)	0.92%	0.94%	0.94%	0.96%	0.96%	-

<출처 : 통계연보: 시도별 세분공종별 계약실적 (2018), 대한전문건설협회>

- 흙막이 공사 시장 전체규모는 2013년부터 2017년까지 5년 동안 약 35% 증가하였으며 그 중 건축분야가 전체 흙막이 공사 시장의 약 81%로 많은 부분을 차지하는 것을 확인 할 수 있었다.

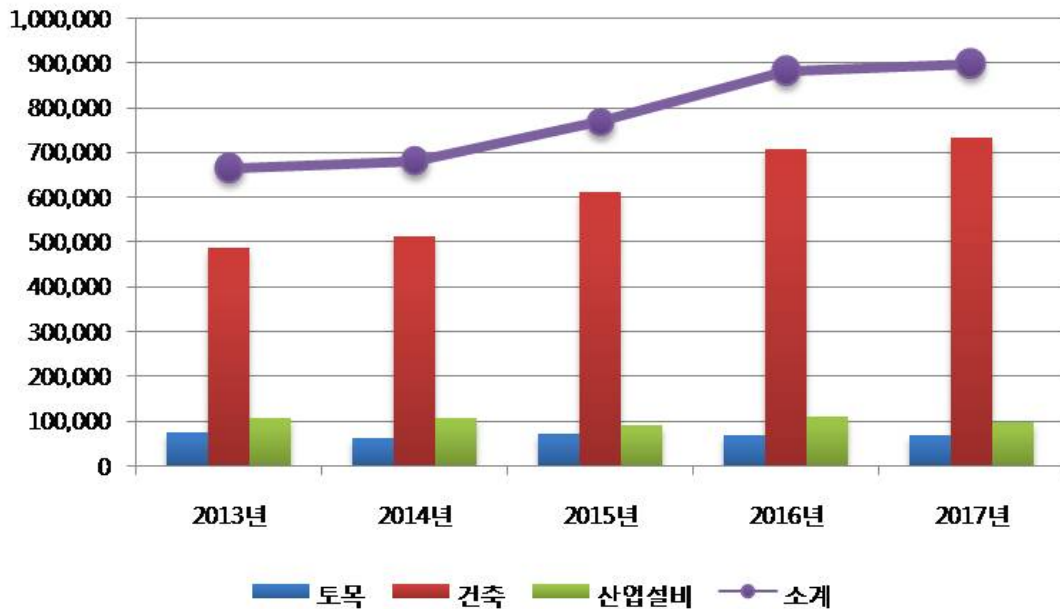


그림 4-1-2(2). 국내 흙막이 시장 동향

- 이와 같이 본 연구에서는 국내 시장 수급현황을 분석하기 위하여 2013년부터 2017년까지 최근 5년 동안의 건설시장 현황과 흙막이 공사 시장 규모를 분석하였다.
- 건설시장 현황과 흙막이 공사 국내 시장규모를 분석 한 결과, 토목분야와 산업설비의 경우 수요가 다소 감소하는 추세를 보였지만 꾸준히 지속적인 수준의 수요를 나타냈고 건축분야의 경우 매년 증가하는 추세를 보임으로써 전체적인 흙막이 가설공사 수요는 증가하고 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발한 HiCT 공법은 지반굴착 공정을 포함하는 모든 건설공사에 활용 가능하므로 시장성이 우수하다고 판단된다.

○ 국내 건설시장 트렌드

- 현 정부에서는 2025년 까지 BIM, AI를 적용한 건설 자동화 기술개발을 주제로 ‘Smart Construction 2025’를 비전으로 설정 및 4차 산업혁명 기술을 활용해 건설 생산성과 안전성을 혁신한다는 ‘제6차 건설기술진흥 기본계획(2018~2022)’ 추진하고 있다.
- 제6차 건설기술진흥 기본계획을 기반으로, 2018년 10월, 국토교통과학기술진흥원과 대한토목학회가 주최한 ‘스마트건설, 전략적 기술개발 방향’ 포럼에서는 ‘스마트 건설 기술 전략 로드맵’을 통해 시공 분야에서 2025년까지 자동 장비 활용, 2030년까지 AI를 도입한 안전관리를 목표로 정부 차원에서 추진하고 있다.
- 이처럼 국가 혁신성장 8대 선도사업인 스마트시티, 자율 주행차, 드론, 건설자동화 등 그 기반기술이 되는 공간정보 분야에 집중이 예상됨에 따라 국내 건설시장 또한 기존 건설기술과 AI, 로봇, IoT, ICT 등 첨단기술을 도입한 스마트 건설에 주목하여 건설사업의 기획, 설계, 조달, 시공, 유지관리 등 전 과정을 IoT, 클라우드, 빅데이터 등 최근 4차 산업혁명 주요 기술과 융합한 시설물 구축 기술개발이 활발하게 추진 될 것으로 판단된다.
- 최근 도심지 재개발 사업이 활발히 진행되고 있으며, 과거에 건설했던 신도시 재건축이 추진되는 등 난이도가 높고 정교한 기술이 요구되는 사업 중심으로 건설시장이 재편될 것으로 전망된다.

○ 국내 시장 수급 전망

- 향후 국내 흙막이 시장은 연평균 9.0%의 성장률을 보이며, 2017년 8,981억 원에서 2022년 1조 3,756억 원 규모의 시장을 형성할 것으로 전망된다.

표 4-1-2(3). 흙막이 가설공사 국내 시장 변화 전망

(단위 : 백만 원, %)

구분	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	연평균 증가율
건설 공사	93,988,798	101,099,689	109,023,562	117,847,370	127,667,507	138,590,836	8.2
흙막이 공사	898,170	974,285	1,059,106	1,153,569	1,258,709	1,375,675	9.0

※ 산출근거: 흙막이 건설시장 규모 = $\sum$ 최근 5년(2013년~2017년)간 공종별 연평균 건설시장 증가율 $\times$ 2017년 공종별 건설 시장 규모 $\times$ 공종별 흙막이 공사 비중

<출처: 통계연보: 시도별 세분공종별 계약실적(2018), 대한전문건설협회>

- 대한전문건설협회의 통계연보에 공개된 최근 5년간 건설 분야별 시장규모 변화와, 분야별 시장규모에 2017년도 건설 분야별 흙막이 공종의 비중을 고려하여 향후 5년간 건설 분야별 흙막이 공종의 시장규모 변화를 예상하였다.
- 건축분야의 시장규모 팽창에 따라 흙막이 공사의 시장규모도 향후에는 과거 5년간의 증가율을 웃도는 수준으로 증가될 것으로 예상된다.
- 건설공사의 규모는 커지고, 활성화 되고 있으나 국토면적에 대한 한계점으로 기존 시설물과 근접하게 시공되고 있으며 굴착 중인 흙막이 구조물과 병행 굴착이 수행되는 경우도 빈번하게 발생하고 있어 주변 구조물의 안전성을 확보하고 인명피해와 경제적 피해를 최소화할 수 있는 흙막이 가시설 범위 검토와 흙막이 공법에 대한 수요가 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 외력거동에 대하여 능동적인 저항 및 즉시대응이 가능하여 높은 안전성을 확보하고 있는 본 연구개발 HiCT 공법의 시장성은 우수한 것으로 판단된다.

4-1-3. 국외 시장 현황 및 전망

○ 국외 시장 수급 현황

- 국외 건설시장의 경우, 다음 표와 같이 연평균 3.1%로 지속적으로 확대되고 있는 추세를 보이고 있으며 2017년에는 10조 8,000억 달러로 2013년 대비 약 13% 증가한 것을 확인 할 수 있었다.

표 4-1-3(1). 흙막이 가설공사 국외 시장 변화 추이

(단위 : 십억 달러, %)

공종별 구분	2013년	2014년	2015년	2016년	2017년	연평균 증가율	5년 동안 증감현황
건설 시장	9,522	9,826	10,141	10,465	10,800	3.1	113%
흙막이 공사 시장	91	94	97	100	104	3.2	114%

<출처 : Global Construction Outlook to 2022-Q3 2018 Update(2018), GlobalData>

○ 국외 건설시장 트렌드

- 최근 미국, 영국, 일본 등 선진국에서도 스마트 건설 분야를 육성하고자 노력하고 있다. 미국 정부에서는 스마트 건설 관련 인프라 투자계획을 하반기에 공개할 예정이라고 발표하였고, 영국 또한 건설 영역에서 BIM 및 ICT 기술 도입을 확대해 나가고 있다. 일본에서는 건설 산업 생산성 향상을 위해 공공사업 전 과정에서 건설과 ICT를 통합하려는 추세이다.
- IoT 기반의 건설 장비, 빌딩, 안전, 유틸리티, 유지보수 등 다양한 분야에서 활용하고 있으며, 건설 장비에 있어 최신 원격 모니터링 기술은 건설 장비 동작에 대한 상세한 정보를 제공할 수 있다. 건설 기계 장비에 IoT 기술을 적용하여 센서로부터 장비 모니터링 및 관리를 통해 이익 증가를 예상하여 기술 투자 및 적용을 확대하려고 노력하고 있다.

○ 국외 시장 수급 전망

- 국내 시장 수급현황의 '흙막이 가설공사 국내 시장 규모(2017년 기준)' 표에서 국내 건설시장에서 흙막이 공사가 차지하는 비중을 세계시장에 적용하면 흙막이 공사의 세계 시장규모는 2022년 1,240억 달러에 달할 것으로 추정된다.

표 4-1-3(2). 흙막이 가설공사 국외 시장 전망

(단위 : 십억 달러, %)

공종별 구분	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	연평균 증가율
건설 시장	10,800	11,189	11,592	12,009	12,441	12,889	3.6
흙막이 공사 시장	104	107	111	115	119	124	3.6

<출처:Global Construction Outlook to 2022-Q3 2018 Update(2018), GlobalData>

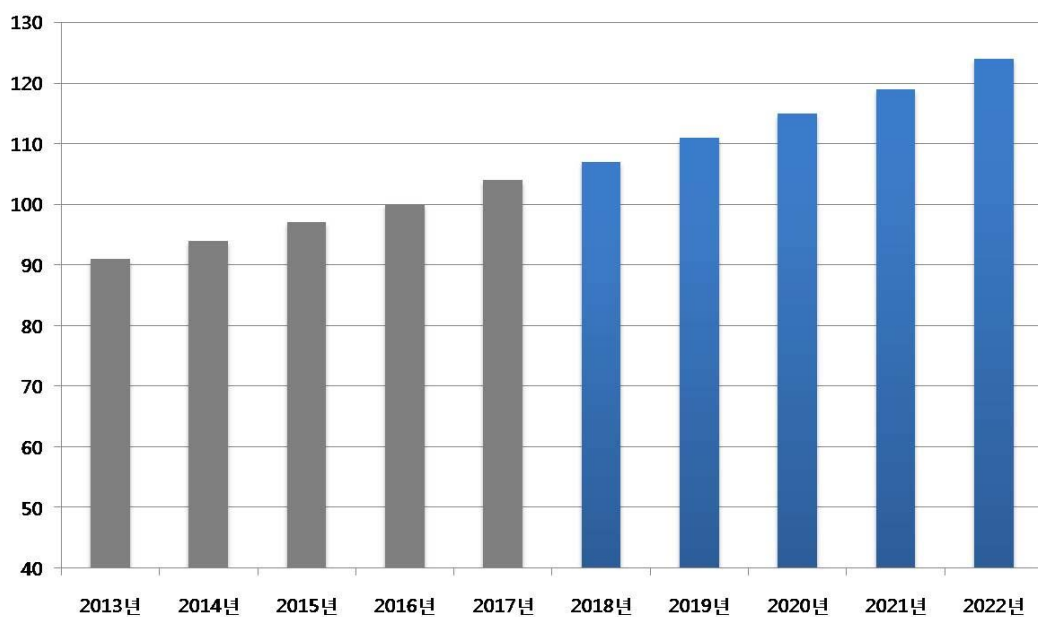


그림 4-1-3. 국외 흙막이 시장 전망

- 국외 건설 시장은 2017년 하반기 이후 석유 공급 부족에 따른 유가 급등에 따른 중동발주 증가 및 세계 경기 회복세 지속 등으로 인해 규모가 더욱 커졌을 뿐만 아니라 전체 공사에서 흙막이 공종이 차지하는 비율이 높은 산업설비 관련 건설시장이 팽창할 것으로 예상되므로 향후 흙막이 공사의 세계 시장규모는 더욱 커질 것으로 예상된다.
- 주요 발주국의 BIM 의무화, 선진국의 첨단기술 투자 등으로 스마트 건설기술 시장이 2016년 100억 달러 규모, 연 12% 성장 전망되는 등 급성장 중으로 IT기업을 포함한 우수한 기술력의 글로벌 기업 간 각축 심화 예상된다.
- 국외 건설시장 현황을 분석한 결과, 국내 건설시장 현황과 유사하게 BIM, AI를 적용한 건설 자동화, 스마트 건설기술 도입을 위해 각 국에서 다양한 정책과 투자계획을 발표하며 노력하고 있었다. 건설 공사의 규모는 커지고 과거보다 높은 수준의 건설기술 발전에 따라 흙막이 공사에 대한 안전성에 대한 요구 또한 높아질 것으로 판단된다.

4-1-4. 기술적 파급효과

- 현재 국내 · 외에서 적용하고 있는 흙막이 공법으로는 버팀대를 약 2.5m~4.0m 간격으로 설치하여 흙

막이 벽체를 지지하는 버팀대 공법(Strut 공법), 강봉이나 강연선을 이용하여 띠장에 선행하중을 도입함으로써 휨 응력에 대한 띠장의 내력을 증대시켜 버팀대의 설치간격을 넓힐 수 있는 PS 띠장 공법 등이 있다.

- 버팀대 공법(Strut 공법)의 경우 버팀대를 촘촘히 설치하므로 자재비와 인건비가 많이 투입되고 작업공간이 협소하여 지반굴착에 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. PS 띠장 공법의 경우 버팀대의 설치개수를 줄여 경제성을 향상시킨 반면 시공 및 유지관리가 어려워 전문 인력을 필요로 한다.
- 본 연구에서는 개발한 HiCT 공법은 PS 띠장에 센서를 부착하여 변형량을 모니터링하고, 변형량이 허용범위 초과 시 각 현장의 여건을 고려하여 강연선의 추가 긴장력 유압을 산출하고 현장 적용을 통해 외력거동에 적기 대응 가능한 시공 공법이다.
- 실내실험을 통해 PS 띠장에 작용하는 긴장력 유압과 재하하중에 따른 처짐량 상관관계를 분석하고 역해석 기법을 통해 변형량에 대응하기 위한 강연선 추가 긴장력을 산출하였다. 산출된 추가 긴장력을 현장에 제공해줌으로써 긴장력 유압 조절을 통해 변형량을 상쇄 및 회복 가능토록 지원하는 역해석 프로그램을 적용한 반작용 PS힘 싱크로나이즈장치를 활용한 흙막이공사 제어, 예측, 조정 공법으로 안정성과 경제성을 동시 확보 가능한 기술로 사회적 니즈를 반영한 기술로써 시장성이 우수하다고 판단된다.
- 또한, HiCT 공법은 띠장의 외압과 변형량을 모니터링 및 제어가 가능한 장점과 더불어 설치와 조작이 간편하고, 넓은 작업공간으로 작업성이 뛰어나 공사기간이 단축되어 경제성이 우수하며, 구조적 안정성까지 확보하여 그 파급효과는 클 것으로 예상된다.

4-2. 시공 및 유지관리 가이드라인 개발

4-2-1. HiCT 띠장재의 취급

○ 운반 및 보관

- ① HiCT 띠장재를 운반할 때는 충격에 의하여 비틀림이나 변형이 생기지 않도록 취급에 주의하여야 한다.
- ② 길이 6m 이상의 HiCT 띠장재를 운반할 경우에는 나일론 슬링 등으로 2점을 로프로 체결하여 운반하는 것을 원칙으로 하며, 도로주변의 원활한 교통흐름과 통행자의 안전을 위하여 반드시 안전담당이 현장에 상주하여 감독하여야 한다.
- ③ HiCT 띠장재의 보관은 지반지지력이 충분히 확보되고 평평한 장소에 보관하여야 하며, 1단 이상 쌓아올리지 말아야 한다.
- ④ HiCT 띠장재를 적재할 때에 하부에 반드시 받침목을 설치하여 HiCT 띠장재가 움직이지 않도록 고정하여야 한다.

○ 용접

- ① HiCT 띠장재를 용접할 경우, 아크용접 또는 전기저항용접으로 하고, 잔류응력이나 변형 등은 되도록 적게 하여야 한다.
- ② 용접하는 HiCT 띠장재의 표면은 용접하기 전에 청결한 상태를 유지하여야 한다. 특히 용접면 및 그 인접부위는 물, 녹, 도료 및 먼지 등이 있으면 균열의 원인이 되므로 반드시 제거하여야 한다.
- ③ 비 또는 눈이 내리는 곳이나 강한 바람이 부는 곳에서 용접해서는 안 된다. 그러나 날씨 등의 영향을 받지 않도록 충분한 보호 장치를 하였을 경우에는 감독관의 승인을 득한 후 용접할 수 있다.
- ④ 기온이 35℃ 이상 또는 -15℃ 이하일 때는 용접해서는 안 된다. 기온이 -15℃ 이하일 경우에는 용접선에서 10cm 이내의 모재부분을 80℃ 이상으로 예열하면 감독관 승인을 득한 후 용접

할 수 있다.

- ⑤ 전기사용에 따른 감전사고 예방을 위하여 관련법규에 따라 조치를 시행한 후 용접하여야 한다.
- ⑥ 특히 통풍이 안 되는 곳에서 용접할 경우에는 가스에 의한 폭발의 우려가 있으므로 환기설비를 설치한 후에 용접하여야 한다.
- ⑦ 기타 용접에 관한 사항은 도로교표준시방서의 용접시공 규정에 따른다.

4-2-1. HiCT 띠장재의 시공

○ 시공일반

- ① HiCT 띠장재는 시공하기 전에 단면손상여부, 변형, 단면치수 등이 점검계획서에 적합한가를 확인한다.
- ② HiCT 띠장재는 흠막이 측압(토압 및 수압, 기타하중)에 의하여 좌굴되지 않도록 충분한 단면과 강성을 가져야 하며, 각 단계별 굴착에 따라 흠막이 벽과 일반띠장, 버팀보에 변형이 발생하지 않도록 시공하여야 한다.
- ③ HiCT 띠장재는 설계도 및 시공계획서에 따라 각 굴착단계마다 소정의 깊이까지 굴착한 후에 신속히 설치한다.
- ④ HiCT 띠장재의 설치는 설계도서에 명시한대로 설치하여야 하며, 지장물의 유무, 구조물의 타설계획, 재료 및 장비투입의 공간확보 등을 고려하여 설치하여야 한다.
- ⑤ HiCT 띠장재는 굴착된 공간에서 본체구보물의 시공장비의 진출입 등을 고려하여 파손되지 않도록 설치하여야 한다.
- ⑥ HiCT 띠장재는 이동이 되지 않도록 설치하여야 하며, 기존 띠장과 접합부와 이음부는 느슨하거나 강조부족이 없도록 설치한다.
- ⑦ HiCT 띠장재 위에 장비나 자재 등을 적재하지 말아야 한다. 설계도서에 표시하지 않은 지장물 등이 간섭하는 경우에는 전문기술자나 감독관의 검토를 받아야 한다.
- ⑧ HiCT 띠장재 위는 원칙적으로 작업자가 통행할 수 없다.
- ⑨ HiCT 띠장재의 거치와 동시에 센서(스트랜드미터, 리니어게이지)를 부착하여야 하며, 센서 부착 후 계산된 초기 긴장력을 도입시켜, 각 센서의 작동 여부를 확인하여야 한다. 센서가 자동되지 않을 경우 무리하게 작업을 진행시키지 말고 전문기술자의 승인을 득한 후 센서를 교체하여야 한다.
- ⑩ 스트럿 연결 후 계산된 측압에 대응하는 긴장력을 자동유압실린더 장치를 이용하여 도입시킨 후 유압잭으로 체결한다. 이 때 계산된 긴장력을 초과해서 긴장하지 않는다.
- ⑪ HiCT 띠장재가 설치된 후에는 계측시스템으로 띠장과 강연선의 변화를 매일 체크하여 기록, 보관한다. 또한 굴착작업부터 해체작업까지 띠장부재가 느슨한 상태로 풀어져 있는지를 수시로 점검하여야 하며, 띠장을 설치한 후에 매 공정마다 계측관리 및 일상점검을 실시하여 안전여부를 판단하고 검사성과를 공사완료시까지 기록, 보관하여야 한다.
- ⑫ HiCT 띠장재의 처짐량과 허용처짐량을 체크하여 추가 긴장이 필요한지 확인한 후에 전문기술자의 승인을 득한 후 재 긴장을 실시하여야 한다.
- ⑬ 기타 띠장의 시공에 관한 사항은 도로교표준시방서, 가시설공사시방서에 따른다.

○ HiCT 띠장재의 계측

- ① 띠장에 작용하는 응력을 측정하기 위해서는 센서를 설치하여 계측하여야 한다.
- ② 변위를 측정하기 위한 센서는 HiCT 띠장재 3곳 이상에 설치하여 HiCT 띠장재에 발생하는 최대 변위를 측정하여 허용변위량 이내가 되는지 체크하여 하며, 변위량 초과시는 전문기술자에 의한 재 긴장을 실시하여야 한다.

○ HiCT 띠장재의 해체

- ① HiCT 띠장재의 해체 및 철거는 사전에 수립된 해체순서에 따라야 하며, 구조체 전체의 안정을 무너뜨리지 않는 방법으로 작업하여야 한다. 시공하기 전에 시공순서 및 작업방법, 사용장비 등에 대하여 감독관의 승인을 받아야 한다.
- ② 해체 및 철거는 흙막이 벽체와 본체 구조물에 영향이 없어야 하며, 주변구조물과 설비 등에 손상이 발생하지 않도록 하여야 한다.
- ③ 흙막이 시설 전체의 철거는 본체구조물의 콘크리트 강도가 소정의 강도에 도달한 후에 작업하여야 한다.
- ④ 해체 및 철거 전후에 계측을 통하여 변위 발생여부를 확인한 후에 실시하여야 한다. 기준 변위를 초과할 경우에는 작업을 중단하고 전문기술자의 지시에 따라야 한다.
- ⑤ 철거 시에는 단계별 안전한 해체 단수를 정하여 1단계 되메우기 후에 앵커 또는 버팀보, HiCT 띠장, 띠장 순서로 해체하고 다음 단계의 되메우기와 해체작업을 번갈아 진행한다.

4-2-2. 유지관리 가이드라인

○ 적용범위

- 본 유지관리지침은 가시설공사 기간 동안 HiCT 띠장재의 안전성과 기능성을 유지하기 위한 유지관리 업무에 적용한다. 본 기술은 유지관리에 특화되어 있는 띠장으로 강연선과 띠장의 변화를 센서를 통해 실시간으로 계측이 가능한 기술이다. 1차적으로 매일 띠장과 강연선을 계측하여 변화가 있는지 여부를 확인하여 측압에 의해 띠장의 변형이 감지된 경우, 허용처짐과 주변 띠장의 변형까지 고려하여 유압잭을 이용한 추가 긴장력 도입 여부를 파악한다. 추가 긴장력이 필요하면 자동식 유압펌프로 유압잭을 밀어내서 띠장을 긴장시킴과 동시에 유압잭을 체결하여 긴장력 도입을 마치는 자동화 시스템이므로 일상계측을 통한 유지관리에 만전을 기하여야 한다. 본 지침서는 HiCT 띠장재의 유지관리 시행함에 있어 점검방법, 관리방법 등의 내용에 대하여 체계적이고 효율적으로 운용하기 위해 기본적인 사항을 규정하였으며, 기타 특별한 전문적인 기술이 필요한 경우는 적절한 보정을 통하여 지침서를 준용할 수 있으며, 가시설과 관련된 각종 특별시방서를 참고하여야 한다. 유지관리 실무자는 감독관의 지시를 받아 다음 사항이 유지되도록 한다.
- 구조물의 안전을 향상시키고 내구성을 유지시키면서 이상 현상이나 낙후현상을 찾아야 한다.
- 이상 현상, 낙후현상을 해결하기 위하여 가능한 방안을 연구하여 실천하여야 한다.
- 구조물 전반에 대한 활동의 우선순위에 따른 분류를 유지관리 책임자에게 제안하여야 한다.

○ 관련기준

- 도로법(도로점용 규칙)
- 건설업법
- 토목공사 일반시방서
- 도로교표준시방서
- 콘크리트표준시방서
- 강철도교표준시방서
- 건설기술진흥법
- 환경 관계법

- 도로교통법
- 공해방지법
- 총포 화약류 단속법

○ 유지관리의 목적관련

- 본 유지관리는 HiCT 띠장재에 관련된 이상 및 손상을 조기에 발견하여 적절한 조치를 취함으로써 시공자의 안전과 원활한 공사를 확보함과 동시에 향후 유지관리에 필요한 자료를 취득하는 것을 목적으로 실시한다.

○ 주요자재의 유지관리

- HiCT 공법의 자재는 강재와 센서로 구성되어 있으므로 수분과 이격시켜 보관한다. 또한 HiCT 띠장재에 무리한 적재를 하여 케이블 및 본체에 변형이 되지 않도록 한다. 필요시 띠장을 설치하기 전에 녹이 슬지 않도록 도장을 실시한다.

○ 시공 중의 유지관리

- 본 기술은 대부분 3~6개월 이내에 철거되는 가시설구조로 장기간에 걸친 유지관리 및 준공 후 유지관리가 필요 없는 시설이지만 시공 중에는 일상계측을 통하여 유지관리 활동을 기록, 보관하여야 한다.
- 계측을 통하여 관리기준에 적합여부를 판정한 후, 별도의 도장이 필요한 경우에는 설계기준 및 현장 여건에 따라 보강대책을 수립하여 전문기술자 및 감독관의 승인을 득한 후 보강한다.
- 유지관리 실무자는 감독관의 지시를 받아 다음 사항이 유지되도록 한다.
 - ① 구조물의 안전을 향상시키고 내구성을 유지시키면서 이상 현상이나 낙후현상을 찾아야 한다.
 - ② 이상 현상, 낙후현상을 해결하기 위하여 가능한 방안을 연구하여 실천하여야 한다.
 - ③ 구조물 전반에 대한 활동의 우선순위에 따른 분류를 유지관리 책임자에게 제안하여야 한다.
- 다양한 시공환경을 고려해야 하므로 시공장비의 충격 등으로 인한 긴장력 손실 및 긴장재 파손 관련 대책(긴장재 손실시 변위형상 및 교체방법 등)
- 긴장재 손실시에 따른 대책은 변위 형상에 따라
 - ① HiCT 띠장재에 손상 없을 때는 손실된 긴장력은 유압장치에 의해 재 복구한다.
 - ② HiCT 띠장재에 PC강선에 손상(40%) 미만인 있을 때는 해당 강선을 교체하고 재긴장한다.
 - ③ HiCT 띠장재에 PC강선에 손상(40%) 이상이 있을 때는 해당 강선을 전부 교체하고 재긴장한다.
- 긴장재 띠장에 파손이 있을 때는 책임기술자의 지시에 따라 임시 버팀재를 설치 후 신 띠장재로 설치한 후 재 긴장하여 감독관의 승인을 받아야한다.

4-3. 실용화 타당성 조사 및 실물 현장시공 대상공사 조사/선정

4-3-1. 실용화 타당성 조사를 위한 SWOT 분석

- HiCT 공법은 기존 공법과 비교하였을 때 기술성 향상 및 안전성 확보 뿐 아니라, 공기를 단축시켜 경제성 측면에서 강점을 보유하고 있다.

① 기회

- 최근 건축 분야를 중심으로 건설시장이 확대되고 있는 전망이다, 특히 도심지역의 재개발 등으로 인

해 고난이도 공사가 증가할 예정이며, 전 세계적으로 안전하고 민원이 적은 기술의 수요가 증가할 것으로 판단

- 국내 정부 정책의 영향을 많이 받는 건설업 특성상 4차 산업혁명이 결합된 스마트 건설 기술 수요에 대한 증가로 높은 시장성을 보유

② 위험

- 국내 대형 건설사와 도급업체들이 시공 경험이 많아 안정성이 인정된 기존 공법을 선호하여 신공법 도입에 소극적인 경향
- 기존 공법 뿐 만 아니라 유사 특수 공법 기술을 보유한 경쟁 업체와 가격 경쟁 심화

③ 강점

- 강재 사용량 감소로 인한 공사비 감소 및 공기 단축에 있어 기존 기술 대비 약 25%의 경제성 향상
- 현장에서의 외부 응력과 변위량에 대한 모니터링 및 제어기술로 인해 흠막이 설치 이후 유지-보수가 간편하고 흠막이 가시설에 대한 안전성 확보
- 기존 공법에 비해 본체 시공 공간 간섭을 최소화하여 본체를 포함한 전체 공사기간의 단축 및 가시설의 잦은 설치 및 해체로 인한 사고 위험성 감소

④ 약점

- HiCT 공법의 원천기술 확보와 관련 흠막이 가시설 공사의 전문시공기술 및 실적을 가지고 있어 시공 업체에 대한 신뢰성은 높은 편이나, 테스트 베드 및 시공 실적이 다소 부족하여 신뢰성 부족

○ HiCT 공법에 대한 SWOT 분석 결과, 높은 시장성 및 기술성을 지니지만, 경험이 중시되는 건설업 특성상 시공 실적 확보와 기술 인증 및 홍보 부분이 상대적으로 부족한 것으로 사료됨.

- 흠막이 공법의 특성상 발주기관이 필요로 하는 맞춤형 기술소개자료 제작을 통해 기존기술 대비 차별성 및 기술의 우수성, 파급효과 등을 부각한 SMK 작성 및 배포하여 마케팅 강화 필요
- 본 연구개발 기술의 인증 및 홍보-시공 실적의 확보 선순환을 통해 공법의 안전성 확보 및 매출 창출을 기대

표 4-3-1. SWOT 분석

SWOT 분석	강점	약점
	• 공기 및 공사비 약 25% 단축 및 절감 • 현장에서의 외부 응력과 변위량에 대한 모니터링 및 제어기술로 흠막이 가시설에 대한 안전성 확보 • 본체 공간 간섭을 최소화하여 공기 전반의 단축 및 사고 위험 감소	• 특허 등 권리성 확보가 미흡하여 사업권 침해 받을 가능성 존재 • 시공실적이 다소 부족하여 신뢰성에 대한 확보가 필요함 • 홍보 부족으로 수요처 발굴에 한계점 존재
	기회	위험
	• 고난이도 도심 사업이 증가로 민원 발생 최소화 및 높은 안정성을 가진 흠막이 공법 필요성 증가 • 4차 산업혁명과 건설기술이 결합된 ‘스마트 건설’ 기술 도입 수요 증가	• 국내 대형건설사와 도급업체들의 시공 경험이 많은 기존 공법 선호 • 기존 및 유사 공법 보유 경쟁업체와 가격 경쟁 심화

4-3-2. 실물 현장시공 대상공사 조사/선정

표 4-3-2. 현장 시공 선정

공 사 명	발주처	공사기간	공사금액 (천원)	시공장소	비고
효천지구 B7-1~2 근린생활시설 신축공사	유한회사 신협토건	6개월	24,000	전북 전주시	시공중
용문면 다문리 703공동주택 및 오피스텔 신축공사	(주)리치건설	4개월	32,000	경기도 양평군	시공예정

4-4. 제품생산 및 현장적용

4-4-1. 제품 생산





그림 4-1-1. 제품 생산

4-4-2. 현장 적용

