



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

2024년 2월
석사학위 논문

강구조물 유지관리를 위한
정밀 손상탐색 기술에 관한 연구

조선대학교 대학원

건축공학과

양재영

강구조물 유지관리를 위한
정밀 손상탐색 기술에 관한 연구

Research on precise damage detection technology
for steel structure maintenance

2024년 2월 23일

조선대학교 대학원

건축공학과

양재영

강구조물 유지관리를 위한 정밀 손상탐색 기술에 관한 연구

지도교수 최 재 혁

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2023년 10월

조선대학교 대학원

건 축 공 학 과

양 재 영

양재영의 석사학위논문을 인준함

위원장 박 정 웅 (인)

위 원 조 창 근 (인)

위 원 최 재 혁 (인)

2023년 12월

조선대학교 대학원

< 목 차 >

1. 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적 및 내용	2
1.3 논문의 구성	7
2. 기존 연구 동향	9
2.1 개요	9
2.2 기존 시설물 재래식 안전진단 방법	9
2.2.1 고력볼트 접합 검사	9
2.2.1.1 고력볼트 육안에 의한 외관 조사 방법	10
2.2.2 용접 결함	10
2.2.3 용접 접합 검사	12
2.2.3.1 파괴시험	12
2.2.3.2 비파괴시험	13
2.2.3.3 비파괴검사 방법	13
2.3 파이프랙 안전점검 매뉴얼 조사 및 분석	16
2.3.1 관리 일반	16
2.3.1.1 적용 범위	16
2.3.2 안전점검의 내용 및 범위	17
2.3.3 안전점검 기기 및 종류	18
2.3.4 안전점검의 진행 및 방법	20
2.3.5 정밀안전점검의 흐름도	21
2.4 국내·외 강구조물 안전성 확보 산업동향	22
2.4.1 시장동향	22

2.4.2 기술동향	23
3. 강재의 접촉/비접촉식 정밀 손상탐색 기술	27
3.1 강재의 접촉식 손상검출 기술	27
3.1.1 디지털 안전용 광섬유 센서	27
3.1.1.1 광섬유 센서의 분류 및 측정 방법	28
3.1.1.2 기존 센서 기술과의 차별성	29
3.1.1.3 광섬유 센서 측정 장비	30
3.1.2 광섬유 센서 기존 연구 동향	31
3.1.2.1 Fiber Optic Sensor에 의한 강구조시험체의 정적/동적 기동 축변형 계측	31
3.1.2.1.1 결과 고찰	33
3.1.2.2 광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg Grating)를 이용한 복합재 구조물의 변형	34
3.2 강재의 비접촉식(비파괴) 손상검출 기술	38
3.2.1 DIC (Digital Image Correlation) 기법	38
3.2.2 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry)	39
3.2.2.1 ESPI의 원리	39
4. DIC 기법을 활용한 ARAMIS 검출 장비 실험	41
4.1 DIC 기술을 활용한 ARAMIS 장비 측정	41
4.2 가력 및 측정 방법	43
4.3 실험 결과	44
4.3.1 변위 측정 결과	44
5. 압연 강재의 경도·소성 변형을 상관관계 검사법	54
5.1 강재 경도·소성 변형률에 관한 연구	54
5.1.1 경도·소성 변형률 관계	54
5.2 강재 경도·소성 변형률에 관계의 실험적 연구	55
5.2.1 경도·소성 변형률 관계	55

5.2.1.1 실험목적 및 구성	55
5.2.1.2 실험체 상세 및 일람	55
5.2.2 실험장치 및 계측	56
5.2.2.1 실험체 상세 및 일람	56
5.2.2.2 가력 및 계측 계획	56
5.2.2.3 경도 시험편 위치	57
5.2.2.4 표면 거칠기 효과	58
5.3 실험 결과	60
5.3.1 하중-변위 곡선	60
5.3.2 소성 변형률에 따른 경도 상관관계	60
5.3.3 실험체 변형형상	61
6. 디지털 안전용 광섬유 센서 측정 실험	62
6.1 디지털 안전용 광섬유 센서 측정	62
6.1.1 실험목적 및 구성	62
6.1.2 실험체 상세 및 일람	63
6.1.3 실험장치 및 계측	63
6.1.3.1 실험체 상세 및 일람	63
6.1.3.2 가력 및 계측 계획	64
6.1.3.3 광섬유센서 부착 위치	67
6.1.4 반복가력재하 결과 고찰	68
6.1.4.1 하중-변위 곡선	68
6.1.4.2 DSS 광섬유 센서 측정 결과	69
6.1.4.3 DAS 광섬유 센서 측정 결과	73
6.1.5 단조가력재하 결과 고찰	75
6.1.5.1 DSS 광섬유 센서 측정 결과	75
6.1.5.2 DAS 광섬유 센서 측정 결과	80
7. 파이프랙 구조물 구조검토해석	82

7.1 대상 구조물	82
7.2 구조물 도면	83
7.3 적용하중	84
7.3.1 Pipe Load	84
7.3.1.1 Operating Load	84
7.3.1.2 Friction Load	84
7.3.1.3 구간별 Operating Load, Friction Load	85
7.3.2 Wind Load	87
7.3.2.1 Pipe Wind Load 적용값	89
7.3.3 Seismic Load	91
7.4 구조 검토 결과	93
7.4.1 구조검토 결과	93
7.4.2 부재 응력 검토 결과	93
7.4.3 변위 검토 결과	94
7.4.4 구조검토 결과	95
7.4.5 보강안	95
7.4.6 구조 안전성 검토 DATA	96
7.4.7 종합결론	101
7.5 구조 검토를 통해 손상탐색 부위 예측	101
8. 결론	103
부록 A. 파이프랙 구조물 도면	110

< 그림 차례 >

[그림 1.1] 국가산업단지 연도별 사상자 추이	1
[그림 1.2] 파이프랙 노후화 및 붕괴 사례	2
[그림 1.3] 가스시설 및 저장 가스배관 내진설계 기준	3
[그림 1.4] 파이프랙 구조물	4
[그림 1.5] 논문의 구성	8
[그림 2.1] 정밀안전점검 흐름도	21
[그림 2.2] IoT플랫폼 안전관리시스템 테스트베드 현황	22
[그림 3.1] 광섬유 분포 감지 센서	27
[그림 3.2] 광섬유 센서와 기존 센서기술과의 차별성	29
[그림 3.3] 시험체 개요와 광섬유 설치 위치	32
[그림 3.4] 광섬유 센서의 설치현황	32
[그림 3.5] 광섬유 센서에 의한 기둥의 축 변형의 정적 예측값	33
[그림 3.6] 각 기둥의 온도와 축변형의 관계	34
[그림 3.7] 변형률과 손상 신호를 동시에 측정하기 위한 테스트 설정	34
[그림 3.8] 인장 시험을 위한 시편 구성	35
[그림 3.9] Typical demodulations of FBG sensor	35
[그림 3.10] Schematic diagram of FBG sensor system with a dual demodulator	36
[그림 3.11] Strain in $[0_2/90_8]_s$ Graphite/Epoxy specimen	36
[그림 3.12] Output of passive MZI demodulator and reflective spectrum of FBG	37
[그림 3.13] 35초 ~ 40초대의 PZT신호, 스트레인 및 고주파 신호	37
[그림 3.14] 손상 신호 및 주파수 기록	37
[그림 3.15] DIC 이미지 상관관계 분석 기술	39
[그림 3.16] DIC 변형 이미지 데이터	39
[그림 3.17] ESPI간섭계 및 시제품	40
[그림 4.1] ARAMIS Adjustable 12M	41
[그림 4.2] 실험체 형상	42
[그림 4.3] 측정기기 종류와 설치 모습	43

[그림 4.4] 점증진폭 입력파형	43
[그림 4.5] ARAMIS 기준점 도포	44
[그림 4.6] 실험데이터 측정 위치	45
[그림 4.7] 부재 ARAMIS 데이터 측정 위치	45
[그림 4.8] 4번 위치 실험데이터, ARAMIS 데이터 비교분석 관계	46
[그림 4.9] 3번 위치 실험데이터, ARAMIS 데이터 비교분석 관계	47
[그림 4.10] 국부적인 변이 데이터 측정 위치	47
[그림 4.11] 앤드플레이트, 패널존 플랜지 변위 비교 값	48
[그림 4.12] 반복가력 Step에 따른 변형 이미지화	49
[그림 4.13] BC2 4번 위치 실험데이터, ARAMIS데이터 비교분석 관계	50
[그림 4.14] BC2 3번 위치 실험데이터, ARAMIS데이터 비교분석 관계	51
[그림 4.15] BC2-Dx방향 앤드플레이트 상부 2점 변위이미지 측정	51
[그림 4.16] BC2-Dy방향 앤드플레이트 상부 2점 변위이미지 측정	51
[그림 4.16] BC3-Dx방향 앤드플레이트 상부 2점 변위이미지 측정	52
[그림 4.17] BC3-Dy방향 앤드플레이트 상부 2점 변위이미지 측정	52
[그림 4.18] BC4-Dx방향 앤드플레이트 상부 2점 변위이미지 측정	52
[그림 4.19] BC4-Dy방향 앤드플레이트 상부 2점 변위이미지 측정	52
[그림 5.1] Portable Hardness Tester	54
[그림 5.2] 강재패널의 실험체 형상	55
[그림 5.3] 실험전경	56
[그림 5.4] 측정기기 사진	56
[그림 5.5] 단조가력 입력 변위	57
[그림 5.6] 스틸 패널 경도 측정 위치	57
[그림 5.7] 스틸 패널 표면 처리 전/후 형상	58
[그림 5.8] 스틸 패널 표면 처리 전/후 경도 측정값	59
[그림 5.9] 하중-변위 이력곡선	60
[그림 5.10] 경도-소성변형을 상관 관계	61
[그림 5.11] 스틸패널 실험체 변형 형상	61
[그림 6.1] DSS (Distributed Strain Sensor : DSS)	62
[그림 6.2] DAS (Distributed Strain Acoustic/Vibration Sensor : DAS)	63

[그림 6.3] 강재패널의 실험체 형상	63
[그림 6.4] 실험전경	64
[그림 6.5] 측정기기 사진	64
[그림 6.6] Strain Gauge 부착 위치	65
[그림 6.7] 점증진폭 입력 변위	66
[그림 6.8] 단조가력 입력 변위	66
[그림 6.9] DSS 케이블(Bare)	67
[그림 6.10] DAS 케이블(노란색)	67
[그림 6.11] 강재패널 하중-변위 곡선	68
[그림 6.12] 강재패널 하중-시간 그래프	68
[그림 6.13] 강재패널 변위-시간 그래프	68
[그림 6.14] 반복가력 전체 데이터 가시화	69
[그림 6.15] 주요지점 분석 데이터	70
[그림 6.16] 각 주요지점 변위-시간 데이터	71
[그림 6.17] 변형을 패턴 데이터	72
[그림 6.18] 진동 신호 형태(강재 내부 격자형 포설)	73
[그림 6.19] 진동 신호 형태(케이블 뭉치)	74
[그림 6.20] DAS 데이터 가시화	74
[그림 6.21] 강재패널 하중-변위 곡선	75
[그림 6.22] 단조가력 전체 데이터 가시화	76
[그림 6.23] 주요지점 분석 데이터	76
[그림 6.24] 각 주요지점 변위-시간 데이터	78
[그림 6.25] 변형을 패턴 데이터	79
[그림 6.26] 진동 신호 형태(케이블 뭉치)	80
[그림 6.27] 진동 신호 형태(강재 내부 격자형 포설)	80
[그림 6.28] DAS 데이터 가시화	81
[그림 7.1] 대상구조물 구조 평면도	83
[그림 7.2] Operating Load 적용	86
[그림 7.3] Friction Load 적용	87
[그림 7.4] 지역별 풍속 기준	88

[그림 7.5] Structure Wind Load	90
[그림 7.6] Pipe Wind Load	91
[그림 7.7] X1~X42열 3D Modeling	93
[그림 7.8] 부재 응력 검토 결과	93
[그림 7.9] 변위 검토 결과	94
[그림 7.10] 보강안	95
[그림 7.11] SC1 검토결과	96
[그림 7.12] SC2 검토결과	97
[그림 7.13] SG1 검토결과	98
[그림 7.14] SG2 검토결과	99
[그림 7.15] SG3 검토결과	100
[그림 7.16] 구조검토를 통한 구조물 취약점 탐색	101
[그림 7.17] 취약부위 손상탐색 기술 도입하여 안전점검 수행	102
[그림 7.18] 손상탐색 장비를 통한 상시모니터링 체계 구축	102

< 표 차례 >

[표 1.1] 파이프랙 구조물 강재의 국부적인 손상상태	4
[표 2.1] 용접 결함 종류	11
[표 2.2] 비파괴검사 종류	15
[표 2.3] 안전점검 비파괴 검사용 장비	18
[표 2.4] 안전점검 조사 항목별 검사용 장비	19
[표 2.5] 국내·외 파이프랙 안전성 확보관련 기술동향	23
[표 3.1] 광섬유센서 분류 및 측정법	28
[표 3.2] 광섬유센서 측정 장비	30
[표 4.1] 실험체 규격	42
[표 6.1] 측정기기 종류	65
[표 7.1] 대상 구조물 개요	82
[표 7.2] 구조검토 방침	82
[표 7.3] 부재 정보	82
[표 7.4] 적용하중	84
[표 7.5] 구간별 Operating Load, Friction Load	85
[표 7.6] Structure Wind Load	87
[표 7.7] Pipe Wind Load	89
[표 7.8] Pipe Wind Load	89
[표 7.9] Seismic Load	91
[표 7.10] 철골보 (STEEL BEAM)	95
[표 7.11] 철골 기둥 (STEEL COLUMN)	95

Abstract

Research on precise damage detection technology for steel structure maintenance

Yang JaeYoung

Advisor : Prof. Choi, Jae Hyouk, Ph.D

Department of Architectural Engineering,

Graduate School of Chosun University

As social infrastructure built during the high growth period (60s and 70s) continues to deteriorate, an effective maintenance system is needed. In order to effectively detect damage to aged steel structures, we are reviewing technology to precisely detect the degree of damage by attaching contact/non-contact damage detection sensors to members expected to be damaged and conducting repeated load tests. To confirm damage detection technology for steel structures, contact and non-contact damage detection technologies for existing steel structures were reviewed, and steel loading of pipe rack structures was tested using ARAMIS damage detection equipment using DIC (Digital Image Correlation) technology. Damage detection technology. Through this, the precision of the damage detection equipment and its applicability for detecting damage to steel structures are evaluated. As a contact damage detection technology, we plan to conduct an experiment on the hardness-plastic strain correlation through forged steel and cyclic load tests to confirm the hardness value according to the plastic strain of the steel and evaluate the correlation between the two. ARAMIS equipment evaluation using DIC technology and damage detection technology through hardness-plastic strain correlation are local damage detection technologies for steel structures. However, due to the nature of pipe rack structures, they are large-scale structures, so research

on damage detection technology for large-scale structures is also necessary. Therefore, for damage assessment of large-scale structures, damage detection equipment is evaluated through steel load testing using an optical fiber distributed sound/vibration sensor (Distributed Strain Sensor) capable of detecting damage over 50 km.

1. 서론

1.1 연구 배경

국내 화학 및 발전 플랜트 설비의 많은 부분이 2000년대 이전에 건설되어 운영시설의 노후화에 따른 유지 관리의 필요성이 대두되고 있다. 또한, 플랜트 시설 현장에서는 안전에 대한 다양한 위험 요인이 내재되어 있고, 이로 인하여 플랜트 구조물의 안전진단에 막대한 예산을 사용하고 있다. 더우기 플랜트 구조물 특성상 여러 관련 기관들이 공동으로 관리하는 특수성 때문에 플랜트 구조물의 통합관리 시스템 부재, 안전 관리 미흡으로 인해 안전 관리에 대한 체계의 고도화가 충분히 이루어지지 않고 있다. 따라서, 플랜트 구조물에 손상이 발생한다면, 구조물의 붕괴뿐만 아니라 더 나아가 사회기반시설물에 직, 간접적인 피해를 줄 수 있다.

플랜트 구조물의 파손은 산업 전반에 부정적인 파급효과를 가져옴과 동시에 인명 및 재산상의 막대한 피해까지 가져오게 된다. Kim(1999)에 의하면 세계적으로 정유 및 석유화학 플랜트의 사고에 의한 재산 손실은 미화 10억달러(1조 4천억원 정도)에 이르고 있으며, 1989년의 경우에는 무려 35억 달러를 기록하기도 하였다.

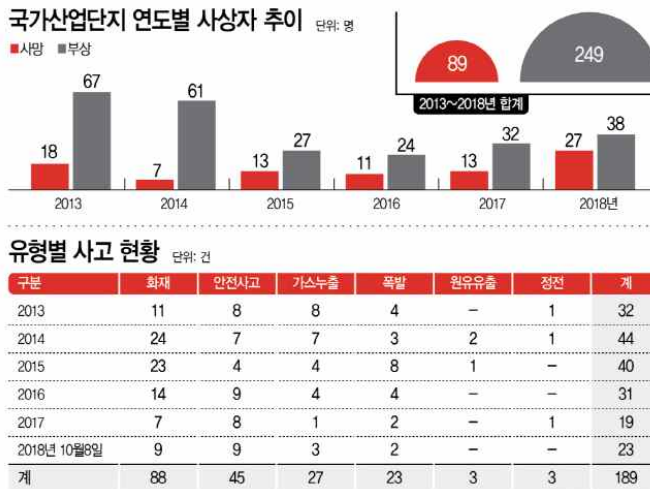


그림 1.1 국가산업단지 연도별 사상자 추이



그림 1.2 파이프랙 노후화 및 붕괴 사례

최근 플랜트 구조물 중 고온 고압의 파이프를 지지하는 파이프랙(pipe-rack)^[1] 구조물의 노후 및 자연재해 등으로 파이프랙 구조물의 유지 관리에 관한 관심이 커지고 있다.

파이프랙은 파이프라인에 의해 상호 연결된 구조물로서 설치된 이래 잦은 증설을 거듭하며 사용되는 특성이 있다. 따라서 최초에 설치된 파이프랙 구조물은 비교적 노후화의 정도가 심하고 야외에 노출되어 있어 현장 상황에 따라 손상을 감지하는데 어려움이 있다. 파이프랙의 특성상 비교적 짧은 경간의 강재 프레임이 반복적으로 나열되어 있는 대규모의 구조물이기 때문에 단기간에 손상을 감지하기 위해서는 다양한 진단기술이 필요하다.^[2]

파이프랙에 대한 손상을 제때 감지하지 못하면 추후 안전성 저하 및 대형사고로도 이어질 가능성이 있다. 따라서 파이프랙 안전성 확보를 위해서는 유지관리를 위한 손상탐색 기술에 대한 연구가 필요로 하다.

더우기, 가스시설 및 저장 가스배관 내진설계 기준(KGS GC203 2018, 산업통상자원부)에 의해 내진설계 기준이 강화되어 다양한 하중에 대한 구조안전성 확보가 시급한 실정이다.

고압가스 안전관리법 내진설계 기준 강화 (진도 5) 7상항 2018.01

「고압가스 안전관리법」 가스시설 및 저장 가스배관 내진설계 기준 개정 및 신설 (KGS GC203)



그림 1.3 가스시설 및 저장 가스배관 내진설계 기준(KGS GC203 2018, 산업통상자원부)^[3]

따라서 본, 연구에서는 강구조물의 손상으로 인한 재해 발생을 미연에 방지하기 위한 강구조물의 글로벌적인 손상검출 기술에 대한 검토하고 피이프랙 구조물의 효과적인 손상검출 시스템을 제안하고자 한다.

1.2 연구 목적 및 내용

강재의 손상검출 기술 중에서 강재에 접촉을 통한 파괴검사(Destructive testing)와 비접촉식 검사인 비파괴검사(Non-destructive testing)를 많이 사용하고 있다. 파이프랙 구조물 특성상 두가지로 구분하여 손상검출에 대한 기술을 접목할 수 있다. 첫 번째로 대규모 구조물에 대한 손상검출 시스템 적용이다. 파이프랙 구조물은 기본적으로 대규모의 구조물이기 때문에 강재의 손상검출을 위해서 본 연구에서는 광섬유센서를 활용한 대규모 파이프랙 구조물 손상검출 기술에 관해 연구하고자 한다. 광섬유 센서는 광섬유 분포 센서를 활용하여 광신호 처리를 통한 진동평가 및 손상검출이 가능한 센서이다. 광섬유 센서는 별도의 전원공급이 필요하지 않고 광섬유 케이블을 센서 단말로 활용하여 관리나 유지 보수비용이 절감되며, 대규모 및 가혹한 환경에 위치한 특수설비의 원격 안전진단에 적합하다는 특징이 있어 플랜트 구조물 중 파이프랙 구조물의 대규모 손상검출 기술에 적합하

다. 두 번째로 강재의 국부적인 손상검출 기술이 필요로 하다. 강재의 국부적인 손상을 장기간 방지할 시 구조물의 성능저하 및 내구력 저하에 원인이 될 수 있기에 국부적인 손상을 적절한 시기에 검출하여 구조물 성능저하를 미연에 방지하는 것이 필요하다. 그리하여 국부적인 손상검출에 대한 활용 기술로는 DIC(Digital Image Correlation)기술 및 경도 소성변형률 관계를 통한 손상검출 기술을 활용하여 강구조물의 손상검출 기술에 대해 개발하는 것이 목표이다.



그림 1.4 파이프랙 구조물

<표 1.1> 파이프랙 구조물 강재의 국부적인 손상상태





Girder 국부좌굴



수직가새 변형



기동 접합부 부식



보 플랜지 변형



거셋 플레이트 및 볼트 부식



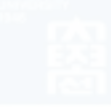
하부 플랜지 볼트 부식 및 변형



거셋 플레이트 및 볼트 부식



하부 플랜지 볼트 부식 및 변형



거셋 플레이트 및 볼트 부식



하부 플랜지 볼트 부식



볼트 너트 부식



V.Brace 볼트 풀림 상태



수직가새 거셋 플레이트 절단



수직가새 접합볼트 파손



수직가새 볼트 탈락



볼트접합부 도장박락 및 녹 발생

1.3 논문의 구성

본 논문은 강구조물의 손상검출 기술을 활용한 강재 손상검출 실험 분석을 통해 강구조물의 손상검출 기술 확보를 고찰하는 내용으로 다음과 같이 총 8장으로 구성되어 있다.

제1장은 서론으로 연구의 배경, 목적 및 논문의 전체적인 구성을 설명한다.

제2장은 철골 구조물의 기존 손상검출 진단법에 대한 기존 이론 및 연구동향을 분석한다.

제3장은 강재에 적용가능한 접촉식, 비접촉식(비파괴) 정밀 손상검출 시스템에 대해 분석하였다.

제4장은 제 3장에서 제시된 손상검출 시스템 중 비 접촉식 검사기법인 DIC (Digital Image Correlation) 기술을 활용한 ARAMIS 장비 측정 실험을 실시한다.

제5장은 제 3장에서 제시된 손상검출 시스템 중 비 접촉식 검사기법인 압연 강재의 경도-소성 변형률 관계를 분석하는 실험적 연구를 실시한다.

제6장은 대규모 플랜트 구조물에 적용 가능한 광섬유 센서 기술을 적용한 접촉식 강재 손상검출 기술 측정 실험을 실시한다.

제7장은 파이프랙 구조물에 대한 구조검토를 실시하여 손상검출 구간을 특정하고 보강안에 대해 설계한다.

제8장은 결론부분으로 본 연구에서 도출된 결과를 요약 정리한다.

부록에는 추가적인 내용을 기술하였으며, 부록 A는 파이프랙 구조물 도면이 수록되어 있다.

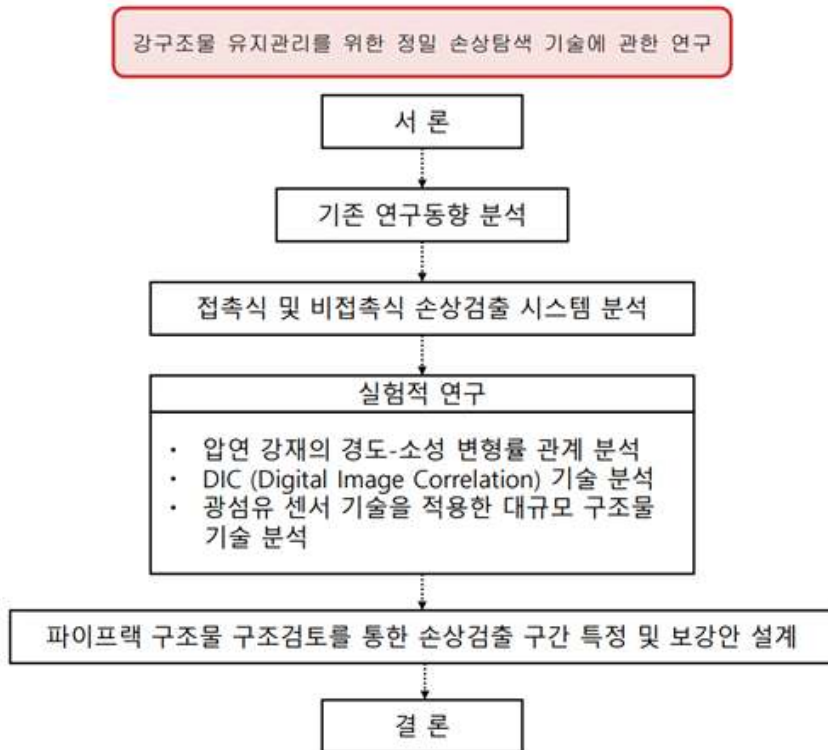


그림 1.5 논문의 구성

2. 기존 연구 동향

2.1 개요

노후화된 강재 구조물의 손상검출 방법으로 기존 강재의 손상검출 기술에 관해 기술하고 접촉식 손상검출 기술과 비접촉식 손상검출 기술을 활용하여 실험을 통해 사용 가능성을 제안하는 것이 본 연구의 목적이다. 본격적으로 연구를 시작하기에 앞서 기존 연구와 이론을 살펴보기로 한다. 먼저 강재의 고력볼트 및 용접 결함 검사에 대해 확인하고 파이프랙 구조물의 안전점검 및 정밀안전진단에 대하여 살펴본 후 현재 국내·외 산업 동향에 대해 살펴보기로 한다.

2.2 기존 시설물 재래식 안전진단 방법

이 장에서는 기존의 철골 구조물의 고력볼트 검사 혹은 용접 결함부 파괴, 비파괴 진단법에 관해 기술하였다. 철골 구조물의 안전성은 구조 부재의 안전성과 접합부의 안전성으로 크게 나뉜다. 구조 부재의 안전성 검토에서는 부재의 재료 및 가공 조립에 관련된 안전성도 검토되어야 하며, 접합부의 안전성 검토에서는 철골 구조 접합에 가장 일반적으로 사용되는 용접과 고력볼트의 결함과 검사방법 등이 다루어진다.

2.2.1 고력볼트 접합 검사

고력볼트에 의한 접합은 용접 접합에 비하여 재질이나 시공성에서 신뢰성이 높다. 그러나 예기치 않은 이유로 부재 접합에 사용된 고력볼트가 부분적으로 파괴되었을 때 같은 접합의 다른 고력볼트의 하중 부담을 크게 하여 연쇄적인 파괴를 일으킬 가능성이 있다. 따라서 철골 구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 부재 접합에 사용된 고력볼트의 상태를 조사하여 확인하는 조사가 필요하다.

2.2.1.1 고력볼트 육안에 의한 외관 조사 방법

고력볼트의 검사는 1차적으로 육안에 의한 외관 조사부터 시작된다. 고력볼트의 외관 검사에서는 다음과 같은 내용들이 중점적으로 조사된다.

- 1) 고력볼트의 치수 및 규격 검사
- 2) 고력볼트의 접합부의 변형 및 균열 상태
- 3) 고력볼트의 변형 및 풀림 여부

고력볼트 접합부에 과도한 변형이나 균열이 생긴 경우에는 방사선 투과법이나 초음파탐상법 등 비파괴시험을 통하여 접합 부재의 안전성을 정밀검사 한 후 보강 방법을 결정한다. 고력볼트의 변형 중 대표적인 것은 고력볼트가 풀려서 마찰 저항에 필요한 축력이 도입되고 있지 않을 경우이다. 이러한 경우에는 토크 관리법이나 너트 회전법으로 조임 검사를 하여 축력의 도입에 필요한 너트회전이 ± 10 퍼센트 범위까지 되어 있는지를 확인한다. 토크 관리법이나 너트회전법에 의한 조임 검사에서 너트와 볼트, 와셔 등이 공회전하는 경우에는 새 고력볼트로 교체하여야 하며, 한 번 사용한 고력볼트를 다시 사용해서는 안 된다.

2.2.2 용접 결함

용접 기술은 용접위치, 이음부의 가공 및 맞춤, 용접봉과 전류의 선택, 용접 속도 등 여러 가지 요인들을 내포하고 있다. 용접 기술이 적합하지 않은 경우에는 용접부에 결함이 생기게 되며, 이러한 결함들을 하중 작용 시 응력 집중 현상을 일으켜, 구조물의 파손 또는 파괴의 직접적인 원인이 되므로 그 발생 요인과 검사 방법을 알아둘 필요가 있다. 용접부에 가장 흔하게 생기는 결함은 언더컷, 용합불량, 불완전 용입, 기포, 슬래그 함입, 균열 등이 있다.

<표 2.1> 용접 결함 종류

결함의 종류 및 모양	발생 원인	결함 방지 대책
<p>가공</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 용접부의 습기, 녹, 먼지, 페인트, 이물질 부착 - 용접봉 건조 불량 - 전류 높고, 아크 길이가 길 때 - 용접 속도 과대 	<ul style="list-style-type: none"> - 습기 이물질 제거 등 용접부를 깨끗이 함. - 용접봉 건조 - 적정 전류, 아크 길이 조정 - 용접속도 낮춤.
<p>피트</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 급속한 응고 	<ul style="list-style-type: none"> - 위빙하거나 예열함
<p>슬래그 섞임</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 전층의 슬래그 제거 불량 - 전류의 과서, 운봉 부적절 - 봉의 각도 부적당 - 운봉 속도가 느릴 때 - 용접 이음의 부적당 	<ul style="list-style-type: none"> - 각층마다 슬래그를 깨끗이 제거함 - 전류를 약간 더 세게, 운봉법 조절 - 용접부 예열, 봉의 각도 조절 - 운봉속도 약간 빠르게 - 루트 간격을 좀 더 넓게 함.
<p>용입불량</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 이음 설계의 불량 - 용접 속도가 너무 빠를 때 - 용접 전류가 너무 낮을 때 - 용접봉 선택 불량 	<ul style="list-style-type: none"> - 루트 간격 및 홈각도를 좀 더 크게 함. - 용접속도를 조금 낮춤. - 용접 전류를 좀 더 높임. - 적정 용접봉 굵기 선택
<p>언더컷</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 전류가 너무 높을 때 - 아크 길이가 너무 길 때 - 무적당한 용접봉 사용시 - 용접 속도가 너무 빠를 때 - 부적당한 운봉법 사용시 	<ul style="list-style-type: none"> - 전류를 조금 더 낮춤 - 적정 아크 길이 유지. - 적정 용접봉 종류와 굵기 사용 - 용접 속도를 조금 더 낮춤 - 적정 운봉법 사용
<p>균열</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 이음의 강성이 큰 경우 - 부적당한 용접봉 사용시 - 모재에 탄소, 망간 등의 합금원소 함량과다 - 용접부의 급냉 - 모재에 유황 등 함량 과대 - 용접 전류 및 속도 과대 - 아크길이 부적당 	<ul style="list-style-type: none"> - 예열 피닝, 비드 배치법 변경 - 적정 용접봉 선택 사용 - 적정 모재 선택 - 용접부 급냉 방지, 예열, 후열 - 유황함량 검사 - 용접 전류, 속도 조정 - 아크길이 조정
<p>스패터 부착</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 전류가 높을 때 - 건조 불량 용접봉 사용시 - 아크 길이가 너무 길 때 - 운봉법 불량 	<ul style="list-style-type: none"> - 전류를 좀 더 낮춤 - 건조된 용접봉 사용 - 아크 길이를 낮춤 - 적정 운봉법 사용

2.2.3 용접 접합 검사

2.2.3.1 파괴시험

용접시험은 시험방법에 따라 파괴시험과 비파괴시험으로 나뉜다. 파괴시험은 용접부를 절단, 인장, 굴곡, 그 외의 소성 변형을 일으켜 조사하는 방법으로 용접 경화성시험과 연성시험 및 용접터짐시험 등이 있다. 용접 경화성 시험은 용접부의 경화의 정도를 조사하는 시험으로 KS B 0893 용접 열영향부의 최고 경도 시험방법 및 용접 열영향부의 태퍼 경도 시험방법에 규정되어 있다. 용접 연성시험은 용접 접합부의 연성을 조사하는 시험으로 굽힘 시험 방법이 사용된다. 굽힘 시험 방법에는

- KS B 0832 맞대기 용접이음의 형틀 굽힘 시험방법
- KS B 0834 맞대기 용접이음의 자유 굽힘 시험방법
- KS B 0844 T형 필렛 용접이음의 굽힘 시험 방법 등이 있다.

용접 터짐은 금속의 용접성 중 가장 중요한 것으로 용접 접합부의 품질과 성능에 중대한 영향을 미치는 용접 결함으로 용접부 또 모재 내에 균열이나 갈라짐을 일으킨다. 용접 터짐은 모재의 재질, 두께 용접 방법, 용접 조건, 이음 형식, 용접 자세, 용접부의 형상, 구속 상태 등에 따라 여러 가지 형태로 나타나므로 터짐 형태, 발생 원인, 발생 온도 등에 따라 적합한 시험방법이 선정되어야 한다. 한국공업규격(KS)^[3]에 규정되어 있는 시험 방법으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- KS B 0859 전개식 필렛 용접터짐 시험방법
- KS B 0867 겹치기 이음 용접터짐 시험방법
- KS B 0869 U형 용접터짐 시험방법
- KS B 0870 경사 Y형 용접 터짐 시험방법

2.2.3.2 비파괴시험

용접부의 비파괴시험은 모재나 용접부의 형상과 기능에 변활를 주지 않으면서 용접 결함을 조사하는 데 사용된다. 용접부의 표면 결함을 조사하는데에는 육안조사, 자분탐상시험, 침투 탐상시험 등의 방법이 일반적으로 사용되고, 내부 결함을 조사하는 데에는 방사선 투과시험, 초음파 탐상시험 등이 효율적이다.

2.2.3.3 비파괴검사 방법

1) 육안조사

육안 조사는 강재나 접합부의 표면에 발생한 균열이나 결함을 찾아내는데 가장 간편하고 효율적인 방법이다. 그러나 육안에 의한 결함 조사는 조사하는 사람의 시력이 미치는 범위에서만 가능하고, 도장표면에 나타나지 않은 작은 균열을 검출하기 어려운 단점이 있다.

2) 방사선 투과시험

파장을 가진 전자파로서, 물체를 투과하는 성질을 가지고 있다. 이러한 방사선이 물체를 투과할 때 물체의 재질과 두께에 따라 투과성이 달라지기 때문에 강재의 한쪽에는 방사선을 방사하여 강재를 투과시키면 결함이 있는 곳과 없는 곳을 투과하는 방사선 사이에는 선량률의 차이가 생기게 된다. 이러한 선량률의 차는 강재 반대편에 배치한 χ 선 필름에는 농도의 차로, 형광판에서는 발광량의 차이로 나타내기 때문에 내부의 결함을 화상으로 만들어 관찰할 수 있다. 이 방법으로는 강판의 라미네이션이나 용접부의 균열, 용입 불량, 용합 불량, 슬래그 함입, 언더 컷 등의 결함을 찾아낼 수 있고 자료를 오래 보관할 수 있는 장점이 있으나, 방사선이 인체에 해롭기 때문에 특별한 주의를 요하고, 장비가 복잡하고 고가이며, 장비 전문기능인이 있어야 하는 단점이 있다.

3) 초음파 탐상시험

초음파를 이용한 비파괴검사 방법으로 펄스 반사법, 투과법, 공진법 등이 있으나 일반적으로 펄스 반사법과 투과법이 많이 사용된다. 펄스 반사법은 시험체의 동일

면에 발진자와 수진자를 설치하여 발진자에서 초음파 펄스를 시험체에 입사하여 시험체가 저면이나 결함부에서 반사되어 돌아온 초음파의 전파 시간을 측정하여 결함의 위치와 크기 등을 추정하는 방법이다. 투과법에서는 시험체의 대향면에 발진자와 수진자를 설치하여 투과된 초음파의 전파시간을 측정하여 내부의 결함을 조사한다. 초음파 탐상검사는 고력볼트나 용접부의 결함검사에 많이 사용된다. 초음파 측정장비는 건전지로 사용 가능하고 휴대하기 쉬우며, 시험 결과를 빨리 알 수 있는 장점이 있으나, 발진자와 수진자를 설치하는 데에는 표면조건이 좋아야 하고, 시험 결과의 해석에 숙련된 기술자가 필요하다.

4) 침투 탐상시험

침투 탐상법은 육안으로는 분간하기 어려운 강재나 용접부의 미세한 균열부에 색깔이 있는 침투액을 침투시켜 판별하는 방법이다. 강재 표면의 페인트, 슬래그 등을 모래 분사나 쇠솔질로 제거하고 솔벤트와 같은 용제로 깨끗이 한 후 붉은 색 또는 노란색의 침투액을 바른다. 여기에 사용되는 침투액은 물보다 표면장력이 훨씬 낮은 액체로서 균열 안으로 깊숙이 침투하는 성질을 가지고 있다. 침투액을 도포하여 15~30분 후 표면의 침투액을 깨끗이 닦아 낸 다음 하얀색의 현상이나 노란색의 균열선을 이루기 때문에 미세한 균열을 육안으로 판별할 수 있기가 간단하며 결함 판별이 쉬운 장점을 가지고 있다.

5) 자분 탐상시험

자성 금속에 자장을 형성하면, 자장의 형태는 금속이 재질과 밀도에 영향을 받는다. 이러한 변화는 미세한 쇠가루 등 자성분말을 시험체 표면에 뿌렸을 때 분말이 결함부위로 물리는 등 알기 쉬운 형태로 나타난다. 자분 탐상법은 표면 결함뿐 아니라 내부 결함을 찾는 데에도 매우 효율적인 방법으로, 미세한 표면균열, 라미네이션, 융합 불량, 언더 컷, 불완전 용입 등의 결함을 탐지 할 수 있다. 자분탐상법은 설치가 간단하여 경제적인 탐사 방법이나, 적용범위는 철금속이나 니켈, 코발트 합금 등 자성물체에 국한되며, 표면건조의 영향을 받기 때문에 이물질이 없는 깨끗하고 건조한 표면에서 실시하여야 한다.

6) 와류 탐상시험

도체에 교류를 통한 코일을 접근시킬 때 결함이 있으면 코일에 유기되는 전류,

전압이 변화한다는 것을 이용하여 결함을 검출하는 방법을 와류탐상시험 또는 전자기유도시험이라 말하고 결함검출과 함께 금속의 재질판별, 막두께측정, 형상·치수측정에 이용되고 있다. 특히 와류탐상시험은 고속검사(50~200m/min)가 가능하고 더욱 검사결과가 전기신호로 얻어져서 자동기록과 자동선별이 용이하므로 철강에 있어서는 봉강, 선재, 강관 등의 표면흠 검사에 널리 이용되고 있다.

<표 2.2> 비파괴검사 종류

구분	원리	장점	단점	개념도
초음파탐상법 (UT)	시험체 내의 불연속부로부터 반사되는 초음파 비교	휴대용으로 간편한 미세결함 탐상이 가능함. 검출결과 즉시 확인 가능	숙련된 기술자 요구 및 표준 시험편 필요	
침투탐상법 (PT)	모세관 현상	비용이 저렴하며, 미세균열탐상 시험방법이 간단하다.	주변 온도에 영향 및 침투제에 의한 오염 가능	
자분탐상법 (MT)	시험체를 자화시키고 자분적용후 자속누설부검출	작업이 신속하고 간단하고 결함 육안 확인 및 표면 균열 확인에 적합	내부 검사 불능, 강자성체 검사 제한, 이형 형상 불능	
와류탐상법 (ET)	전자기유도현상	미세결함탐상 및 데이터 보존가능 검사 단순화.	깊은 결함 검출 불능, 전도성 재료에 유효	

2.3 파이프랙 안전점검 매뉴얼 조사 및 분석

2.3.1 관리 일반

2.3.1.1 적용 범위

○ 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」 제13조(긴급안전점검의 실시)에 규정에 따라 파이프랙 주요부재의 외관조사, 균열, 파손, 변형발생 등을 조사하여 시설물 전체의 객과적인 상태를 평가한다.

- 관리주체는 시설물의 붕괴·전도 등이 발생할 위험이 있다고 판단하는 경우 긴급안전점검을 실시하여야한다.

- 국토교통부장관 및 관계 행정기관의 장은 시설물의 구조상 공중의 안전한 이용에 중대한 영향을 미칠 우려가 있다고 판단되는 경우에는 소속 공무원으로 하여금 긴급안전점검을 하게 하거나 해당 관리주체 또는 시장·군수·구청장(제6조제1항 단서에 해당하는 시설물의 경우에 한정한다)에게 긴급안전점검을 실시할 것을 요구할 수 있다. 이 경우 요구를 받은 자는 특별한 사유가 없으면 이에 응하여야 한다.

- 국토교통부장관 또는 관계 행정기관의 장이 제2항에 따른 긴급안전점검을 실시하는 경우 점검의 효율성을 높이기 위하여 관계 기관 또는 전문가와 합동으로 긴급안전점검을 실시할 수 있다.

- 제2항에 따라 긴급안전점검을 실시하는 공무원은 관계인에게 필요한 질문을 하거나 관계 서류 등을 열람할 수 있다.

- 제2항에 따라 긴급안전점검을 실시하는 공무원은 그 권한을 나타내는 증표를 지니고 이를 관계인에게 보여주어야 한다.

- 국토교통부장관 또는 관계 행정기관의 장은 제2항에 따라 긴급안전점검을 실시한 경우 그 결과를 해당 관리주체에게 통보하여야 하며, 시설물의 안전 확보를 위하여 필요하다고 인정하는 경우에는 정밀안전진단의 실시, 보수·보강 등 필요한 조치를 취할 것을 명할 수 있다.

- 제1항 및 제2항에 따라 관리주체 또는 관계 행정기관의 장이 긴급안전점검을 실시한 경우 그 결과보고서를 국토교통부장관에게 제출하여야 한다. 관리주체가

제출하는 경우에는 제6조제4항부터 제7항까지를 준용한다.

- 긴급안전점검의 절차 및 방법, 긴급안전점검을 실시할 수 있는 자의 자격 등 긴급안전점검 실시에 필요한 사항은 대통령령으로 정한다.

안전점검은 파이프랙의 1)구조변경 이력을 검토하고 2)주요부재의 외관조사를 수행한 후 상세한 점검이 요구되는 파이프랙을 대상으로 ①균열, ②도장, ③부식상태 ④콘크리트의 균열, ⑤박리/박락 및 ⑥철근노출 등을 체크하고 콘크리트 비파괴강도, 탄산화 깊이 측정을 수행하는 기본적인 안전점검에 대한 일련의 작업을 수행한다.

2.3.2 안전점검의 내용 및 범위

파이프랙 구조물의 현재 상태를 파악을 위하여, 다음과 같은 각종 현황조사 및 간단한 비파괴조사를 수행한다.

1) 사전조사

- 가) 진단구조물의 규모 및 이력 파악
- 나) 관계자 의견 청취(필요시)

2) 자료수집 및 분석

- 가) 건축물사용 및 관리실태
- 나) 설계도서 및 관련서류 검토

3) 현장조사 및 시험

- 가) 구조물, 주요부재의 외관(손상, 상태)조사
 - 부재 규격조사
 - 손상, 상태조사 : 철근 콘크리트 부재 → 균열, 박리, 박락, 층분리, 백태, 철근노출 등. 철골부재 → 균열, 도장상태, 부식상태, 용접부 확인, 내화피복
 - 변위조사 : 수직, 수평변위조사

나) 현장 재료시험 등

- 철근콘크리트 압축강도(반발경도 시험)
- 철근탐사
- 철근콘크리트 탄산화시험

5) 보수·보강 및 유지관리 방안

6) 종합결론 및 건의

2.3.3 안전점검 기기 및 종류

안전점검시 사용되는 비파괴 검사용 장비는 아래와 같다.

<표 2.3> 안전점검 비파괴 검사용 장비

장 비 명	규 격	수 량	용도 및 활용방법	비고
줄 자	5m, 50m	1	부재치수, 거리 등 측정	
버니어캘리퍼스	Mitutiyo (0~150mm /0.01mm)	1	이격, 균열 폭, 부재치수 등 측정	
거리측정기	JA6N	1	거리 측정	
데오도라이트	DT-25	1	각도 측정 (기울기 측정)	
레이저레벨기	RL-VH40R	1	부재 처짐 측정 (부동침하 측정)	
균열폭 측정기	Peak 2028 (10배율)	1	균열 등 시공 상태 조사	
철근탐사장비	Structure Scan Mini XT	1	철근 배근상태 및 피복두께 측정	
슈미트해머	SD 7000P	1	콘크리트 압축강도 조사	
드릴	-	1	탄산화시험, 콘크리트 천공	
카 메 라	DIGITAL	1	주요 손상, 상태 촬영	
손 전 등	-	1	외관 조사 시 시야 확보	

<표 2.4> 안전점검 조사 항목별 검사용 장비

구분	장비명	MODEL 및 규격	용도	비고
제원조사	줄자	5m,50m 줄자	제원 측정	
	버니어 캘리퍼스	Mitutoyo (측정범위/정밀도) 0~150mm/0.01mm	치수 조사	
	카메라	Canon (IXUS 285 HS)	현장조사 시 손상 및 특이사항 촬영	
변위조사	거리측정기	JA6N	거리 측정	
	데오도라이트	DT-2S	각도측정 (기울기 측정)	
	레이저레벨기	RL-VH40R	부재처짐 측정	
균열조사	균열폭 측정기	Peak 2028 (10배율, 라이트부착)	균열 등 시공상태조사	
압축강도 조사	Schmidt Hammer	SD 7000P	콘크리트 압축강도 산정	
철근배근 상태조사	철근탐사장비	Structure Scan Mini XT	구조물의 철근 배근 상태 및 피복두께 측정	
탄산화 조사	충전드릴 버니어캘리퍼스	페놀프탈레인 1% 용액	콘크리트 탄산화 깊이측정	

2.3.4 안전점검의 진행 및 방법

점검대상 구조물에 대한 전반적인 육안 현황조사를 실시하고, 비파괴조사 장비를 이용하여 구조물 실측 및 상태를 조사하였으며, 준공 후 현재까지의 사용에 따른 안전성 확보 여부의 판단과 향후 지속적인 유지관리를 통한 시설물의 안전성을 확보하고자 다음과 같은 과업을 수행해야한다.

1) 현황조사

대상 구조물의 전체적인 현황 및 상태를 파악하기 위하여 다음과 같은 항목에 대하여 조사를 실시한다.

- 단면치수, 형상조사를 통한 현황도 작성
- 육안조사를 통한 하자조사 및 손상현황도 작성
- 철골 접합부, 부식상태 등 현황조사
- 수직처짐, 수평변위 조사를 통한 시설물의 변형조사

2) 비파괴조사

대상 구조물의 시공상태 및 노후화상태를 파악하기 위하여 다음과 같은 항목에 대하여 조사를 실시한다.

- 철근콘크리트 강도조사
- 철근콘크리트 철근배근상태 조사
- 철근콘크리트 탄산화조사

3) 보수·보강 방안 제시

- 현황조사 및 비파괴조사 결과를 참고하여, 보수·보강이 필요한 부분 판단
- 각 보수·보강의 시공도 및 시방서 작성

2.3.5 정밀안전점검의 흐름도

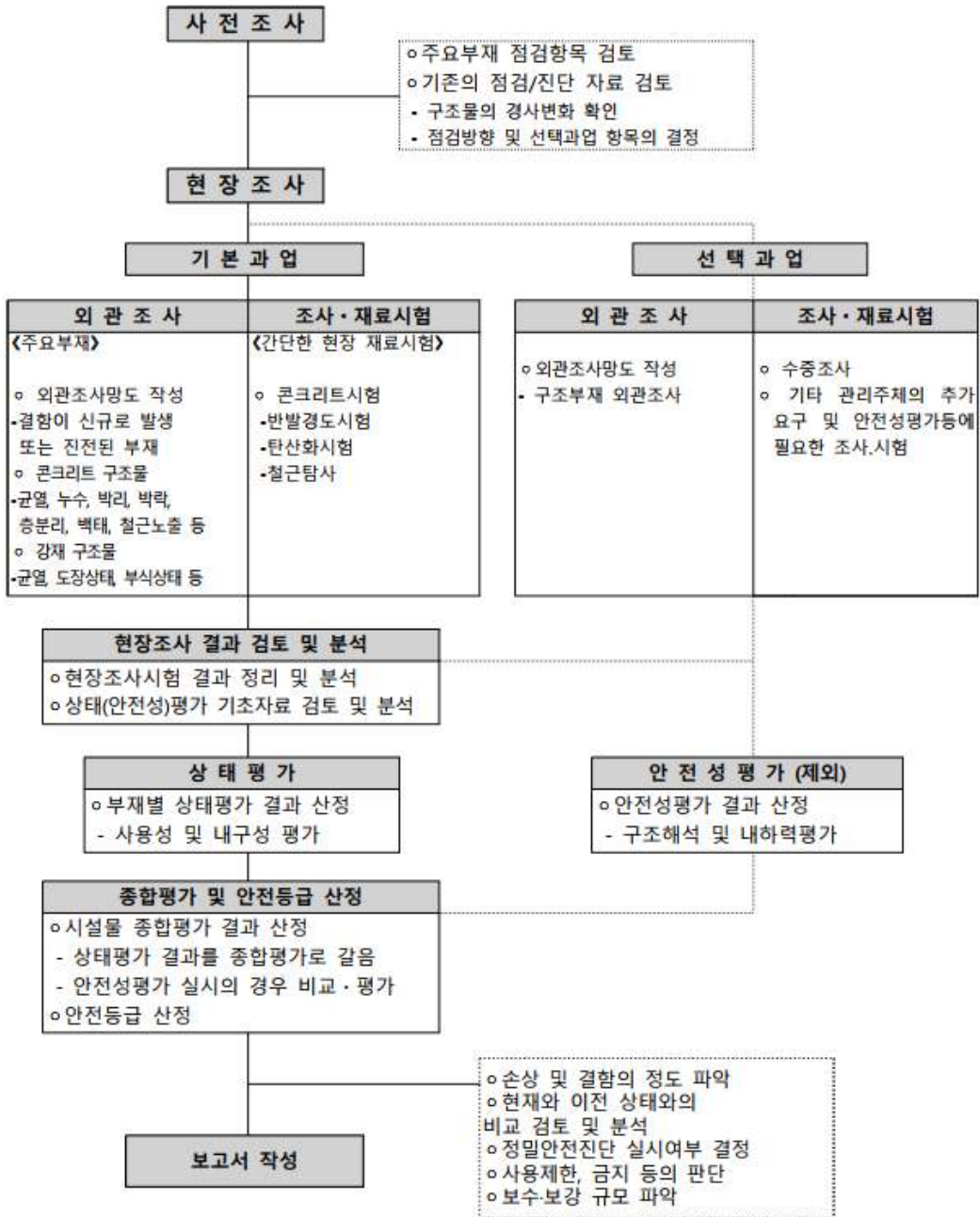


그림 2.1 정밀안전점검 흐름도

2.4 국내 · 외 강구조물 안전성 확보 기술개발 동향

2.4.1 시장동향

1) 안전점검 및 유지관리 시장

산업단지의 노후화로 인하여 해당지역 구조물의 안전점검 및 유지관리에 대한 수요가 지속적으로 증가함에 따라 산단 중심의 ‘일자리 거점 혁신계획 (정보)’의 안전·환경 통합관리시스템 구축 등이 이에 해당됨.

2) 보수 및 보강 시장

국내 재난안전산업의 시장 규모는 약 47.3조 (2019년 말)로 전년대비 8% 증가하였으며, 특히 경주 포항지진 이후, 노후구조물에 대한 보수 및 보강이 증가하는 추세로, ‘안전관리 특별대책 (포스코)’ 3년간 1조원 투자가 대표적인 예임.

3) 사물인터넷기술 시장

건설분야 사물인터넷기술 (IoT, Internet of Things)의 시장규모는 약 8.8조 (2019년)에서, 16.5%의 연평균 성장률로 성장하여 2024년에는 약 19조에 이를 것으로 추정되며, 여수국가산업단지에서는 파이프랙의 주요 하중에 대한 상태 모니터링이 필수적으로 요구됨에 따라 (주)한국플랜트관리의 연구에서는 여수국가산업단지 내 일부 구간을 선정하여 개발된 IoT 플랜트 안전관리시스템의 테스트베드를 구축하고 시험 운영을 통해 현장 적용성을 검증하고 있으나, 선진국과 비교할 때, 국내의 건설분야 IoT 기술격차가 존재하며 활용 경험도 부족한 실정임.



a) 박스컬버트

b) 파이프랙

c) 드레인포트

그림 2.2 IoT플랜트 안전관리시스템 테스트베드 현황^[38]

2.4.2 기술개발동향

1) 국내 기술개발동향

파이프라인의 성능향상을 목적으로 배관 등 설비와 이를 지지하는 구조체인 파이프랙을 일체로 모듈화하는 시공방법에 대해서 기술이 다수 제시되었으며 일부는 현장에서 적용성이 검토됨. 또한 파이프라인에 대한 외부환경 요인의 영향을 검토하는 센서 등의 동적 계측 장비나 시스템에 대한 기술이 제안되어 있으나 현장에 도입된 사례는 매우 제한적임.

2) 국외 기술개발동향

국내의 파이프랙 안전성 확보 관련기술 동향과 거의 유사한 형태로 진행되고 있음.

<표 2.5> 국내·외 파이프랙 안전성 확보관련 기술동향

구분	대상	내용	효과
국내	G사	사전 제작 후 건설현장에서 설치하는 파이프랙 모듈	안전사고 예방 및 공기 단축
	S사	분절모듈을 이용한 파이프랙 구조물의 모듈러 시공방법	안전사고 예방 및 공기 단축
	G사	Pipe-rack 접합부 개선방법에 대한 실험적 연구	현장작업 최소화로 인한 안전성 확보
	K사	철골-콘크리트 하이브리드 PC파이프랙 구조	내화성능을 향상시키는 공장제작형 부재
	K사	플랜트 구조물의 동적 계측 데이터 모니터링 시스템	구조물 상시점검을 통한 안전성 확보
	D사	파이프랙 모듈의 칼럼 서포트 구조	기초부 보강을 통한 구조 안전성 확보
	K연구소	무선센서를 활용한 파이프랙 안전성 검토 네트워크	모니터링을 통한 파이프랙의 안전성 검토
국외	F사	Industrial Pipe Racks Using Modules, Pre-Assembled Units	안전사고 예방 및 공기 단축
	C사	Modularised Pipe Racks	안전사고 예방 및 공기 단축
	W사	Monitoring system to control pipeline operation environment	파이프라인 시설의 외부환경요인 모니터링 및 자동 운영 체계

3) 국내외 기술동향에 근거한 시사점

신규 파이프랙의 안전성을 확보하기 위한 다양한 기술은 국내외에서 확보되어 있으

나 노후화된 기존 파이프랙의 안전성을 향상시키기 위한 기술은 상대적으로 부족한 실정임. 또한 기존 파이프랙의 구조성능향상을 위해 보강하는 시공사례에서 일반 강 구조물의 보강공법에 근거하여 시공되는 것이 일반적임. 이에 따라 기 시공된 현장의 파이프랙의 특성을 고려한 현장맞춤형 보강기술의 개발이 파이프랙의 안전성 확보에 매우 중요한 요인이라 할 수 있음. 파이프랙 안전 및 유지관리 분야에서 다양한 첨단 기술개발이 시도되고 있으나 선진국 대비 기술격차가 현저함. 국내의 안전 및 유지관리 기술수준은 최고 기술보유국 (미국) 대비 74.1% (기술력차 6.8년)이며, 지금까지 하드웨어 중심으로 연구개발이 추진되어 상태 관리 등 소프트웨어 기술과 이와 관련된 핵심장비 등 기초 및 원천 기술이 부족하고, 저임금/비속력 기술자에 대한 의존도가 여전히 높은 상태임. 기존 파이프랙에 대한 외부환경요인의 영향을 모니터링 하는 기술 체계는 국내외에서 일정 수준 확보되어 있으나 현장에 적용되어 시범 운영된 경우는 적으며, 상시모니터링 결과를 활용하여 지속적으로 파이프랙의 안전성을 유지 및 관리하는 기술체계 확보가 요구되는 실정임.

국내·외의 대표적인 연구들을 살펴보면 다음과 같다.

1) 이종한외 3인은 ‘USN 기반의 파이프랙 모니터링 시스템’을 통하여 산업용 현장 계측기에 대한 ISA100.11a 표준을 사용하는 WSN 기반의 파이프랙 안전 모니터링 시스템을 설계하고 구현하였다.^[1]

2) 김경석은 ‘디지털 화상 상관법(DIC)의 원리’를 통하여 디지털 화상 상관법의 원리에 대해 다루었고, 비파괴검사 분야의 발전에 일조하였다.^[6]

3) 최인영 외 4인은 ‘이미지 상관법을 이용한 힘 변형률 측정에 관한 연구’를 통하여 기계 부품 및 구조물 평가에 있어 변위와 변형률 측정을 스트레인 게이지와 같은 접촉식 방법을 대체하는 비접촉식 이미지 상관법(Digital Image Correlation: DIC)을 이용한 계측방법을 활용한 계측을 진행하였다.^[7]

4) Yong Du 외 1인은 ‘Application of the Non-Contact Video Gauge on the Mechanical Properties Test for Steel Cable at Elevated Temperature’를 통하여 주변 온도 및 고온에서 강재의 변형-응력 관계를 측정하기 위해 스트레인 게이지, 비접촉 비

디오 게이지(DIC)를 이용하여 측정 결과를 나타내었고, 응력-변형률 곡선을 비교하면 비접촉식 비디오 게이지가 특히 고온에서 신장계뿐만 아니라 스트레이 게이지보다 더 효율적이고 신뢰할 수 있는 데이터 베이스를 제공할 수 있음을 나타내었습니다.^[8]

5) Digendranath Swain 외 3인은 ‘Digital Image Correlation (DIC) – An Invaluable Tool for Non-contact and Full-field Assessment of Critical Regions on Launch Vehicle Structures’ 를 통해 발사체(LV) 중요 위치에 대한 구조적 평가를 위해 향상된 장비로 디지털 이미지 상관관계(DIC)를 사용하는 방법을 연구하였다.^[9]

6) 김경석 외 3인은 ‘ESPI를 이용한 복합재료 구조물의 결함 검출’ 을 통해 ESPI 기술을 이용하여 복합재료 구조물의 결함을 쉽게 검출할 수 있는 실험을 진행하였다.^[10]

7) 윤성운 외 3인은 ‘ESPI를 이용한 전자부품 비파괴 신뢰성평가’ 를 통해 기존의 진동해석 실험으로 가속도계를 사용하는 반면 ESPI를 이용하여 에어콘용 팬의 진동해석 실험을 진행하여 고유주파수, 고유주파수의 범위를 검사하였다.^[11]

8) 성도윤 외 3인은 ‘구조안전진단에서의 3D 레이저 스캐너 투입 성과 분석’ 를 통해 파이프랙을 진단하는 구조안전진단팀의 작업성능을 정량적으로 분석하는 것으로 3D 레이저 스캐너를 도입하여 대기비용, 인건비, 초기 투자비용 등을 고려하여 경제성 분석을 실시하였다.^[12]

9) 차희성은 ‘ICT 스마트 건축 재난관리 기술의 현재와 미래’ 를 통해 화재, 지진, 홍수, 재해 조기 예측 및 예방과 효과적인 대응의 연구성과와 적용 사례를 검토하여 건축물 대상의 ICT 융복합 재난관리 기술의 현재 기술에 대해 확인하였다.^[13]

10) 윤희철은 ‘영상기반 구조물 변위측정 기술’ 을 통해 영상기반 구조물 모니터링 기법을 활용하여 콘크리트 또는 강재의 균열을 검출하는데도 활용하여 구조물의 동적 변위를 측정하는 방법에 대해 연구한다.^[14]

11) 이상훈은 ‘스마트 복합재난 대응을 위한 커넥티드 디지털 트윈’ 을 통해 인공

지능을 기반한 스마트 커넥티드 디지털 트윈을 통해 복합재난에 효과적으로 대응할 수 있는 체계적인 시스템의 솔루션을 제시하였다.^[15]

12) 정해용 외 3인은 ‘마그네틱 센싱 기반 강구조물 손상검출 시스템 기초연구’를 통해 강구조물을 육안검사 하듯 용이하고 쉽게 점검하면서 구조물의 안전성에 대해 신뢰성을 확보 가능하도록 구조물을 전체적으로 간편하고 신속하게 정밀검사 할 수 있는 마그네틱 기반 강재 손상검출 시스템에 대해 연구하였다.^[16]

13) H Nashid 외 5인은 ‘Non-destructive method to investigate the hardness - plastic strain relationship in cyclically deformed structural steel elements’를 통해 압연 H형강의 경도 측정을 통해 경도-소성변형을 상관관계를 확인하고 DIC 카메라를 활용하여 경도-소성변형률의 상관관계에 대해 연구하였다.^[17]

14) 김한선 외 4인은 ‘강구조물 진단을 위한 누설자속 기반 강판 손상의 이미지화’를 통해 강구조물 손상 검사를 손쉽게 검사 가능한 누설자속(MFL:Magnetic flux leakage)기반의 비파괴검사 기법을 적용하여 강판 시편에 여러 가지의 인위적인 손상 적용하여 누설자속 비파괴검사법을 이용해 손상 진단 가능성을 실험적 연구를 통해 확인하였고 이를 통해 신호의 이미지화 기법에 대한 연구를 진행하였다.^[18]

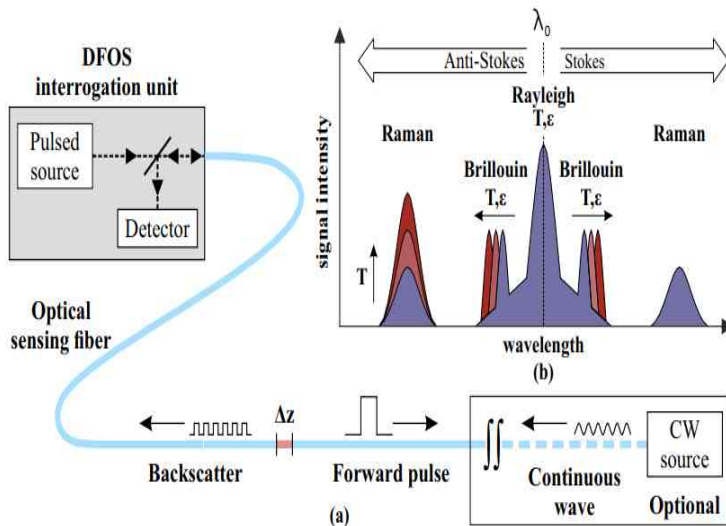
15) S.A. Krishnan 외 8인은 ‘Assessment of Deformation Field during High Strain Rate Tensile Tests of RAFM Steel Using DIC Technique’를 통해 재료의 유동 및 파괴 거동을 설명하기 위한 구성 모델을 개발하기 위해 강재의 인장시험을 통해 균일하고 국부적인 변형 영역의 변형장 측정을 DIC(Digital Image Correlation) 기술로 매핑하였습니다.^[19]

3. 강재의 접촉/비접촉식 정밀 손상탐색 기술

3.1 강재의 접촉식 손상검출 기술

3.1.1 디지털 안전용 광섬유 센서

디지털 안전용 광섬유 센서는 광섬유 분포 센서를 활용하여 광신호 처리를 통한 진동평가 및 손상검출을 탐색할 수 있는 센서이다. 기본개념으로는 광섬유 케이블을 센서로 활용하여, 광섬유 케이블 전구간에 대한 물리량 (온도, 진동, 음향, 변위 등)의 분포를 계측하는 센서 시스템이다. 동작원리로는 계측기에서 생성된 광신호로부터 광섬유 케이블에서 발생하는 역 산란광 신호를 수신 및 분석하여 광섬유 위치별 물리량을 측정한다. 광섬유 센서의 특징점으로는 별도의 전원공급이 필요 없는 광섬유 케이블을 센서 단말로 활용하여 관리 및 유지 보수비용이 절감된다. 또한 전자기파의 영향을 받지 않는 광섬유 기반 기술로 가혹한 환경에 위치한 특수설비의 원격 안전진단에 적합하다.






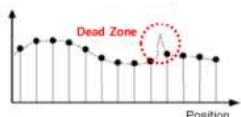
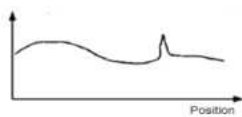
(a) 감지 설정의 기본 방식 (b) 광학 유리섬유의 다양한 산란 성분

그림 3.1 광섬유 분포 감지 센서^[27]

3.1.1.1 광섬유 센서의 분류 및 측정 방법

광섬유 센서는 Point Sensor, Multi-Point Sensor, Distributed Sensor 3가지 분류로 나뉘어진다. 첫 번째로는 Point Sensor는 광섬유 센서 소자 기반으로 단일 지점을 측정할 수 있다. 유효 측정점으로는 1 Point이며 신호 특성으로는 광신호의 세기, 파장, 위상, 주파수 등의 변화를 확인할 수 있다. 두 번째로는 Multi-Point Sensor는 고정지점 채널형 다중 지점 측정 센서이며, 유효 측정점으로는 100 Point 이하의 측정을 수행할 수 있다. 측정 거리로는 센서 간격과 수신 채널 수에 따라 달라진다. 위치 분해능 또한 센서 간격에 의존하고 신호 특성으로는 이산적인 신호 특성을 가지고 있다. 세 번째로는 Distributed Sensor는 연속구간의 동시 측정이 가능하며 1000 Point 이상의 측정이 가능하며, 측정거리로는 수 m ~ 수십 km의 대규모 구조물에도 측정이 가능하다. 위치 분해능으로는 수 mm ~ 수 m이고 신호 특성으로는 연속적인 신호의 특성을 가지고 있다.

<표 3.1> 광섬유센서 분류 및 측정법

Optical Fiber Sensors By Topology			
	Point Sensor	Point Sensor	Distributed Sensor
기반기술	✓ Interferometric Sensors ✓ FBG Sensors	✓ WDM-FBG sensors	✓ Raman/Payleigh/Brillouin Scattering sensors
특징	광섬유 센서 소자 기반 단일 지점 측정 	고정지점 채널형 다중 지점 측정 	연속구간 동시 측정 (동적위치 다중 측정) 
유효 측정점	1 Point	100 Point	1,000 Point 이상
측정 거리	-	센서 간격 및 채널 수에 의존	수 m ~ 수십 km
위치 분해능	-	센서 간격에 의존	수 mm ~ 수 m
신호 특성	광신호의 세기, 파장, 위상, 주파수 등의 변화	이산(Discrte) 신호 	연속(continuous) 신호 

3.1.1.2 기존 센서 기술과의 차별성

기존 측정 센서 기술은 데이터의 정확성이 센서노드 상태, 네트워크 상황, 센서 오작동 등에 의한 데이터 누락 및 오류 발생 가능성이 높았고, 센서노드 간 측정 시각의 정확한 동기화를 위해 부가적으로 장치/기법을 추가로 요구하였다. 또한 수백 ~ 수천 개 이상의 지정 데이터를 수집 시 제어/유지보수의 난이도가 급등하였고, 네트워크 복잡도 또한 대폭 증가하였다. 하지만 광섬유 분포 센서는 고전류, 고전압, 고온고습, 해양, 방사선 등 극한 환경에서의 데이터 수집능력에 저하 없이 높은 신뢰도와 높은 품질의 데이터를 확보 가능하였다. 또한 연속구간에 대한 데이터가 동일 광섬유 상에서 동시에 측정 및 수집되므로 특성 변화가 따로 없기에 데이터 특성이 균일하다. 기존 센서 기술로는 어려운 장거리, 대형 구조물을 시설물 전반에 걸쳐 상태감시 및 이상진단이 가능하다. 광섬유 기반으로 센서 설치의 유연성과 자유도가 높고 단일장비로 다수지점 및 채널 계측이 가능하다는 차별성을 가지고 있다.

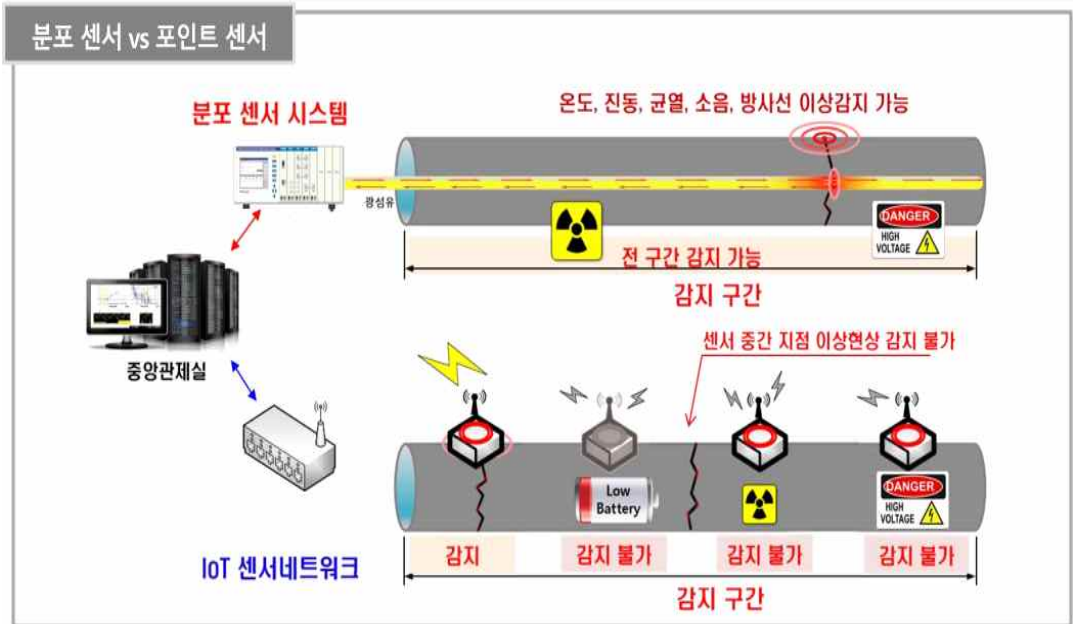


그림 3.2 광섬유 센서와 기존 센서기술과의 차별성

3.1.1.3 광섬유 센서 측정 장비

광섬유 센서 측정 장비로는 온도 분포센서 (Distributed Temperature Sensor:DT S), 음향/진동 센서 (Distributed Acoustic/Vibration Sensor:DAS/DVS) 각 장비의 상세는 표 3.2에 표기하였다.

<표 3.2> 광섬유센서 측정 장비



광섬유 온도 분포 센서
(Distributed Temperature Sensor : DTS)

최대측정거리	온도정확도	위치분해능	온도 측정범위	채널수
16 km (SMF & MMF)	$\pm 1^{\circ} \text{C}$	1 m	$-50 \sim 200^{\circ} \text{C}$	8~12ch



광섬유 분포 음향/진동 센서
(Distributed Acoustic/Vibration Sensor : DAS/DVS)

최대측정거리	위치분해능	주파수 범위	Dynamic Range	광원 선폭
50 km (SMF)	0.1~5m	DC ~ 5kHz 최대 20kHz	25 dB	16 kHz



광섬유 분포 변형 분포 센서
(Distributed Strain Sensor : DSS)

종류	최대 측정거리	위치분해능	변형률 분해능	변형률 측정범위	측정 시간
Static	1km (SMF)	10mm	$10\text{m} \epsilon$ $10 \mu \epsilon$	$\pm 3,000\text{m} \epsilon$ $\pm 5,000 \mu \epsilon$	1 ~ 10초 100Hz



광섬유 방사선 분포 센서

(Distributed Radiation Sensor : DRS)

최대 측정거리	위치 분해능	선량 분해능	누적 선량 측정범위
1 km (P, Al doped Fiber)	1 m	1 Gy	1 kGy

3.1.2 광섬유 센서 기존 연구 동향

3.1.2.1 Fiber Optic Sensor에 의한 강구조시험체의 정적/동적 기동 축변형이 계측^[39]

본 논문에서는 고층 건축물의 내진성 평가에 관한 E-defence 실험의 강구조 시험체를 대상으로, 광섬유에 의한 구조물 계측 시스템(SOFO)을 이용한 철골 기동의 정적·동적 축변형의 계측 방법과 계측 결과에 대해 기술했다. 광섬유에 의한 구조물 계측 시스템(SOFO)¹⁾은 측정 대상 구간의 변형을 측정하는 것으로 30cm 센서를 사용하여 기동 중산 부분의 축 변형을 평가한다. 우선 시험체 제작과정의 하중 증가에 따른 기동축력의 변화를 정적 계측을 통하여 검토한다. 이 때 측정 결과에 큰 영향을 미치는 온도 의존성 그리고 센서 설치 방법을 포함한 보정 방법을 자세히 기술하였다.

계속해서, 진동대 진동 시의 동적 계측에 의해 기동의 동적 축변형과 굽힘변형을 분리하여 평가할 수 있으며, 또한 구조물의 손상평가에 관계된 결과를 얻을 수 있다. 측정 대상의 시험체는 장주기 지진동에 대한 고층 건물의 기동과 손상을 시뮬레이션 하는 것이며, 다수의 스트레이게이지, 변위계, 가속도 센서 등이 설치되어 있다. 철골 프레임은 2차 부재가 적고, 건설 중의 중량의 변화가 명확하며 궁극적

1) SOFO : Surveillance d'Ouvrages par Fibers Optiques, 광섬유에 의한 구조물 모니터링 시스템

으로 상층부의 하중을 슬래브도 실려 있기 때문에 실제 높이 층 건물 건설시와 마찬가지로 기동 축력의 변화가 크고 건설 도중의 변화에 관하여 하는 모니터링의 검토에 적합하다.

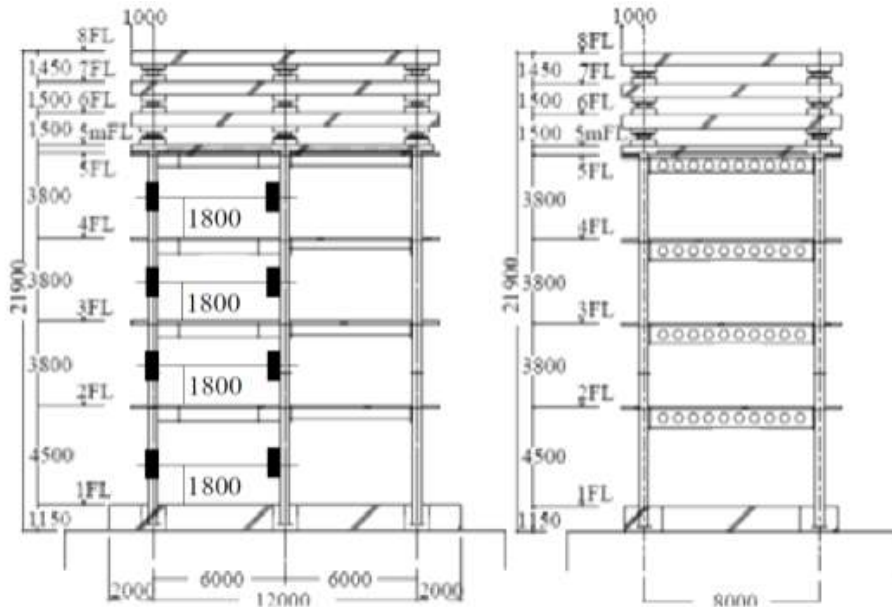


그림 3.3 시험체 개요와 광섬유 설치 위치

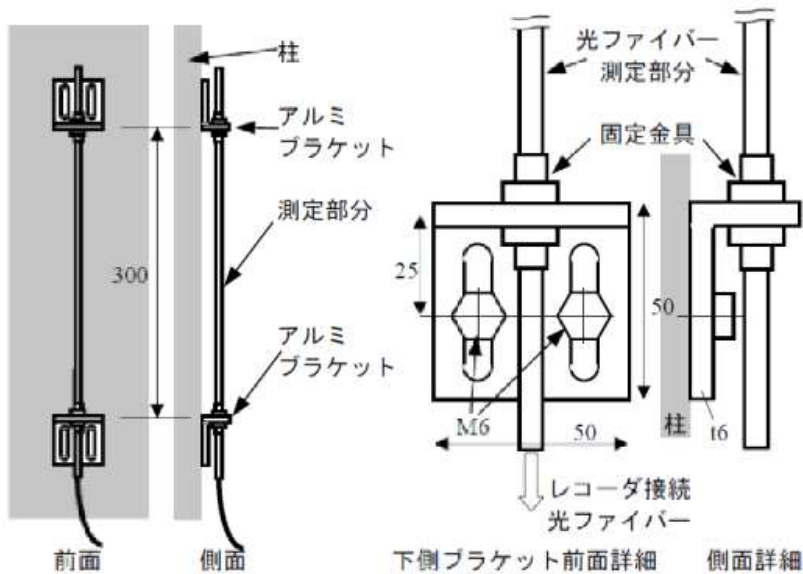


그림 3.4 광섬유 센서의 설치 현황

철골구조가 노출되어 있어 온도변화가 커서 변위계측에 의한 온도보정에 적합하며, 손상이 큰 가진실험에서는 동적계측 및 손상검출이 용이하다.

3.1.2.1.1 결과 고찰

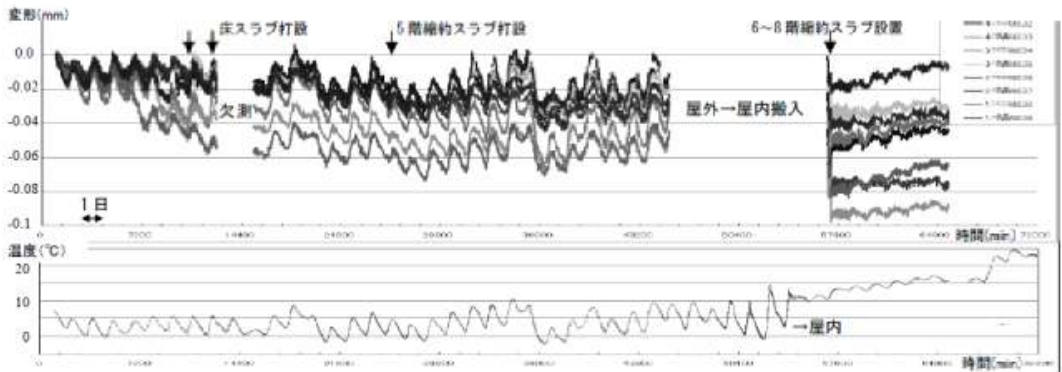
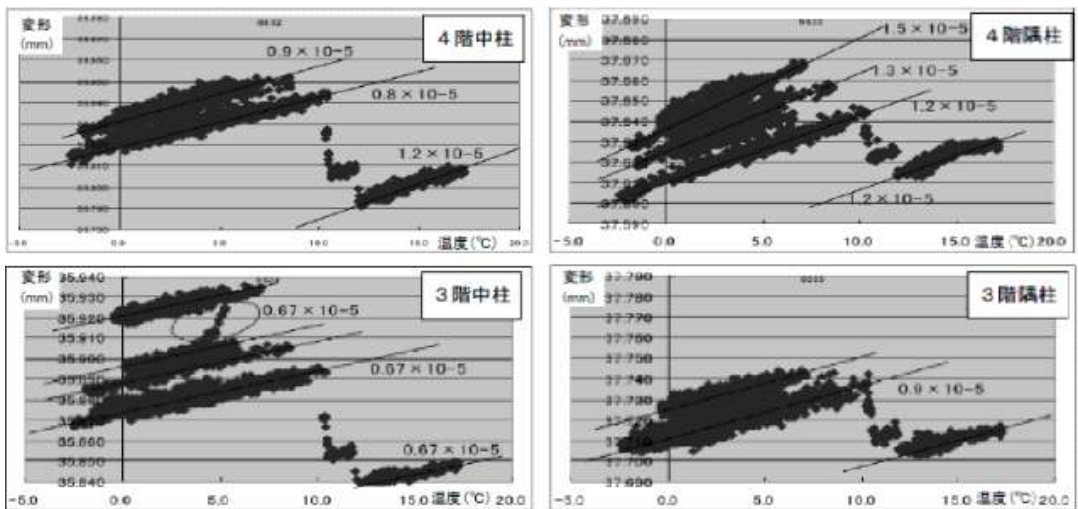


그림 3.5 광섬유 센서에 의한 기둥의 축 변형의 정적 계측값

축압축력은 시공일수가 증가할수록 기둥 축압축력에 의한 변형이 0.08mm정도 미소하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

온도 변화를 확인해보면 1층 ~ 5층까지 시공 중에 온도가 5도에서 29도까지 상승하는 것을 확인할 수 있다. 또한 1층 ~ 4층 변형이 증가할수록 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있었다.



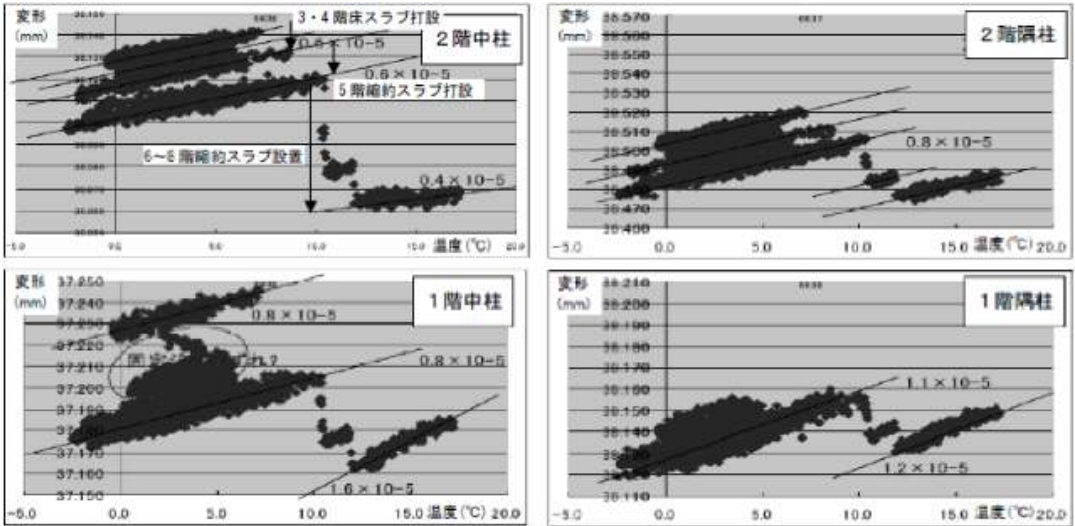


그림 3.6 각 기둥의 온도와 축변형의 관계

3.1.2.2 광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg grating)를 이용한 복합재 구조물의 변형(2004 9 한국과학기술원)^[21]

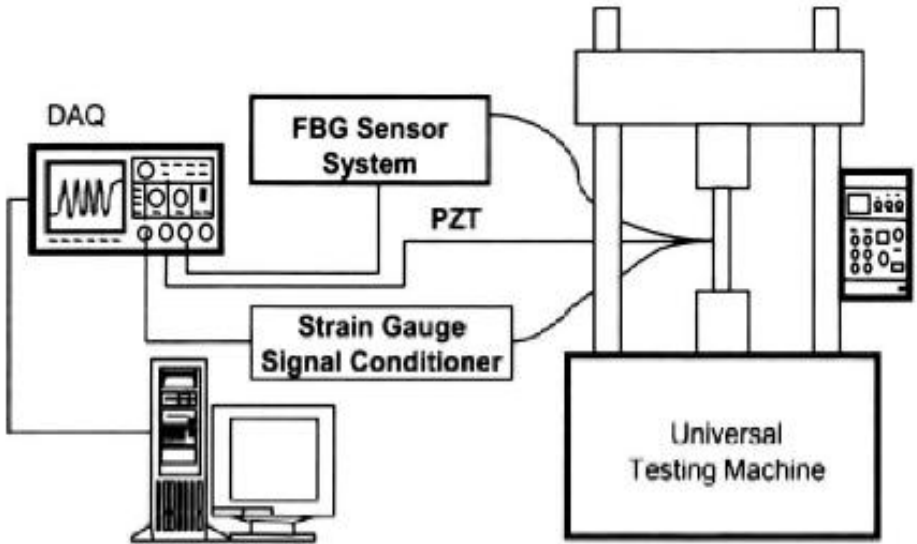


그림 3.7 변형률과 손상 신호를 동시에 측정하기 위한 테스트 설정

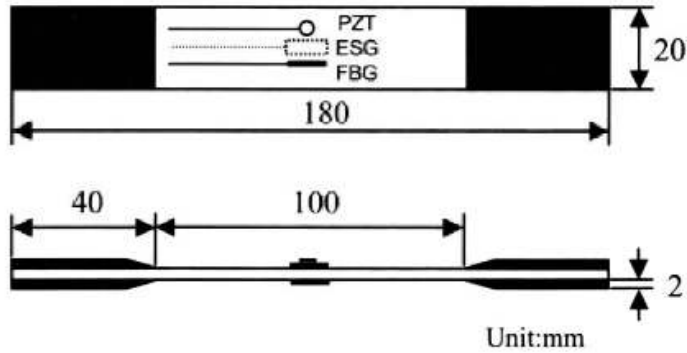


그림 3.8 인장 시험을 위한 시편 구성

변형률을 측정하기 위해서 ESG(스트레인 게이지), 파손신호를 취득하기 위해서 압전센서(PZT)와 FBG를 실험체 중앙에 부착하였다. FBG 센서 시스템은 광대역 광원, FBG센서, 이중복조기, 광섬출기로 구성된다. 이중복조기(Dual demodulator)는 TFPF(가변 패브리-페로 필터 : Tunable Fabry-Perot Filter)²⁾, 전압발생기(Voltage Generator)로 이루어진다. 광세기복조(Intensity demodulation)는 브래그 파장의 이동을 광세기(Intensity)의 변화량으로 변환시킬 수 있기 때문에 민간도 및 주파수대역 성능이 우수하나 측정범위가 좁아지는 단점이 있다.

TFPF복조기는 변형률과 같은 저주파 신호를 특정하고, 간섭계의 복조기는 충격이나 파손신호와 같은 고주파 신호를 특정한다. TFPF 복조기는 기본적으로 변형률의 다중센싱이 가능하므로, 간섭계 복조기에만 SDM을 장착하여 고주파 진동의 다중센싱이 가능하도록 한다.

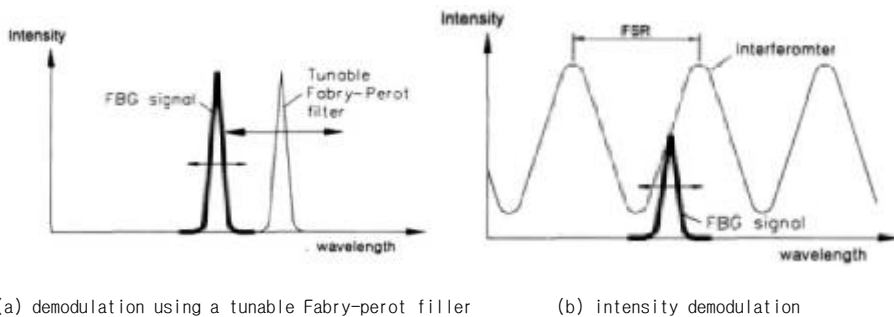


그림 3.9 Typical demodulations of FBG sensor

2) TFPF(가변 패브리-페로 필터: Tunable Fabry-Perot Filter) : 측정범위가 넓고 다중센싱이 쉽게 구현된다. 파장 주사 속도의 한계로 인하여 수kHz 이상의 동적변형률은 측정하기 어렵다.

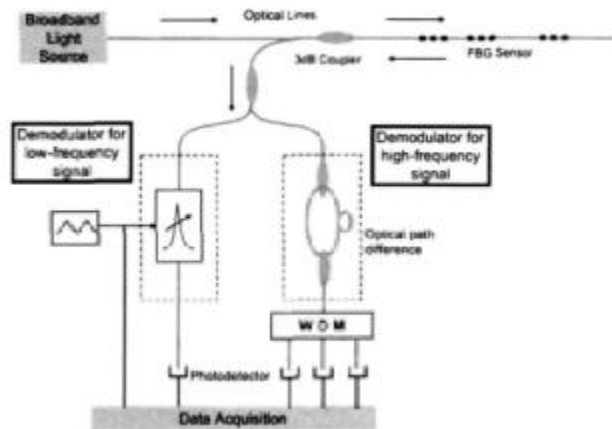


그림 3.10 Schematic diagram of FBG sensor system with a dual demodulator

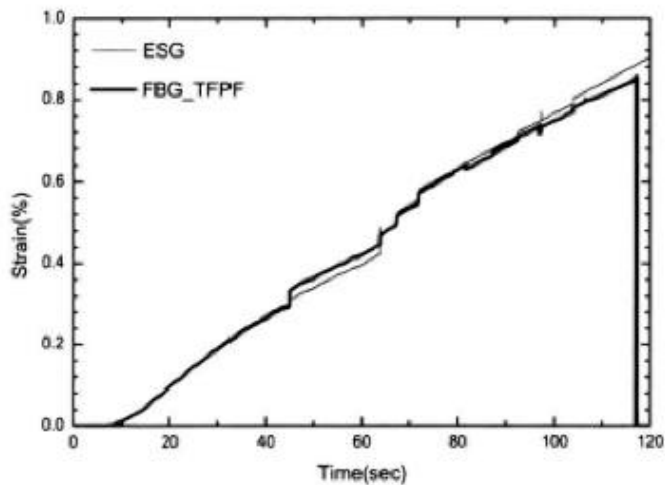


그림 3.11 Strain in $[0_2/90_8]_s$ Graphite/Epoxy specimen

실험 결과를 분석해보면 1) 그림 3.11에서 인장하중 시 ESG와 FBG센서로 측정된 변형을 선도이다.(취득 속도 200Hz) 두 센서의 측정값은 거의 일치. 2) 0.8%의 변형을에서 FBG 센서의 파손된다. 3) 그림 3.12sms 인장하중 시 FBG센서의 수동 MZI복조기의 출력신호와 반사스펙트럼의 변화를 보여주고 있다. 4) 수동 MZI복조기를 통한 FBG센서의 초기 출력 신호는 변형률이 증가함에 따라 사인함수 형태로 변하고 있으나 0.4% 이상의 변형률에서는 사인함수의 형태가 약하게 나타난다. 변형률이 증가하면서 FBG센서의 반사파장 폭이 MZI의 FSR($\sim 0.8\text{nm}$)보다 넓어져서 나타난 결과이다.

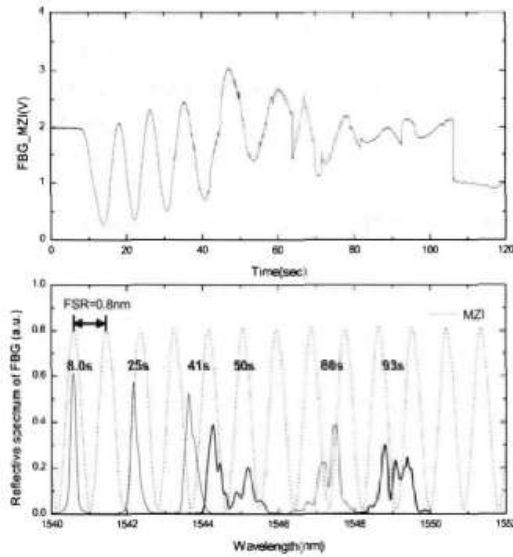


그림 3.12 Output of passive MZI demodulator
 and reflective spectrum of FBG
 sensor

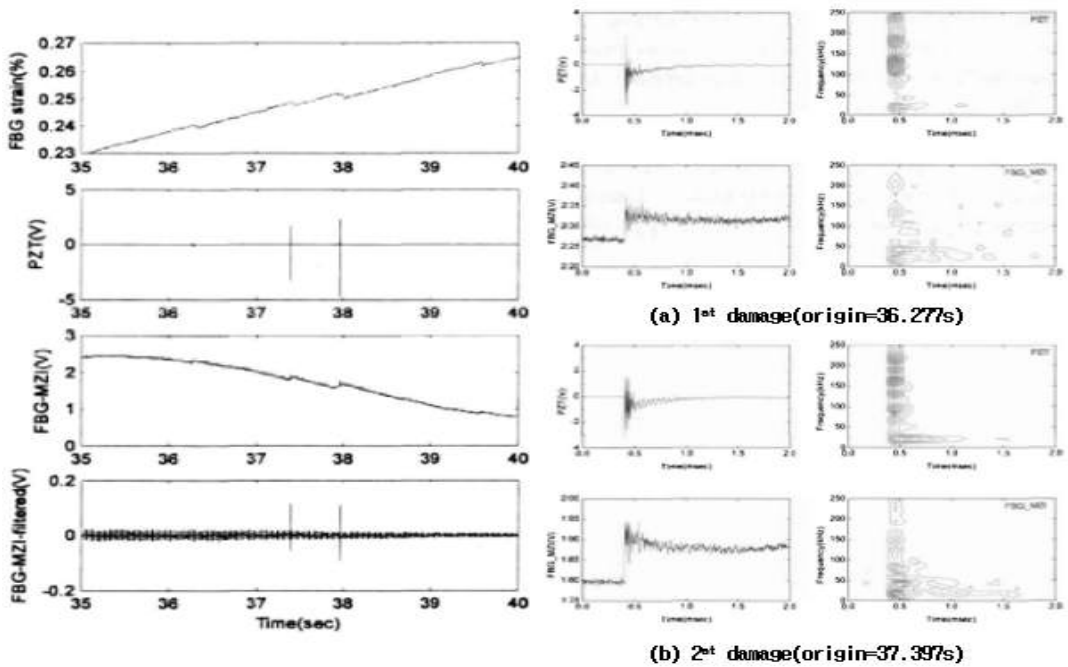


그림 3.13 35초 ~ 40초대의 PZT신호,
 스트레인 및 고주파 신호

그림 3.14 손상 신호 및 주파수 기록

그림 3.13에서 35초와 40초 사이에 측정된 신호들에서 총 5번의 파손이 발생하였다. 각각의 파손시점에서 변형률의 급격한 이동이 발견되었고, 고역여파기를 통과한 FBG센서의 파손 신호에서도 압전센서와 동일한 형태의 침두전압이 발견되었다. 그림 3.14에서 파손시점에서 압전센서 계측한 파손 신호에 대해서 STFT를 수행한 결과에서도 광범위한 주파수 성분이 검출되었다. FBG센서로 계측한 파손신호는 파손시점에서 순간적으로 평균전압의 이동이 발생하면서 진동하는 특징 때문이다. 인장하중이 증가할수록 기지 균열의 밀도가 증가하여 결국 강성을 저하시킨다고 알려져 있다. 이를 보아 강재의 파손 신호를 모니터링하면 기지 균열과 같은 파손의 누적된 발생빈도를 알 수 있으며 결국 구조물의 잔여강성을 예측할 수 있다.

3.2 강재의 비접촉식(비파괴) 손상검출 기술

현재 강구조물의 손상 탐지에는 점검자가 직접적으로 육안검사에 대다수 의존하고 있고, 정밀검사가 필요할 시 UT(Ultrasonic Testing: 초음파 검사), RT(Radiography Testing: 방사선 투과 검사) 등과 같은 비파괴 검사를 실시한다.(Kim, 2006) 하지만 현재 국내에서 시행되는 비파괴검사방법을 파이프랙과 같은 대규모 구조물의 피검사체에 적용하기에는 어려움이 있다. 실제 검사 시 육안 조사로는 강재의 미세한 균열이나 변형을 확인하기 어렵고, 현재의 비파괴검사기술 장비로는 강재의 전체적인 검사에 많은 시간이 소요된다. 이러한 검사기법으로 대규모의 강구조물 정밀 손상검출 하는것에 효율적이지 않고 구조물의 수명과 안전성을 판단하기 어렵다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 다양한 비파괴 검사 기술들이 연구되고 있다.

3.2.1 DIC (Digital Image Correlation) 기법

DIC기법은 물체 표면의 변위를 측정하기 위해 실험역학분야에서 널리 사용되고 있고, 기본 원리로는 변형 및 변형되지 않는 이미지 사이의 최대상관관계를 찾는 것이다^[22]. 디지털 이미지 상관관계 시스템으로 패턴 인식 알고리즘을 통해 이미지

내 타겟 지점의 움직임을 추적하여 변위 또는 변형을 분석하는 기술로 변형 전의 기존 이미지와 변형 후 이미지의 상관관계를 파악하여 손상검출 분석이 가능하다. 비접촉식 측정 장비로 재료 및 구조물의 변형, 변위 측정을 위해 주로 사용하였던 Strain Gauge, LVDT 변위계 등 다양한 센서를 대체하여 비접촉 방식으로 변형 또는 변위를 측정할 수 있다.

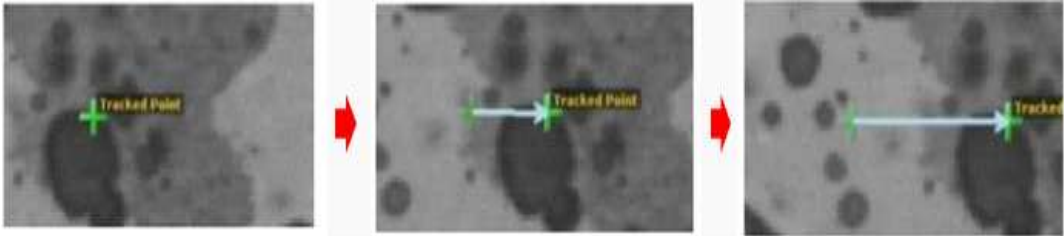


그림 3.15 DIC 이미지 상관관계 분석 기술

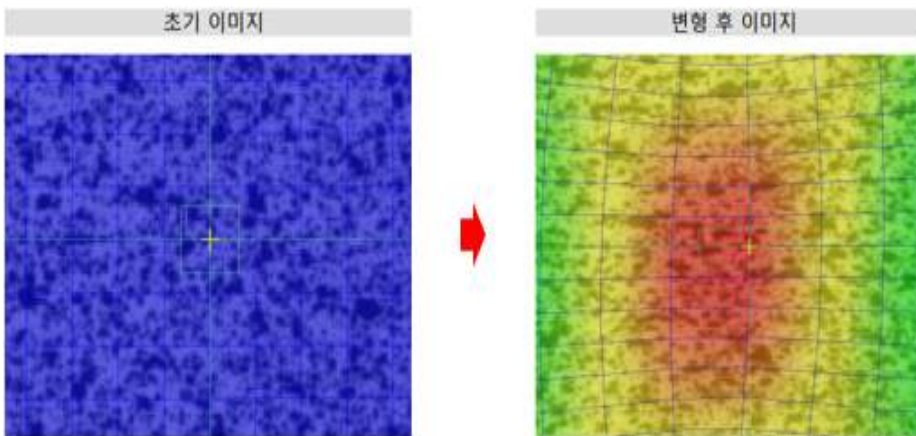


그림 3.16 DIC 변형 이미지 데이터

3.2.2 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry)

3.2.2.1 ESPI의 원리

레이저의 간섭현상을 이용하여 물체의 변위를 측정하는 기술로서 정밀 계측 및 비파괴 검사가 가능하며 화상처리 기술을 이용하여 물체의 변형 전/후의 이미지를

처리함으로써 변위량 및 응력집중현상을 가시적으로 모니터에 나타내고, 줄무늬의 간격을 계산하여 변위량 정량 검사가 가능하다. 홀로그래피 간섭법은 물체에 하중이 가해지고, 물체 표면에 변위 간섭무늬를 나타내면 간섭무늬 형상이 물체의 변형과 관계를 확인할 수 있다. 이 방식은 우수한 장점을 가지고 있지만, 사용이 폭넓게 되지 않고 있다. 그 이유는 화상처리과정(Image Processing system)과 후처리과정(Post processing)시 요구되는 화상 재현(image reconstruction)시 요구되는 화상 재현(image reconstruction)을 만족시켜야 하고 광학적 기술이 숙련되지 않은 사용자가 만족할만한 간섭무늬를 만들어내기가 쉽지 않다. 이러한 사항을 보완하기 위해 CCD(Charge Coupled Device) 카메라를 이용하여 기록된 영상을 컴퓨터를 통해 이미지 처리과정을 거쳐 간섭무늬를 생성해 표면 변위의 분석과 형상의 측정을 실시간으로 측정할 수 있는 ESPI 기법이 개발되었다.^[10]

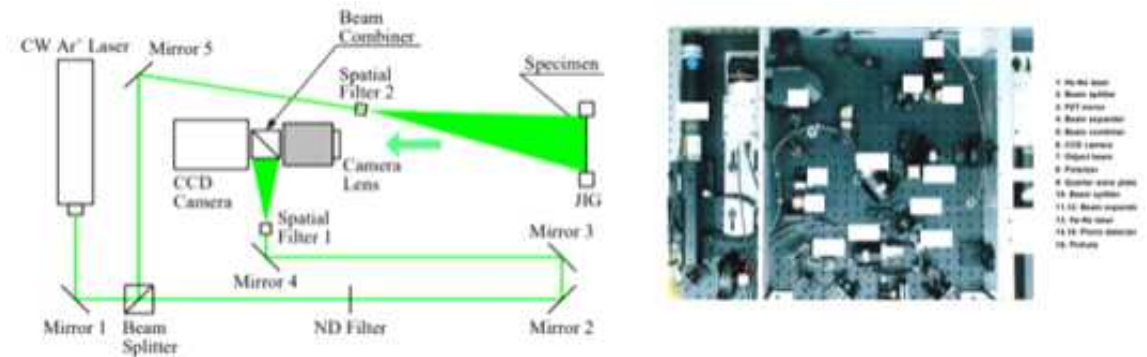


그림 3.17 ESPI간섭계 및 시제품

ESPI 기존 시제품의 특징으로는 두 대의 레이저의 위상을 동기화하고 하나의 PZT mirror로 두 Beam의 위상을 이동함으로써 위상 이동량을 정확히 제어할 수 있고, PZT Calibration이 용이하도록 제작한다. 두 대의 레이저를 사용함으로써 출력이 저하가 되지 않아 고출력 레이저를 사용한 경우와 같은 면적을 검사 가능하다. 또한 위상 이동 기법을 적용하여 고분해능 구현이 가능하다.

4. DIC 기법을 활용한 ARAMIS 검출 장비 실험

이 장에서는 3장에서 소개한 DIC (Digital Image Correlation) 기법을 활용한 ARAMIS 검출 장비를 이용하여 보-기동 접합부의 패널존 정적변위 실험을 통해 실험 결과값과 ARAMIS 측정값의 정합성을 확인하기 위해 실험을 진행하였다. 보-기동 부재는 국가산단 파이프랙 구조물과 동일한 구조물을 적용하였다.

4.1 DIC 기술을 활용한 ARAMIS 장비 측정

H형강 보-기동 접합부의 정적 반복재하실험에 대한 소성거동 측정 실험을 진행하였다. 측정 장비로는 ARAMIS Adjustable 12M이며, 소프트웨어는 ARAMIS Professional 2021, 하드웨어 제원으로는 촬영속도 최대 100Hz 카메라 해상도는 4000x3000이며 측정면적은 약 350mm x 280mm 이다.



그림 4.1 ARAMIS Adjustable 12M

실험체 규격으로는 기동 부재와 보 부재가 접합된 보-기동 접합부 부재로 실제 국가산단 파이프랙 구조물과 동일한 사이즈로 제작하였다. 실험체 상세 규격으로는 표 4.1과 그림 4.2에 나타내었다.

<표 4.1> 실험체 규격

	기둥단면	보단면	앤드플레이트			너비방향 볼트간격	연단거리	패널존 보강
			두께	높이	너비			
BC1	H-244x175 x7x11	H-244x175 x7x11	25	430	175	95	40	+
BC2	H-244x175 x7x11	H-244x175 x7x11	25	175	175	95	40	+
BC3	H-298x201 x9x14	H-244x175 x7x11	25	410	200	120	40	
BC4	H-298x201 x9x14	H-244x175 x7x11	25	415	200	120	40	

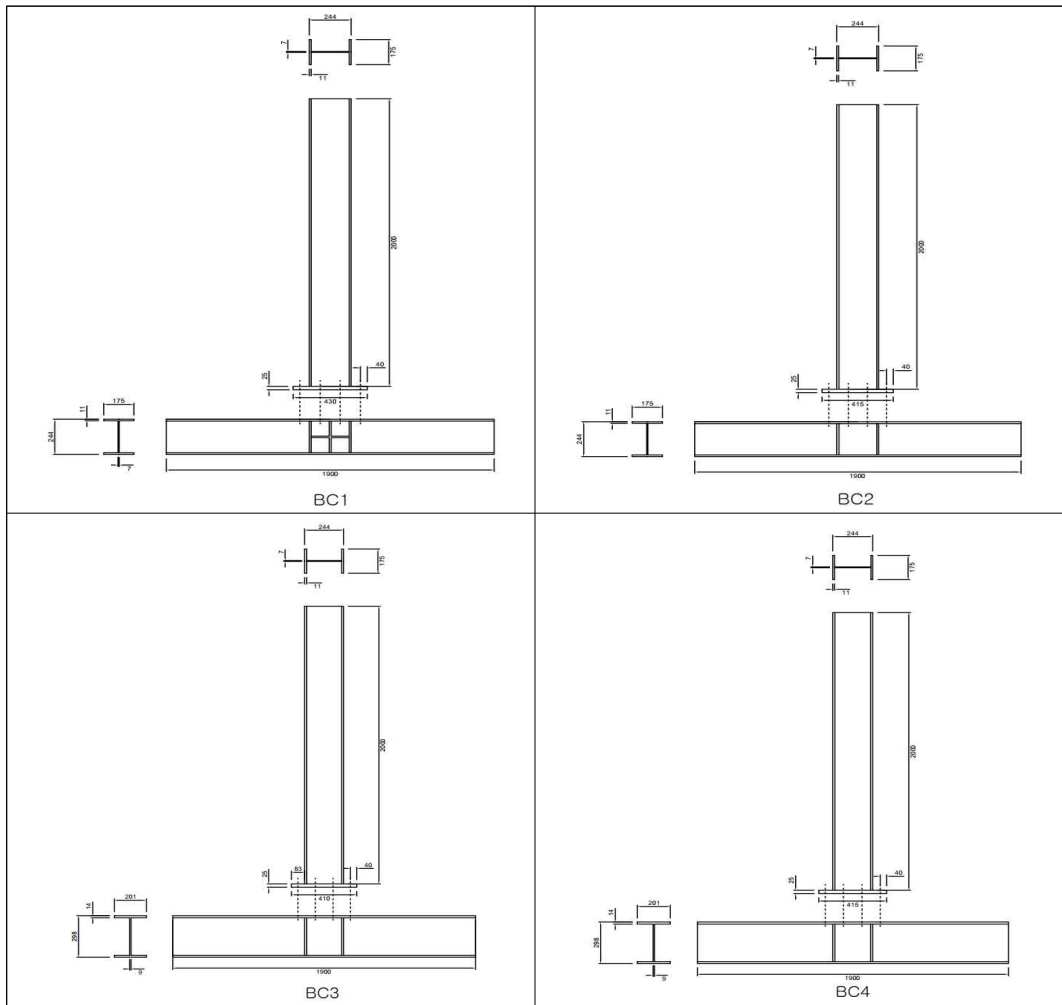


그림 4.2 실험체 형상

4.2 가력 및 측정 방법

본 실험의 측정기기의 종류와 설치 모습을 그림 4.2에 나타내었다. 가력방법은 반복에 따른 누적 손상을 반영하기 위하여 점증진폭을 갖는 반복하중을 적용하였으며, 본 가력은 AISC Seismic Provison^[25]에서 제시된 강재실험에 사용되는 프로토콜을 기본으로 사용하였다. 그림 4.3에서 가력패턴을 확인할 수 있으며, 기동 중심에서 가력 지점까지의 높이(1,822mm)에 따른 수평이동 변위각을 기준으로 0.00375rad(6.833mm), 0.005rad(9.11mm), 0.0075rad(13.67mm), 0.01rad(18.22mm), 0.015rad(27.33mm), 0.02rad(36.44mm), 0.03rad(54.66mm), 0.04rad(72.8mm), 0.05rad(91.1mm), 0.06rad(109.4mm)로 가력하였다.



그림 4.3 측정기기 종류와 설치 모습

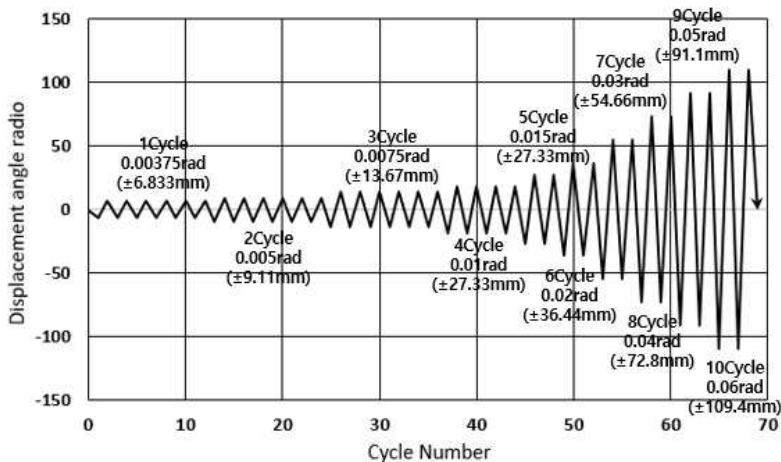


그림 4.4 점증진폭 입력파형

ARAMIS 측정 방법으로는 측정 부위에 기준점을 제작하기 위해 회색 스프레이를 도포 한 후 검정색 스프레이로 작은 눈금을 만들어 기준점을 제작한다. ARAMIS 장비는 이 검정색 눈금을 이미지 상관관계를 이용하여 초기 기준점과 변형 후 기준점을 확인하여 변형 정도를 측정할 것이다. 또한 반복하중의 각 사이클 최대점에서 촬영을 통해 최대 변위의 값을 측정한다.

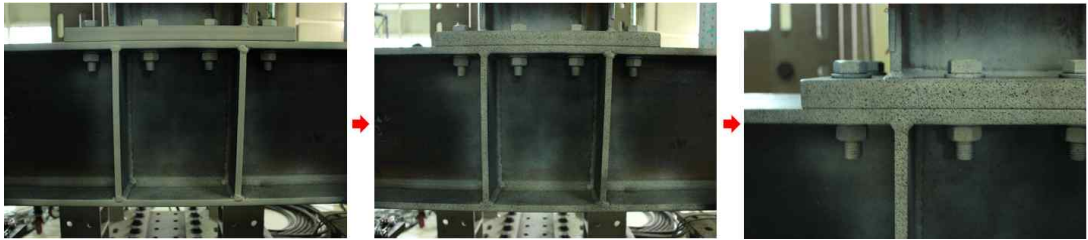


그림 4.5 ARAMIS 기준점 도포

4.3 실험결과

본 장에서는 DIC (Digital Image Correlation) 기법을 활용한 강재의 손상검출 기술을 확인하고자 반복가력 실험을 실시하였다. 실험체에서 측정된 LVDT 변형률 값과 ARAMIS 데이터의 변형률을 상호 비교하여 정확도를 확인하였다. 또한 DIC 측정 기법의 장점인 부재의 변형을 이미지화 할 수 있다는 것도 각 반복가력 Step에 따라 확인가능하였다.

4.3.1 변위 측정 결과

BC1 부재의 ARAMIS 변위 측정 데이터 값과 실험 변위 데이터 값을 비교하였다. 첫 번째로 실험 데이터 측정 위치는 기동 하부 패널존 플랜지 좌, 우측 두 개가 설치되었고, ARAMIS 데이터 측정은 기동 하부 패널존 플랜지 양측 동일하게 측정하여 비교하여 ARAMIS 데이터의 정확도를 판별하고, 두 번째로 강재의 국부적인 부분의 손상을 확인하기 위해 ARAMIS 데이터 상에서 확인 가능한 보의 앤드플레이트의 변위와 기동의 플랜지의 변위를 측정하여 국부적인 부위에 스트레인게이지 혹은 변위계를 설치하지 않아도 ARAMIS 데이터 상에서 확인 가능한지 확인하였다.

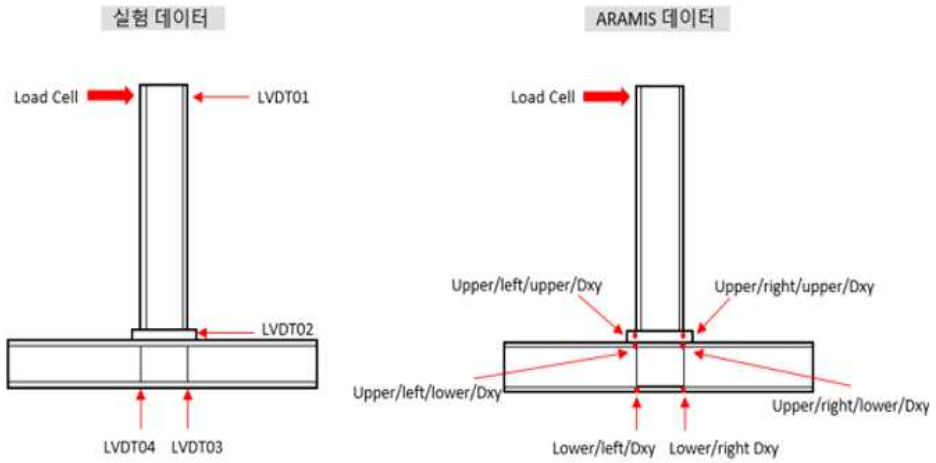


그림 4.6 실험데이터 측정 위치

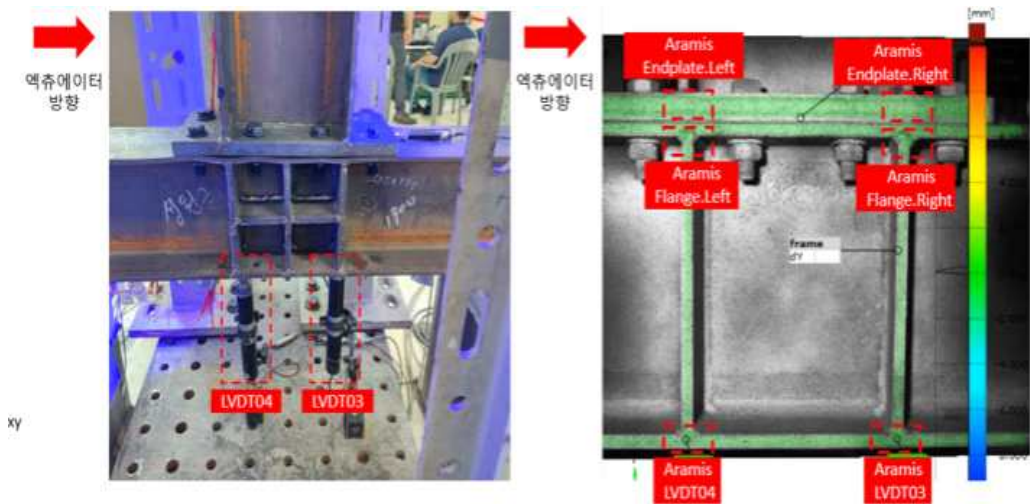
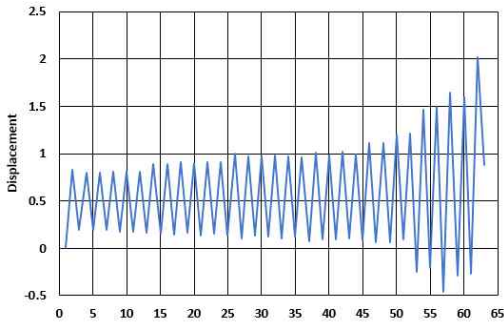
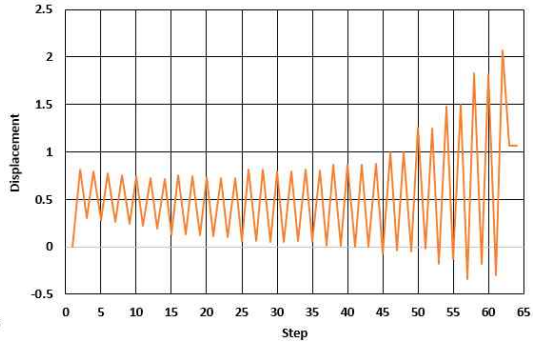


그림 4.7 부재 ARAMIS 데이터 측정 위치

첫 번째로는 좌측 LVDT04번과 ARAMIS04번 위치 부분의 변위를 비교하였고, 결과값으로는 그림 4.7과 같이 0.2 ~ 0.3mm 정도의 미세한 차이로 일치하는 것을 측정할 수 있었다.



a) 실험 변위 데이터



b) ARAMIS 변위 데이터

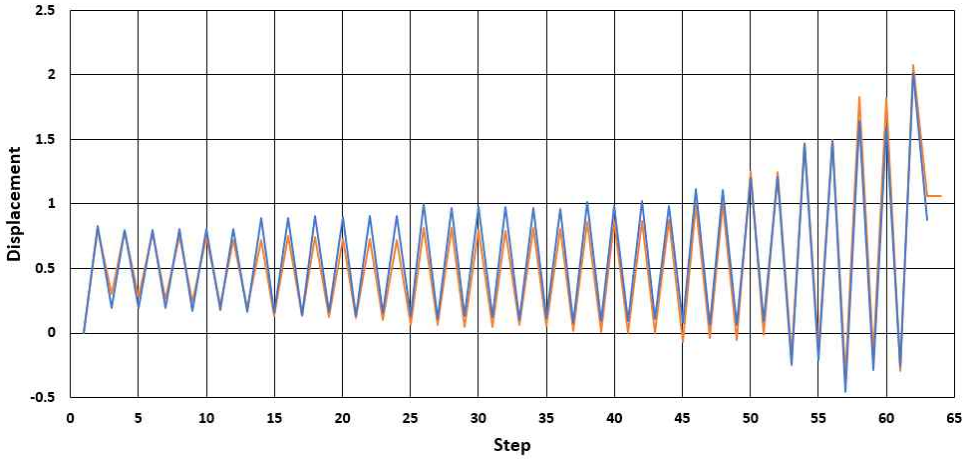
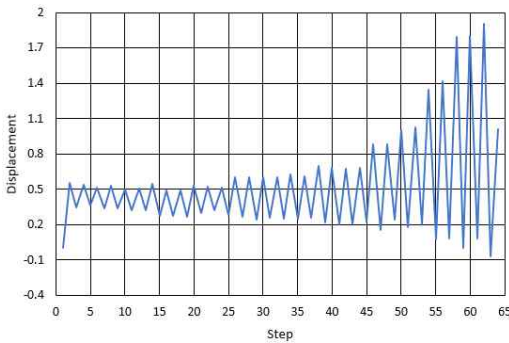
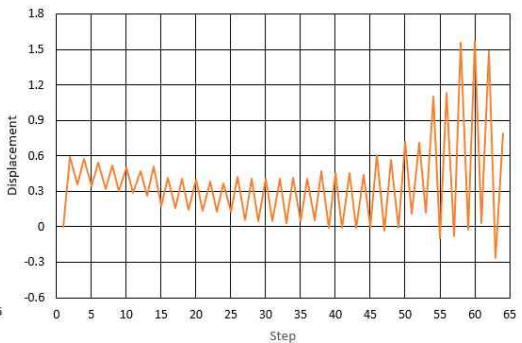


그림 4.8 4번 위치 실험데이터, ARAMIS데이터 비교분석 관계

두 번째로는 우측 LVDT03번 변형률계 위치와 ARAMIS03번 위치 부분의 변위값을 비교하였고, 결과값으로는 첫 번째 측정 위치와 동일하게 0.2 ~ 0.3mm정도로 미세한 차이로 일치하는 것을 확인할 수가 있었다.



a) 실험 변위 데이터



b) ARAMIS 변위 데이터

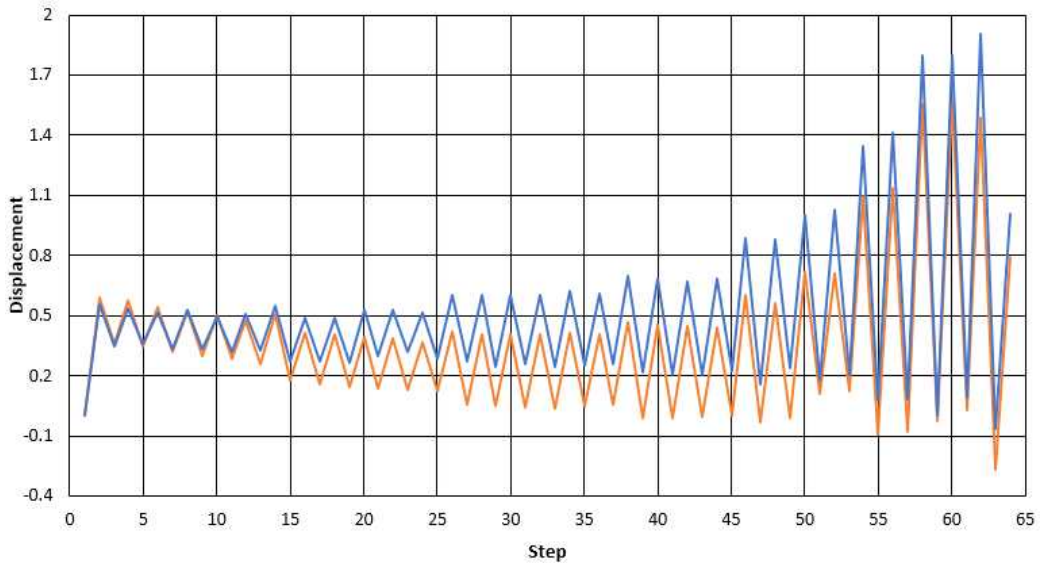


그림 4.9 3번 위치 실험데이터, ARAMIS데이터 비교분석 관계

그림 4.7과 4.8을 확인한 결과 실험데이터와 ARAMIS데이터는 0.1~0.3mm 정도의 미세한 차이를 보이며 높은 정확도를 확인할 수 있었고, ARAMIS측정 정확도가 높은 것을 확인하였다. 다음으로 강재의 국부적인 손상을 손쉽게 검출하기 위하여 부재의 보의 앤드플레이트와 기둥의 플랜지에 대한 변위 측정을 진행하였고 측정 위치로는 그림 4.9의 좌측 앤드플레이트와 플랜지, 우측 앤드플레이트와 플랜지를 확인하였다.

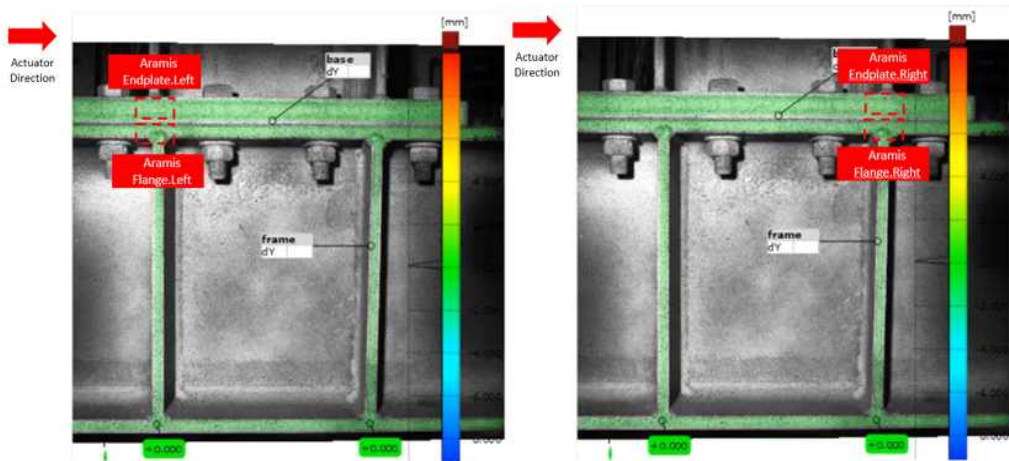


그림 4.10 국부적인 변위 데이터 측정 위치

좌측 상부 앤드플레이트와 상부 기동 패널존의 플랜지 부분의 ARAMIS 데이터 값을 확인하였다. 두 데이터를 비교해본 결과 앤드플레이트가 패널존 변위보다 크다는 것을 확인할 수 있었다.

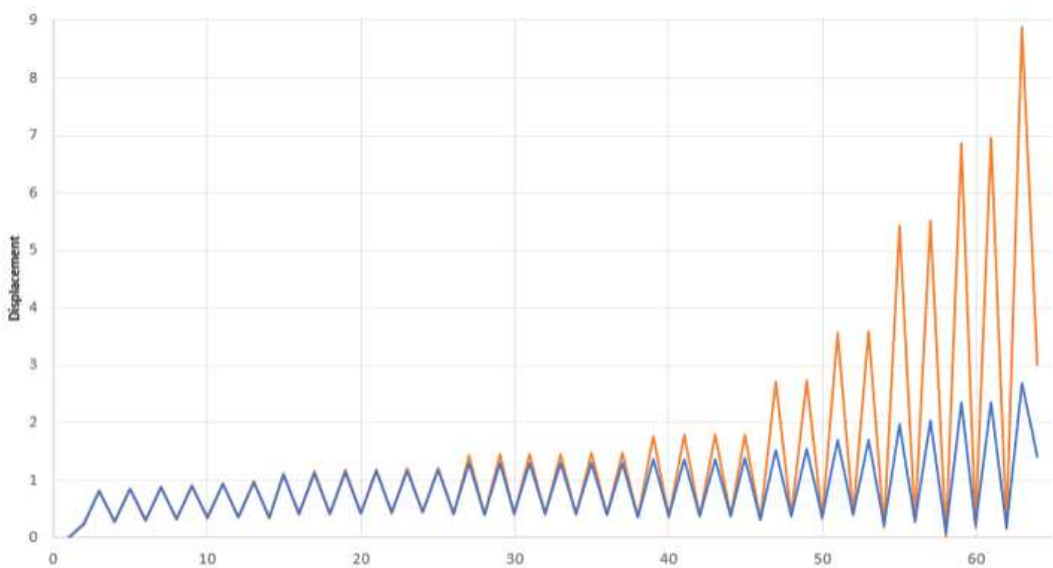
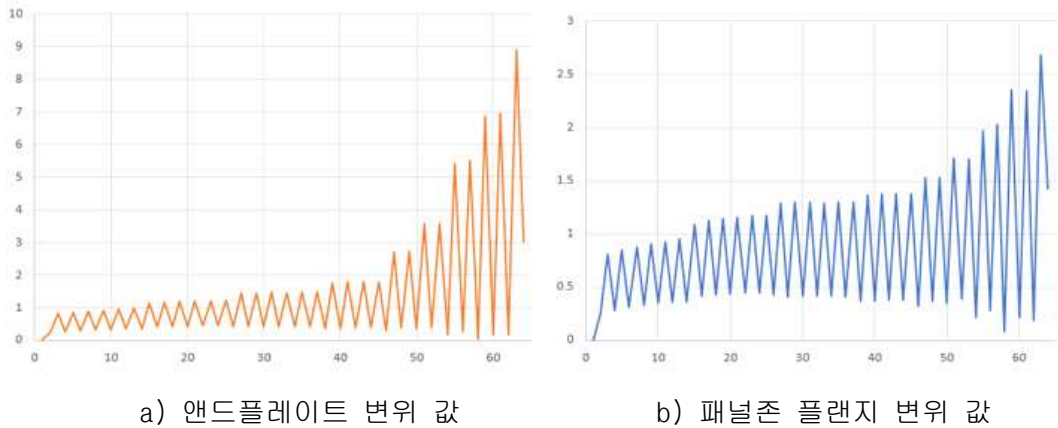


그림 4.11 앤드플레이트, 패널존 플랜지 변위 비교 값

DIC기법의 특징으로 이미지 상호관계를 통한 손상 검출이기에 강재의 손상 변위를 육안으로 확인 가능하게 이미지화 할 수 있다 그리하여 각 9 step의 반복가력에서 4개의 변위 구간을 이미지화 하여 그림 4.11에 나타내었다. 각 변위 Cycle에서 부재의 변형 이미지와 변형 구간의 색 변화를 확인할 수 있다.

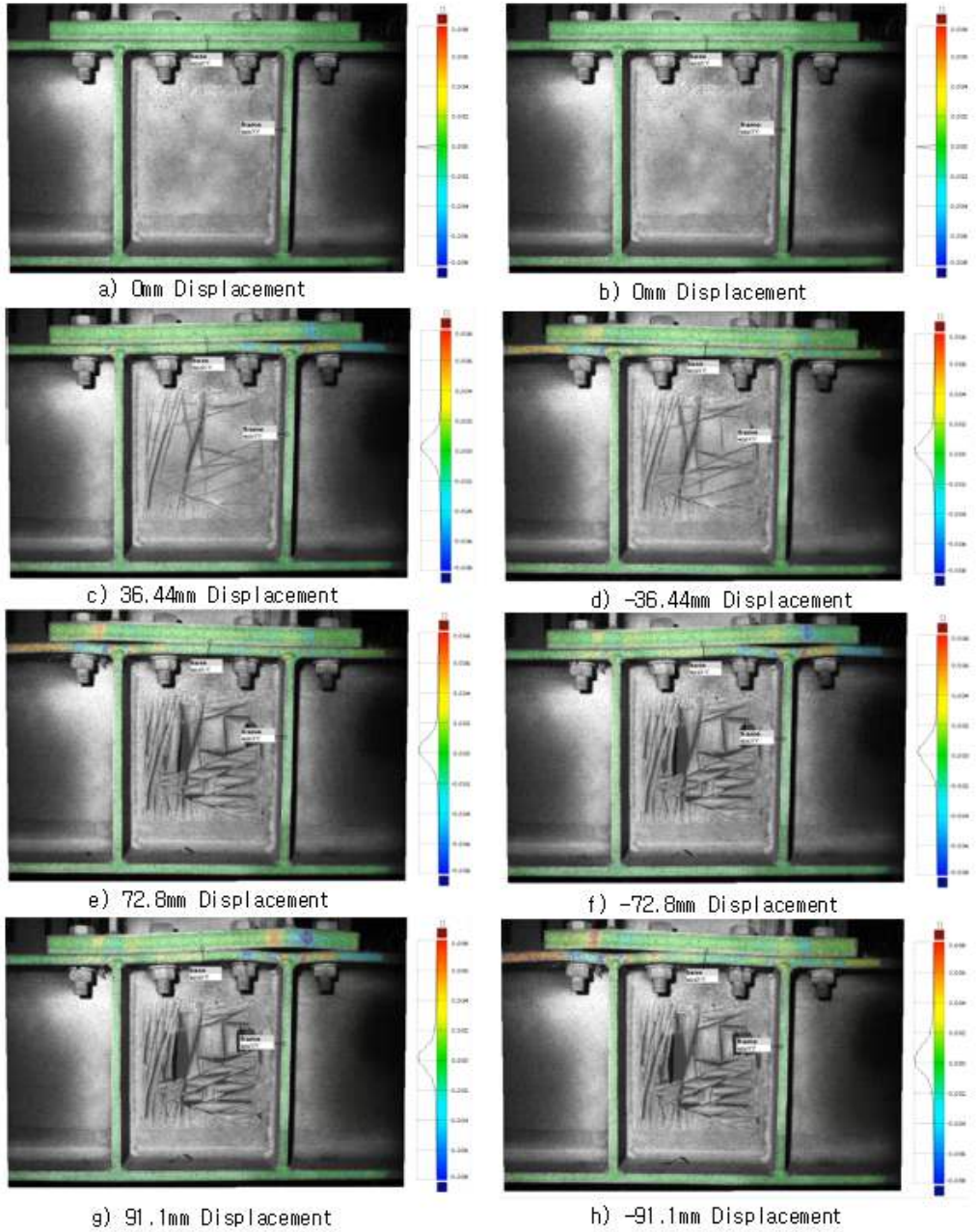
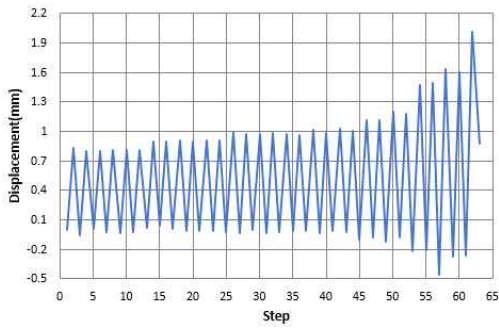
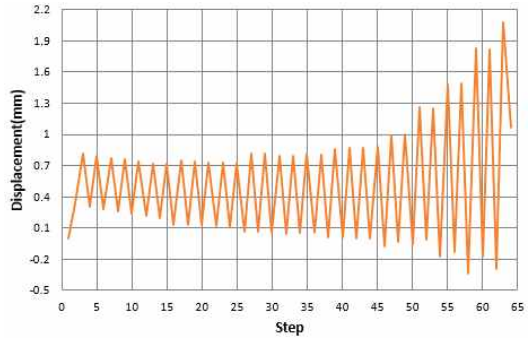


그림 4.12 반복가력 Step에 따른 변형 이미지화



a) 실험 변위 데이터



b) ARAMIS 변위 데이터

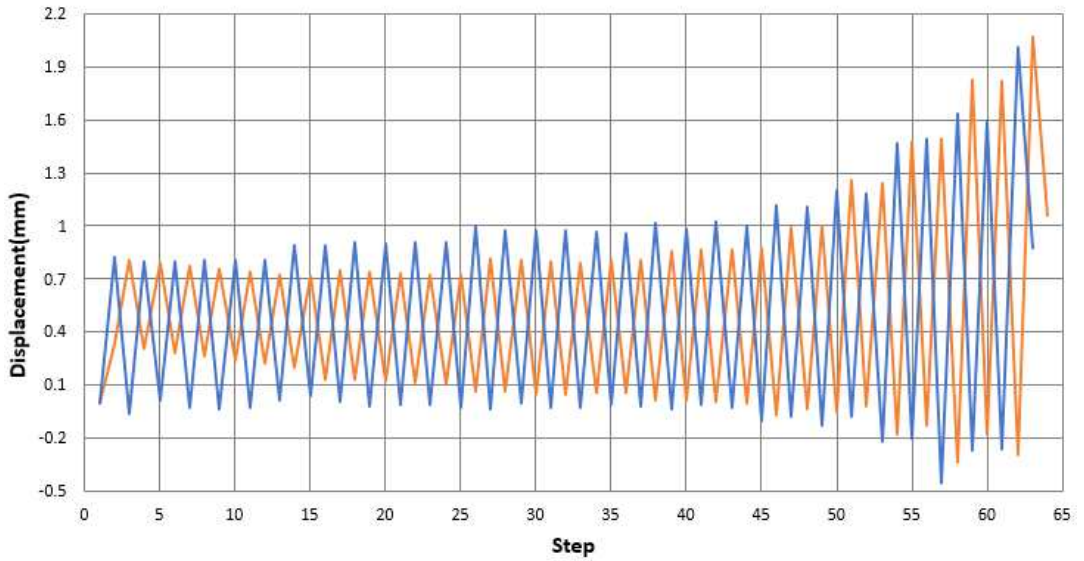
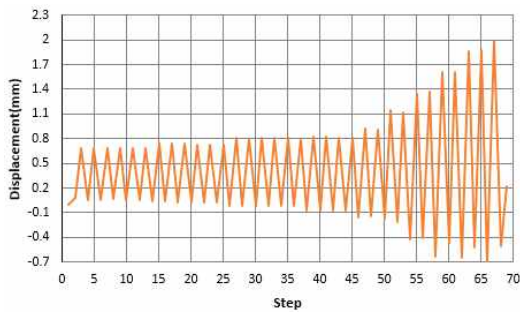
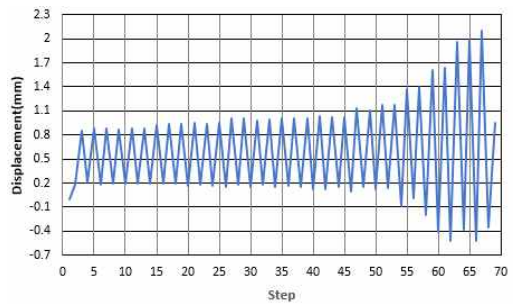


그림 4.13 BC2 4번 위치 실험데이터, ARAMIS데이터 비교분석 관계



a) 실험 변위 데이터



b) ARAMIS 변위 데이터

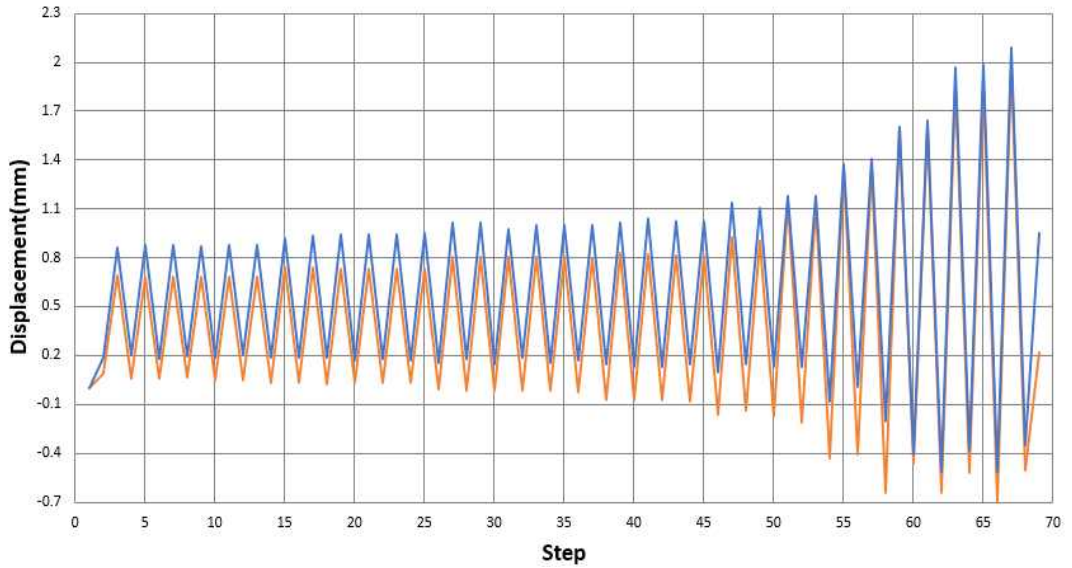
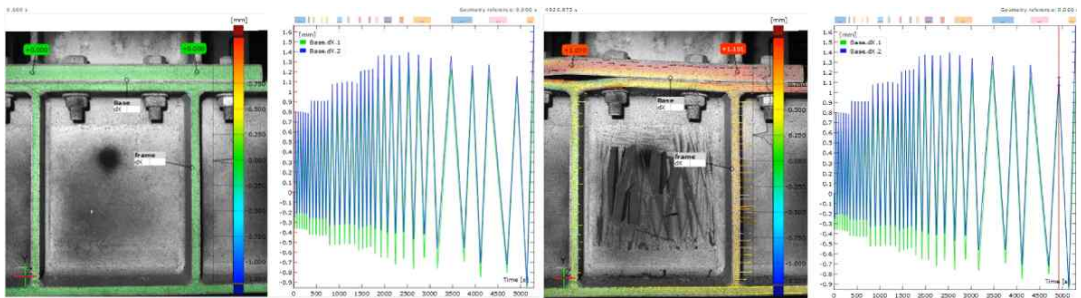


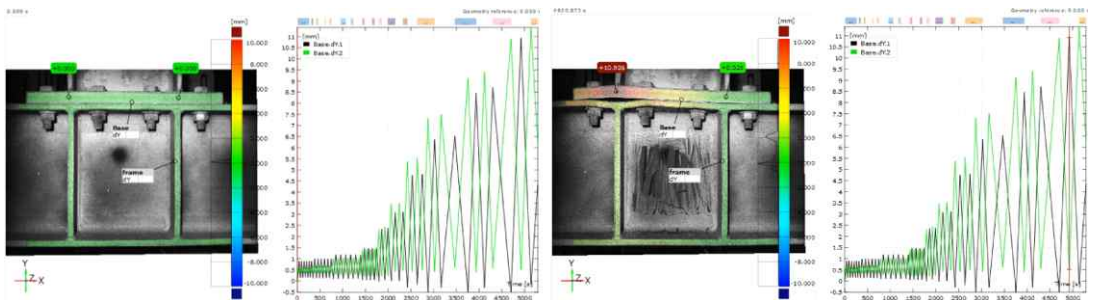
그림 4.14 BC2 3번 위치 실험데이터, ARAMIS데이터 비교분석 관계



a) Intial displacement image

b) Last displacement image

그림 4.15 BC2-Dx방향 앤드플레이트 상부 2점 변위이미지 측정



a) Intial displacement image

b) Last displacement image

그림 4.16 BC2-Dy방향 앤드플레이트 상부 2점 변위이미지 측정

DIC기법을 활용한 ARAMIS장비 측정 결과 높은 정밀도의 데이터 측정도를 확인할 수 있었다. 부재의 변위검출, 변위 이미지화 등 강재의 정밀 손상검출에 높은 정확도를 보였지만, 현장에서 사용 가능한 강재 손상검출 장비로 사용하기 위해서는 현장 사용성 평가가 필요로 하다. DIC기법 특성상 측정에 외부환경에 대해 매우 민감하기 때문에 현장 적용성을 높이기 위한 현장 조건 파악 및 연장 설치 정밀도를 높이기 위한 추가 연구가 요구한다.

5. 압연 강재의 경도 · 소성 변형률 상관관계 검사법

이 장에서는 강재의 진동평가 및 손상검출을 위한 압연 H형강으로 제작된 스틸 패널의 단조가력실험을 통해 주기적으로 변형된 부재의 경도와 소성 변형률 요구 사이의 관계를 확립하고 일반적으로 사용되는 강재의 손상검출 시스템을 평가하기 위한 포괄적인 검사법을 제시한다.

5.1 강재 경도 · 소성 변형률에 관한 연구

5.1.1 경도 · 소성 변형률 관계

금속의 소성변형을 측정하는 비파괴적인 방법인 경도측정은 1900년대 초반부터 사용되어 왔습니다. 이러한 경도측정은 초기 단계에서는 측정 재료를 1mm 이상의 깊이로 압입하여 측정하기 때문에 비파괴 검사 방법으로는 구분할 수 없음을 확인 하였습니다. 또한 장비의 무게와 크기가 매우 컸기에 현장에서 활용하기에는 어려움이 있었습니다. 이러한 문제점은 탄성반발을 이용한 휴대용 경도 측정기의 개발로 휴대성 문제가 해결이 되었습니다.^[17] 본 연구에서는 열간압연H형강 스틸패널의 소성 변형률을 측정하기 위해 휴대용 경도 측정기(모델 JH180)를사용하였습니다.



그림 5.1 Portable Hardness Tester

5.2 강재 경도 · 소성 변형을 관계의 실험적 연구

5.2.1 경도 · 소성 변형을 관계

5.2.1.1 실험목적 및 구성

본 장에서는 스틸패널 강재의 변형률에 따른 강도 측정을 통해서 강재의 경도 소성 변형을 관계에 대해 확인하였다. 강재로는 SS400으로 건축 구조용 강재 중에서 비교적 항복응력과 항복비가 낮고, 자재 수급이 용이하다. 반발 경도 측정으로는 단조가력을 진행하면서 5mm마다 측정을 수행하여 최대 변위 30mm에서 실험을 완료하였다. 총 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mm로 6번의 변위에서의 반발경도를 측정할 수 있었다.

5.2.1.2 실험체 상세 및 일람

실험체는 국가산단 파이프랙 강재와 동일한 압연 H형강을 사용하였으며, 강재 단면 규격으로는 H-244x175x7x11의 강재를 사용하였다. 에너지 흡수 구간인 패널부의 크기의 폭은 244mm 높이는 300mm이며, 패널부 상하에 20mm 두께를 갖는 앤드플레이트가 필렛용접으로 구성된다.

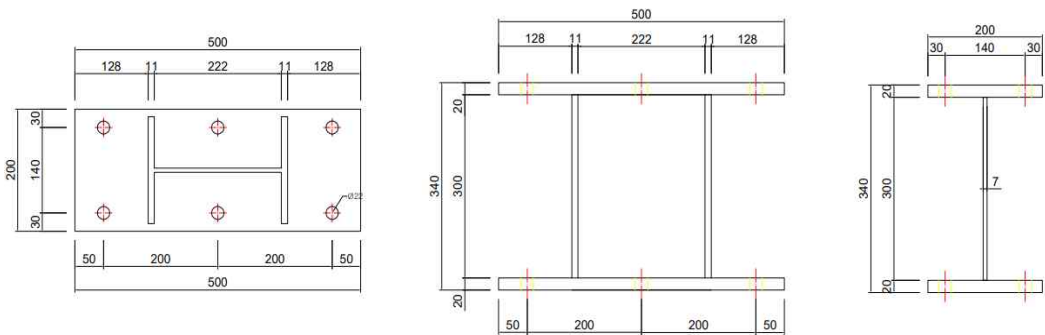


그림 5.2 강재패널의 실험체 형상

5.2.2 실험장치 및 계측

5.2.2.1 실험체 상세 및 일람

실험은 조선대학교 건설계열 공용 구조실험동에서 수행되었으며, 실험체 설치상황은 그림 4.3과 4.4와 같다. 가력에는 $\pm 500\text{kN}$ 용량의 $\pm 200\text{mm}$ 스트로크(Stroke)를 갖는 유압식 액추에이터를 사용하였다. 하중은 강체거동을 하도록 제작된 가력보(Loading Beam)에 의해 패널로 전달된다. 실험체 상단부에는 면외변형을 억제하기 위해 횡변형 구속기구(Lateral Restraint)를 설치하였다.



그림 5.3 실험전경

5.2.2.2 가력 및 계측 계획

본 실험의 사용된 측정기기의 종류와 설치 모습을 그림 5.4에 나타내었다.

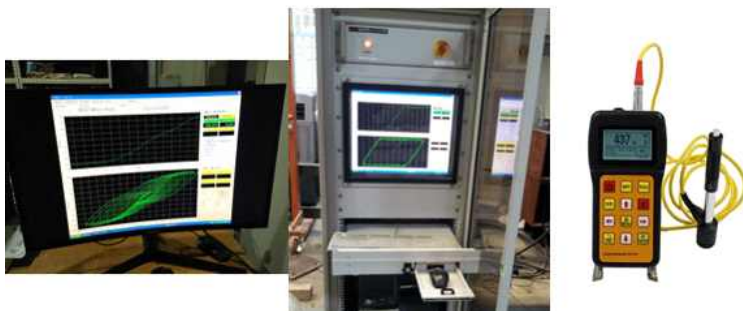


그림 5.4 측정기기 사진

가력방법은 한 방향에 따른 누적 손상을 반영하기 위하여 단조가력재하 실험을 적용하였으며, 부재 경간 300mm에 따른 0.1rad까지 가력을 사용하였다. 그림 5.5에서 가력패턴을 확인할 수 있다.

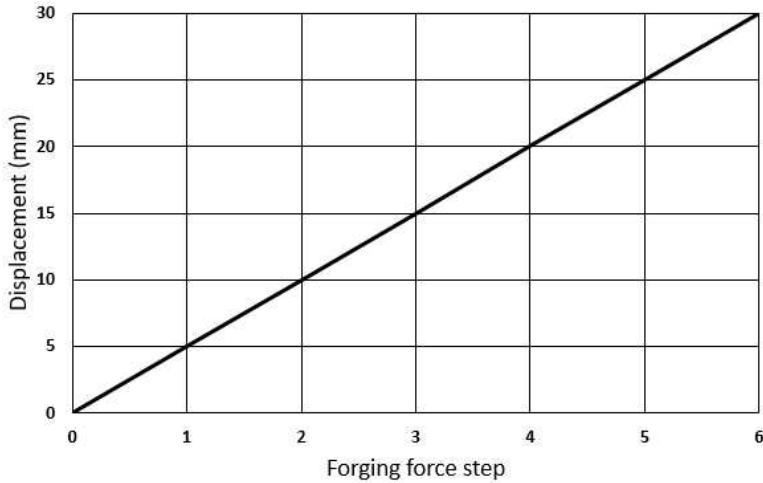


그림 5.5 단조가력 입력 변위

5.2.2.3 경도 시험편 위치

변형률에 따른 강재 경도 상관 관계 측정을 위해서는 부재의 측정 위치가 길어야 한다. 스틸 패널의 Web 부분을 측정하기 위해 가로 방향은 A, B, C, D, E로 다섯 개로 구분하였고 세로 방향으로는 위에서부터 Top1, Top2, Mid, Bot2, Bot1으로 구분하여 측정하였다. 본 실험에서 측정 위치 모습을 그림 5.6에 나타내었다.

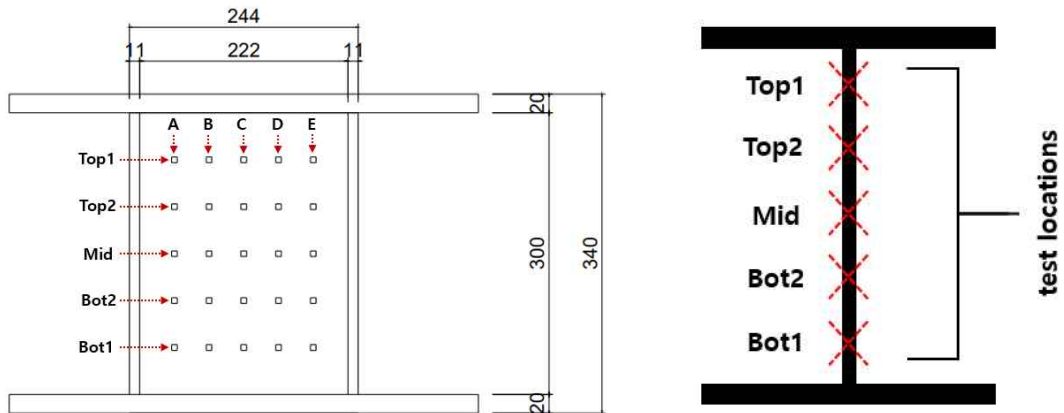


그림 5.6 스틸 패널 경도 측정 위치

5.2.2.4 표면 거칠기 효과

본 연구에서는 정확한 경도 측정 시험 결과를 얻기 위해서 시험 시편의 표면 거칠기에 따른 경도 측정 결과를 확인하였다. 경도 측정기 원리가 추나 해머를 일정한 높이에서 시험면에 낙하시켜 튀어 오른 높이에 따라 경도를 측정하는 것으로 표면에 이물질이나 표면 도포가 없는 상태에서 측정을 수행해야 정밀한 데이터를 얻을 수 있다. 표면 처리는 글라인더를 사용하여 진행하였고, 글라인더 사용 후 표면은 알코올 거즈를 이용하여 처리하였다. 표면 처리 전과 후의 경도 측정 결과에 대해 그림 5.7에 나타내었다. Top1과 Bot1에서는 17.73과 17.86이 측정되었고, Top2와 Bot2에서는 30.4와 36.4가 측정되었으며, Mid에서는 30.33이 측정되었다. 압연 H형강 특성상 대칭되는 형식의 경도값을 확인할 수 있었다.



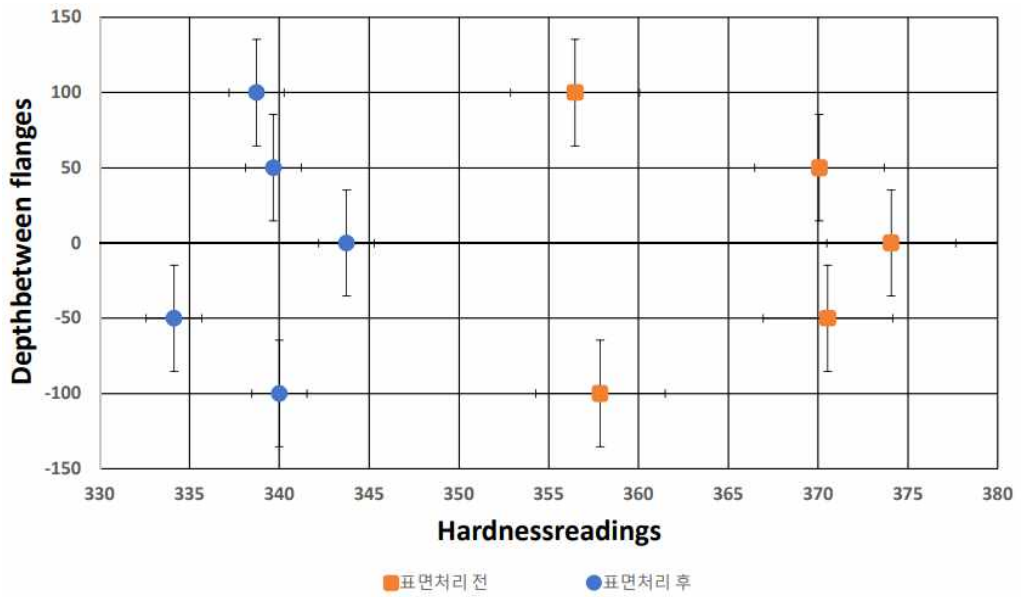
a) 표면 처리 전

b) 표면 처리 후

그림 5.7 스틸 패널 표면 처리 전/후 형상

표면X / 평균값			차이값	표면O / 평균값		
위치	거리(mm)	경도		위치	거리(mm)	경도
Top1	100	356.467	17.734	Top1	100	338.733
Top2	50	370.067	30.4	Top2	50	339.667
Mid	0	374.067	30.4	Mid	0	343.667
Bot2	-50	370.533	36.4	Bot2	-50	334.133
Bot1	-100	357.867	17.867	Bot1	-100	340

a) 표면처리 전/후 경도 측정값



b) 표면 처리 전/후 경도 측정 그래프

그림 5.8 스틸 패널 표면 처리 전/후 경도 측정값

5.3 실험 결과

5.3.1 하중-변위 곡선

단조 실험 결과 실험체에 대한 하중-변위 이력곡선을 확인할 수 있었고, 이력 곡선 형상에 경도 측정시점은 ↓로 표시하였고, 항복점은 ▼로 표시하였다.

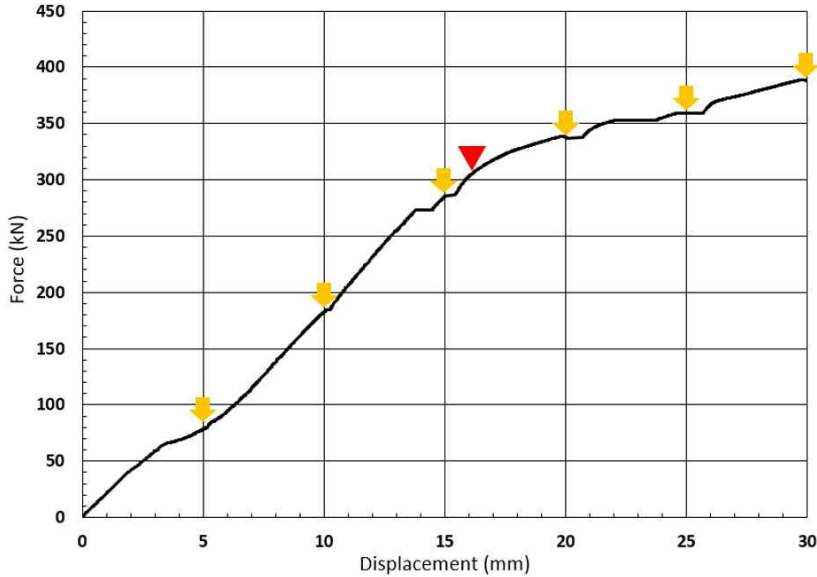


그림 5.9 하중-변위 이력곡선

5.3.2 소성 변형률에 따른 경도 상관관계

본 연구에서는 소성변형에 따른 경도 상관관계를 분석하고자 단조가력 실험을 실시하였다. 각 변형 구간의 강재의 반발 경도를 측정하였고, 측정 결과 소성 변형률 요구가 증가함에 따라 반발경도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Web 중앙에서 시험전 경도 측정기로 측정한 값은 343이었다. 5mm 변형률 시편의 평균 경도 값은 345, 10mm 변형률 시편의 경우 347.3, 15mm 변형률 시편의 경우 348.6mm, 20mm 변형률 시편의 경우 358, 25mm 변형률 시편의 경우 364.6, 30mm 변형률 시편의 경우 373.4mm의 결과를 확인할 수 있었다. 변형률이 증가할수록 경도 값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

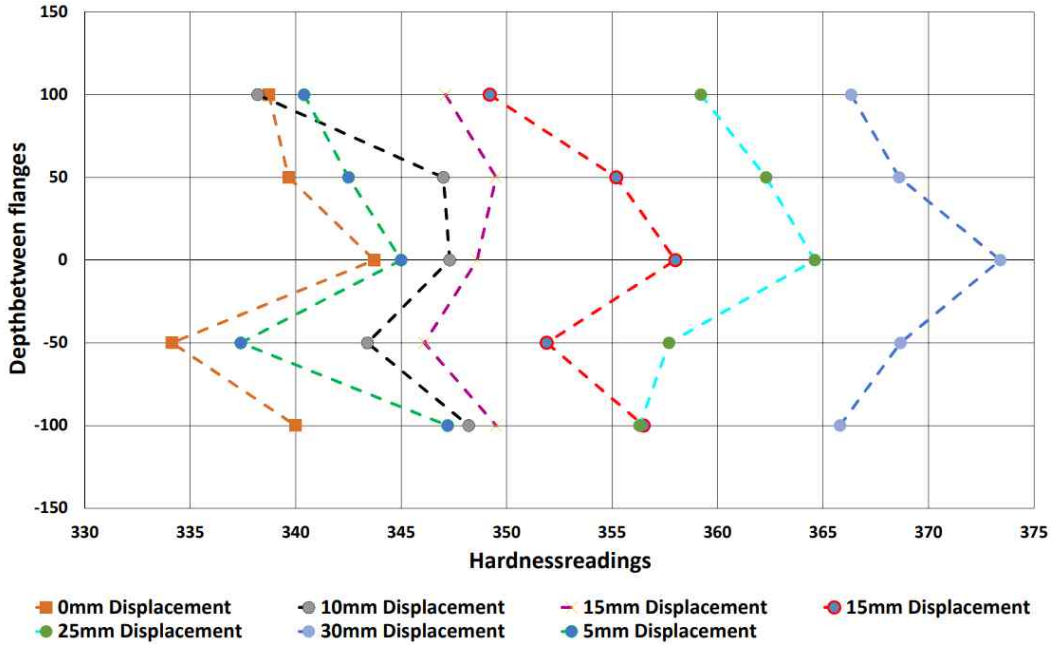


그림 5.10 경도-소성변형을 상관 관계

5.3.3 실험체 변형형상

그림 5.11는 스틸패널 실험체의 30mm 변형 형태이다. 패널 존 실험체의 경우 실험이 진행됨에 따라 우측 상단부와 좌측 하단부에 Tention Filed형상의 면외좌굴이 발생하였다, 스틸패널 실험체의 경우 항복 이하로 변형이 진행되지 않았기에 눈에 보이게 면외좌굴이 많이 진행되지는 않았지만, 실험체의 변형이 진행되어 항복점 이상에 도달했다는 것을 확인할 수 있었다.

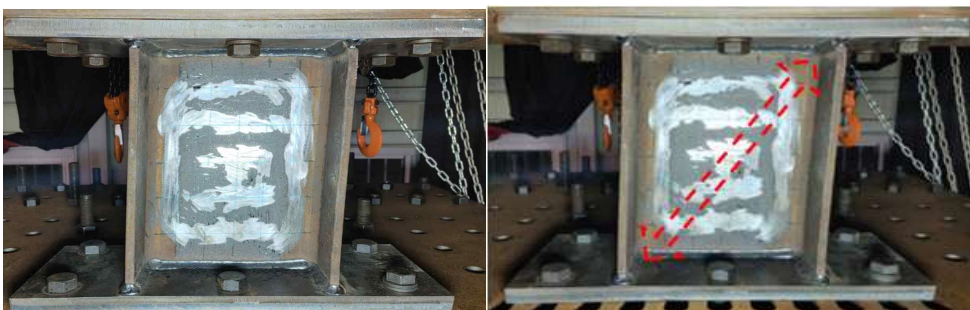


그림 5.11 스틸패널 실험체 변형 형상

6. 디지털 안전용 광섬유 센서 측정 실험

대규모 강구조물인 파이프랙 강재의 손상검출을 위해서는 장거리의 손상검출이 필요로 하다. 특히 파이프랙 구조물 특성상 외부에 배치되어있어서 외부 손상이나 외부 환경의 영향이 적어야 한다. 그리하여 장거리, 외부손상 피해가 적은 광섬유 센서를 활용한 손상검출 시스템을 적용하기 위해 광섬유센서의 적용 가능성에 대해 패널강재 정적실험을 통해 연구를 수행하였다.

6.1 디지털 안전용 광섬유 센서 측정

6.1.1 실험목적 및 구성

본 장에서는 광섬유 센서를 활용한 강재 패널의 손상 탐색에 대한 실험을 진행하였다. 사용한 광섬유 센서 장비로는 광섬유 분포 진동 센서인 DSS (Distributed Strain Sensor : DSS)와 광섬유 분포 변형 분포 센서인 DAS (Distributed Acoustic /Vibration Sensor :DAS)를 사용하였고, 단조가력실험과 반복가력실험을 통해 총 두 번의 실험을 통해 강재 패널 손상에 대한 광섬유 센서 장비 측정을 진행하였다. 광섬유 센서를 활용하여 손상검출에 대한 정확도 검증을 통해 추후 대규모 강 구조물 손상탐색 장비로 활용하기 위해 본 연구를 수행하였다.



그림 6.1 DSS (Distributed Strain Sensor : DSS)



그림 6.2 DAS (Distributed Strain Acoustic/Vibration Sensor : DAS)

6.1.2 실험체 상세 및 일람

실험체는 국가산단 공용파이프랙과 동일한 강재의 압연 H형강을 사용하였으며, 강재 단면 규격으로는 H-244x175x7x11의 강재를 사용하였다. 에너지 흡수구간인 패널부의 크기는 폭은 244mm 높이는 300mm이며, 패널부 상하에 20mm 두께를 갖는 앤드플레이트가 필렛용접으로 구성된다.

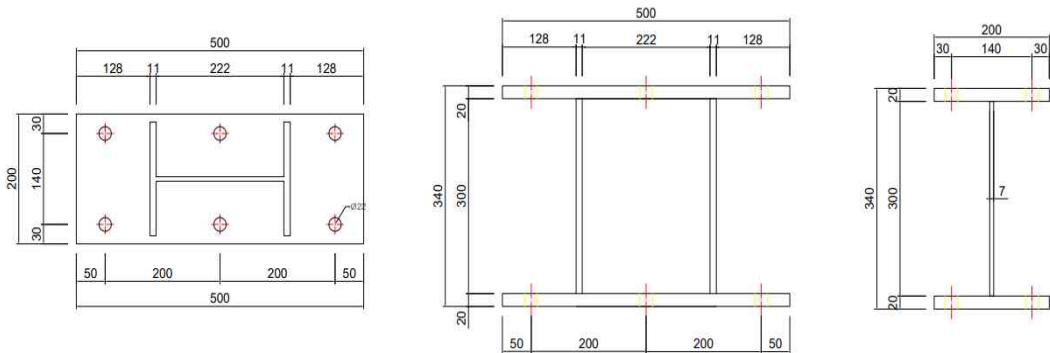


그림 6.3 강재패널의 실험체 형상

6.1.3 실험장치 및 계측

6.1.3.1 실험체 상세 및 일람

실험은 조선대학교 건설계열 공용 구조실험동에서 수행되었으며, 실험체 설치상황은 그림 6.4와 같다. 가력에는 $\pm 500\text{kN}$ 용량의 $\pm 200\text{mm}$ 스트로크(stroke)를 갖

는 유압식 액추에이터를 사용하였다. 하중은 강제거동을 하도록 제작된 가력보(Loading Beam)에 의해 패널로 전달된다. 실험체 상단부에는 면외변형을 억제하기 위해 횡변형 구속기구(Lateral Restraint)를 설치하였다.



그림 6.4 실험전경

6.1.3.2 가력 및 계측 계획

본 실험은 사용된 측정기기의 종류와 설치 모습을 그림 6.5 및 표 6.1에 나타내었다. 스틸패널 Web에는 스트레인 게이지를 부착하여 측정하였다.

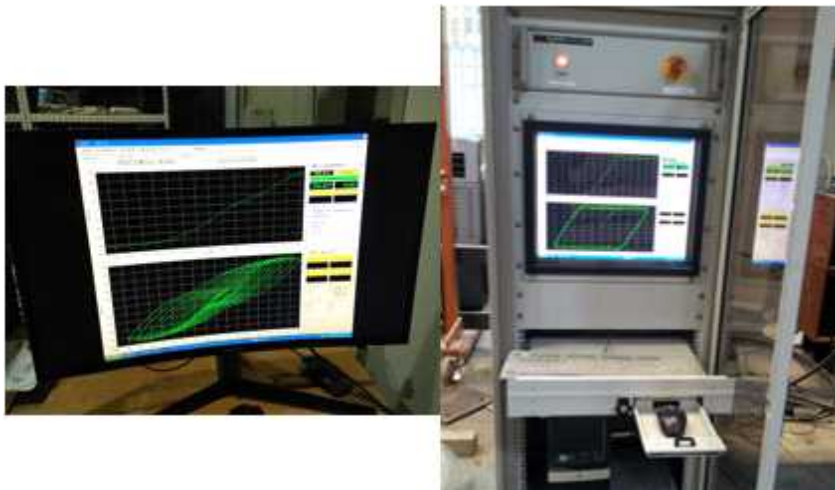





그림 6.5 측정기기 사진

<표 6.1> 측정기기 종류

측정기기	측정범위	비고
Actuator	Max Capacity : 500kN	
Data Logger	Max Capacity ±50,000 strain	
	Precision : ± 0.2%	
Strain Gauges	Gauge Factor : 2.13 ±1%	
	Gauge Lmength : 5mm	

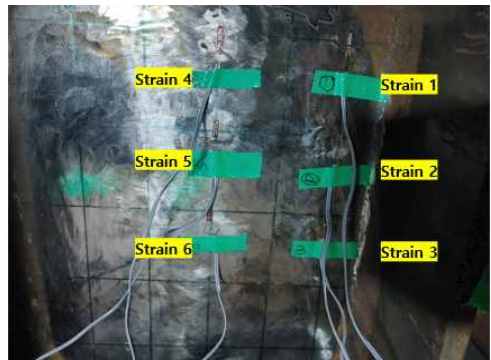
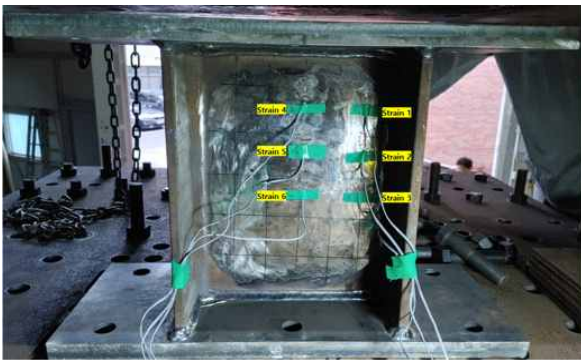


그림 6.6 Strain Gauge 부착 위치

첫 번째로 진행한 실험의 가력방법은 반복에 따른 누적 손상을 반영하기 위하여 점증진폭을 갖는 반복하중을 적용하였으며, 본 가력은 AISC Seismic Provision에서 제시된 강재실험에 사용되는 프로토콜을 기본으로 순수패널 높이(300mm)에 따른

수평이동 변위각을 기준으로 0.00375rad($\pm 1.125\text{mm}$), 0.005rad($\pm 1.5\text{mm}$), 0.0075rad($\pm 2.25\text{mm}$), 0.01rad($\pm 3\text{mm}$), 0.015rad($\pm 4.5\text{mm}$), 0.02rad($\pm 6\text{mm}$), 0.03rad($\pm 9\text{mm}$), 0.04rad($\pm 12\text{mm}$), 0.05rad($\pm 15\text{mm}$), 0.06rad($\pm 18\text{mm}$), 0.07rad($\pm 21\text{mm}$), 0.08rad($\pm 24\text{mm}$), 0.09rad($\pm 27\text{mm}$), 0.1rad($\pm 30\text{mm}$), 0.11rad($\pm 33\text{mm}$), 0.12rad($\pm 36\text{mm}$), 0.13rad($\pm 39\text{mm}$), 0.14rad($\pm 42\text{mm}$), 0.15rad($\pm 45\text{mm}$), 0.16rad($\pm 48\text{mm}$)로 반복 가력하였다. DSS 장비에서 항복 이후의 데이터를 추출하기 위해 0.16rad까지 가력하였다. 그림 6.7에서 가력패턴을 확인할 수 있다.

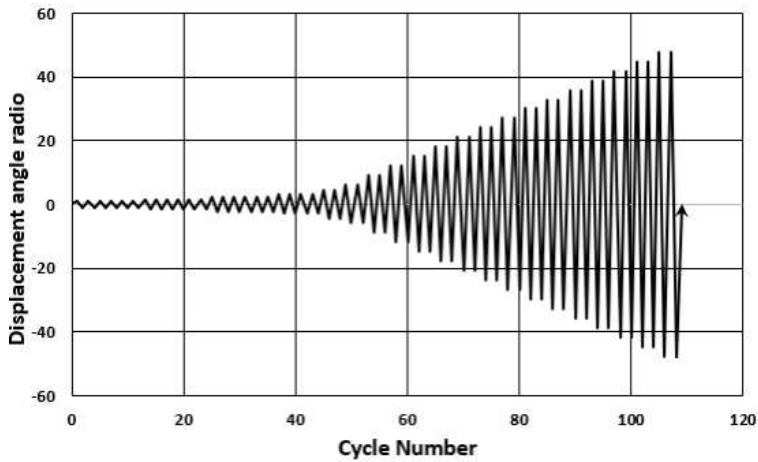


그림 6.7 점증진폭 입력 변위

두 번째로 진행한 실험의 가력방법은 한 방향에 따른 누적 손상을 검출하기 위해 단조가력실험을 진행하였다. 단조 가력실험 또한 반복가력과 동일하게 최대 변위 48mm를 수행하였다.

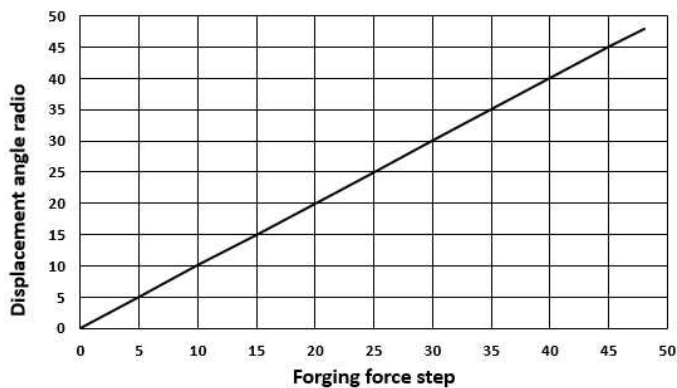


그림 6.8 단조가력 입력 변위

6.1.3.3 광섬유센서 부착 위치

스틸 패널 전면부에 광섬유센서 측정을 위해 광섬유 센서를 설치하였다. DSS 케이블(Bare)는 강재 내부의 미세 변형률을 측정하기 위해 격자 포설을 진행하였다. 다음으로 DAS 케이블(노란색) 강재 내부 미세 진동 감지를 위해 격자 포설하였고, 강재 전체적인 진동 감지를 위해 DAS케이블 뭉치를 부재의 플랜지에 우측에 부착해 주었다.



그림 6.9 DSS 케이블(Bare)



그림 6.10 DAS 케이블(노란색)

6.1.4 반복가력재하 결과 고찰

6.1.4.1 하중-변위 곡선

본 연구에서는 광섬유 센서 DSS (Distributed Strain Sensor), DAS (Distributed Strain Sensor)를 활용한 강재패널의 진동 평가 및 손상검출을 확인하기 위해 실험을 실시하였다. 강재패널의 반복가력 실험을 통해 확인된 하중-변위 곡선의 결과 패널 웨브부의 면외좌굴로 인해 발생하는 핀칭(Pingching) 현상이 약간씩 관찰되었습니다. 그러나 일반적인 패널부의 현저한 핀칭 현상보다는 매우 완화된 거동 특성을 관찰할 수 있었습니다.

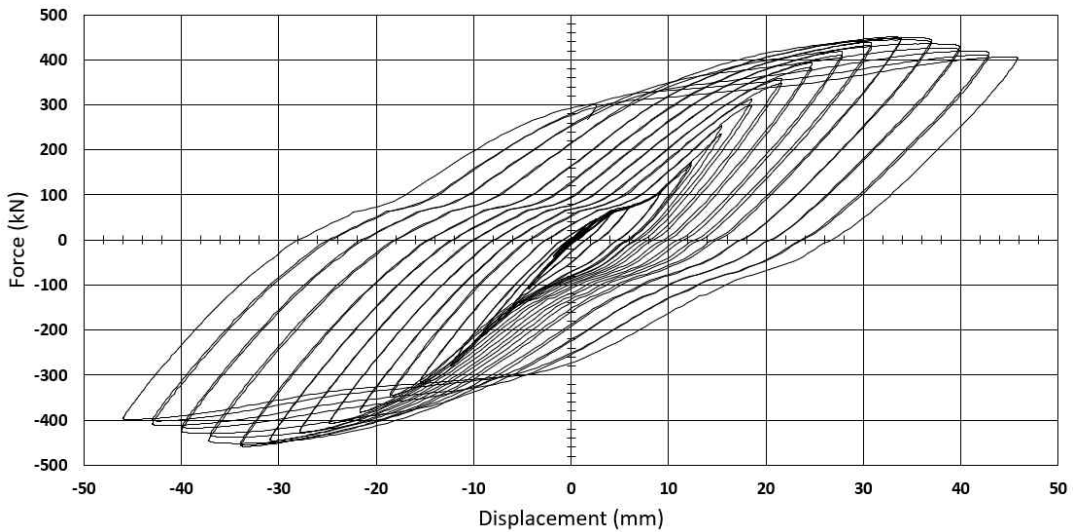


그림 6.11 강재패널 하중-변위 곡선

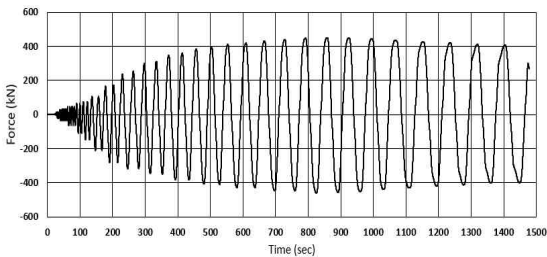


그림 6.12 강재패널 하중-시간 그래프

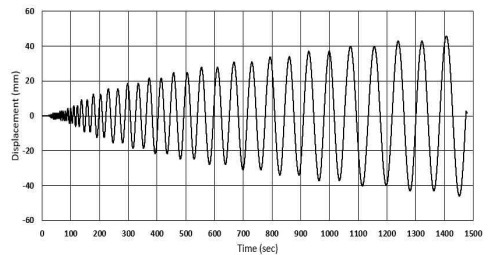


그림 6.13 강재패널 변위-시간 그래프

6.1.4.2 DSS 광섬유 센서 측정 결과

OFDR HMI 구동 데이터 측정으로 데이터를 수집하였고, 반복가력은 19:07:23 ~ 19:27:39로 약 20분 16초 동안 측정되었으며 측정 데이터는 1281파일이다.

첫 번째로는 반복가력에 대한 패널부의 전체적인 데이터 가시화를 그림 6.15에 나타내었다. X축은 광섬유센서를 설치한 전체의 길이로 실험체의 정면 웹부분을 나타낸다.

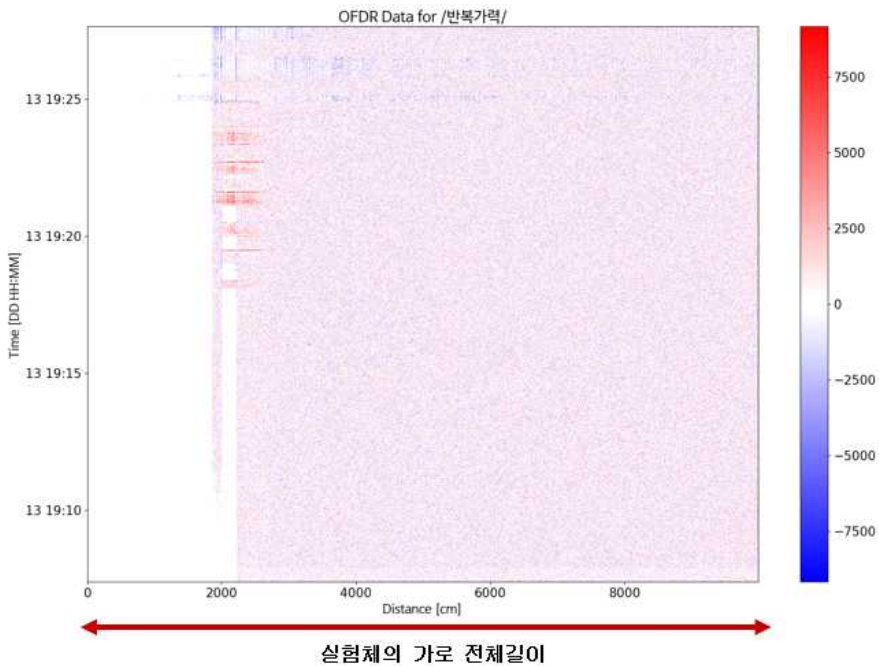


그림 6.14 반복가력 전체 데이터 가시화

반복가력이 진행되었을때의 전체적인 실험의 데이터 가시화이며, 우측의 빨간색과 파란색으로 되어있는 그래프는 변형의 크기를 뜻한다. 데이터 가시화에서 빨간색을 띄면 정면으로 변형이 발생하는 (+)변위 파란색을 띄면 후면으로 변형이 발생하는 (-)변위이다. 데이터 가시화 이미지는 전체적인 실험에 대한 형상을 나타내기에 변형이 주로 발생하는 구간을 특정하여 세부적으로 확인하였다. 주요 지점으로 X축의 Distance의 1860cm, 1870cm, 1900cm, 1920cm, 1940cm, 1960cm, 1975cm, 1992cm, 2008cm, 2025cm의 데이터를 추출하여 확인하였다. 주요 지점에 대한 데이터는 그림 6.15에 나타내었다.

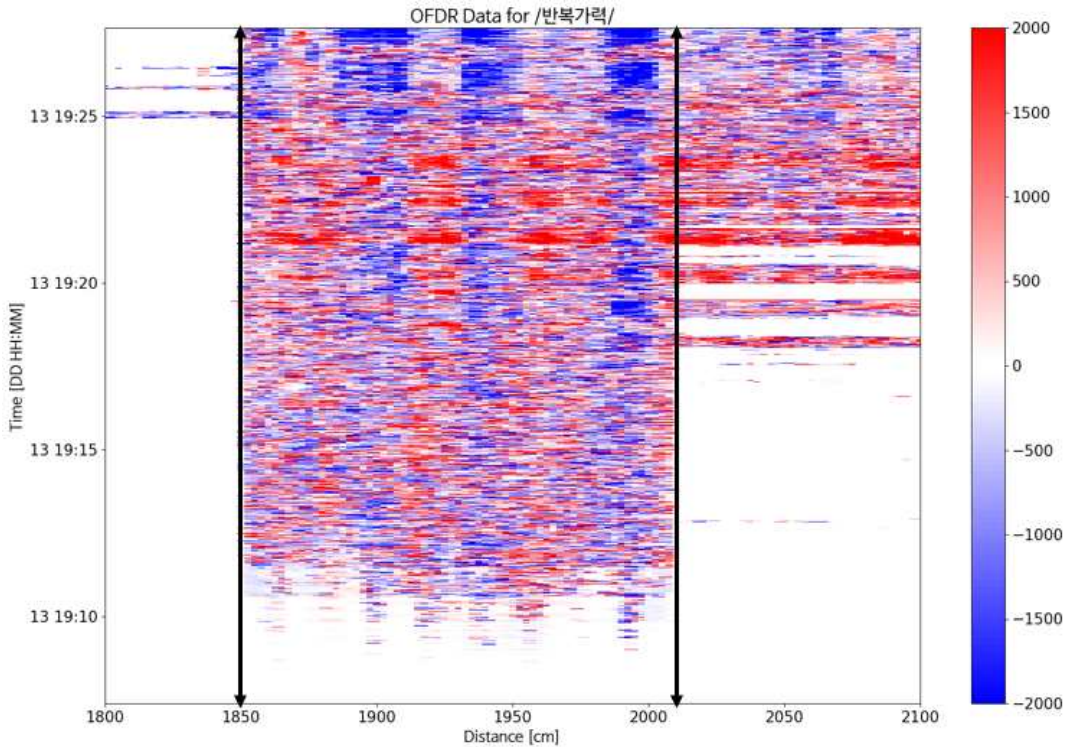


그림 6.15 주요지점 분석 데이터

주요지점 데이터를 시간-거리 데이터로 분석하였고, 첫 번째로 확인한 것은 데이터의 색이 빨간색에서 파란색으로 나타나는 현상은 반복가력이 진행되면서 실험체의 패널부가 변형이 발생할 때 패널이 주름지듯이 변형되는 것을 확인 가능하다. 두 번째는 19:17초에서 우측 부분에 측정 센서의 강도 이상으로 부재의 변형이 발생하여 센서가 끊어진 것을 확인하였는데 부재가 반복가력을 진행하였을 때 중심부로 돌아올 때마다 신호가 다시 살아나는 것을 보아 버트 커플링(butt coupling) 현상으로 광섬유 센서가 완전히 끊어지지 않고 크랙만 난 경우로 확인할 수 있다.

그림 6.16의 주요 지점별로 변위 시간 데이터를 확인해보면 항복 시점, 변위 발생 시점, 변위가 시작하는 시점을 확인할 수 있다. 데이터를 확인해보면 패널부의 중심부에서 먼저 변위가 발생하는 것을 확인할 수 있고, 19:10초 지점에서 급격하게 변위가 커진 것을 보아 항복예상 시점으로 파악할 수 있다.

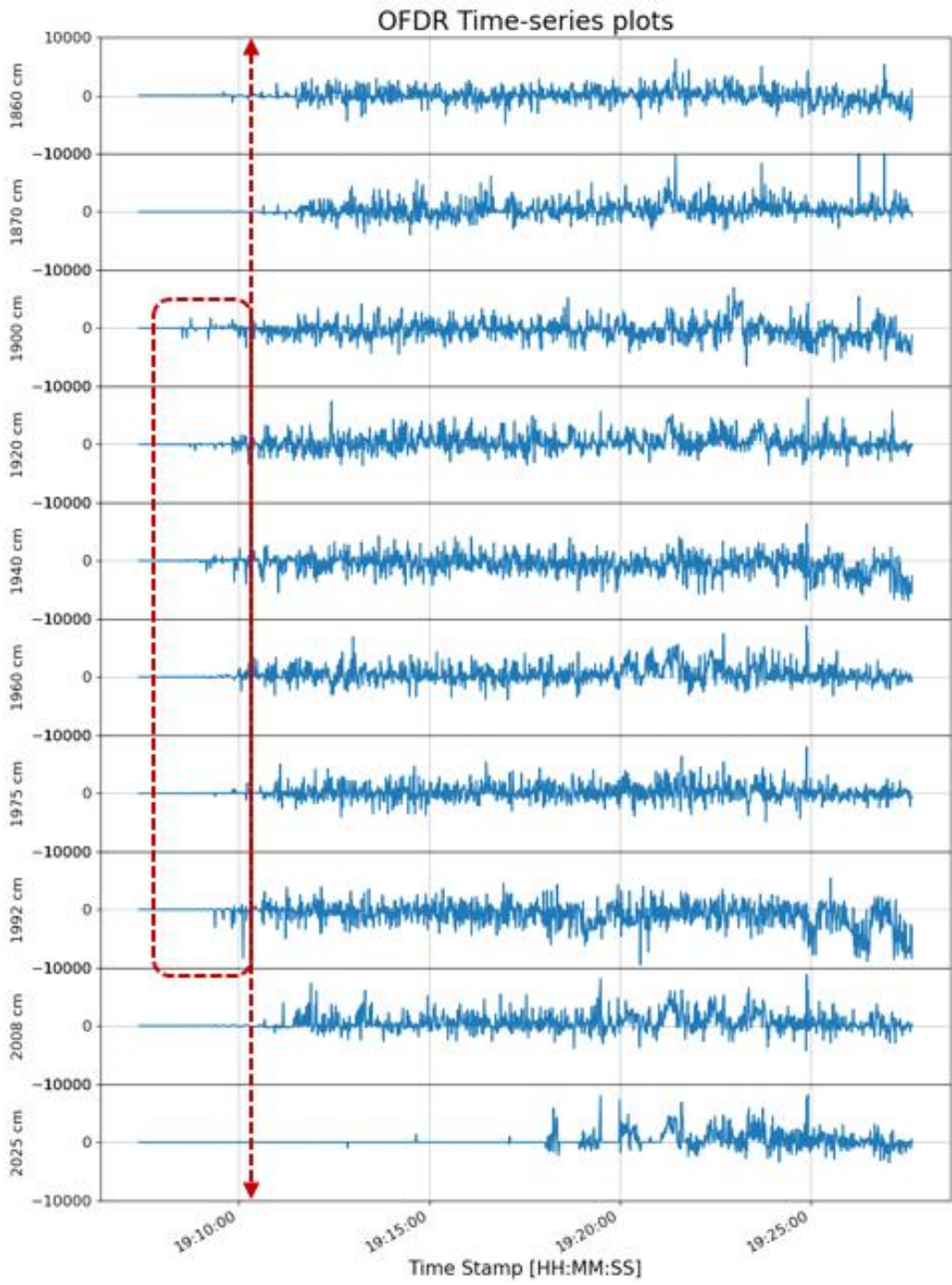


그림 6.16 각 주요지점 변위-시간 데이터

주요지점의 분석 지점(Point)을 2가지로 나누어 변형률 패턴에 대해 확인하였다. 분석 지점은 그림 6.17에 나타내었다.

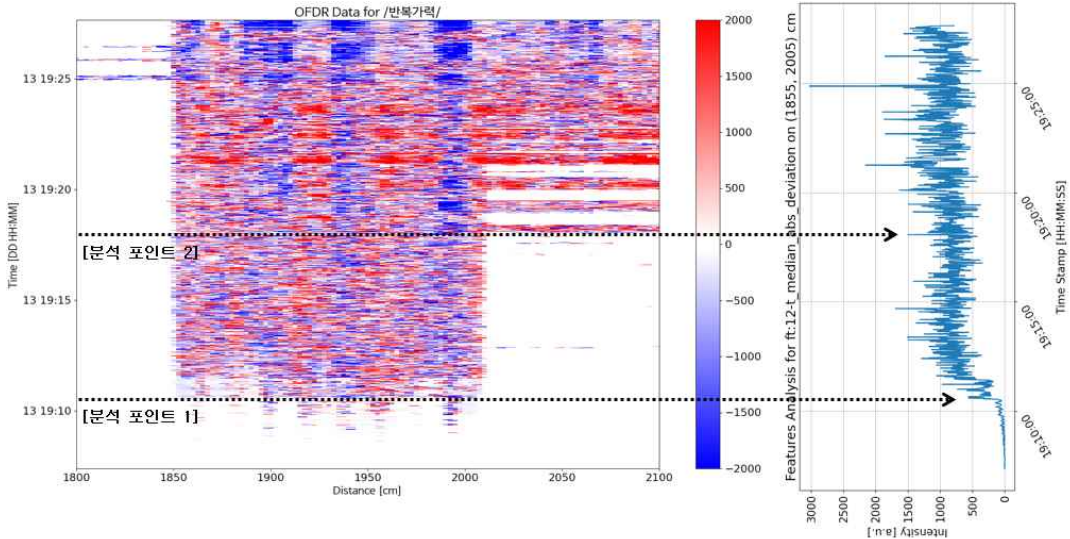


그림 6.17 변형률 패턴 데이터

1) 분석 Point.1

- 19:10초를 기점으로 변형률 패턴이 바뀌기 시작하면서 변형률 스케일이 $\pm 200\mu\epsilon$ 수준에서 $\pm 2000\mu\epsilon$ 수준으로 대폭 상승하였다.
- 우측의 중앙값 절대편차(median absolute deviation) 데이터값이 급격하게 커진 것을 보아 강재의 항복 시점으로 인한 변형률 스케일 상승으로 확인할 수 있다.

2) 분석 Point.2

- 18:01초를 기점으로 변형부위가 넓어지기 시작한다.
- 실험 구간 외에서 $5000\mu\epsilon$ 이상으로 변형이 크게 발생하는 현상이 관찰되었다.
- 변형 구간이 넓어지면서 광섬유 단선이 발생하였다.

6.1.4.3 DAS 광섬유 센서 측정 결과

DAS 광섬유 센서 측정 결과 실험을 진행한 부재의 내부에 격자형으로 설치된 광섬유 센서와 부재의 플랜지에 케이블 뭉치로 설치된 광섬유 센서에 대한 진동 신호 형태에 대해 확인하였다. 강재에 변형 발생 시, 강재 내부 격자형 포설 구간에서는 연속적인 진동 신호가 발생하였다. 연속적인 규칙의 진동 신호는 엑추에이터 가력보(Loading Beam)가 +방향에서 -방향으로 움직일 때 진동이 발생하여 규칙적으로 진동 신호가 발생하였다. 발생 변위가 커질수록 더욱 강한 진동 신호 및 주파수 변화를 확인하였고 강재 내부 격자형 포설 구간에서도 연속적이며 강한 이상 진동이 발생하는 것으로 확인하였다.

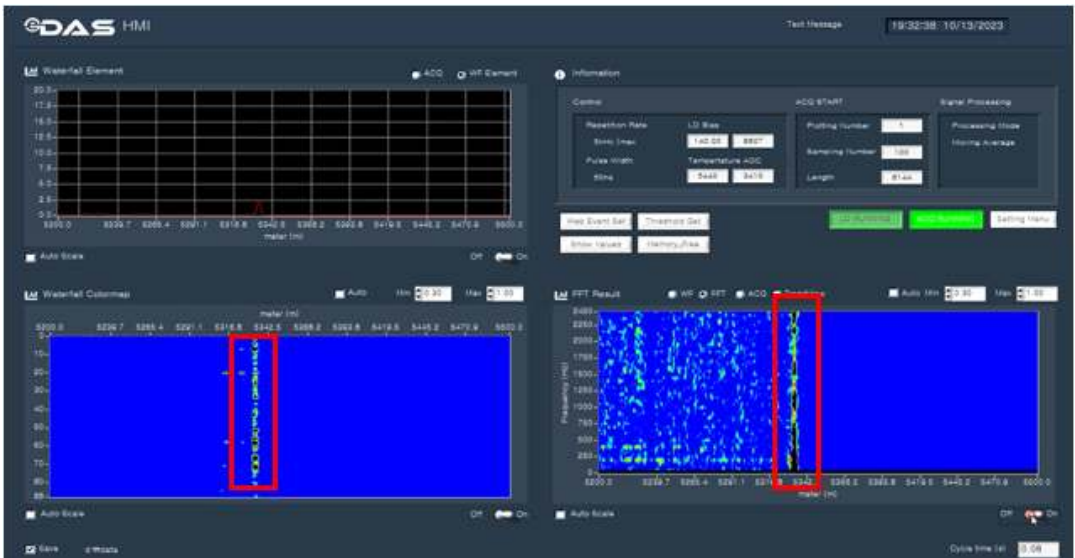


그림 6.18 진동 신호 형태(강재 내부 격자형 포설)

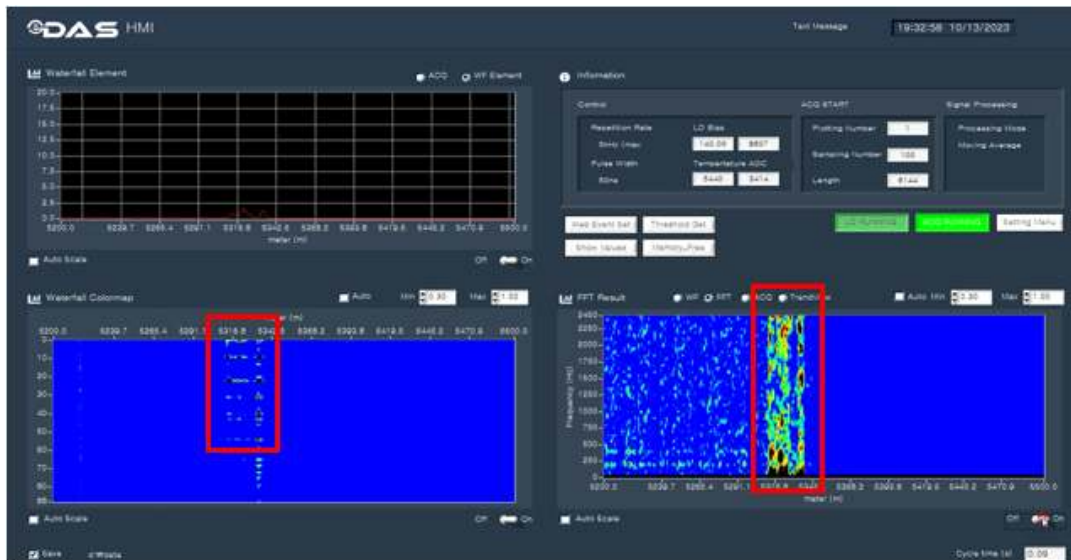


그림 6.19 진동 신호 형태(케이블 뭉치)

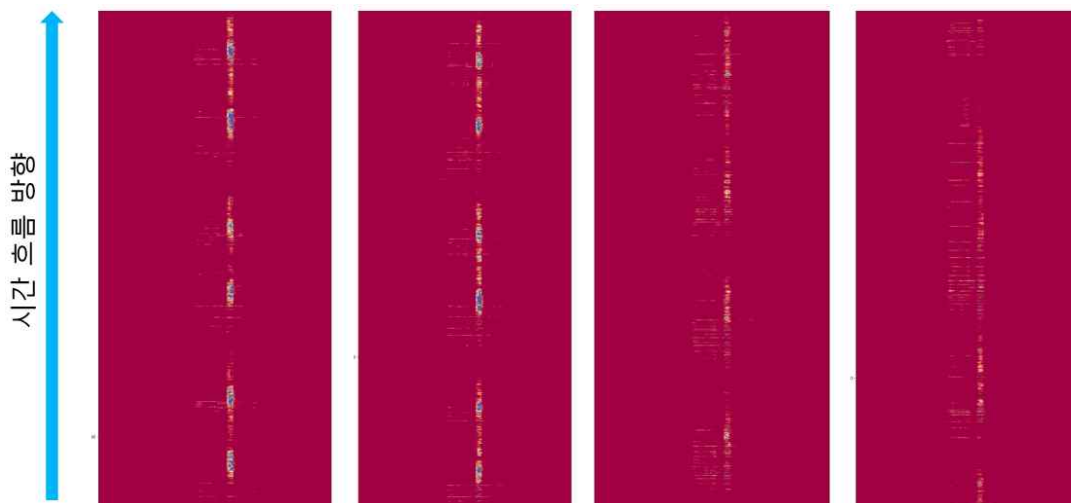


그림 6.20 DAS 데이터 가시화

6.1.5 단조가력재하 결과 고찰

강재패널의 단조가력실험을 실시하였고, 그에 대한 하중-변위 곡선을 확인 할 수 있었다. 실험체의 하단부 앤드플레이트의 와서 미체결로 인해 실험 도중 Slip이 발생하였는데 이에 대한 광섬유센서의 데이터 변화를 관찰하였다.

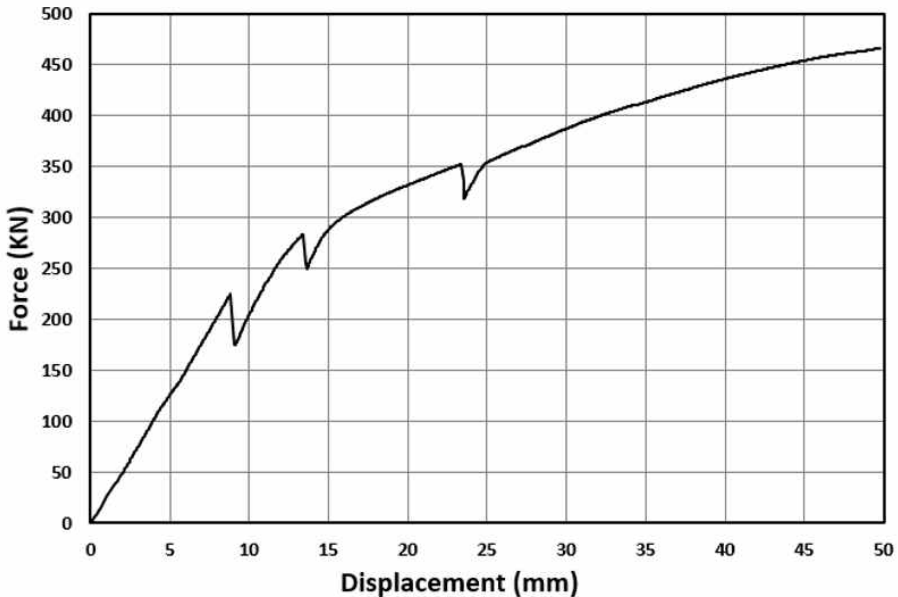


그림 6.21 강재패널 하중-변위 곡선

6.1.5.1 DSS 광섬유 센서 측정 결과

반복가력 데이터와 동일하게 OFDR HMI 구동 데이터 측정으로 데이터를 수집하였고, 단조가력은 14:38:55 ~ 14:42:26으로 약 3분 30초 동안 측정되었으며 측정 데이터는 223파일이다. 단조가력 전체적인 데이터 가시화를 확인 시 14:41:30초 시점에서 (+)방향으로 빨간색의 큰 신호가 감지되는데 이 부분은 앞쪽 방향으로 큰 굴곡이 생긴 것을 확인할 수 있으며, 이 시점에서 DSS 광섬유 센서의 강도 이상으로 변형이 발생하여 끊어진 것을 확인할 수 있다.

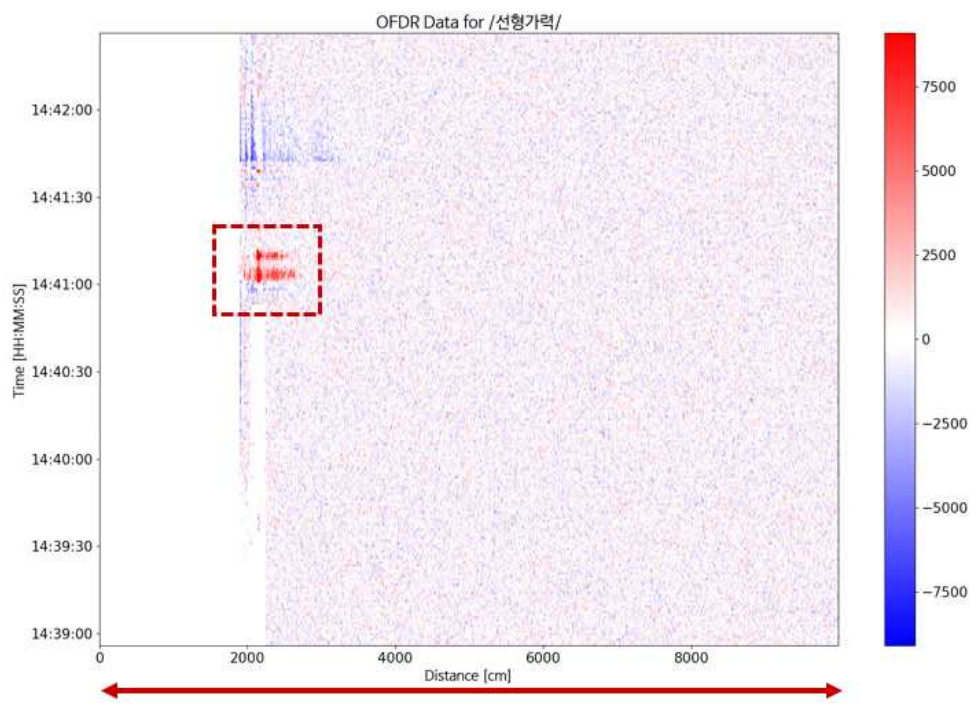


그림 6.22 단조가력 전체 데이터 가시화

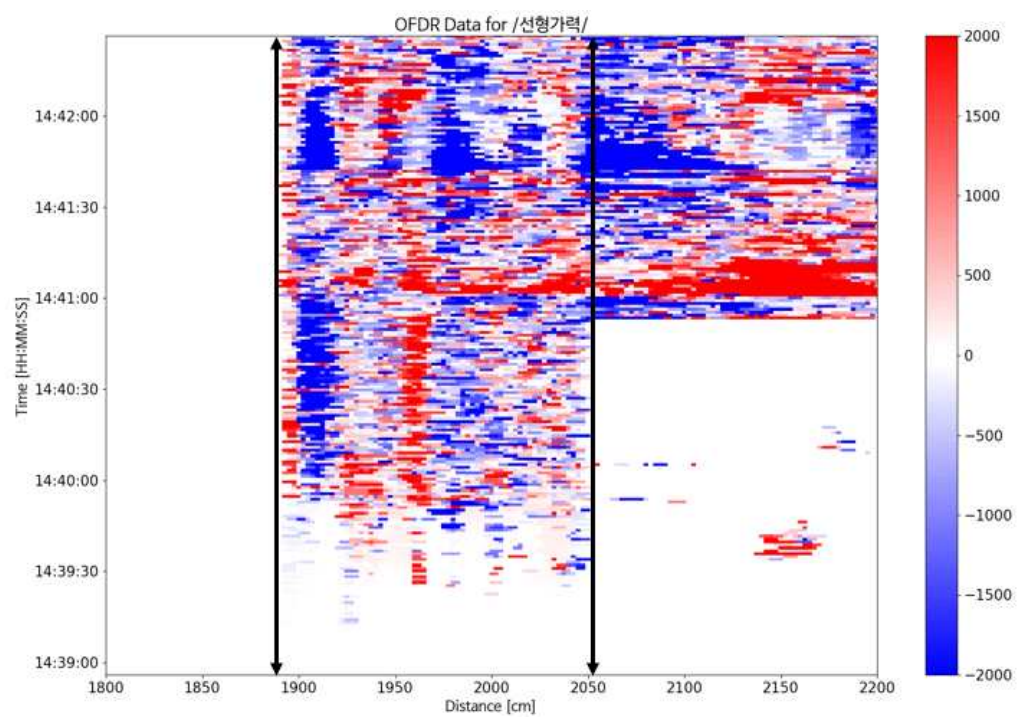


그림 6.23 주요지점 분석 데이터

데이터 가시화 이미지는 전체적인 실험에 대한 형상을 나타내기에 변형이 주로 발생하는 구간을 특정하여 세부적으로 확인하였다. 주요지점으로 X축의 Distance 의 1895cm, 1910cm, 1930cm, 1950cm, 1062.5cm, 1980cm, 2005cm, 2020cm, 2035cm, 2065cm의 데이터를 추출하여 확인하였다. 주요 지점에 대한 데이터는 그림 6.22에 나타내었다. 반복가력과 동일하게 변형이 발생할 때 패널이 주름지듯이 변형되는 것을 확인하였다. 또한 14:41초까지는 앞뒤로 정상 패턴이 보이지만 이후로는 노이즈로 보이는 패턴이 발생하는 것을 보아 광섬유 센서가 끊어진 것으로 확인 가능하다.

그림 6.23의 주요 지점별로 변위 시간 데이터를 확인해보면 항복 시점, 변위 발생 시점, 변위가 시작하는 시점을 확인할 수 있다. 데이터를 확인해보면 패널부의 중심부에서 먼저 변위가 발생하는 것을 확인할 수 있고, 14:39초 지점에서 급격하게 변위가 커진 것을 보아 항복예상 시점으로 파악할 수 있다.

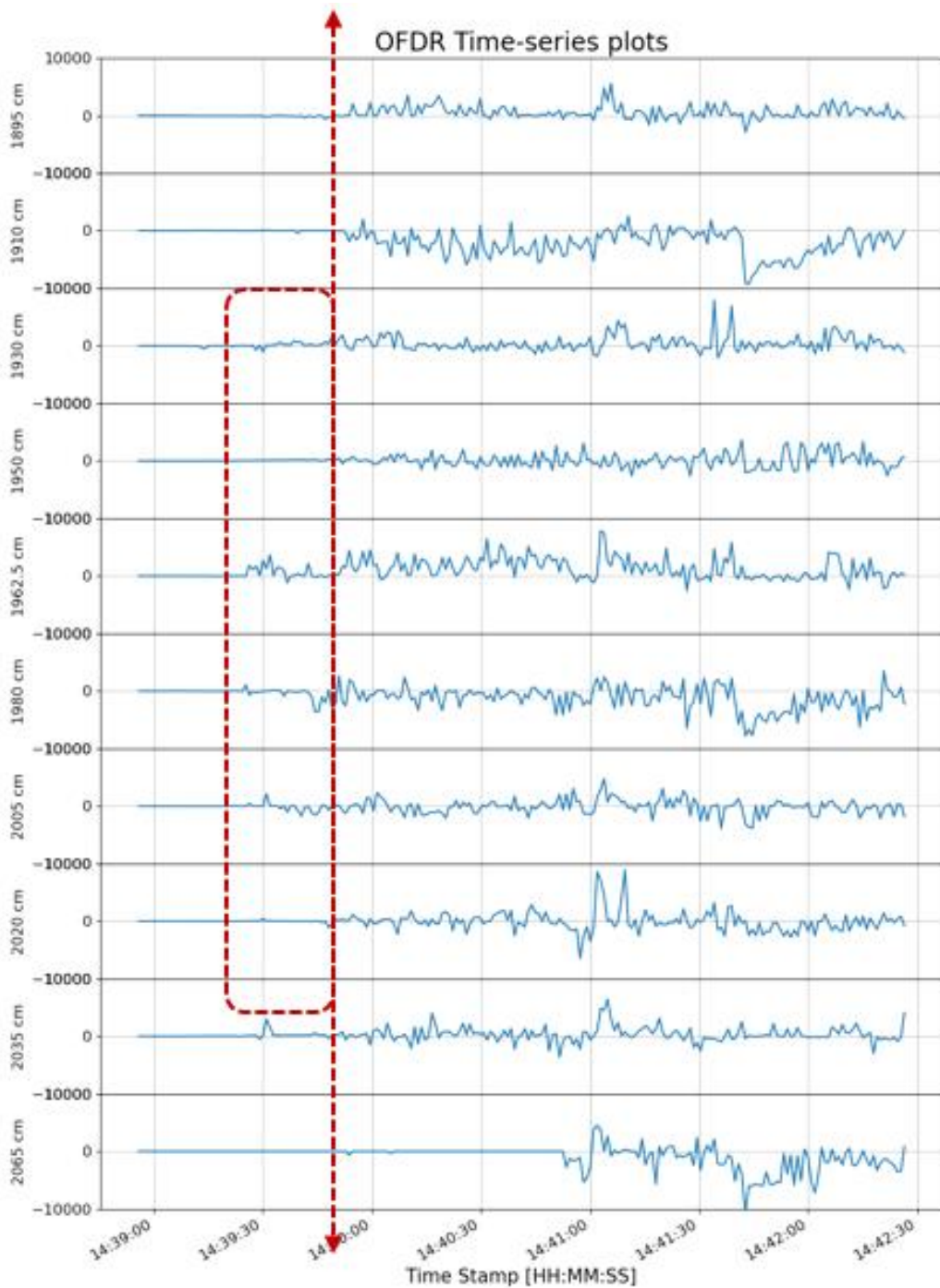


그림 6.24 각 주요지점 변위-시간 데이터

주요지점의 분석 지점(Point)을 2가지로 나누어 변형률 패턴에 대해 확인하였다. 분석 지점은 그림 6.24에 나타내었다.

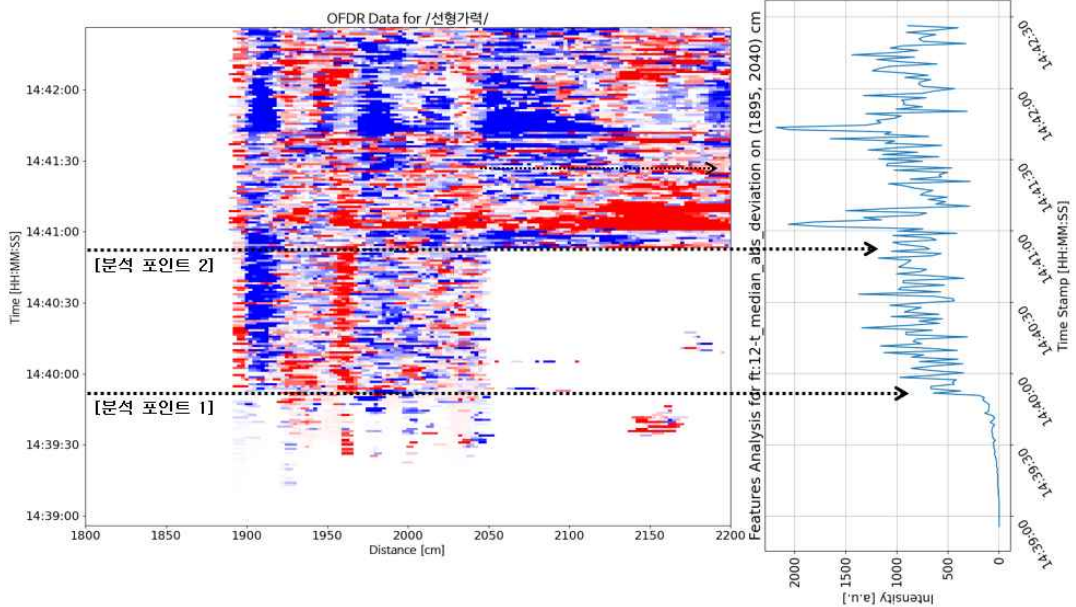


그림 6.25 변형률 패턴 데이터

1) 분석 Point.1

- 14:39:51초를 기점으로 변형률의 패턴이 전후로 바뀜.
- 변형률 스케일이 $\pm 200\mu\epsilon$ 수준에서 $\pm 2000\mu\epsilon$ 수준으로 대폭 상승하였다. (항복 전조 증상으로 다른 지점에 변형률 분포 신호가 관측됨)
- 우측의 중앙값 절대편차(median absolute deviation) 데이터값이 급격하게 커진 것을 보아 강재의 항복 시점으로 인한 변형률 스케일 상승으로 확인할 수 있다.

2) 분석 Point.2

- 14:40:52초에 광섬유 단선 추정 → 신호 크기가 $\pm 1000\mu\epsilon$ 까지 상승 후 노이즈화 현상 발생함.

6.1.5.2 DAS 광섬유 센서 측정 결과

DAS 광섬유 센서 측정 결과 실험을 진행한 부재의 내부에 격자형으로 설치된 광섬유 센서와 부재의 플랜지에 케이블 뭉치로 설치된 광섬유 센서에 대한 진동 신호 형태에 대해 확인하였다. 강제 변형 시 광음과 함께 강한 진동이 발생한 것을 케이블 뭉치의 신호에서 확인 가능하였고, 주파수 분석 시에도 신호 발생이 확인되었다. 그에 반해 강제 내부 격자형 포설 케이블에서는 진동 신호가 약하게 확인되었다.

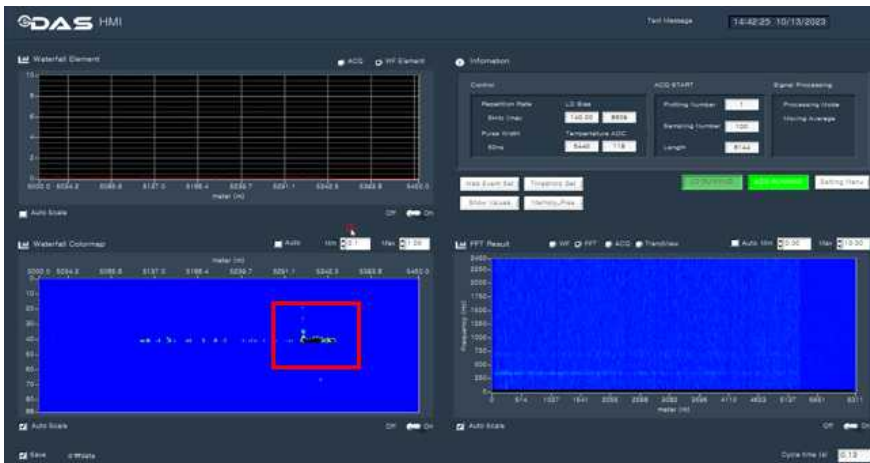


그림 6.26 진동 신호 형태(케이블 뭉치)

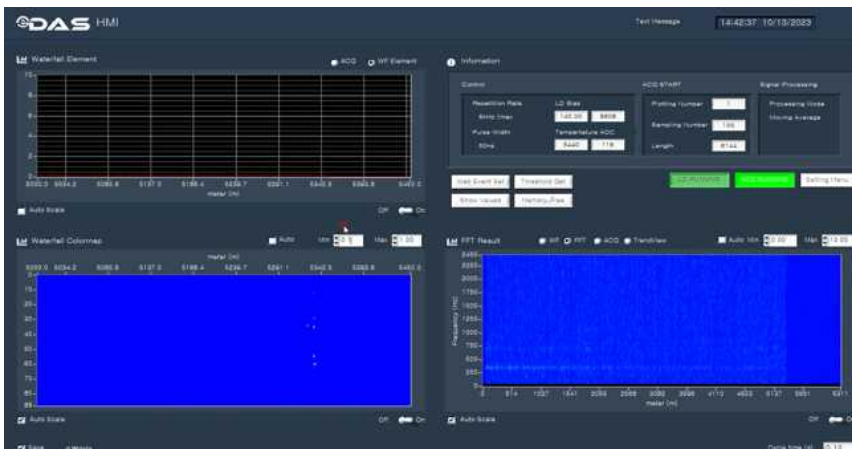


그림 6.27 진동 신호 형태(강제 내부 격자형 포설)

그림 6.26의 전체적인 데이터 가시화를 확인 시 3번의 큰 진동 신호를 포착하였는데 단조가력 진행 시 발생한 부재 Slip으로 인한 진동이 DAS 데이터에 진동 신호로 포착되었다는 것을 확인 가능하였다.

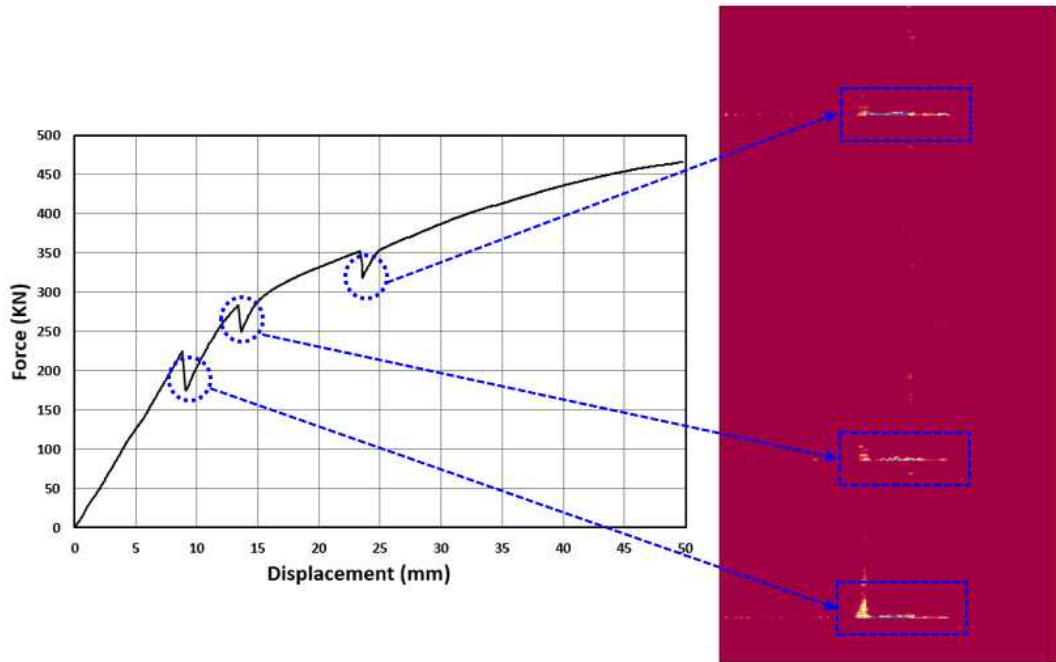


그림 6.28 DAS 데이터 가시화

7. 파이프랙 구조물 구조검토해석

7.1 대상 구조물

대상 구조물로는 실제 국가산단 파이프랙 구간 중 일부 구조물을 대상으로 등가 정적 해석을 실시하여, 구조물의 구조검토를 통해 파이프랙 구조물 거동 특성을 확인하고 손상 부위를 특정하였다. 구조물의 용도는 플랜트 배관지지 구조물이며, 층고는 6.6m, SS235, SM275강재를 이용하여 설계하였다.

표 7.1 대상 구조물 개요

구조물 용도	산업단지 내 Pipe Rack	
건물개요	단수	4단
	층고	6.6m
	용도	Pipe-rack (파이프랙)
	구조	철골조
재료강도	철골 : $F_y = 235 \text{ MPa}$	

표 7.2 구조검토 방침

구분	내용	비고
검토방법	철골 - 한계상태설계법	
적용기준	건축구조기준 (KDS 41)	
참고기준	ASCE7-16, SABP-M-007 (Saudi Aramco)	

표 7.3 부재 정보

Beam & Girder		
MEMBER LIST	SIZE	MATERIAL
SG1	H-194x150x6x9	SS235
SG2	H-244x175x7x11	SS235
SG3	H-340x250x9x14	SS235
Column		
MEMBER LIST	SIZE	MATERIAL
SC1	H-200x200x8x12	SM275
SC2	H-250x250x9x14	SM275

7.2 구조물 도면

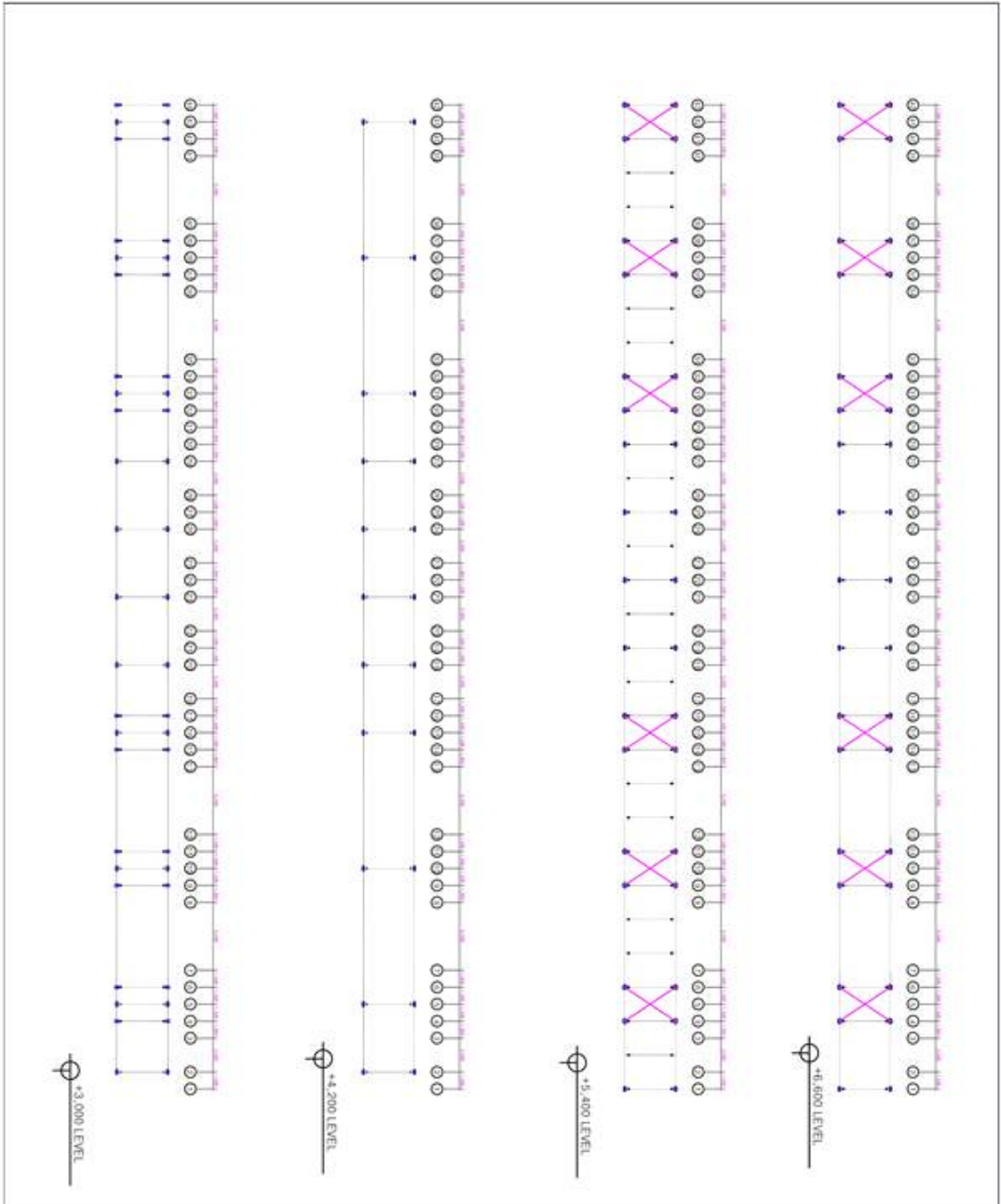


그림 7.1 대상구조물 구조 평면도

7.3 적용하중

표 7.4 적용하중

Load Case	Description	Load Category
DL	Permanent Load	Dead Load
Po	Operating Load	Dead Load
Pt	Pipe Testing Load	Dead Load
Pe	Pipe Empty Load	Dead Load
Fr	Friction Load	Dead Load
Af	Anchor Load	Live Load
Wx	Wing Load	Wind Load
Wy	Wing Load	Wind Load
Ex	Seismic or Earthquake Load	Seismic Load
Ey	Seismic or Earthquake Load	Seismic Load

7.3.1 Pipe Load

7.3.1.1 Operating Load

설치된 강제 배관 내에 물이 가득 차 있는 것으로 가장하여 집중하중을 산출하고 추가 적용한다.

7.3.1.2 Friction Load

열공급 배관의 운전 혹은 정지 시 배관의 신축으로 인한 배관과 배관지지 보(beam)와의 마찰에 의해 발생하는 배관 축 방향의 수평하중으로, 운전 혹은 정지 시 순각적으로 발생하며, 접수 하중이 없을 경우, 운전하중의 10%를 적용한다. Pipe Load 의 10% Pipe 진행방향 적용 (단, Pipe가 3개 이하일 경우 20%)

7.3.1.3 구간별 Operating Load, Friction Load

표 7.5 구간별 Operating Load, Friction Load

높이	직경 (")	개수 (EA)	길이(mm)	W (kN/m^3)	집중하중 P0 (kN/m^2)	수평하중 FR (kN/m^2)
+300 LEVEL	6	1	4500	10	0.041	0.0041
	8	1	4500	10	0.072	0.0072
	10	3	4500	10	0.338	0.0338
	12	1	4500	10	0.162	0.0162
	20	1	4500	10	0.450	0.0450

높이	직경 (")	개수 (EA)	길이(mm)	W (kN/m^3)	집중하중 P0 (kN/m^2)	수평하중 FR (kN/m^2)
+1500 LEVEL	2	1	4500	10	0.005	0.0005
	4	1	4500	10	0.018	0.0018
	6	2	4500	10	0.081	0.0081
	10	4	4500	10	0.450	0.0450
	12	1	4500	10	0.162	0.0162
	18	1	4500	10	0.365	0.0365

높이	직경 (")	개수 (EA)	길이(mm)	W (kN/m^3)	집중하중 P0 (kN/m^2)	수평하중 FR (kN/m^2)
+3000 LEVEL	4	1	4500	10	0.005	0.0005
	6	1	4500	10	0.018	0.0018
	8	2	4500	10	0.081	0.0081
	10	4	4500	10	0.450	0.0450
	12	1	4500	10	0.162	0.0162
	18	1	4500	10	0.365	0.0365

높이	직경 (")	개수 (EA)	길이(mm)	W (kN/m^3)	집중하중 P0 (kN/m^2)	수평하중 FR (kN/m^2)
+4200 LEVEL	4	1	4500	10	0.018	0.0018
	6	1	4500	10	0.041	0.0041
	8	8	4500	10	0.577	0.0577
	10	1	4500	10	0.113	0.0113
	12	2	4500	10	0.324	0.0324
	14	1	4500	10	0.221	0.0221

파이프랙 X1 ~ X42열 Pipe Friction Load

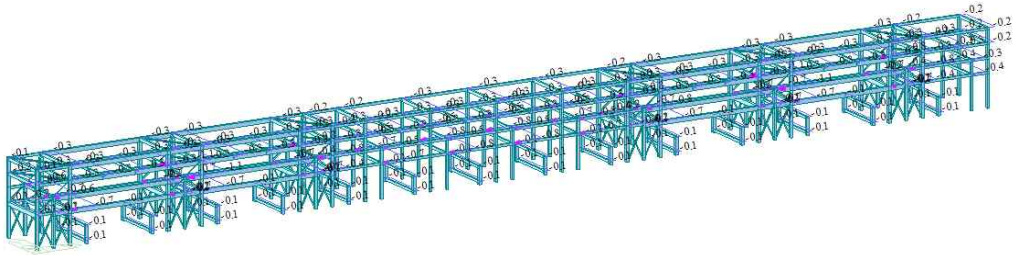


그림 7.3 Friction Load 적용

7.3.2 Wind Load

Structure Wind Load에 ‘KDS 41 12 00 : 2022 건축물 설계하중’^[23]에 의해 계산된 풍하중을 각 부재에 직접 재하한다. Pipe Wind Load에 ‘SABP-M-007 (Saudi Aramco)’^[24]에 의해 계산된 풍하중을 각 부재에 직접 재하한다.

표 7.6 Structure Wind Load

설계기본풍속(V_0)	36m/s 전남 여수
중요도 계수(I_w)	1.0
지표면조도구분	C
지형계수(K_{zt})	1.0

풍속고도분포계수(Kzr)	1.0
풍향계수(KD)	1.0
설계풍속(Vz)	$V_H = V_0 \times K_{zt} \times K_{zr} \times K_D \times I_w = 36 \text{ m/s}$
가스트영향계수(GD)	2.171
풍력계수	기동부재 : 0.7, 보부재 : 2.1 (KDS 41 10 15 표 5.7-13, H형부재)
수압면적(Af)	기동 부재 : 0.2, 0.25 보 부재 : 0.15, 0.175, 0.25
설계풍하중 (for open structure)	$P_F = k_2 \times q_H \times G_D \times C_D \times A_F$ $q_h = 0.5 \times 1.225 \times V_H^2 = 793.8$

설계기본풍속은 36m/s로 국가산업단지 위치가 여수이기에 구조물 기준상으로 기본풍속은 40m/s를 적용하여야 하나 현재 해당 국가산단 지역은 아래의 그림 7.4의 지도 빨간 동그라미 지역에 위치하여 36m/s로 산정하였음.



그림 7.4 지역별 풍속 기준

표 7.7 Pipe Wind Load

가스트영향계수(GD)	0.85 (ASCE7-16 26.11장 적용)
유효면적(Ae)	Pipe 최대 직경 + Pipe rack Width × 10%
Pipe Support 길이(L)	3,000, 4,500, 6,000 그 이하 생략
풍력계수(CD)	0.7
설계풍하중(Pipe Wind)	$P_F = k_2 \times q_H \times G_D \times C_D \times A_E \times L$
	$q_h = 0.5 \times 0.1225 \times V_H^2$

7.3.2.1 Pipe Wind Load 적용값

표 7.8 Pipe Wind Load

높이	최대직경(")	길이(mm)	영향면적	가스트 영향 계수	풍력계수	파이프 풍하중 (kN)
6600	8	3000	0.50	0.85	0.7	0.91
5400	12	3000	0.60	0.85	0.7	1.09
4200	14	3000	0.66	0.85	0.7	1.19
3000	14	3000	0.66	0.85	0.7	1.19

높이	최대직경(")	길이(mm)	영향면적	가스트 영향 계수	풍력계수	파이프 풍하중 (kN)
6600	8	4500	0.65	0.85	0.7	1.77
5400	12	4500	0.75	0.85	0.7	2.05
4200	14	4500	0.81	0.85	0.7	2.19
3000	14	4500	0.81	0.85	0.7	2.19

높이	최대직경(")	길이(mm)	영향면적	가스트 영향 계수	풍력계수	파이프 풍하중 (kN)
6600	8	6000	0.80	0.85	0.7	2.91
5400	12	6000	0.90	0.85	0.7	3.27
4200	14	6000	0.96	0.85	0.7	3.46
3000	14	6000	0.96	0.85	0.7	3.46

Pipe Wind Load는 가로 거더 길이에 따라 Nodal Load로 입력하였다. Pipe 풍하중 구하는 식은 아래와 같다.

- 속도압(qh) × 가스트영향계수(GD) × 풍력계수(CD) × 영향면적 × 가로거더 길이/1000

파이프랙 X1 ~ X42열 Structure Wind Load

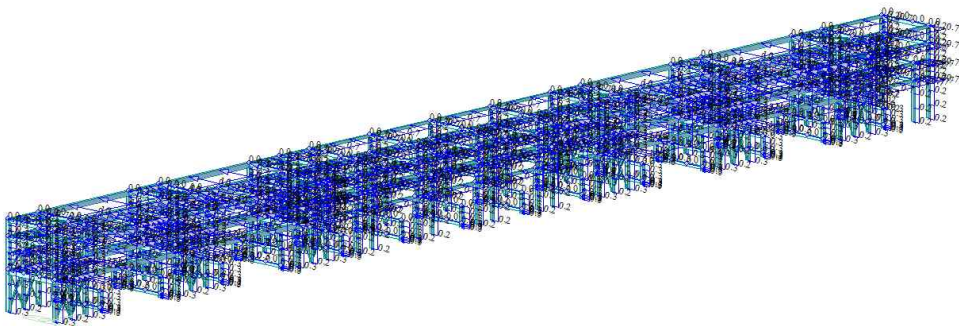


그림 7.5 Structure Wind Load

파이프랙 X1 ~ X42열 Pipe Wind Load

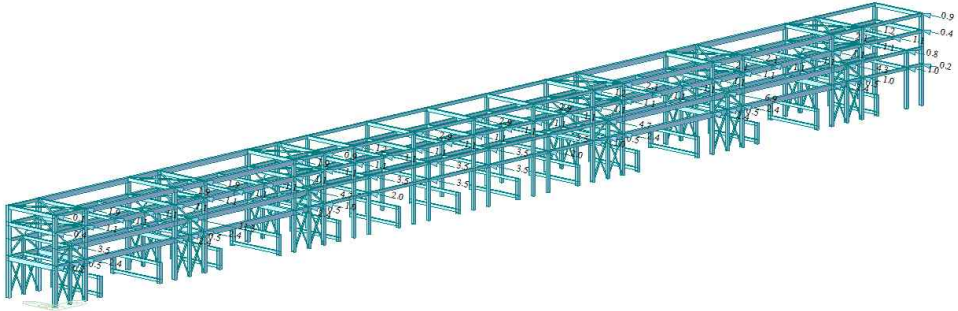


그림 7.6 Pipe Wind Load

7.3.3 Seismic Load

표 7.9 Seismic Load

KDS 41 17 00 : 2022	
유효지반가속도(S)	$0.22 \times 2.0(\text{위험도계수 } I) \times 0.8 = 0.176$
<p>The map shows the Korean peninsula with seismic zones and intensity contours. The zones are labeled with numbers: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, and 19. The zones are roughly rectangular and cover the peninsula. The intensity contours are labeled with numbers: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, and 19. A red dot is located in the southern part of the peninsula, near the border of zones 15 and 16, labeled '여수 산단' (Yeosu Industrial Complex). Other labels include '전라북도' (Chollabuk-do), '전라남도' (Chollanam-do), '경상남도' (Gyeongsangnam-do), '대구광역시' (Daegu Metropolitan City), '울산광역시' (Ulsan Metropolitan City), '부산광역시' (Busan Metropolitan City), and '광주광역시' (Gwangju Metropolitan City).</p>	

지반종류	S ₄
중요도계수(I_E)	1.5(특)
반응수정계수(R)	3.0
	역추형 시스템에 속하지 않으면서 강구조기준의 일반규정만을 만족하는 철골구조시스템
하중 적용	지진하중의 경우 등가정적해석법으로 산정하여 MIDAS GEN의 Static Seismic Loads로 적용

7.4 구조 검토 결과

7.4.1 구조검토 결과

3D Modeling

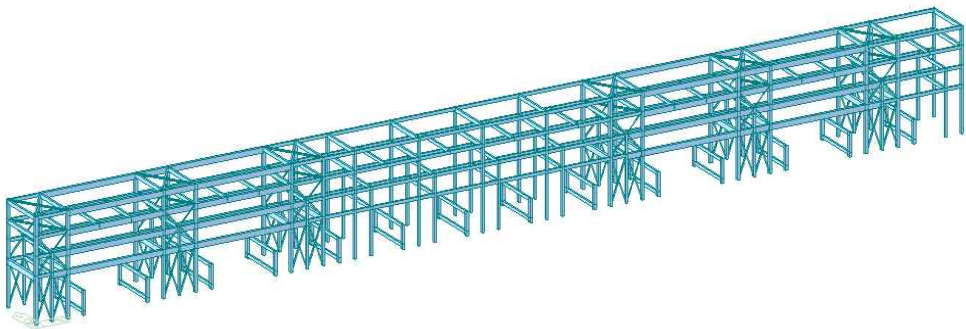


그림 7.7 X1~X42열 3D Modeling

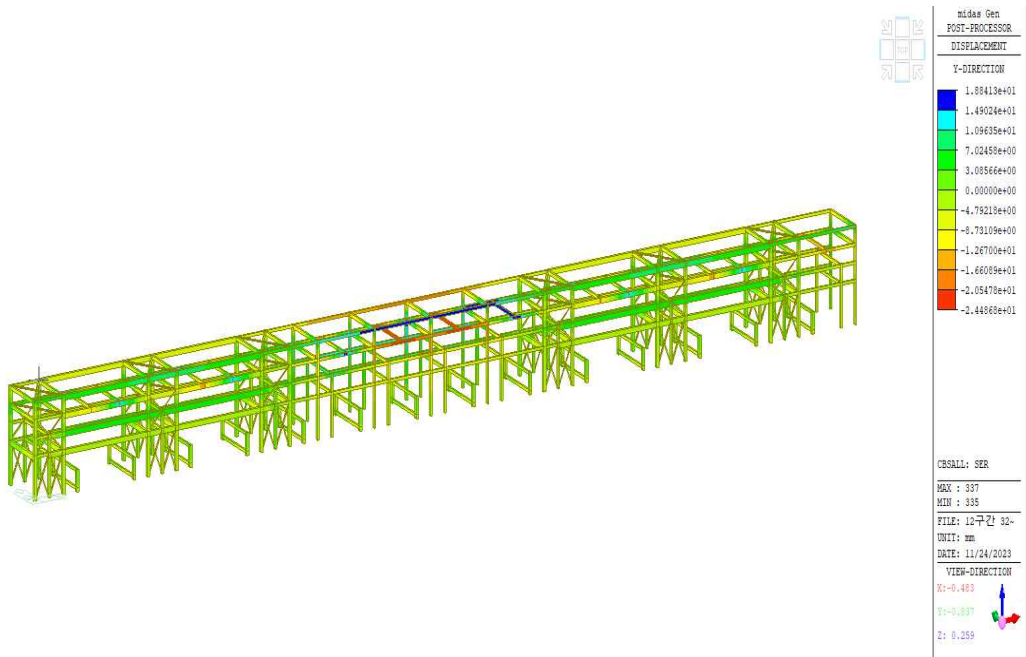
7.4.2 부재 응력 검토 결과

CH K	MEMB COM	SECT SHR	SEL	Section		LCB	Len Lb	Ly Lz	Cb	Ky Kz	B1y B1z	B2y B2z	RalPc	Pu	Muy	Muz	Vuy	Vuz	Tu	Def
				Material	Fy									pPn	pMny	pMnz	pVny	pVnz	pTn	Defa
OK	598	1	□	SG1, H 194x150x6/9	0.23500	5	4500.00	4500.00	1.000	1.000	1.001	1.000	0.009	-3.6301	28438.9	-2783.5	2.45700	-25.246	0.00000	-
				SS235			4500.00	4500.00		1.000	1.007	1.000		394.670	52221.0	21996.0	342.630	164.124	0.00000	-
OK	578	2	□	SG2, H 244x175x7/11	0.23500	7	4500.00	4500.00	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	6.51377	-17969	3319.01	-1.9867	-13.599	0.00000	-
				SS235			4500.00	4500.00		1.000	1.000	1.000		1189.48	99477.6	36589.5	488.565	240.828	0.00000	-
OK	487	4	□	SG4, H 340x250x9/14	0.23500	7	4500.00	4500.00	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	2.04731	-55416	6843.76	-4.1338	-37.363	0.00000	-
				SS235			4500.00	4500.00		1.000	1.000	1.000		2146.73	269231	93867.5	888.300	431.460	0.00000	-
OK	263	6	□	SC1, H 200x200x8/12	0.27500	5	3000.00	3000.00	1.000	1.000	1.000	1.000	0.035	-45.103	29711.5	-728.45	-0.8886	10.9105	0.00000	-
				SM275			3000.00	3000.00		1.000	1.000	1.000		1289.49	126528	60390.0	712.800	264.000	0.00000	-
OK	246	7	□	SC2, H 250x250x9/14	0.27500	5	3000.00	3000.00	1.000	1.000	1.000	1.000	0.045	-90.109	42684.7	-2220.8	-2.0634	25.0094	0.00000	-
				SM275			3000.00	3000.00		1.000	1.000	1.000		2010.70	237848	109690	1039.50	371.250	0.00000	-
OK	178	8	□	L 90x7	0.23500	35	3354.10	3354.10	1.000	1.000	1.052	1.000	0.117	-8.4525	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-
				SS235			3354.10	3354.10		1.000	1.052	1.000		72.0894	5497.76	3336.04	0.00000	0.00000	0.00000	-
OK	611	9	□	2L 90x7	0.23500	31	5408.33	5408.33	1.000	1.000	1.108	1.000	0.124	-13.105	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-
				SS235			5408.33	5408.33		1.000	1.057	1.000		106.061	9686.37	8039.30	0.00000	0.00000	0.00000	-

그림 7.8 부재 응력 검토 결과

7.4.3 변위 검토 결과

구조물 변위값 검토 결과, 장변방향(Y-Direction)의 최대 변위는 24.48mm로 나타났다. 파이프랙 구조물 특성상 슬래브가 없는 브레이싱 구조물이기에 일반적인 강 구조물의 변위 허용범위인 구조물 최대높이(H) 1/150로 하였을 때 최대높이 6,600mm의 허용범위는 44.00mm로 해당 구조물의 최대변위 허용범위 이내 인 것을 확인할 수 있었다.



24.48mm < H/150(44.00mm) OK

그림 7.9 변위 검토 결과

7.4.4 구조검토 결과

표 7.10 철골보 (STEEL BEAM)

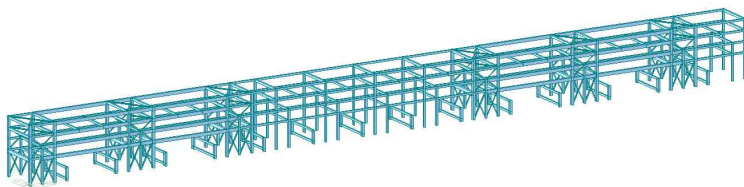
부재명	Combined Ratio	Shear Force Ratio	검토결과
SG1	0.68	0.15	0 K
SG2	0.27	0.06	0 K
SG3	0.28	0.09	0 K

표 7.11 철골 기둥 (STEEL COLUMN)

부재명	Combined Ratio	Shear Force Ratio	검토결과
SC1	0.26	0.04	0 K
SC2	0.22	0.07	0 K

7.4.5 보강안

3D Modeling



단변방향

보강 불필요

장변방향

보강 불필요

그림 7.10 보강안

7.4.6 구조 안전성 검토 DATA

midas Gen Academic
Steel Checking Result

Certified by :

	Company	Project Title
	Author	File Name

12구간 32번 ~ 73번.mgb

1. Design Information

Design Code : KDS 41 30 : 2022
 Unit System : kN, mm
 Member No : 263
 Material : SM275 (No:2)
 (Fy = 0.27500, Es = 210.000)
 Section Name : SC1 (No:6)
 (Rolled : H 200x200x8/12).
 Member Length : 3000.00

2. Member Forces

Axial Force
Fxx = -45.103 (LCB: 5, POS:1)

Bending Moments
My = 29711.5, Mz = -728.45

End Moments
Myi = 29711.5, Myj = -2314.1 (for Lb)
Myi = 29711.5, Myj = -2314.1 (for Ly)
Mzi = -728.45, Mzj = 515.484 (for Lz)

Shear Forces
Fyy = -0.6886 (LCB: 10, POS:1)
Fzz = 10.9105 (LCB: 5, POS:1)

Depth	200.000	Web Thick	8.00000
Top F Width	200.000	Top F Thick	12.0000
Bot. F Width	200.000	Bot. F Thick	12.0000
Area	6353.00	Asz	1600.00
Qyb	32072.0	Qzb	5000.00
Iyy	47200000	Izz	16000000
Ybar	100.000	Zbar	100.000
Syy	472000	Szz	1600000
ry	86.2000	rz	50.2000

3. Design Parameters

Unbraced Lengths : Ly = 3000.00, Lz = 3000.00, Lb = 3000.00
 Effective Length Factors : Ky = 1.00, Kz = 1.00
 Moment Factor / Bending Coefficient : Cmy = 0.85, Cmz = 0.85, Cb = 1.00

4. Checking Results

Slenderness Ratio
KL/r = 59.8 < 200.0 (Memb:263, LCB: 5) 0.K

Axial Strength
Pu/phiPn = 45.10/1289.49 = 0.035 < 1.000 0.K

Bending Strength
Muy/phiMny = 29712/ 128528 = 0.235 < 1.000 0.K
 Muz/phiMnz = 728.5/60390.0 = 0.012 < 1.000 0.K

Combined Strength (Compression+Bending)
 Pu/phiPn = 0.03 < 0.20
 Rmax = Pu/(2*phiPn) + [Muy/phiMny + Muz/phiMnz] = 0.264 < 1.000 0.K

Shear Strength
 Vuy/phiVny = 0.001 < 1.000 0.K
 Vuz/phiVnz = 0.041 < 1.000 0.K

Modeling, Integrated Design & Analysis Software
http://www.MidasUser.com
Gen 2024
Print Date/Time : 11/24/2023 21:03

그림 7.11 SC1 검토결과

midas Gen Academic

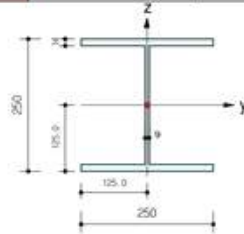
Steel Checking Result

Certified by :

MIDAS	Company		Project Title	
	Author		File Name	12구간 32번 ~ 73번.mgb

1. Design Information

Design Code KDS 41 30 : 2022
 Unit System kN, mm
 Member No 246
 Material SM275 (No:2)
 (Fy = 0.27500, Es = 210.000)
 Section Name SC2 (No:7)
 (Rolled : H 250x250x9/14).
 Member Length : 3000.00



2. Member Forces

Axial Force Fxx = -90.109 (LCB: 5, POS:1)
 Bending Moments My = 42684.7, Mz = -2220.8
 End Moments Myi = 42684.7, Myj = -31461 (for Lb)
 Mzi = -2220.8, Mzj = 2361.98 (for Lz)
 Shear Forces Fyy = -2.0634 (LCB: 10, POS:1)
 Fzz = 25.0094 (LCB: 5, POS:1)

Depth	250.000	Web Thick	9.00000
Top F Width	250.000	Top F Thick	14.0000
Bot. F Width	250.000	Bot. F Thick	14.0000
Area	9218.00	Asz	2250.00
Oyb	52049.4	Ozb	7812.50
Iyy	108000000	Izz	36500000
Ybar	125.000	Zbar	125.000
Syy	857000	Szz	292000
ry	108.000	rz	62.9000

3. Design Parameters

Unbraced Lengths Ly = 3000.00, Lz = 3000.00, Lb = 3000.00
 Effective Length Factors Ky = 1.00, Kz = 1.00
 Moment Factor / Bending Coefficient
 Ony = 0.85, Onz = 0.85, Ob = 1.00

4. Checking Results

Slenderness Ratio
 $KL/r = 47.7 < 200.0$ (Memb:246, LCB: 5)..... 0.K
 Axial Strength
 $Pu/\phi Pn = 90.11/2010.70 = 0.045 < 1.000$ 0.K
 Bending Strength
 $Muy/\phi Mn_y = 42685/237848 = 0.179 < 1.000$ 0.K
 $Muz/\phi Mn_z = 2221/109890 = -0.020 < 1.000$ 0.K
 Combined Strength (Compression+Bending)
 $Pu/\phi Pn = 0.04 < 0.20$
 $R_{max} = Pu/(2\phi Pn) + [Muy/\phi Mn_y + Muz/\phi Mn_z] = 0.222 < 1.000$ 0.K
 Shear Strength
 $Vuy/\phi Vn_y = 0.002 < 1.000$ 0.K
 $Vuz/\phi Vn_z = 0.067 < 1.000$ 0.K

그림 7.12 SC2 검토결과

midas Gen Academic

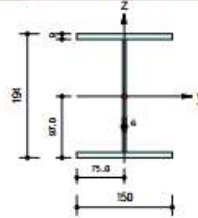
Steel Checking Result

Certified by :

MIDAS	Company		Project Title	
	Author		File Name	12구간 32번 - 73번.mgb

1. Design Information

Design Code KDS 41 30 : 2022
 Unit System kN, mm
 Member No 598
 Material SS235 (No:1)
 (Fy = 0.23500, Es = 210.000)
 Section Name SG1 (No:1)
 (Rolled : H 194x150x6/9)
 Member Length : 4500.00



2. Member Forces

Axial Force Fxx = -3.6301 (LCB: 5, POS: 1/2)
 Bending Moments My = 28438.9, Mz = -2783.5
 End Moments Myi = 0.00000, Myj = 0.00000 (for Lb)
 Myi = 0.00000, Myj = 0.00000 (for Ly)
 Mzi = 0.00000, Mzj = 0.00000 (for Lz)
 Shear Forces Fyy = 2.45700 (LCB: 27, POS: 1)
 Fzz = -25.246 (LCB: 27, POS: 1)

Depth	194.000	Web Thick	6.00000
Top F Width	150.000	Top F Thick	9.00000
Bot. F Width	150.000	Bot. F Thick	9.00000
Area	3901.00	Asz	1164.00
Oyb	24684.5	Ozb	2812.50
Iyy	26900000	Izz	5070000
Ybar	75.0000	Zbar	97.0000
Syy	277000	Szz	67600.0
ry	83.0000	rz	36.1000

3. Design Parameters

Unbraced Lengths Ly = 4500.00, Lz = 4500.00, Lb = 4500.00
 Effective Length Factors Ky = 1.00, Kz = 1.00
 Moment Factor / Bending Coefficient Cmy = 1.00, Cnz = 1.00, Cb = 1.00

4. Checking Results

Slenderness Ratio
 $KL/r = 166.2 < 200.0$ (Mem: 123, LCB: 1) 0.K
 Axial Strength
 $P_u/\phi P_n = 3.630/394.670 = 0.009 < 1.000$ 0.K
 Bending Strength
 $M_{uy}/\phi M_{ny} = 28438.9/52221.0 = 0.545 < 1.000$ 0.K
 $M_{uz}/\phi M_{nz} = 2783.5/21996.0 = 0.127 < 1.000$ 0.K
 Combined Strength (Compression+Bending)
 $P_u/\phi P_n = 0.01 < 0.20$
 $R_{max} = P_u/(2\phi P_n) + [M_{uy}/\phi M_{ny} + M_{uz}/\phi M_{nz}] = 0.676 < 1.000$ 0.K
 Shear Strength
 $V_{uy}/\phi V_{ny} = 0.007 < 1.000$ 0.K
 $V_{uz}/\phi V_{nz} = 0.154 < 1.000$ 0.K

그림 7.13 SG1 검토결과

midas Gen Academic

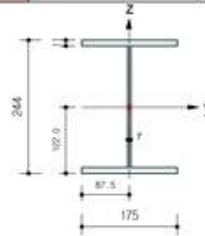
Steel Checking Result

Certified by :

MIDAS	Company		Project Title	
	Author		File Name	12구간 32번 ~ 73번.mgb

1. Design Information

Design Code : KDS 41 30 : 2022
 Unit System : kN, mm
 Member No : 578
 Material : SS235 (No:1)
 (Fy = 0.23500, Es = 210.000)
 Section Name : SG2 (No:2)
 (Rolled : H 244x175x7/11).
 Member Length : 4500.00



2. Member Forces

Axial Force : Fxx = 6.51377 (LCB: 7, POS:1)
Bending Moments : My = -17969, Mz = 3319.01
End Moments : Myl = -17969, Myj = 7800.76 (for Lb)
 Myi = -17969, Myj = 7800.76 (for Ly)
 Mzi = 3319.01, Mzj = -2512.0 (for Lz)
Shear Forces : Fyy = -1.9867 (LCB: 5, POS:J)
 Fzz = -13.599 (LCB: 7, POS:1)

Depth	244.000	Web Thick	7.00000
Top.F Width	175.000	Top.F Thick	11.0000
Bot.F Width	175.000	Bot.F Thick	11.0000
Area	5624.00	Asz	1708.00
Dyb	38198.0	Qzb	3826.13
Iyy	61200000	Izz	9840000
Ybar	87.5000	Zbar	122.000
Syy	502000	Szz	113000
ry	104.000	rz	41.8000

3. Design Parameters

Unbraced Lengths : Ly = 4500.00, Lz = 4500.00, Lb = 4500.00
 Effective Length Factors : Ky = 1.00, Kz = 1.00
 Moment Factor / Bending Coefficient : Cmy = 1.00, Cmz = 1.00, Cb = 1.00

4. Checking Results

Slenderness Ratio
 $KL/r = 107.7 < 200.0$ (Mem:479, LCB: 5) 0.K

Axial Strength
 $P_u/\phi P_n = 6.51/1189.48 = 0.005 < 1.000$ 0.K

Bending Strength
 $M_{uy}/\phi M_{ny} = 17969.3/99477.6 = -0.181 < 1.000$ 0.K
 $M_{uz}/\phi M_{nz} = 3319.0/36589.5 = 0.091 < 1.000$ 0.K

Combined Strength (Tension+Bending)
 $P_u/\phi P_n = 0.01 < 0.20$
 $R_{max} = P_u/(2\phi P_n) + [M_{uy}/\phi M_{ny} + M_{uz}/\phi M_{nz}] = 0.274 < 1.000$ 0.K

Shear Strength
 $V_{uy}/\phi V_{ny} = 0.004 < 1.000$ 0.K
 $V_{uz}/\phi V_{nz} = 0.056 < 1.000$ 0.K

그림 7.14 SG2 검토결과

midas Gen Academic

Steel Checking Result

Certified by :



Company
Author

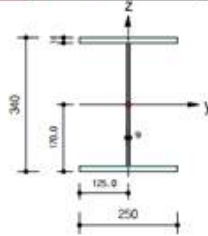
Project Title

File Name

12구간 32번 ~ 73번.mgb

1. Design Information

Design Code KDS 41 30 : 2022
 Unit System kN, mm
 Member No 487
 Material SS235 (No:1)
 (Fy = 0.23500, Es = 210.000)
 Section Name SG4 (No:4)
 (Rolled : H 340x250x9/14).
 Member Length : 4500.00



2. Member Forces

Axial Force Fxx = 2.04731 (LCB: 7, POS:1)
 Bending Moments My = -55416, Mz = 6843.76
 End Moments Myl = -55416, Myj = 36074.1 (for Lb)
 Myl = -55416, Myj = 36074.1 (for Ly)
 Mzl = 6843.76, Mzj = -4878.2 (for Lz)
 Shear Forces Fyy = -4.1338 (LCB: 5, POS:J)
 Fzz = -37.363 (LCB: 7, POS:1)

Depth	340.000	Web Thick	9.00000
Top F Width	250.000	Top F Thick	14.0000
Bot.F Width	250.000	Bot.F Thick	14.0000
Area	10150.0	Asz	3060.00
Oyb	75556.9	Ozb	7812.50
Iyy	217000000	Izz	36500000
Ybar	125.000	Zbar	170.000
Syy	1280000	Szz	292000
ry	146.000	rz	60.0000

3. Design Parameters

Unbraced Lengths Ly = 4500.00, Lz = 4500.00, Lb = 4500.00
 Effective Length Factors Ky = 1.00, Kz = 1.00
 Moment Factor / Bending Coefficient Cmy = 1.00, Cmz = 1.00, Cb = 1.00

4. Checking Results

Slenderness Ratio
 $KL/r = 150.0 < 200.0$ (Mem:97, LCB: 1) 0.K
 Axial Strength
 $Pu/\phi Pn = 2.05/2146.73 = 0.001 < 1.000$ 0.K
 Bending Strength
 $Muy/\phi Mn = 55416/269231 = -0.206 < 1.000$ 0.K
 $Muz/\phi Mn = 6843.8/93867.5 = 0.073 < 1.000$ 0.K
 Combined Strength (Tension+Bending)
 $Pu/\phi Pn = 0.00 < 0.20$
 $Rmax = Pu/(2\phi Pn) + [Muy/\phi Mn + Muz/\phi Mn] = 0.279 < 1.000$ 0.K
 Shear Strength
 $Vuy/\phi Vn = 0.005 < 1.000$ 0.K
 $Vuz/\phi Vn = 0.087 < 1.000$ 0.K

그림 7.15 SG3 검토결과

7.4.7 종합결론

국가산단의 일부 구간에 대한 파이프랙 구조검토를 실시한 결과 철골보의 구조안전성은 모든 보부재가 안전한 것으로 검토되었고, 철골기둥 구조안전성을 검토한 결과 모든 기둥 부재가 안전한 것으로 검토되었다. 또한 철골부재 변위를 검토한 결과 허용범위를 모두 만족하는 것을 검토할 수 있었다. 따라서, 위의 결과를 종합적으로 보았을 때 구조적으로 안전한 것으로 확인된다.

7.5 구조 검토를 통해 손상탐색 부위 예측

구조검토를 통해 철골 부재의 변위를 검토하여 부재에 변형이 가해졌을 때 가장 먼저 변위가 발생하는 부위를 예측하여 손상탐색 기술을 도입해 구조물에 대한 손상을 미연에 예방을 하는 것을 목적으로 하였다.

1. 구조검토를 통한 구조물 취약점 탐색
2. 취약점 파악 후 손상탐색 기술을 도입하여 안전점검 수행
3. 설치된 손상탐색 장비를 모니터링하여 상시 모니터링 체계 구축
4. 상시 모니터링 체계를 통해 구조물 안전성 확보

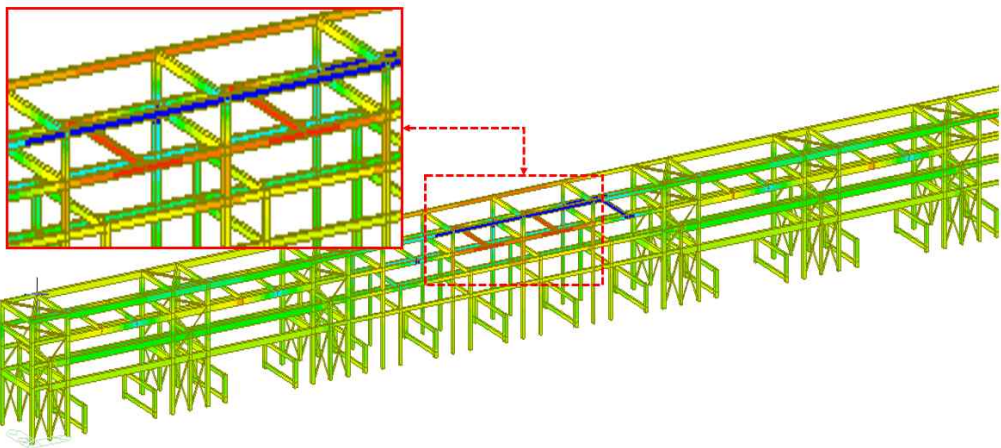


그림 7.16 구조검토를 통한 구조물 취약점 탐색

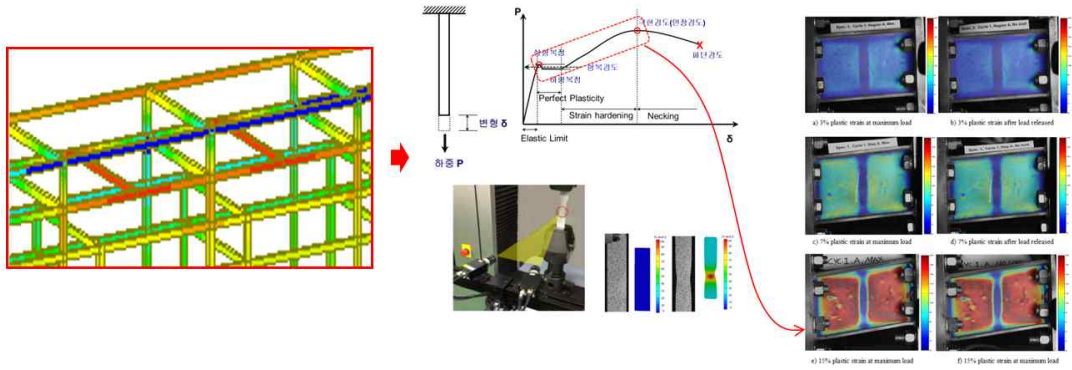


그림 7.17 취약부위 손상탐색 기술 도입하여 안전점검 수행

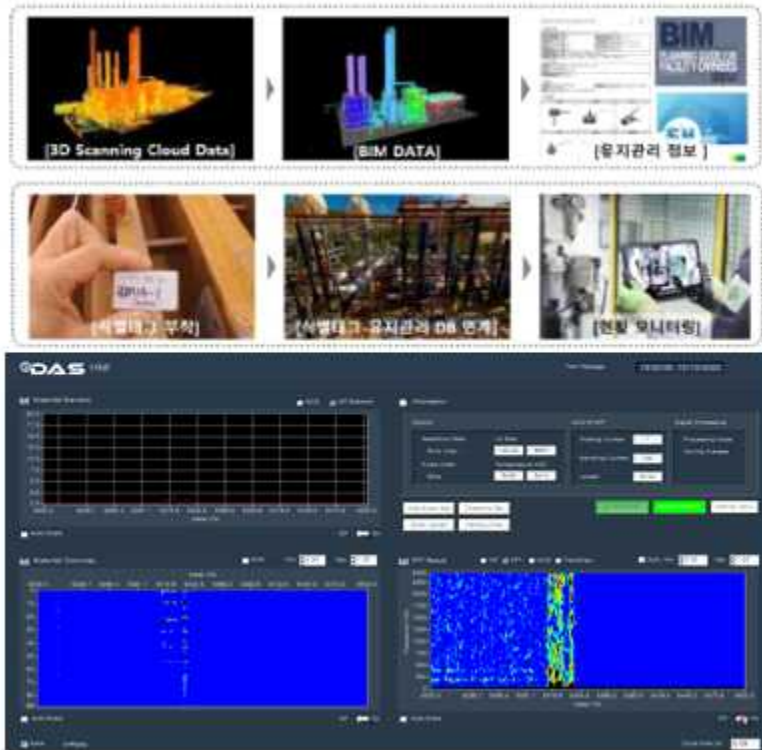


그림 7.18 손상탐색 장비를 통한 상시모니터링 체계 구축

8. 결론

본 논문에서는 강구조물의 정밀 손상탐색을 위한 접촉식 및 비접촉식 손상탐색 기술을 제안하였다. 첫 번째로 강구조물의 국부적인 손상을 측정하기 위한 DIC기법을 활용한 ARAMIS 손상탐색, 경도 측정을 통한 경도·소성변형을 상관관계에 대해 실험적 분석을 진행하였으며, 두 번째로 강구조물의 대규모 구조물에 대한 손상을 측정하기 위해 광섬유 분포 진동 센서(DAS), 광섬유 분포 변형 센서(DSS)에 대한 실험적 분석을 진행하였다. 마지막으로 대규모 구조물에 대한 국부적인 손상 취약 부위 예측을 위해 국가산단 내 일부 구간을 대상으로 구조검토를 진행하여 구조 안전성을 판단하고 구조검토를 통한 손상 취약 부위를 특정하여 손상 탐색 장비 도입 위치를 특정하였다. 이에 대한 결론으로는 아래와 같다.

1) DIC 기법을 활용한 ARAMIS 검출 장비 실험

강구조물을 대상으로 장비의 검출 정확성 및 적용 가능성을 확인하기 위해 보-기둥 접합부 구조물에 대한 동적 실험을 진행한 결과 실험체 BC1에서 패널존 하단부에 설치된 LVDT04번과 LVDT03번의 변위값과 ARAMIS 장비상에 측정된 패널존 하단부의 변위 값을 비교 분석한 결과 0.2mm ~ 0.3mm 정도의 근소한 차이를 보이며 매우 높은 정확도를 확인할 수 있었다. 또한 실험을 진행한 부재는 전체적으로 변위 측정을 할 수는 없는 반면 ARAMIS 장비 측정 데이터상에서는 전체 구간에 대한 변위 측정이 가능하였다. 이 외에도 부재의 변형을 이미지화하여 변형이 진행됨을 손쉽게 육안으로 확인이 가능하였다. DIC기법을 활용한 ARAMIS 검출 장비는 위와 같이 정밀 손상검출에 높은 정확도를 보였지만, 현장에서 사용 가능한 강재 손상 검출 장비로 사용하기 위해서는 현장 사용성 평가가 필요로 하다. DIC기법 특성상 측정에 외부환경에 대해 매우 민감하기 때문에 현장 적용성을 높이기 위한 현장 조건 파악 및 연장 설치 정밀도를 높이기 위한 추가 연구가 요구된다.

2) 강재 경도·소성 변형률에 관한 연구

금속의 소성변형을 측정하는 비파괴적인 방법을 연구하기 위해 휴대용 경도 측정기(모델 JH180)를 활용하여 강재의 경도·소성 변형률 상관관계 실험을 진행하였

다. 변형률이 증가할수록 경도값이 점차 상승하는 것을 확인할 수 있었고, 단조가력 15mm 부근에서 부재의 소성변형이 진행되는 것을 하중-변위 이력곡선에서 확인할 수 있었다. 이에 대한 경도 값을 확인해 보면 탄성영역에서 경도값은 2 ~ 3 정도의 차이가 있지만 소성영역 이후에는 경도값이 5 ~ 8 정도로 2배 이상 커지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 강재 패널 특성상 Tention Filed action이 진행되면서 중심부에 가장 큰 변형이 발생하기 때문에 경도 값도 중심부가 가장 큰 것을 확인하였다.

3) 디지털 안전용 광섬유 센서 측정

대규모 구조물의 손상탐색을 위해서는 장거리의 측정이 가능한 센서가 필요하다. 그리하여 구조물에 대한 진동을 감지하는 광섬유 변형 분포 센서인 DAS (Distributed Acoustic/Vibration Sensor)와 광섬유 분포 진동 센서인 DSS (Distributed Strain Sensor)를 사용하여 강재에 대한 반복가력 및 단조가력 실험을 진행하였다.

3-1) 반복가력 DSS 측정 결과

변형률 패턴 데이터 분석 Point.1

- ◆ 변형률 패턴 데이터상 항복구간에서 변형 스케일이 $\pm 200\mu\epsilon$ 수준에서 $\pm 2000\mu\epsilon$ 수준으로 대폭 상승하였는데 이 구간의 절대편차(median absolute deviation)를 확인하면 데이터값이 급격하게 커진 것을 보아 강재의 항복 시점으로 인한 변형률 스케일 상승으로 확인할 수 있다.

변형률 패턴 데이터 분석 Point.1

- ◆ 변형률 패턴 데이터상 항복점으로 추측되는 18:01 초의 기점에 변형부위가 넓어지기 시작한다. 실험 구간 외에서 $5000\mu\epsilon$ 이상으로 변형이 크게 발생하는 현상이 관찰되었으며, 변형과 변형 구간이 넓어지면서 광섬유 센서의 단선이 발생하였다.

3-2) 반복가력 DAS 측정 결과

강재의 변형 발생 시, 강재 내부 격자형 포설 구간에서는 연속적인 진동 신호가 발생하였다. 연속적인 규칙의 진동 신호는 액추에이터 가력보>Loading Beam)가 +방향에서 -방향으로 움직일 때 진동이 발생하여 규칙적인 진동 신호가 발생하였고, 강재 내부 격자형 포설 구간에서도 연속적으로 강한 이상 진동이 발생하는 것으로 확인하였다.

3-3) 단조가력 DSS 측정 결과

변형률 패턴 데이터 분석 Point.1

- ◆ 변형률 스케일이 $\pm 200\mu\epsilon$ 수준에서 $\pm 2000\mu\epsilon$ 수준으로 대폭 상승하였다. 반복 가력 실험과 동일하게 항복 전조 증상으로 해당 스케일에서 항복 발생 진행됨.

변형률 패턴 데이터 분석 Point.1

- ◆ 신호 크기가 $\pm 1000\mu\epsilon$ 까지 상승 후 노이즈화 현상이 발생된 것을 보아 광섬유 단선 시점으로 판단.

이와 같이 국부적인 손상 검출을 위한 손상탐색 기술과 대규모 구조물에 대한 손상탐색 기술에 대해 실험적 연구를 통해 기술의 정확성과 적합성에 대해 연구하였다. 이러한 손상탐색 기술을 실제 강구조물에 적용하기 위해서는 대규모 구조물에 대한 취약부위 특정이 필요하다. 그리하여 구조물에 대한 구조검토를 통해 구조물 취약부위를 특정할 수 있어야한다. 그리하여 산업단지 내 일부 구간에 대해 구조검토를 진행하였으며, 구조검토 진행 결과 철골 보, 철골 기둥, 구조물 변위 값 모두 안전한 것을 검토할 수 있었다. 모든 구간이 안전한 것으로 확인하였고, 구조검토 결과 취약한 부위를 확인 할 수 있었으며, 취약한 부위에 대한 손상탐색 기술을 도입하여 안전점검을 진행해 단기적으로는 구조검토를 통한 부재의 현재 상태 체크, 장기적으로는 손상탐색 기술을 도입하여 상시 모니터링 체계를 통한 구조물 안전성 확보를 위해 본 연구를 진행하였다.

참고문헌

- [1] 이종한, 이종재 and 김성연. (2015). 외부 환경적 요인에 의한 파이프랙 구조물의 열적 거동. 한국건설순환자원학회 논문집, 3(2), 165-170.
- [2] Jung K. H. and Cha C. J (2008), Examples of Collapse & Damage of Steel Bridges and Repair Measures, International Journal of Steel Structures, KSSC, 20 (1), 14-25.
- [3] 한국공업규격(KS)
- [4] Chen, K., Zeng, X., and Qui, X. (July 2011) "The passive control burst protection device for pressure pipeline", International Conference on Intelligent Control and Information Processing, 1(1), pp. 371-374
- [5] 이종한(Lee Jong-Han), 김남규(Kim Namgyu), 정지은(Jung Jieun), and 송병훈(Song Byunghun). "USN 기반의 파이프랙 모니터링 시스템." 대한토목학회 학술대회 2012.10 (2012): 1930-1933.
- [6] 김경석, and Kim Kyeong-Suk. "디지털 화상 상관법(DIC)의 원리." 한국비파괴 검사학회지 29.6 (2012): 597-602.
- [7] 최인영(In Young Choi), 강영준(Young June Kang), 홍경민(Kyung Min Hong), 고광수(Kwang Su Ko), and 이학성(Hak Sung Lee). "이미지 상관법을 이용한 횡 변형을 측정에 관한 연구." 한국생산제조학회지 23.5 (2014): 498-504.
- [8] Du, Yong, and Zhang-ming Gou. 2019. "Application of the Non-Contact Video Gauge on the Mechanical Properties Test for Steel Cable at Elevated Temperature" Applied Sciences 9, no. 8: 1670.
- [9] Swain, D., Philip, J., Selvan, K., & Pillai, A. (2014). Digital Image Correlation (DIC)-An Invaluable Tool for Non-contact and Full-field Assessment of Critical Regions on Launch Vehicle Structures. Proceeding of ASET-2014, June 2014, 1-4.
- [10] 김경석, 정성균, 강진식, and 장호섭. "ESPI를 이용한 복합재료 구조물의 결함 검출." 한국비파괴검사학회지 21.3 (2001): 299-306.

- [11] 윤성운, 김경석, 조선형, and 강기수. "ESPI를 이용한 전자부품 비파괴 신뢰성 평가." 한국비파괴검사학회지 21.6 (2001): 630-633.
- [12] 성도윤, 백인수, 김재준, 함남혁, Seong Do-Yun, Baek In-Soo, Kim Jea-Jun, and Ham Nam-Hyuk. "구조안전진단에서의 3D 레이저 스캐너 투입 성과 분석." KIBIM Magazine 11.3 (2021): 34-44.
- [13] 차희성(Cha Hee-Sung). "ICT 스마트 건축 재난관리 기술의 현재와 미래." 建築 67.10 (2023): 43-46.
- [14] 윤희철(Yoon Hyungchul). "영상기반 구조물 변위측정 기술." 建築 67.10 (2023): 36-38.
- [15] 이상훈(Lee Sanghoon). "스마트 복합재난 대응을 위한 커넥티드 디지털 트윈." 建築 67.10 (2023): 39-42.
- [16] 정해용(Jung Hae Yong), 최상식(Choi Sang Sik), 이흥수(Lee Heung Su), and 박승희(Park Sung Hee). "마그네틱 센싱 기반 강구조물 손상검출 시스템 기초연구." 대한토목학회 학술대회 2017.10 (2017): 1377-1378.
- [17] Nashid, H., Ferguson, W. G., Clifton, G. C., Hodgson, M., Battley, M., Seal, C., & Choi, J. H. (2014). Non-destructive method to investigate the hardness-plastic strain relationship in cyclically deformed structural steel elements. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 47 (3), 181-189.
- [18] 김한선, 김주원, 유병준, 김원규, and 박승희. "강구조물 진단을 위한 누설자속 기반 강판 손상의 이미지화." 한국구조물진단유지관리공학회 논문집 23.7 (2019): 129-136.
- [19] Krishnan, S. A., Baranwal, A., Moitra, A., Sasikala, G., Albert, S. K., Bhaduri, A. K., Harmain, G. A., Jayakumar, T., & Kumar, E. R. (2014). Assessment of deformation field during high strain rate tensile tests of RAFM steel using DIC technique. Procedia Engineering, 86, 131-138.
- [20] Monsberger, C. M., & Lienhart, W. (2021). Distributed fiber optic shape sensing of concrete structures. Sensors, 21(18), 1-25.
- [21] 광성유 브래그 격자 센서를 이용한 복합재 구조물의 변형을 및 파손신호 동시 측정.pdf. (n.d.).
- [22] 김성완 and 김남식. (2009). Digital Image Correlation기법을 이용한 구조

물의 다중 동적변위응답 측정. 한국지진공학회논문집, 13(3), 11-19.

[23] KDS 41 12 00 건축물 설계하중

[24] New Saudi Aramco Best Practice (SABP-007).

[25] AISC (1997) Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction Inc., Chicago

[26] Pavlina, E. J., & Van Tyne, C. J. (2008). Correlation of Yield strength and Tensile strength with hardness for steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17(6), 888-893.

[27] Monsberger, C. M., & Lienhart, W. (2021). Distributed fiber optic shape sensing of concrete structures. *Sensors*, 21(18), 1-25.

[28] Ho, J., Young, S., & Kyeong, S. (n.d.). Pipe-Rack구조물의 내진성능평가 A Study of Earthquake Characteristics of Pipe-Rack Structure. 2213-2216.

[29] Code, L. (n.d.). PIPERACK 구조물의 유지관리 방안연구 A Study on the Safety Maintenance Management Method of 최 현 석 한양대학교 공학대학원.

[30] Lee, J. K. (2018). Experimental Study on Improvement of Pipe-rack Joint. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance ...*, 22(4), 1-9.

[31] Kim. (2014). Cyclic Loading Test on Connection of SRC Column-Composite Beam Consisting of H-Section and U-Section Members. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 26(4), 263.

[32] Clifton, C., Nashid, H., Ferguson, G., Hodgson, M. A., Seal, C., Bruneau, M., Gardiner, S. (2012). Performance of eccentrically braced framed buildings in the christchurch earthquake series of 2010/2011. Paper presented at the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal

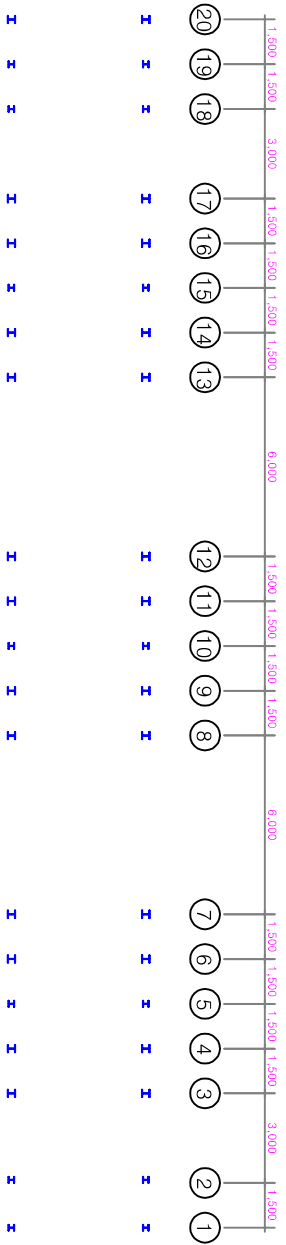
[33] GOM. (2016). Digital image correlation and strain computation basics. *GOM Testing: Technical Documentation*, V8 SR1(0), 1-30.

[34] Lee, J.-H., Lee, J.-J., & Kim, S.-Y. (2015). Thermal Behavior of a Pipe-Rack Structure Subjected to Environmental Factors. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 3(2), 165-170.

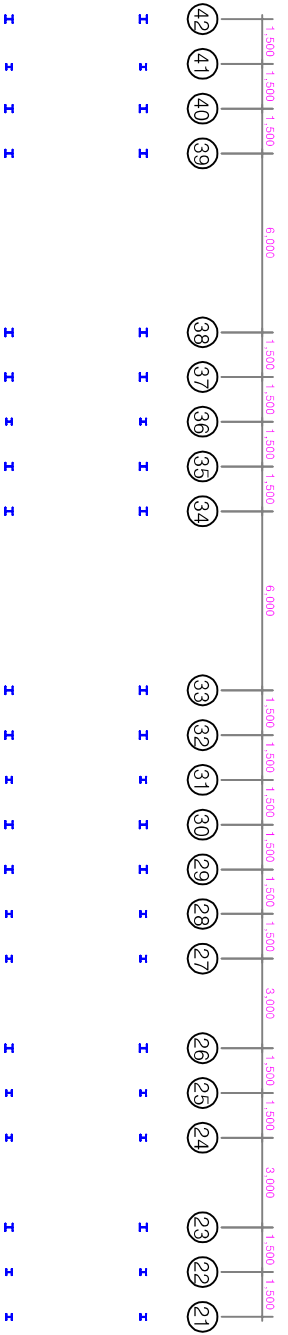
[35] 양재영(Yang Jae Young), 최재혁(Choi Jae Hyouk), and 지관식(Ji Gwan Sik). "DIC - TRITOP 측정 기술을 활용한 파이프랙 강구조물의 NDT기술 현황 및 전망." *한국강구조학회 학술대회 발표집 33.1 (2022): 169-170.*

- [36] 마그네틱 기반 Portable 강구조물 손상검출 시스템 개발. (2020).
- [37] 김지은 & 홍창희(2018). 효과적인 재난 대응을 위한 3차원 BIM 기반 재난 통합 정보 시스템활용 서비스 제시. 한국산학기술학회논문지, 19(10)
- [38] 박수열(Park Soo Yeol), 박재우(Park Jae Woo), 송병훈(Song Byung Hun), 이용환(Lee Yong Hwan), and 여금수(Yeo Keum Soo). "IoT 기술을 적용한 플랜트 안전관리시스템 구축." 대한토목학회 학술대회 2012.10 (2012): 2084-2087.
- [39] Monitoring, D., Column, O. F., & Deformation, A. (2009). Static and Dynamic Monitoring of Column Axial Deformation of. 55, 1-6.
- [40] 방형준, 홍창선, 김천곤, "안정화된 광섬유 브래그 격자 센서 시스템을 이용한 실시간 충격위치검출에 관한 연구." 2004_9_日本音響学会講演論文集.Pdf. (n.d.).
- [41] 三上降男. (2007). 光ファイバ変位センサ (Sofa 센サ) による構造物のヘルスマニタリング. Ihi技報, 47(4).
- [42] 이승재, and Lee Seung-Jae. "광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 텐서그리티 구조물의 변형 계측." 한국공간구조학회지 8.6 (2008): 95-100.
- [43] Lichun, K., He, L., Yili, R., Kai, L., Mingyu, S., Jian, S., & Xin, L. (2021). Application and development trend of artificial.pdf. 21(1), 1-10.
- [44] 광섬유센서를 이용한 교량안전진단 기술개발 연차보고서. (2000). 한국건설기술연구원
- [45] 고종인(Jong-In Koh), 방형준(Hyung-Joon Bang), 김천곤(Chun-Gon Kim), and 홍창선(Chang-Sun Hong). "광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 복합재 구조물의 변형을 및 파손신호 동시 측정." 韓國航空宇宙學會誌 32.7 (2004): 43-50.

부록 A
파이프랙 구조물 도면

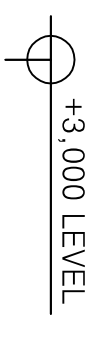
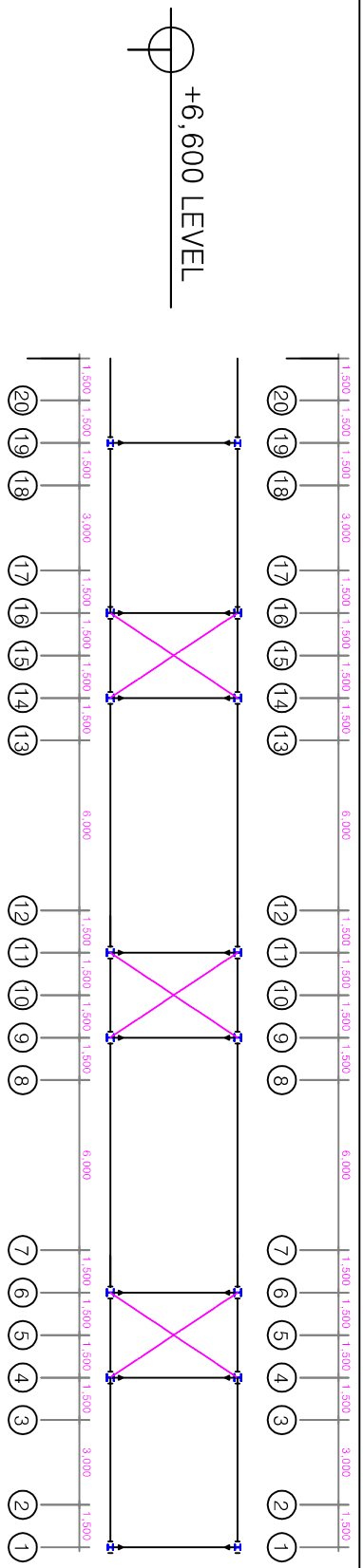


X1~X20열



X1~X20열

축척	도면명	도면번호
None	구조평면도 1	

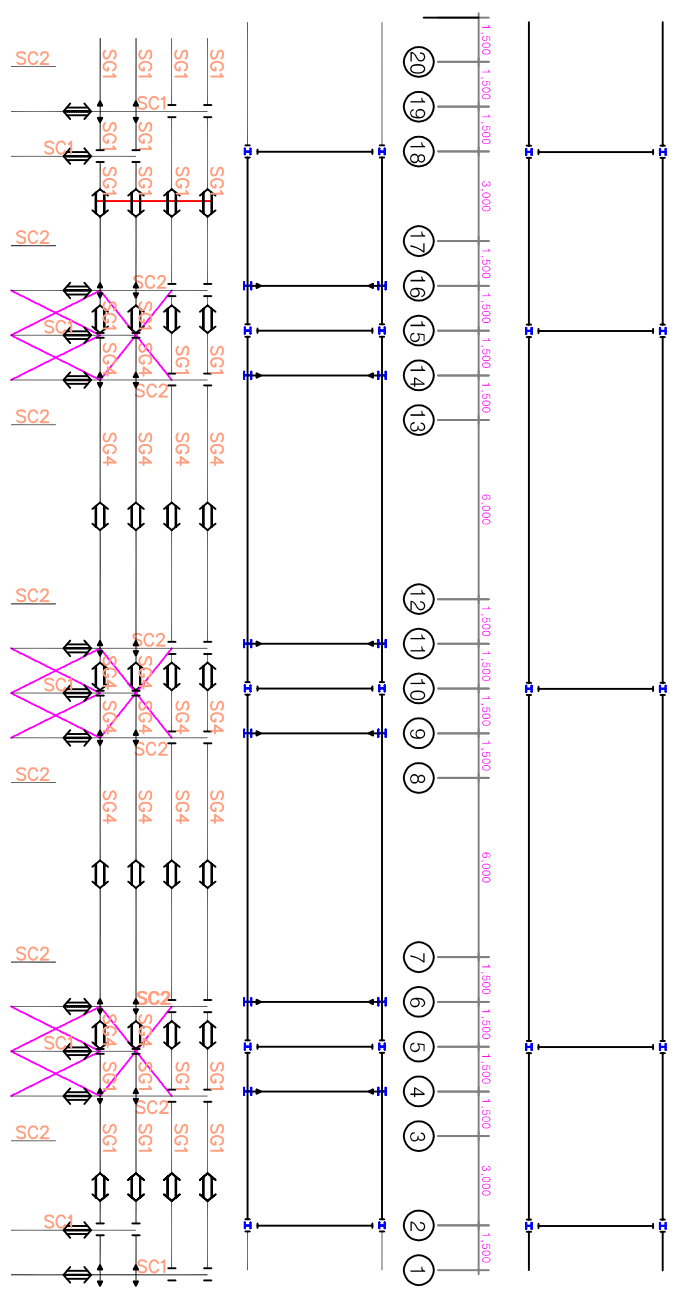


NOTE

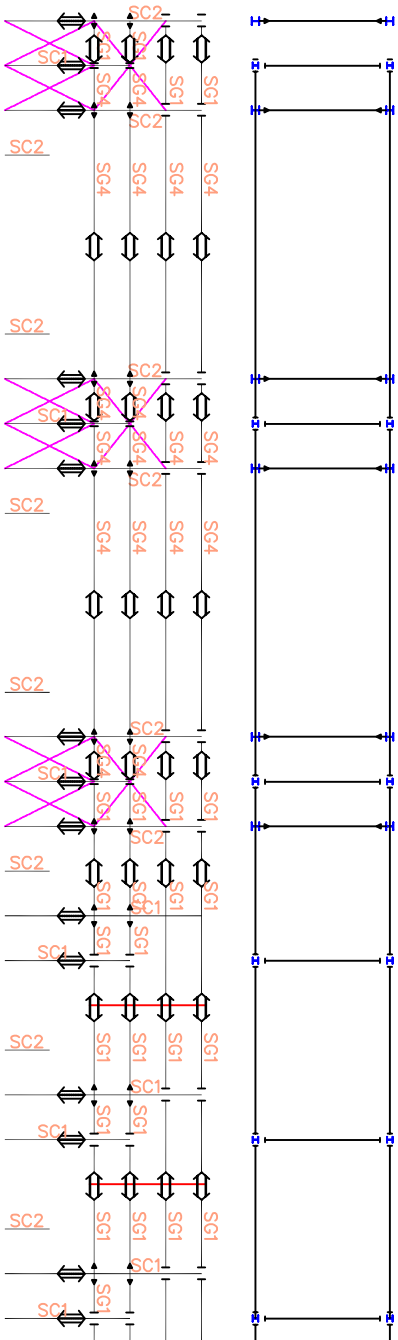
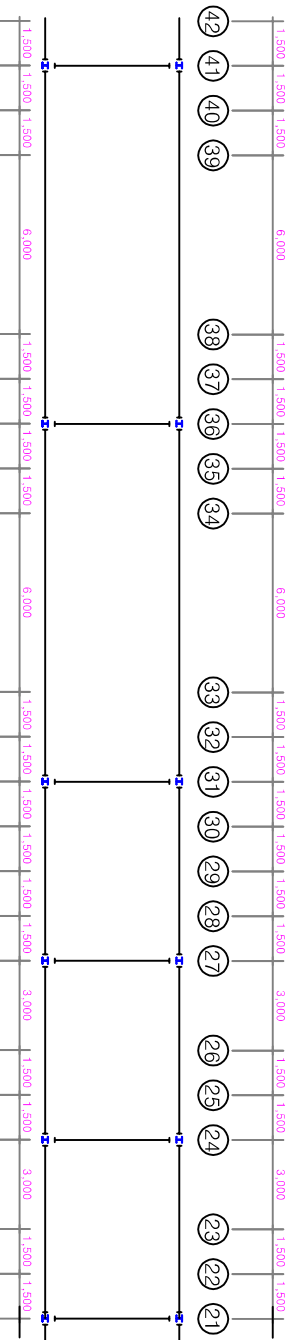
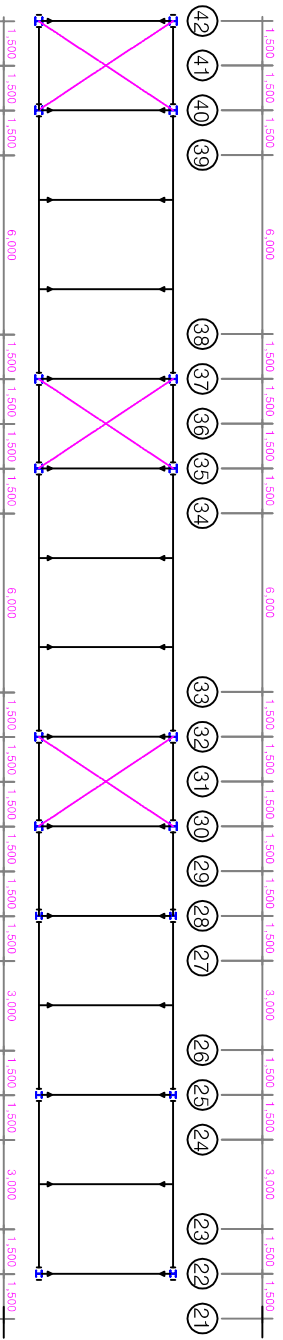
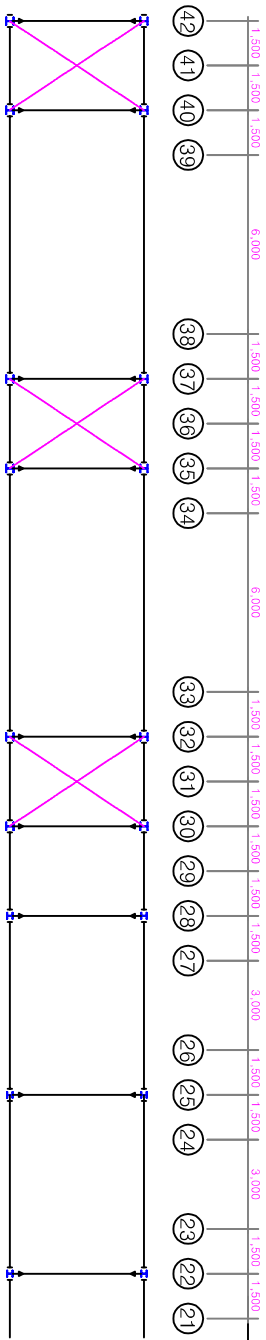
1. 강재의 종류 및 강도
Beam & Brace = SS235
Column & Girder = SS235
2. : MOMENT CONNECTION
3. : SHEAR CONNECTION
4. MEMBER LIST
Beam & Girder

MEMBER LIST	SIZE	MATERIAL
SG1	H-194x150x6x9	SS235
SG2	H-244x175x7x11	SS235
SG3	H-340x250x9x14	SS235

Column	SIZE	MATERIAL
SC1	H-200x200x8x12	SM275
SC2	H-250x250x9x14	SM275



	축척	도면명	도면번호
	None	X1~X20열 골구조도	

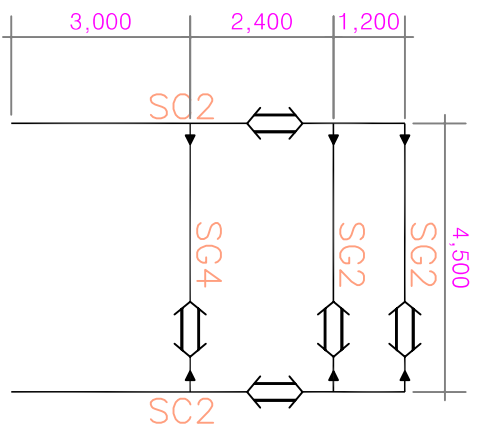


NOTE

1. 강체의 종류 및 강도
Beam & Brace = SS235
Column & Girder = SS235
2. : MOMENT CONNECTION
3. : SHEAR CONNECTION
4. MEMBER LIST
Beam & Girder

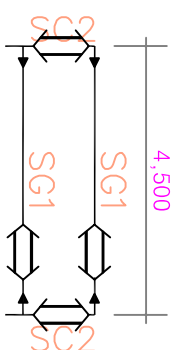
MEMBER LIST	SIZE	MATERIAL
SG1	H-194x150x6x9	SS235
SG2	H-244x175x7x11	SS235
SG3	H-340x250x8x14	SS235
Column		
MEMBER LIST	SIZE	MATERIAL
SC1	H-200x200x8x12	SM275
SC2	H-250x250x8x14	SM275

축척	도면명	도면번호
None	X21~X42열 골구조도	



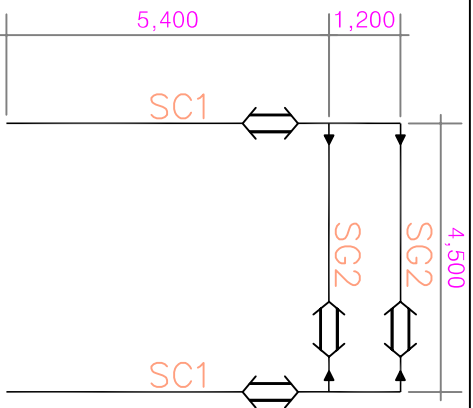
헤당구간 X열 콤구조도

4 6 9 11 14 16 30 32 35 37 40 42



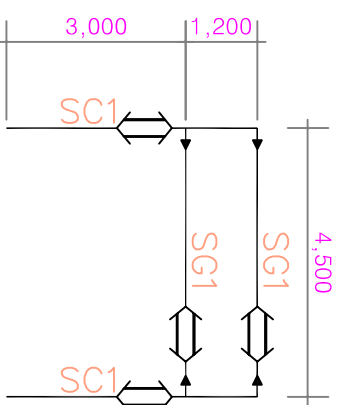
헤당구간 X열 콤구조도

3 7 8 12 13 17 20 23 26 29 33 34 38 39



헤당구간 X열 콤구조도

1 19 22 25 28



헤당구간 X열 콤구조도

2 5 10 15 18 21 24 27 31 36 41

축척	도면명	도면번호
None	헤당 X열 콤구조도-1	