



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

박사학위 논문

# IoT 센싱을 이용한 현수교의 동적 거동 분석에 관한 연구

조선대학교 대학원

토목공학과

문 인 기

# IoT 센싱을 이용한 현수교의 동적 거동 분석에 관한 연구

**A Study on Dynamic Behavior Analysis of Suspension Bridge  
Using IoT Sensing**

2024년 2월 23일

조선대학교 대학원

토목공학과

문 인 기

# IoT 센싱을 이용한 현수교의 동적 거동 분석에 관한 연구

지도교수 박 정 응

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함


2023년 10월


조선대학교 대학원


토목공학과


문 인 기


# 문인기의 박사학위논문을 인준함.

위원장 이성로 (인) 

위원 정명훈 (인) 

위원 김대현 (인) 

위원 이희영 (인) 

위원 박정웅 (인) 

2024년 1월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

<b>제 1 장 서론</b> .....	1
1.1 연구 배경과 목적 .....	1
1.2 연구 내용 및 방법 .....	2
1.3 연구 동향 .....	4
<b>제 2 장 이론적 고찰</b> .....	7
2.1 사물인터넷(IoT) .....	7
2.1.1 사물인터넷(IoT) 빅데이터(Big Data) 개념 .....	7
2.1.2 사물인터넷(IoT) 플랫폼 .....	8
2.1.3 빅데이터(Big Data) .....	10
2.1.4 사물인터넷(IoT) 적용 분야 .....	11
2.2 국내·외 IoT 산업 현황 .....	12
2.2.1 기술 발전 방향 및 활용사례 .....	12
2.2.2 IoT 산업 시장동향 .....	17
<b>제 3 장 IoT 센싱 계측을 위한 모니터링 시스템 구축</b> .....	20
3.1 개요 .....	20
3.2 A대교 .....	21
3.3 IoT 센싱 계측 모니터링 시스템 구축 .....	22
3.3.1 계측시스템 .....	22
3.3.2 동적 거동 계측기 종류 .....	28
3.3.3 동적 계측시스템 구축 .....	34

<b>제 4 장 IoT 센싱 모니터링 시스템을 활용한 동적 거동 계측 결과</b> .....	52
4.1 개요 .....	52
4.2 계측 방법 .....	52
4.2.1 계측데이터 분석 및 평가 .....	52
4.2.2 계측항목 .....	53
4.3 구조부재별 계측데이터 획득실험 결과 .....	54
4.3.1 온도계 및 풍향풍속계 .....	54
4.3.2 주탑 2축 경사계 .....	57
4.3.3 주탑 2축 가속도계 .....	63
4.3.4 주탑 지진계 .....	70
4.3.5 보강거더 2축 가속도계 .....	74
4.3.6 보강거더 동적 변형률계 .....	86
4.3.7 타이다운로프, 행어로프 1축 가속도계 .....	96
4.3.8 앵커리지 스트랜드 정적 변형률계 .....	116
<b>제 5 장 IoT 센싱을 활용한 A대교 동적 거동 특성 분석</b> .....	122
5.1 개요 .....	122
5.2 구조부재별 풍속변화 이력 .....	123
5.3 풍속변화에 따른 구조부재별 진동 가속도 변화 분석 .....	124
5.3.1 보강형 진동 가속도 변화 .....	124
5.3.2 풍속 대비 보강형 진동 가속도 변화 .....	126
5.3.3 주탑 진동 가속도 변화 .....	128
5.3.4 풍속 대비 주탑 진동 가속도 변화 .....	130
5.3.5 행어로프 진동 가속도 변화와 장력과의 관계 .....	132
5.3.6 풍속 대비 행어로프 진동 가속도 변화 .....	134
5.4 보강형 동적 특성 분석 .....	136
5.4.1 감쇠 특성 일반 이론 .....	136
5.4.2 감쇠비 계산 .....	138

제 6 장 FE Model과 IoT를 활용한 현수교의 건전도 분석 .....	143
6.1 개요 .....	143
6.2 FE Model .....	145
6.3 교면 포장 보수공사에 따른 교량 응답 검토 .....	146
6.4 소결 .....	151
 제 7 장 결 론 .....	 152
 참고문헌 .....	 156



## 표 목 차

표2.1 IoT의 적용 분야 .....	11
표2.2 공공부문의 IoT 실증사업 .....	14
표2.3 각국의 사물인터넷 정책 및 특성 .....	16
표2.4 국내 IoT 시장규모 추정 .....	17
표2.5 국내 IoT 사업체 매출액 .....	17
표2.6 세계 IoT 시장규모 추정 .....	18
표2.7 IoT 분야별 규모 전망 .....	18
표2.8 IoT 분야별 규모 전망 .....	19
표2.9 분야별 IoT 시장 전망 .....	19
표3.1 A대교 개요 .....	21
표3.2 계측시스템 구축 개요 .....	22
표3.3 계측시스템 통신 구성 .....	23
표3.4 계측 센서 항목 및 구성 .....	25
표3.5 계측기 배치 .....	26
표3.6 함체 배치 .....	27
표3.7 계측 센서 사양 .....	28
표3.8 계측기기 사양 .....	31
표3.9 공용 중 센서별 ID .....	34
표3.10 공용 중 계측시스템 사용 케이블 정보 .....	37
표3.11 공용 중 계측시스템 배선 .....	38
표3.12 온도계 설치 전경 및 설치 방법 .....	39
표3.13 풍향풍속계 설치 전경 및 설치 방법 .....	40
표3.14 2축 경사계 설치 전경 및 설치 방법 .....	41
표3.15 2축 가속도계 설치 전경 및 설치 방법 .....	42
표3.16 GPS 설치 전경 및 설치 방법 .....	43
표3.17 지진계 설치 전경 및 설치 방법 .....	44
표3.18 신축 이음계 설치 전경 및 설치 방법 .....	45
표3.19 동적 변형률계 설치 전경 및 설치 방법 .....	46
표3.20 광섬유 변형률계 설치 전경 및 설치 방법 .....	47

표3.21 1축 가속도계 설치 전경 및 설치 방법 .....	48
표3.22 정적 변형률계 설치 전경 및 설치 방법 .....	49
표3.23 변위계 설치 전경 및 설치 방법 .....	50
표3.24 공용 중 데이터 수집 장치 합체 설치 .....	51
표4.1 계측 데이터 획득 실험 분석 내용 .....	53
표4.2 부재별 계측항목 .....	53
표4.3 시험 기간 내 일간 온도 편차 .....	56
표4.4 PY1 주탑 변위 변화 .....	57
표4.5 PY2 주탑 변위 변화 .....	60
표4.6 PY1 주탑 가속도진폭 변화 .....	63
표4.7 PY2 주탑 가속도진폭 변화 .....	67
표4.8 PY1 주탑 기초부 가속도진폭 변화 .....	70
표4.9 PY1 주탑 기초부 가속도진폭 변화 .....	71
표4.10 PY2 주탑 기초부 가속도진폭 변화 .....	72
표4.11 PY2 주탑 기초부 가속도진폭 변화 .....	73
표4.12 PY1 측경간 1/2지점 가속도진폭 변화 .....	74
표4.13 중앙경간 1/2지점 가속도진폭 변화 .....	77
표4.14 PY2 측경간 1/2지점 가속도진폭 변화 .....	81
표4.15 보강거더 연직 방향 고유진동수 .....	84
표4.16 PY1 주탑 연결부 보강거더 응력 변화 .....	86
표4.17 중앙경간 1/2지점 응력 변화 .....	90
표4.18 PY2 주탑 연결부 보강거더 응력 변화 .....	93
표4.19 타이다운로프 제원 및 물성치 .....	96
표4.20 타이다운로프 장력 변화 .....	97
표4.21 행어로프 제원 및 물성치 .....	99
표4.22 행어로프 장력 변화 .....	99
표4.23 행어로프 제원 및 물성치 .....	103
표4.24 행어로프 장력 변화 .....	103
표4.25 자유진동 시 타이다운로프 1번 서측 장력 .....	110
표4.26 자유진동 시 타이다운로프 1번 동측 장력 .....	110
표4.27 자유진동 시 타이다운로프 2번 서측 장력 .....	111
표4.28 자유진동 시 타이다운로프 2번 동측 장력 .....	111

표4.29 자유진동 시 행어로프 7번 동측 장력 .....	111
표4.30 자유진동 시 행어로프 10번 동측 장력 .....	112
표4.31 자유진동 시 행어로프 13번 동측 장력 .....	112
표4.32 자유진동 시 행어로프 16번 동측 장력 .....	112
표4.33 자유진동 시 행어로프 19번 동측 장력 .....	113
표4.34 자유진동 시 행어로프 22번 동측 장력 .....	113
표4.35 자유진동 시 행어로프 71번 서측 장력 .....	113
표4.36 자유진동 시 행어로프 74번 서측 장력 .....	114
표4.37 자유진동 시 행어로프 77번 서측 장력 .....	114
표4.38 자유진동 시 행어로프 80번 서측 장력 .....	114
표4.39 자유진동 시 행어로프 83번 서측 장력 .....	115
표4.40 자유진동 시 행어로프 86번 서측 장력 .....	115
표4.41 자유진동 시 타이다운로프, 행어로프 장력 정리 .....	115
표4.42 AN1 서측 스트랜드 장력 변화 .....	117
표4.43 AN1 동측 스트랜드 장력 변화 .....	117
표4.44 AN2 서측 스트랜드 장력 변화 .....	119
표4.45 AN2 동측 스트랜드 장력 변화 .....	119
표5.1 분석에 활용한 동적 계측항목 .....	122
표5.2 보강형 진동 가속도 변화(RMS) .....	125
표5.3 주탑 진동 가속도(RMS) .....	129
표5.4 측경간 행어로프 장력 .....	132
표5.5 주경간 행어로프 장력 .....	133
표5.6 보강거더의 감쇠율 및 감쇠비 .....	141
표6.1 A대교 구조기준 .....	143
표6.2 A대교 종단 및 폭원 .....	144
표6.3 A대교 채포장 공사 시공순서 .....	147
표6.4 A대교 채포장 공사 여수방향 2차선 포장제거 구조해석 변위 .....	148
표6.5 A대교 채포장 공사 여수방향 1차선 포장제거 구조해석 변위 .....	149
표6.6 A대교 채포장 공사 광양방향 2차선 포장제거 구조해석 변위 .....	149
표6.7 A대교 채포장 공사 광양방향 1차선 포장제거 구조해석 변위 .....	150

## 그림 목 차

그림1.1 대형 교량 디지털 트윈 구축 .....	3
그림2.1 건설 부분의 디지털화 .....	8
그림2.2 빅데이터 처리 과정 .....	10
그림2.3 글로벌 IoT 산업 규모 전망 .....	12
그림3.1 A대교 전경 .....	21
그림3.2 계측시스템 구성도 .....	24
그림3.3 계측시스템 무정전 전원공급 장치 구성도 .....	24
그림4.1 외부온도 및 보강거더 내부 온도변화 이력 .....	54
그림4.2 주탑 내부 단면 온도변화 이력 .....	54
그림4.3 보강거더 1/2지점 내부 온도변화 이력 .....	55
그림4.4 풍속변화 이력 .....	55
그림4.5 보강거더 풍향 변화 이력 .....	55
그림4.6 PY1 주탑 교축 방향 변위 변화 이력 .....	57
그림4.7 PY1 주탑 교축 직각 방향 변위 변화 이력 .....	57
그림4.8 외부 하중 대비 PY1 주탑 교축 방향 변위 변화 이력(상단가로보) .....	58
그림4.9 외부 하중 대비 PY1 주탑 교축 직각 방향 변위 변화 이력(상단가로보) .....	58
그림4.10 시간별 PY1 주탑 교축 방향 변위 변화 이력(상단가로보) .....	59
그림4.11 시간별 PY1 주탑 교축 직각 방향 변위 변화 이력(상단가로보) .....	59
그림4.12 PY2 주탑 교축 방향 변위 변화 이력 .....	60
그림4.13 PY2 주탑 교축 직각 방향 변위 변화 이력 .....	61
그림4.14 외부 하중 대비 PY2 주탑 교축 방향 변위 변화 이력(상단가로보) .....	61
그림4.15 외부 하중 대비 PY2 주탑 교축 직각 방향 변위 변화 이력(상단가로보) .....	62
그림4.16 시간별 PY2 주탑 교축 방향 변위 변화 이력(상단가로보) .....	62
그림4.17 시간별 PY2 주탑 교축 직각 방향 변위 변화 이력(상단가로보) .....	63
그림4.18 PY1 주탑 교축 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	64
그림4.19 PY1 주탑 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	64
그림4.20 외부 하중 대비 PY1 주탑 교축 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	65

그림4.21 외부 하중 대비 PY1 주탑 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	65
그림4.22 시간별 PY1 주탑 교축 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	66
그림4.23 시간별 PY1 주탑 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	66
그림4.24 PY2 주탑 교축 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	67
그림4.25 PY2 주탑 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	67
그림4.26 외부 하중 대비 PY2 주탑 교축 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	68
그림4.27 외부 하중 대비 PY2 주탑 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	68
그림4.28 시간별 PY2 주탑 교축 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	69
그림4.29 시간별 PY2 주탑 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	69
그림4.30 PY1 주탑 기초부 가속도진폭 변화 이력 .....	70
그림4.31 시간별 PY1 주탑 기초부 가속도진폭 변화 이력 .....	71
그림4.32 PY2 주탑 기초부 가속도진폭 변화 이력 .....	72
그림4.33 시간별 PY2 주탑 기초부 가속도진폭 변화 이력 .....	73
그림4.34 PY1 측경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	74
그림4.35 PY1 측경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	75
그림4.36 외부 하중 대비 PY1 측경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	75
그림4.37 외부 하중 대비 PY1 측경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 ..	76
그림4.38 시간별 PY1 측경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	76
그림4.39 시간별 PY1 측경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	77
그림4.40 중앙경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	78
그림4.41 중앙경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	78
그림4.42 외부 하중 대비 중앙경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	79
그림4.43 외부 하중 대비 중앙경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 ..	79
그림4.44 시간별 중앙경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	80
그림4.45 시간별 중앙경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	80
그림4.46 PY2 측경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	81
그림4.47 PY2 측경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	81
그림4.48 외부 하중 대비 PY2 측경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	82
그림4.49 외부 하중 대비 PY2 측경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 ..	82
그림4.50 시간별 PY2 측경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	83
그림4.51 시간별 PY2 측경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력 .....	83

그림4.52 PY1 측경간 서측 주파수 분석_연직 방향 .....	85
그림4.53 PY1 측경간 동측 주파수 분석_연직 방향 .....	85
그림4.54 중앙경간 서측 주파수 분석_연직 방향 .....	85
그림4.55 중앙경간 동측 주파수 분석_연직 방향 .....	85
그림4.56 PY2 측경간 서측 주파수 분석_연직 방향 .....	86
그림4.57 PY2 측경간 동측 주파수 분석_연직 방향 .....	86
그림4.58 PY1 주탑연결부 보강거더 응력 변화 이력 .....	87
그림4.59 온도 대비 PY1 주탑 연결부 보강거더 하단 응력 변화 이력 .....	87
그림4.60 온도 대비 PY1 주탑 연결부 보강거더 상단 응력 변화 이력 .....	88
그림4.61 차량 통행으로 인한 PY1 주탑 연결부 서측 보강거더 응력 변화 이력 .....	88
그림4.62 차량 통행으로 인한 PY1 주탑 연결부 동측 보강거더 응력 변화 이력 .....	89
그림4.63 중앙경간 1/2지점 응력 변화 이력 .....	90
그림4.64 온도 대비 중앙경간 1/2지점 보강거더 하단 응력 변화 이력 .....	91
그림4.65 온도 대비 중앙경간 1/2지점 보강거더 상단 응력 변화 이력 .....	91
그림4.66 차량 통행으로 인한 중앙경간 1/2지점 서측 보강거더 응력 변화 이력 .....	92
그림4.67 차량 통행으로 인한 중앙경간 1/2지점 동측 보강거더 응력 변화 이력 .....	92
그림4.68 PY2 주탑 연결부 보강거더 응력 변화 이력 .....	93
그림4.69 온도 대비 PY2 주탑 연결부 보강거더 하단 응력 변화 이력 .....	94
그림4.70 온도 대비 PY2 주탑 연결부 보강거더 상단 응력 변화 이력 .....	94
그림4.71 차량 통행으로 인한 PY2 주탑 연결부 서측 보강거더 응력 변화 이력 .....	95
그림4.72 차량 통행으로 인한 PY2 주탑 연결부 동측 보강거더 응력 변화 이력 .....	95
그림4.73 외부 하중 대비 타이다운로프 장력 변화 이력 .....	97
그림4.74 시간별 타이다운로프 장력 변화 이력 .....	98
그림4.75 외부 하중 대비 측경간 행어로프 장력 변화 이력(최외측 행어로프) .....	99
그림4.76 외부 하중 대비 측경간 행어로프 장력 변화 이력(중앙측 행어로프) .....	100
그림4.77 외부 하중 대비 측경간 행어로프 장력 변화 이력(주탑측 행어로프) .....	100
그림4.78 시간별 측경간 행어로프 장력 변화 이력(최외측 행어로프) .....	101
그림4.79 시간별 측경간 행어로프 장력 변화 이력(중앙측 행어로프) .....	101
그림4.80 시간별 측경간 행어로프 장력 변화 이력(주탑측 행어로프) .....	102
그림4.81 외부 하중 대비 중앙경간 행어로프 장력 변화 이력(주탑측 행어로프) .....	103
그림4.82 외부 하중 대비 중앙경간 행어로프 장력 변화 이력(중앙측 행어로프) .....	104

그림4.83 외부 하중 대비 중앙경간 행어로프 장력 변화 이력(중앙경간측 행어로프)	104
그림4.84 시간별 중앙경간 행어로프 장력 변화 이력(주탑측 행어로프)	105
그림4.85 시간별 중앙경간 행어로프 장력 변화 이력(중앙측 행어로프)	105
그림4.86 시간별 중앙경간 행어로프 장력 변화 이력(중앙경간측 행어로프)	105
그림4.87 타이다운로프 1번 서측 주과수 분석	106
그림4.88 타이다운로프 1번 동측 주과수 분석	106
그림4.89 타이다운로프 2번 서측 주과수 분석	106
그림4.90 타이다운로프 2번 동측 주과수 분석	107
그림4.91 행어로프 7번 동측 주과수 분석	107
그림4.92 행어로프 10번 동측 주과수 분석	107
그림4.93 행어로프 13번 동측 주과수 분석	107
그림4.94 행어로프 16번 동측 주과수 분석	108
그림4.95 행어로프 19번 동측 주과수 분석	108
그림4.96 행어로프 22번 동측 주과수 분석	108
그림4.97 행어로프 71번 서측 주과수 분석	108
그림4.98 행어로프 74번 서측 주과수 분석	109
그림4.99 행어로프 77번 서측 주과수 분석	109
그림4.100 행어로프 80번 서측 주과수 분석	109
그림4.101 행어로프 83번 서측 주과수 분석	109
그림4.102 행어로프 86번 서측 주과수 분석	110
그림4.103 AN1 5번 스트랜드 장력 변화 이력	117
그림4.104 AN1 17번 스트랜드 장력 변화 이력	118
그림4.105 AN1 29번 스트랜드 장력 변화 이력	118
그림4.106 AN2 5번 스트랜드 장력 변화 이력	120
그림4.107 AN2 17번 스트랜드 장력 변화 이력	120
그림4.108 AN2 29번 스트랜드 장력 변화 이력	120
그림5.1 보강거더 1/2지점 풍속변화 이력	123
그림5.2 PY2 탑정 풍속변화 이력	123
그림5.3 주경간 보강형 1/4지점 진동 가속도 변화 이력	124
그림5.4 주경간 보강형 1/2지점 진동 가속도 변화 이력	124
그림5.5 주경간 보강형 3/4지점 진동 가속도 변화 이력	125

그림5.6 PY2탑정 풍속 대비 주경간 보강형 1/4지점 진동 가속도 변화 이력 .....	126
그림5.7 PY2탑정 풍속 대비 주경간 보강형 1/2지점 진동 가속도 변화 이력 .....	126
그림5.8 PY2탑정 풍속 대비 주경간 보강형 3/4지점 진동 가속도 변화 이력 .....	127
그림5.9 PY2탑정 풍속 대비 주경간 보강형 진동 가속도 변화 이력 .....	127
그림5.10 PY1 교축 방향 진동 가속도 변화 이력 .....	128
그림5.11 PY1 교직 방향 진동 가속도 변화 이력 .....	128
그림5.12 PY2 교축 방향 진동 가속도 변화 이력 .....	129
그림5.13 PY2 교직 방향 진동 가속도 변화 이력 .....	129
그림5.14 PY2탑정 풍속 대비 PY1 교축 방향 진동 가속도 변화 이력 .....	130
그림5.15 PY2탑정 풍속 대비 PY1 교직 방향 진동 가속도 변화 이력 .....	130
그림5.16 PY2탑정 풍속 대비 PY2 교축 방향 진동 가속도 변화 이력 .....	131
그림5.17 PY2탑정 풍속 대비 PY2 교직 방향 진동 가속도 변화 이력 .....	131
그림5.18 측경간 행어로프 진동 가속도 변화 이력 .....	132
그림5.19 주경간 행어로프 진동 가속도 변화 이력 .....	133
그림5.20 PY2탑정 풍속 대비 측경간 행어로프 진동 가속도 변화 이력 .....	134
그림5.21 PY2탑정 풍속 대비 주경간 행어로프 진동 가속도 변화 이력 .....	134
그림5.22 보강형 평균 진동 가속도 대비 주탑 평균 진동 가속도 변화 이력 .....	135
그림5.23 보강형 평균 진동 가속도 대비 행어로프 평균 진동 가속도 변화 이력 .....	135
그림5.24 감쇠 자유진동 파형 .....	136
그림5.25 Raw data(filter 적용 전, A), Refined data(filter 적용 후, B) .....	137
그림5.26 감쇠 파형 추출 구간 설정 .....	137
그림5.27 PY1 측경간 1/2지점 서측 감쇠진동 파형 .....	138
그림5.28 PY1 측경간 1/2지점 동측 감쇠진동 파형 .....	138
그림5.29 보강거더 1/2지점 서측 감쇠진동 파형 .....	139
그림5.30 보강거더 1/2지점 동측 감쇠진동 파형 .....	139
그림5.31 PY2 측경간 1/2지점 서측 감쇠진동 파형 .....	140
그림5.32 PY2 측경간 1/2지점 동측 감쇠진동 파형 .....	140
그림5.33 보강거더 위치별 감쇠비 .....	141
그림6.1 FE Model .....	145
그림6.2 A대교의 선형 .....	146
그림6.3 재포장 공사 구간 .....	146



그림6.4 2021년 연직변위 관측 데이터 ..... 150  
그림6.5 재포장 공사 기간 관측 데이터 변화 ..... 151

## ABSTRACT

### A Study on Dynamic Behavior Analysis of Suspension Bridge Using IoT Sensing

Moon, In-ki

Advisor : Prof. Park, Jeong-ung, Ph. D.

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

Based on the continuous development of construction technology, the construction of long-span bridges such as suspension bridges and oblique suspension bridges is on the rise. Since these long-distance bridges account for a large proportion of the SOC industry and have a great social and economic impact when a problem occurs, it is necessary to check the structural behavior and safety of the bridge during the public use in real time as well as during the construction stage.

In recent research trends, various studies are being conducted to detect, collect, and analyze the behavior of structures through the establishment of monitoring measurement systems to check structural safety in real time and to efficiently maintain them, and as part of this, various measurement systems are installed and operated to monitor the behavior and structural safety of many large structures.

Due to the rapid development of information and communication, Internet of Things (IoT) technology that connects all things to communicate with information is expanding throughout society.

If these IoT technologies are applied to special bridge structures such as long-span suspension bridges, it is believed that a smart monitoring measurement system for maintenance during the public use as well as during the construction

stage can be implemented. It is believed that the data secured through the IoT system can determine maintenance priorities and can be used as important data for predicting durability life.

The purpose of this study is to establish a way for managers to facilitate construction and safety management by verifying the reliability of the measurement data obtained by the measurement system built on long bridges such as suspension bridges, checking the performance and completeness of the automatic measurement system, acquiring quantitative information on behavioral characteristics, and securing data for setting management standards.

In addition, by comparing and analyzing the acquired data, it is intended to evaluate whether IoT sensing technology can be introduced not only for long bridges but also for small and medium-sized bridges in urban areas, and to lay the foundation for the development of IoT sensing control systems that can actively cope with cognitive loads such as repaving bridges and behaviors caused by environmental factors such as typhoons.

The IoT measurement analysis results of suspension bridges verified through this study can be used as a basis for the necessity of establishing a real-time bridge condition monitoring and prediction response system that combines ICT (Information and Communication Technology) technology, and in the future, an intelligent IoT measurement system that predicts safety monitoring, construction management, integrated management, and life expectancy of urban infrastructure such as large SOCs can be expanded and developed in the construction sector.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경과 목적

최근 건설기술의 지속적인 발전을 기반으로 현수교 및 사장교 등의 장대교량 공사가 증가하는 추세이다. 이러한 장대 교량들은 SOC 산업에서 차지하는 비중이 크고 문제 발생 시 사회 및 경제적으로 큰 영향을 미치기 때문에 시공단계뿐만 아니라 준공 후 공용 단계에서도 교량의 구조적인 거동과 안전성을 실시간으로 확인할 필요가 있다.

이전까지 교량 유지관리 과정은 시공 중 주요부재에 계측기를 설치하고 데이터 획득 장치를 구조물 주변에 설치한 후 관리자가 현장을 방문해야 확인할 수 있었지만 근래에 와서는 인터넷을 이용 관리자가 사무실에서 확인할 수 있는 단계에까지 이르게 되었다.

최근에는 모니터링 계측시스템 구축을 통해 구조물의 거동을 감지, 수집 및 분석하여 구조적 안전성을 실시간으로 확인하고 효율적인 유지관리를 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 목적으로 많은 장대교량에 구조물의 거동과 구조적 안전성을 모니터링하기 위한 다양한 계측시스템이 설치되어 운용되고 있다. 교량의 구조적인 거동과 안전성이 실시간으로 확인이 되면 유지관리와 발생할 수 있는 문제에 대해 사전 예방이 가능하므로 소요되는 사회적 경제적 비용을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

시공단계에서의 모니터링 계측시스템은 사전에 확인할 수 있는 설계하중과 현장의 환경적인 요인에 대하여 지반과 구조물의 여러 가지 거동을 실시간 관리하여 발생할 수 있는 문제점을 사전에 해소하는 차원과 예기치 못한 영향인자로 인한 이상 거동을 계측 관리하여 사전에 예방하는 차원에서의 모니터링에 한정된다.

공용 단계에서의 모니터링 계측시스템은 실제 사용하중 하에서의 교량 구조물의 여러 가지 거동을 모니터링하고 구조물의 거동 한계 값과 비교 분석하여 안전성을 확인하는 차원의 모니터링 단계라고 할 수 있다.

건설 이외의 다른 분야에서는 정보통신의 발달로 인해 이미 첨단분야의 여러 가지 관리 시스템이 도입되어 운용되고 있다. 이러한 정보통신 분야의 발달에 발맞춰 건설 구조물의 관리도 진보된 스마트 모니터링 계측관리 시스템이 필요한 실정이다.

최근 모든 사물을 서로 연결하여 정보를 소통하는 사물인터넷(IoT:Internet of Things) 기술이 사회 전반적으로 확대되고 있다.

이러한 IoT 기술을 장대 현수교와 같은 특수 교량 구조물에 적용할 수 있다면 구조물의 시공단계뿐만 아니라 공용 중의 유지관리를 위한 스마트 모니터링 계측관리 시스템을 구현할 수 있을 것이라 판단된다.

그리고 계측시스템을 통하여 확보된 객관적인 데이터는 구조물의 유지관리 우선순위를 결정할 수 있고 교량의 내구수명을 예측하는데 중요한 자료로 활용될 수 있다.

본 연구의 목적은 현수교 등 장대교량에 구축된 계측시스템으로 획득한 계측데이터의 신뢰도 검증 및 자동 계측시스템의 성능과 시공완성도 확인 그리고 거동 특성에 대한 정량적인 정보획득과 관리기준치 설정을 위한 자료를 확보하여 관리자가 시공관리와 안전관리를 원활히 할 수 있는 방안을 구축하는 데 있다.

그리고 이렇게 획득한 자료를 비교 분석하여 다른 교량도 IoT 센싱 기술의 도입이 가능한지를 평가하고 교면 재포장과 같이 인지 하중과 태풍과 같은 환경적인 요인으로 인한 거동에 능동적으로 대체할 수 있는 IoT 센싱 제어시스템의 개발을 위한 기반을 마련하고자 한다.

## 1.2 연구 내용 및 방법

사회기반시설인 대형 토목구조물의 공용 중 구조적 안정성을 위해 효율성을 갖춘 유지관리 시스템을 개발하고 적용하기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 국내 건설 산업에서도 각종 사건을 겪으면서 공용 중인 구조물에 대한 안전성 확보 및 유지관리에 관한 관심이 높아졌으며, 여러 연구와 기술개발로 정밀안전진단을 통한 구조물의 안전성 판단과 유지관리를 위한 자동화된 계측시스템을 도입하고 있다.

교량 구조물의 정확한 성능 평가를 위한 최첨단 지능형 구조물 관리의 필요성 증대에 따라 경제적이고 정밀한 첨단 미래형 특수 센서 칩에 의한 지능형 관리시스템을 통해 최적화된 구조물 손상 감지, 손상 확인, 진단 및 예방 관련 알고리즘 및 모듈을 개발하여 IoT 기반을 통한 데이터의 생산(수집, 저장, 가공)과 네트워크를 활용한 구조물의 구조 건전도 서비스를 실시간으로 제공할 수 있다.

IoT 통신 네트워크 플랫폼을 이용한 장대교량의 실시간 계측을 위한 본 논문은 “제1장 서론”과 “제7장 결론”을 제외한 5개의 장에서 그 내용을 전개하고자 한다. “제2장 이론적 고찰”에서는 IoT 이론적 개념, 주요 서비스 분야, 국내·외 기술 전망에 대하여 구성하였다. “제3장 IoT 센싱 계측을 위한 모니터링 시스템 구축”에서는 A대교의 모니터링 시스템

구축과 계측기 종류와 사양 등을 제시하였다. “제4장 IoT 센싱 모니터링 시스템을 활용한 동적 거동 계측 결과”에서는 모니터링 결과에 대한 계측항목별 분석을 통해 교량의 구조검토를 수행하였다. “제5장 IoT 센싱을 활용한 A대교의 동적 거동 특성 분석”에서는 A대교 모니터링 후 계측값을 통한 감쇠비 계산 및 구조 건전도를 제시하였다. “제6장 FE Model과 IoT를 활용한 현수교의 건전도 분석”에서는 A대교를 대상으로 가장 최근에 실시한 교면 재포장 공사에 따라 발생한 구조물의 비정상 변위 응답을 유한 요소 구조해석을 통해 산정한 후 실제 계측데이터와의 비교검토를 통해 구조물 건전 상태 및 포장 공사 진행 여부를 확인하였다.

기존의 교량 유지관리 시스템은 계측 수치 및 이에 근거한 정보체계를 마련하기 위한 수단에 지나지 않으므로, 합리적인 교량 유지관리 정보체계 구현을 위해서는 기존 시스템의 정보관리체계 분석 및 IoT 기술 적용 평가를 시도해야 할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 교량 구조물의 거동 중 수집된 계측데이터를 분석하여 관리 및 안전성 판단기준을 제시하고 구조물의 안전성 문제 발생 시 조기경보 알림을 통해 빠른 대응이 가능하게 함은 물론 정량적인 교량 거동 자료를 기반으로 IoT 센싱 기술 기반의 적용을 도모하고자 하는 것이며, 또한 유무선 네트워크로 연결된 유기적 정보 수집 및 활용체계인 IoT 기반 교량 안전관리·공사관리·유지관리 정보체계의 발전 방향을 제시하고자 한다.

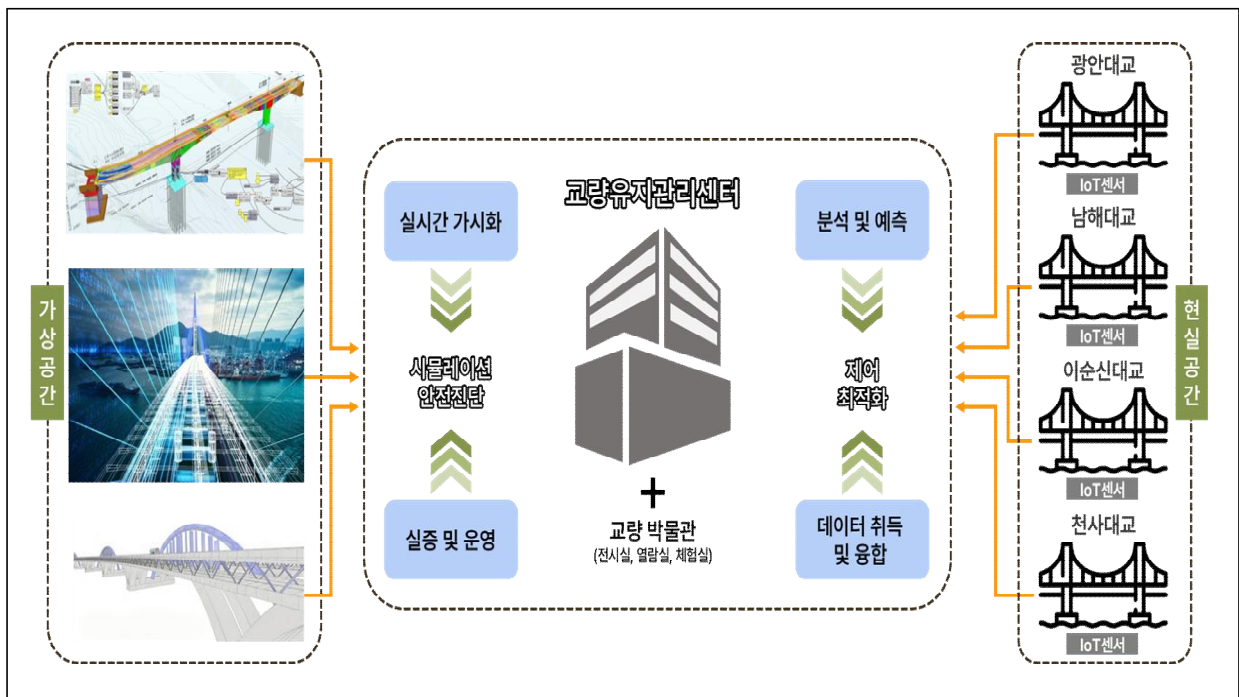


그림 1.1 대형 교량 디지털 트윈 구축

### 1.3 연구 동향

건설기술의 발전과 맞물려 설계 및 시공 기술의 발전으로 장경간의 해상 장대교량의 건설이 증가하고 있다. 일반적으로 교량은 크게 상부구조와 하부구조로 나뉘지는데 교대나 교각 위에 있는 차량이 주행하는 상부구조와 교량 구조물을 지반에 견고히 지지하게 하는 하부구조, 차량 주행면인 포장 부분과 부대시설 등으로 구성된다.

교량의 핵심 구조부인 상부 구조부와 하부 구조부는 철근콘크리트 구조 또는 강재 구조물 형태를 가지며, 이는 구조물의 시공성과 경제성 등을 고려하여 결정한다. 교량 구조물은 공용기간이 늘어날수록 부식, 균열 등의 손상이 나타난다. 부식 및 균열에 대한 유지관리가 제대로 이루어지지 않으면 교량의 공용주기가 단축되며 붕괴의 원인이 된다.

교량 시공 중 계측은 단계별 계측관리 계획을 설정하고 수행함으로써 교량 거동에 대한 계측데이터를 확보하고 이를 설계 당시의 구조계산 데이터와의 비교분석을 통해 시공관리가 정밀하게 이루어질 수 있도록 해야 한다.

공용 중인 교량의 계측관리는 유지관리를 위한 계측과 예측이 불가한 변수로 인한 환경의 변화에 따른 교량 거동을 신속하게 파악하여 대응할 수 있게 하는 계측이 주가 된다. 국내 몇몇 대형 교량의 붕괴사고를 겪으면서 건설산업 전반에 걸쳐 공용 중인 교량의 안전성을 확보할 수 있는 시스템 도입 운영은 필수적인 사항이 되었다.

서울시(홍상연 등, 2021)는 시설물 안전을 위해 한강 교량 등 각종 노후 시설에 기울기, 진동 등을 감지하는 IoT 센서를 부착하여 실시간 파악하고 있으며, 향후 인프라 안전 센서의 신규 구축 등 발전방안을 계획 중에 있다.

한국건설기술연구원(2022)에서도 노후화된 교량 구조물 유지관리 고도화를 위한 IoT 시스템을 활용한 지방자치단체 소관 30개소에 대해 데이터 수집 체계를 구축하여 플랫폼을 통해 계측데이터를 다운로드 및 활용할 수 있게 하였다.

이는 교량 구조물 유지관리에 필요한 서비스를 제공하기 위한 스마트 유지관리 플랫폼 개발로 이어질 전망이다.

공용 중 교량의 안전성을 확보하기 위해서는 정밀한 시공이 우선되어야 한다. IoT 네트워크시스템을 시공 단계별로 적용하여 정밀하고 안전한 시공 환경을 확보할 수 있다.

교량 구조물의 정확한 성능 평가를 위한 최첨단 지능형 구조물 관리의 필요성 증대에 따라 경제적이고 정밀한 첨단 미래형 특수 센서 칩에 의한 지능형 관리시스템을 통해 최적화된 구조물 손상 감지, 손상 확인, 진단 및 예방 관련 알고리즘 및 모듈을 개발하여

IoT 기반 데이터 생산(수집, 저장, 가공) 및 실시간 네트워킹을 통해 구조물의 구조 건전도를 실시간으로 관리자에게 제공할 수 있다.

인터넷의 일상화는 가상의 세계에서 문화 활동 및 경제활동이 가능한 사이버 공간을 만들어 냈다.

IoT 기술은 이러한 사이버 공간과 현실 세계를 연결해 사람, 정보, 사물이 융합할 수 있는 공간 창출의 개념을 실현 가능케 하고 있다. 교량 등 구조물과 건축물에 이런 융합 공간을 적용하여 인간 중심적인 지능형 구조물 및 건축물의 운용이 가능하게 될 전망이다.

정보통신 기술력이 국가의 무역과 경제력을 바탕으로 하는 기존의 국력 판단의 기준들과 더불어 국력을 결정하는 새로운 기준이 되었다고 볼 수 있다.

건설 구조물의 안전사고에 대한 유지관리 분야는 앞서 밝힌 바와 같이 육안에 의한 감시나 정기적인 안전 점검의 개념에서 실시간 모니터링을 중심으로 자동화 시스템에 의한 지능형 감시시스템으로 발전하고 있다.

특히, 인터넷 기반 정보 기술과 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 센서 등 무선 기반 계측 기술이 빠르게 발전하면서 지능형 모니터링 기술의 활용이 매우 증가하고 있다.

이같이 발전된 기술을 기반으로 많은 전문가는 차세대 구조물에 대한 유지관리 분야 기술이 IoT에 기반한 데이터 구축과 함께 분석기술 발전으로 이어질 것으로 예상하고 있다.

본 연구에서도 근거리 무선 시스템과 IoT 네트워킹 환경이 복합된 스마트 계측관리 시스템을 요구한다. 이러한 시스템은 관리자 관점에서 구조물의 물리적 기능을 제어관리 할 수 있는 정보를 실시간으로 수집·제공하는 IoT 네트워킹을 통한 플랫폼 구축 개발과 다양한 센서를 이용하여 장비를 지능화하는 기술개발이 절대적으로 필요하다.

현재 교량의 효율적 유지관리를 위한 실시간 데이터 확보는 물론 정보 분석 및 유지관리 전략 수립에 기반이 되는 IoT 기반 플랫폼 구축으로 스마트 건설 및 유지관리를 위한 연구는 다양하게 진행되고 있다.

국내에서도 도로, 교량 등 대형 SOC 시설 노후화에 따른 안전 문제를 해결하기 위한 효율적인 방안을 찾고자 시설물 모니터링 기술개발 수요가 급증하고 있다.

단순 조사를 통한 보수는 발생 여부 인지 시간 소요로 인한 사고의 위험성이 높아지기 때문에 모니터링 시스템 구축이 필요하며 효율적인 수집과 즉시 대응이 가능한 IoT 기반 모니터링 시스템은 예방적 손상 기술 진단으로써 최적 대안이 될 수 있다.



따라서 댐이나 교량 등과 같은 대형구조물 모니터링 시스템이 개발되고 있고 구조물 내 케이블을 통한 신호 전송으로 구축도 용이한 상황이다. 이에 따라 디지털 트윈을 활용한 센서와 함께 유지관리 프로세서 수요도 동반 증가하고 있다.

해외의 경우 2020년부터 센서 개발이 활발하게 진행되고 있으며 IoT와 데이터를 연계한 대형구조물 관리 수요가 있어 다양한 데이터 수집에 IoT 기술 활용이 두드러지고 있다.

이렇듯 국내외에서 개발 중인 IoT 기반 구조물진단 기술은 대형구조물뿐만 아니라 중·소형 구조물에 대한 조사 및 진단 용이성과 비용 절감으로 각 현장에서 해당 기술 접목에 대한 접근성을 높일 수 있다.

이와 관련하여 우리나라 역시 국토교통부 주관으로 교통기술 연구와 사업화 지원을 위해 다양한 분야에서 IoT를 활용한 SOC 연계 기술개발이 진행되고 있다(스마트방재 시스템(주), 2023; (주)큐센텍 등, 2023; 중앙대학교 산학협력단 등, 2023).

현재 개발 중인 연구 사례로 공간 내 화재징후 감지를 통해 예방과 조치를 실시간으로 수행할 수 있도록 IoT기반 센서 모듈과 플랫폼을 연결하고 이를 소방서 등과 연계한 재난재해 안전망 구축을 추진하고 있다.

또한, SOC 시설물 안전관리 및 분석 플랫폼 개발·실증을 통한 사업화를 목표로 테스트베드(광안대교 10개소, 남항대교 10개소)를 구축하고 해당 교량 내 SUS 브라켓에 의한 이종 금속 간의 부식 영향도 자료수집·분석을 통한 무선통신의 신뢰성 확보와 함께 공공데이터 연계 API(Application Program Interface) 개발을 목표로 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근 교량의 노후도 증가와 성남 정자교 붕괴 사례에서와 같이 성능 저하로 인한 문제를 해결하기 위한 연구도 진행되고 있다.

현재 국내 교량 중 소수의 특수교량에서 고가의 센서를 통해 유지관리가 진행되고 있지만 나머지 일반 교량의 경우 육안 검사나 일정 기간마다 이루어지는 정기 검사에 따른 결과로 유지관리 방향을 결정하고 있다.

경제 성장기 시절 급격히 증가한 교량들의 노후화 문제(청담 1교 등)가 대두되어 점검 주기 단축과 정확한 교량 상태 파악을 위해 다수의 교량에 적용할 수 있는 저비용·고성능의 IoT 센서를 개발하고자 고해상도 초저전력 IoT 센서 시스템과 데이터 관리 서버 구축을 목표로 기술혁신이 이루어지고 있다.

이처럼, IoT는 스마트홈을 넘어 건설, 시설물, SOC 안전 분야까지 실시간 측정, 분석 관리가 가능한 센싱 개발을 토대로 그 적용 범위가 다양하게 발전하고 있다.

## 제 2 장 이론적 고찰

### 2.1 사물인터넷(IoT)

#### 2.1.1 사물인터넷(IoT), 빅데이터(Big Data) 개념

사물인터넷은 Kevin Ashton이 “일상생활의 모든 사물이 인터넷에 연결되면 이런 사물들이 서로 소통하고 연결되어 정보를 주고받는다.”라는 개념을 처음 말하며 RFID (Radio Frequency Identification)와 기타 센서를 일상생활에 사용하는 사물에 탑재한 사물인터넷이 구축되리라 전망하면서 처음 사용한 것으로 알려졌다.

이렇게 사물인터넷은 세상에 존재하는 유형 혹은 무형의 객체들이 다양한 방식으로 서로 연결되어 개별 객체들이 제공하지 못했던 새로운 서비스를 제공하는 것을 말한다.

다시 말해, 사물인터넷은 인터넷을 기반으로 포괄적인 의미의 모든 사물을 연결하여 정보를 교환하고, 서로 간에 소통하면서 유기적인 관계를 맺으며 인간의 개입 없이 유무선 통신 기술을 바탕으로 상호 정보를 주고받으며 자율적으로 서비스를 제공할 수 있는 기술이다.

인터넷에 연결된 사물들을 통해서 수집된 데이터는 특정 행동을 수행할 수 있는 다른 기기에 전송되거나, 수집된 데이터를 공유하기 위해 다른 기기와 연결되기도 한다.

연결된 기기들은 자동화된 방식으로 다른 기기들과 소통하고, 연결된 네트워크를 통해 정보와 지능을 공유하면서 주어진 업무를 자율적으로 수행하게 된다.

예를 들어 침대와 실내등이 연결되었다고 가정해 보자. 지금까지는 침대에서 일어나서 실내등을 켜거나 꺼야 했지만, 사물인터넷 시대에는 침대가 사람이 자고 있는지를 스스로 인지한 후 자동으로 실내등이 켜지거나 꺼지도록 할 수 있게 된다.

마치 사물들끼리 서로 대화를 함으로써 사람들을 위한 편리한 기능들을 수행하게 되는 것이다.

이처럼 편리한 기능들을 수행하기 위해서는 침대나 실내등과 같은 현실 세계에 존재하는 유형의 사물들을 인터넷이라는 가상의 공간에 존재하는 것으로 만들어줘야 한다.

그리고 스마트 폰이나 인터넷상의 어딘가에 “사람이 잠들면 실내등을 꺼라” 또는

“사람이 깨어나면 실내등을 켜라”와 같은 설정을 미리 해놓으면 사물인터넷 서비스를 이용할 수 있게 된다.

사물인터넷은 빅데이터, 클라우드 서비스 및 인공지능 기술과도 밀접한 관계를 가지고 있다. 사물인터넷의 다양한 시스템으로부터 수집된 빅데이터는 클라우드라는 공유 저장 공간에 저장되고, 이 데이터를 처리하기 위해서 딥-러닝과 같은 인공지능 기술이 연계되어 최적화된 서비스를 제공하게 된다.

이런 과정들이 순환 구조를 이루며 더욱더 양질의 서비스를 제공하게 된다.

### 2.1.2 사물인터넷(IoT) 플랫폼

사물인터넷의 개념은 인간, 사물 및 서비스 등 세 가지 분산된 환경요소에 대해 인간의 개입 없이 상호 협력적으로 센싱, 네트워킹, 인터페이스 기술 등이 지능적인 관계를 형성하는 사물 공간 연결망을 의미한다.

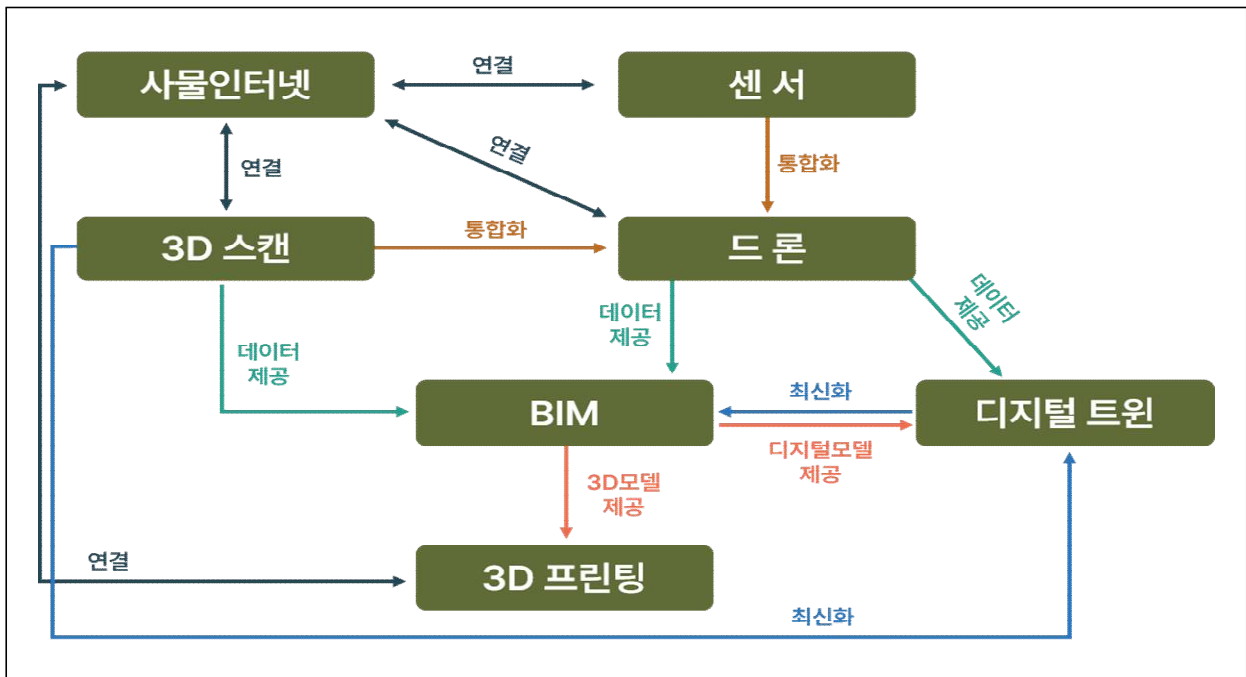


그림 2.1 건설 부분의 디지털화

사물인터넷 구조도와 같이 지능적이고 자율화된 서비스 제공을 위해서는 디바이스, 플랫폼, 네트워크, 서비스의 주요 구성요소로 나눌 수 있다. 가장 종단의 디바이스에서는

데이터 수집을 위한 센서, 제어용 액추에이터 및 통신 모듈로 구성되어 있고, 디바이스에서 수집된 데이터들의 송수신을 담당하는 네트워크, 그리고 네트워크를 통해 전달된 데이터들을 목적에 맞게 분석 처리하는 서비스 플랫폼, 마지막으로 상위 계층에서는 목적에 맞게 헬스케어, 스마트홈, 환경 감시 등과 같은 서비스를 제공한다.

### 가. 센서 및 액추에이터 기술

센서는 온도와 기압, 가스, 이미지 등 주변 환경 정보를 사람이 감지할 수 있는 전기적 신호로 변환하는 소자 부품이다. 센서는 주변 환경 정보를 전기적 정보로 전환하는 변환 원리에 따라 압력 및 가속도 등의 물리 센서, CIS, IR, 조도 등의 광센서, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, pH 등의 화학 센서, DNA와 단백질 등의 바이오센서 등으로 분류할 수 있다.

1980년대 이후 반도체 산업 및 나노 기술 또는 미세 전자제어 기술(MEMS) 발전에 힘입어 크고 무거운 조립식 센서를 반도체 IC와 같은 실리콘 기판 상에 작게 구현할 수 있게 된 것이 센서의 진화 및 시장 성장의 계기가 되었다.

센서는 1세대 Discrete Sensor, 2세대 Integrated Sensor, 3세대 Digital Sensor, 4세대 Smart Sensor로 진화하고 있으며, 세대가 발전할수록 MEMS, 나노기술, 반도체 집적 기술의 진보로 센서의 소형화, 지능화, 무선화가 가능해지고 있다.

### 나. 사물인터넷(IoT) 무선 네트워크

사물인터넷에서 사용되는 통신 기술은 기존 유무선 통신 기술들을 바탕으로 사물인터넷 특성에 적합하게 발전하는 추세로 기존의 인터넷망과 사물인터넷 디바이스들 사이의 통신을 위해 무선 센서네트워크를 기반으로 한다.

무선 센서네트워크 기술은 사물인터넷 서비스에 근간이 되며 인간의 개입 없이 또는 최소한의 개입으로 사물 간 협력하여 센싱, 정보처리 및 교환을 위한 상호 지능적 자율적인 네트워크 형성에 있어 매우 중요한 기술이다.

또한 다양한 기기와의 정보 교환과 연동을 위해 센서네트워크의 물리 계층 및 네트워크 기술도 중요한 기술 요소로 자리 잡고 있다.

무선 센서네트워크는 일반적으로 저비용, 저전력, 다기능의 센서 노드들로 이루어져 있고 이 센서들은 RFID, NFC(Near Field Communication), WiFi(Wireless Fidelity), Bluetooth, Zig Bee, GSM(Global System for Mobile Communications), LTE(Long Term Evolution) 등의 다양한 네트워크 기술에 적용되고 있다.

인터넷을 통해 사물 간에 데이터를 송수신하기 위해서는 사물에 IP 주소가 부여되어 있어야 한다. 그러나 사물인터넷에 연결된 사물의 대부분 센서들은 기본적으로 센싱 기능과 통신 기능만을 지니면서 데이터를 수집하여 전송한다. 이러한 센서들에 IP 주소를 할당하기보다는 IP 주소 없이 센서 간에 통신이 이루어지도록 하는데 이러한 기술을 비 IP 네트워크 기술이라고 한다.

### 2.1.3 빅데이터(Big Data)

IoT는 기존에 연결되지 않은 새로운 99%가 연결되어 사람과 사물 간의 모든 활동 및 연계 기록이 데이터로 수집할 수 있는 환경으로 빅데이터를 가치 있는 정보로 가공 후 삶의 질을 향상하는 데 그 목적이 있다.

빅데이터는 Public Cloud, Social Data 그리고 수많은 센서가 생성하는 스트리밍 데이터를 분석하여 아주 짧은 시간에 의사 결정을 가능하게 해 각종 비즈니스 프로세스와 다채널 실시간 마케팅과 같이 시간에 민감한 프로세스에서 중요하게 활용되고 있다.

빅데이터에서 의미 있는 정보를 추출하려면 효율적으로 저장 관리하는 기술이 필요하다. 빅데이터는 대용량, 비정형, 실시간성 속성을 수용할 수 있는 저장 방식이 필요하며, 특히 대량의 데이터를 파일 형태로 저장할 수 있는 기술과 비정형 데이터를 정형화된 데이터 형태로 저장하는 기술이 중요하다.



그림2.2 빅데이터 처리 과정

## 2.1.4 사물인터넷(IoT) 적용 분야

IoT는 기존에 존재하던 서비스들에 ‘실시간성’을 부여함에 따라 질적인 향상을 일으킨다. 예컨대 가로등을 관리하는 데 있어 하루에 두 번씩 정해진 시간에 점검하던 도시에 사물인터넷 기기를 설치할 경우, 가로등의 고장 여부가 센서를 통해 데이터의 형태로 실시간으로 주어지기 때문에 규칙적인 점검 자체가 불필요해지는 것이다. 따라서 데이터를 필요로 하는 모든 서비스는 IoT 서비스가 될 수 있기 때문에 적용 분야 역시 다양하다.

표2.1 IoT의 적용 분야(홍상연 등, 2021)

구분	주요 내용
헬스케어/의료/복지	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 운동량, 수면량 관리, 의약품 및 기기, 환자 관리 서비스</li> <li>▪ 치매·독거노인 건강관리, 여성 안심귀가 등</li> </ul>
에너지	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 원격 검침, 에너지 생산·소비 관리</li> </ul>
제조	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 생산공정 관리 및 예측 정비, 공장 자동화</li> </ul>
스마트홈/오피스	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 가전기기 원격제어, 스마트 방법, 영상회의 및 회의록 기록 등</li> </ul>
금융/보험	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 지불·결제 간소화, 재무 분석 자동화</li> </ul>
교육	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 자동 출결 시스템, 전자도서관 등</li> </ul>
국방	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 병력 및 군수품 관리 자동화, 작전·훈련 시뮬레이션</li> </ul>
농림축산/수산	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 원격 모니터링 및 관리시스템, 이력 관리 등</li> </ul>
교통/항공/조선	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 대중교통 운영정보 관리, 실시간 항공기 위치 점검, 선박 모니터링</li> </ul>
관광/스포츠	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 문화유산 관리 및 정보 제공, 운동량 관리</li> </ul>
소매/물류	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 실시간 재고관리 및 구매예측, 물류창고 및 배송관리</li> </ul>
건설/시설물/안전	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 공공시설물 상태모니터링 및 위험 감지 서비스</li> <li>▪ 유해화학물 관리 및 재해 모니터링</li> </ul>

## 2.2 국내·외 IoT 산업 현황

### 2.2.1 기술 발전 방향 및 활용사례

사물인터넷은 통신 네트워크 속에 연결된 지능적인 기기들의 상호 작용에 의한 데이터 수집, 처리, 활용을 아우르는 디바이스, 통신 네트워크, 데이터 플랫폼, 그리고 서비스 기술의 구조적인 과정 등의 총체라 정의할 수 있다.

이러한 IoT는 2012년부터 가트너(Gartner)사의 10대 전략 기술에 매년 선정되는 등 AI 기술과의 결합을 통해 점차 지능화되어 ‘자율사물’로 나아갈 것으로 예측되고 있다.

글로벌 IoT 산업 규모는 지속해서 증가해 '25년 약 2.13조 달러(한화 약 2,802조 원) 규모로 연평균 증가율이 15%에 달할 것으로 전망된다.

2020년 기준 국내 IoT 분야별 점유율을 살펴보면 제품기기 40.9%, 서비스 27.5%, 네트워크 16.4%, 플랫폼 15.1% 순으로 나타난다.(홍상연 등, 2021)

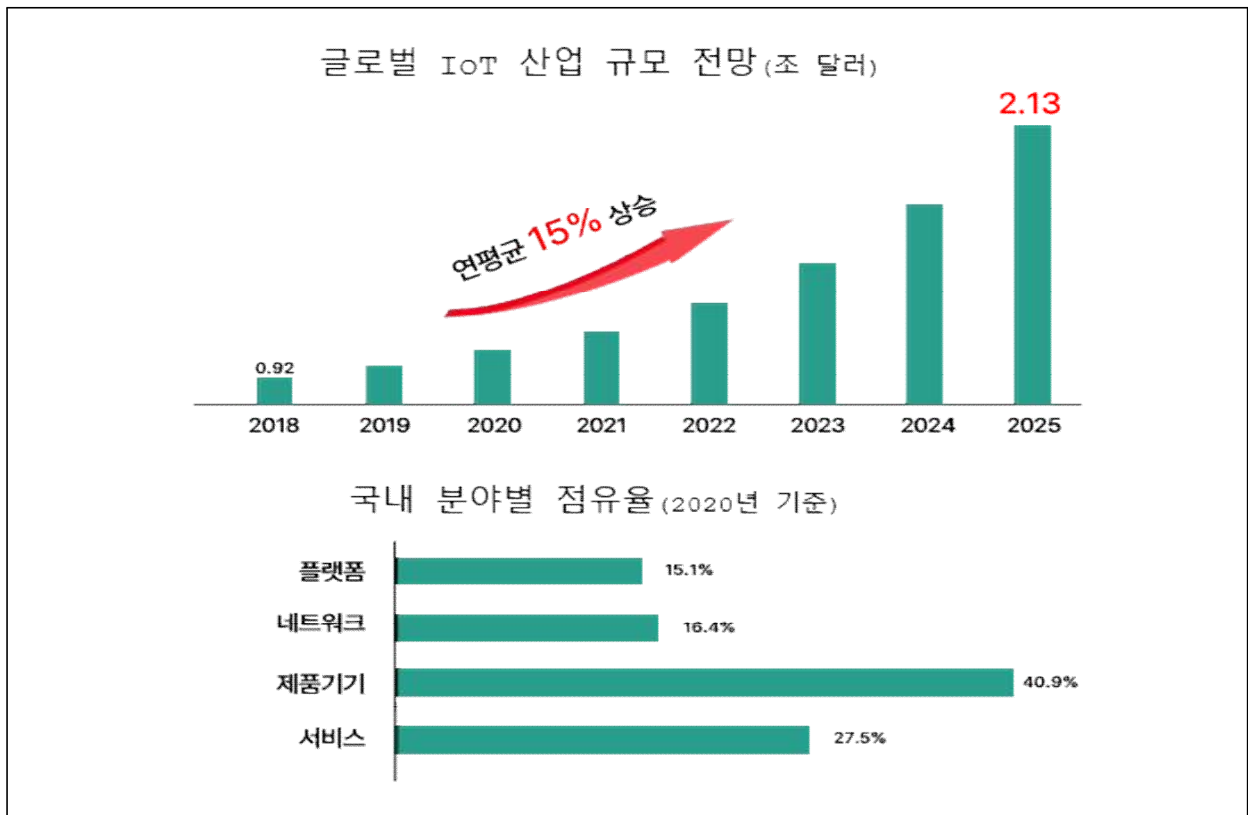


그림2.3 글로벌 IoT 산업 규모 전망

## 가. 사물인터넷(IoT) 기술의 발전 방향

2017년부터는 IoT 응용 기술은 주목받고 있다. 특히 가트너사는 2017년부터 디지털 트윈을 사물인터넷 활용의 유력한 모델로 제시하고 있다.

이와 더불어 전문가들은 사물인터넷 기술이 크게 세 가지 방향으로 발전할 것으로 예측하고 있다.

첫 번째는 사물인터넷의 지능화 자율화이다. 즉 사물인터넷은 단순 연결형에서 벗어나 지능형(Intelligence)을 거쳐 자율형(Autonomy)으로 진화하게 될 것이다. 먼저 연결형은 사물이 인터넷에 연결되어 주변 환경을 센싱하고 생산된 데이터를 전송하는 단계에 해당한다. 이후 이 데이터를 지능형 플랫폼을 통해 분석하고 의사 결정하는 단계로 발전하여 최종 자율형 단계에선 사물인터넷 자체가 지능적 판단을 통해 실시간으로 물리 세계를 조작하는 이른바 ‘엡징 컴퓨팅’ 기술이 장착된 수준으로 올라설 전망이다.

두 번째로 사물인터넷의 수집 데이터 자체가 고도화됨에 따라 처리할 수 있는 데이터의 양과 질 모두 비약적으로 증가할 것이다. 이는 안정적인 초고속 인터넷망의 발전과 맞물려 있어 5G 등의 통신 기술이 사물인터넷의 외연 자체를 확장하는 기술로서 역할을 하고 있다.

기존 사물인터넷이 저용량 데이터를 생산하는 저전력 센서에 국한되었다면 통신 기술은 물론 각종 센서의 발전은 해상도와 용량이 높은 고품질의 데이터를 더욱 빠른 처리로 이어지게 하는 디바이스를 가진 체계를 만든다. 예로써 기존 CCTV가 단순 녹화나 기록을 가졌다면 특정한 데이터를 감지하기 위한 센싱 기술이 접목되어 특수한 데이터를 생산하게 되는 사물인터넷이 되는 것이다.

마지막은 사물인터넷이 생산해낸 데이터 사이의 상호운용성(interoperability)이 증가할 것으로 보인다. 상호운용성이란 기기 및 데이터들 사이에 이루어지는 일련의 상호작용을 의미하는데, 이는 표준화(standardization)를 거쳐 데이터 및 기기 간 호환이 가능해지므로 상호운용성의 보장만으로 잠재 가치 생산 가능성은 높다.

## 나. 사물인터넷(IoT) 국내·외 활용사례

### (1) 국내 사례

과학기술정보통신부가 주도하는 IoT 실증사업은 IoT 인프라와 기술을 자동차와 보건 의료, 에너지, 도시, 공장 등 핵심 분야와 융합하여 서비스 개발과 조기 사업화를 촉진하는 대규모 프로젝트로 추진되어 왔다.



표2.2 공공부문의 IoT 실증사업(홍상연 등, 2021)

사업명	주요 내용	주관기관
수요연계형 데일리 헬스케어 실증단지	병원·침단 의료복지 단지 등 수요기관과 헬스케어 업체 등 공급기관 연계형 실증단지	대구/KT
글로벌 스마트시티 실증단지	IoT 기반 도시형 신서비스 모델 발굴 및 실증	부산/SK텔레콤
스마트그리드 보안 실증 및 지원	스마트그리드 보안 취약성 분석 및 기술 검증	국가보안기술연구소
중증질환자 애프터케어 기술개발 및 실증	암, 심장 등 중증질환 퇴원 환자를 대상으로 스마트 사후관리 서비스 개발	가톨릭대 서울성모병원
관광·안전 IoT 융합 실증	관광·안전 등 국민 생활 체감형 서비스 제공	서울시

서울시는 주차 관련 서비스와 교통안전 서비스를 제공하고 있다. 주차 관련 서비스는 거주자 우선 주차 구역의 주차공유 서비스와 불법 주정차 단속을 중심으로 이뤄지고 있다.

거주자 우선 주차 공유서비스는 노면에 사물인터넷 센서를 설치하여 차량의 유무를 실시간으로 파악하고 이 정보를 모바일 애플리케이션을 통해 제공하는 방식으로 이루어진다.

이를 통해 주차 구역 거주자에게는 수익이 발생하고 주차하고자 하는 이에게는 시간이 절약된다. 교통안전 서비스는 보행자 알림 등 교통사고 선제 대응 서비스와 정지선 위반과 같은 단속도 이루어지고 있다. 이외에도 교차로 전광판을 통한 보행자 유무 안내와 사물인터넷이 탑재된 가로등/보안등 원격제어를 통한 효율화 정책도 시행 중이다.

U-City 마스터플랜에 스마트시티를 조성하고 있는 부산시는 낙동강 하류 지역에 다양한 4차 혁명 기술을 활용한 에코델타시티를 건설 중이다. 부산 에코델타시티는 기존의 국내 스마트시티가 서비스별 기반, 데이터, 활용체계를 독립적으로 구축함으로써 서비스 간 높은 장벽을 초래하고 투입비 대비 효율이 낮다는 문제를 사전에 차단하고자 플랫폼 기반 시티를 목표로 하고 있다.

디지털 도시 플랫폼 구축의 일환으로 IoT 센서 데이터에 기반한 공유 플랫폼을 구축하고 통합 도시 데이터 분석 센터로 분야별 데이터를 모아 분석하고 활용할 예정이다.

이를 위한 기반으로 BIM 정보와 IoT 등 실시간 데이터가 상호 침투가 가능한 표준화를 추진하고 있다.

## (2) 해외 사례

미국 정부는 IoT 실생활에서 DML 적용에 초점을 둔 ‘스마트 아메리카 챌린지 (Smart America Challenge)’ 프로젝트를 추진하고 있다. 2013년 12월 시작되었으며 24개 프로젝트를 수행하고 있다. 백악관의 대통령 혁신 전문가 프로그램 (White House Innovation Fellow Program) 중 하나로 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 주관하고 있다.

스마트 아메리카 챌린지 프로젝트는 IoT를 통한 도시 일자리 확대, 새로운 비즈니스 기회 창출, 경제개선, 사람의 생명 구호 등의 목표를 담고 있다.

그 일환으로 켈컴과 혼다는 보행자에게 자동차가 접근하고 있음을 알려주는 시스템을 켈컴과 CH2M HILL은 밸브에 센서를 달아 빠져나가는 물의 양을 추적하는 등의 시스템을 개발했다.

이는 생명 구호와 경제개선 등이 제시하는 목표에 부합하는 결과를 창출하고 있다.

매사추세츠주 랜돌프(Randolph)시와 피츠버그시는 원격제어, 모니터링 관리와 동시에 인프라를 구축할 수 있는 “스마트 가로등 네트워크 서비스”를 제공하고 있다. 이를 통해 에너지 비용을 절감하고 삶의 질을 향상하며 투자를 유치하는 효과를 보였다.

캘리포니아주 글렌데일시, 버뱅크시, 롱비치시는 ‘스마트 워터 미터 (smart water meter)’를 설치하여 물 소비를 관리하면서 소비 데이터를 알려주는 서비스를 제공한다.

뉴욕시의 “Lower Manhattan’s Smart Neighborhood Pilot”은 시간에 따라 도시와 주민들이 어떻게 변화하는지를 잘 이해할 수 있도록 실시간 데이터를 제공한다. 대기, 교통 패턴, 소음 레벨, 일조량 등을 모니터링하는 센서 데이터 네트워크를 구축하여 교통사고를 줄이고 대기상태를 호전시키며, 도시복구계획을 향상할 수 있는 데이터를 제공한다.

영국 런던시는 ‘Smart London’이라는 슬로건 아래 새로운 기술과 데이터를 런던시민들, 기업체 그리고 관광객들을 위한 보다 높은 활용성을 추구하는 한편, 세계적으로 가장 빠른 무선 네트워크와 무료 와이파이를 갤러리와 박물관에 설치할 계획이다. 또한, 관광객들과 시민들을 위해 도시 길 찾기와 여행계획 도구들, 디지털 화폐를 채택하여 개발했다.

글래스고시(Glasgow)는 IBM과 협력하여 CCTV를 활용한 스마트시티 프로젝트를 진행하여 시민 편의를 위한 다양한 서비스를 제공하여 효과를 보고 있다. 시내 곳곳에

500개의 공공 카메라를 설치하여 교통체증이나 범죄, 대기오염 등 도시를 위협하는 상황에 신속히 대응하고 있다.

스페인의 바르셀로나(Barcelona)시는 필립스(Philips)사와 협력하여 인구밀집도를 실시간으로 파악하여 유동 인구수에 따라 가로등 조명 밝기를 조절하는 LED 조명 기반 ‘Urban Lighting’ 프로젝트를 추진해 연 30% 이상 전력 소비를 절약하는 효과를 거두었다.

일본 정부는 2011년 동일본 대지진 발생 이후 고조되고 있는 공공 안전에 대한 우려와 인구 고령화 등의 사회 문제에 대비하기 위해 사물인터넷 기반의 프로그램을 준비하였다.

특히 2015년 5월 발표한 ‘신로봇 전략’에서 세계 최고 수준의 산업용 로봇 기술을 이용하여 낮은 출산율, 심화하고 있는 고령화, 사회 기반 시설의 노후화 등의 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

미래는 사물인터넷 시대가 도래하면서 데이터 중심의 사회가 될 것이고, 이 같은 상황에서 로봇을 활용하여 사물인터넷 시대를 주도하며 간호산업과 의료산업, 사회기반 시설/재난/건설산업, 농업/식물산업 등 공공부문 관련 분야의 전략목표를 설정하여 추진할 계획이다.

2011년 동일본 대지진의 영향으로 방사능 우려가 존재하는 후쿠시마현에서는 야마데라 준이 개발한 ‘후쿠시마 휠(Fukushima Wheel)’이 자전거에 달린 센서로 도시 각지의 지형·대기 정보를 수집, 공유하고 있다.

**표2.3 각국의 사물인터넷(IoT) 정책 및 특성(전황수, 2016)**

구분	미국	EU	일본	한국
추진 정책	<ul style="list-style-type: none"> <li>IoT 신용합서비스</li> <li>IoT 실생활 적용</li> <li>사용자 보호/보안</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>연구개발 수행</li> <li>스마트 라이프 서비스 구현</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IoT, 로봇 집중투자</li> <li>CPS/IoT 관련 연구개발 수행</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>오픈 이노베이션</li> <li>글로벌 겨냥 서비스 개발 확산</li> </ul>
상용 제품	<ul style="list-style-type: none"> <li>스마트 홈·위치, 스마트카, 지능형 주차 서비스</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>스마트홈·카 IoT앱, LED 전구, RGB 조명</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>스마트홈, e-Factory 등 IoT 솔루션 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>스마트홈 서비스, 텔레매틱스, 스마트팜,</li> </ul>
특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>시스코, IBM 등 민간기업 중심</li> <li>스마트시티 등 공공 IoT 적용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IoT 보안 강조</li> <li>표준화 중시</li> <li>스마트시티 등 공공 IoT 적용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IoT 신용합 서비스 발굴 및 육성</li> <li>후쿠시마 휠 등 공공 IoT 적용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>기술격차, 센서 수입 의존</li> <li>컨트럴타워 부재</li> <li>전문인력 부족</li> </ul>

## 2.2.2 IoT 산업 시장동향

IoT 기술의 발전과 함께 실생활에서 가정 내 전자기기 원격 관리부터 건설 분야 스마트 장비까지 다양한 분야에 적용되어 기술개발이 이루어지고 있다.

IoT 기술은 생활은 물론 산업 전반의 다양한 분야에 스며들고 있으며 그 속도 역시 급격히 증가하고 있다.

### 가. 국내 시장 동향

사물인터넷 관련 국내 시장은 2014년 약 3조 7,600억 원 규모에서 2017년 약 7조 1,630억 원으로 연평균 약 24%라는 매우 높은 성장률을 기록했으며 2024년에는 약 32조 2,360억 원에 이를 것으로 추산된다.

표2.4 국내 IoT 시장규모 추정(홍상연 등, 2021)

(단위 : 조 원)

구 분	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
규 모	8.879	11.008	13.646	16.916	20.971	25.997	32.236

2020년 9월 기준 국내 사물인터넷 사업체 수는 2,502개로 조사되었으며 2020년 국내 총매출액은 약 13조 4,637억 원을 기록하였고(정보통신산업진흥원, 2020) 수출보다는 내수 비율이 높은 것으로 나타났다.

표2.5 국내 IoT 사업체 매출액(홍상연 등, 2021)

(단위 : 조 원)

구 분	2015	2016	2017	2018	2019	2020
내수액	4.408	5.424	6.689	8.470	9.734	12.887
수출액	0.262	0.379	0.569	0.945	1.204	1.375

### 나. 세계시장 동향

IDC(International Data Crop) 사에 따르면 사물인터넷 세계시장 규모는 2017년 약 8,000억 달러에서 연평균 15% 성장률을 기록하여 2024년경에는 약 2조 1,300억 달러에 육박할 것으로 예상된다.

표2.6 세계 IoT 시장규모 추정(홍상연 등, 2021)

(단위 : 조 달러)

2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
0.92	1.06	1.22	1.4	1.61	1.85	2.13

McKinsey 사는 2025년까지 사물인터넷 시장의 규모가 최소 3.9조 달러에서 최대 11.1조 달러에 달할 것으로 평가하고 있다.

이처럼 편차가 큰 이유 중 하나는 ‘상호운용성(interoperability)’ 때문으로 이미 구축된 사물인터넷 기기들의 상호작용을 모방하는 것만으로도 실현될 잠재적 가치가 크다고 예상하였다.

표2.7 IoT 분야별 규모 전망(2025년 추정치)(홍상연 등, 2021)

(단위 : 조 달러)

분 야	규 모	세부 전망
인간	0.2~1.6	질병을 비롯한 건강의 비대면, 원격 관리 일원화
주거	0.2~0.4	에너지 관리, 안전, 가사노동 자동화의 일반화
소매	0.4~1.2	거래 자동화, 공간 배치 최적화, 개인별 맞춤형 프로모션 일반화
사무실	0.07~0.25	조직 자체 및 노동자 모니터링 체계의 변화, 훈련에서 AR 활용, 사무실 보안 및 에너지 관리 효율화
공장	1.2~3.7	운영 최적화, 예측 정비 및 재화 공급 최적화, 공장 내 보건 및 안전관리 효율화
작업장	0.2~0.9	운영 효율화, 장비 유지, 건강, 안전 등 관리 효율화, IoT 기반 R&D로 인한 생산성 증대
교통수단	0.2~0.7	생태 기반 정비의 일반화
도시	0.9~1.7	공공 안전 및 보건, 교통 통제, 자원 관리 효율화
도시외곽	0.6~0.9	스마트 물류, 자율 주행 등의 활성화

### 다. 분야별 IoT 시장 전망

사물인터넷 부문별 비중과 성장률 전망은 다음의 표와 같이 예상된다.

표2.8 IoT 분야별 규모 전망(2025년 추정치)(홍상연 등, 2021)

구 분	2015	2022	CAGR
디바이스	88%	37%	10.0%
네트워크	5%	3%	17.0%
플랫폼	4%	30%	66.0%
서비스	3%	30%	90.0%

표2.9 분야별 IoT 시장 전망(홍상연 등, 2021)

구 분	기관별 전망
플랫폼	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 세계 IoT 플랫폼 시장은 2018년 약 112억 달러에서 연평균 17.9%로 빠르게 성장하여 2023년 약 248억 달러의 시장규모가 형성될 것으로 예상됨(IDC, 2020)</li> <li>▪ 세계 IoT 플랫폼 시장은 2018년부터 연평균 28.5%씩 성장하여 2023년엔 약 747억 달러 규모로 성장할 것으로 전망됨(Market Research Future, 2019)</li> </ul>
디바이스	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 세계 IoT 연결 디바이스 개수가 2018년 약 228억 개에서 연평균 8.9%씩 성장하여 2025년엔 약 416억 개로 늘어날 것으로 예측됨(IDC, 2019)</li> <li>▪ 세계 IoT 모듈/센서 시장은 2018년 1,986억 달러에서 2023년까지 연평균 11.7%씩 성장하여 2025년경 2,967억 달러에 달할 것으로 추정됨(IDC, 2020)</li> <li>▪ 세계 IoT 디바이스 관리시장은 연평균 28.3% 성장해 2025년엔 51억 달러의 규모로 성장할 것으로 전망됨(QTR Research, 2019)</li> </ul>
서비스	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 세계 IoT 서비스 시장은 2019년 2.4억 달러에서 20.8%로 성장해 2025년 7.6억 달러의 규모에 이를 것으로 예측됨, 2025년 기준 IoT 개별 서비스 중 SW개발이 45.3%로 가장 큰 비중을 차지하며, 인프라 통합이 22.0% 순(QTR Research, 2019)</li> </ul>
네트워크	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 세계 IoT 통신 시장은 2019~2023년까지 36.9%의 빠른성장 예측되며, 2023년 225.7억 달러로 시장 규모가 크게 확대될 것으로 예측됨(Market Research Future, 2020)</li> <li>▪ 세계 NB-IoT 시장은 연평균 34.9%씩 고성장하여 2025년 60.2억 달러 규모에 이를 것으로 전망됨(Grand View Research, 2019)</li> </ul>

## 제 3 장 IoT 센싱 계측을 위한 모니터링 시스템 구축

### 3.1 개요

해상교량과 같은 특수 구조물에 대한 계측을 통한 유지관리는 육안 점검 및 정기 점검을 통하여 이뤄지고 있다. 이는 주변 상황과 여건에 따라 시시각각으로 변하는 구조물에 미치는 영향인자를 전부 파악할 수 없다. 즉, 현행의 유지관리를 위한 점검 시스템은 그 한계점이 분명히 존재한다.

이와 관련하여 최근 현수교와 같은 장대교량 및 특수교량은 육안 점검이나 정기 점검의 모니터링 관점에서 진보된 실시간 모니터링 관련 기술을 개발 및 도입하여 지능형 감시 시스템으로 발전하고 있는 추세이다. 구조물에 대한 실시간 모니터링 기술의 발전에는 무선인터넷 환경의 진화와 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 센서와 같은 무선 기술의 발전이 빠르게 진행되고 있기에 가능하다. 무선 계측 및 통신 기술의 발달로 IoT 기술을 적용한 구조물에 대한 실시간 지능형 모니터링은 건설 구조물의 안전성 확보 및 유지관리의 효율성 향상을 제고시킬 것이다.

본 장에서는 IoT 기술을 적용한 네트워크 환경하에서 특수교량 중 하나인 현수교 구조의 동적 거동 분석을 위한 방법론을 제시한다. 현수교나 사장교와 같은 특수 장대교량을 대상으로 하는 IoT 기술을 이용한 센서 유지관리 시스템은 실시간으로 교량 구조물의 부분별 상태 및 손상 정도를 관측하여 관리주체에게 보고할 수 있으며, 손상 및 변화에 대한 한계상태를 설정하여 경보시스템을 갖추도록 하여 교량의 시공 중 또는 공용 중의 안전성 및 유지관리 효율성을 확보할 수 있다.

특히 최근 자연적, 인위적 재난재해로 인한 구조물의 안전성에 관한 관심과 집중이 높아지고 있는 상황과 노후 교량 및 신설 교량의 공용주기를 장기화하기 위한 노력이 이루어지고 있는 점은 IoT 기술을 적용한 네트워크를 이용한 실시간 모니터링 시스템 기술의 필요성을 설명해준다. 앞서 언급한 IoT 플랫폼의 자율형 발전은 계측된 데이터들이 단순 수치에 머무르지 않고 교량별 동적 거동에 대한 수치 분석을 가능케 한다. 이를 통해 교량의 각 부분의 진동, 처짐 등을 분석하여 구조해석을 수행할 수 있으며, 이를 자료화하여 교량의 설계 및 시공에 반영할 수 있다.

### 3.2 A대교

A대교는 여수국가산업단지 진입도로의 여수시 묘도동과 광양시 금호동을 연결하는 연장 2,260m인 3경간 현수교로서, 주경간 1,545m와 측경간 357.5m(×2)로 구성되어 있다.

보강거더는 트윈 강박스 형식으로 폭원은 25.7m이며, 특히 주탑의 높이가 270m에 이르는 등 규모 면에서 국내 최대 규모의 장대 현수교량이다.

A대교의 전경은 그림 3.1과 같으며, 교량 개요는 표 3.1과 같다.



그림 3.1 A대교 전경

표 3.1 A대교 개요

항 목		내 용
교 량 명		▪ A대교
공사위치		▪ 전남 여수시 묘도동 - 전남 광양시 금호동
교량형식	형 식	▪ 3경간 플로팅 현수교
	보강거더	▪ 트윈 강박스 거더
	주 탑	▪ H형 콘크리트 주탑
제 원	경간구성	▪ $357.5 + 1545.0 + 357.5 = 2,260\text{m}$
	대표폭원	▪ $B = 27.0\text{m}$
설계기준	차 선 수	▪ 왕복 4차로
	설계속도	▪ 60km/hr
	설계하중	▪ 1등급 교량(DB-24, DL-24)



### 3.3 IoT 센싱 계측 모니터링 시스템 구축

#### 3.3.1 계측시스템

계측시스템 구축 절차는 ‘계획 및 준비’ 단계를 시작으로 ‘계측시스템 설치’ 그리고 ‘전산처리시스템 구축’ 단계를 거쳐 최종단계인 ‘시스템 이관’ 단계까지 순차적으로 진행되었다. 단계별 세부 내용은 표 3.2와 같다.

표 3.2 계측시스템 구축 개요

구 분	세부 항목	세부 내용
계획 및 준비	기초자료 조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 관련 자료 및 설계도서 검토</li> <li>▪ 현장 여건 파악</li> </ul>
	실행 계획 및 준비	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 현장 여건에 따른 공정계획 수립</li> </ul>
	투입 자재 검토	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 시방서 및 현장 여건 감안 자재검토</li> </ul>
	시공계획서 작성	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 시공계획서 작성·제출</li> </ul>
계측 시스템 설치	자재수급(공용 중 계측기)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 설치 자재 수급</li> </ul>
	실내 테스트	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 현장 설치 전 실내 테스트 시행</li> </ul>
	계측기 설치	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 공용 중 계측기 설치</li> <li>▪ 계측시스템 보호 설비 설치</li> </ul>
	부대 작업	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 신호케이블 및 케이블보호관로 포설</li> <li>▪ 전원·접지선로 구축</li> <li>▪ 통신 시스템 구축</li> </ul>
전산처리 시스템 구축	전산장비 설치	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 내·외부 전산 통신망 구축</li> <li>▪ 전산장비 보호설비 설치</li> </ul>
	시스템 안정화	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 시험운용을 통한 오류 수정작업 실시</li> </ul>
시스템 이관	매뉴얼, 보고서, 도면 작성	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 운영관리 매뉴얼 작성</li> <li>▪ 최종보고서 및 설치도면 작성</li> </ul>
	계측관리자 교육	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 계측기기 사용법</li> <li>▪ 전반적인 운영 방법 교육</li> </ul>

### 가. 계측시스템 구성

A대교 계측시스템은 센서와 데이터 수집 장치 간 통신거리 및 장비 운용의 효율성 등을 고려하여 총 8개소에 분리되어 설치되었으며, 데이터가 수집되는 계측시스템의 설치 위치는 주탑과 보강거더, 케이블, 앵커리지로 크게 구분되어 외부에 노출되지 않도록 구축되었다.

한편, A대교는 여수국가산단 진입도로를 관리하는 통합유지관리센터로 이관되어 현재 여수산단 진입도로 내 타 교량들과 통합적으로 유지관리되고 있다.

따라서 본 연구에서 사용된 계측시스템의 구성은 표3.3, 그림3.2와 그림3.3과 같다.

**표3.3 계측시스템 통신 구성**

통신구간		통신규격	케이블	통신장비	비고
센서(정적)	⇔ 정적 데이터로거	Analog Signal	4Core or 10Core Shield Data Cable	-	연구범위
센서(동적)	⇔ 채널모듈	Analog Signal	2 Pair or 5 Pair Twist Shield Data Cable	-	연구범위
채널모듈	⇔ 동적 데이터로거	UART	PIN Connect	(자체내장)	연구범위
정적데이터로거 동적데이터로거 광데이터로거	⇔ 데이터변환	-	-	광미디어 컨버터	연구범위
정적데이터로거 동적데이터로거 광데이터로거	⇔ 계측서버 (유지관리 사무소)	Ethernet	Optical Fiber Cable	-	연구범위

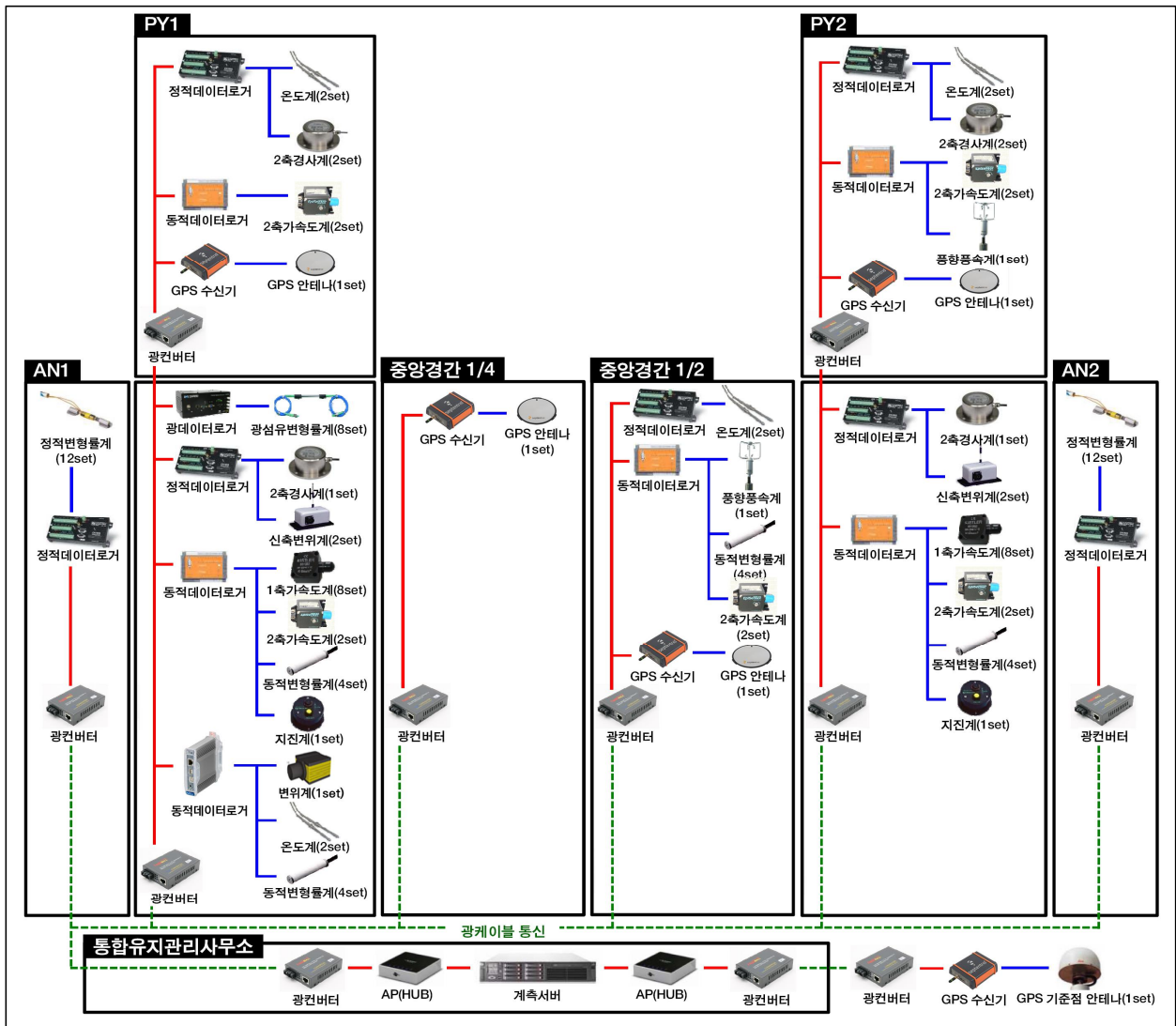


그림3.2 계측시스템 구성도



그림3.3 계측시스템 무정전 전원공급 장치 구성도

### 나. 계측항목 구성 및 배치

A대교의 계측시스템은 총 106개의 센서로 구성되어 있다. 계측 센서 항목 및 수량은 표3.4와 같으며 계측기 및 합체 배치는 표3.5, 표3.6과 같다.

표3.4 계측 센서 항목 및 구성

구분	계측센서	범례	부착위치	수량	방법	비고
주탑	온도계		PY1 상단가로보 동측 주탑, PY2 상단가로보 동측 주탑	4	정적	주탑 단면 온도변화 확인
	풍향 풍속계		PY2 동측 주탑 상부	1	동적	풍향, 풍속 감시
	2축 경사계		PY1, PY2 윈드슈, 중간가로보, 상단가로보 동측 주탑	6	정적	주탑 변위 측정
	2축 가속도계		PY1, PY2 중단가로보 동측 주탑, PY1, PY2 상단가로보 동측 주탑	4	동적	주탑 고유진동 측정
	GPS		PY1, PY2 동측 주탑 상부	2	GPS	주탑부 상부 변위 확인
	지진계		PY2 하단기초부 동측	2	동적	지진에 의한 진동특성 측정
보강거더	풍향 풍속계		중앙경간 1/2지점	1	동적	관리기준 풍속 초과시 교통통제용으로 적용
	GPS		중앙경간 1/2, 1/4지점	2	GPS	중앙경간 처짐 및 변위 확인
	온도계		SP1 동측 링크슈 하단부	3	동적	링크슈 단면 온도변화 확인
			중앙경간 1/2지점	5	정적	보강거더 내부 온도변화
	2축 가속도계		측경간 1/2지점, 중앙경간 1/2지점	6	동적	보강거더 연직, 비틀림, 수평고유주기 산출
	변위계		SP1 동측 링크슈 하단부	1	동적	부탑 벽체에서 링크슈까지의 온도에 의한 교축방향 변위 측정
	신축 변위계		SP1, SP2 부탑연결부	4	정적	신축이음부의 온도에 의한 교축방향 변위 측정
	동적 변형률계		SP1 동측 링크슈 하단부	4	동적	링크슈 응력 측정
		PY1, PY2 주탑연결부, 중앙경간 1/2지점	12	동적	보강거더 응력 측정	
광섬유 변형률계		중앙경간 센터락, SP1, SP2 링크슈	8	광섬유	활하중 응력 변동폭 계산을 위한 변형률 측정	
케이블	1축 가속도계		타이다운 로프 유효길이 내	4	동적	타이다운 로프 장력상태 확인
	1축 가속도계		행어로프 유효길이 내	12	동적	행어로프 장력상태 확인
앵커리지	정적 변형률계		AN1, AN2 스트랜드 Rod	24	정적	스트랜드 Rod 응력 측정
기타	GPS		육상부	1	GPS	GPS센서의 기준점으로 활용
센서 총 수량				106		

표3.5 계측기 배치

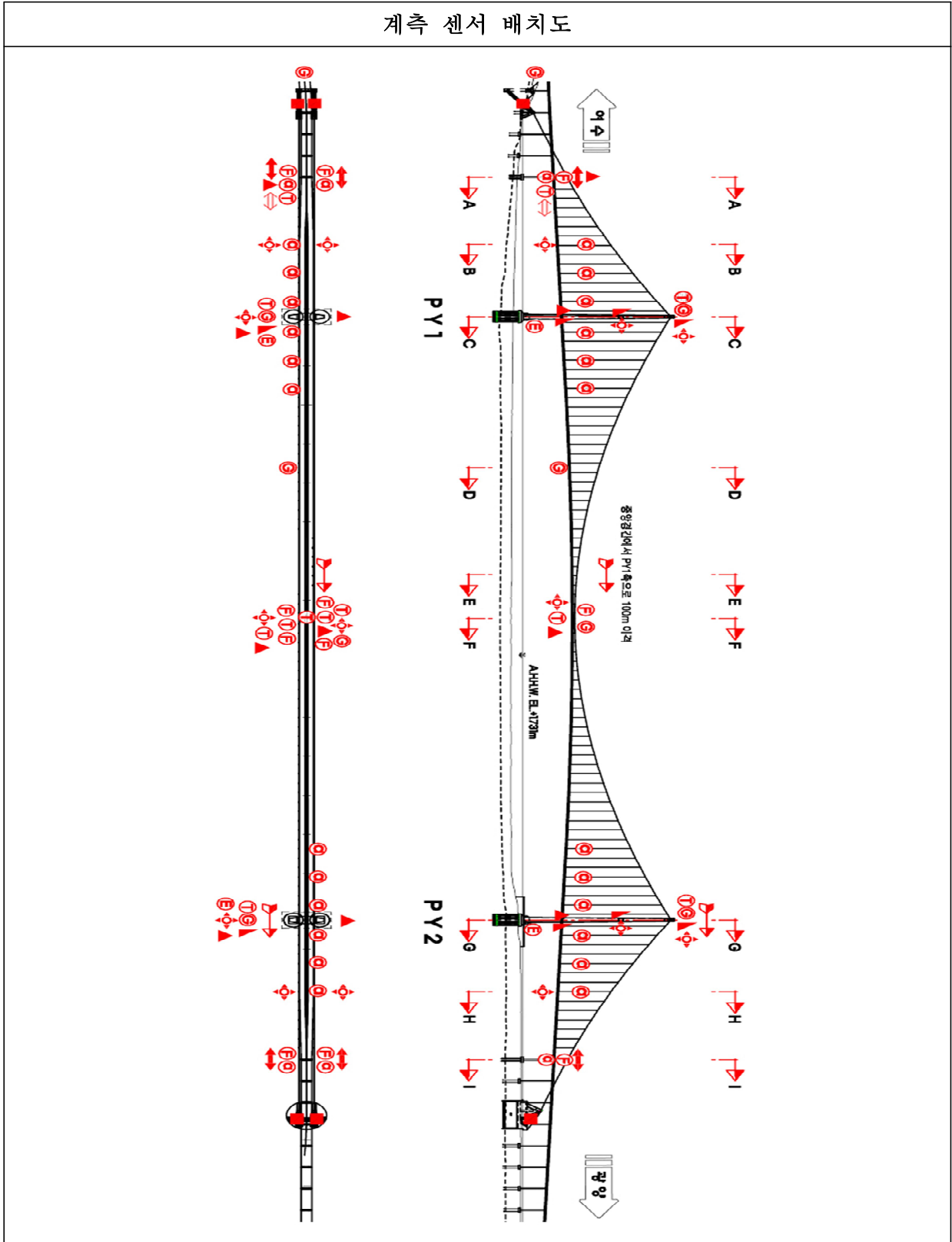
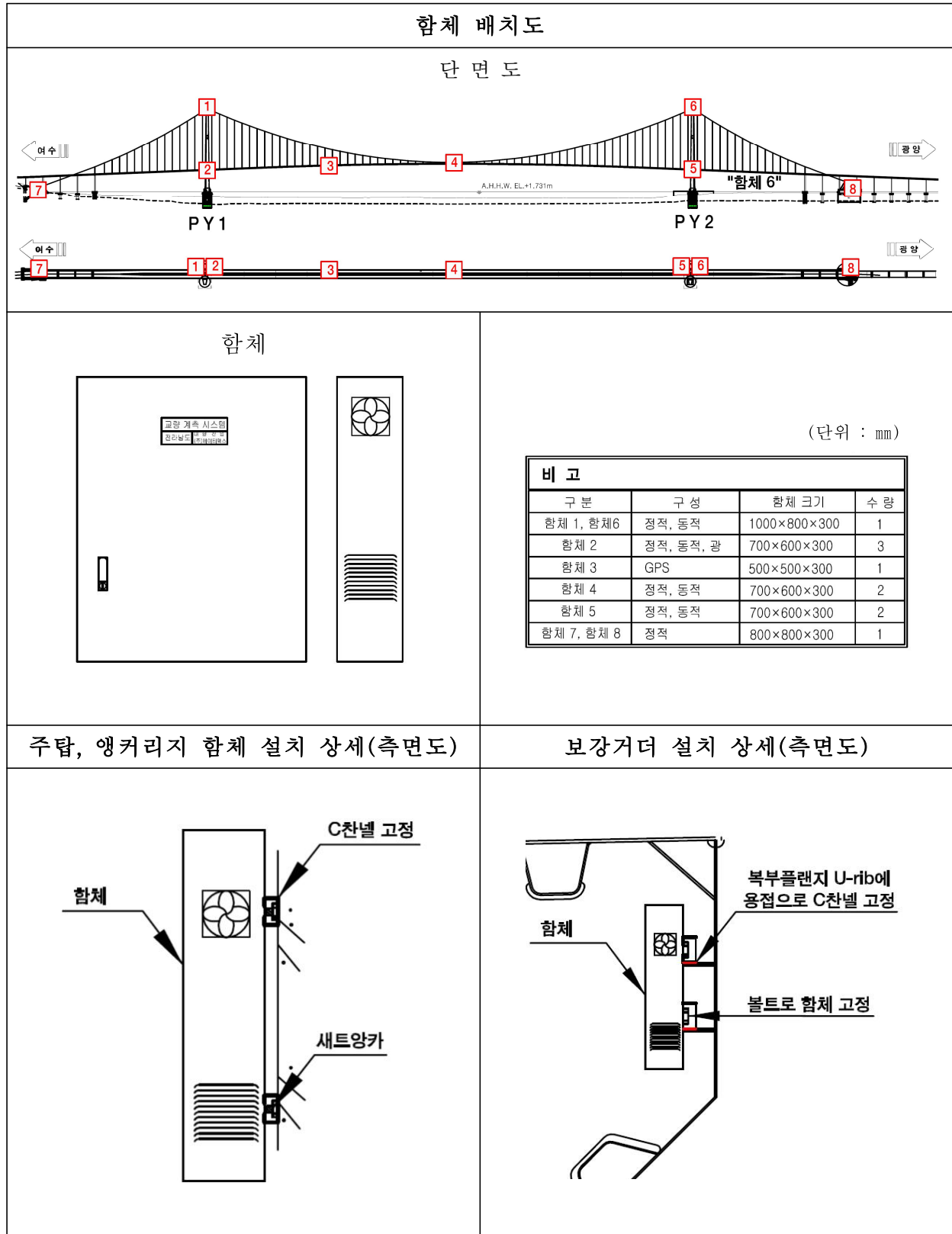


표3.6 합체 배치



### 3.3.2 동적 거동 계측기 종류

#### 가. 계측 센서 사양

A대교 계측시스템 센서의 종류 및 사양은 표3.7과 같다.

표3.7 계측 센서 사양

종 류	사 양		수 량	사 진
	항 목	내 용		
온도계	모 델 명	NTC-3KD-3F	12	
	형 식	Thermistor		
	Range	-40℃ ~ +120℃		
	저항소자	백금체소자		
	분 해 능	0.1℃		
	제 작 사	GTC(한국)		
풍향 풍속계	모 델 명	HD2003	2	
	Range	60m/s, 360 degree		
	분 해 능	0.01m/s, 0.1 degree		
	사용온도	-40℃ ~ +60℃		
	방 식	Ultrasonic Wave Type		
	제 작 사	Delta OHM(이탈리아)		
2축 경사계	모 델 명	MV-2B	4	
	방 식	Electronic Type		
	Range	±2°		
	감 도	0.15% FS		
	정 확 성	0.1% FS		
	사용온도	-20℃ ~ 80℃		
	제조회사	NGI 사(한국)		
	모 델 명	CUBE-D	2	
	방 식	Electronic Type		
	Range	±3°		
	정 밀 도	0.001°		
	정 확 성	0.1% FS		
	사용온도	-30℃ ~ +85℃		
	제조회사	(주)다스		

표3.7 계측 센서 사양(계속)

종 류	사 양		수 량	사 진
	항 목	내 용		
2축 가속도계	모 델 명	ES-U2	10	
	Range	± 0.25 ~ 4g		
	측정범위	200Hz		
	정 도	± 1%		
	사용온도	-20℃ ~ 70℃		
	방 식	Force Balance Type		
	제 작 사	Kinometrics(미국)		
GPS	모 델 명	PolaNT MF Antenna	4	
	Range	GPS & GLONASS & Galileo		
	Peak Gain	5.5dBi		
	사용온도	-55℃ ~ +85℃		
	방 식	Geodetic		
	제 작 사	Septentrio(벨기에)		
지진계	모 델 명	ES-T	2	
	Range	± 0.25g ~ 4g		
	측정범위	200Hz		
	정 도	± 1%		
	사용온도	-20℃ ~ 70℃		
	방 식	Force Balance Type		
	제 작 사	Kinometrics(미국)		
변위계	모 델 명	DLD-420	1	
	측정범위	0 ~ 80m		
	정 도	± 1mm		
	사용온도	-20℃ ~ +45℃		
	레이저등급	2등급(IEC60825-1)		
	제 작 사	DAS(한국)		
신축 변위계	모 델 명	ODSL 30/V-30M	2	
	측정범위	0.2 ... 30m		
	분 해 능	0.1mm/1mm (factory setting)		
	응답속도	30 ... 100ms		
	감지방식	직접 반사형(TOF측정)		
	제 작 사	Leuze(독일)	2	
	모 델 명	PT420		
	Range	100in		
	직 선 성	± 0.05% F.S		
	사용온도	-40℃ ~ +90℃		
방 식	Position Transducer Type			
제 작 사	Celesco(미국)			



표3.7 계측 센서 사양(계속)

종 류	사 양		수 량	사 진
	항 목	내 용		
동적 변형률계	모 델 명	KM-100B	16	
	Range	$\pm 5,000 \mu\text{Strain}$		
	분 해 능	$1.0 \mu\text{Strain}$		
	비직선성	1%		
	사용온도	$-20^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$		
	방 식	Electric Resistance Type		
	제 작 사	Tokyo Sokki(일본)		
광섬유 변형률계	모 델 명	FSS-100	8	
	Range	$\pm 4,000 \mu\text{Strain}$		
	분 해 능	$1.0 \mu\text{Strain}$		
	방 식	Optical Fiber Type		
	사용온도	$-20^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$		
	제 작 사	FBG Tech(한국)		
1축 가속도계	모 델 명	8315A	16	
	Range	$\pm 2g$		
	측정범위	250Hz		
	정 도	$\pm 1\%$		
	사용온도	$-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$		
	방 식	Capacitive Type		
	제 작 사	Kistler(미국)		
정적 변형률계	모 델 명	4150	24	
	Range	$\pm 3,000 \mu\text{Strain}$		
	분 해 능	$0.4 \mu\text{Strain}$		
	정 도	$\pm 0.5\%$		
	사용온도	$-20^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$		
	방 식	Vibration Wire Type		
	제 작 사	Geokon(미국)		
GPS (기준점)	모 델 명	PolaNt Chock-ring Antenna	1	
	Range	GPS & GLONASS & Gallieo		
	Peak Gain	5.5dBi		
	사용온도	$-55^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$		
	방 식	3D chokering		
	제 작 사	Septentrio(벨기에)		

## 나. 데이터 수집 장치

정·동적, 광, GPS 데이터 수집장치(로거)의 종류 및 사양은 표 3.8과 같다.



표3.8 계측기기 사양

종 류	정적 데이터 수집 장치	
	사 양	계측기기
정 적 데 이 터 수 집 장 치	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 모 델 명 : CR1000</li> <li>▪ 입력전압범위 : ±5,000mV</li> <li>▪ 측정채널 수 : 16개 Single Ended, 8개 Diff</li> <li>▪ 아날로그 출력 : 2.5V 이상</li> <li>▪ 전력소모 : 27.6mA @ 100Hz</li> <li>▪ 통 신 : CDMA, Ethernet, RS232 등</li> <li>▪ 데이터 저장 : 본체 메모리 내장형</li> <li>▪ 저장용량 : 2Mbyte</li> <li>▪ 사용온도 : -25℃ ~ 50℃</li> <li>▪ 제 작 사 : Campbell(미국)</li> </ul>	
채널 확장기	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 명 칭 : MUX (Multiplexer)</li> <li>▪ 모 델 명 : GTX 248</li> <li>▪ 측정채널 수 : 32개 Single Ended, 16개 Diff</li> <li>▪ 제 작 사 : GTC(한국)</li> </ul>	
적용 사유	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 다양한 종류의 센서 및 통신방식 지원</li> <li>▪ Multiplex를 활용한 채널 확장 기능 우수</li> <li>▪ 안정적인 데이터 취득</li> <li>▪ 사용 환경에 적합하도록 계측주기 및 환산정보 수정하여 측정 가능</li> <li>▪ 교량 적용실적 우수함 (진도대교, 돌산대교, 소록대교, 여수대교 등)</li> </ul>	

표3.8 계측기기 사양(계속)

종 류	동적 데이터 수집 장치	
	사 양	계측기기
동적 데이터 수집장치	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 모델명 : E-Gate</li> <li>▪ 측정채널 수 : 최대 220채널</li> <li>▪ 측정속도 : 최대 1000Hz</li> <li>▪ 사용온도 : -20℃ ~ 60℃</li> <li>▪ 특성 : RS485통신으로 500m 이상 계측가능</li> <li>▪ 특이사항 : 전기저항식, 전류식센서 등 방식 다양</li> <li>▪ 제작사 : Gantner(독일)</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 모델명 : Q-Gate</li> <li>▪ 측정채널 수 : 최대 220채널</li> <li>▪ 측정속도 : 최대 100000Hz</li> <li>▪ 사용온도 : -20℃ ~ 60℃</li> <li>▪ 특성 : RS485통신으로 500m 이상 계측가능</li> <li>▪ 특이사항 : 전기저항식, 전류식센서 등 방식 다양</li> <li>▪ 제작사 : Gantner(독일)</li> </ul>	
채널 확장기	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 명칭 : 채널모듈</li> <li>▪ 모델명 : A1-1</li> <li>▪ 측정채널 수 : 대당 1채널</li> <li>▪ 제작사 : Gantner(독일)</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 명칭 : 채널모듈</li> <li>▪ 모델명 : A3-1</li> <li>▪ 측정채널 수 : 대당 4채널</li> <li>▪ 제작사 : Gantner(독일)</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 명칭 : 채널모듈</li> <li>▪ 모델명 : A107</li> <li>▪ 측정채널 수 : 대당 4채널</li> <li>▪ 제작사 : Gantner(독일)</li> </ul>	
적용 사유	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 센서 변경 등에 따른 다양한 센서를 측정 가능</li> <li>▪ 원거리에 있는 센서의 노이즈를 최소화할 수 있음 (RS485통신 지원)</li> <li>▪ 다양한 통신 방법 적용 가능</li> <li>▪ 내구성이 뛰어나 장기 계측(유지관리)에 유리</li> <li>▪ 교량 적용실적 우수함 (안도대교, 낙생고가교, 숲내교, 여수대교 등)</li> </ul>	

표3.8 계측기기 사양(계속)

종 류	동적 데이터 수집 장치	
	사 양	
광 전 용 데 이 터 수 집 장 치	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 모 델 명 : SM125</li> <li>▪ 측정채널수 : 최대 4채널</li> <li>▪ 파장범위 : 1520 ~ 1570nm (50nm)</li> <li>▪ 측정속도 : 1Hz</li> <li>▪ 사용온도 : 0℃ ~ 50℃</li> <li>▪ 콘 넥 터 : FC/APC</li> <li>▪ 특이사항 : 자동 전원복구기능 내장</li> <li>▪ 제 작 사 : Micron Optics(미국)</li> </ul>	
적용 사유	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 측정속도 및 측정파장 범위 등이 본 교량의 계측목적에 적합한 사양임</li> <li>▪ 원거리 인터넷 접속을 통해 센서 및 로거의 이상 유·무, 데이터 등 모니터링 가능</li> <li>▪ Ethernet통신 지원으로 본 교량 통신방식에 유리함</li> <li>▪ 내구성이 뛰어나 장기 계측(유지관리)에 유리</li> <li>▪ 교량 적용실적 우수함 (제2진도대교, 운암대교 등)</li> </ul>	
종 류	광전용 데이터 수집 장치	
	사 양	계 측 기 기
동적 데 이 터 수 집 장 치	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 모 델 명 : AstRx SB</li> <li>▪ 측정채널 수 : 1채널</li> <li>▪ 측정속도 : 20Hz 이상</li> <li>▪ 입력전원 : 3 ~ 15VDC</li> <li>▪ 사용온도 : -30℃ ~ 65℃</li> <li>▪ 특 성 : RTK 기능 내장 (Base), IP68</li> <li>▪ RTK 성능 : 수평 6mm+0.5ppm, 수직: 10+1ppm</li> <li>▪ 특이사항 : GPS : L1, L2, L5, GLONASS : L1, L2, L3, Galileo : E1, E5, Beidou : B1, B2, 400채널 이상 트래킹</li> <li>▪ 제 작 사 : Septentrio(벨기에)</li> </ul>	
적용 사유	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ LAN통신</li> <li>▪ 빠르고 정밀한 측정</li> <li>▪ 교량, 댐과 같은 민감한 구조물에 적용 가능</li> <li>▪ 교량 적용실적 우수함 (영흥대교, 교동대교, 월드컵경기장 등)</li> </ul>	

### 3.3.3 동적 계측시스템 구축

#### 가. 개요

계측 센서를 설치함에 있어 대상 구조물의 손상을 최소화하고 계측 센서의 장기 내구성을 확보하며 향후 유지관리 효율성을 도모하기 위해서는 다음과 같은 설치 원칙이 적용되었다.

- 모든 계측 센서는 구조물에 가능한 손상이 없도록 설치하여야 하며, 부재에 간섭을(용접 등) 줄 경우 부식방지 등 필요한 조치를 취한다.
- 센서 부착용 지그 및 볼트 등 모든 자재는 내구성 확보와 부식방지를 위하여 스테인리스 재질 또는 도장 처리된 자재를 사용한다.
- 계측 센서 등은 외부 영향에 의하여 구조물에서 이탈이 발생치 않도록 부착한다.
- 계측시스템의 모든 자재 및 케이블 관로 등은 표식을 하여 타 시설물과 구별될 수 있도록 한다.

한편, 계측 센서를 효율적으로 관리할 수 있도록 표3.9와 같이 센서별로 ID를 부여하였다.

**표3.9 공용 중 센서별 ID**

센서종류	센서ID	설치 위치	센서종류	센서ID	설치 위치
온도계	TMP1	PY1 중단가로보 동측 내부	2층 경사계	BTI1_X, BTI1_Y	PY1 윈드슈 동측
	TMP2	PY1 상단가로보 동측 내부			
	TMP3	보강거더 1/2지점 서측 내부		BTI2_X, BTI2_Y	PY1 중단가로보 동측
	TMP4	보강거더 1/2지점 서측 상부			
	TMP5	보강거더 1/2지점 동측 하부		BTI3_X, BTI3_Y	PY1 상단가로보 동측
	TMP6	보강거더 1/2지점 동측 상부			
	TMP7	보강거더 1/2지점 서측 하부		BTI4_X, BTI4_Y	PY2 윈드슈 동측
	TMP8	PY2 중단가로보 동측 내부			
	TMP9	PY2 상단가로보 동측 내부		BTI5_X, BTI5_Y	PY2 중단가로보 동측
	TG_01	SP1 동측 링크슈 하단부			
	TG_02	SP1 동측 링크슈 하단부			
	TG_03	SP1 동측 링크슈 하단부		BTI6_X, BTI6_Y	PY2 상단가로보 동측

표3.9 공용 중 센서별 ID(계속)

센서종류	센서ID	설치 위치	센서종류	센서ID	설치 위치			
풍향 풍속계	WGT1_X	PY2 동측 탐정부	신축 변위계	EXP1	SP1 부탐연결부 서측			
	WGT1_Z			EXP2	SP1 부탐연결부 동측			
	WGT1_S			EXP3	SP2 부탐연결부 서측			
	WGT1_H			EXP4	SP2 부탐연결부 동측			
	WGT1_T		변위계	EM_01	SP1 동측 링크슈 하단부			
	WGT2_X	보강거더 1/2지점에서 PY1측으로 100M 이격 지점		FSG1	SP1 링크슈 서측			
	WGT2_Z			FSG2	SP1 링크슈 동측			
	WGT2_S			FSG3	센터락 서측 시점			
	GPS			GPS1	PY1 탐정부 동측	광섬유 변형률 계	FSG4	센터락 동측 시점
				GPS2			보강거더 1/4지점 서측	FSG5
GPS3			보강거더 1/2지점 서측	FSG6			센터락 동측 종점	
GPS4		PY2 탐정부 동측	FSG7	SP2 링크슈 서측				
GPS5		유지관리사무소	FSG8	SP2 링크슈 동측				
동적 변형 률계	DSG01	PY1 주탐연결부 서측 하부	1축 가속 도계	CAC01	TD1 서측			
	DSG02	PY1 주탐연결부 서측 상부		CAC02	TD1 동측			
	DSG03	PY1 주탐연결부 동측 하부		CAC03	H7 동측			
	DSG04	PY1 주탐연결부 동측 상부		CAC04	H10 동측			
	DSG05	보강거더 1/2지점 서측 하부		CAC05	H13 동측			
	DSG06	보강거더 1/2지점 서측 상부		CAC06	H16 동측			
	DSG07	보강거더 1/2지점 동측 하부		CAC07	H19 동측			
	DSG08	보강거더 1/2지점 동측 상부		CAC08	H22 동측			
	DSG09	PY2 주탐연결부 서측 하부		CAC09	TD2 서측			
	DSG10	PY2 주탐연결부 서측 상부		CAC10	TD2 동측			
	DSG11	PY2 주탐연결부 동측 하부		CAC11	H71 서측			
	DSG12	PY2 주탐연결부 동측 상부		CAC12	H74 서측			
	DSG_01	SP1 동측 링크슈 하단부		CAC13	H77 서측			
	DSG_02	SP1 동측 링크슈 하단부		CAC14	H80 서측			
	DSG_03	SP1 동측 링크슈 하단부		CAC15	H83 서측			
	DSG_04	SP1 동측 링크슈 하단부		CAC16	H86 서측			

표3.9 공용 중 센서별 ID(계속)

센서 종류	센서ID	설치 위치	센서 종류	센서ID	설치 위치
2층 가속 도계	ACC01_Z ACC01_Y	PY1 측경간 1/2지점 서측	정적 변형 률계	SSG01_B	AN1 서측 5번 스트랜드 하부 로드
				SSG01_T	AN1 서측 5번 스트랜드 상부 로드
	ACC02_Z ACC02_Y	PY1 측경간 1/2지점 동측		SSG02_B	AN1 서측 17번 스트랜드 하부 로드
				SSG02_T	AN1 서측 17번 스트랜드 상부 로드
	ACC03_X ACC03_Y	PY1 중단가로보 동측		SSG03_B	AN1 서측 29번 스트랜드 하부 로드
				SSG03_T	AN1 서측 29번 스트랜드 상부 로드
	ACC04_X ACC04_Y	PY1 중단가로보 동측		SSG04_B	AN1 동측 5번 스트랜드 하부 로드
				SSG04_T	AN1 동측 5번 스트랜드 상부 로드
	ACC05_Z ACC05_Y	보강거더 1/2지점 서측		SSG05_B	AN1 동측 17번 스트랜드 하부 로드
				SSG05_T	AN1 동측 17번 스트랜드 상부 로드
	ACC06_Z ACC06_Y	보강거더 1/2지점 동측		SSG06_B	AN1 동측 29번 스트랜드 하부 로드
				SSG06_T	AN1 동측 29번 스트랜드 상부 로드
	ACC07_Z ACC07_Y	PY2 측경간 1/2지점 서측		SSG07_B	AN2 서측 5번 스트랜드 하부 로드
		SSG07_T		AN2 서측 5번 스트랜드 상부 로드	
ACC08_Z ACC08_Y	PY2 측경간 1/2지점 동측	SSG08_B		AN2 서측 17번 스트랜드 하부 로드	
		SSG08_T		AN2 서측 17번 스트랜드 상부 로드	
ACC09_X ACC09_Y	PY2 중단가로보 동측	SSG09_B		AN2 서측 29번 스트랜드 하부 로드	
		SSG09_T		AN2 서측 29번 스트랜드 상부 로드	
ACC10_X ACC10_Y	PY2 중단가로보 동측	SSG10_B		AN2 동측 5번 스트랜드 하부 로드	
		SSG10_T		AN2 동측 5번 스트랜드 상부 로드	
지진계	EQK1_Z, EQK1_X, EQK1_Y	PY1 기초부 동측		SSG11_B	AN2 동측 17번 스트랜드 하부 로드
				SSG11_T	AN2 동측 17번 스트랜드 상부 로드
	EQK2_Z EQK2_X EQK2_Y	PY2 기초부 동측		SSG12_B	AN2 동측 29번 스트랜드 하부 로드
			SSG12_T	AN2 동측 29번 스트랜드 상부 로드	

## 나. 계측 센서 배선

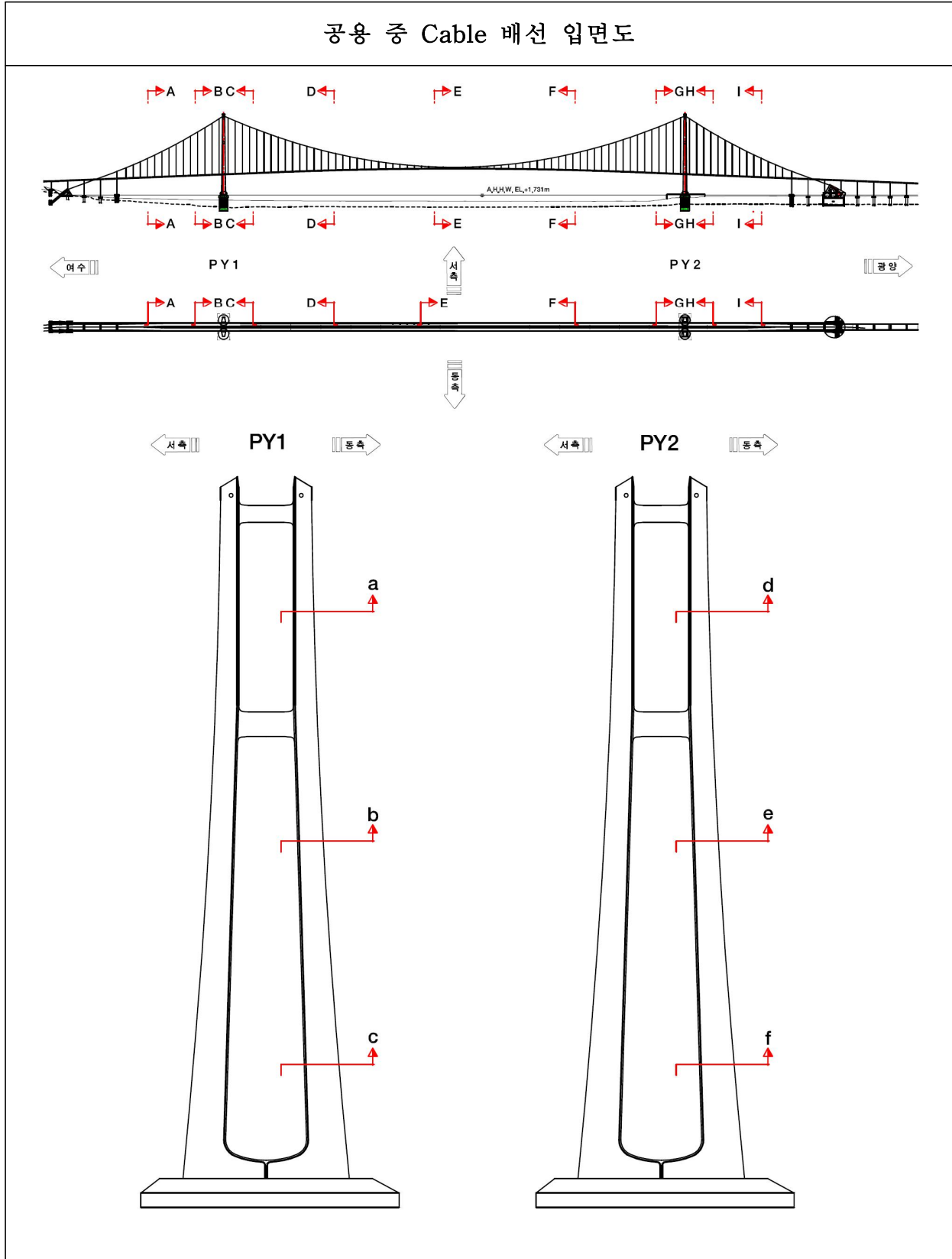
센서별 core 수와 사용 케이블은 표3.10과 같고, 배선도는 표3.11과 같다.

표3.10 공용 중 계측시스템 사용 케이블 정보

센서 종류	케이블 종류	케이블 규격	소요 core 수
온도계	UL Shield Style	20AWG × 3C	3
풍향풍속계(초음파식)	UL Shield Style	20AWG × 3P	6
2축 경사계	UL Shield Style	20AWG × 2P	4
2축 가속도계	UL Shield Style	20AWG × 3P × 2가닥	6 + 6 = 12
GPS	동축 10C	1C(10mm)	1
지진계	UL Shield Style	20AWG × 5P	10
변위계	UL Shield Style	20AWG × 2P	4
신축 이음계	UL Shield Style	20AWG × 2P	4
동적 변형률계	UL Shield Style	20AWG × 2P	4
광섬유 변형률계	광섬유	1C(3mm)	1
1축 가속도계	UL Shield Style	20AWG × 3P	6
정적 변형률계	UL Shield Style	20AWG × 2P	4
광통신 케이블	광섬유	16C(11.5mm)	16
전원 케이블	F-CV	2.5SQ 3C	3



표3.11 공용 중 계측시스템 배선



## 다. 계측기 설치

### (1) 온도계 설치

온도계의 경우 PY1, PY2 중단과 상단 가로보 동측 내부에 각각 1개씩 4개의 센서가 설치되었고 보강거더 중앙경간 1/2지점 내부에 5개의 센서가 설치되었으며, SP1 동측 링크슈 하단 모퉁이에 각각 1개씩 3개의 센서가 설치되었다.

주탑의 경우 주탑 단면의 온도를 계측하기 위하여 단면을 형삭 후 고체 에폭시로 마무리하였고, 보강거더의 경우 내부의 온도를 측정하기 위한 센서 1개와 강재의 온도를 측정하기 위하여 강재에 밀착하여 4개의 센서가 설치되었으며, SP1 링크슈 단면 온도를 측정하기 위해 고체 에폭시로 마무리하였다.

온도계의 설치 전경 및 설치 방법을 정리하면 표3.12와 같다.

**표3.12 온도계 설치 전경 및 설치 방법**

주탑 _ 센서 설치	보강거더 _ 센서 설치
	
주탑 _ 센서 설치 전경	보강거더 _ 센서 설치 전경
	
내용	① 설치위치 선정    ② 주 탑 : 단면 형삭 / 보강형 : 지그 설치(용접) ③ 센서 설치 후 고정 ④ 연장케이블 결선 후 계측기기까지 신호케이블 포설 ⑤ 보호커버 설치    ⑥ 센서 이상 유무 확인





**(2) 풍향풍속계 설치**

풍향풍속계의 경우 PY2 동측 탑정부에 1개소, 보강거더 1/2지점에서 PY1측으로 100m 이격된 지점에 1개소, 총 2개소에 풍향풍속계가 설치되었다.

설치 시 보다 정확한 풍향 풍속을 계측하기 위하여 주탑 지그의 경우 1.5m, 보강거더 지그의 경우는 2m로 제작되었다.

풍향풍속계의 설치 전경 및 설치 방법을 정리하면 표3.13와 같다.

**표3.13 풍향풍속계 설치 전경 및 설치 방법**

주탑 _ 센서 설치		보강거더 _ 지그 설치	
			
주탑 _ 센서 설치 전경		보강거더 _ 센서 설치 전경	
			
내용	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 설치위치 선정</li> <li>② 고정용 볼트 용접</li> <li>③ 배선을 위한 보강거더 홀링</li> <li>④ 지그 고정(너트)</li> <li>⑤ 센서 설치</li> <li>⑥ 방수를 위한 실링</li> <li>⑦ 연장케이블 결선 후 계측기기까지 신호케이블 포설</li> <li>⑧ 센서 이상 유무 확인</li> </ol>		

### (3) 2축 경사계 설치

2축 경사계는 PY1, PY2 윈드슈와 중단, 상단가로보 동측에 각각 1개소씩 총 6개소에 센서가 설치되었다.

2축 경사계 설치 시 X축이 교축 방향으로 Y축이 교축 직각 방향으로 향하도록 설치되었으며, 교축 방향의 경우 시점에서 종점 방향으로 +X축, 교축 직각 방향의 경우 동측에서 서측으로 +Y축으로 향하게 설치되었다.

2축 경사계의 설치 전경 및 설치 방법을 정리하면 표3.14과 같다.

**표3.14 2축 경사계 설치 전경 및 설치 방법**

지그 설치	센서 고정 및 수평 조절
	
케이블 결선 후 보호 커버 설치	센서 설치 전경
	
내용	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 설치위치 선정</li> <li>② 센서 고정 지그 설치(세트양카)</li> <li>③ 지그에 센서 고정 및 수평 조정</li> <li>④ 연장케이블 결선</li> <li>⑤ 계측기기까지 신호케이블 포설</li> <li>⑥ 보호커버 설치</li> <li>⑦ 센서 이상 유무 확인</li> </ol>



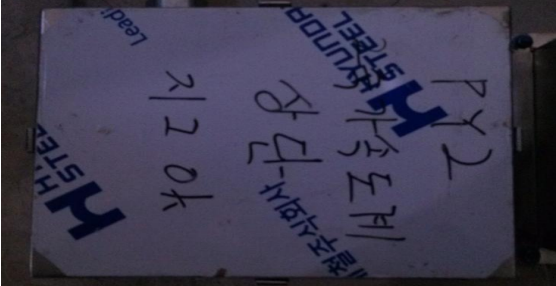

**(4) 2층 가속도계 설치**

2층 가속도계는 PY1, PY2 중단과 상단 가로보 동측에 각각 1개소씩 4개소가 설치되었으며, 보강거더의 경우 PY1, PY2 측경간 1/2지점 동·서측에 1개소씩 4개소, 중앙경간 1/2지점 동·서측에 1개소씩 2개소가 설치되었다.

주탑에 설치되는 2층 가속도계의 경우 진동이 큰 교축 방향과 교축 직각 방향으로 설치되었으며, 보강거더의 경우 차량 통행으로 인한 진동이 큰 연직 방향과 교축 직각 방향의 진동을 측정하도록 설치되었다.

2층 가속도계의 설치 전경 및 설치 방법을 정리하면 표3.15과 같다.

**표3.15 2층 가속도계 설치 전경 및 설치 방법**

주탑 _ 센서 설치	보강거더 _ 센서 설치
	
주탑 _ 센서 설치 전경	보강거더 _ 센서 설치 전경
	
내용	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 설치위치 선정</li> <li>② 주 탑 : 센서 고정 지그 설치(세트양카, 용접)</li> <li>③ 지그에 센서 고정 및 수평 조정</li> <li>④ 연장케이블 결선 후 계측기기까지 신호케이블 포설</li> <li>⑤ 보호커버 설치</li> <li>⑥ 센서 이상 유무 확인</li> </ol>

**(5) GPS 설치**

GPS는 PY1, PY2 동측 탑정부와 보강거더 중앙경간 1/4지점, 1/2지점 총 4개소가 설치되었으며, 기준점은 유지관리사무소에 1개소 설치되었다.

GPS 안테나의 경우 타 시설물로 인한 간섭 시 신호의 품질이 떨어짐으로 인하여 PY1, PY2 탑정부와 보강거더 중앙경간 1/4지점의 지그는 2m, 보강거더 중앙경간 1/2 지점 지그는 4.3m로 제작하여 설치되었다.

GPS의 설치 전경 및 설치 방법을 정리하면 표3.16과 같다.

**표3.16 GPS 설치 전경 및 설치 방법**

주탑 _ 지그 설치	보강거더 _ 지그 설치
	
주탑 _ 센서 설치 전경	보강거더 _ 센서 설치 전경
	
내용	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 설치위치 선정</li> <li>② 고정용 볼트 용접</li> <li>③ 배선을 위한 보강거더 홀링</li> <li>④ 지그 고정(너트)</li> <li>⑤ 센서 설치</li> <li>⑥ 방수를 위한 실링</li> <li>⑦ 계측기기까지 신호케이블 포설</li> <li>⑧ 센서 이상 유무 확인</li> </ol>



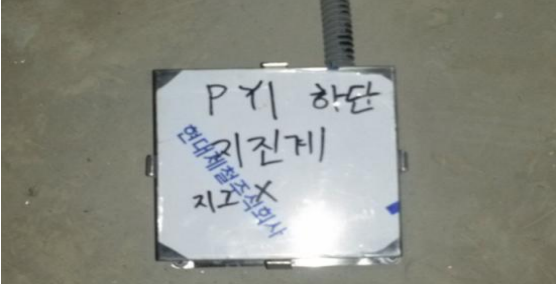

(6) 지진계 설치

지진계는 PY1, PY2 하단기초부 동측 내부에 설치되었으며, 지진계 설치 시 Y축이 교축 방향으로 X축이 교축 직각 방향으로 Z축이 연직 방향으로 향하도록 설치되었다.

지진계는 전원공급방식에 따라 differential type과 single supply type으로 나눌 수 있고, type 별로 결선방식이 다른데, A대교의 경우 differential type으로 설치되었다.

지진계의 설치 전경 및 설치 방법을 정리하면 표3.17와 같다.

표3.17 지진계 설치 전경 및 설치 방법

지그 설치	센서 설치 및 수평 조정
	
케이블 결선 후 보호 커버 설치	센서 설치 전경
	
내용	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 설치위치 선정</li> <li>② 설치위치에 센서설치를 위한 기초 제작</li> <li>③ 기초에 센서 고정 및 수평 조정(세트 앙카)</li> <li>④ 연장케이블 결선</li> <li>⑤ 계측기기까지 신호케이블 포설</li> <li>⑥ 보호커버 설치</li> <li>⑦ 센서 이상 유무 확인</li> </ol>

**(7) 신축 이음계 설치**

신축 이음계의 경우 SP1, SP2 부탑 연결부 동·서측에 총 4개소의 신축 이음계가 설치되어 있다.

센서 지그는 부탑 상부에 고정하였으며 와이어 고정용 지그는 보강거더에 고정하여 와이어의 신축량을 측정하도록 하였다. 보강거더가 압축되면 센서의 와이어가 늘어나므로 센서의 전기신호는 (+)값이 출력되며, 반대로 보강거더가 인장되면 센서의 와이어가 줄어들므로 센서의 전기신호는 (-)값이 출력된다.

신축 이음계의 설치 전경 및 설치 방법을 정리하면 표3.18과 같다.

**표3.18 신축 이음계 설치 전경 및 설치 방법**

와이어 고정용 지그 설치	센서 지그 설치
	
센서 설치	센서 설치 전경
	
<p>내용</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 설치위치 선정</li> <li>② 보강거더에 와이어고정용 지그 설치(용접), 용접부 방청 처리(도색)</li> <li>③ 와이어 길이를 고려하여 교각 상부에 센서 지그 설치(세트 양카)</li> <li>④ 와이어 연결</li> <li>⑤ 연장케이블 결선 후 계측기기까지 신호케이블 포설</li> <li>⑥ 보호커버 설치</li> <li>⑦ 센서 이상 유무 확인</li> </ol>



**(8) 동적 변형률계 설치**

동적 변형률계의 경우 PY1, PY2 주탑 연결부의 보강거더 동·서측 상·하단에 8개소의 센서가 설치되었고, 보강거더 중앙경간 1/2지점 동·서측 상·하단에 4개소가 설치되었으며, SP1 동측 링크슈 하단 모퉁이에 각각 1개씩 4개의 센서가 설치되었다.

동적 변형률계의 경우 보강거더에 인장력이 발생하면 센서의 전기신호는 (+)값이 출력되고, 반대로 보강거더에 압축력이 발생하면 센서의 전기신호는 (-)값이 출력되며, SP1 링크슈의 변형률을 측정하기 위해 지그를 용접으로 고정하고 각 모퉁이의 링크슈 변화를 측정하도록 설치되었다.

동적 변형률계의 설치 전경 및 설치 방법을 정리하면 표3.19와 같다.

**표3.19 동적 변형률계 설치 전경 및 설치 방법**

센서 설치	센서 영점 조절
	
보호 커버 설치	센서 설치 전경
	
<p>내용</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 설치위치 선정</li> <li>② 지그 설치(용접)</li> <li>③ 용접부 방청 처리(도색)</li> <li>④ 센서 설치            ⑤ 센서 영점 조정</li> <li>⑥ 연장케이블 결선 후 계측기기까지 신호케이블 포설</li> <li>⑦ 보호커버 설치    ⑧ 센서 이상 유무 확인</li> </ol>

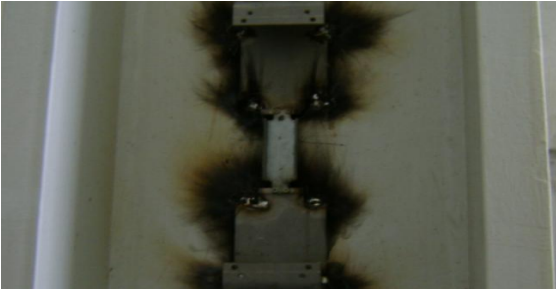
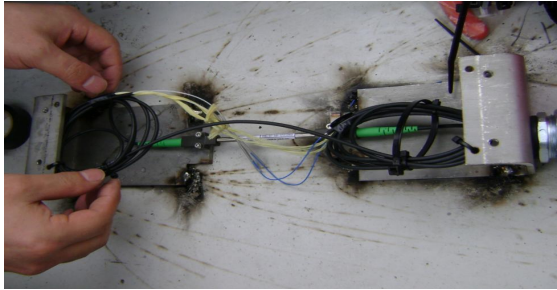
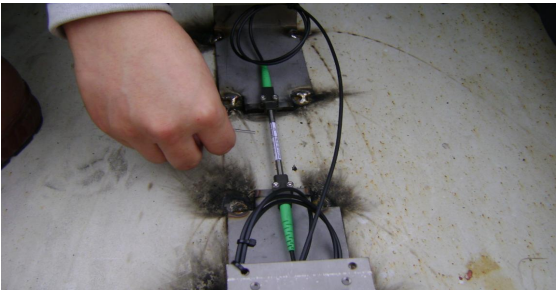

**(9) 광섬유 변형률계 설치**

광섬유 변형률계의 경우 SP1, SP2 링크슈 동·서측에 각각 1개소씩 4개가 설치되었으며, 보강거더 1/2지점 센터락 동·서측 시점 측과 종점 측에 각각 1개소씩 4개소가 설치되었다.

광섬유 변형률계의 경우 인장력이 발생하면 센서의 전기신호는 (+)값이 출력되며, 반대로 압축력이 발생하면 센서의 전기신호는 (-)값이 출력된다.

광섬유 변형률계의 설치 전경 및 설치 방법을 정리하면 표3.20와 같다.

**표3.20 광섬유 변형률계 설치 전경 및 설치 방법**

지그 설치	센서 설치
	
센서 영점 조정	센서 설치 전경
	
내용	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 설치위치 선정</li> <li>② 지그 설치(용접)</li> <li>③ 센서 설치</li> <li>④ 센서 영점 조정</li> <li>⑤ 연장케이블 결선 후 계측기기까지 신호케이블 포설</li> <li>⑥ 보호커버 설치</li> <li>⑦ 센서 이상 유무 확인</li> </ol>

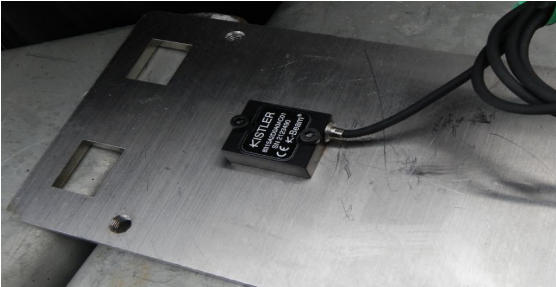



**(10) 1축 가속도계 설치**

1축 가속도계의 경우 행어로프 12개소, 타이다운로프 4개소가 설치되었다. 행어로프의 경우 긴 로프에 센서를 설치하였으며, 타이다운로프는 중간 로프에 센서를 설치하였다.

또한 휴대용 계측장비를 사용하여 1축 가속도계 설치 위치를 확인 후 설치하여 더욱 신뢰성 높은 데이터 값을 제공하도록 설치되었다.

1축 가속도계의 설치 전경 및 설치 방법을 정리하면 표3.21과 같다.

**표3.21 1축 가속도계 설치 전경 및 설치 방법**

<b>센서 설치</b>	<b>보호 커버 설치</b>
	
<b>센서 설치</b>	<b>센서 설치 전경</b>
	
내용	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 설치위치 선정</li> <li>② 배선, 배관을 위한 보강거더 홀링</li> <li>③ 센서 설치</li> <li>④ 지그 설치(SUS밴드)</li> <li>⑤ 연장케이블 결선 후 계측기기까지 신호케이블 포설</li> <li>⑥ 보호커버 설치</li> <li>⑦ 센서 이상 유무 확인</li> </ol>


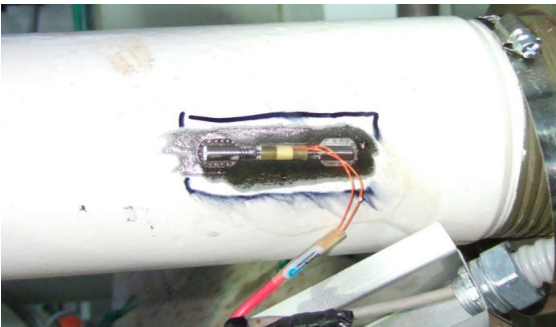
**(11) 정적 변형률계 설치**

정적 변형률계의 경우 AN1, AN2 동서측 5번, 17번, 29번 스트랜드 로드 상·하단 총 24개의 센서가 설치되었다.

로드에 설치해야 하는 센서이므로 로드에 최대한 영향을 미치지 않도록 스팟 용접을 통하여 센서가 설치되었으며, 용접부는 부식을 막기 위해 방청제 처리되었다.

정적 변형률계의 설치 전경 및 설치 방법을 정리하면 표3.22와 같다.

**표3.22 정적 변형률계 설치 전경 및 설치 방법**





센서 설치 위치 페인트 제거	센서 설치(스팟 용접)
	
센서 설치	센서 설치 전경
	
내용	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 설치위치 선정</li> <li>② 용접을 위한 센서 설치 위치 페인트 제거</li> <li>③ 센서 설치(스팟 용접)</li> <li>④ 방청제 처리</li> <li>⑤ 연장케이블 결선 후 계측기기까지 신호 케이블 포설</li> <li>⑥ 보호커버 설치</li> <li>⑦ 센서 이상 유무 확인</li> </ol>

(12) 변위계 설치

변위계는 SP1 동측 링크슈 하단에 1개의 센서가 설치되었다. 레이저 시준 방향을 고려해 직각 방향으로 시준시 방해물이 없는 곳을 선정하여 설치하였다.

변위계의 설치 전경 및 설치 방법을 정리하면 표3.23과 같다.

표3.23 변위계 설치 전경 및 설치 방법

설치 위치 확인	고정 브라켓 거치
	
신호선 연결 및 보호박스 설치	레이저 시준 위치 확인
	
내용	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 설치위치 선정           <ul style="list-style-type: none"> <li>* 고정지그 홀위치에 해머드릴로 천공</li> </ul> </li> <li>② 콘크리트면에 레이저 거리계 고정 지그 설치(세트 양카)</li> <li>③ 고정 지그 및 센서 고정</li> <li>④ 레이저의 시준 방향을 고려해 직각 방향으로 설치           <ul style="list-style-type: none"> <li>* 시준 방해물 없는 곳에 설치</li> </ul> </li> <li>⑤ 연장케이블 결선</li> <li>⑥ 계측기기까지 신호케이블 포설</li> <li>⑦ 보호박스 설치</li> <li>⑧ 센서 이상 유무 확인, 시준 포인트 위치 확인</li> </ol>

### (13) 데이터 수집 장치 설치

데이터 수집 장치 구성을 위해 다음과 같은 사항이 고려되었다.

- 스테인리스 재질의 기기함을 제작하여 데이터 수집 장치 및 전산시스템을 내장.
- 데이터 수집 장치가 고정되는 함체는 구조물 내부에 설치.
- 함체는 관리자 외 조작을 방지하기 위하여 잠금장치를 설치.
- 안정적인 전원 사용을 위해 서지프로텍터 및 누전차단기를 이용.

데이터 수집 장치는 주탑에 2개소, 보강거더에 4개소, 앵커리지에 2개소, 총 8개소에 계측 기기함이 설치되었으며, 내부와 외부에서 인입되는 모든 계측 센서의 신호케이블을 연결하여 데이터를 취득하고 있다. 데이터 수집 장치 설치 전경은 표3.24와 같다.

표3.24 공용 중 데이터 수집 장치 함체 설치

설치 위치 확인	고정 브라켓 거치
	
신호선 연결 및 보호박스 설치	레이저 시준 위치 확인
	
내용	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 설치위치 선정(고정 지그 홀 위치에 해머 드릴로 천공)</li> <li>② 콘크리트 면에 레이저 거리계 고정 지그 설치(세트 양카)</li> <li>③ 고정 지그 및 센서 고정</li> <li>④ 레이저의 시준 방향을 고려해 직각 방향으로 설치(시준 방해물 없는 곳)</li> <li>⑤ 연장케이블 결선 후 계측기기까지 신호케이블 포설</li> <li>⑥ 보호박스 설치      ⑦ 센서 이상 유무 확인, 시준 포인트 위치 확인</li> </ol>

## 제 4 장 IoT 센싱 모니터링 시스템을 활용한 동적 거동 계측 결과

### 4.1 개요

본 장에서는 계측 모니터링 결과를 확인하여 A대교에 구축된 유지관리용 계측시스템의 전반적인 성능을 검증하고 A대교의 구조적 거동을 파악해 보았다. 그리고 활하중 및 자유진동에 대한 계측 센서의 신호를 확인하여 계측시스템의 신뢰성을 검토하였다.

### 4.2 계측 방법

계측 방법은 A대교가 공용 중인 관계로 전면적인 교통 통제가 불가능하므로 교통 통제하지 않는 조건에서 계측시험을 실시하였다. 계측시스템의 기준 값 설정을 위한 데이터를 저장하는 도중에는 최대한 자유진동에 근접한 데이터를 구분할 수 있도록 시간대별 차량 운행 정보를 기록하였다.

활하중에 대한 데이터 취득은 최소 48시간 동안 실시간으로 일반적인 차량 주행상태에서 계측 신호를 취득 후 계측시스템의 검증이 이루어졌다. 또한, 데이터의 일간 경향 분석을 통해 구조 거동 및 계측 신호의 신뢰성을 확인하였다.

자유진동에 대한 데이터 확보는 활하중에 대하여 취득된 데이터 중에서 자유진동에 대한 데이터를 구분하여 확보하였다. 자유진동은 최소 48시간의 실시간 계측데이터 중에서 대상 교량 내에 차량이 없는 구간을 자유진동으로 간주하며, 차량이 없는 구간을 확인하기 위해서는 새벽 시간에 차량 운행 정보를 기록하도록 하였다.

기록된 차량 운행 정보를 근거하여 최대한 자유진동 환경과 유사한 데이터 샘플을 확보할 수 있었다.

#### 4.2.1 계측데이터 분석 및 평가

획득 데이터 분석은 활하중 상시 진동 상태의 데이터와 자유진동 상태의 데이터로 구분할 수 있으며, 각 분석 항목별로 도출되는 결과에 관한 내용을 정리하면 표4.1과 같다.

**표4.1 계측 데이터 획득 실험 분석 내용**

구분	분석 항목	도출 항목	비고
활하중 상시진동 데이터	실시간 데이터 취득	계측시스템 성능 검증	
	일간 장력, 변위, 진동 크기 변화	A대교 구조거동 확인	
		계측신호 신뢰성 확인	
	고유진동수	A대교 동적특성 확인	
자유진동 데이터	진동가속도	A대교 동적특성 확인	
	고유진동수		
	상시 진동 구간 데이터	계측시스템 관측치 제안	

## 4.2.2 계측항목

본 연구를 목적으로 수행된 계측항목을 정리하면 표4.2와 같다.

**표4.2 부재별 계측항목**

( ● : 직접 활용, ● : 간접 활용(데이터 분석 보조자료) )

부재	계측 센서	부착 위치	수량	활용 센서	비고
주탑	온도계	PY1, PY2 중간가로보, 상단가로보	4	●	
	풍향풍속계	PY2 탑정부	1	●	
	2축 경사계	PY1, PY2 윈드슈, 중간가로보, 상단가로보	6	◎	
	2축 가속도계	PY1, PY2 중간가로보, 상단가로보	4	◎	
	GPS	PY1, PY2 탑정부	2	◎	
보강 거더	풍향풍속계	중앙경간 1/2지점	1	●	
	GPS	중앙경간 1/4, 1/2지점	2	◎	
	온도계	중앙경간 1/2지점, SP1 동측 링크슈 하단부	8	●	
	2축 가속도계	측경간 1/2지점, 중앙경간 1/2지점	6	◎	
	변위계	SP1 동측 링크슈 하단부	1	◎	
	신축 변위계	SP1, SP2 부탑 연결부	4	◎	
	동적 변형률계	PY1, PY2 주탑연결부, 중앙경간 1/2지점 SP1 동측 링크슈 하단부	16	◎	
	광섬유변형률계	중앙경간 센터락, SP1, SP2 링크슈	8	◎	
케이블	1축 가속도계	타이다운로프 유효길이 내	4	◎	
	1축 가속도계	행어로프 유효길이 내	12	◎	
기타	정적 변형률계	앵커리지 스트랜드	24	◎	
	지진계	PY1, PY2 하단기초부	2	◎	
	GPS	육상부	1	◎	



### 4.3 구조부재별 계측데이터 획득실험 결과

#### 4.3.1 온도계 및 풍향풍속계

A대교의 전반적인 계측시스템의 성능 검증과 구조물의 거동 확인, 계측데이터의 신뢰성 확보, 계측 센서의 관측치 획득을 위하여 총 84시간 계측하였다. 또한, 대상 교량의 교통 통제를 하지 않는 조건에서 진행되었으며, 차량 통행으로 인한 관측치의 신뢰성을 높이기 위하여 새벽 시간대별 차량 운행 정보를 기록하였다.

온도계와 풍향풍속계의 경우 구조물 거동에 영향을 미치는 중요한 계측항목으로 다른 계측항목에 보조자료로 활용되며, 관측치 획득 시험 중 활하중을 제외한 관측치 설정에 중요한 계측항목이다. 이처럼 관측치 획득 시험 중 위치별 온도변화와 풍향 풍속변화를 도시하면 그림4.1부터 그림4.5와 같으며, 일간 온도 편차를 정리하면 표4.3과 같다.

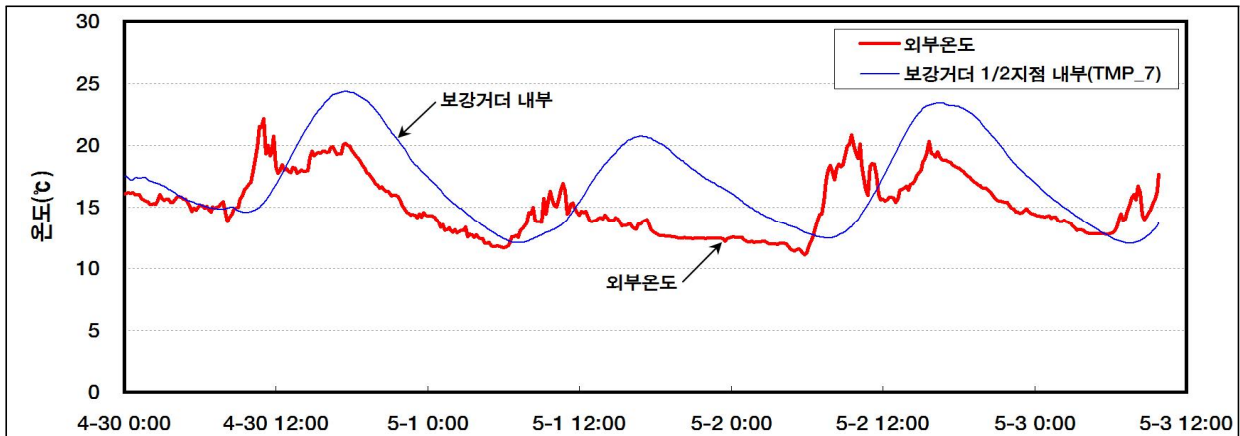


그림4.1 외부온도 및 보강거더 내부 온도변화 이력

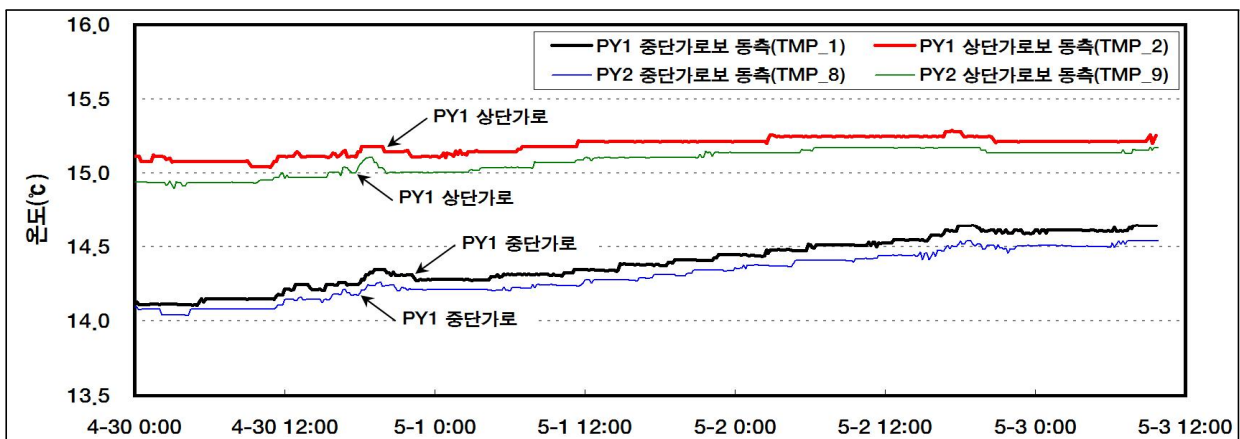


그림4.2 주탑 내부 단면 온도변화 이력

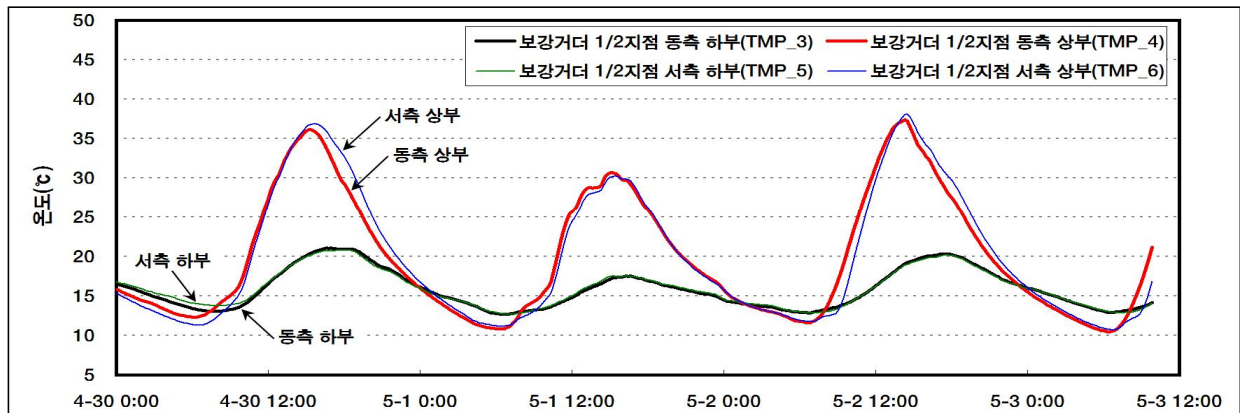


그림4.3 보강거더 1/2지점 내부 온도변화 이력

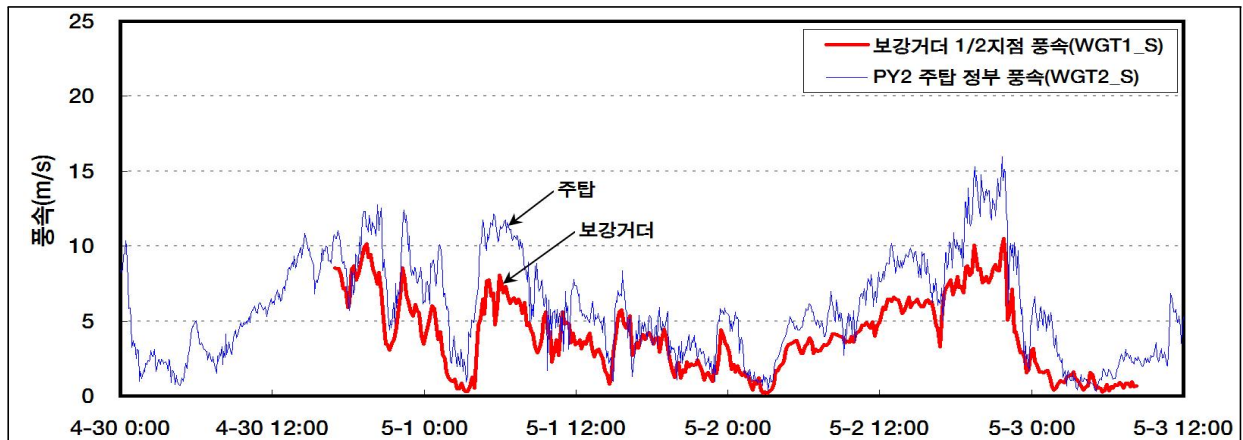


그림4.4 풍속변화 이력

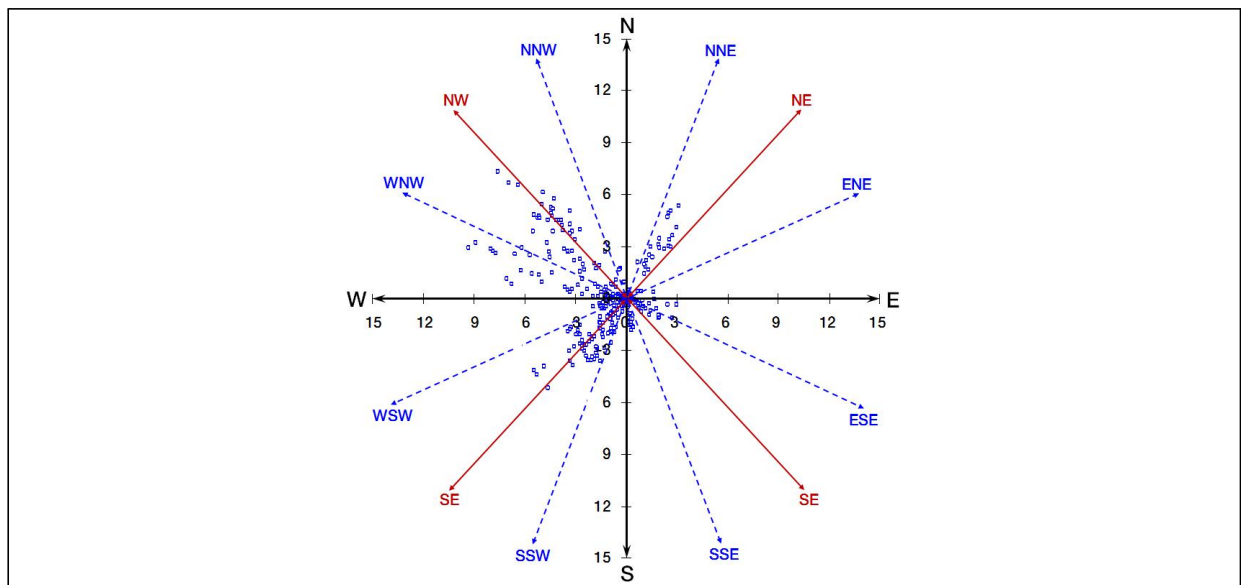


그림4.5 보강거더 풍향 변화 이력

표4.3 시험 기간 내 일간 온도 편차

(단위 : °C)

구분	외부 온도	주탑 내부				보강거더 내부				
		PY1 중단	PY1 상단	PY2 중단	PY2 상단	동측 하부	동측 상부	서측 하부	서측 상부	내부
최고	9.73	0.24	0.14	0.23	0.21	7.98	25.79	7.29	26.37	10.97
최저	4.87	0.06	0.06	0.05	0.04	2.36	5.06	2.19	5.30	3.42
평균	7.05	0.15	0.09	0.13	0.08	5.14	17.06	4.89	16.51	7.55

관측치 획득 기간 내 온도변화를 관찰한 결과, 외부온도의 경우 일조량의 영향을 받는 낮보다는 새벽 시간의 시간별 온도변화가 적은 것으로 확인되었다.

보강거더 내부 온도의 경우는 강제 내부에 설치되어 외부온도 대비 높게 측정되었으며, 일간 온도 편차도 큰 것으로 확인되었다. 또한 부재별 온도변화를 확인한 결과, 부재별 위치에 따라 온도 차가 발생하는 것을 확인하였으며, 이는 부재별 특성과 온도계 설치 위치에 따라 일조량의 차로 인하여 발생하는 것으로 판단된다.

주탑 온도계의 경우 중단과 상단 가로보 동측 내부 단면에 설치되어 일조량으로 인한 온도변화가 미비한 것으로 확인되었으며, 공기의 밀도 차로 인하여 중단의 온도보다 상단의 온도가 높은 것으로 확인되었다. 보강거더 내부 온도계의 경우 동·서측 상부와 하부에 설치되어 일조량이 영향을 직접 주는 상부에는 일간 온도 편차가 크게 발생하였으며, 하부의 경우 일조량의 직접적인 영향이 적으므로 인하여 상부에 비하여 상대적으로 일간 온도 편차가 적은 것으로 확인되었다.

풍속변화를 관찰한 결과, 보강거더에 비하여 주탑 정부의 풍속이 더 크게 발생하는 것으로 확인되었으며, 관측치 획득 시험 기간 내 최대 풍속은 주탑 정부에서 15.98m/s로 확인되었으며, 보강거더에서도 같은 시간대 10.51m/s의 최대 풍속이 측정되었다. 풍향 변화는 최대 풍속 발생 시 북서쪽에서 불어온 것으로 확인되었다.

이처럼 온도변화와 풍향 풍속변화는 구조물 거동을 관찰할 수 있는 보조자료로 활용된다.

### 4.3.2 주탑 2축 경사계

#### 가. PY1 주탑 2축 경사계

주탑의 변위 및 구조 거동의 건전성 평가를 위하여 PY1 주탑 윈드슈와 중단, 상단가로보 동측 내부에 2축 경사계가 총 3개소 설치되어 있다. 설치 방향은 교축 방향 (+)부호를 광양 측으로, (-)부호를 여수 측으로 하였으며, 교축 직각 방향 (+)부호를 서측, (-)부호를 동측으로 설정하였다. 관측치 획득 시험 기간 중 PY1 주탑의 변위 변화를 정리하면 표4.4와 같으며, 이를 도시하면 그림4.6, 그림4.7과 같다.

표4.4 PY1 주탑 변위 변화

(단위 : mm)

구분	윈드슈 교축	중단 교축	상단 교축	윈드슈 교직	중단 교직	상단 교직
최대	285.37(광양)	495.41(광양)	378.43(광양)	83.73(서측)	128.35(서측)	110.25(서측)
최소	266.57(여수)	324.43(여수)	290.43(여수)	74.50(동측)	136.03(동측)	98.83(동측)
평균	13.15(광양)	19.24(광양)	26.83(광양)	2.91(동측)	1.23(동측)	0.83(동측)

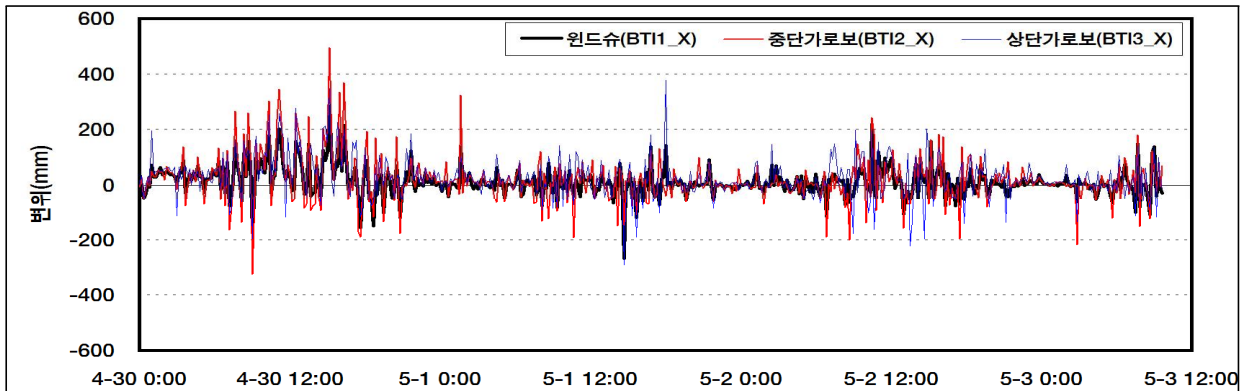


그림4.6 PY1 주탑 교축 방향 변위 변화 이력

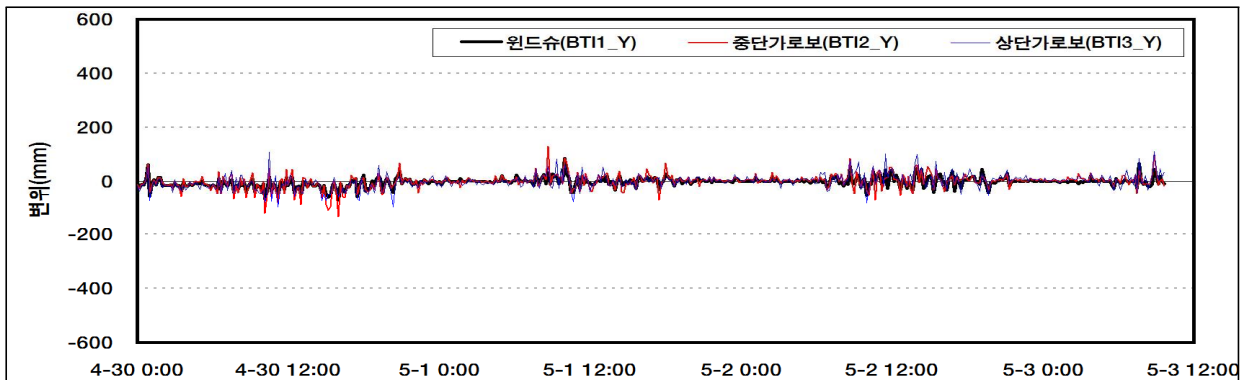


그림4.7 PY1 주탑 교축 직각 방향 변위 변화 이력

시험 기간 내 절댓값으로 PY1 주탑 교축 방향의 변위 변화를 확인한 결과, 윈드슈의 경우 광양(중앙경간)측 285.37mm, 중단가로보의 경우 광양(중앙경간)측 495.41mm, 상단가로보의 경우 광양(중앙경간)측 378.43mm의 최대 변위가 발생하였다.

관측치 획득 시험 시기는 작게나마 온도가 상승하는 계절로 광양(중앙경간)측으로 주탑이 거동하는 것으로 판단되며, 또한 A대교의 차량 통행으로 인한 경간장이 긴 중앙경간에서 받는 하중이 커 광양(중앙경간)측으로 주탑이 거동하는 것으로 판단된다.

교축 직각 방향의 변위 변화를 확인한 결과, 윈드슈의 경우 서측으로 83.73mm, 중단가로보의 경우 동측으로 136.03mm, 상단가로보의 경우 서측으로 110.25mm의 최대 변위가 발생하였다.

이 또한 관측치 획득 시험이 실시된 시기는 작게나마 온도가 상승하는 계절로 서측으로 주탑이 거동하는 것으로 판단되며, 절댓값을 통해 분석하여 다소 차는 발생하였으나, 전체적인 거동은 서측으로 향하는 것을 확인하였다.

주탑 거동에 가장 큰 영향을 미치는 외부 하중에 의한 주탑의 거동을 확인하기 위하여 주탑의 변위 변화가 가장 크게 발생하는 중단가로보의 변위 변화와 외부 하중을 비교·분석하여 이를 정리하면 그림4.8과 그림4.9와 같다.

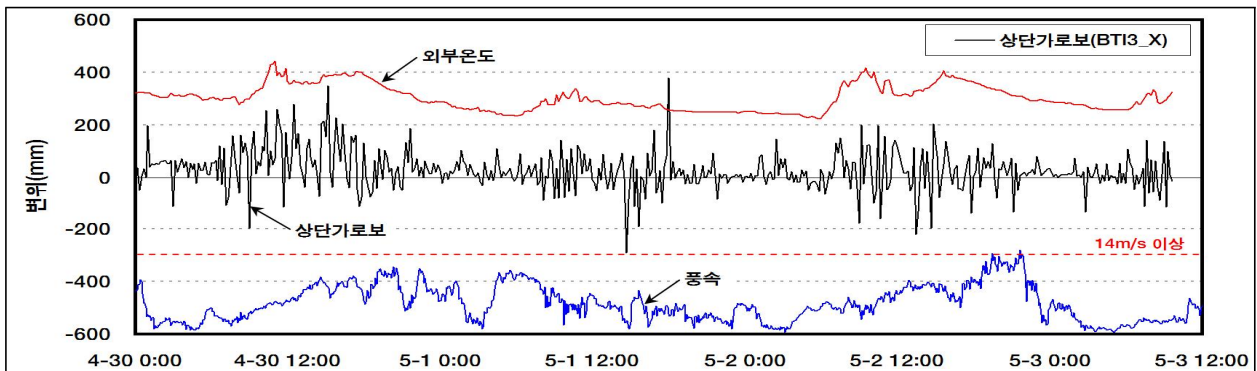


그림4.8 외부 하중 대비 PY1 주탑 교축 방향 변위 변화 이력(상단가로보)

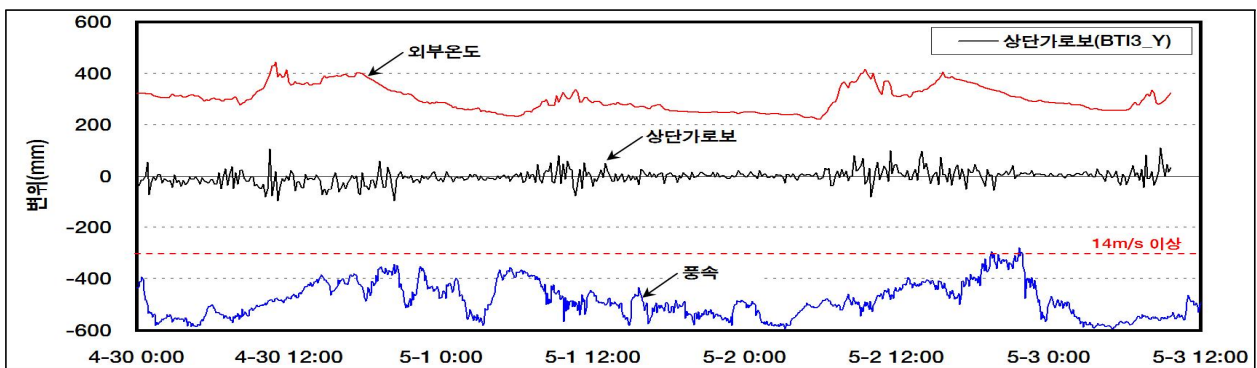


그림4.9 외부 하중 대비 PY1 주탑 교축 직각 방향 변위 변화 이력(상단가로보)

외부 하중에 의한 주탑의 거동을 확인한 결과, 교축 방향의 경우 온도가 상승하면 광양(중앙경간)측으로 거동하는 것으로 확인되었으며, 온도가 하강하면 여수(측경간)측으로 거동하는 것으로 확인되었다.

교축 직각 방향의 경우 온도변화로 인한 일간 온도 경향은 명확하지 않으나 전체적인 거동을 보면 온도가 상승하면서 서측으로 거동하는 것으로 확인되었다. 풍속으로 인한 주탑의 거동 변화를 살펴보면 14m/s 이상의 강한 바람이 약 5차례 확인되었으나, 주탑 거동 변화에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 확인되었다.

또한 A대교의 차량 통행으로 인한 주탑의 거동을 관찰하기 위하여 차량 통행이 잦은 오전에서 오후 시간과 차량 통행이 비교적 적은 저녁과 새벽 시간의 주탑 거동을 그림 4.10, 그림4.11과 같이 정리하였다.

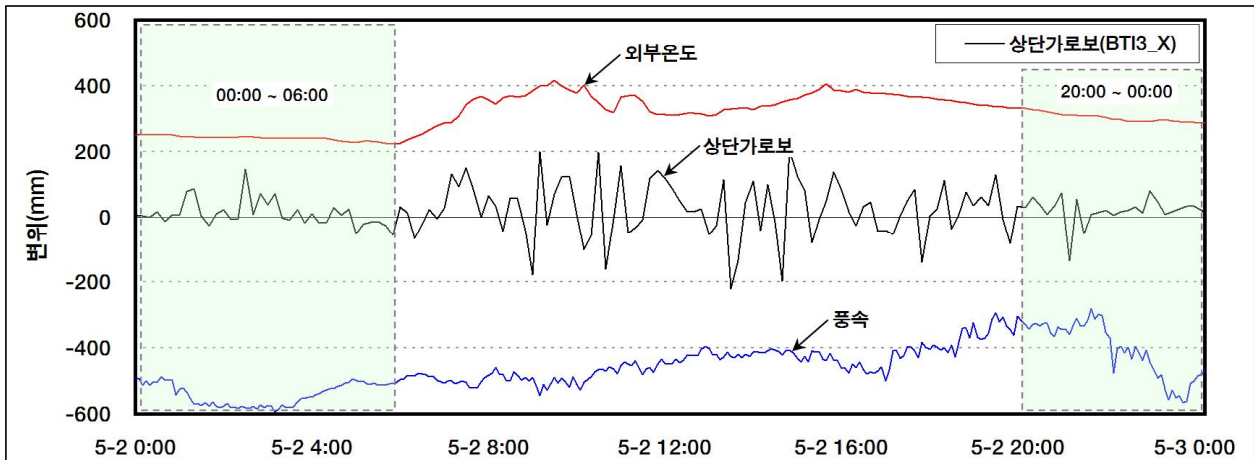


그림4.10 시간별 PY1 주탑 교축 방향 변위 변화 이력(상단가로보)

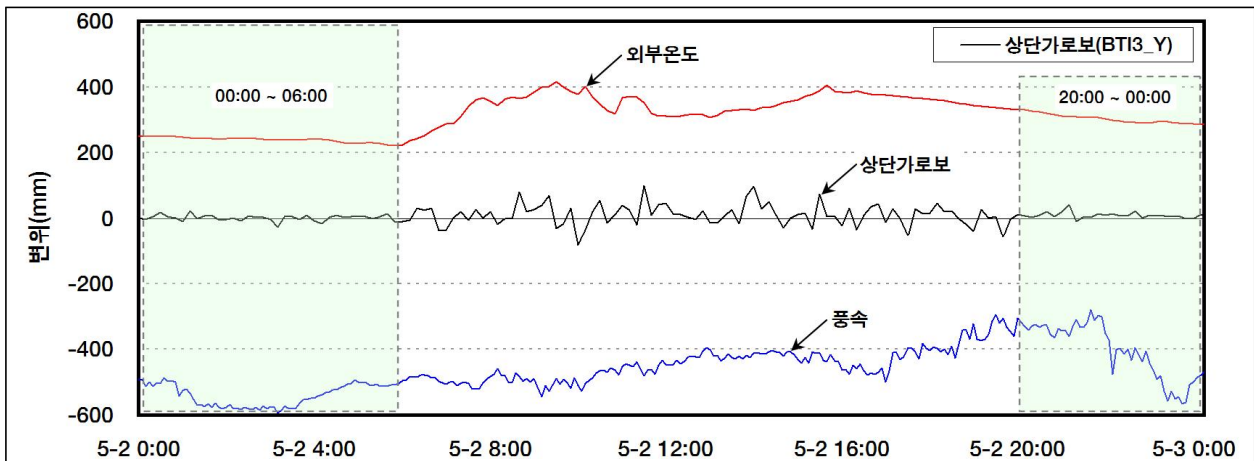


그림4.11 시간별 PY1 주탑 교축 직각 방향 변위 변화 이력(상단가로보)

위 그림과 같이 차량 통행으로 인한 주탑의 변위 변화가 증가하는 것으로 확인되었다. 차량 통행이 비교적 적은 저녁 시간과 새벽 시간에는 주탑의 변위 변화가 적었으며, 차량 통행이 잦은 오전과 오후에는 주탑의 거동이 증가하는 것으로 확인되었다.

### 나. PY2 주탑 2축 경사계

주탑의 변위 및 구조 거동의 건전성 평가를 위하여 PY2 주탑 윈드슈와 중단, 상단가로보 동측 내부에 2축 경사계가 총 3개소 설치되어 있다. 설치방향은 교축 방향 (+)부호를 광양 측으로, (-)부호를 여수 측으로 하였으며, 교축 직각 방향 (+)부호를 서측, (-)부호를 동측으로 설정하였다. 관측치 획득 시험 기간 중 PY2 주탑의 변위 변화를 정리하면 표4.5와 같으며, 이를 도시하면 그림4.12, 그림4.13과 같다.

표4.5 PY2 주탑 변위 변화

(단위 : mm)

구분	윈드슈 교축	중단 교축	상단 교축	윈드슈 교직	중단 교직	상단 교직
최대	213.60(광양)	261.98(광양)	190.08(광양)	54.68(서측)	128.35(서측)	74.77(서측)
최소	191.39(여수)	316.78(여수)	282.77(여수)	100.82(동측)	143.25(동측)	117.70(동측)
평균	5.63(여수)	14.49(여수)	37.25(여수)	4.48(동측)	3.38(서측)	9.85(동측)

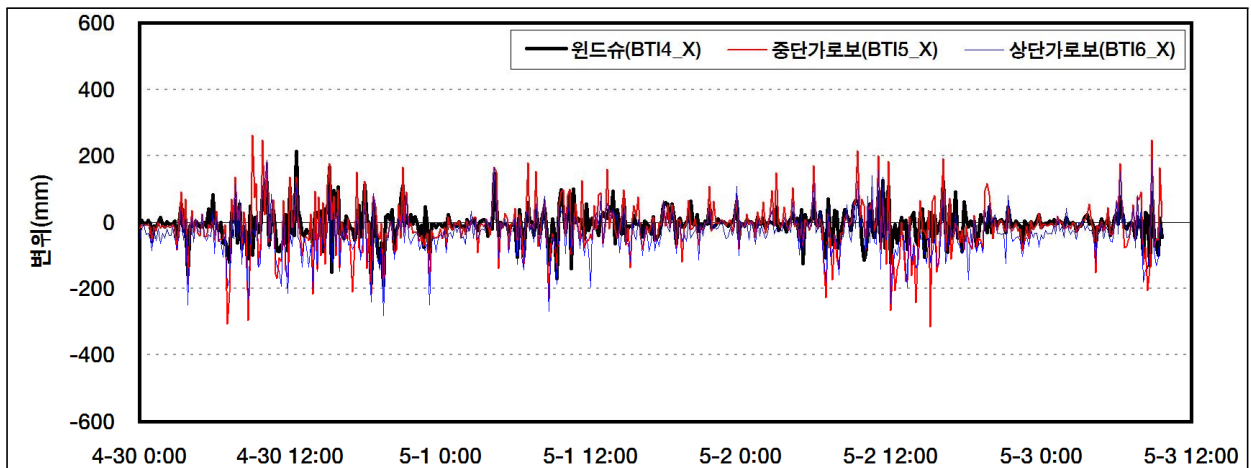


그림4.12 PY2 주탑 교축 방향 변위 변화 이력

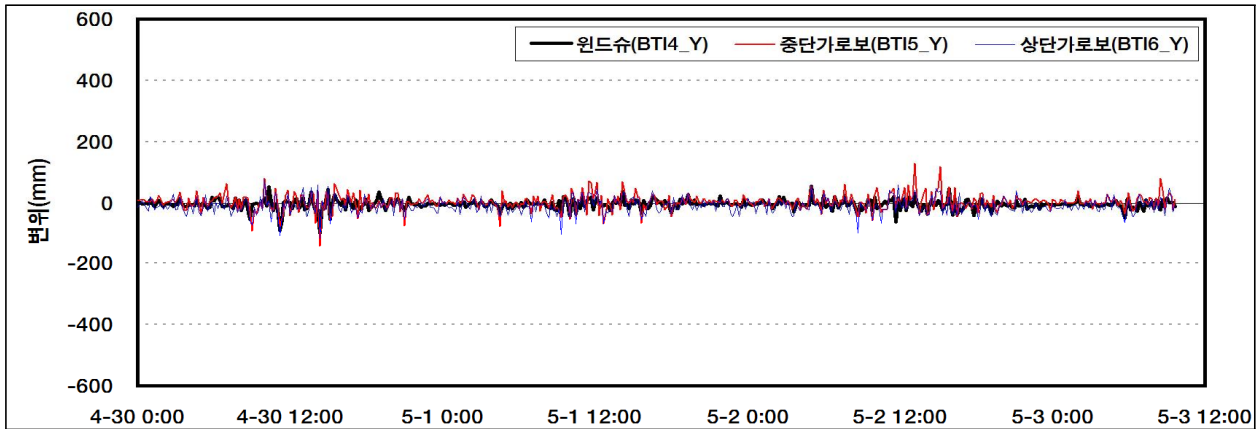


그림4.13 PY2 주탑 교축 직각 방향 변위 변화 이력

시험 기간 내 절댓값으로 PY2 주탑 교축 방향의 변위 변화를 확인한 결과, 윈드슈의 경우 광양(측경간)측 213.60mm, 중단가로보의 경우 여수(중앙경간)측 316.78mm, 상단가로보의 경우 여수(중앙경간)측 282.77mm의 최대 변위가 발생하였다.

이는 관측치 획득 시험이 실시된 시기는 작게나마 온도가 상승하는 계절로 여수(중앙경간)측으로 주탑이 거동하는 것으로 판단되며, 또한 A대교의 차량 통행으로 인한 경간장이 긴 중앙경간에서 받는 하중이 커 여수(중앙경간)측으로 주탑이 거동하는 것으로 판단된다. 교축 직각 방향의 변위 변화를 확인한 결과, 윈드슈의 경우 동측으로 100.82mm, 중단가로보의 경우 동측으로 143.25mm, 상단가로보의 경우 동측으로 117.70mm의 최대 변위가 발생하였다. 교축 직각 방향의 경우 최대 변위가 동측으로 발생하였으나, 이는 절댓값에 관한 결과이며, 전체적인 거동을 살펴보면 관측치 획득 시험이 실시된 시기는 온도가 상승하는 계절로 서측으로 거동하는 것으로 확인되었다.

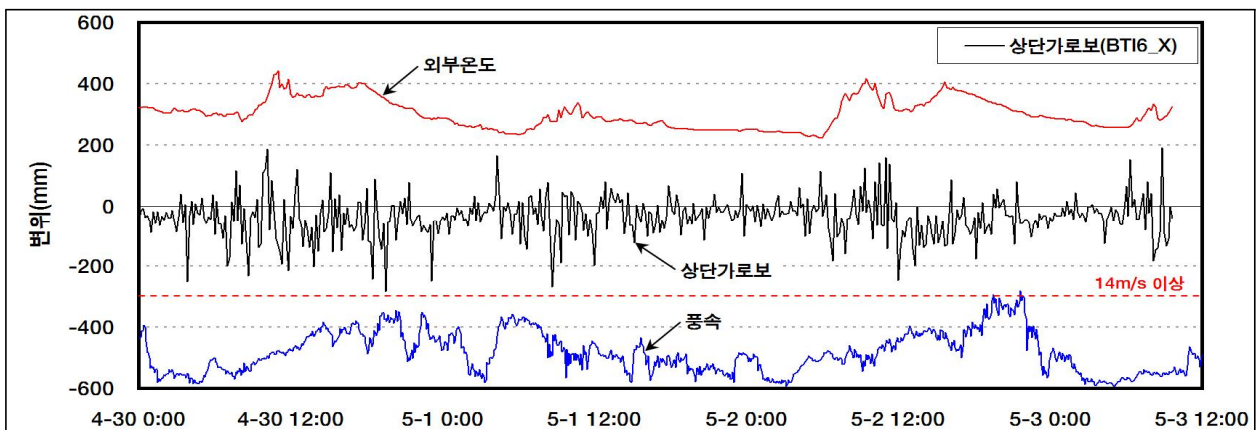


그림4.14 외부 하중 대비 PY2 주탑 교축 방향 변위 변화 이력(상단가로보)



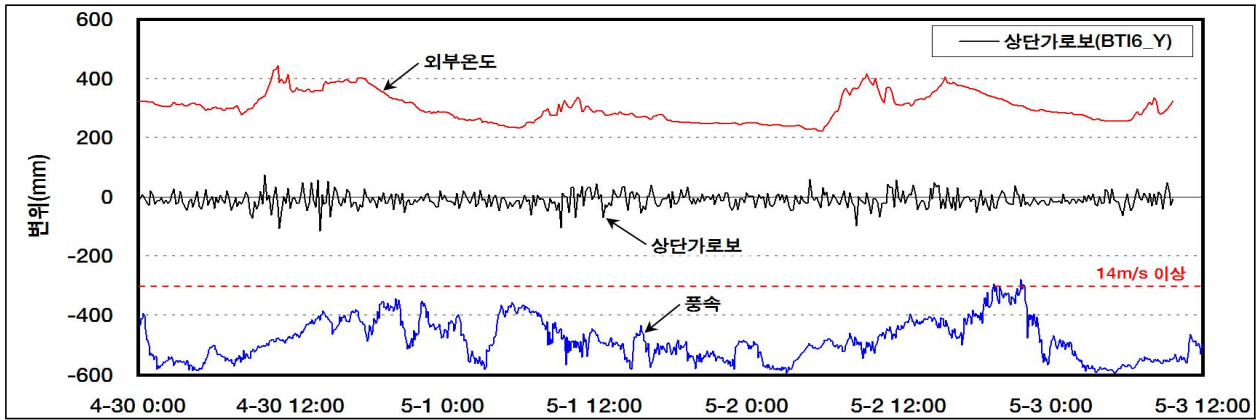


그림4.15 외부 하중 대비 PY2 주탑 교축 직각 방향 변위 변화 이력(상단가로보)

주탑 거동에 가장 큰 영향을 미치는 외부 하중에 의한 주탑의 거동을 확인하기 위하여 주탑의 변위 변화가 가장 크게 발생하는 상단 가로보의 변위 변화와 외부 하중을 비교·분석하여 이를 정리하면 그림4.14와 그림4.15와 같다.

외부 하중에 의한 주탑의 거동을 확인한 결과, 교축 방향의 경우 온도가 상승하면 여수(중앙경간)측으로 거동하는 것으로 확인되었으며, 온도가 하강하면 광양(측경간)측으로 거동하는 것으로 확인되었다. 교축 직각 방향의 경우 온도변화로 인한 일간 온도 경향은 명확하지 않으나 전체적인 거동을 보면 온도가 상승하면서 서측으로 거동하는 것으로 확인되었다.

풍속으로 인한 주탑의 거동 변화를 살펴보면 14m/s 이상의 강한 바람이 약 5차례 확인되었으나, 주탑 거동 변화에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 확인되었다.

또한 A대교의 차량 통행으로 인한 주탑의 거동을 관찰하기 위하여 차량 통행이 잦은 오전에서 오후 시간과 차량 통행이 비교적 적은 저녁과 새벽 시간의 주탑의 거동을 그림4.16, 그림4.17과 같이 정리하였다.

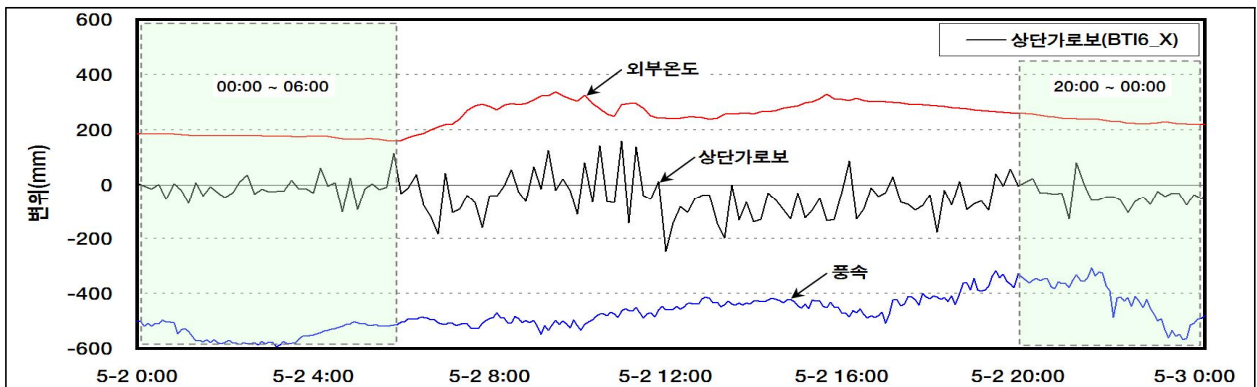


그림4.16 시간별 PY2 주탑 교축 방향 변위 변화 이력(상단가로보)

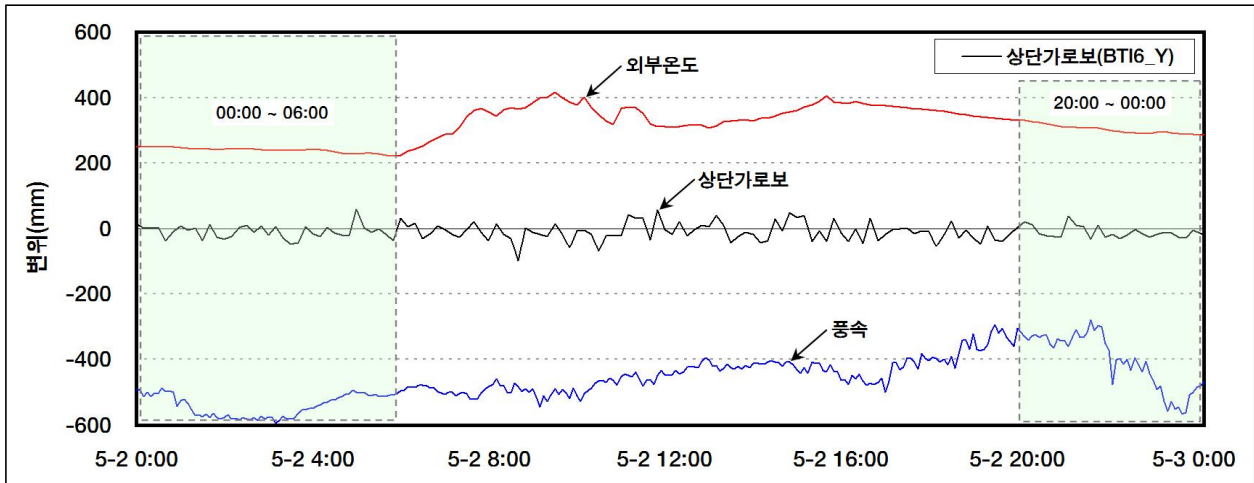


그림4.17 시간별 PY2 주탑 교축 직각 방향 변위 변화 이력(상단가로보)

위 그림과 같이 차량 통행으로 인한 주탑의 변위 변화가 증가하는 것으로 확인되었다. 차량 통행이 비교적 적은 저녁 시간과 새벽 시간에는 주탑의 변위 변화가 적었으며, 차량 통행이 잦은 오전과 오후에는 주탑의 거동이 증가하는 것으로 확인되었다.

### 4.3.3 주탑 2축 가속도계

#### 가. PY1 주탑 2축 가속도계

A대교의 풍하중, 활하중, 지진, 외부 충격 등에 의한 주탑의 진동과 동적 거동을 감시하기 위하여 PY1 중단가로보, 상단가로보 동측 내부에 2축 가속도계가 총 2개소 설치되어 있다. 설치 방향은 교축 방향을 X축으로 교축 직각 방향을 Y축으로 설치되었으며, 관측치 획득 시험 기간 내 주탑의 가속도 진폭을 정리하면 표4.6과 같으며, 이를 도시하면 그림4.18, 그림4.19와 같다.

표4.6 PY1 주탑 가속도진폭 변화

(단위 : gal)

구분	중단가로보 교축	상단가로보 교축	중단가로보 교직	상단가로보 교직
최대	0.87	1.43	0.28	0.45
최소	0.06	0.20	0.03	0.04
평균	0.41	0.72	0.13	0.21

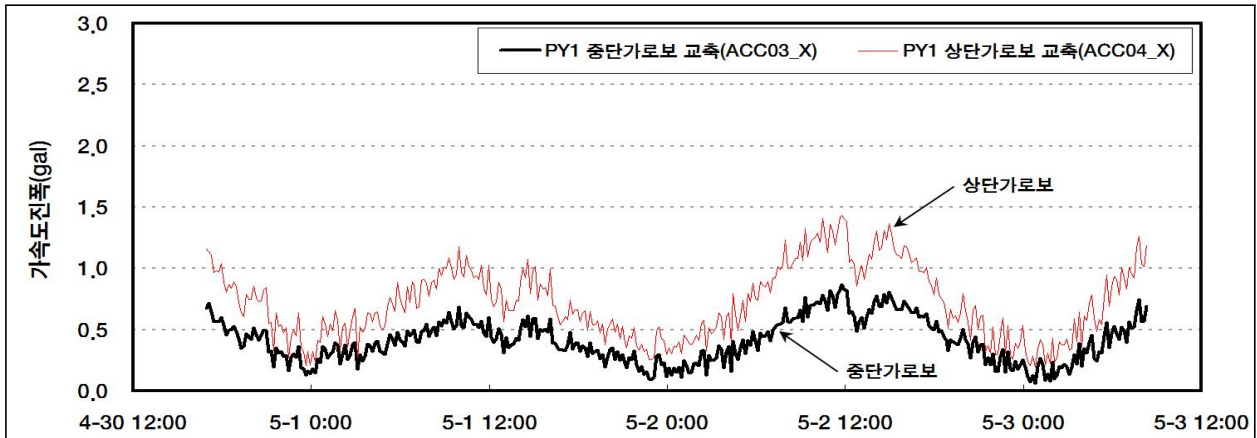


그림4.18 PY1 주탑 교축 방향 가속도진폭 변화 이력

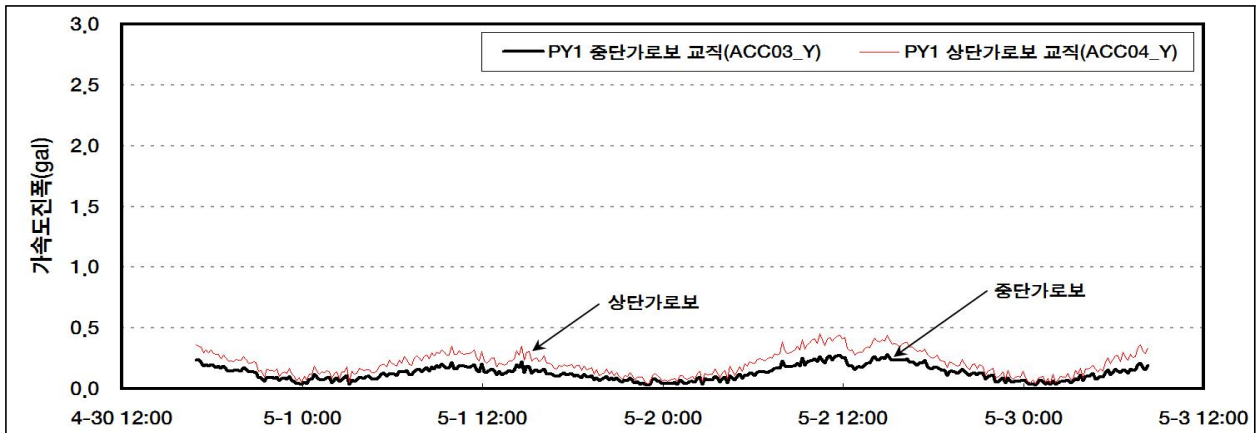


그림4.19 PY1 주탑 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력

시험 기간 내 주탑에 발생한 진폭을 관찰한 결과, 교축 방향의 경우 중단가로보에서 0.87gal, 상단가로보에서 1.43gal의 최대 진폭이 발생하였으며, 교축 직각 방향의 경우 중단가로보에서 0.28gal, 상단가로보에서 0.45gal의 최대 진폭이 발생하였다.

교축 방향으로의 최대 진폭의 경우 ‘미진(0.8gal ~ 2.5gal)’ 수준으로 민감한 사람만 느낄 수 있는 정도의 진동이며 이는 대형 차량 통행 시 발생할 수 있는 수준의 진동으로 판단된다.

최대 진폭이 발생하는 시간대를 살펴보면, 차량 통행이 잦은 낮 시간으로 차량 통행으로 인하여 주탑에 진동이 발생하는 것으로 판단되며, 중단가로보에서의 진동보다 상단가로보에서 발생하는 진동이 더 큰 것으로 확인되었다.

주탑의 진동을 일으키는 주요 영향인자는 바람으로, 풍속이 큰 경우 구조물의 진폭도 증가하게 된다. 이처럼 외부 하중에 의하여 주탑에 발생하는 진동 변화를 관찰하기 위하여 외부 하중과 함께 그래프로 도시하였으며, 이는 그림 4.20과 그림4.21과 같다.

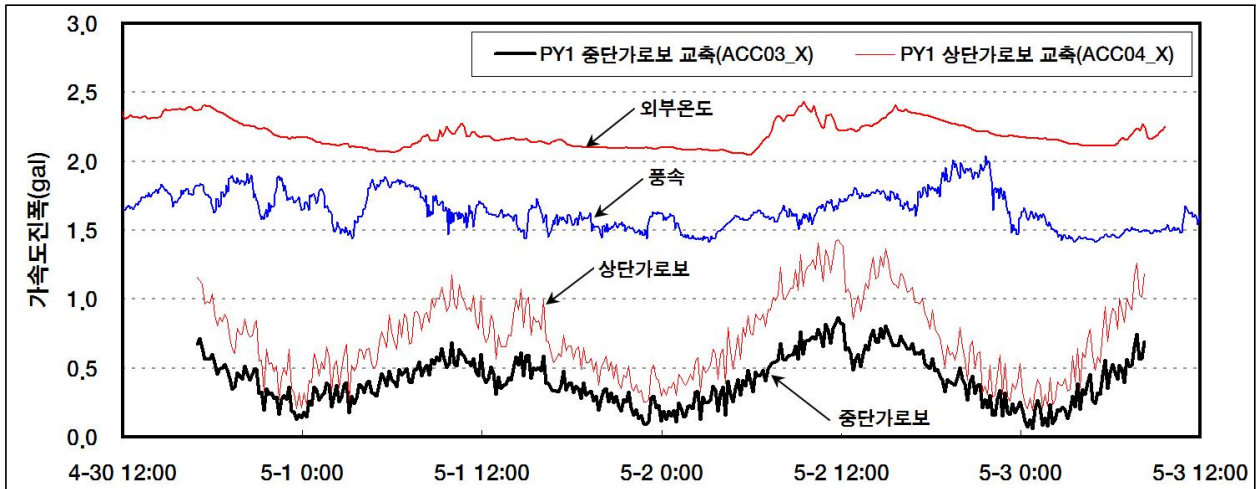


그림4.20 외부 하중 대비 PY1 주탑 교축 방향 가속도진폭 변화 이력

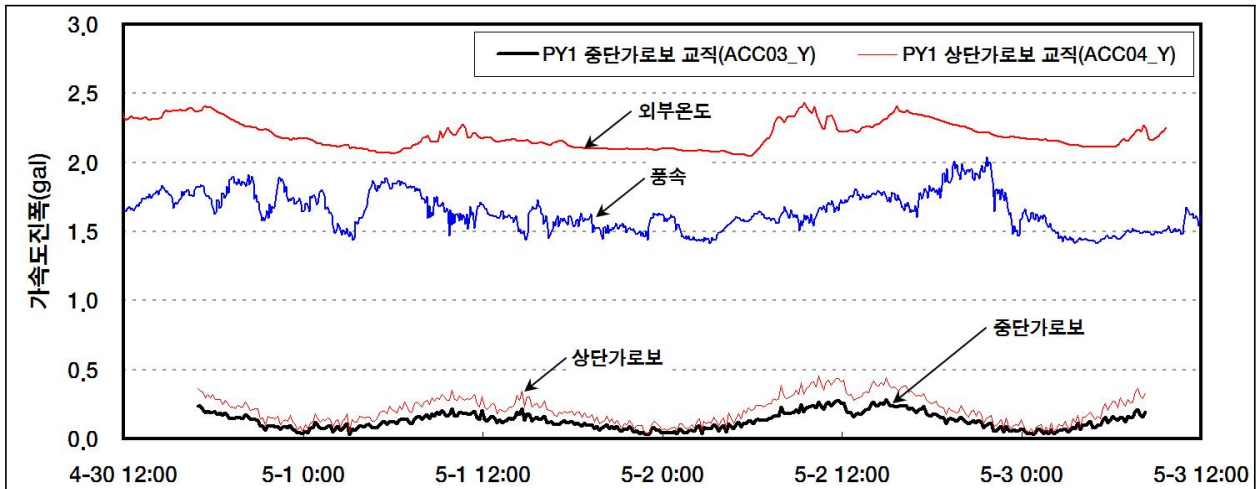


그림4.21 외부 하중 대비 PY1 주탑 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력

외부 하중에 의한 가속도진폭 변화 경향을 살펴보면 온도변화 이력과 유사한 것으로 보인다. 하지만 이는 온도에 의한 영향보다는 차량 통행량의 변화로 인한 진폭 변화인 것으로 판단되는데, 온도가 상승하는 오전과 오후 시간에는 차량 통행량이 증가하며, 온도가 하강하는 저녁과 새벽 시간에는 차량 통행량이 줄어들어 인한 변화인 것으로 판단된다. 또한 풍속으로 인한 주탑의 진동을 관찰한 결과 14m/s 이상의 강한 바람이 약 5차례 확인되었으나, 풍속으로 인한 주탑 가속도 진동 변화에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 확인되었다.

또한 A대교의 차량 통행으로 인한 주탑의 가속도진폭 변화를 관찰하기 위하여 차량 통행이 잦은 오전에서 오후 시간과 차량 통행이 비교적 적은 저녁과 새벽 시간의 주탑의 거동을 그림4.22, 그림4.23과 같이 정리하였다.

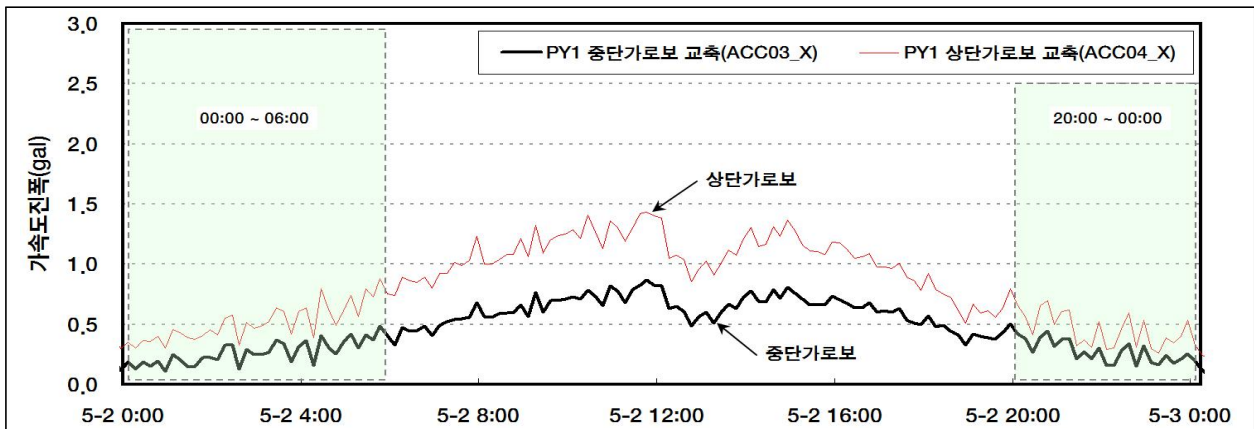


그림4.22 시간별 PY1 주탑 교축 방향 가속도진폭 변화 이력

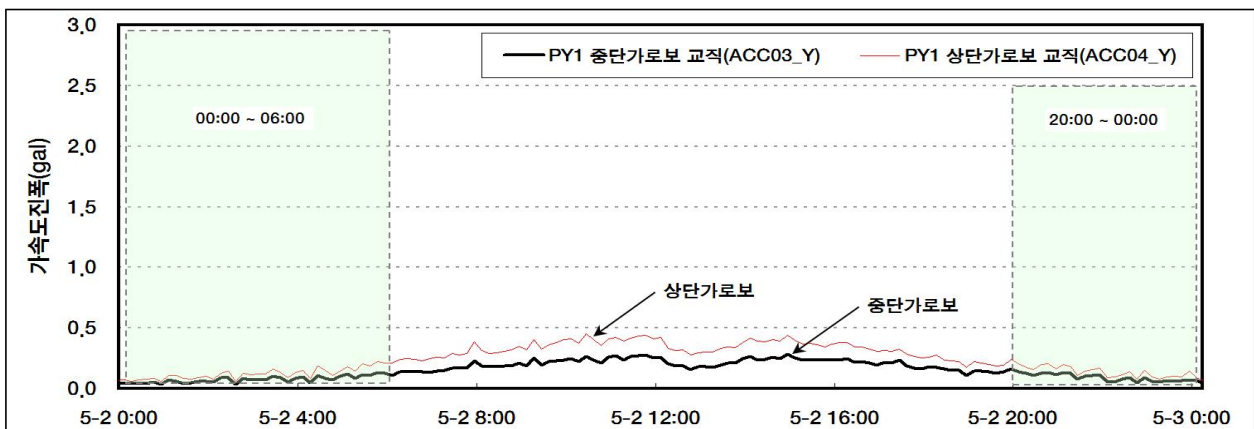


그림4.23 시간별 PY1 주탑 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력

위 그림과 같이 차량 통행으로 인한 주탑의 가속도진폭을 살펴보면, 차량 통행으로 인한 주탑의 가속도진폭이 증가하는 것으로 확인되었다. 차량 통행이 비교적 적은 저녁과 새벽 시간에는 주탑의 진동이 줄어들며, 차량 통행이 잦은 오전과 오후 시간에는 주탑의 진동이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

#### 나. PY2 주탑 2축 가속도계

A대교의 풍하중, 활하중, 지진, 충격 등에 의한 주탑의 진동과 동적 거동을 감시하기 위하여 PY2 중단가로보, 상단가로보 동측 내부에 2축 가속도계가 총 2개소 설치되어 있다.

설치 방향은 교축 방향을 X축으로 교축 직각 방향을 Y축으로 설치되었으며, 관측치 획득 시험 기간 내 주탑의 가속도진폭을 정리하면 표4.7과 같으며, 이를 도시하면 그림 4.24, 그림4.25와 같다.

표4.7 PY2 주탑 가속도진폭 변화

(단위 : gal)

구분	중단가로보 교축	상단가로보 교축	중단가로보 교직	상단가로보 교직
최대	0.55	0.91	0.11	0.19
최소	0.09	0.35	0.02	0.02
평균	0.30	0.56	0.06	0.11

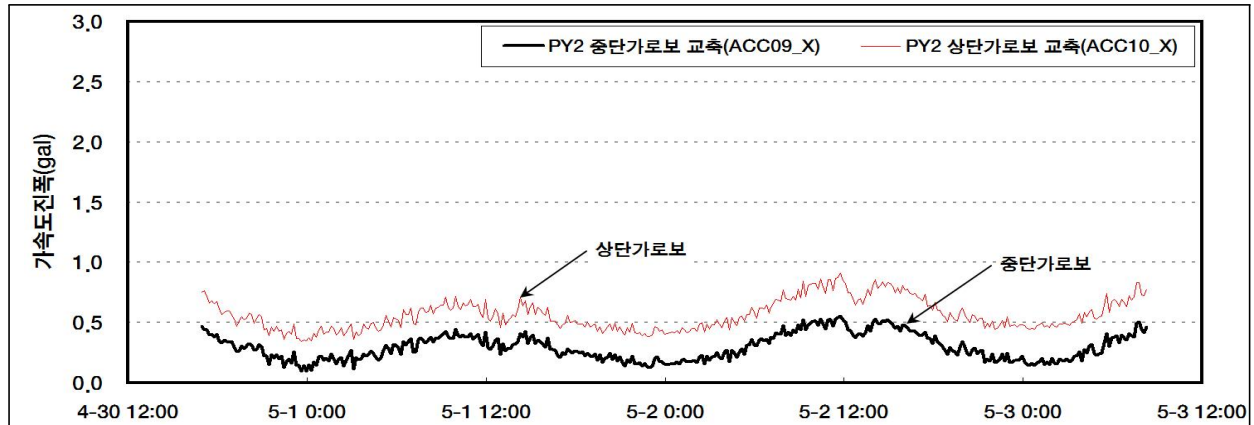


그림4.24 PY2 주탑 교축 방향 가속도진폭 변화 이력

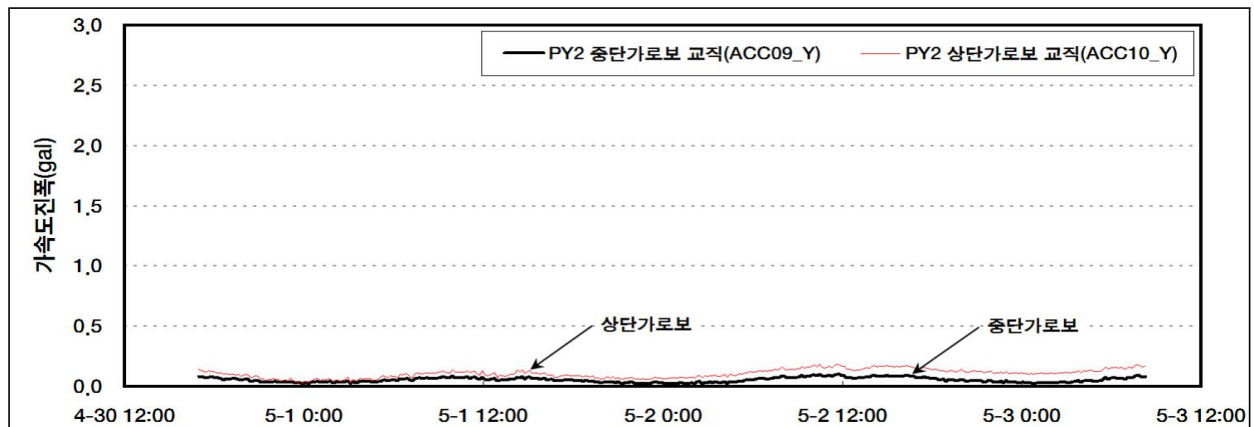


그림4.25 PY2 주탑 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력

관측치 획득 시험 기간 내 주탑에 발생한 진폭을 관찰한 결과, 교축 방향의 경우 중단가로보에서 0.55gal, 상단가로보에서 0.91gal의 최대 진폭이 발생하였으며, 교축 직각 방향의 경우 중단 가로보에서 0.11gal, 상단 가로보에서 0.19gal의 최대 진폭이 발생하였다. 교축 방향으로의 최대 진폭의 경우 ‘미진(0.8gal ~ 2.5gal)’ 수준으로 이는 민감한 사람만 느낄 수 있는 정도이며 대형 차량의 통행 시 발생할 수 있는 수준의 진동으로 판단된다.

최대 진폭이 발생하는 시간대를 살펴보면, 차량 통행이 잦은 낮 시간으로 차량 통행으로 인하여 주탑에 진동이 발생하는 것으로 판단되며, 중단가로보에서의 진동보다 상단가로보에서 발생하는 진동이 더 큰 것으로 확인되었다.

주탑의 진동을 일으키는 가장 중요한 영향인자는 바람으로 일반적으로 강한 바람이 부는 환경, 즉 풍속이 큰 경우 구조물의 진폭도 증가하게 된다. 이처럼 외부 하중에 의하여 주탑에 발생하는 진동 변화를 관찰하기 위하여 외부 하중과 함께 그래프로 도시하였으며, 이는 그림4.26, 그림4.27과 같다.

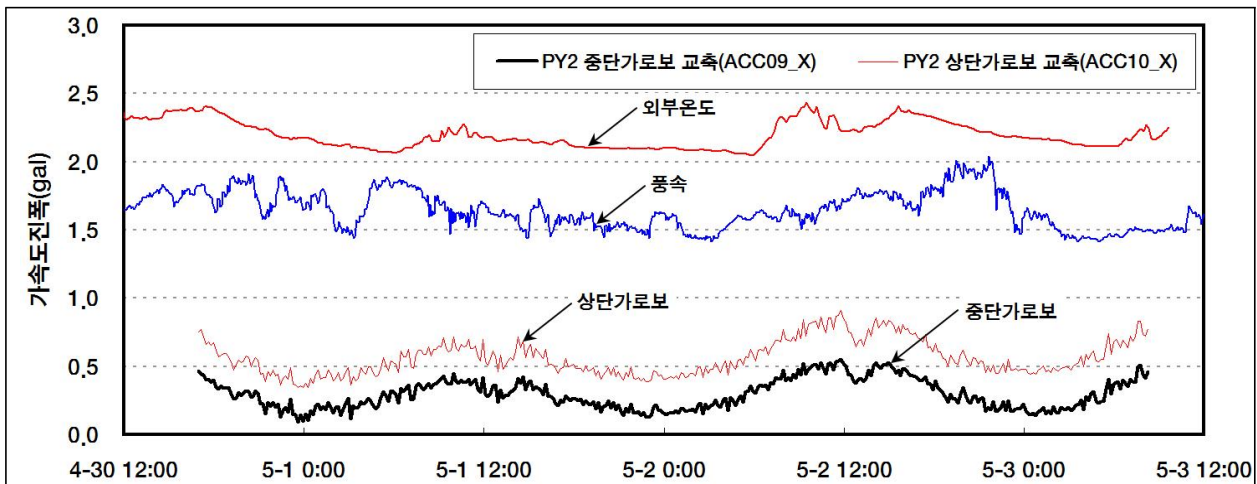


그림4.26 외부 하중 대비 PY2 주탑 교축 방향 가속도진폭 변화 이력

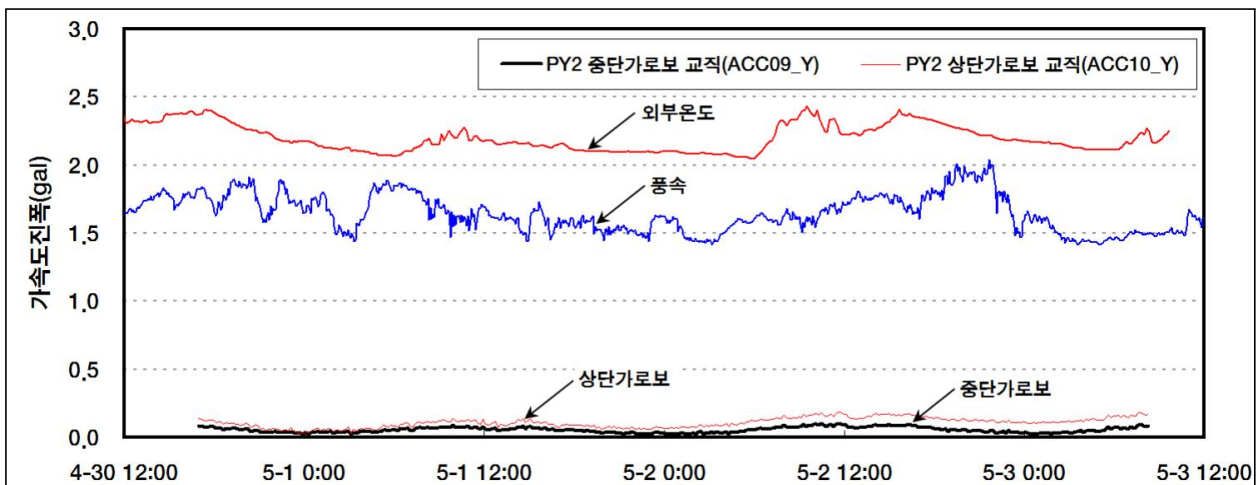


그림4.27 외부 하중 대비 PY2 주탑 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력

외부 하중에 의한 가속도진폭 변화 경향을 살펴보면 온도변화 이력과 유사한 것으로 보인다. 하지만 이는 온도에 의한 영향보다는 차량 통행량의 변화로 인한 진폭 변화인

것으로 판단되는데, 온도가 상승하는 오전과 오후 시간에는 차량 통행량이 증가하며, 온도가 하강하는 저녁과 새벽 시간에는 차량 통행량이 줄어들어 인하여 변화인 것으로 판단된다.

또한 풍속으로 인한 주탑의 진동을 관찰한 결과 14m/s 이상의 강한 바람이 약 5차례 확인되었으나, 풍속으로 인한 주탑 가속도 진동 변화에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 확인되었다.

또한 A대교의 차량 통행으로 인한 주탑의 가속도진폭 변화를 관찰하기 위하여 차량 통행이 잦은 오전에서 오후 시간과 차량 통행이 비교적 적은 저녁과 새벽 시간 주탑의 거동을 그림4.28, 그림4.29와 같이 정리하였다.

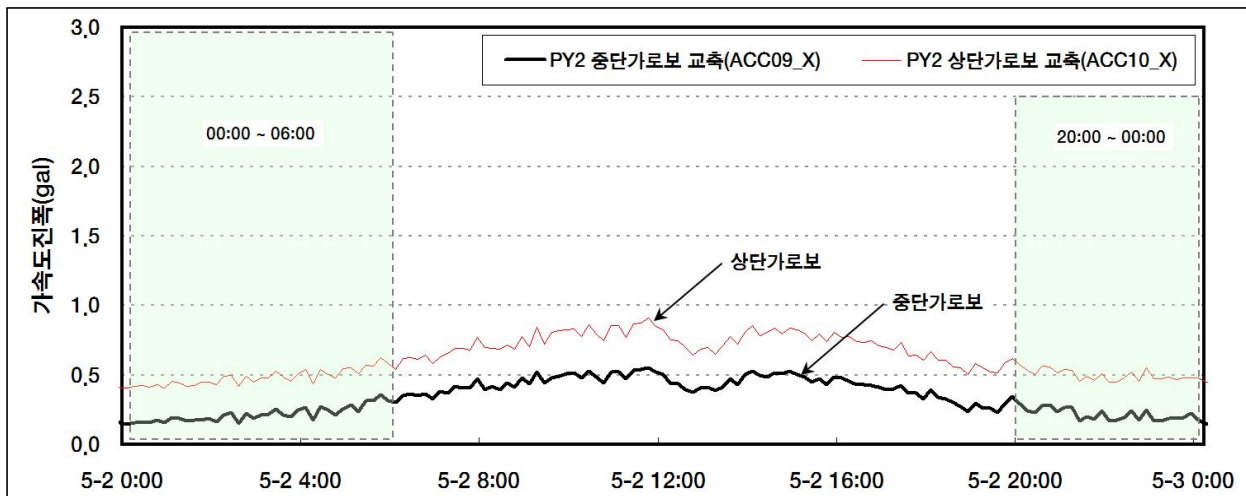


그림4.28 시간별 PY2 주탑 교축 방향 가속도진폭 변화 이력

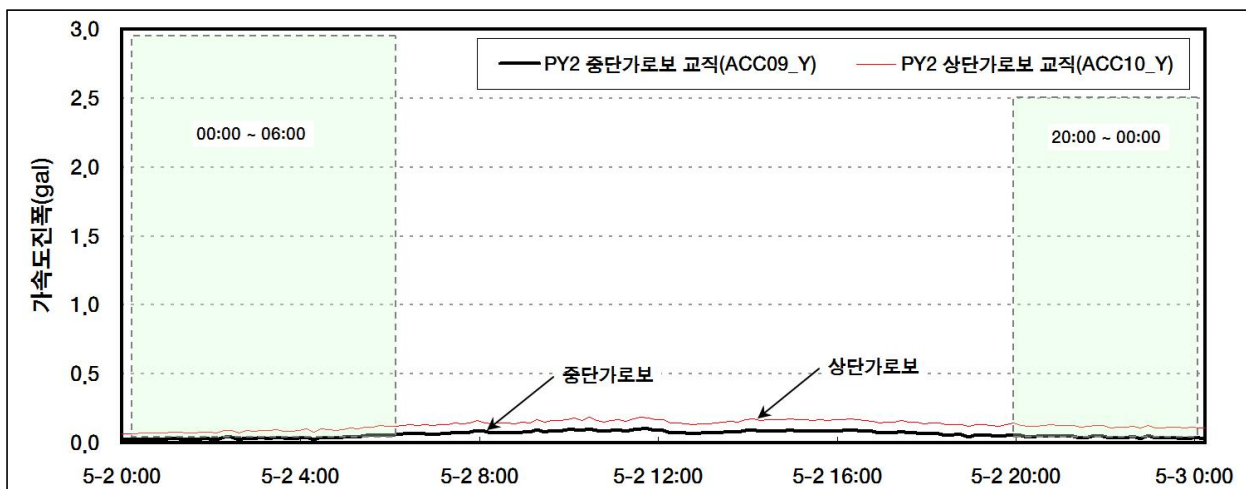


그림4.29 시간별 PY2 주탑 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력



위 그림과 같이 차량 통행으로 인한 주탑의 가속도진폭을 살펴보면, 차량 통행으로 인한 주탑의 가속도진폭이 증가하는 것으로 확인되었다. 차량 통행이 비교적 적은 저녁 시간과 새벽 시간에는 주탑의 진동이 줄어들며, 차량 통행이 잦은 오전과 오후 시간에는 주탑의 진동이 증가하는 것으로 확인되었다.

### 4.3.4 주탑 지진계

#### 가. PY1 주탑 지진계

A대교의 지진으로 인한 주탑 기초부의 진동과 동적 거동을 감시하기 위하여 PY1 기초부 동측에 1개소의 지진계가 설치되어 있다. 설치 방향은 교축 방향을 Y축으로 교축 직각 방향을 X축, 연직 방향을 Z축으로 설치되었으며, 관측치 획득 시험 기간 내 주탑 기초부의 가속도진폭을 정리하면 표4.8과 같으며, 이를 도시하면 그림 4.30과 같다.

표4.8 PY1 주탑 기초부 가속도진폭 변화

(단위 : gal)

구분	교축 방향	교축 직각 방향	연직 방향
최대	0.197	0.000	0.105
최소	0.040	0.000	0.039
평균	0.116	0.000	0.068

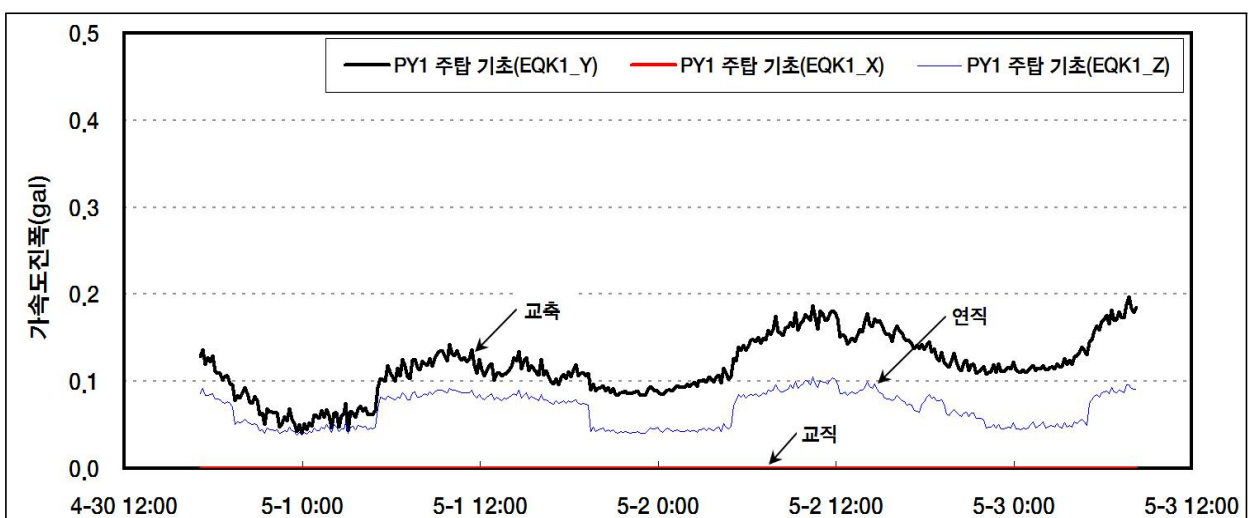


그림4.30 PY1 주탑 기초부 가속도진폭 변화 이력

관측치 획득 시험 기간 내 주탑 기초부에 발생한 진폭을 관찰한 결과, 교축 방향은 최대 0.197gal, 교축 직각 방향은 0.000gal, 연직 방향은 0.105gal의 최대 진폭이 발생하였다.

주탑 기초부에서 계측된 최대 진폭의 경우 ‘무감(0.8gal이하)’ 수준으로 인체에 느껴지지 않고 지진계에 기록되는 수준의 진동이 관찰되었다. 이는 A대교의 차량 통행으로 인한 진동이 발생한 것으로 판단된다.

또한 교축 방향의 진동보다 교축 직각 방향으로 진동이 더 큰 것으로 확인되었는데 이 또한 차량 통행으로 교축 직각 방향으로 발생하는 진동이 더 큰 것으로 판단된다.

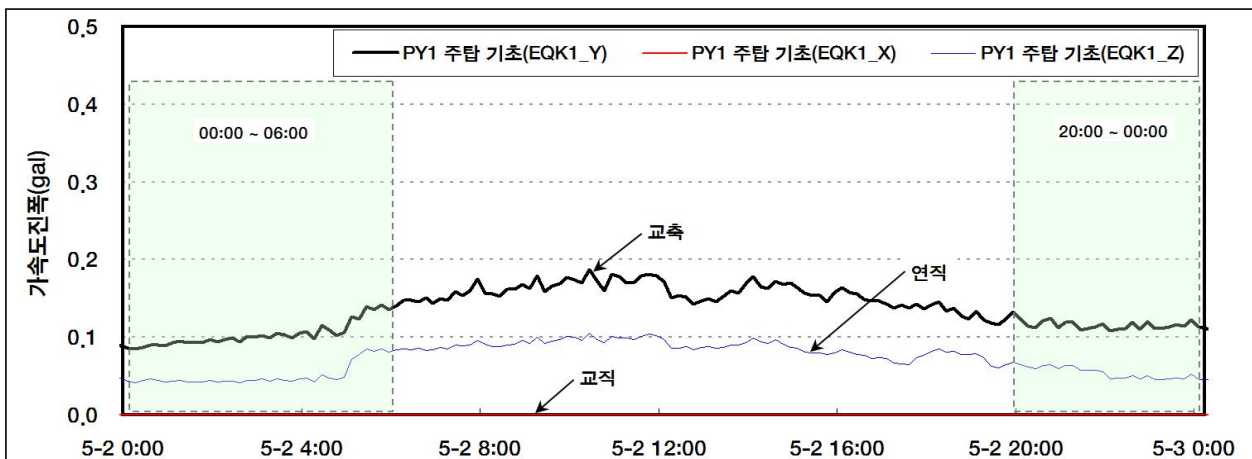
평균 진폭의 경우 교축 방향의 경우 0.116gal, 교축 직각 방향의 경우 0.000gal, 연직 방향의 경우 0.068gal로 작은 진동이 확인되었다.

주탑 기초부의 진동 발생 여부는 외부 하중인 온도와 풍속으로 인한 진동 발생보다는 차량 통행으로 인한 영향이 큰 것으로 판단된다. 따라서 차량 통행이 잦은 오전, 오후 시간과 차량 통행이 비교적 적은 늦은 저녁과 새벽 시간의 주탑 기초부 진동을 비교하여 정리하면 표4.9와 같으며, 이를 도시하면 그림4.31과 같다.

**표4.9 PY1 주탑 기초부 가속도진폭 변화**

(단위 : gal)

구분	교축 방향		교축 직각 방향		연직 방향	
	저녁, 새벽	오전, 오후	저녁, 새벽	오전, 오후	저녁, 새벽	오전, 오후
최대	0.140	0.187	0.000	0.000	0.085	0.105
최소	0.085	0.116	0.000	0.000	0.041	0.061
평균	0.110	0.155	0.000	0.000	0.053	0.086



**그림4.31 시간별 PY1 주탑 기초부 가속도진폭 변화 이력**

위의 표와 그래프와 같이 차량 통행이 비교적 적은 늦은 저녁과 새벽 시간의 주탑 기초부의 진동과 차량 통행이 잦은 오전, 오후 시간의 주탑 기초부의 진동을 비교해 보면 교축 방향의 경우 0.046gal, 교축 직각 방향의 경우 0.000gal, 연직 방향의 경우 0.020gal의 진동이 증가한 것으로 확인되었다.

차량 통행으로 인한 주탑 기초부에 발생하는 진동의 경우 주탑 건전성에 영향을 미칠만한 수준의 진동이 아닌 것으로 판단되며, 추후 차량 통행 이외의 지진 및 외부 하중으로 인한 주탑의 이상 유무를 판단하는 자료로 활용될 수 있다.

### 나. PY2 주탑 지진계

A대교의 지진으로 인한 주탑 기초부의 진동과 동적 거동을 감시하기 위하여 PY2 기초부 동측에 1개소의 지진계가 설치되어 있다. 설치 방향은 교축 방향을 Y축으로 교축 직각 방향을 X축, 연직 방향을 Z축으로 설치되었으며, 관측치 획득 시험 기간 내 주탑 기초부의 가속도진폭을 정리하면 표4.10과 같으며, 이를 도시하면 그림4.32와 같다.

표4.10 PY2 주탑 기초부 가속도진폭 변화

(단위 : gal)

구분	교축 방향	교축 직각 방향	연직 방향
최대	0.041	0.044	0.039
최소	0.009	0.008	0.008
평균	0.023	0.026	0.022

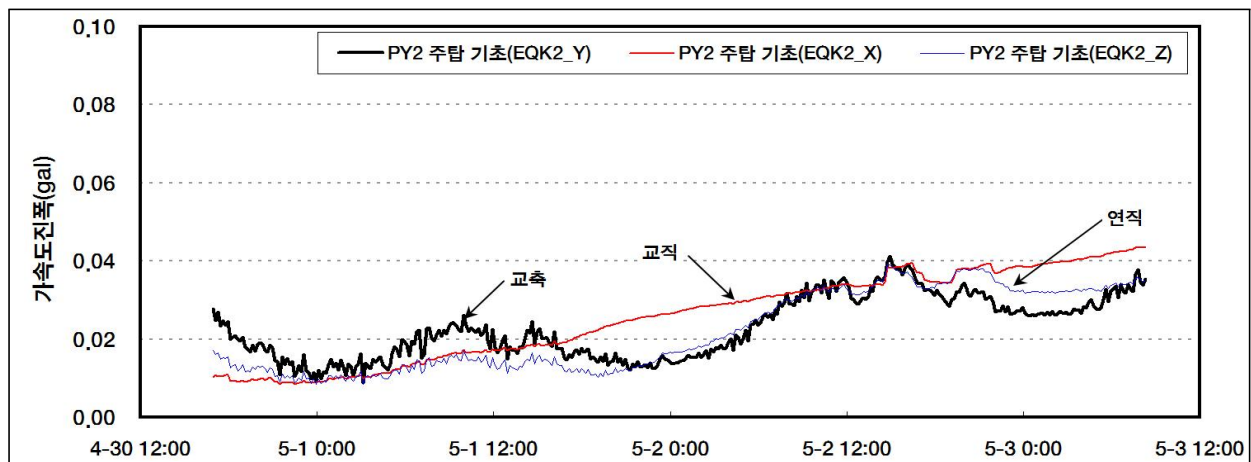


그림4.32 PY2 주탑 기초부 가속도진폭 변화 이력

관측치 획득 시험 기간 내 주탑 기초부에 발생한 진폭을 관찰한 결과, 교축 방향의 경우 최대 0.041gal, 교축 직각 방향의 경우 0.040gal, 연직 방향의 경우 0.039gal의 최대 진폭이 발생하였다.

주탑 기초부에서 계측된 최대 진폭의 경우 ‘무감(0.8gal 이하)’ 수준의 진동으로 사람이 느낄 수는 없지만, 지진계에는 기록되는 수준의 진동이 관찰되었다. 이는 A대교의 차량 통행으로 인한 진동이 발생한 것으로 판단된다.

또한, 교축 방향의 진동보다 교축 직각 방향으로의 진동이 더 큰 것으로 확인되었는데 이 또한 차량 통행으로 교축 직각 방향으로 발생하는 진동이 더 큰 것으로 판단된다.

평균 진폭의 경우 교축 방향의 경우 0.023gal, 교축 직각 방향의 경우 0.026gal, 연직 방향의 경우 0.022gal로 작은 진동이 확인되었다.

주탑 기초부의 진동 발생 여부는 외부 하중인 온도와 풍속으로 인한 진동 발생보다는 차량 통행으로 인한 영향이 큰 것으로 판단된다. 따라서 차량 통행이 많은 오전, 오후 시간과 차량 통행이 비교적 적은 늦은 저녁과 새벽 시간의 주탑 기초부의 진동을 비교하여 정리하면 표4.11과 같으며, 이를 도시하면 그림4.33과 같다.

표4.11 PY2 주탑 기초부 가속도진폭 변화

(단위 : gal)

구분	교축 방향		교축 직각 방향		연직 방향	
	저녁, 새벽	오전, 오후	저녁, 새벽	오전, 오후	저녁, 새벽	오전, 오후
최대	0.033	0.041	0.039	0.040	0.038	0.039
최소	0.014	0.024	0.027	0.031	0.017	0.026
평균	0.022	0.032	0.032	0.034	0.026	0.033

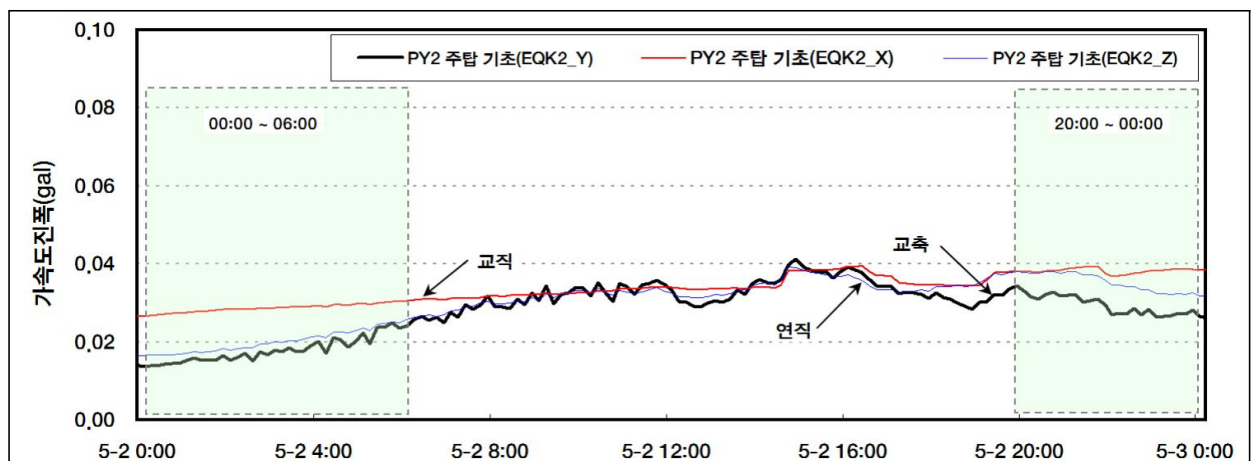


그림4.33 시간별 PY2 주탑 기초부 가속도진폭 변화 이력

위의 표 및 그래프와 같이 차량 통행이 비교적 적은 늦은 저녁과 새벽 시간의 주탑 기초부의 진동과 차량 통행이 잦은 오전, 오후 시간의 주탑 기초부의 진동을 비교해 보면 교축 방향의 경우 0.008gal, 교축 직각 방향의 경우 0.001gal, 연직 방향의 경우 0.001gal의 진동이 증가한 것으로 확인되었다.

차량 통행으로 인한 주탑 기초부에 발생하는 진동의 경우 주탑 건전성에 영향을 미칠만한 수준의 진동이 아닌 것으로 판단되며, 추후 차량 통행 이외의 지진 및 외부 하중으로 인한 주탑의 이상 유무를 판단하는 자료로 활용될 수 있다.

### 4.3.5 보강거더 2축 가속도계

#### 가. PY1 측경간 1/2지점 2축 가속도계

A대교의 풍하중, 활하중, 외부 충격 등에 의한 보강거더의 진동과 동적 거동을 감시하기 위하여 PY1 측경간 1/2지점 동·서측 내부에 2축 가속도계가 총 2개소 설치되어 있다.

설치 방향은 연직 방향을 Z축으로 교축 직각 방향을 Y축으로 설치되었으며, 관측치 획득 시험 기간 내 보강거더의 가속도진폭을 정리하면 표4.12와 같으며, 이를 도시하면 그림4.34, 그림4.35와 같다.

표4.12 PY1 측경간 1/2지점 가속도진폭 변화 (단위 : gal)

구분	서측 연직	동측 연직	서측 교직	동측 교직
최대	18.53	21.16	3.10	8.99
최소	1.00	0.96	0.32	2.18
평균	9.03	9.52	1.15	4.62

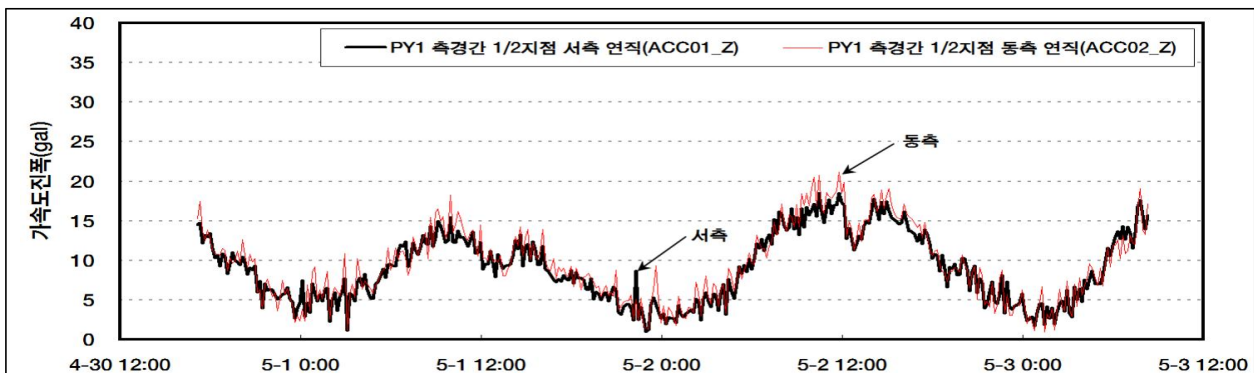


그림4.34 PY1 측경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력

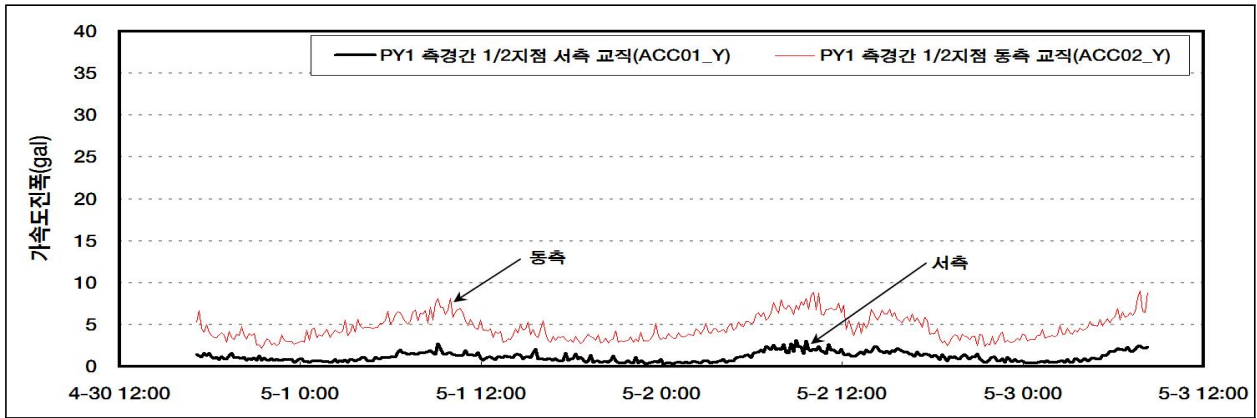


그림4.35 PY1 측경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력

관측치 획득 시험 기간 내 PY1 측경간 1/2지점에 발생한 최대 진폭을 관찰한 결과, 서측 연직 방향 18.53gal, 동측 연직 방향 21.16gal의 최대 진폭이 발생하였으며, 서측 교축 직각 방향 3.10gal, 동측 교축 직각 방향의 경우 8.99gal의 최대 진폭이 발생하였다.

연직 방향 최대 진폭은 ‘약진(8gal~25gal)’ 수준으로 그릇에 담긴 물이 진동하는 수준의 진동이 발생하는 것으로 확인되었다. 또한 교축 직각 방향의 최대 진폭은 ‘경진(2.5gal~8.0gal)’ 수준의 진동으로 보통 사람에게 느껴지는 정도의 진동이 확인되었다.

보강거더의 경우 부재의 특성상 주탑에 비하여 진동이 크게 발생하며, 대형 차량의 통행이 잦은 산업지역으로 차량 통행으로 인한 진동이 큰 것으로 판단된다. 또한 활하중이 재하되는 연직 방향의 진동이 교축 직각 방향의 진동보다 큰 것으로 확인되었다.

이처럼 외부 하중에 의하여 보강거더에 발생하는 진동 변화를 관찰하기 위하여 외부 하중과 함께 그래프로 도시하였으며, 이는 그림4.36 및 그림4.37과 같다.

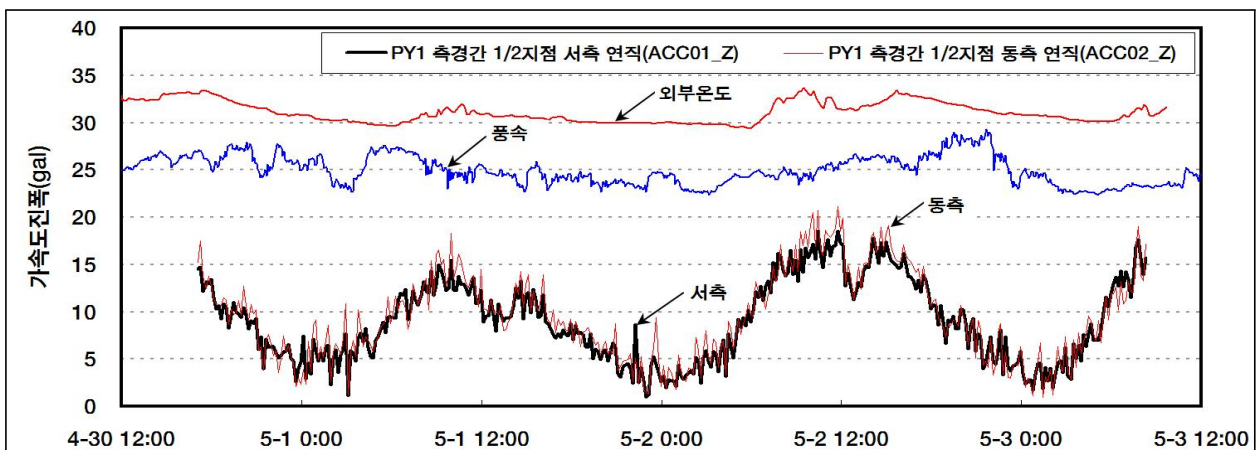


그림4.36 외부 하중 대비 PY1 측경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력

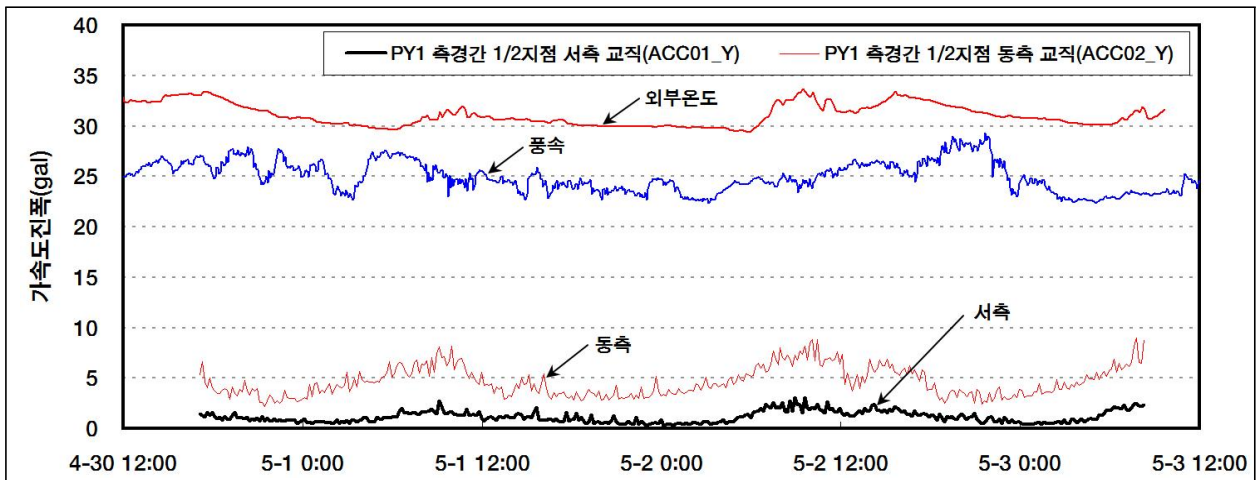


그림4.37 외부 하중 대비 PY1 축경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력

외부 하중에 의한 가속도진폭 변화 경향을 살펴보면 온도변화 이력과 유사한 것으로 보인다. 하지만 이는 온도에 의한 영향보다는 차량 통행량의 변화로 인한 것으로 판단되는데, 온도가 상승하는 오전과 오후 시간에는 차량 통행량이 증가하며, 온도가 하락하는 저녁과 새벽 시간에는 차량 통행량이 줄어들어 인하여 변화인 것으로 판단된다. 또한 풍속으로 인한 보강거더의 진동을 관찰한 결과 14m/s 이상의 강한 바람이 약 5차례 확인되었는데 동일 시간 보강거더의 진폭이 증가한 것으로 확인되었다.

또한 차량 통행으로 인한 보강거더의 가속도진폭 변화를 관찰하기 위하여 차량 통행이 잦은 오전에서 오후 시간과 차량 통행이 비교적 적은 저녁과 새벽 시간의 보강거더 거동을 다음과 같이 그림4.38, 그림4.39와 같이 정리하였다.

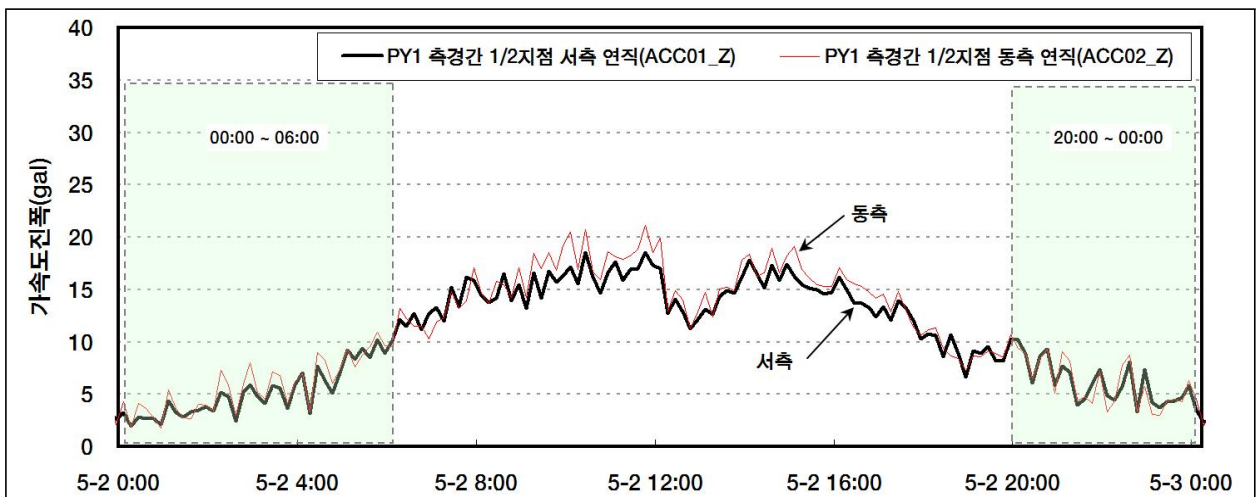


그림4.38 시간별 PY1 축경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력

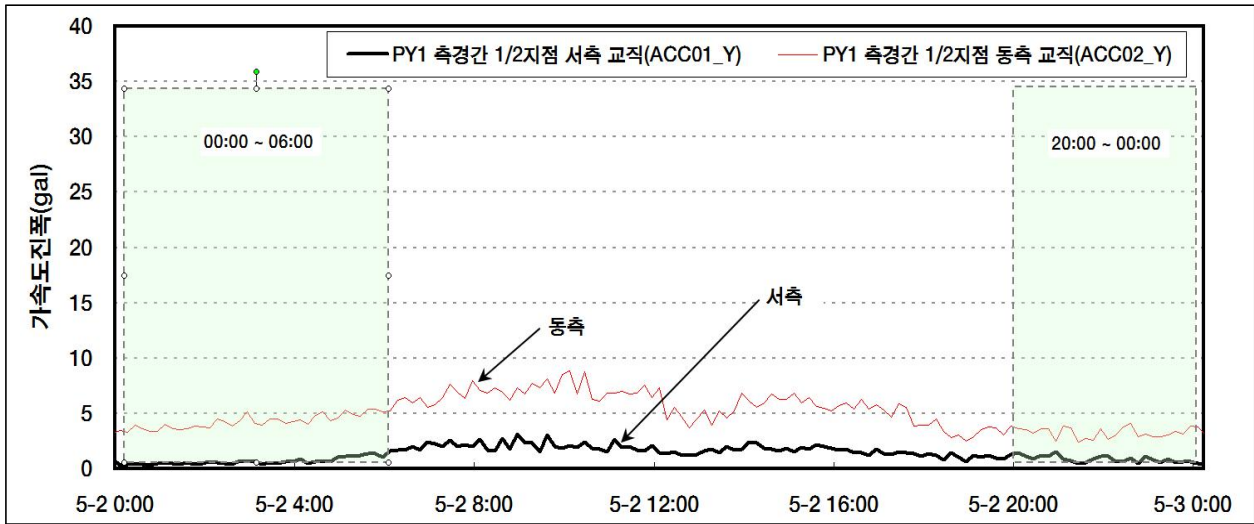


그림4.39 시간별 PY1 축경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력

위 그림과 같이 차량 통행으로 인한 보강거더의 가속도진폭을 살펴보면, 차량 통행이 비교적 적은 저녁과 새벽 시간에는 보강거더의 진동이 줄어들며, 차량 통행이 잦은 오전과 오후 시간에는 보강거더의 진동이 증가하는 것으로 확인되었다.

#### 나. 중앙경간 1/2지점 2축 가속도계

A대교의 풍하중, 활하중, 외부 충격 등에 의한 보강거더의 진동과 동적 거동을 감시하기 위하여 중앙경간 1/2지점 동·서측 내부에 2축 가속도계가 총 2개소 설치되어 있다.

설치 방향은 연직 방향을 Z축으로 교축 직각 방향을 Y축으로 설치하였으며, 관측치 획득 시험 기간 내 보강거더의 가속도진폭을 정리하면 표4.13과 같으며, 이를 도시하면 그림4.40, 그림4.41과 같다.

표4.13 중앙경간 1/2지점 가속도진폭 변화 (단위 : gal)

구분	서측 연직	동측 연직	서측 교직	동측 교직
최대	11.44	13.40	4.15	5.62
최소	1.19	0.97	0.54	1.33
평균	5.35	5.97	2.05	2.63



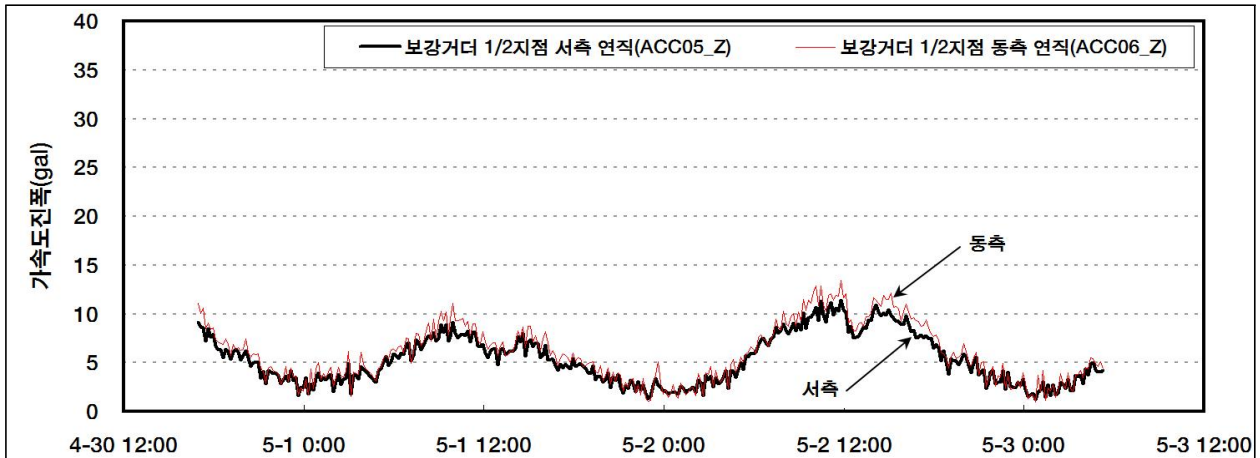


그림4.40 중앙경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력

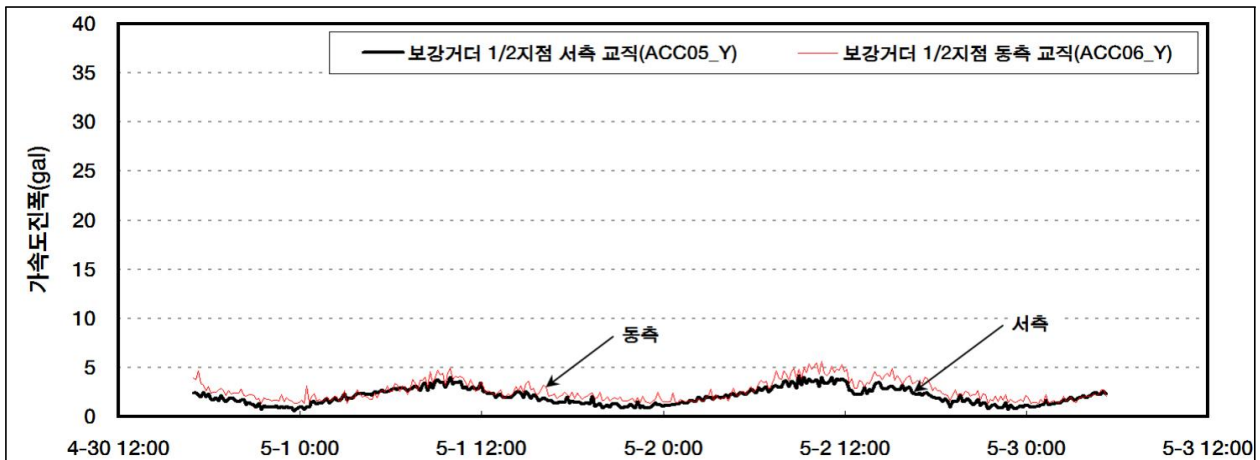


그림4.41 중앙경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력

관측치 획득 시험 기간 내 중앙경간 1/2지점에 발생한 최대 진폭을 관찰한 결과, 서측 연직 방향의 경우 11.44gal, 동측 연직 방향의 경우 13.40gal의 최대 진폭이 발생하였으며, 서측 교축 직각 방향의 경우 4.15gal, 동측 교축 직각 방향의 경우 5.62gal의 최대 진폭이 발생하였다.

연직 방향의 최대 진폭의 경우 ‘약진(8gal ~ 25gal)’ 수준으로 그릇에 담긴 물이 진동하는 수준의 진동이 발생하는 것으로 확인되었다. 또한 교축 직각 방향의 최대 진폭의 경우 ‘경진(2.5gal ~ 8.0gal)’ 수준으로 대개의 사람에게 느껴지는 정도의 진동이 확인되었다.

보강거더의 경우 부재의 특성상 주탑에 비하여 진동이 크게 발생하며, 대형 차량의 통행이 잦은 산업지역으로 차량 통행으로 인한 진동이 큰 것으로 판단된다. 또한 활하중이 재하되는 연직 방향의 진동이 교축 직각 방향의 진동보다 큰 것으로 확인되었다.

보강거더의 진동을 일으키는 가장 중요한 영향인자는 바람으로 일반적으로 강한 바람이 부는 환경, 즉 풍속이 큰 경우 구조물의 진폭도 증가하게 된다. 이처럼 외부 하중에 의하여 보강거더에 발생하는 진동 변화를 관찰하기 위하여 외부 하중과 함께 그래프로 도시하였으며, 이는 그림4.42, 그림4.43과 같다.

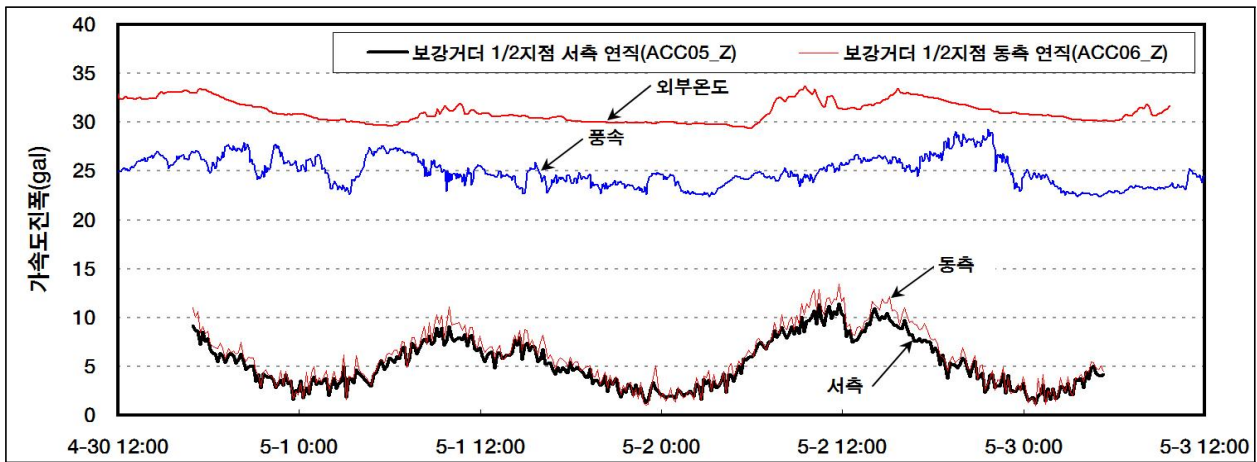


그림4.42 외부 하중 대비 중앙경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력

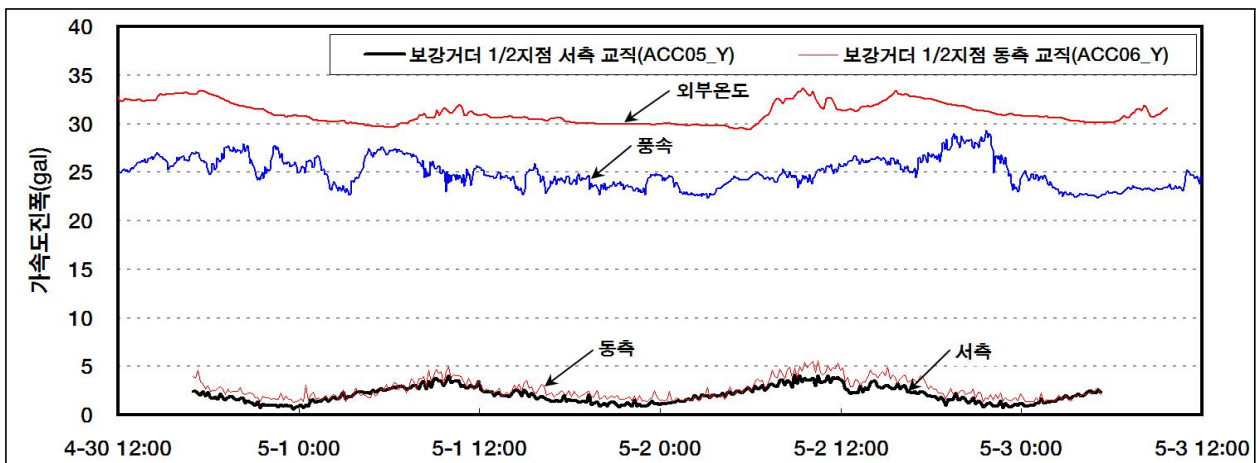


그림4.43 외부 하중 대비 중앙경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력

외부 하중에 의한 가속도진폭 변화 경향을 살펴보면 온도변화 이력과 유사한 것으로 보인다. 하지만 이는 온도에 의한 영향보다는 차량 통행량의 변화로 인한 것으로 판단되는데, 온도가 상승하는 오전과 오후 시간에는 차량 통행량이 증가하며, 온도가 하강하는 저녁과 새벽 시간에는 차량 통행량이 줄어들므로 인한 변화인 것으로 판단된다.

또한 풍속으로 인한 보강거더의 진동을 관찰한 결과 14m/s 이상의 강한 바람이 약 5차례 확인되었는데 동일 시간 보강거더의 진폭이 증가한 것으로 확인되었다.

A대교 차량 통행으로 인한 보강거더의 가속도진폭 변화를 관찰하기 위하여 차량 통행이 잦은 오전에서 오후 시간과 차량 통행이 비교적 적은 저녁과 새벽 시간의 보강 거더의 거동을 다음 그림4.44, 그림4.45와 같이 정리하였다.

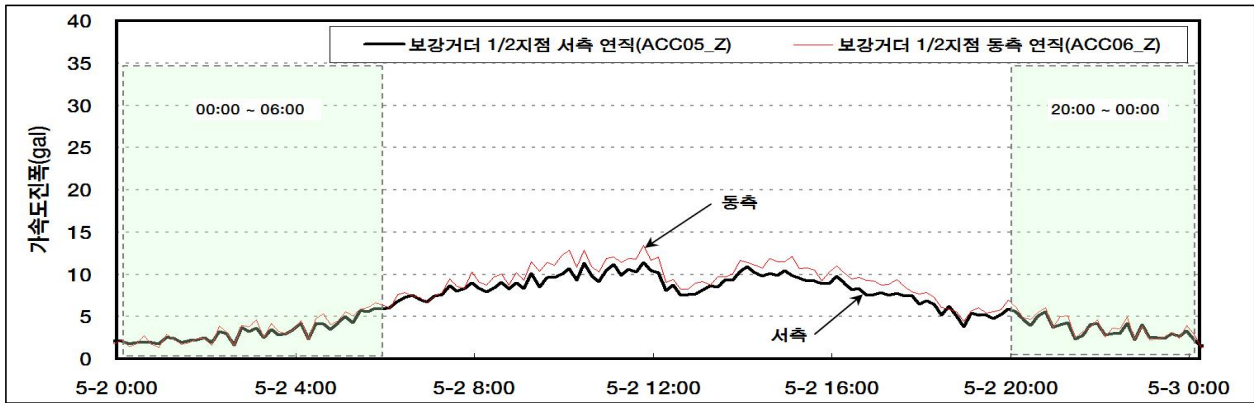


그림4.44 시간별 중앙경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력

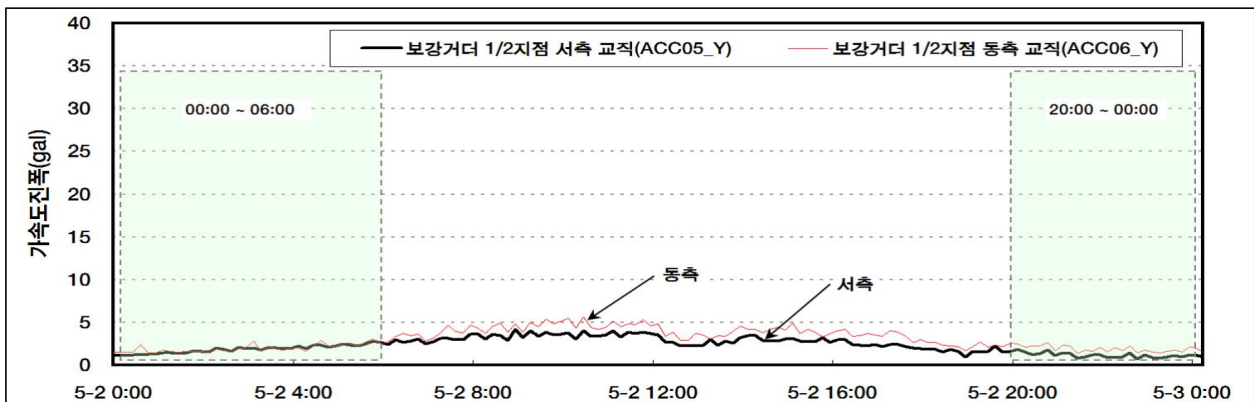


그림4.45 시간별 중앙경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력

위 그림과 같이 차량 통행으로 인한 보강거더의 가속도진폭을 살펴보면, 차량 통행이 비교적 적은 저녁과 새벽 시간에는 보강거더의 진동이 줄어들며, 차량 통행이 잦은 오전과 오후 시간에는 보강거더의 진동이 증가하는 것으로 확인되었다.

#### 다. PY2 측경간 1/2지점 2축 가속도계

A대교의 풍하중, 활하중, 외부 충격 등에 의한 보강거더의 진동과 동적 거동을 감시하기 위하여 PY2 측경간 1/2지점 동서측 내부에 2축 가속도계가 총 2개소 설치되어 있다. 관측치 획득 시험 기간 내 보강거더의 가속도진폭을 정리하면 표4.14와 같으며, 이를 도시하면 그림4.46, 그림4.47과 같다.

표4.14 PY2 측경간 1/2지점 가속도진폭 변화

(단위:gal)

구분	서측 연직	동측 연직	서측 교직	동측 교직
최대	22.26	21.837	9.79	12.55
최소	4.85	2.82	2.26	3.03
평균	11.62	10.23	4.85	7.22

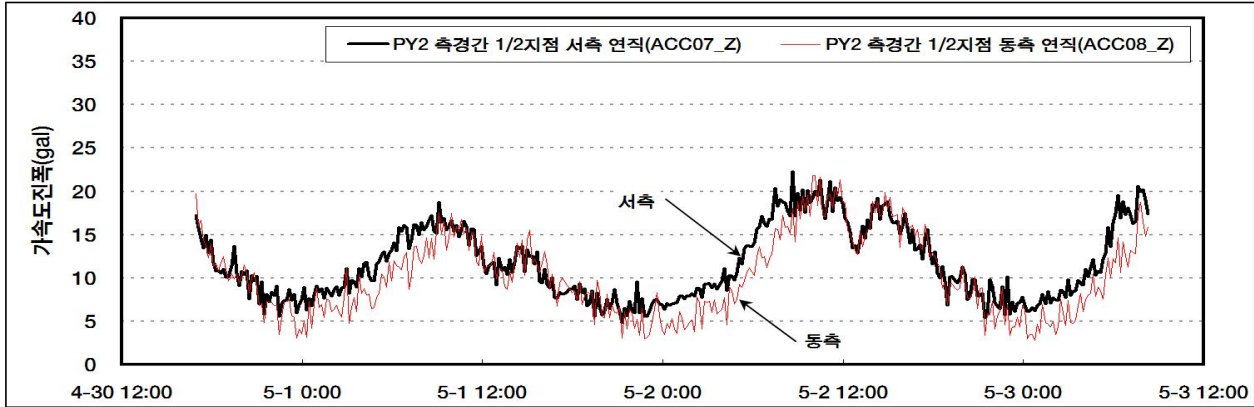


그림4.46 PY2 측경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력

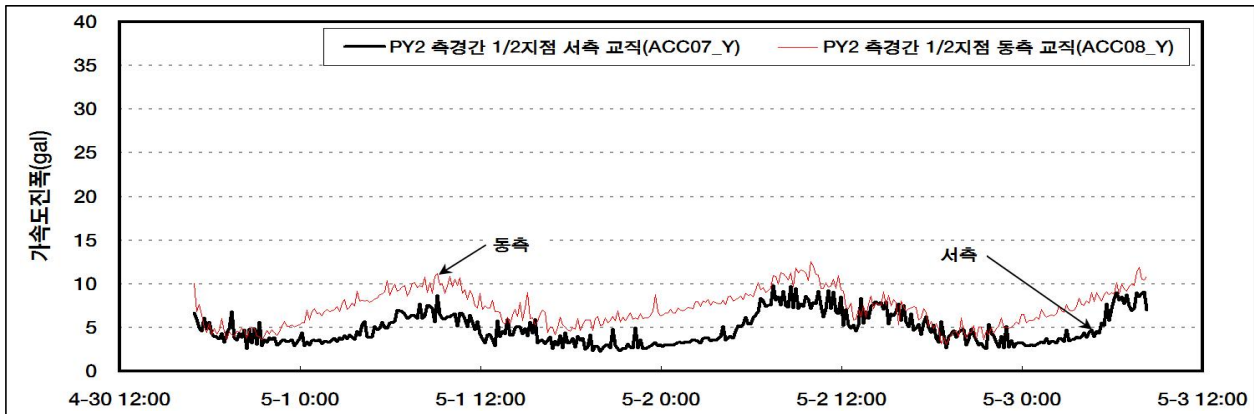


그림4.47 PY2 측경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력

관측치 획득 시험 기간 내 PY2 측경간 1/2지점에 발생한 최대 진폭을 관찰한 결과, 서측 연직 방향의 경우 22.26gal, 동측 연직 방향의 경우 21.83gal의 최대 진폭이 발생하였으며, 서측 교축 직각 방향의 경우 9.79gal, 동측 교축 직각 방향의 경우 12.55gal의 최대 진폭이 발생하였다.

연직 방향의 최대 진폭은 ‘약진(8gal~25gal)’ 수준으로 그릇에 담긴 물이 진동하는 수준의 진동이 발생하는 것으로 확인되었다. 교축 직각 방향 또한 최대 진폭은 ‘약진

(8gal~25gal)' 수준으로 그릇에 담긴 물이 진동하는 수준의 진동이 발생하는 것으로 확인되었다.

보강거더의 경우 부재의 특성상 주탑에 비하여 진동이 크게 발생하며, 대형 차량의 통행이 잦은 산업지역으로 차량 통행으로 인한 진동이 큰 것으로 판단된다. 또한 활하중이 재하되는 연직 방향의 진동이 교축 직각 방향의 진동보다 큰 것으로 확인되었다.

보강거더의 진동을 일으키는 가장 중요한 영향인자는 바람으로 일반적으로 강한 바람이 부는 환경, 즉 풍속이 큰 경우 구조물의 진폭도 증가하게 된다. 이처럼 외부 하중에 의하여 보강거더에 발생하는 진동 변화를 관찰하기 위하여 외부 하중과 함께 그래프로 도시하였으며, 이는 그림4.48과 그림4.49와 같다.

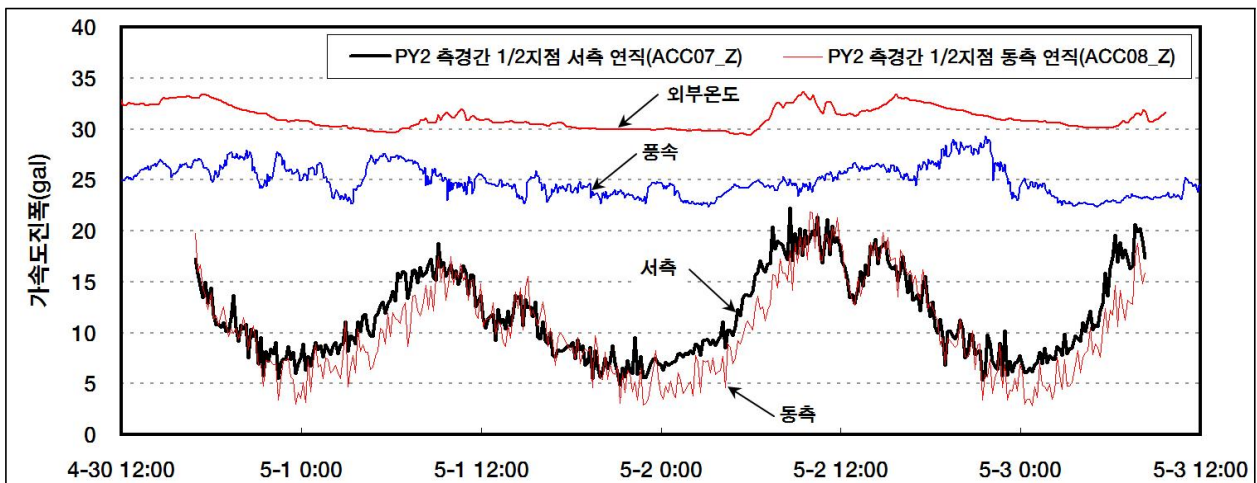


그림4.48 외부 하중 대비 PY2 축경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력

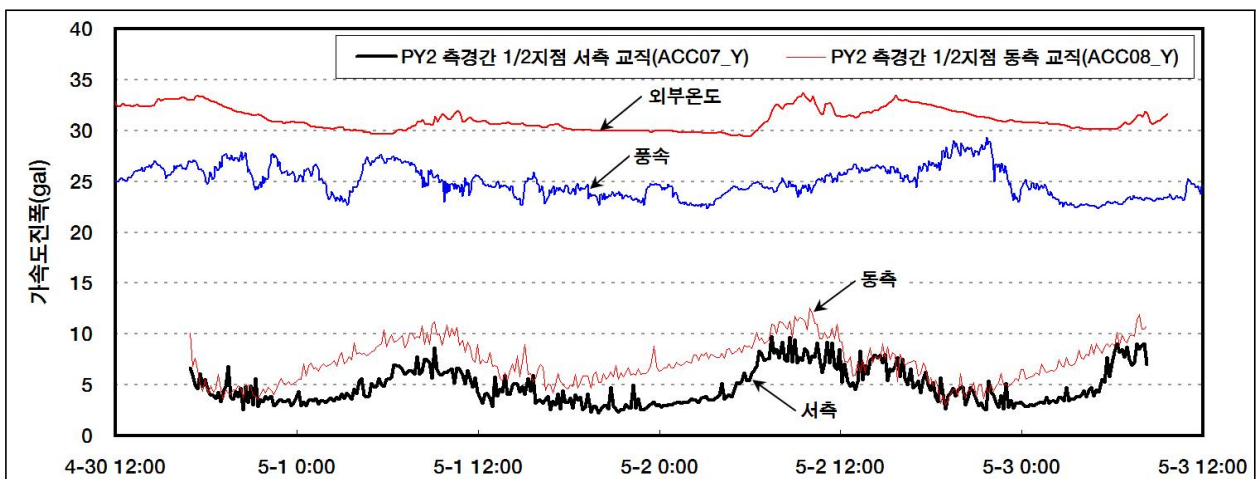


그림4.49 외부 하중 대비 PY2 축경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력

외부 하중에 의한 가속도진폭 변화 경향을 살펴보면 온도변화 이력과 유사한 것으로 보인다. 하지만 이는 온도에 의한 영향보다는 차량 통행량의 변화로 인한 것으로 판단된다. 또한 풍속으로 인한 보강거더의 진동을 관찰한 결과 14m/s 이상의 강한 바람이 약 5차례 확인되었는데 동일 시간 보강거더의 진폭이 증가한 것으로 확인되었다.

또한 A대교의 차량 통행으로 인한 보강거더의 가속도진폭 변화를 관찰하기 위하여 차량 통행이 잦은 오전에서 오후 시간과 차량 통행이 비교적 적은 저녁과 새벽 시간의 보강거더의 거동을 그림4.50, 그림4.51에 정리하였다.

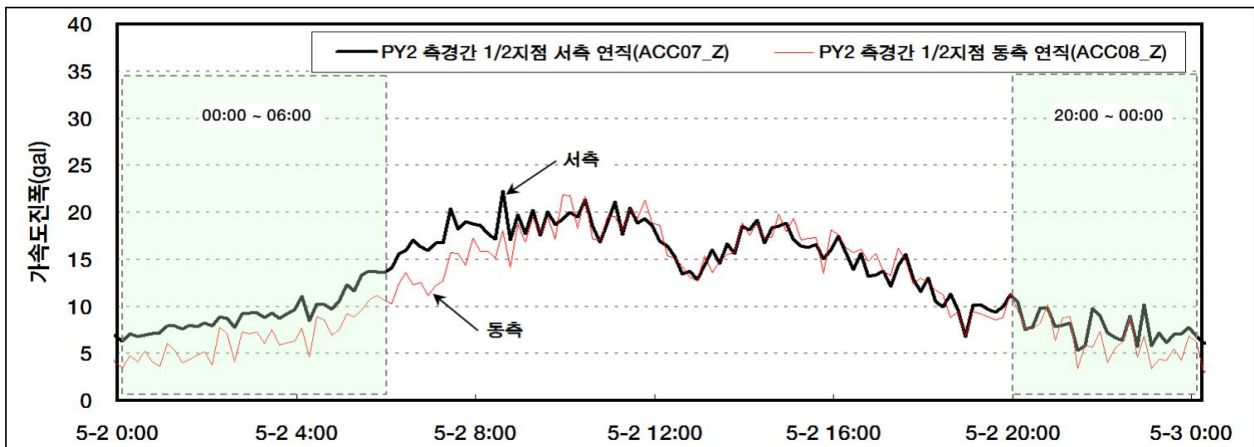


그림4.50 시간별 PY2 축경간 1/2지점 연직 방향 가속도진폭 변화 이력

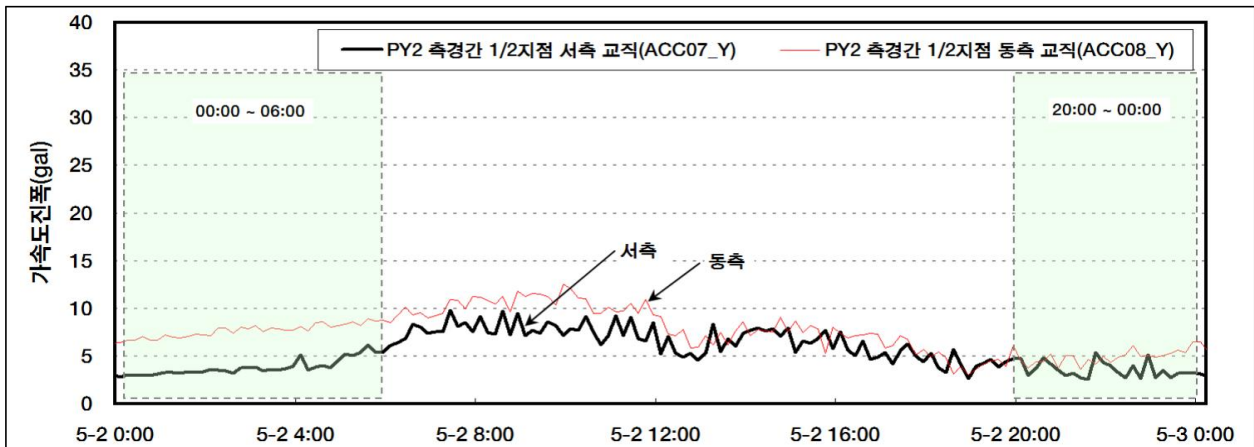


그림4.51 시간별 PY2 축경간 1/2지점 교축 직각 방향 가속도진폭 변화 이력

위 그림과 같이 차량 통행으로 인한 보강거더의 가속도진폭을 살펴보면, 차량 통행이 비교적 적은 저녁과 새벽 시간에는 보강거더의 진동이 줄어들며, 차량 통행이 잦은 오전과 오후 시간에는 보강거더의 진동이 증가하는 것으로 확인되었다.

### 라. 보강거더 고유진동수

고유진동수는 교량의 고유한 동적 특성을 대표하는 변수로서, 교량의 고유진동수를 측정하기 위해서 일반적으로 실험실 등에서 가진 시험을 시행하기도 한다.

그러나 A대교와 같이 실물 교량에 대해 가진 시험을 시행하기는 무리가 따르며, 또한 차량이 통행하고 있어 더욱 무리가 따른다.

따라서 관측치 획득 시험 기간 내 계측된 데이터를 이용하여 주파수 분석을 실시하였으며, 최대한 자유진동과 유사한 상황의 데이터를 분석하기 위하여 기록된 차량 운행 정보를 바탕으로 차량 운행이 적은 새벽 시간을 선정하였다.

또한 차량 통행으로 발생하는 진동을 통하여 주파수 분석을 실시하여 연직 방향의 진동 모드 고유진동수를 구하였다.

이처럼 새벽 시간의 데이터를 주파수 분석하였으며 연직 방향 변형 모드별 고유진동수를 정리하면 표4.15와 같으며, 연직 방향의 가속도 성분과 주파수 분석을 통한 스펙트럼은 그림4.52에서 그림4.57까지와 같다.

표4.15 보강거더 연직 방향 고유진동수 (단위:Hz)

전체 차수(n)	3	5	12	16	37	47
연직 방향 차수(n)위치	1	2	3	4	5	6
PY1 측경간 서측	0.116	0.147	0.217	0.244	0.409	0.497
PY1 측경간 동측	0.116	0.146	0.217	0.244	0.409	0.500
중앙경간 서측	0.116	0.146	0.217	0.244	0.415	0.497
중앙경간 동측	0.113	0.150	0.217	0.244	0.412	0.500
PY2 측경간 서측	0.116	0.146	0.217	0.244	0.415	0.491
PY2 측경간 동측	0.116	0.146	0.217	0.244	0.415	0.500

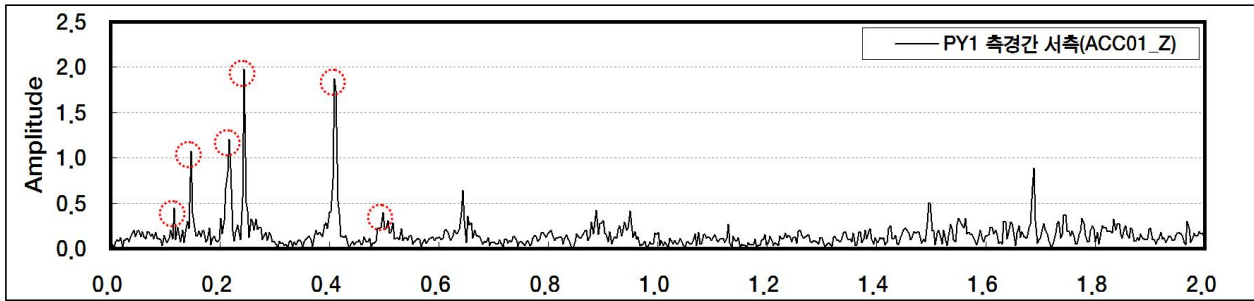


그림4.52 PY1 측경간 서측 주파수 분석\_연직 방향

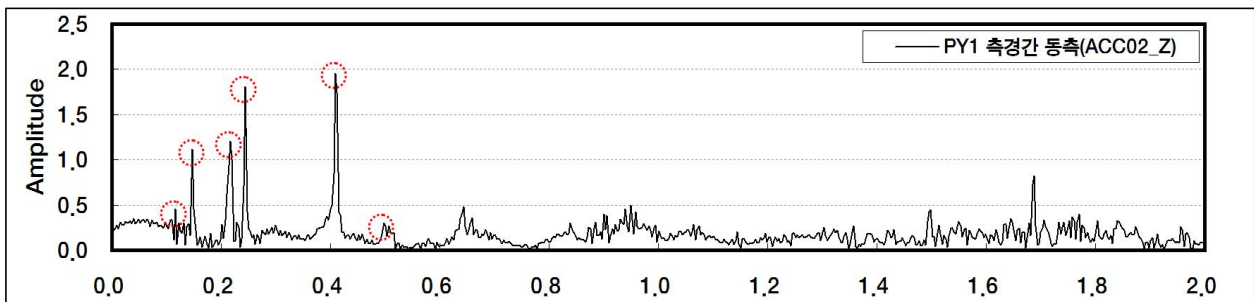


그림4.53 PY1 측경간 동측 주파수 분석\_연직 방향

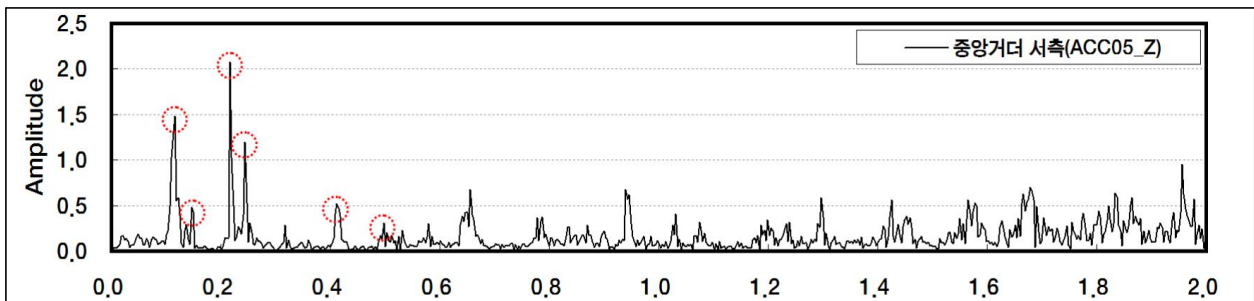


그림4.54 중앙경간 서측 주파수 분석\_연직 방향

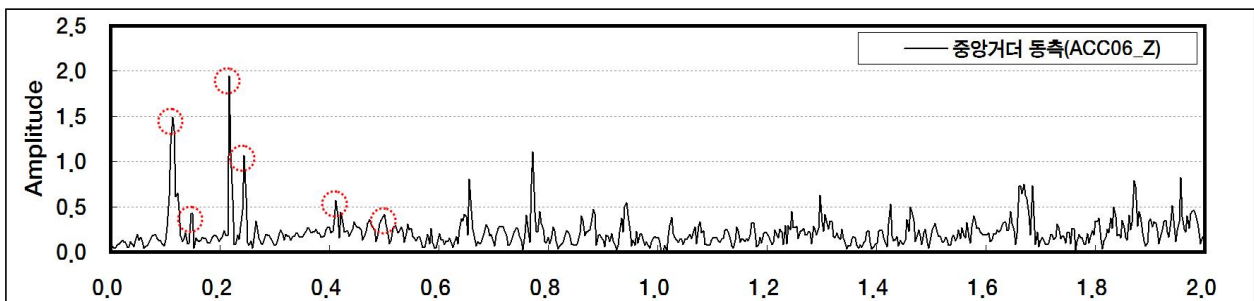


그림4.55 중앙경간 동측 주파수 분석\_연직 방향



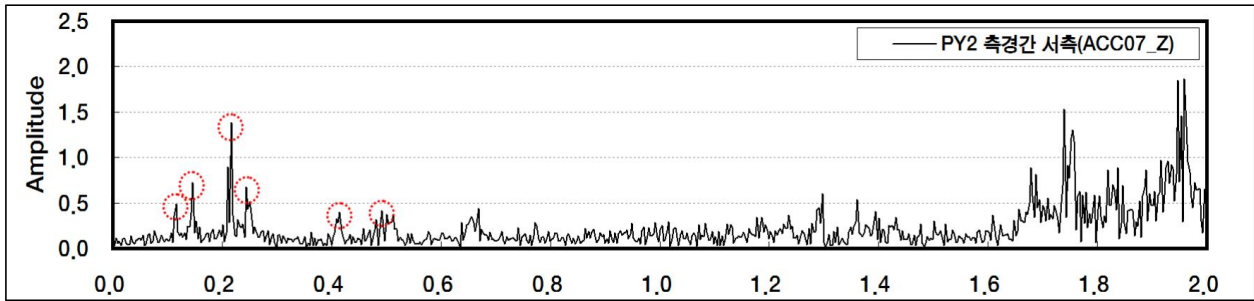


그림4.56 PY2 측경간 서측 주파수 분석\_연직 방향

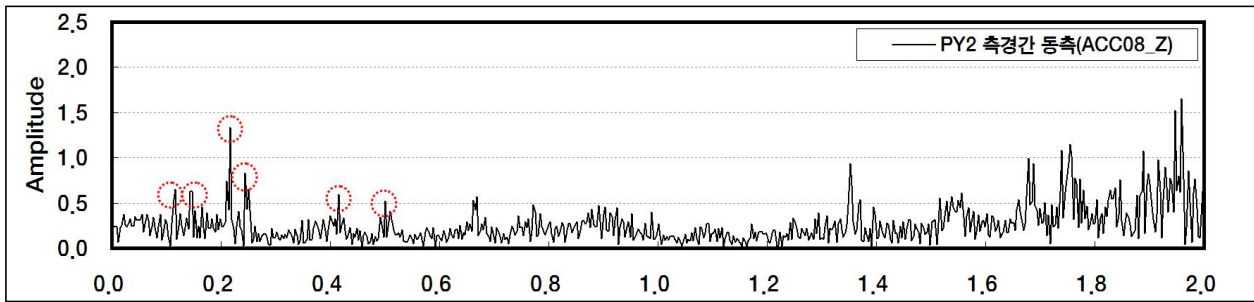


그림4.57 PY2 측경간 동측 주파수 분석\_연직 방향

### 4.3.6 보강거더 동적 변형률계

#### 가. PY1 주탑 연결부 보강거더 동적 변형률계

A대교의 활하중과 외부 충격, 외부 하중 등에 의한 보강거더의 응력 변화를 감시하기 위하여 PY1 주탑 연결부 보강거더 동·서측 내부 하단과 상단에 동적 변형률계가 총 4개소 설치되어 있다. 계측 방법은 보강거더에 인장 응력이 발생하면 (+)값, 압축응력이 발생하면 (-)값이 표출되도록 설치되었다. 관측치 획득 시험 기간 내 보강거더의 응력 변화를 정리하면 표4.16과 같으며, 이를 도시하면 그림4.58과 같다.

표4.16 PY1 주탑 연결부 보강거더 응력 변화 (단위 : MPa)

구분	서측 하단	서측 상단	동측 하단	동측 상단
인장응력	23.17	0.35	17.48	1.59
압축응력	-0.45	-24.88	-2.08	-41.09
평균	9.36	-8.00	5.32	-10.74

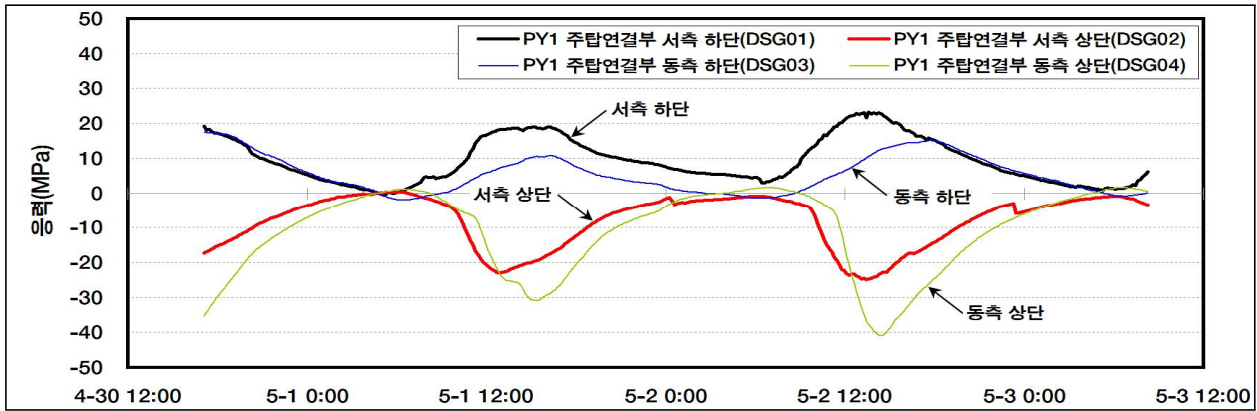


그림4.58 PY1 주탑 연결부 보강거더 응력 변화 이력

관측치 획득 시험 기간 내 PY1 주탑 연결부 보강거더에 발생한 최대 응력을 관찰한 결과, 서측 하단의 경우 23.17MPa의 인장 응력, 서측 상단의 경우 24.88MPa의 압축 응력이 발생하였으며, 동측 하단의 경우 17.48MPa의 인장 응력, 동측 하단의 경우 41.09MPa의 압축응력이 발생하였다.

PY1 주탑 연결부 보강거더 하단의 경우 인장 응력이 크게 발생하는 것으로 확인되었으며, 상단의 경우 압축응력이 크게 발생하는 것으로 확인되었다.

이는 활하중과 온도변화로 인한 보강거더의 응력 변화인 것으로 판단되며, 서측 보강 거더의 경우 강제 허용응력의 약 12%에 해당하는 수준으로 판단되며, 동측 보강거더의 경우 강제 허용응력의 약 20%에 해당하는 수준으로 평가된다.

보강거더의 경우 강제 부재로 제작되어 온도에 의한 응력 변화가 크다. 따라서 하단과 상단으로 나누어 보강거더 내부 온도변화에 따른 보강거더 응력 변화를 관찰한 결과를 그림4.59, 그림4.60과 같이 도시하였다.

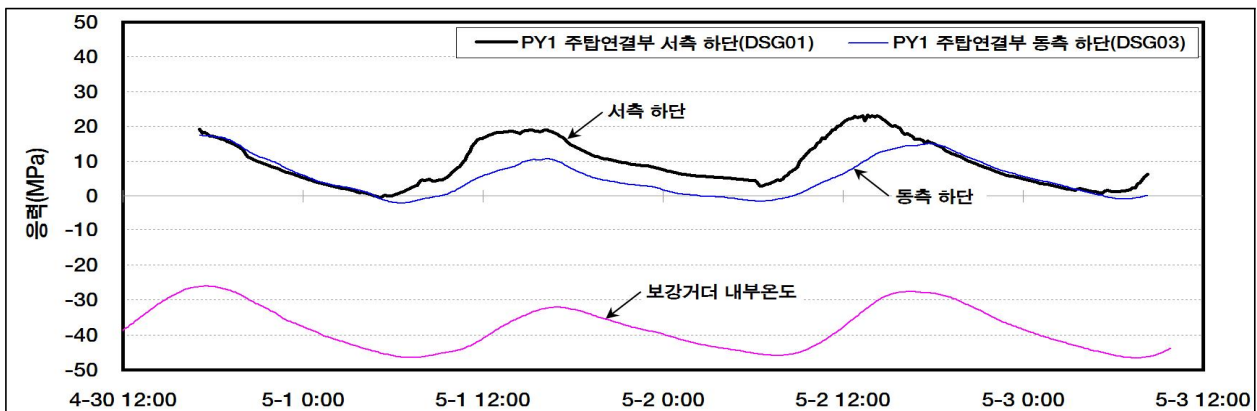


그림4.59 온도 대비 PY1 주탑 연결부 보강거더 하단 응력 변화 이력

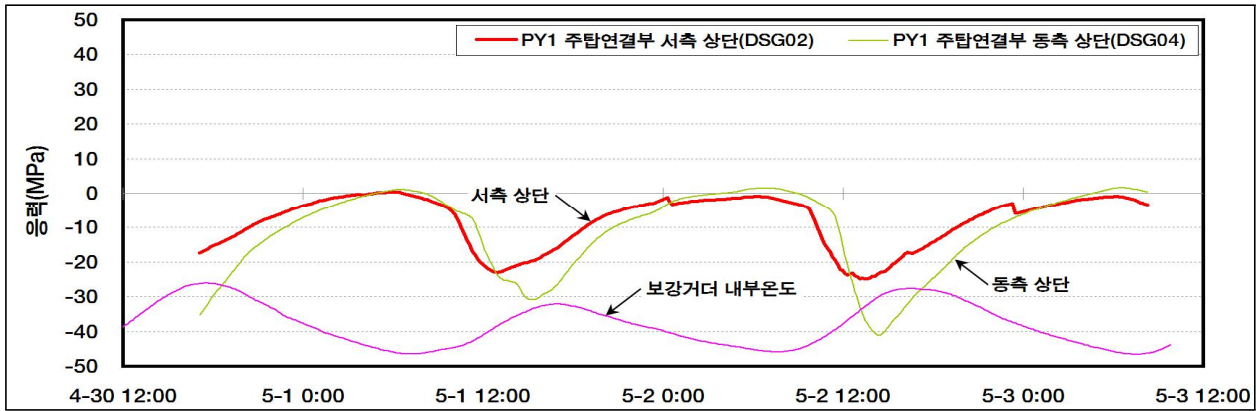


그림4.60 온도 대비 PY1 주탑 연결부 보강거더 상단 응력 변화 이력

관측치 획득 시험 기간 내 온도변화에 의한 응력 변화 경향을 살펴보면 하단의 경우 온도가 상승하면 인장 응력이 발생하며 온도가 하강하면 인장 응력이 감소하는 것으로 확인되었다. 이와 반대로 상단의 경우 온도가 상승하면 압축응력이 발생하며 온도가 하강하면 압축응력이 감소하는 것으로 확인되었다.

온도변화로 인하여 보강거더 하단과 상단에 응력 변화가 발생하는 것으로 확인되었으며, 햇빛의 직접적인 영향을 받는 상단 쪽의 응력 변화가 더 큰 것으로 확인되었다.

또한 일교차가 적은 날에는 응력 변화가 작으며, 일교차가 큰 날에는 응력 변화 또한 큰 것으로 확인되었다. 이상과 같이 온도변화와 응력 변화를 지속해서 비교 분석하여 보강거더의 이상 유무를 확인할 수 있다.

관측치 획득 시험 기간 내 차량 통행으로 인한 보강거더의 응력 변화를 관찰하기 위하여 차량 통행이 잦은 시간의 분당 데이터를 위치별로 나누어 하단과 상단의 응력 변화를 그림4.61과 그림4.62와 같이 도시하였다.

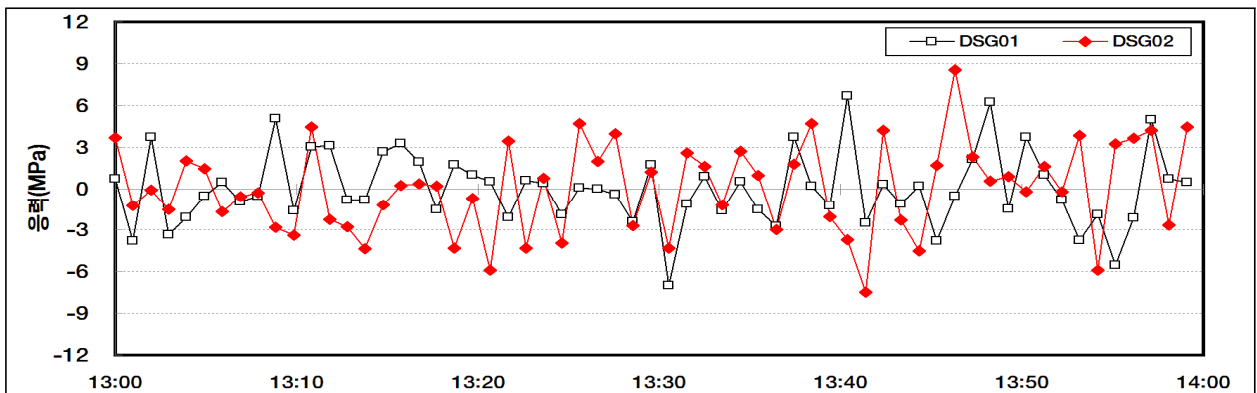


그림4.61 차량 통행으로 인한 PY1 주탑 연결부 서측 보강거더 응력 변화 이력

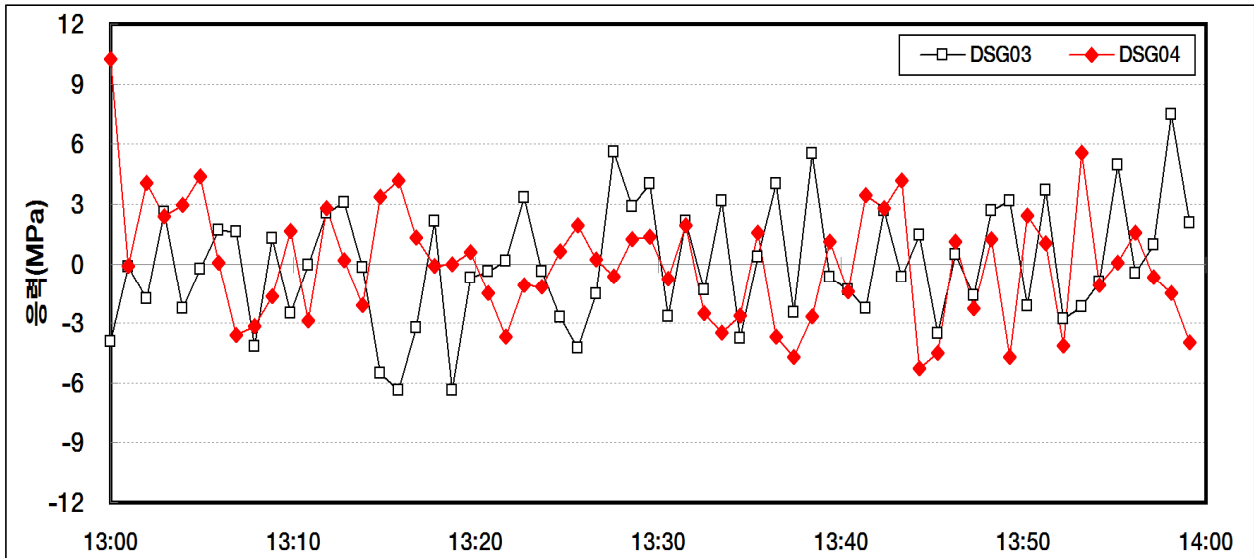


그림4.62 차량 통행으로 인한 PY1 주탑 연결부 동측 보강거더 응력 변화 이력

보강거더의 경우 구조상 상단에 압축응력이 발생하면 하단에는 인장 응력이 발생하며 상단에 인장 응력이 발생하면 하단에는 압축응력이 발생하여야 한다.

따라서 관측치 획득 시험 기간 내 차량 통행으로 인한 보강거더의 응력 변화를 살펴 보면 다소 다른 부분이 확인되었으나 하단에 인장 응력이 발생하면 상단에는 압축응력이 발생하였으며 하단에 압축응력이 발생하면 상단에는 인장 응력이 발생한 것으로 확인 되었다.

이는 차량 통행으로 인하여 보강거더의 하단과 상단에 발생하는 응력이 다르므로 인하여 위와 같은 응력 변화가 관찰된 것으로 판단된다. 또한 미미하지만, 차량 통행으로 인하여 상단에서 더 큰 응력 변화가 확인되었다.

#### 나. 중앙경간 1/2지점 동적 변형률계

A대교의 활하중과 외부 충격, 외부 하중 등에 의한 보강거더의 응력 변화를 감시하기 위하여 중앙경간 1/2지점 동서측 내부 하단과 상단에 동적 변형률계가 총 4개소 설치 되어 있다.

계측 방법은 보강거더에 인장 응력이 발생하면 (+)값, 압축응력이 발생하면 (-)값이 표출되도록 설치되었다.

관측치 획득 시험 기간 내 보강거더의 응력 변화를 정리하면 표4.17과 같으며, 이를 도시하면 그림4.63과 같다.

표4.17 중앙경간 1/2지점 응력 변화

(단위 : MPa)

구분	서측 하단	서측 상단	동측 하단	동측 상단
인장응력	27.84	3.56	29.53	6.83
압축응력	-9.20	-31.11	-2.65	-31.93
평균	9.66	-11.16	10.12	-10.72

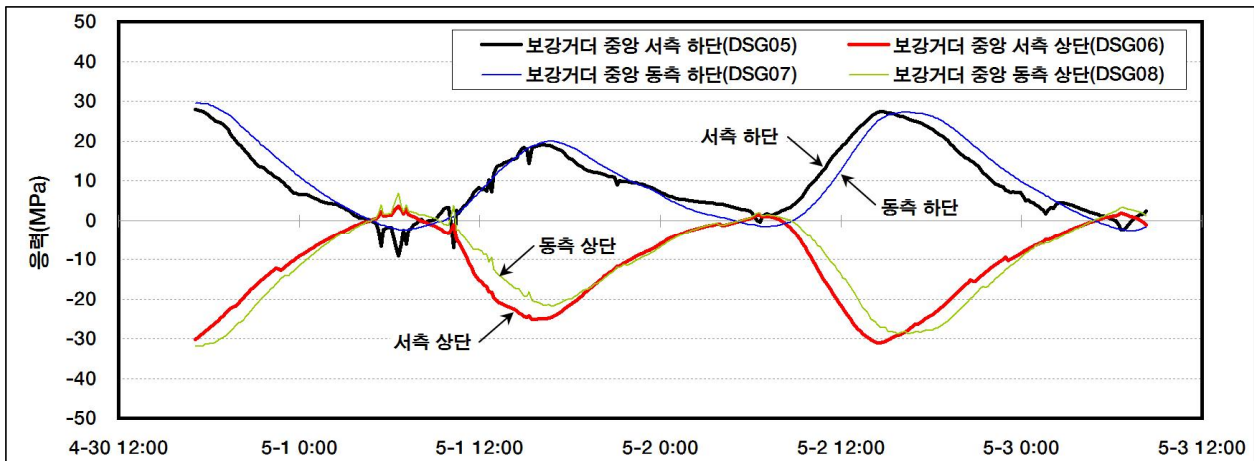


그림4.63 중앙경간 1/2지점 응력 변화 이력

관측치 획득 시험 기간 내 중앙경간 1/2지점에 발생한 최대 응력을 관찰한 결과, 서측 하단의 경우 27.84MPa의 인장 응력, 서측 상단의 경우 31.11MPa의 압축응력이 발생하였으며, 동측 하단의 경우 29.53MPa의 인장 응력, 동측 하단의 경우 31.93MPa의 압축 응력이 발생하였다.

중앙경간 1/2지점 하단의 경우 인장 응력이 크게 발생하는 것으로 확인되었으며, 상단의 경우 압축응력이 크게 발생하는 것으로 확인되었다.

이는 활하중과 온도변화로 인한 보강거더의 응력 변화인 것으로 판단되며, 서측 보강 거더의 경우 강제 허용응력의 약 16%에 해당하는 수준으로 판단되며, 동측 보강거더의 경우 강제 허용응력의 약 17%에 해당하는 수준으로 평가된다.

위와 같이 동·서측의 차는 적은 것으로 확인되었으나, 응력 변화의 시점이 맞지 않는 것은 차량 통행으로 인하여 발생한 것으로 판단된다.

보강거더의 경우 강제 부재로 제작되어 온도에 의한 응력 변화가 크다. 따라서 하단과 상단으로 나누어 보강거더 내부 온도변화에 따른 보강거더 응력 변화를 관찰하기 위하여 그림4.64, 그림4.65과 같이 도시하였다.

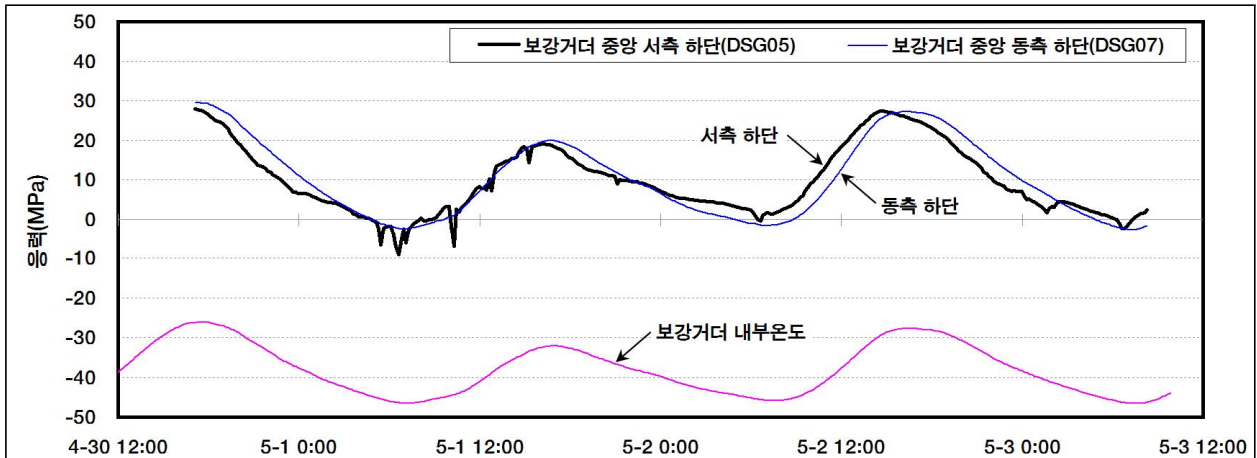


그림4.64 온도 대비 중앙경간 1/2지점 보강거더 하단 응력 변화 이력

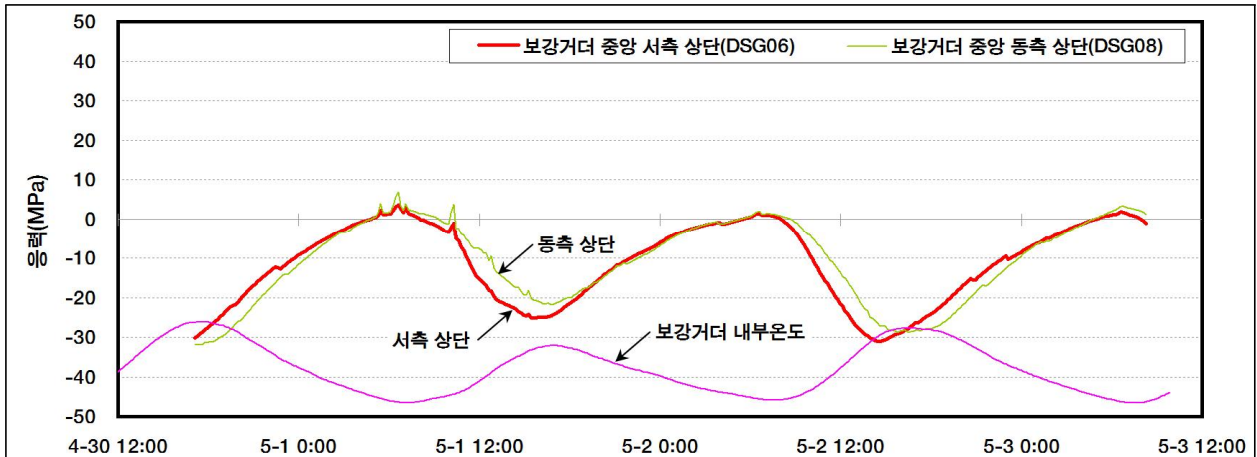


그림4.65 온도 대비 중앙경간 1/2지점 보강거더 상단 응력 변화 이력

관측치 획득 시험 기간 내 온도변화에 의한 응력 변화 경향을 살펴보면 하단의 경우 온도가 상승하면 인장 응력이 발생하며 온도가 하강하면 인장 응력이 감소하는 것으로 확인되었다. 이와 반대로 상단의 경우 온도가 상승하면 압축응력이 발생하며 온도가 하강하면 압축응력이 감소하는 것으로 확인되었다.

이처럼 온도 변화로 인하여 보강거더 하단과 상단에 응력 변화가 발생하는 것으로 확인되었으며 햇빛의 직접적인 영향을 받는 상단 쪽의 응력 변화가 더 큰 것으로 확인되었다.

또한 일교차가 적은 날에는 응력 변화가 작으며, 일교차가 큰 날에는 응력 변화 또한 큰 것으로 확인되었다. 이상과 같이 온도변화와 응력 변화를 지속해서 비교 분석하여 보강거더의 이상 유무를 확인할 수 있다.

관측치 획득 시험 기간 내 차량 통행으로 인한 보강거더의 응력 변화를 관찰하기 위하여 차량 통행이 잦은 시간의 분당 데이터를 위치별로 나누어 하단과 상단의 응력 변화를 그림4.66과 그림4.67과 같이 도시하였다.

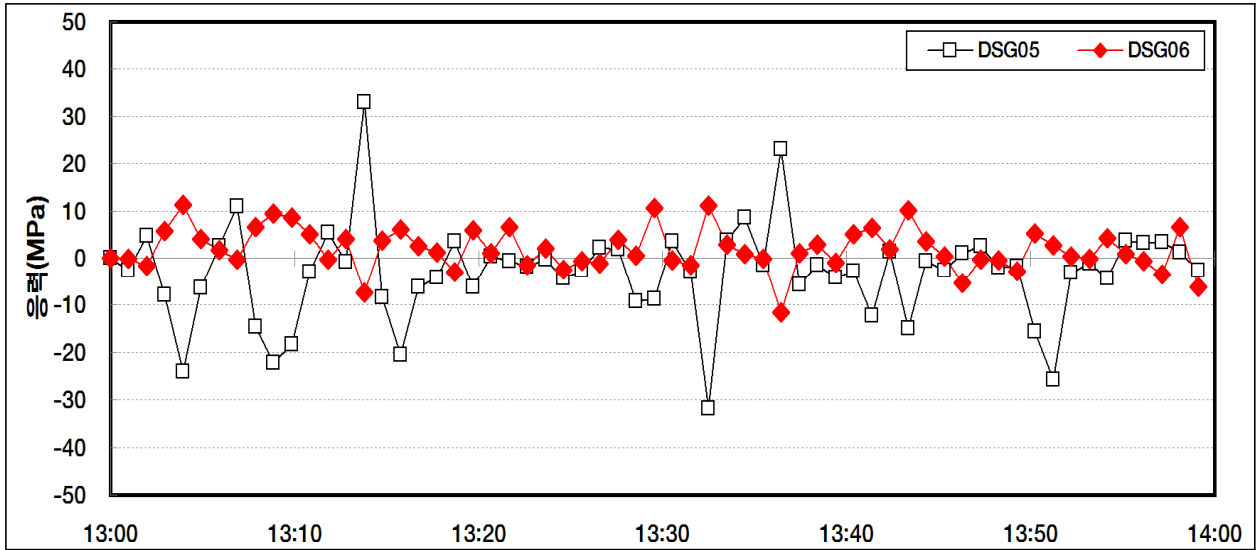


그림4.66 차량 통행으로 인한 중앙경간 1/2지점 서측 보강거더 응력 변화 이력

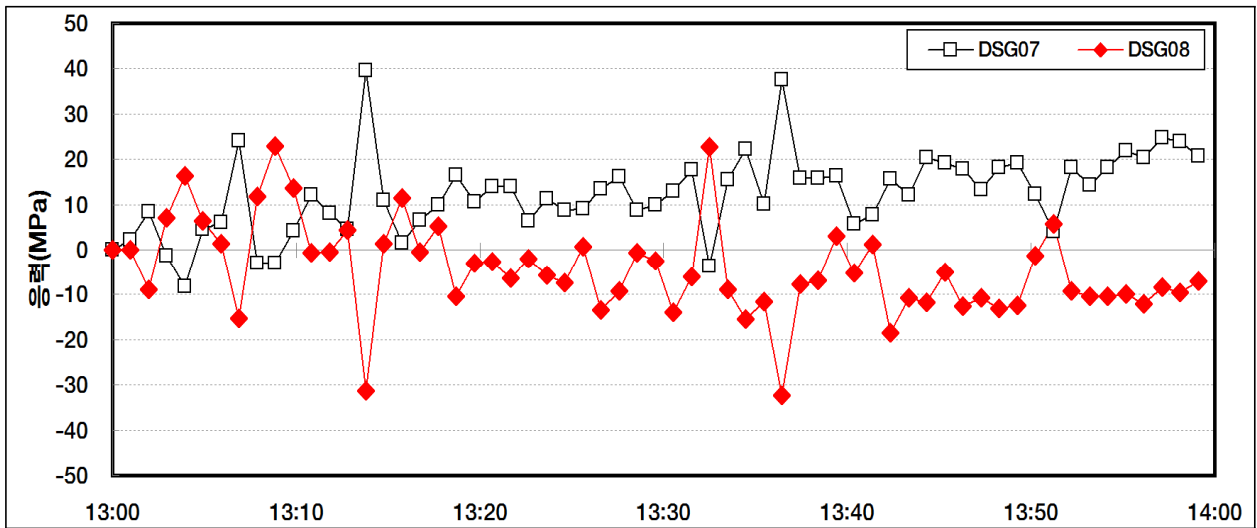


그림4.67 차량 통행으로 인한 중앙경간 1/2지점 동측 보강거더 응력 변화 이력

보강거더의 경우 구조상 상단에 압축응력이 발생하면 하단에는 인장 응력이 발생하며 상단에 인장 응력이 발생하면 하단에는 압축응력이 발생하여야 한다.

따라서 관측치 획득 시험 기간 내 차량 통행으로 인한 보강거더의 응력 변화를 살펴

보면 다소 다른 부분이 확인되었으나 하단에 인장 응력이 발생하면 상단에는 압축응력이 발생하였으며 하단에 압축응력이 발생하면 상단에는 인장 응력이 발생한 것으로 확인되었다.

이는 차량 통행으로 인하여 보강거더의 하단과 상단에 발생하는 응력이 다르므로 인하여 위와 같은 응력 변화가 관찰된 것으로 판단된다. 또한, 미미하지만 차량 통행으로 인하여 상단에서 더 큰 응력 변화가 확인되었다.

#### 다. PY2 주탑 연결부 보강거더 동적 변형률계

A대교의 활하중과 외부 충격, 외부 하중 등에 의한 보강거더의 응력 변화를 감시하기 위하여 PY2 주탑 연결부 보강거더 동·서측 내부 하단과 상단에 동적 변형률계가 총 4개소 설치되어 있다. 계측 방법은 보강거더에 인장 응력이 발생하면 (+)값, 압축응력이 발생하면 (-)값이 표출되도록 설치되었다. 관측치 획득 시험 기간 내 보강거더의 응력 변화를 정리하면 표4.18과 같으며, 이를 도시하면 그림4.68과 같다.

표4.18 PY2 주탑 연결부 보강거더 응력 변화 (단위:MPa)

구분	서측 하단	서측 상단	동측 하단	동측 상단
인장응력	20.47	2.21	24.28	0.88
압축응력	-1.67	-23.86	-0.39	-21.13
평균	7.03	-8.07	10.58	-5.99

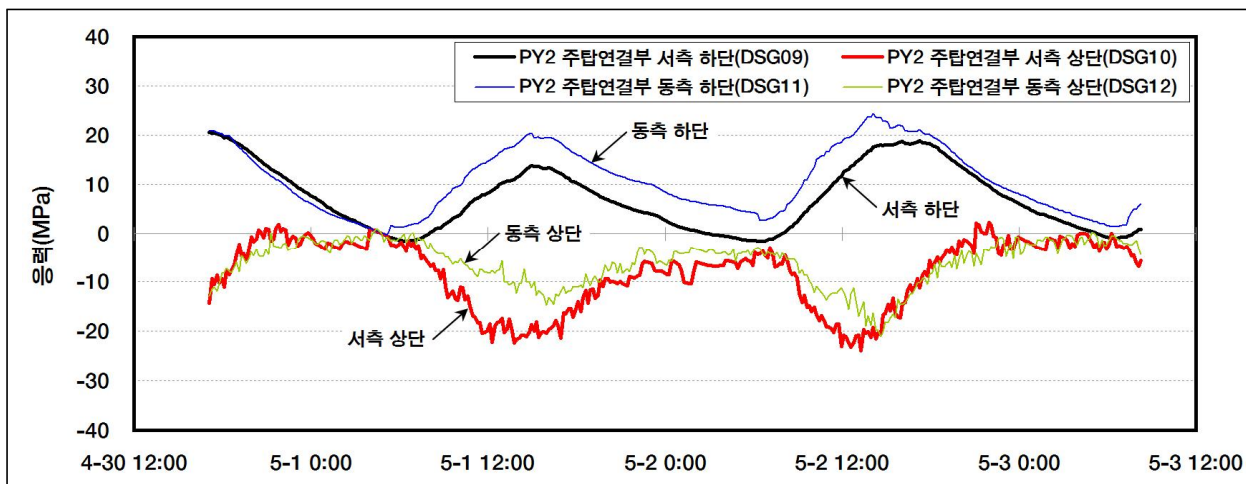


그림4.68 PY2 주탑 연결부 보강거더 응력 변화 이력



관측치 획득 시험 기간 내 PY2 주탑 연결부 보강거더에 발생한 최대 응력을 관찰한 결과, 서측 하단의 경우 20.47MPa의 인장 응력, 서측 상단의 경우 23.86MPa의 압축응력이 발생하였으며, 동측 하단의 경우 24.28MPa의 인장 응력, 동측 하단의 경우 21.13MPa의 압축응력이 발생하였다.

이는 활하중과 온도변화로 인한 보강거더의 응력 변화인 것으로 판단되며, 서측 보강거더의 경우 강제 허용응력의 약 11%에 해당하는 수준으로 판단되며, 동측 보강거더의 경우 강제 허용응력의 약 12%에 해당하는 수준으로 평가된다. 위와 같이 동서측의 차는 확인되었으나 이는 차량 통행으로 인하여 발생한 것으로 판단된다.

보강거더의 경우 강제 부재로 제작되어 온도에 의한 응력 변화가 크다. 따라서 하단과 상단으로 나누어 보강거더 내부 온도변화에 따른 보강거더 응력 변화를 관찰한 결과를 그림4.69, 그림4.70과 같이 도시하였다.

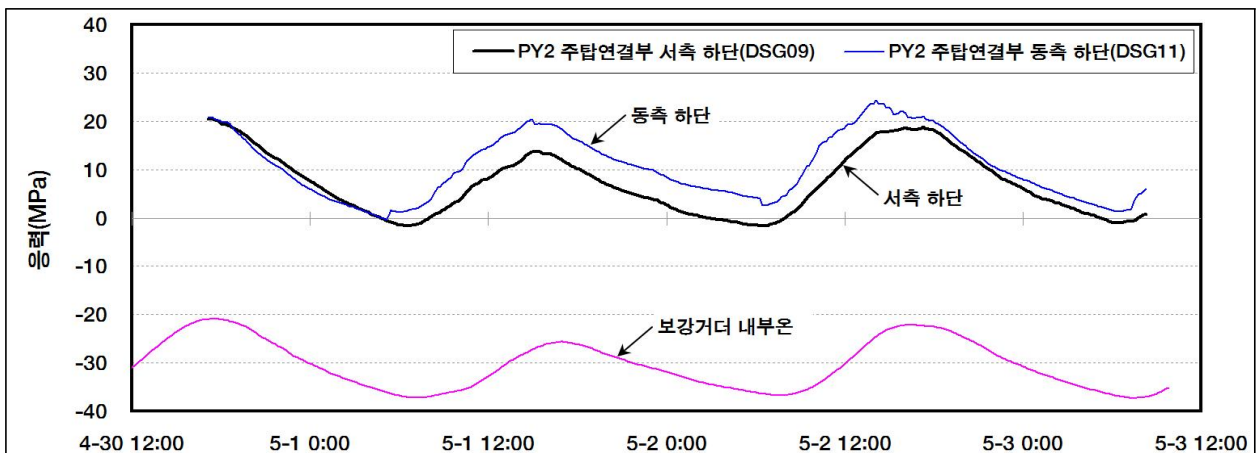


그림4.69 온도 대비 PY2 주탑 연결부 보강거더 하단 응력 변화 이력

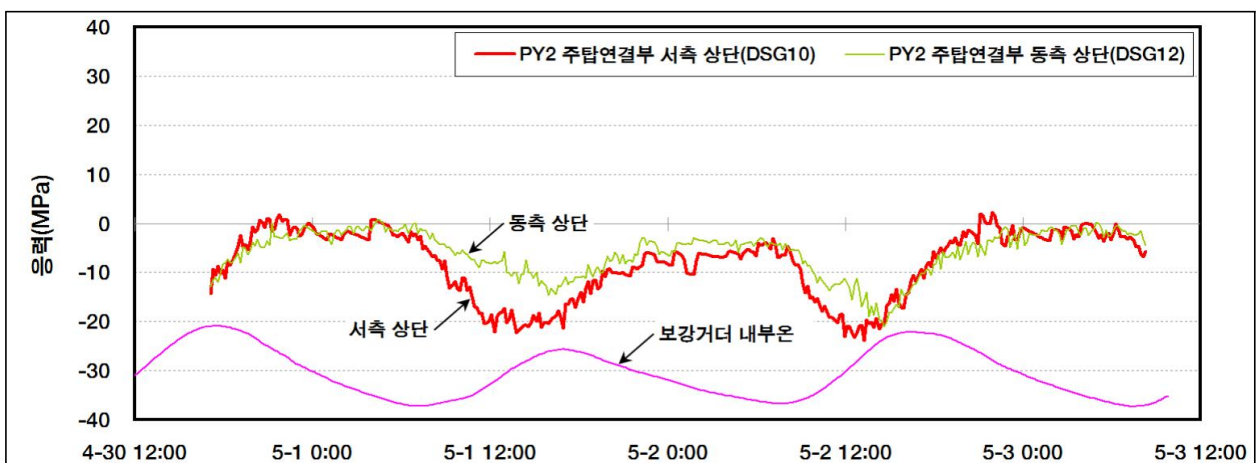


그림4.70 온도 대비 PY2 주탑 연결부 보강거더 상단 응력 변화 이력

관측치 획득 시험 기간 내 온도변화에 의한 응력 변화 경향을 살펴보면 하단의 경우 온도가 상승하면서 인장 응력이 발생하며 온도가 하강하면 인장 응력이 감소하는 것으로 확인되었다.

이와 반대로 상단의 경우 온도가 상승하면 압축응력이 발생하며 온도가 하강하면 압축응력이 감소하는 것으로 확인되었다. 이처럼 온도변화로 인하여 보강거더 하단과 상단에 응력 변화가 발생하는 것으로 확인되었으며 햇빛의 직접적인 영향을 받는 상단 쪽의 응력 변화가 더 큰 것으로 확인되었다. 또한 일교차가 적은 날에는 응력 변화가 작으며, 일교차가 큰 날에는 응력 변화 또한 큰 것으로 확인되었다. 이상과 같이 온도변화와 응력 변화를 지속해서 비교 분석하여 보강거더의 이상 유무를 확인할 수 있다.

관측치 획득 시험 기간 내 차량 통행으로 인한 보강거더의 응력 변화를 관찰하기 위하여 차량 통행이 잦은 시간의 분당 데이터를 위치별로 나누어 하단과 상단의 응력 변화를 그림4.71과 그림4.72와 같이 도시하였다.

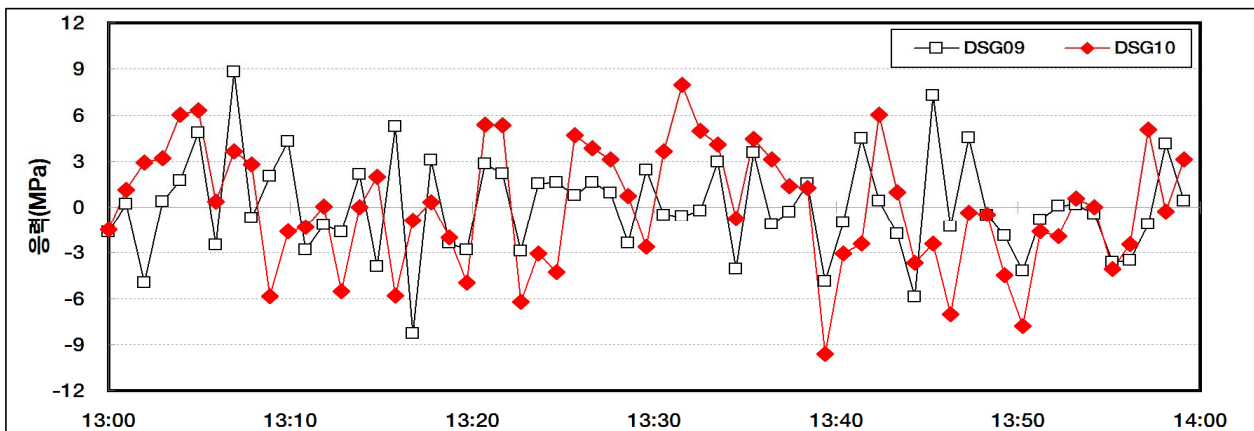


그림4.71 차량 통행으로 인한 PY2 주탑 연결부 서측 보강거더 응력 변화 이력

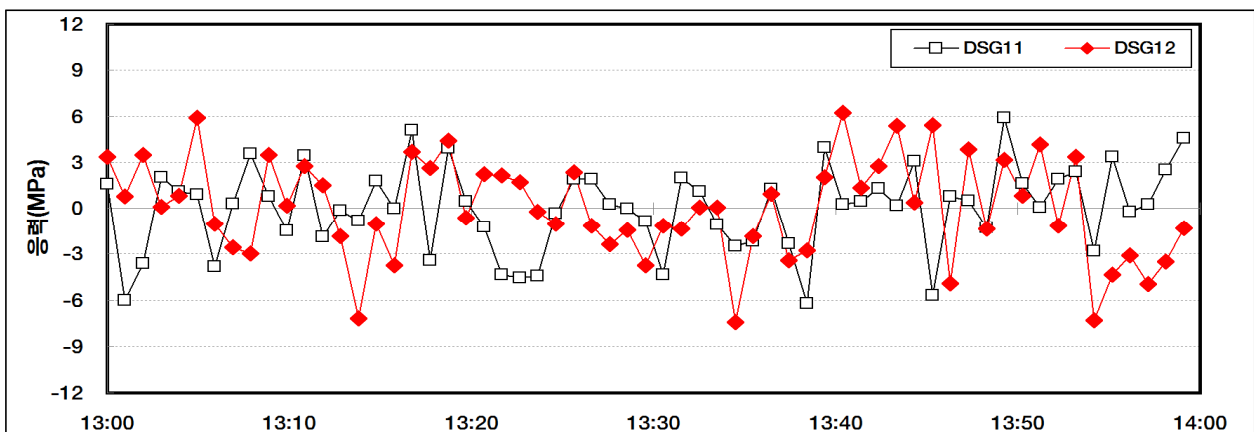


그림4.72 차량 통행으로 인한 PY2 주탑 연결부 동측 보강거더 응력 변화 이력

보강거더의 경우 구조상 상단에 압축응력이 발생하면 하단에는 인장 응력이 발생하며 상단에 인장 응력이 발생하면 하단에는 압축응력이 발생하여야 한다.

따라서 관측치 획득 시험 기간 내 차량 통행으로 인한 보강거더의 응력 변화를 살펴 보면 다소 다른 부분이 확인되었으나 하단에 인장 응력이 발생하면 상단에는 압축응력이 발생하였으며 하단에 압축응력이 발생하면 상단에는 인장 응력이 발생한 것으로 확인 되었다.

이는 차량 통행으로 인하여 보강거더의 하단과 상단에 발생하는 응력이 다르므로 인하여 위와 같은 응력 변화가 관찰된 것으로 판단된다.

### 4.3.7 타이다운로프, 행어로프 1축 가속도계

#### 가. 타이다운로프 1축 가속도계

타이다운로프는 주 케이블과 부탑을 연결함으로 주 케이블 변위를 제한하여 단부측 보강거더의 응력을 낮추고 더불어 링크슈에 걸리는 부반력을 감소시키는 데 목적이 있다.

따라서 타이다운로프의 장력을 감시하기 위하여 TD1과 TD2 동서측 타이다운로프에 1축 가속도계가 총 4개소 설치되어 있다.

타이다운로프는 위치별 총 3가닥으로 구성되어 중앙 로프에만 1축 가속도계를 설치 하였으며, 진동 가속도를 측정한 후 주파수 분석을 통하여 장력을 계산하는 간접법으로 계산하였다.

간접법으로 장력을 계산하는 데 필요한 타이다운로프의 제원 및 물성치를 정리하면 표4.19와 같다. 관측치 획득 시험 기간 내 장력 변화를 정리하면 표4.20과 같으며, 외부 하중에 의한 장력 변화를 확인하기 위하여 외부 하중 대비 타이다운로프 장력 변화를 도시하면 그림4.73과 같다.

표4.19 타이다운로프 제원 및 물성치

구분	무응력장 길이(m)	단위중량 (kgf/m)	단위중량 (kN/m)	설계장력 (kN)	로프 당 장력 (kN)
	중앙				
TD1~TD4	27.444	33.4	0.32732	2520.00	840

표4.20 타이다운로프 장력 변화

(단위:kN)

구분	TD1_W	TD1_E	TD2_W	TD2_E
최대	598.09	555.68	749.75	748.48
최소	562.54	488.06	683.85	696.68
평균	582.64	514.69	713.16	718.17

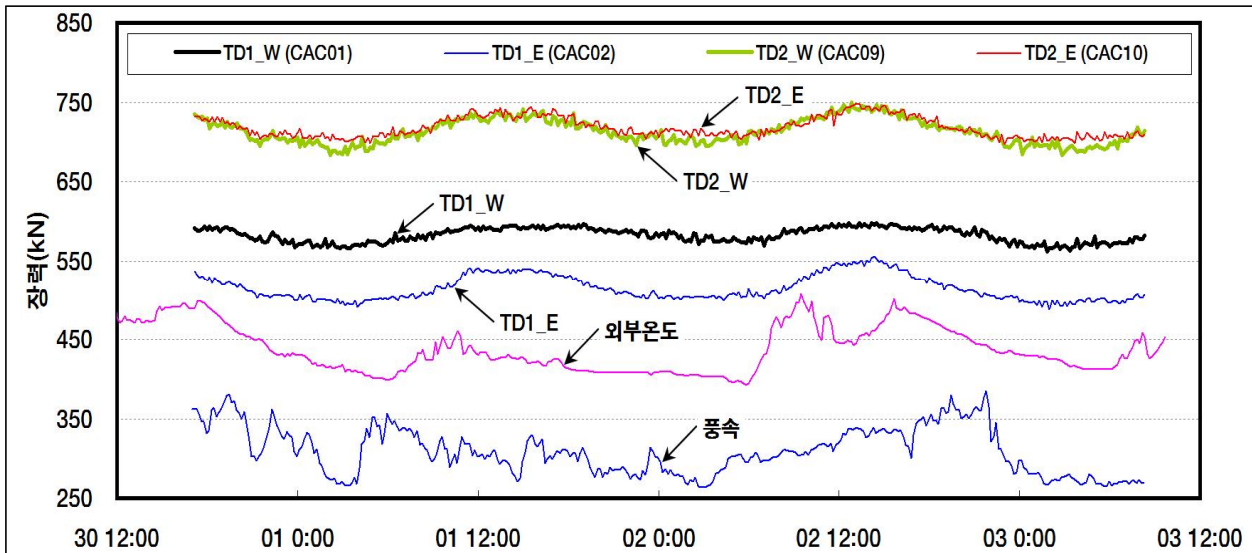


그림4.73 외부 하중 대비 타이다운로프 장력 변화 이력

관측치 획득 시험 기간 내 장력 변화를 확인한 결과, TD1 서측의 경우 598.09kN, 동측 555.68kN, TD2 서측 749.75kN, 동측 748.48kN의 최대 장력이 확인되었다.

A대교는 대칭 구조물로 타이다운로프에 동일한 장력이 발생하는 것이 타당하나 간접적인 방법을 통해 로프의 장력을 유추하므로 인해 다소 오차가 발생한 것으로 판단된다.

또한 설계장력 대비 최대 장력을 비교해보면 TD1 서측 241.91kN, 동측 284.32kN으로 확인되었으며, TD2 서측 90.25kN, 동측 91.52kN으로 계측되었다.

외부 하중에 의한 장력 변화를 살펴보면 온도변화와 유사한 거동을 하는 것으로 확인되었다. 이는 온도가 상승하면 측경간 주 케이블이 중앙경간 측으로 인장하면서 타이다운로프의 장력이 증가한 것으로 판단되며, 온도 하강 시에는 측경간 주 케이블이 압축하여 타이다운로프 장력이 감소한 것으로 판단된다.

또한 온도가 상승하는 시간대에는 차량 통행량의 증가로 인하여 더 큰 장력 증가가 발생한 것으로 판단되며, 온도가 하강하는 시간대에는 차량 통행량도 감소하면서 장력 또한 감소한 것으로 판단된다. 아울러 풍속은 장력 변화에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 확인되었다.

차량 통행으로 인한 타이다운로프의 장력 변화를 관찰하기 위하여 차량 통행이 잦은 오전에서 오후 시간과 차량 통행이 비교적 적은 저녁과 새벽 시간의 타이다운로프의 장력 변화를 그림 4.74와 같이 도시하였다.

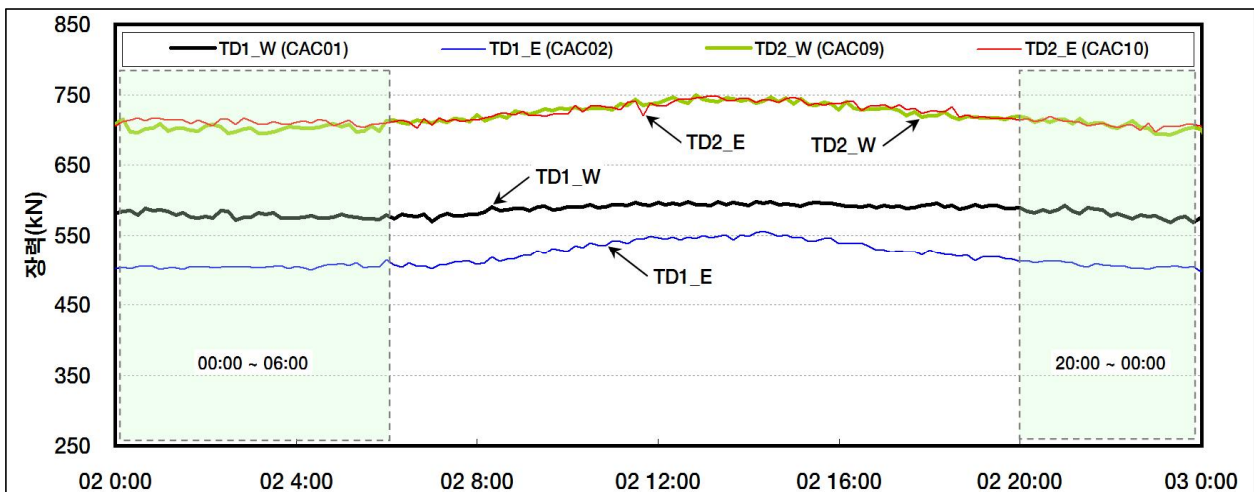


그림4.74 시간별 타이다운로프 장력 변화 이력

차량 통행으로 인한 타이다운로프 장력 변화를 확인한 결과, 위에 기술한 바와 같이 온도변화와 차량 통행량의 변화로 인하여 장력 변화가 확인되었다. 차량 통행이 증가하는 시간과 온도가 상승하는 시간이 맞물려 장력 증가가 크게 발생하였으며, 차량 통행이 감소하는 시간과 온도가 하강하는 시간이 맞물려 장력 감소가 발생하였다.

#### 나. 측경간 행어로프 1축 가속도계

행어로프는 보강거더로 전달되는 하중을 주 케이블로 연결해 주는 역할로 보강거더에 재하되는 하중에 의하여 인장력이 발생하게 된다.

따라서 행어로프의 장력을 감시하기 위하여 PY1 측경간 행어로프 7번, 10번, 13번 동측에 3개소, PY2 측경간 행어로프 80번, 83번, 86번 서측에 3개소, 총 6개소의 1축 가속도계가 설치되어 있다. 행어로프는 진동 가속도를 계측한 후 주파수 분석을 통하여 장력을 계산하는 간접법으로 계산하였다.

간접법으로 장력을 계산하는 데 필요한 행어로프의 제원 및 물성치를 정리하면 표 4.21과 같다. 관측치 획득 시험 기간 내 장력 변화를 정리하면 표4.22와 같으며, 외부 하중에 의한 장력 변화를 확인하기 위하여 외부 하중 대비 장력 변화를 그림4.75 ~ 그림4.77과 같이 도시하였으며, 대칭되는 행어로프의 장력도 도시하였다.

표4.21 행어로프 제원 및 물성치

구분	무응력장 길이(m)	단위중량 (kgf/m)	단위중량 (kN/m)	설계장력 (kN)	로프 당 장력 (kN)
	긴 로프				
H 7_E	95.937	26.00	0.2548	1670.40	835.20
H10_E	131.156	26.00	0.2548	1713.20	856.60
H13_E	169.613	26.00	0.2548	1766.20	883.10
H80_W	169.329	26.00	0.2548	1767.80	883.90
H83_W	130.351	26.00	0.2548	1712.60	856.30
H86_W	94.611	26.00	0.2548	1668.40	834.20

표4.22 행어로프 장력 변화

(단위:kN)

구분	H7_E	H10_E	H13_E	H80_W	H83_W	H86_W
최대	809.24	820.74	892.47	890.90	798.18	728.87
최소	674.39	761.40	722.55	838.87	735.58	706.19
평균	756.06	790.93	808.98	863.91	773.33	719.72

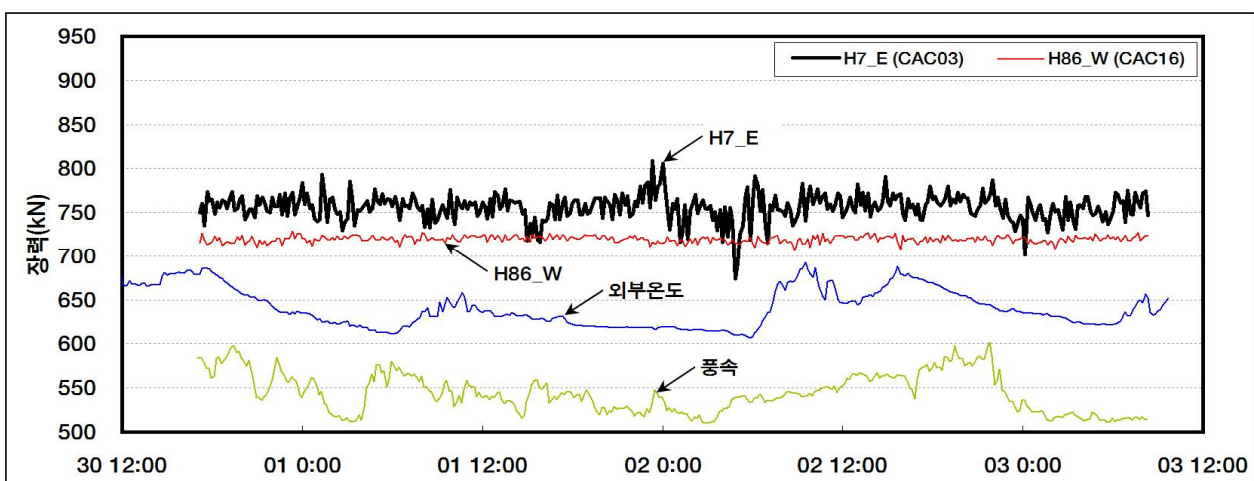


그림4.75 외부하중 대비 측정간 행어로프 장력 변화 이력(최외측 행어로프)

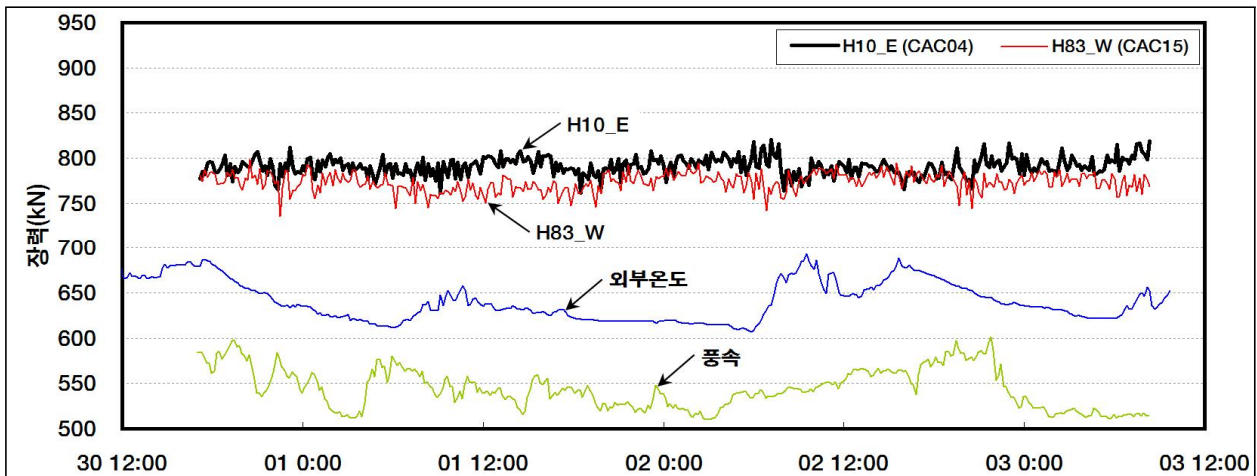


그림4.76 외부하중 대비 측경간 행어로프 장력 변화 이력(중앙측 행어로프)

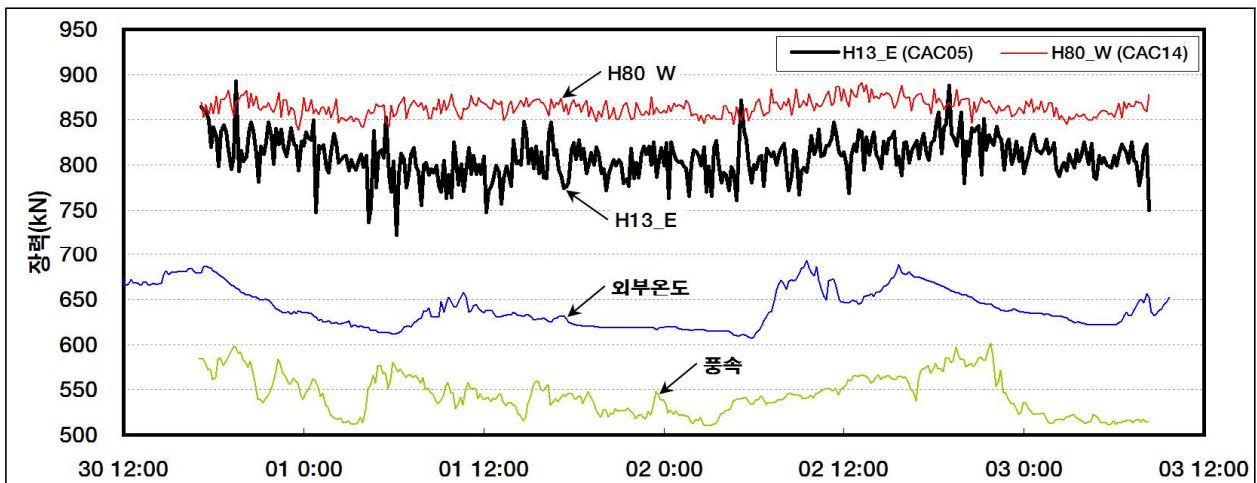


그림4.77 외부하중 대비 측경간 행어로프 장력 변화 이력(주탑측 행어로프)

관측치 획득 시험 기간 내 최대 장력 변화를 살펴보면 H7번의 경우 809.24kN, H10번의 경우 820.74kN, H13번의 경우 892.47kN, H80번의 경우 890.90kN, H83번의 경우 798.18kN, H86번의 경우 728.87kN의 최대 장력이 확인되었다.

또한 설계장력 대비 최대 장력과의 오차를 확인해보면 H7번에서 3.1%, H10번에서 4.2%, H13번에서 1.1%, H80번의 경우 0.8%, H83번의 경우 6.8%, H86번의 경우 12.6%의 오차가 확인되었다.

이상과 같이 오차가 발생하는 것은 간접적인 방법을 통해 로프의 장력을 유추하므로 인해 다소 오차가 발생한 것으로 판단된다. 또한 A대교의 경우 대칭 구조물로 제작되어 대칭되는 부분의 로프에는 같은 장력이 발생하는 것이 타당하다.

따라서 대칭되는 부분의 행어로프 간의 평균 장력 차를 확인하면, 최외측 행어로프의 경우 36.34kN의 차가 확인되었으며, 중앙측 행어로프의 경우 17.60kN, 주탑측 행어로프의 경우 54.93kN의 차가 확인되었다. 최대 차의 경우 계측 장력의 6.4%에 해당하는 장력으로 대칭되는 행어로프 간의 차는 크지 않은 것으로 판단된다.

외부 하중에 의한 장력 변화를 살펴보면 온도변화에 의한 장력 변화는 미미한 것으로 판단되며, 풍속으로 인한 장력 변화를 살펴보면 14m/s 이상의 강한 바람이 약 5차례 확인되었는데 동일 시간대를 살펴보면 장력 변화가 발생한 것으로 확인되었다.

차량 통행으로 인한 장력 변화를 관찰하기 위하여 차량 통행이 잦은 오전, 오후 시간과 차량 통행이 비교적 적은 저녁과 새벽 시간의 행어로프의 장력 변화를 그림4.78에서 그림4.80까지 도시하였다.

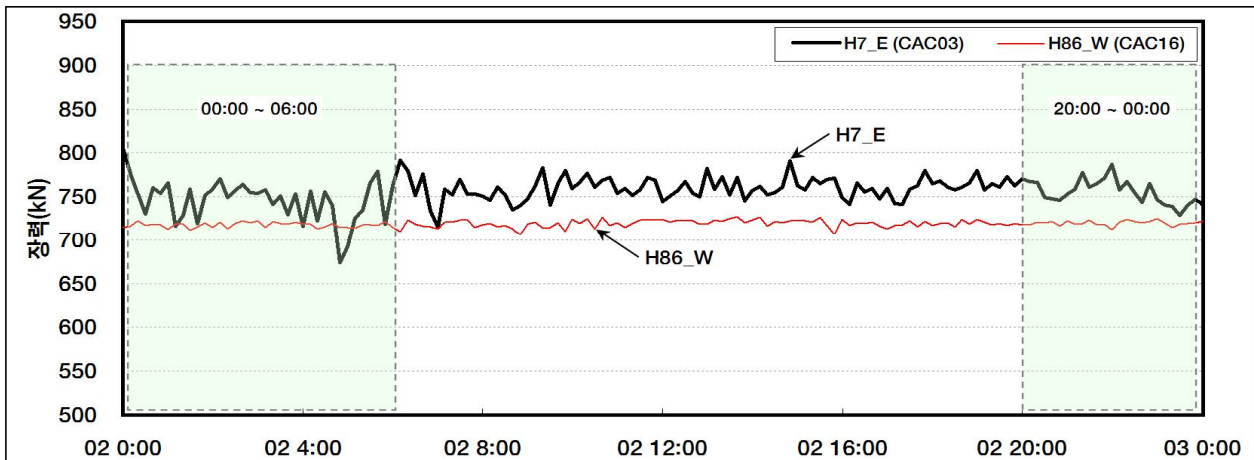


그림4.78 시간별 측경간 행어로프 장력 변화 이력(최외측 행어로프)

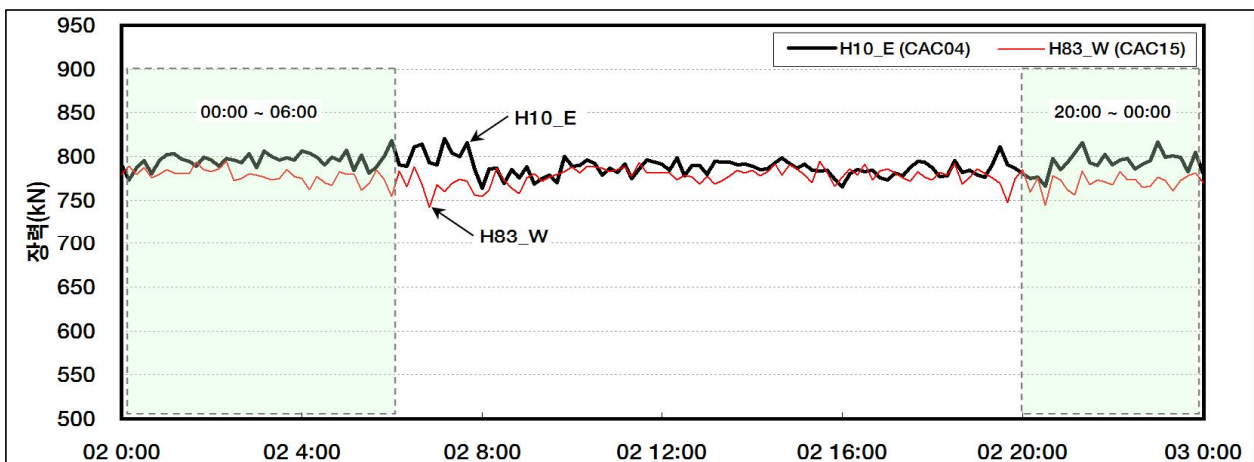


그림4.79 시간별 측경간 행어로프 장력 변화 이력(중앙측 행어로프)



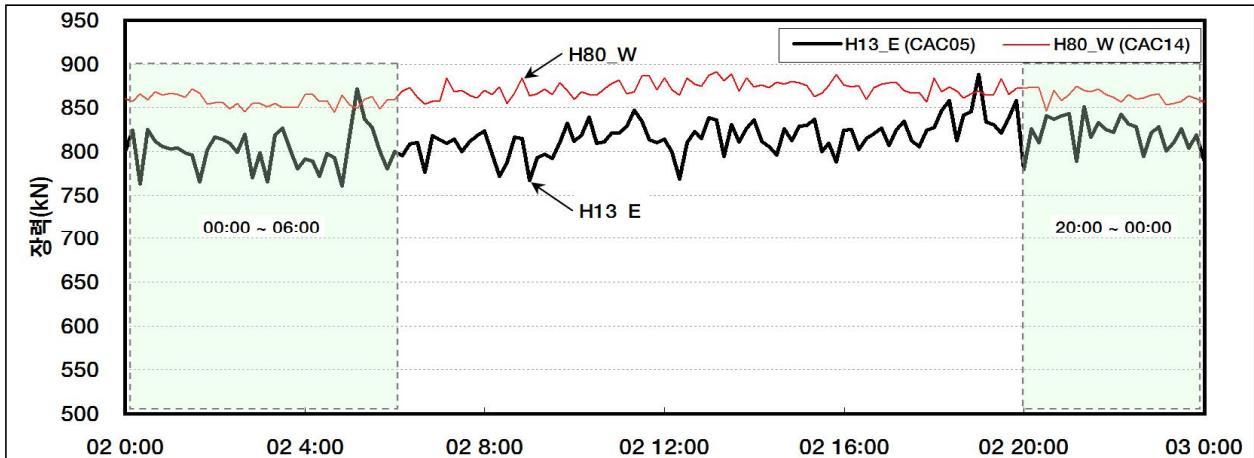


그림4.80 시간별 측경간 행어로프 장력 변화 이력(주탑측 행어로프)

차량 통행으로 인한 행어로프의 장력 변화는 미미한 것으로 확인되었다.

이는 차량 하중이 정지된 상태가 아니라 이동 중으로 인하여 활하중에 의한 장력 변화는 미미한 것으로 사료된다.

#### 다. 중앙경간 행어로프 1축 가속도계

행어로프는 보강거더로 전달되는 하중을 주 케이블로 연결해 주는 역할로 보강거더에 재하되는 하중에 의하여 인장력이 발생하게 된다.

따라서 행어로프의 장력을 감시하기 위하여 중앙경간 동측 행어로프 16번, 19번, 22번에 3개소, 서측 행어로프 71번, 74번, 77번에 3개소, 총 6개소의 1축 가속도계가 설치되어 있다.

행어로프는 위치별 총 2가닥으로 구성되어 긴 로프에만 1축 가속도계가 설치되었고, 진동 가속도를 측정한 후 주파수 분석을 통하여 장력을 계산하는 간접법으로 계산하였다.

간접법으로 장력을 계산하는 데 필요한 행어로프의 제원 및 물성치를 정리하면 표 4.23과 같다.

관측치 획득 시험 기간 내 장력 변화를 정리하면 표 4.24와 같으며, 외부 하중에 의한 장력 변화를 확인하기 위하여 외부 하중 대비 장력 변화를 그림 4.81에서 그림 4.83까지 도시하였으며, 대칭되는 행어로프의 장력도 도시하였다.

표4.23 행어로프 제원 및 물성치

구분	무응력장 길이(m)	단위중량 (kgf/m)	단위중량 (kN/m)	설계장력 (kN)	로프 당 장력 (kN)
	긴 로프				
H16_E	173.296	26.00	0.2548	1776.50	888.25
H19_E	141.445	26.00	0.2548	1718.00	859.00
H22_E	112.712	26.00	0.2548	1670.00	835.00
H71_W	112.712	26.00	0.2548	1670.00	835.00
H74_W	141.432	26.00	0.2548	1718.00	859.00
H77_W	173.296	26.00	0.2548	1776.60	888.30

표4.24 행어로프 장력 변화

(단위 : kN)

구분	H16_E	H19_E	H22_E	H71_W	H74_W	H77_W
최대	910.78	810.24	739.26	817.72	833.97	894.93
최소	836.32	766.45	697.43	716.37	794.36	747.57
평균	871.08	793.90	716.18	778.20	815.87	812.84

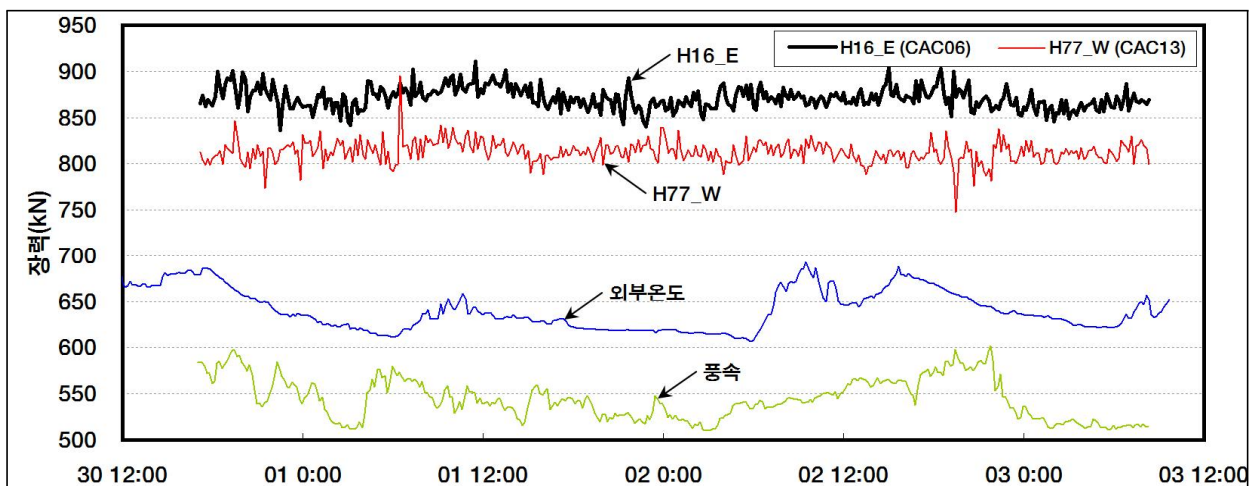


그림4.81 외부 하중 대비 중앙경간 행어로프 장력 변화 이력(주탑측 행어로프)

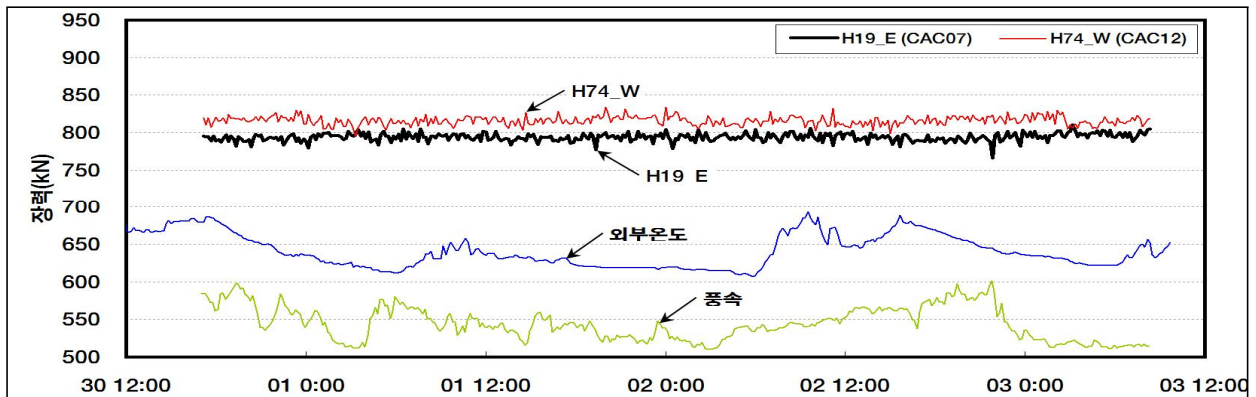


그림4.82 외부 하중 대비 중앙경간 행어로프 장력 변화 이력(중앙측 행어로프)

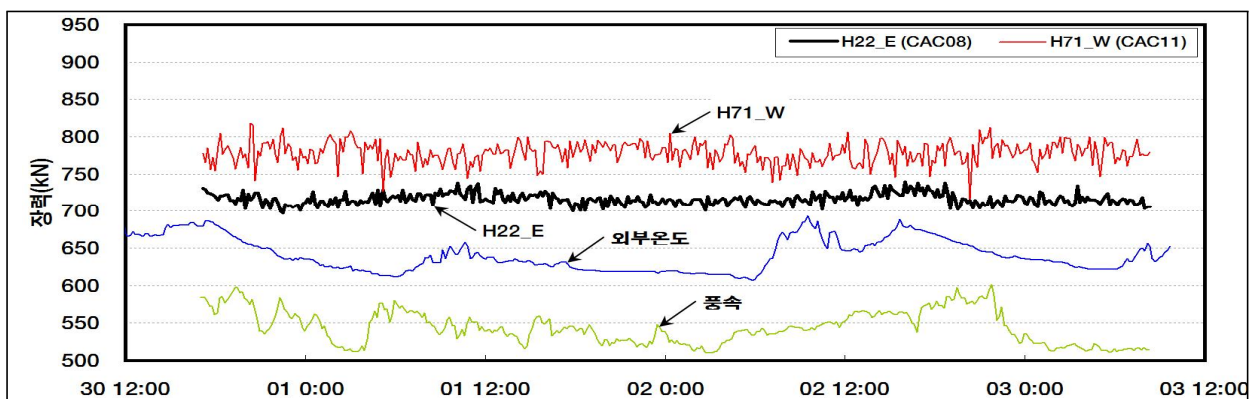


그림4.83 외부 하중 대비 중앙경간 행어로프 장력 변화 이력(중앙경간측 행어로프)

관측치 획득 시험 기간 내 최대 장력 변화를 살펴보면 H16번의 경우 910.78kN, H19번의 경우 810.24kN, H22번의 경우 739.26kN, H71번의 경우 817.72kN, H74번의 경우 833.97kN, H77번의 경우 894.93kN의 최대 장력이 확인되었다.

또한 설계장력 대비 최대 장력과의 오차를 확인해보면 H16번에서 2.5%, H19번에서 5.7%, H22번에서 11.5%, H71번의 경우 2.1%, H74번의 경우 2.9%, H77번의 경우 0.8%의 오차가 확인되었다. 이상과 같이 오차가 발생하는 것은 간접적인 방법을 통해 로프의 장력을 유추하므로 인해 다소 오차가 발생한 것으로 판단된다.

또한 A대교의 경우 대칭 구조물로 제작되어 대칭되는 부분의 로프에는 동일한 장력이 발생하는 것이 타당하다.

따라서 대칭되는 부분의 행어로프 간의 평균 장력 차를 확인해 보면, 주탑측 행어로프의 경우 58.24kN의 차가 확인되었으며, 중앙측 행어로프의 경우 21.97kN, 중앙경간측 행어로프의 경우 62.02kN의 차가 확인되었다. 최대 차의 경우 계측 장력의 7.4%에 해당하는 장력으로 대칭되는 행어로프 간의 차는 크지 않은 것으로 판단된다.

외부 하중에 의한 장력 변화를 살펴보면 온도변화에 의한 장력 변화는 미미한 것으로 판단되며, 풍속으로 인한 장력 변화를 살펴보면 14m/s 이상의 강한 바람이 약 5차례 확인되었는데 동일 시간대를 살펴보면 장력 변화가 발생한 것으로 확인되었다.

차량 통행이 잦은 오전, 오후 시간과 차량 통행이 비교적 적은 저녁과 새벽 시간의 행어로프의 장력 변화를 그림4.84에서 그림4.86까지와 같이 도시하였다.

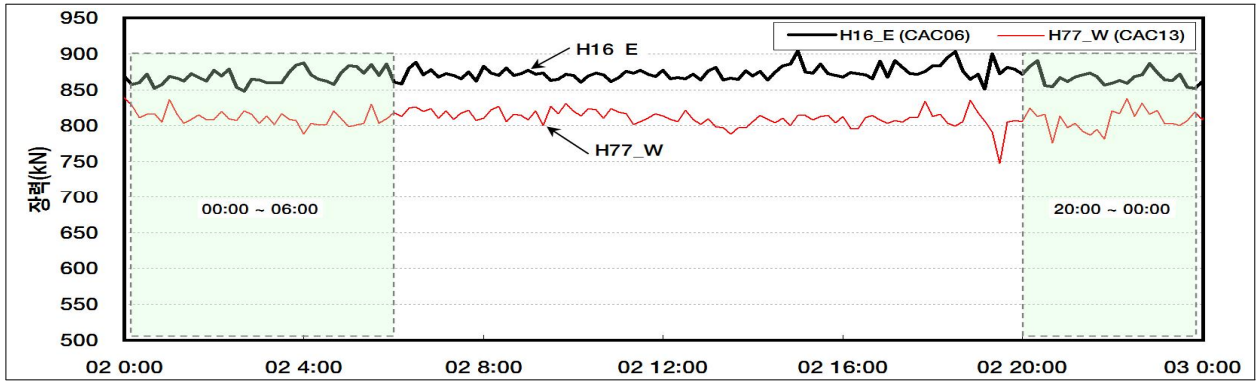


그림4.84 시간별 중앙경간 행어로프 장력 변화 이력(주탑측 행어로프)

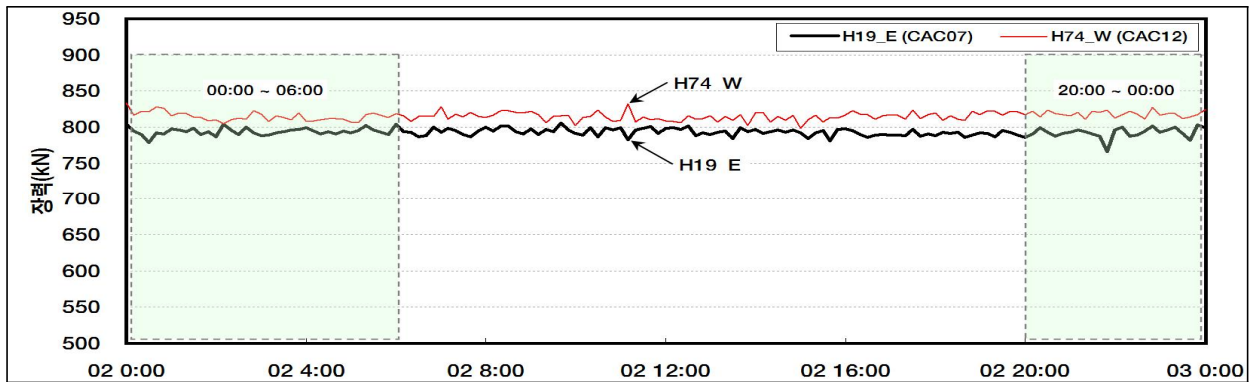


그림4.85 시간별 중앙경간 행어로프 장력 변화 이력(중앙측 행어로프)

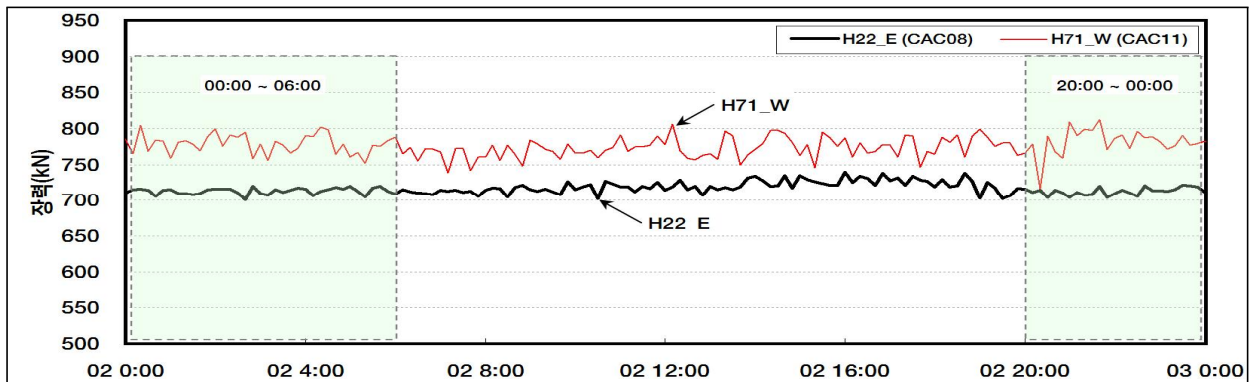


그림4.86 시간별 중앙경간 행어로프 장력 변화 이력(중앙경간측 행어로프)

### 라. 자유진동 시 타이다운로프, 행어로프 장력

기록된 차량 운행 정보를 바탕으로 차량 운행이 적은 새벽 시간 중 최대한 자유진동과 유사한 구간대의 데이터를 선정하여 주파수 분석을 그림4.87에서 그림4.102까지와 같이 실시하였으며, 이를 정리하면 표4.25에서 표4.40까지와 같다. 또한 자유진동 시 타이다운로프와 행어로프 장력을 정리하면 표 4.41과 같다.

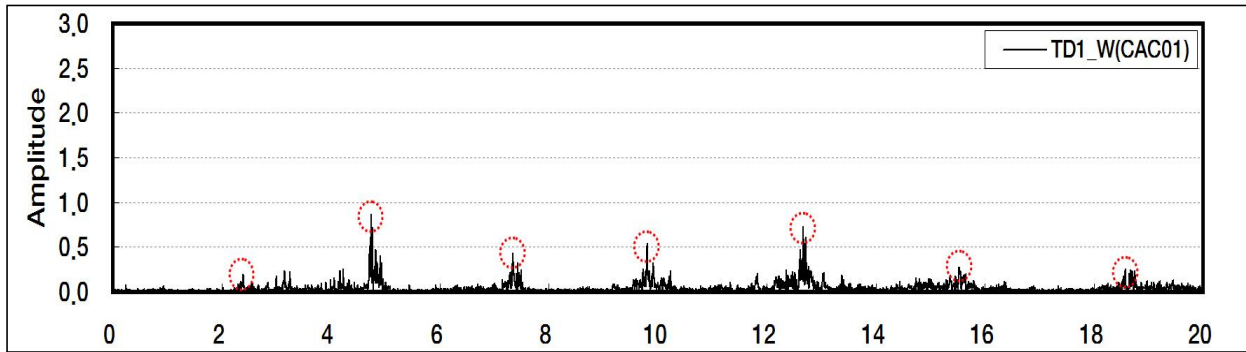


그림4.87 타이다운로프 1번 서측 주파수 분석

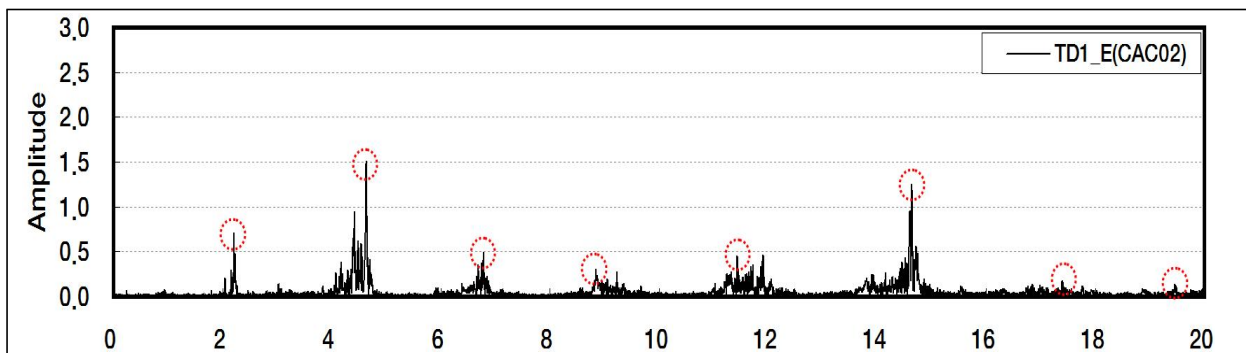


그림4.88 타이다운로프 1번 동측 주파수 분석

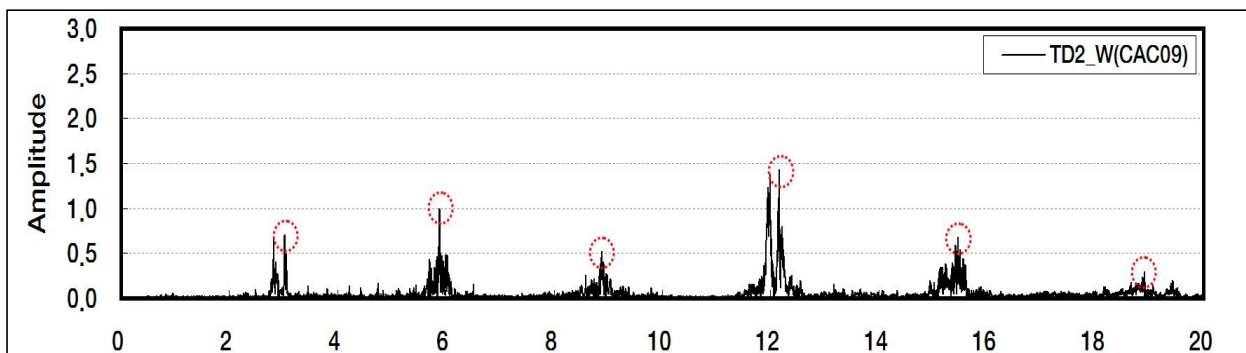


그림4.89 타이다운로프 2번 서측 주파수 분석

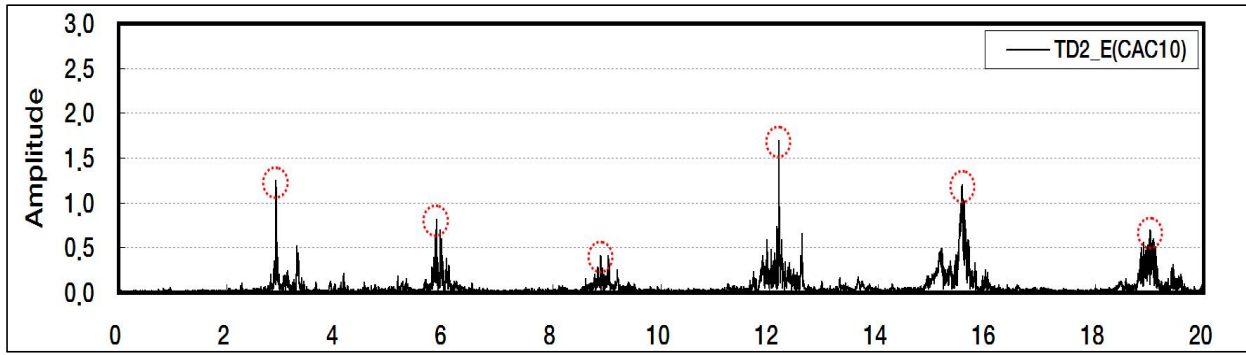


그림4.90 타이다운로프 2번 동측 주파수 분석

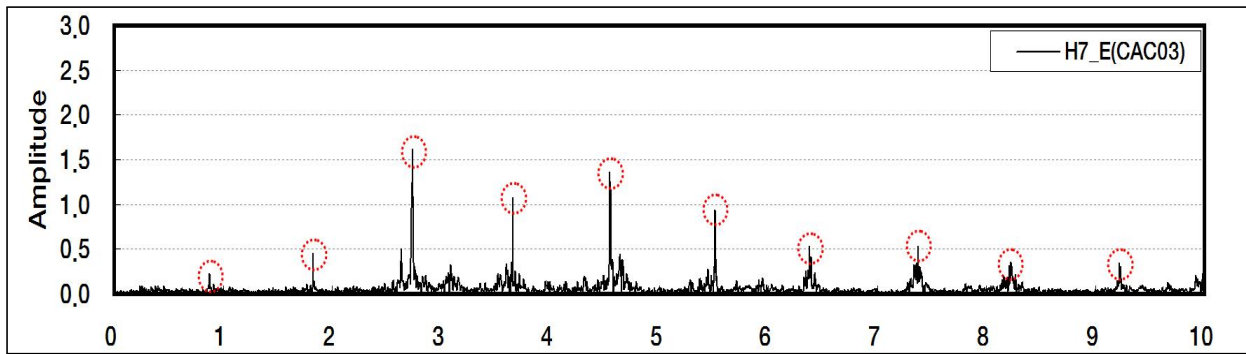


그림4.91 행어로프 7번 동측 주파수 분석

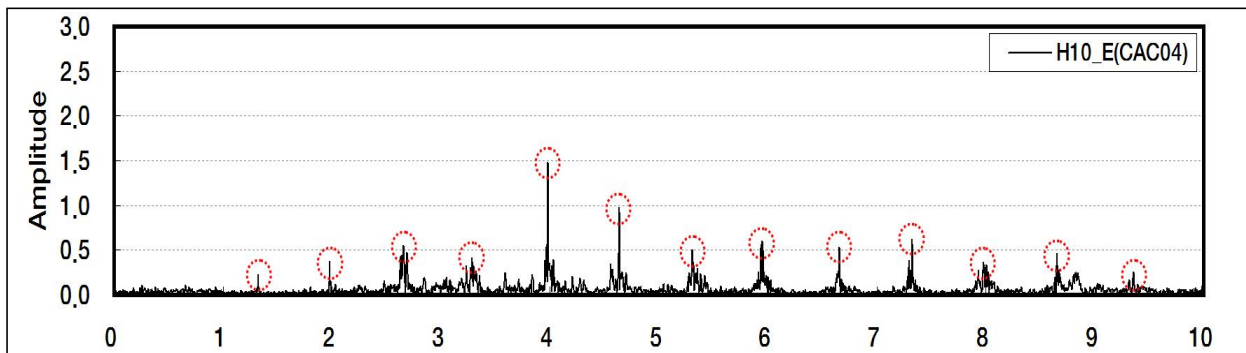


그림4.92 행어로프 10번 동측 주파수 분석

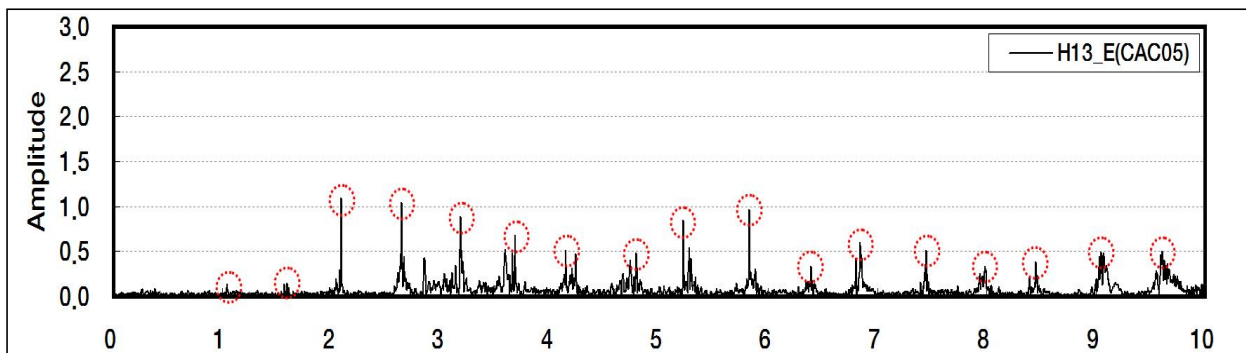


그림4.93 행어로프 13번 동측 주파수 분석

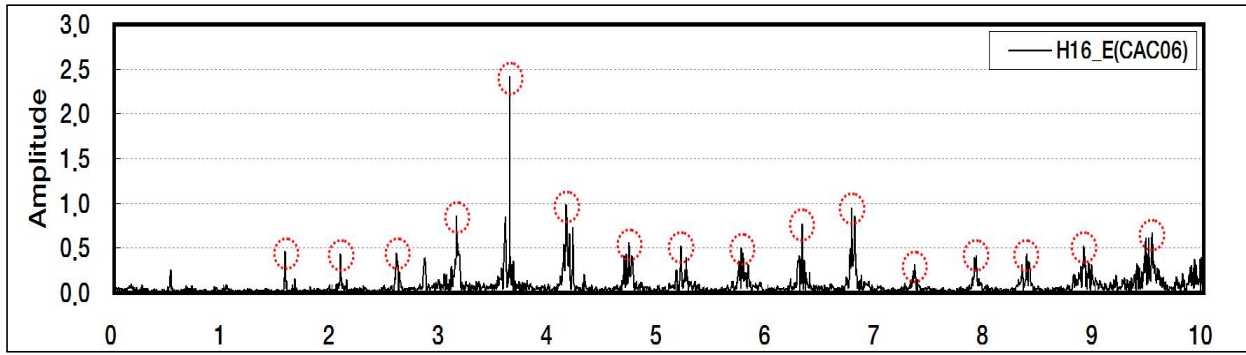


그림4.94 행어로프 16번 동측 주파수 분석

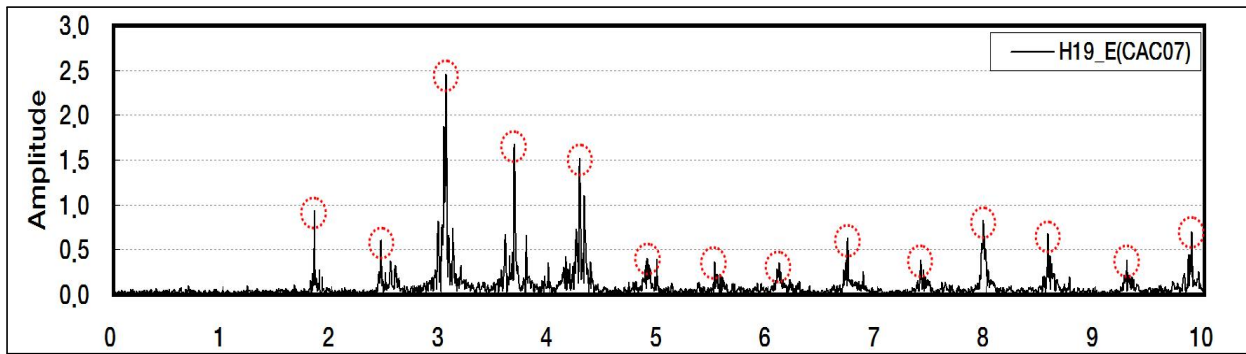


그림4.95 행어로프 19번 동측 주파수 분석

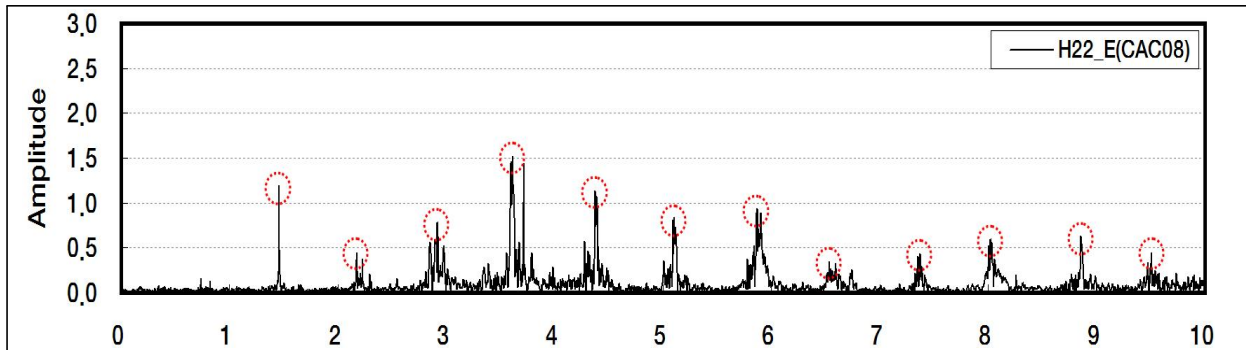


그림4.96 행어로프 22번 동측 주파수 분석

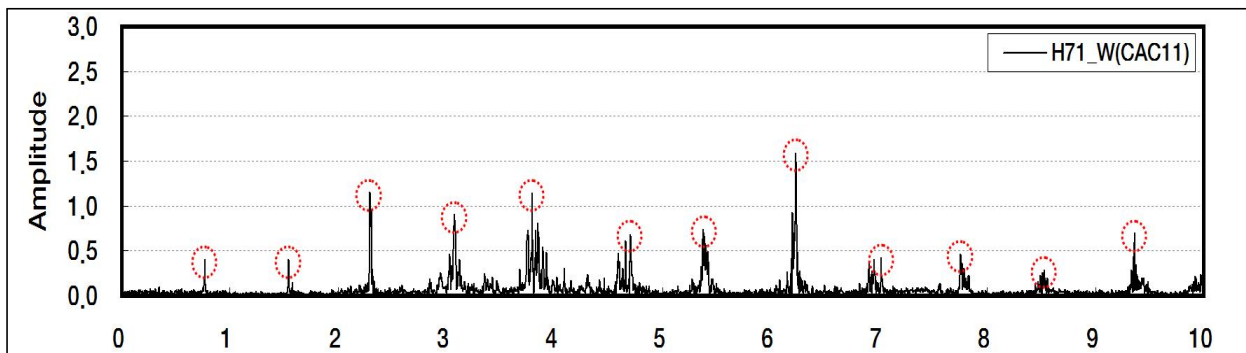


그림4.97 행어로프 71번 서측 주파수 분석

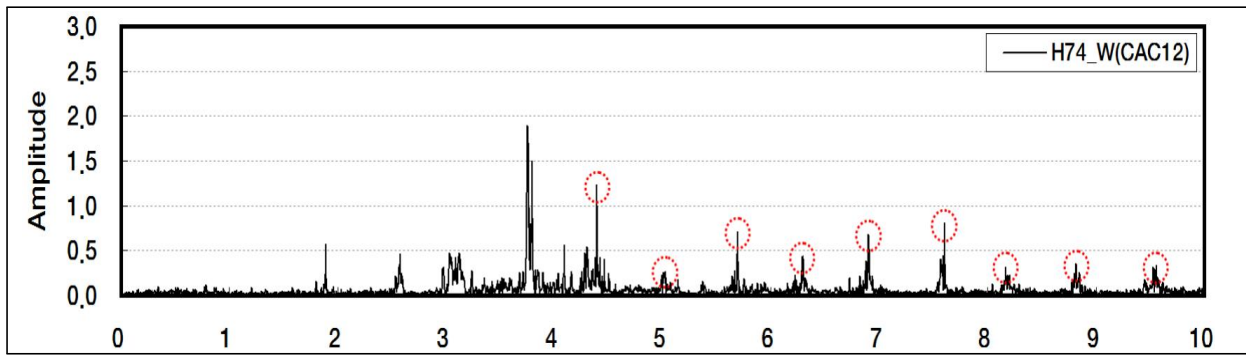


그림4.98 행어로프 74번 서측 주파수 분석

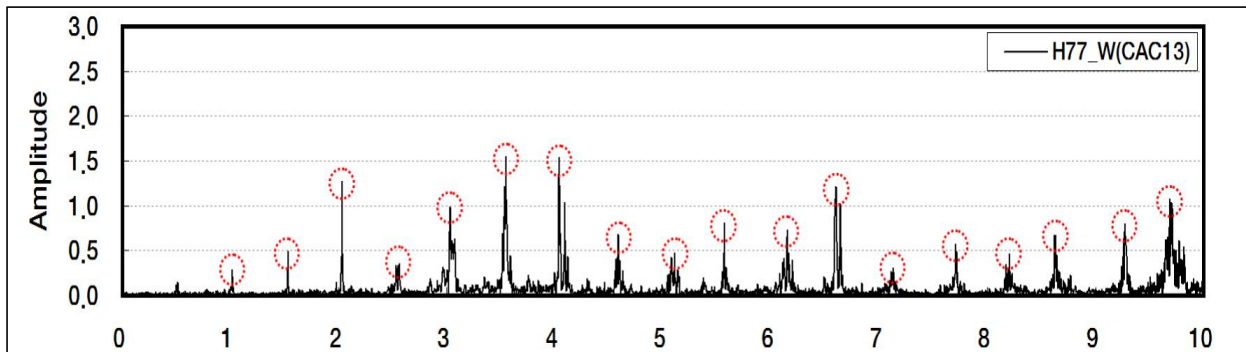


그림4.99 행어로프 77번 서측 주파수 분석

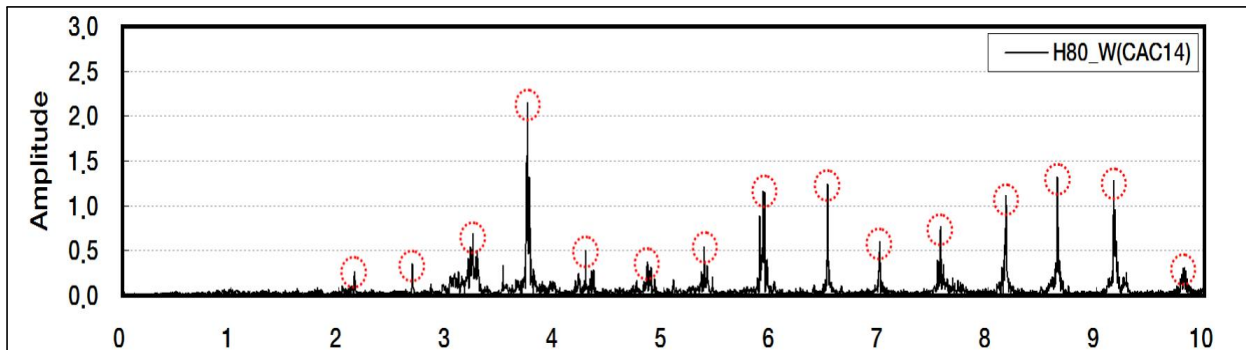


그림4.100 행어로프 80번 서측 주파수 분석

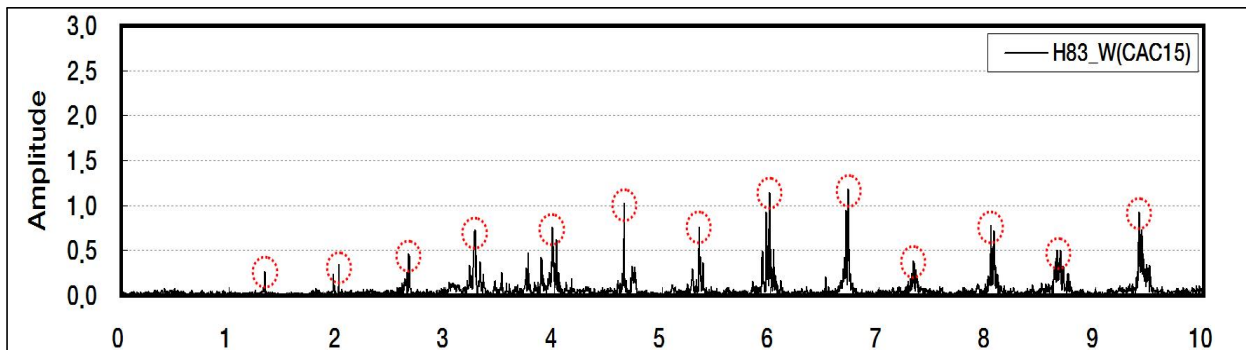


그림4.101 행어로프 83번 서측 주파수 분석



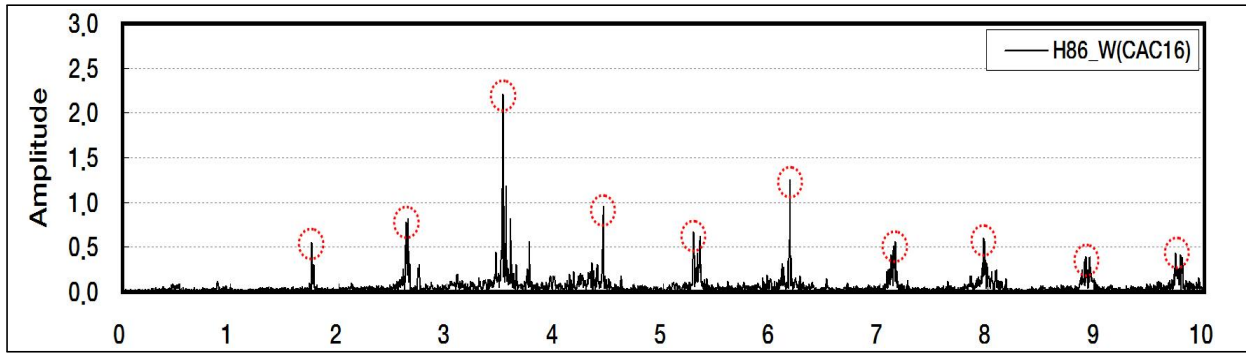


그림4.102 행어로프 86번 서측 주파수 분석

표4.25 자유진동 시 타이다운로프 1번 서측 장력

로프 번호	TD1_W			a	b
w (kN/m)	0.32732	유효길이(m)	27.423		
n	f	n <sup>2</sup>	(f/n) <sup>2</sup>	0.02960	5.63411
1	2.40	1	5.76000		
2	4.74	4	5.61690		
3	7.34	9	5.98618		
4	9.81	16	6.01476		
5	12.67	25	6.42116		
장력(kN)	565.46				

표4.26 자유진동 시 타이다운로프 1번 동측 장력

로프 번호	TD1_E			a	b
w (kN/m)	0.32732	유효길이(m)	27.423		
n	f	n <sup>2</sup>	(f/n) <sup>2</sup>	-0.00107	5.09561
1	2.210	1	4.88410		
2	4.640	4	5.38240		
3	6.790	9	5.12268		
4	8.850	16	4.89516		
5	11.330	25	5.13476		
장력(kN)	511.43				

표4.27 자유진동 시 타이다운로프 2번 서측 장력

로프 번호	TD2_W			<i>a</i>	<i>b</i>	
<i>w</i> (kN/m)	0.32732	유효길이(m)	24.873			
<i>n</i>	<i>f</i>	<i>n</i> <sup>2</sup>	$(f/n)^2$			
1	3.030	1	9.18090	0.02723	8.78645	
2	5.890	4	8.67303			
3	8.880	9	8.76160			
4	12.160	16	9.24160			
5	15.470	25	9.57284			
장력(kN)	725.49					

표4.28 자유진동 시 타이다운로프 2번 동측 장력

로프 번호	TD2_E			<i>a</i>	<i>b</i>	
<i>w</i> (kN/m)	0.32732	유효길이(m)	24.873			
<i>n</i>	<i>f</i>	<i>n</i> <sup>2</sup>	$(f/n)^2$			
1	2.9	1	8.41000	0.05202	8.42762	
2	5.86	4	8.58490			
3	9.03	9	9.06010			
4	12.18	16	9.27203			
5	15.55	25	9.67210			
장력(kN)	695.86					

표4.29 자유진동 시 행어로프 7번 동측 장력

로프 번호	H7_E			<i>a</i>	<i>b</i>	
<i>w</i> (kN/m)	0.25480	유효길이(m)	95.937			
<i>n</i>	<i>f</i>	<i>n</i> <sup>2</sup>	$(f/n)^2$			
1	0.880	1	0.77440	0.00139	0.80439	
2	1.820	4	0.82810			
3	2.740	9	0.83418			
4	3.660	16	0.83723			
5	4.540	25	0.82446			
장력(kN)	769.18					

표4.30 자유진동 시 행어로프 10번 동측 장력

로프 번호	H10_E			a	b
w (kN/m)	0.25480	유효길이(m)	131.156		
n	f	n <sup>2</sup>	(f/n) <sup>2</sup>		
2	1.320	4	0.43560	0.00004	0.43595
3	1.980	9	0.43560		
4	2.660	16	0.44223		
5	3.280	25	0.43034		
6	3.980	36	0.44001		
장력(kN)	779.11				

표4.31 자유진동 시 행어로프 13번 동측 장력

로프 번호	H13_E			a	b
w (kN/m)	0.25480	유효길이(m)	169.613		
n	f	n <sup>2</sup>	(f/n) <sup>2</sup>		
2	1.040	4	0.27040	0.00023	0.27273
3	1.590	9	0.28090		
4	2.090	16	0.27301		
5	2.640	25	0.27878		
6	3.180	36	0.28090		
장력(kN)	815.14				

표4.32 자유진동 시 행어로프 16번 동측 장력

로프 번호	H16_E			a	b
w (kN/m)	0.25480	유효길이(m)	173.296		
n	f	n <sup>2</sup>	(f/n) <sup>2</sup>		
3	1.570	9	0.27388	-0.00006	0.27267
4	2.080	16	0.27040		
5	2.590	25	0.26832		
6	3.140	36	0.27388		
7	3.630	49	0.26892		
장력(kN)	850.76				

표4.33 자유진동 시 행어로프 19번 동측 장력

로프 번호	H19_E			<i>a</i>	<i>b</i>
<i>w</i> (kN/m)	0.25480	유효길이(m)	141.445		
<i>n</i>	<i>f</i>	<i>n</i> <sup>2</sup>	( <i>f/n</i> ) <sup>2</sup>		
3	1.840	9	0.37618	-0.00003	0.37554
4	2.450	16	0.37516		
5	3.050	25	0.37210		
6	3.680	36	0.37618		
7	4.280	49	0.37384		
장력(kN)	780.59				

표4.34 자유진동 시 행어로프 22번 동측 장력

로프 번호	H22_E			<i>a</i>	<i>b</i>
<i>w</i> (kN/m)	0.25480	유효길이(m)	112.712		
<i>n</i>	<i>f</i>	<i>n</i> <sup>2</sup>	( <i>f/n</i> ) <sup>2</sup>		
2	1.460	4	0.53290	-0.00012	0.53136
3	2.180	9	0.52804		
4	2.920	16	0.53290		
5	3.610	25	0.52128		
6	4.370	36	0.53047		
장력(kN)	701.32				

표4.35 자유진동 시 행어로프 71번 서측 장력

로프 번호	H71_W			<i>a</i>	<i>b</i>
<i>w</i> (kN/m)	0.25480	유효길이(m)	112.712		
<i>n</i>	<i>f</i>	<i>n</i> <sup>2</sup>	( <i>f/n</i> ) <sup>2</sup>		
1	0.770	1	0.59290	-0.00063	0.59414
2	1.540	4	0.59290		
3	2.290	9	0.58268		
4	3.080	16	0.59290		
5	3.790	25	0.57456		
장력(kN)	784.18				

표4.36 자유진동 시 행어로프 74번 서측 장력

로프 번호	H74_W			<i>a</i>	<i>b</i>
<i>w</i> (kN/m)	0.25480	유효길이(m)	141.432		
<i>n</i>	<i>f</i>	$n^2$	$(f/n)^2$		
7	4.390	49	0.39331	0.00001	0.39455
8	5.020	64	0.39376		
9	5.690	81	0.39970		
10	6.290	100	0.39564		
11	6.900	121	0.39347		
장력(kN)	819.95				

표4.37 자유진동 시 행어로프 77번 서측 장력

로프 번호	H77_W			<i>a</i>	<i>b</i>
<i>w</i> (kN/m)	0.25480	유효길이(m)	173.296		
<i>n</i>	<i>f</i>	$n^2$	$(f/n)^2$		
2	1.020	4	0.26010	-0.00011	0.26097
3	1.530	9	0.26010		
4	2.030	16	0.25756		
5	2.560	25	0.26214		
6	3.030	36	0.25503		
장력(kN)	814.24				

표4.38 자유진동 시 행어로프 80번 서측 장력

로프 번호	H80_W			<i>a</i>	<i>b</i>
<i>w</i> (kN/m)	0.25480	유효길이(m)	169.329		
<i>n</i>	<i>f</i>	$n^2$	$(f/n)^2$		
4	2.150	16	0.28891	-0.00006	0.29030
5	2.680	25	0.28730		
6	3.240	36	0.29160		
7	3.740	49	0.28546		
8	4.280	64	0.28623		
장력(kN)	864.78				

표4.39 자유진동 시 행어로프 83번 서측 장력

로프 번호	H83_W			a	b
w (kN/m)	0.25480	유효길이(m)	130.351		
n	f	n <sup>2</sup>	(f/n) <sup>2</sup>	-0.00025	0.44511
2	1.330	4	0.44223		
3	2.010	9	0.44890		
4	2.660	16	0.44223		
5	3.270	25	0.42772		
6	3.990	36	0.44223		
장력(kN)	785.75				

표4.40 자유진동 시 행어로프 86번 서측 장력

로프 번호	H86_W			a	b
w (kN/m)	0.25480	유효길이(m)	94.611		
n	f	n <sup>2</sup>	(f/n) <sup>2</sup>	0.00038	0.76939
2	1.750	4	0.76563		
3	2.640	9	0.77440		
4	3.520	16	0.77440		
5	4.450	25	0.79210		
6	5.280	36	0.77440		
장력(kN)	715.52				

표4.41 자유진동 시 타이다운로프, 행어로프 장력 정리

구분	설계장력(kN)	자유진동 시 장력(kN)	장력 오차(%)
TD1_W	840.00	565.46	32.68%
TD1_E	840.00	511.43	39.12%
H7_E	835.20	769.18	7.90%
H10_E	856.60	779.11	9.05%

표4.41 자유진동 시 타이다운로프, 행어로프 장력 정리 (계속)

구분	설계장력(kN)	자유진동 시 장력(kN)	장력 오차(%)
H13_E	883.10	815.14	7.70%
H16_E	888.25	850.76	4.22%
H19_E	859.00	780.59	9.13%
H22_E	835.00	701.32	16.01%
TD2_W	840.00	725.49	13.63%
TD2_E	840.00	695.86	17.16%
H71_W	835.00	784.18	6.09%
H74_W	859.00	819.95	4.55%
H77_W	888.30	814.24	8.34%
H80_W	883.90	864.78	2.16%
H83_W	856.30	785.75	8.24%
H86_W	834.20	715.52	14.23%

### 4.3.8 앵커리지 스트랜드 정적 변형률계

#### 가. AN1 스트랜드 정적 변형률계

앵커리지는 현수교에서 상부구조 하중을 지지 지반에 안전하게 전달하는 구조로 하중 증가 및 온도변화에 따른 스트랜드의 장기적인 장력 변화 및 거동을 감시하기 위하여 AN1 5번, 17번, 29번 스트랜드 하부와 상부에 정적 변형률계가 총 12개소 설치되어 있다.

계측 방법은 스트랜드 로드에서 인장 응력이 발생하면 (+)값, 압축응력이 발생하면 (-)값이 표출되도록 설치되었다.

관측치 획득 시험 기간 내 스트랜드의 장력 변화를 정리하면 표4.42와 표4.43과 같으며, 장력 변화에 가장 큰 영향을 미치는 외부 하중에 의한 스트랜드의 거동을 확인하기 위하여 그림4.103에서 그림4.105까지와 같이 도시하였다.

표4.42 AN1 서측 스트랜드 장력 변화 (단위 : kN)

구분	5번 하부	5번 상부	17번 하부	17번 상부	29번 하부	29번 상부
최대	136.51	87.97	148.09	118.66	166.23	159.27
최소	-19.32	-23.83	-20.30	-15.99	-19.61	-15.50
평균	18.73	10.98	22.65	20.10	27.75	27.85

표4.43 AN1 동측 스트랜드 장력 변화 (단위 : kN)

구분	5번 하부	5번 상부	17번 하부	17번 상부	29번 하부	29번 상부
최대	108.17	136.81	111.90	140.83	154.07	146.61
최소	-49.04	-25.50	-19.12	-19.61	-22.46	-12.45
평균	13.83	28.24	14.32	21.38	23.83	28.24

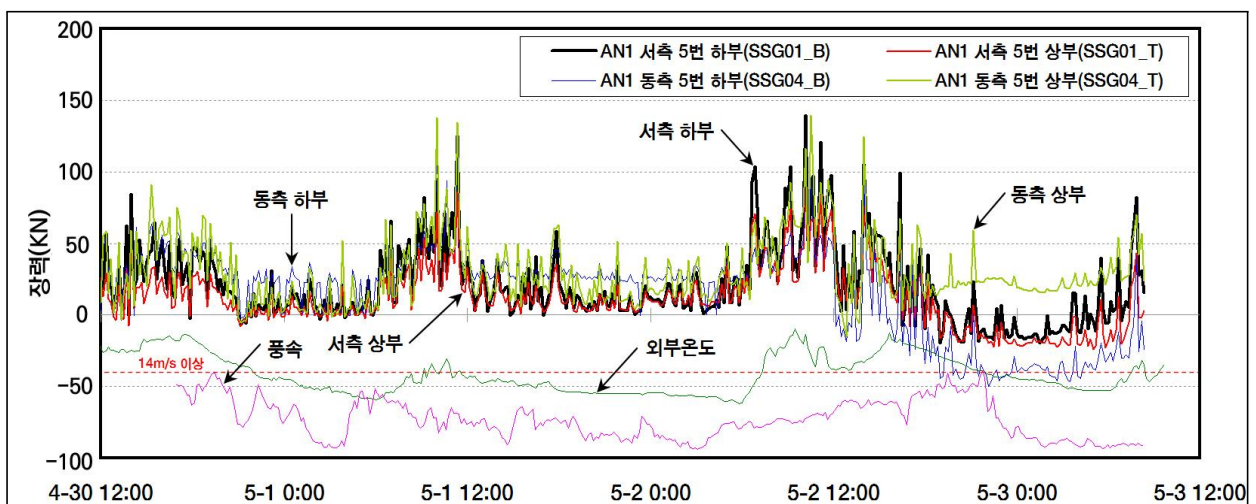


그림4.103 AN1 5번 스트랜드 장력 변화 이력



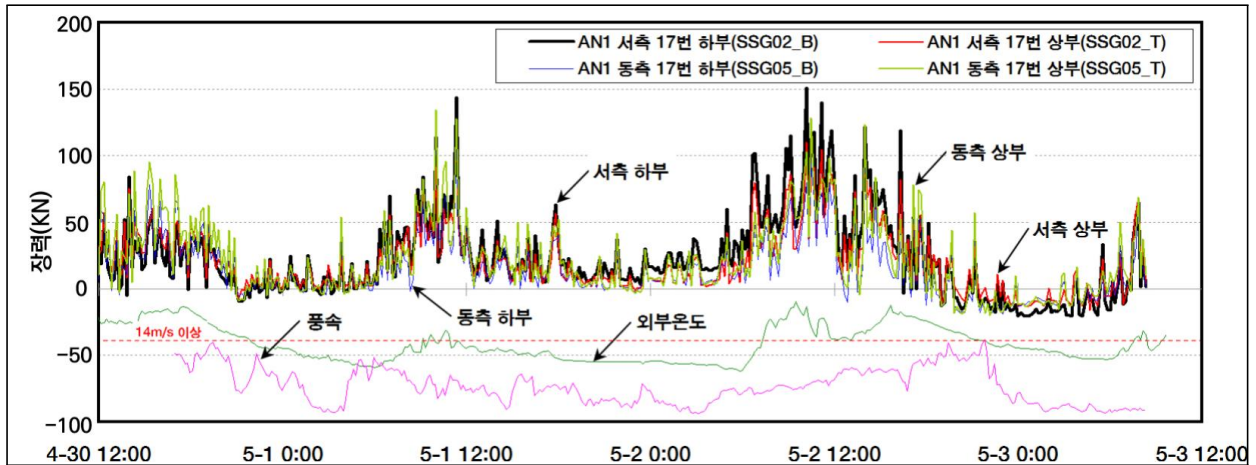


그림4.104 AN1 17번 스트랜드 장력 변화 이력

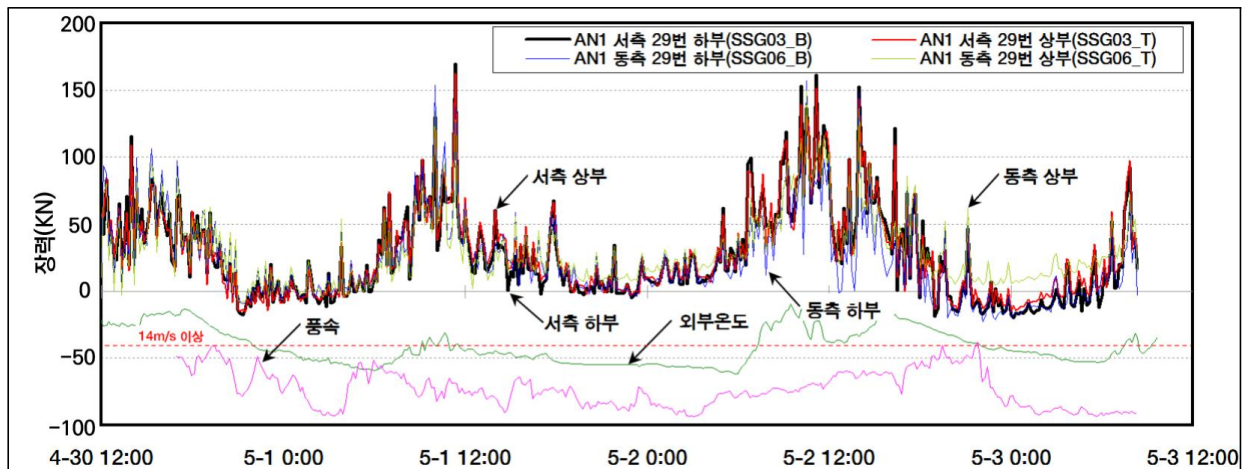


그림4.105 AN1 29번 스트랜드 장력 변화 이력

관측치 획득 시험 기간 내 AN1 동서측 스트랜드 최대 장력 변화를 살펴보면, 서측의 경우 29번 스트랜드 하부에서 166.23kN, 상부에서 159.27kN의 최대 장력이 발생하였으며, 동측의 경우 또한 29번 스트랜드 하부에서 154.07kN, 상부에서 146.61kN의 최대 장력이 발생하였다.

이론적으로 AN1의 동서측 스트랜드는 모두 같은 장력이 작용하고 있어야 하지만, 스트랜드 위치에 따라 다소 장력의 차이는 발생할 수 있다. 또한 A대교는 대칭 구조이므로 동서 측의 같은 위치의 스트랜드는 같은 장력이 발생하는 것이 타당하나 전기적 신호를 물리 신호로 환산함에 따라 다소 오차가 발생한 것으로 판단된다.

장력 변화에 가장 큰 영향을 미치는 외부 하중에 의한 스트랜드의 거동을 살펴보면, 온도변화와 매우 흡사한 것을 확인할 수 있다.

온도가 상승하면 스트랜드의 장력이 증가하며, 온도가 하강하면 스트랜드의 장력 또한 감소하는 것으로 확인되었는데, 이는 온도가 상승하면서 상부구조 하중의 증가로 인하여 이와 같은 거동이 발생하는 것으로 판단된다. 또한 풍속으로 인한 장력 변화를 살펴보면, 강한 풍속 발생 시간에 스트랜드의 장력 변화가 발생한 것으로 확인되었다.

#### 나. AN2 스트랜드 정적 변형률계

앵커리지는 현수교에서 상부구조 하중을 지지 기반에 안전하게 전달하는 구조로 하중 증가 및 온도변화에 따른 스트랜드의 장기적인 장력 변화 및 거동을 감시하기 위하여 AN2 5번, 17번, 29번 스트랜드 하부와 상부에 정적 변형률계가 총 12개소 설치되어 있다.

계측 방법은 스트랜드 로드에서 인장 응력이 발생하면 (+)값, 압축응력이 발생하면 (-)값이 표출되도록 설치되었다.

관측치 획득 시험 기간 내 스트랜드의 장력 변화를 정리하면 표4.44, 표4.45와 같으며, 장력 변화에 가장 큰 영향을 미치는 외부 하중에 의한 스트랜드의 거동을 확인한 결과 그림4.106에서 그림4.108과 같이 도시하였다.

**표4.44 AN2 서측 스트랜드 장력 변화** (단위 : kN)

구분	5번 하부	5번 상부	17번 하부	17번 상부	29번 하부	29번 상부
최대	147.50	138.97	142.89	140.63	152.20	112.98
최소	-16.28	-14.51	-11.77	-10.79	-24.71	-20.99
평균	22.75	19.03	22.36	22.26	17.36	14.42

**표4.45 AN2 동측 스트랜드 장력 변화** (단위 : kN)

구분	5번 하부	5번 상부	17번 하부	17번 상부	29번 하부	29번 상부
최대	133.57	114.35	148.67	137.89	122.20	116.80
최소	-25.01	-20.79	-30.01	-27.07	-21.87	-25.60
평균	11.87	13.14	12.55	11.28	11.47	9.02

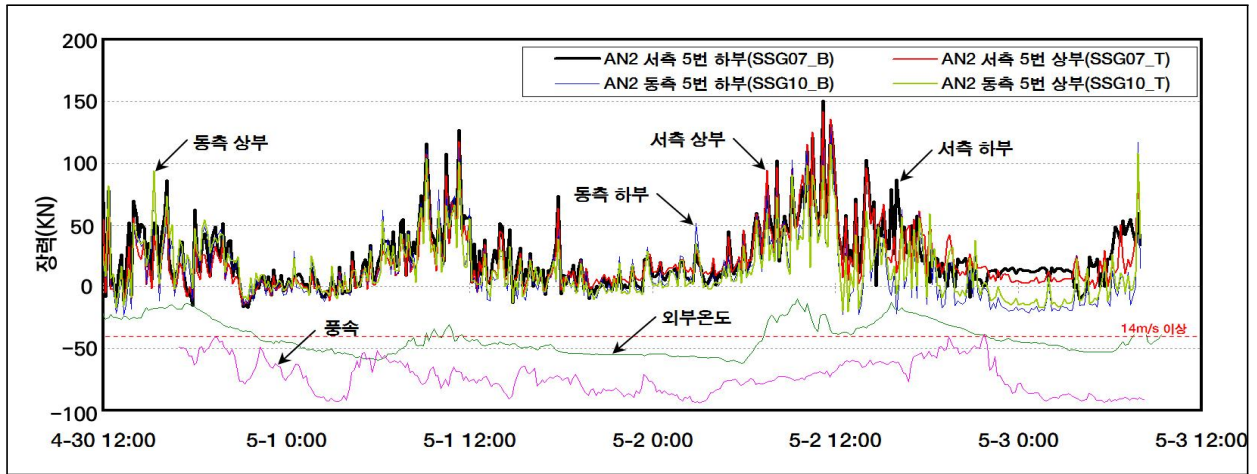


그림4.106 AN2 5번 스트랜드 장력 변화 이력

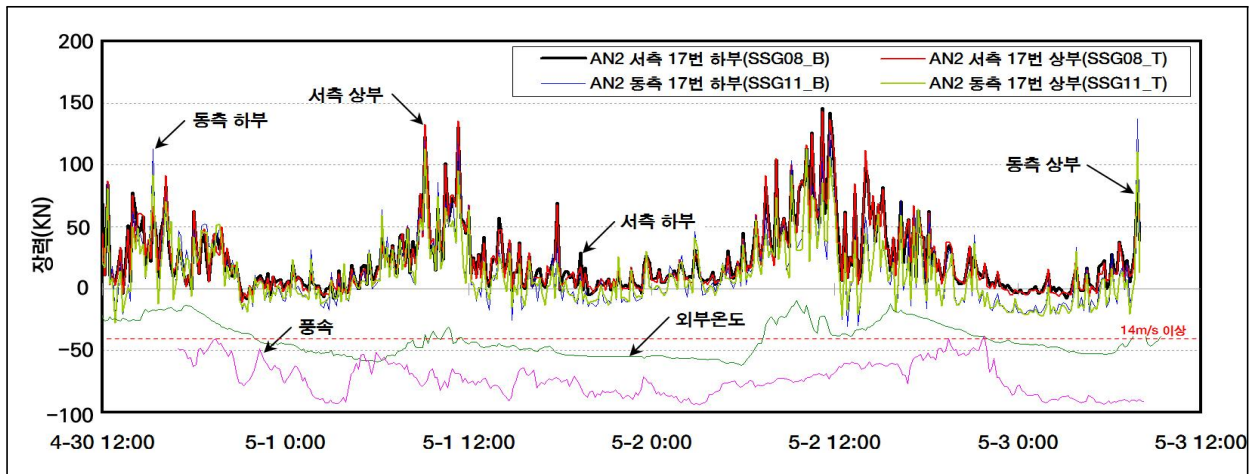


그림4.107 AN2 17번 스트랜드 장력 변화 이력

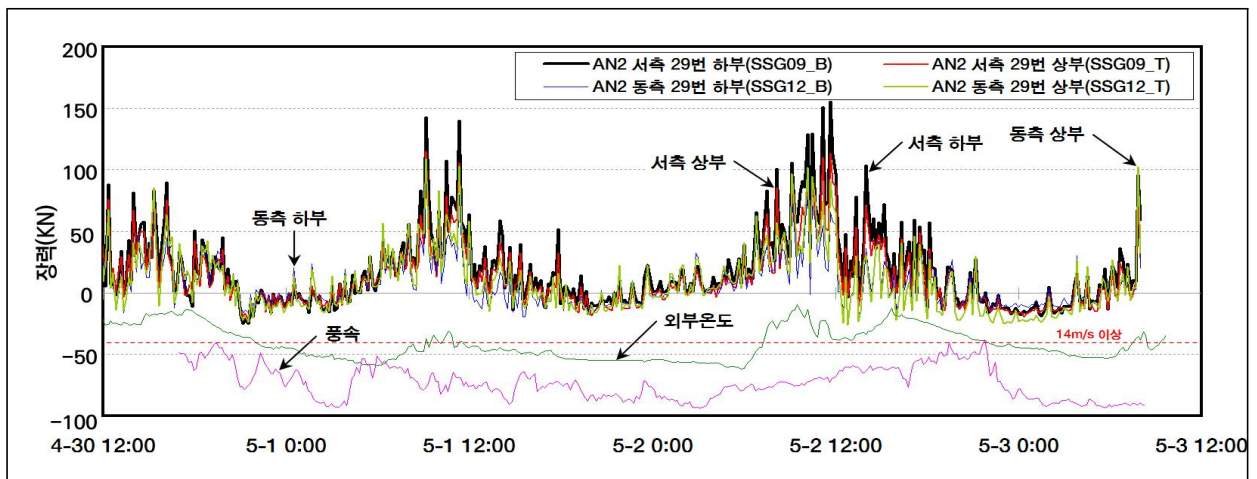


그림4.108 AN2 29번 스트랜드 장력 변화 이력

관측치 획득 시험 기간 내 AN2 동서 측 스트랜드 최대 장력 변화를 살펴보면, 서측의 경우 5번 스트랜드 하부에서 147.50kN, 상부에서 138.97kN의 최대 장력이 발생하였으며, 동측의 경우 또한 17번 스트랜드 하부에서 148.67kN, 상부에서 137.89kN의 최대 장력이 발생하였다.

이론적으로 AN2의 동서 측 스트랜드는 모두 같은 장력이 작용하고 있어야 하지만, 스트랜드 위치에 따라 다소 장력의 차이는 발생할 수 있다.

또한 A대교는 대칭 구조이므로 동서 측의 같은 위치의 스트랜드는 같은 장력이 발생하는 것이 타당하나, 노이즈 오차 및 전기적신호를 물리 신호로 환산하므로 인해 다소 오차가 발생한 것으로 판단된다.

장력 변화에 가장 큰 영향을 미치는 외부 하중에 의한 스트랜드의 거동을 살펴보면, 온도변화와 매우 흡사한 것을 확인할 수 있다.

온도가 상승하면 스트랜드의 장력이 증가하며, 온도가 하강하면 스트랜드의 장력 또한 감소하는 것으로 확인되었는데, 이는 온도가 상승하면서 상부구조 하중의 증가로 인하여 이와 같은 거동이 발생하는 것으로 판단된다.

또한 풍속으로 인한 장력 변화를 살펴보면, 강한 풍속이 발생한 시간에 스트랜드의 장력 변화가 발생한 것으로 확인되었다.

## 제 5 장 IoT 센싱을 활용한 A대교 동적 거동 특성 분석

### 5.1 개요

교량의 구조적인 거동 분석 항목 중 진동은 구조물의 고유한 특성을 대변할 수 있는 항목 중의 하나이며, 특별히 사용 중인 교량의 유지관리 시에는 사용성 및 안전성과 밀접하게 연관된 항목이므로 타 계측항목보다 더욱 조명하여 볼 필요가 있는 부분이다.

본 장에서는 주탑 및 행어로프의 진동, 풍속 등의 타 동적 계측항목을 참고하여 장대 구간인 주경간 보강형의 동적 거동을 분석하여 기술하였다.

그러나 실제 사용 중인 교량의 동적 거동은 자연현상 등 인위적으로 제어할 수 없는 요소들에 의한 것이기 때문에 이론적인 분석과는 상이할 수 있음을 밝혀둔다.

분석에 활용한 데이터는 관측치 획득실험 시 취득한 데이터이며 데이터 취득 및 분석 구간 선정 기준은 아래와 같다.

- 활하중에 대해 취득된 데이터 중 자유진동에 대한 데이터를 구분하여 확보
  - 최소 48시간 실시간 계측데이터 중 교량 내 차량이 없는 구간을 자유진동으로 간주
  - 교량 내 차량이 없는 구간을 확인하기 위해 새벽 시간에 차량 운행 정보 기록
  - 차량 운행 정보에 근거하여 최대한 자유진동 환경과 유사한 데이터 샘플 확보
- A대교의 동적 특성 분석에 활용한 계측항목 및 계측 위치는 표5.1과 같다.

**표5.1 분석에 활용한 동적 계측항목**

계측항목	계측 위치		
풍속	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ PY2 탑정</li> <li>▪ 보강형 1/2 서측</li> </ul>		
진동가속도	보강형	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 1/4지점 동측_연직</li> <li>▪ 1/4지점 서측_연직</li> <li>▪ 1/2지점 동측_연직</li> <li>▪ 1/2지점 서측_연직</li> <li>▪ 3/4지점 동측_연직</li> <li>▪ 3/4지점 서측_연직</li> </ul>	
	주탑	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ PY1 중단가로보 동측_교축</li> <li>▪ PY1 중단가로보 동측_교직</li> <li>▪ PY1 상단가로보 동측_교축</li> <li>▪ PY1 상단가로보 동측_교직</li> <li>▪ PY2 중단가로보 동측_교축</li> <li>▪ PY2 중단가로보 동측_교직</li> <li>▪ PY2 상단가로보 동측_교축</li> <li>▪ PY2 상단가로보 동측_교직</li> </ul>	
	행어로프	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ B7_동측</li> <li>▪ B10_동측</li> <li>▪ B13_동측</li> <li>▪ B16_동측</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ B19_동측</li> <li>▪ B22_동측</li> <li>▪ B71_서측</li> <li>▪ B74_서측</li> </ul>

## 5.2 구조부재별 풍속변화 이력

풍하중은 구조물의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 인자 중 하나이다. 풍속의 변화가 구조물의 거동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 아래 그림5.1, 그림5.2와 같이 데이터 분석 기간 중의 풍속변화 이력을 도시하였다.

풍속 데이터는 주탑과 보강형의 진동 가속도를 분석할 때 비교 자료로 활용하였다.

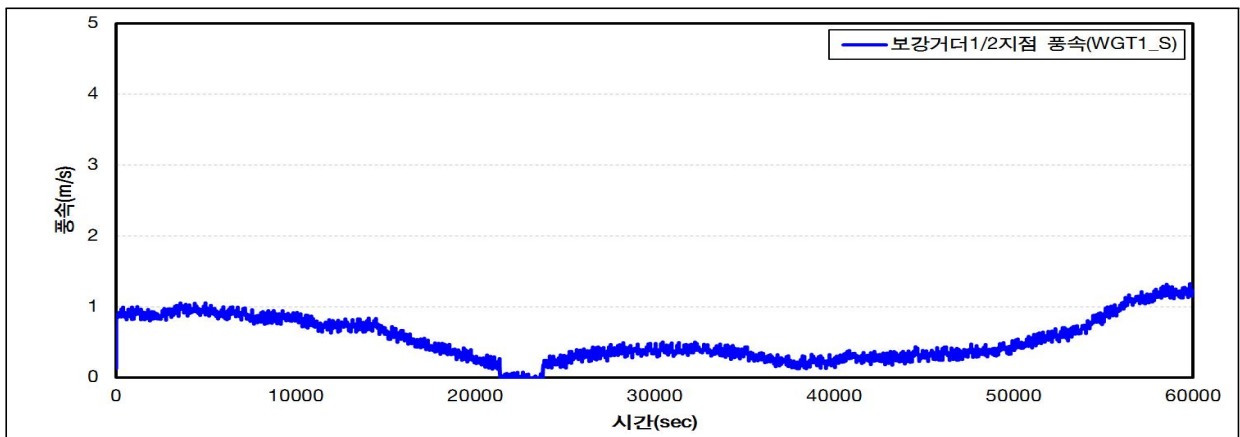


그림5.1 보강거더 1/2지점 풍속변화 이력

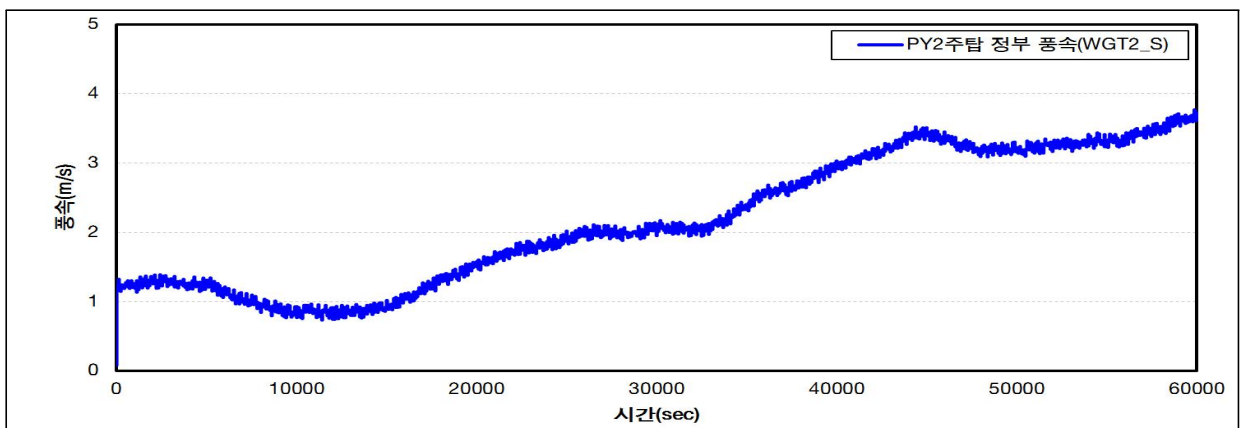


그림5.2 PY2 탑정 풍속변화 이력

데이터 선정 구간의 풍속은 PY2 탑정에서 최대 3.8m/s로 나타났다. 관측치 획득실험 당시 최대풍속은 PY2 탑정에서 15.98m/s, 보강형에서 10.51m/s였던 것을 볼 때, 보강형의 동적 특성 분석구간에서의 풍하중은 보강형의 거동에 큰 영향을 미치지 못하는 미미한 수준인 것으로 판단된다.

### 5.3 풍속변화에 따른 구조부재별 진동 가속도 변화 분석

자연 환경적인 요소를 제어하는 것은 어려운 사안이므로 풍하중과 구조물 진동 가속도의 관계를 정량적으로 분석하는 것도 매우 복잡한 과정이다.

따라서 아래 그림과 같이 부재별로 보강형, 주탑, 행어로프의 진동 가속도 변화 이력과 풍속 변화 이력을 함께 도시하고 두 인자의 변화 경향에 대한 상호 관계를 검토하는데 주안점을 두었다.

#### 5.3.1 보강형 진동 가속도 변화

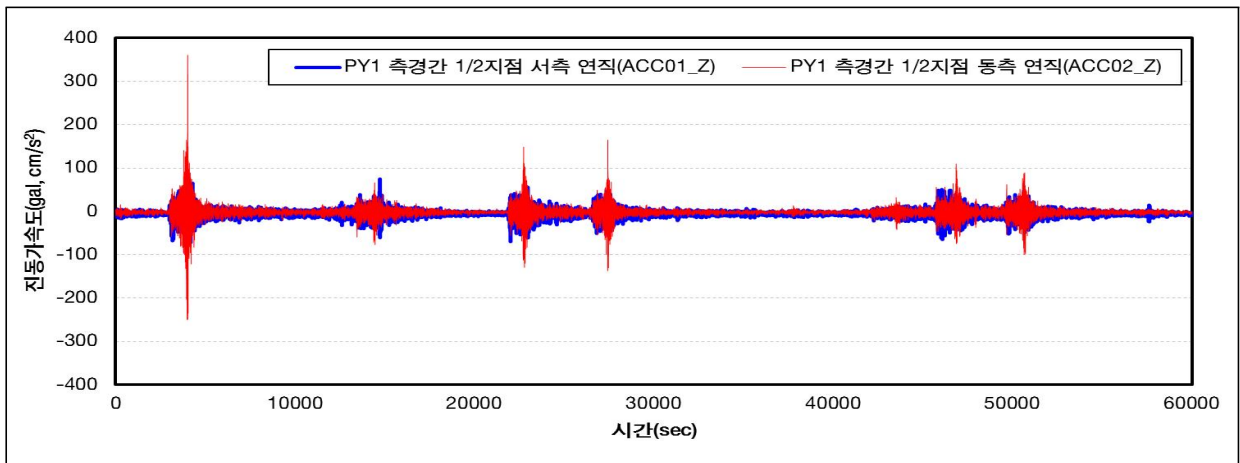


그림5.3 주경간 보강형 1/4지점 진동 가속도 변화 이력

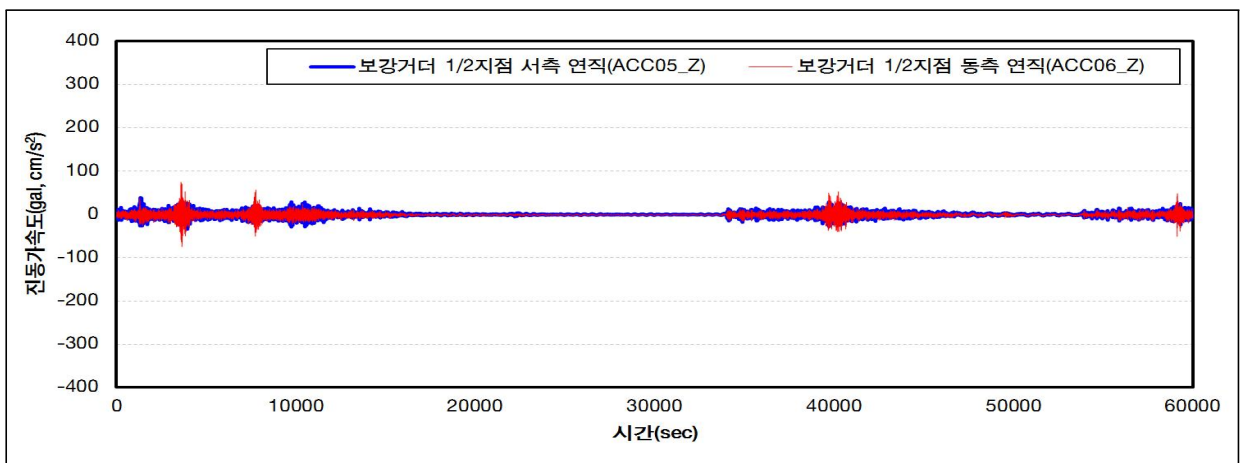


그림5.4 주경간 보강형 1/2지점 진동 가속도 변화 이력

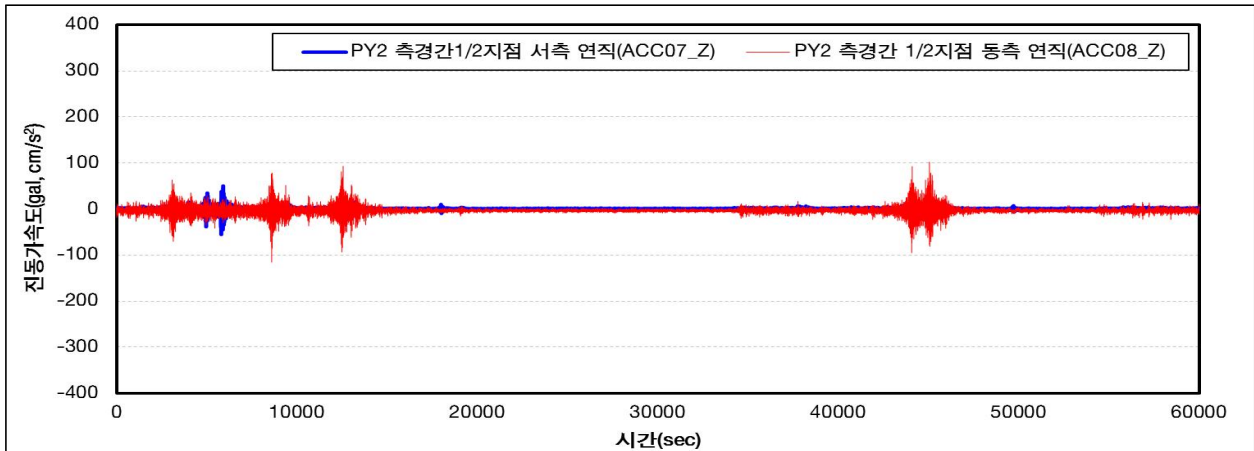


그림5.5 주경간 보강형 3/4지점 진동 가속도 변화 이력

표5.2 보강형 진동 가속도 변화(RMS)

(단위 : gal)

1/4지점		1/2지점		3/4지점	
서측 연직	동측 연직	서측 연직	동측 연직	서측 연직	동측 연직
9.19	11.03	4.19	4.99	2.44	8.28

보강형의 진동은 교직 방향보다 연직 방향의 거동이 더욱 주요한 거동이기 때문에 교직 방향의 진동은 배제하였고, 연직 방향의 진동 가속도만 검토하였으며 변화 이력은 위의 그림과 같다.

데이터 분석 구간 중 보강형의 최대진동 가속도는 1/4지점 동측에서 11.03gal로 나타났다. 관측치 획득실험 시의 평균 진동 가속도 5~11gal과 비교하면 전반적으로 평균 이하의 안정적인 상태인 것을 볼 수 있다.

같은 시간 주탑의 진동 가속도 최대 0.71gal과 비교하여 볼 때 보강형의 진동이 큰 것을 확인할 수 있다. 진동이 더 크게 발생한다는 것은 피로에 더 많이 노출됨을 의미한다.

또한 보강형은 사용성 측면에서 가장 민감한 부재이기 때문에 좀 더 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다.



### 5.3.2 풍속 대비 보강형 진동 가속도 변화

보강형 진동 가속도 변화 이력과 PY2 탑정의 풍속 변화 이력을 아래 그림과 같이 도시하였다. 풍속은 보강형 1/2지점과 PY2 탑정에서 측정하고 있으며 데이터 분석구간 중 PY2 탑정의 풍속 변화 이력이 보강형 1/2지점의 풍속 변화 이력보다 역동적이고 최대풍속도 더 크게 나타났기 때문에 풍하중의 영향을 좀 더 큰 경우로 가정하기 위하여 PY2 탑정의 풍속 데이터를 활용하였다.

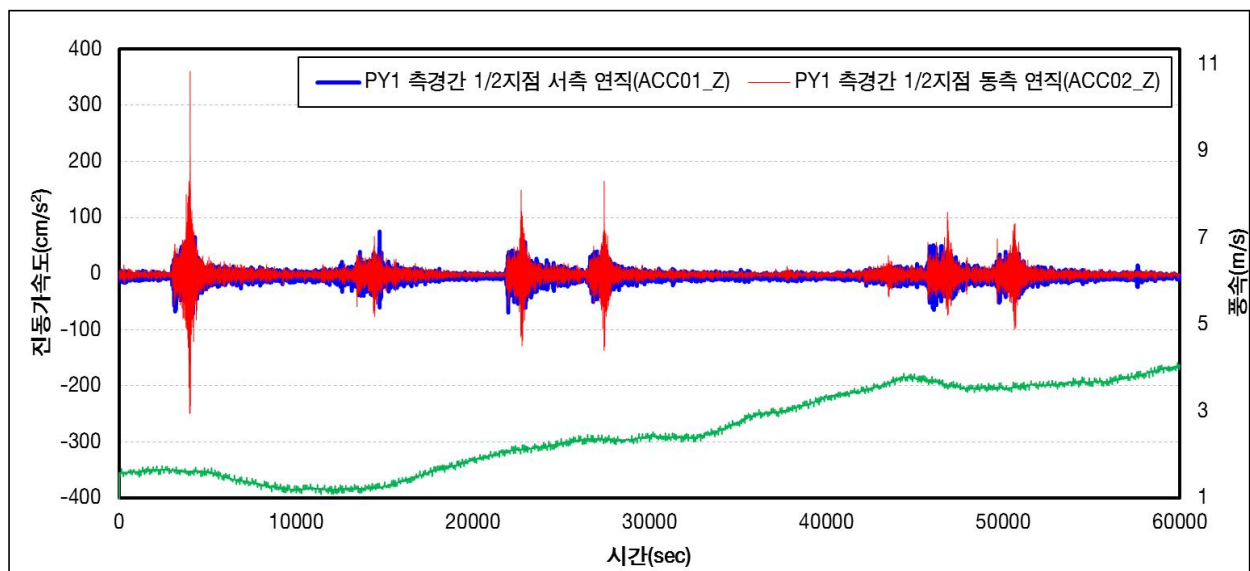


그림5.6 PY2 탑정 풍속 대비 주경간 보강형 1/4지점 진동 가속도 변화 이력

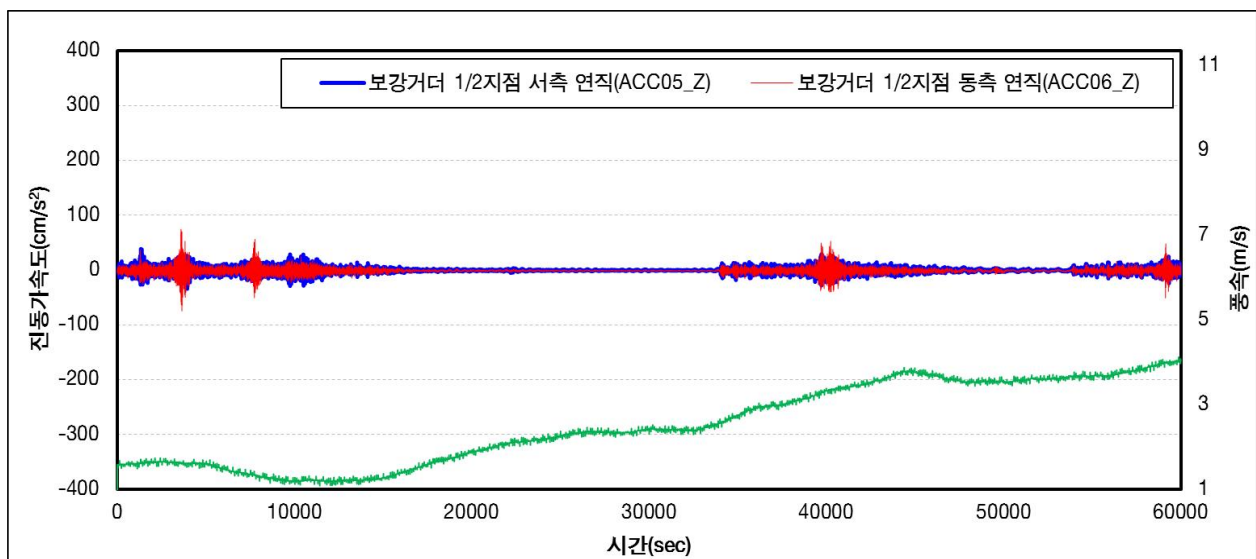


그림5.7 PY2 탑정 풍속 대비 주경간 보강형 1/2지점 진동 가속도 변화 이력

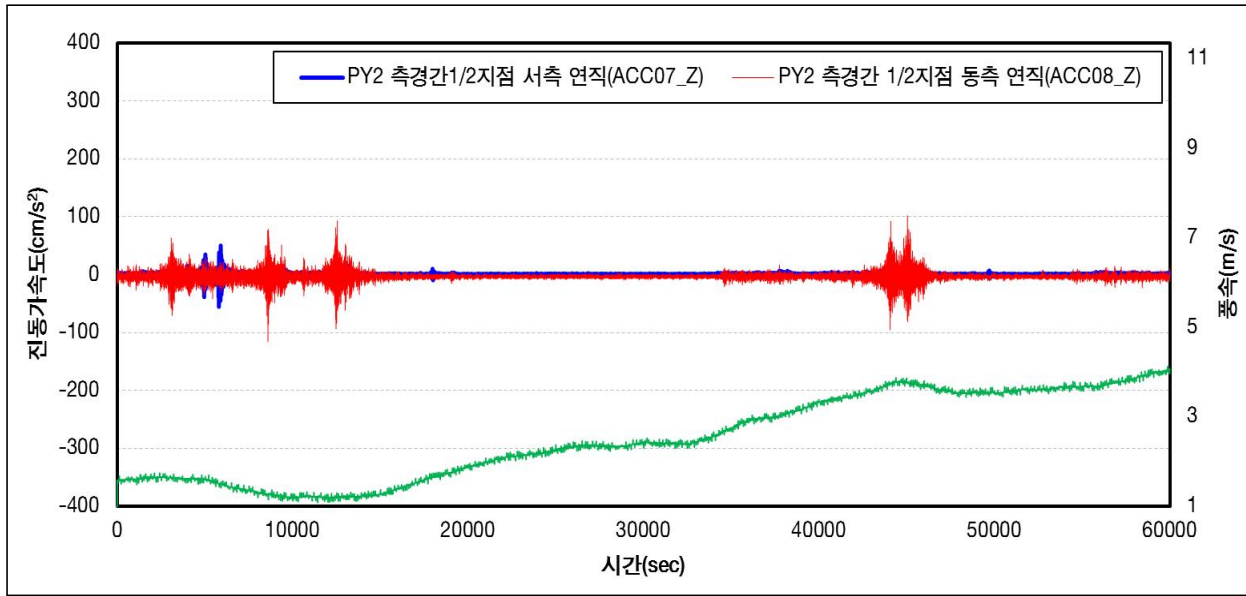


그림5.8 PY2 탑정 풍속 대비 주경간 보강형 3/4지점 진동 가속도 변화 이력

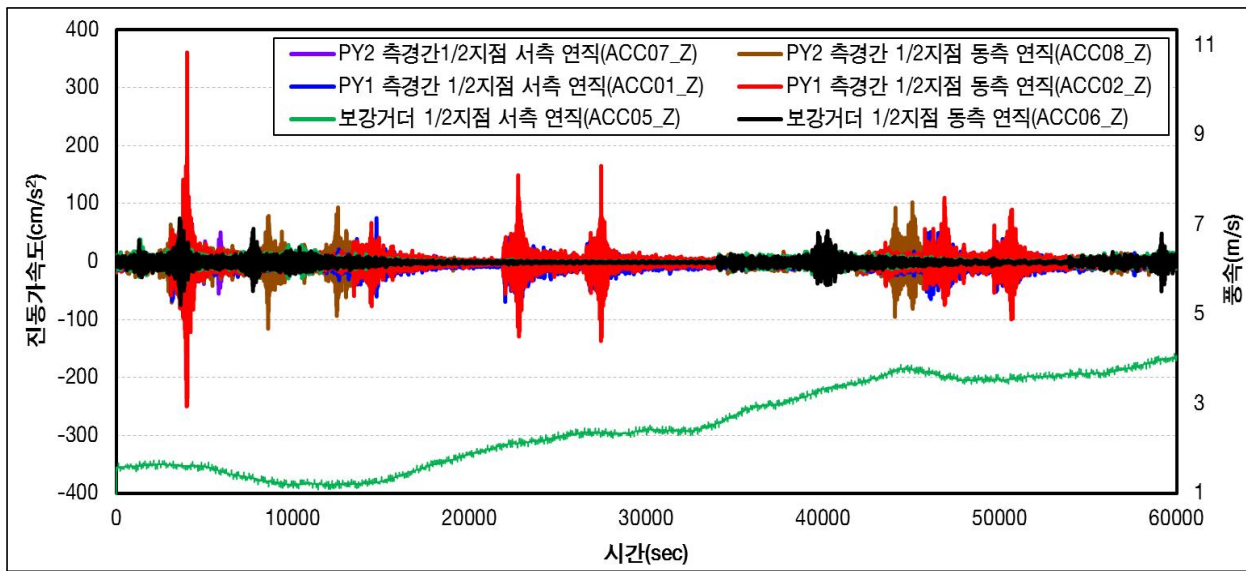


그림5.9 PY2 탑정 풍속 대비 주경간 보강형 진동 가속도 변화 이력

보강형의 거동에 풍하중이 미치는 영향을 검토하기 위하여 보강형의 진동 가속도 변화 이력과 같은 시간의 풍속 변화 이력을 그림5.9와 같이 도시하였다.

주경간 1/4, 1/2, 3/4지점 모두 풍속 변화 이력과는 무관한 거동을 보이는 것으로 나타났다, 차량에 의한 진동 발생이 지배적인 것을 확인하였다.

데이터 분석 구간 당시의 풍속은 보강형의 거동에 영향을 미칠 수 있는 수준이 아닌 4m/s 이하의 비교적 잔잔한 바람으로 특별한 거동의 변화는 없는 것으로 판단된다.

### 5.3.3 주탑 진동 가속도 변화

PY1, PY2의 중단 가로보 및 탑정의 진동 가속도 변화 이력을 주탑별로 교축 및 교직 방향에 대하여 아래 그림과 같이 도시하였다.

방향별로 유사한 경향을 보이고 있으며 교직 방향보다 교축 방향의 진동 가속도가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

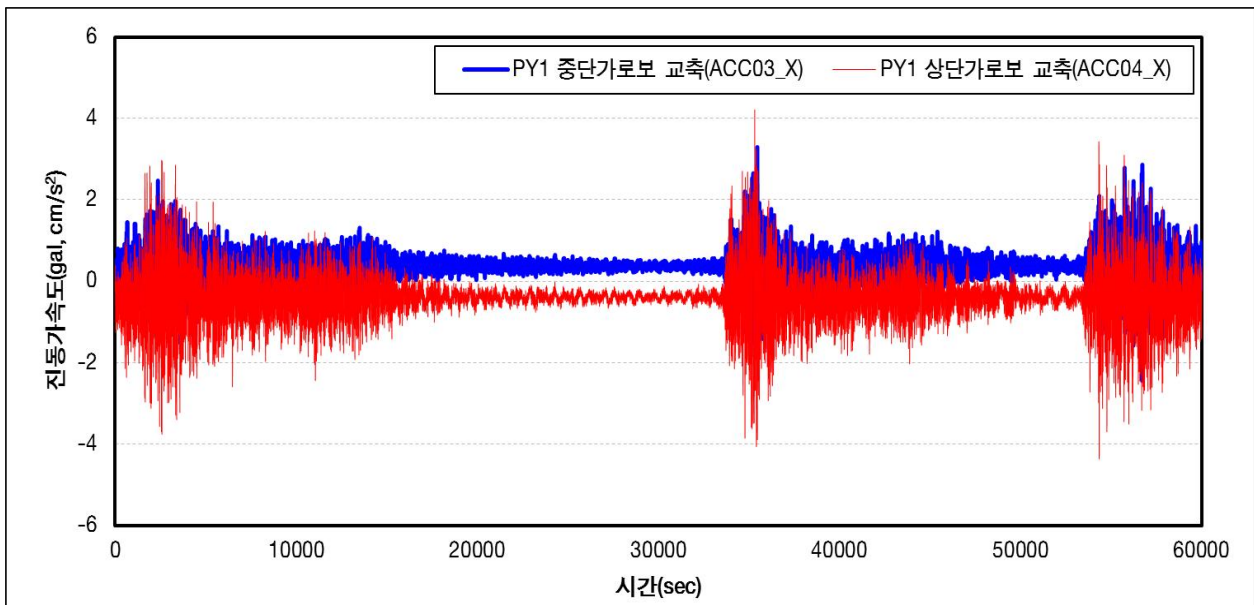


그림5.10 PY1 교축 방향 진동 가속도 변화 이력

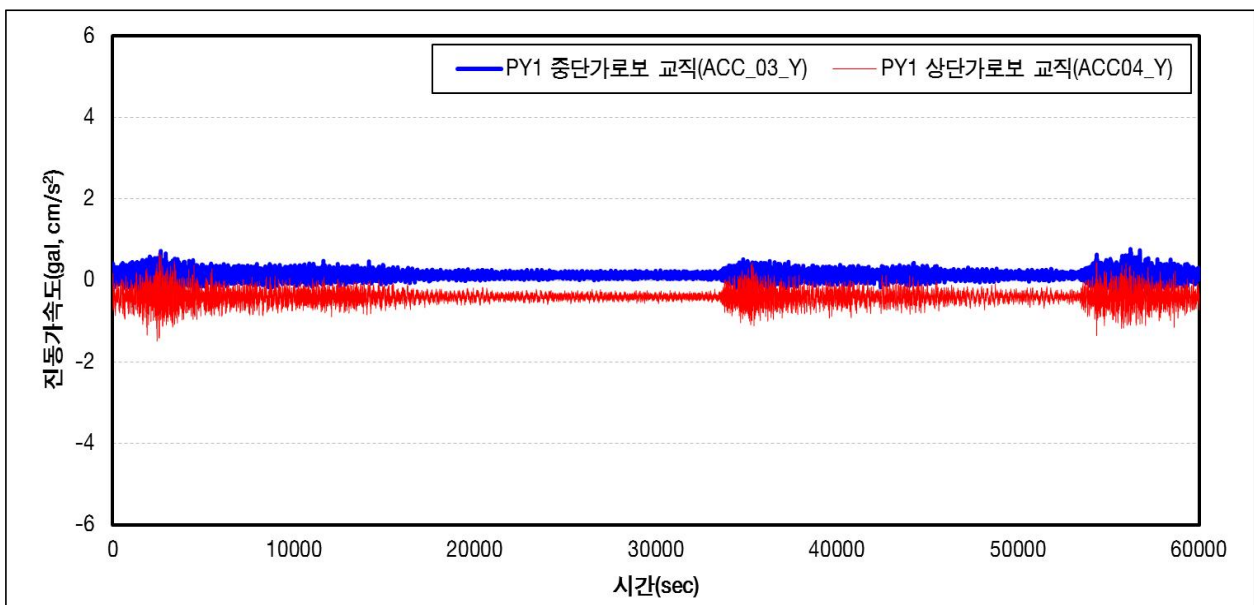


그림5.11 PY1 교직 방향 진동 가속도 변화 이력

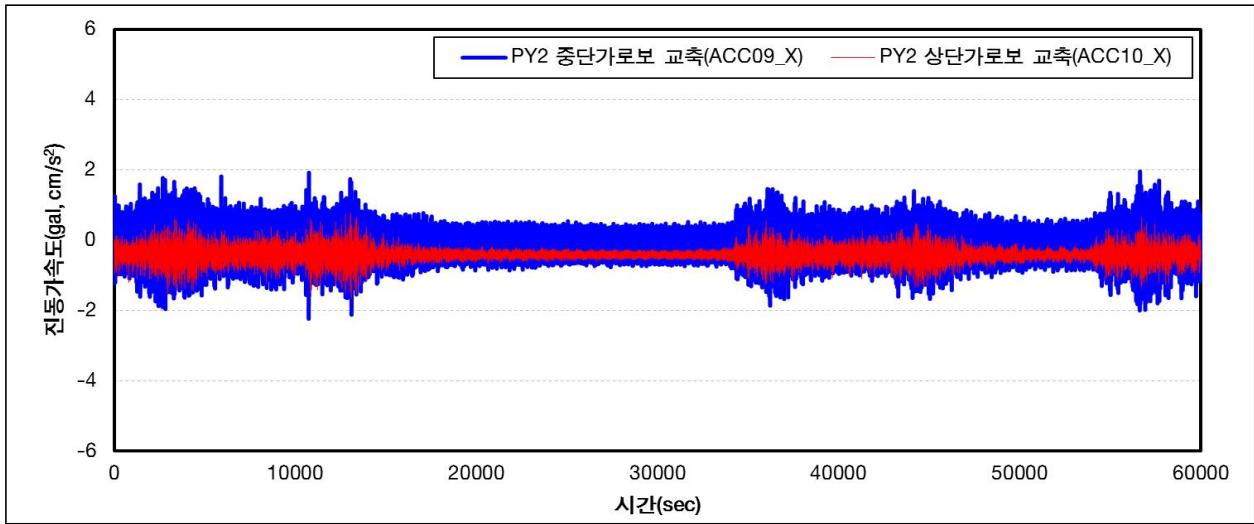


그림5.12 PY2 교축 방향 진동 가속도 변화 이력

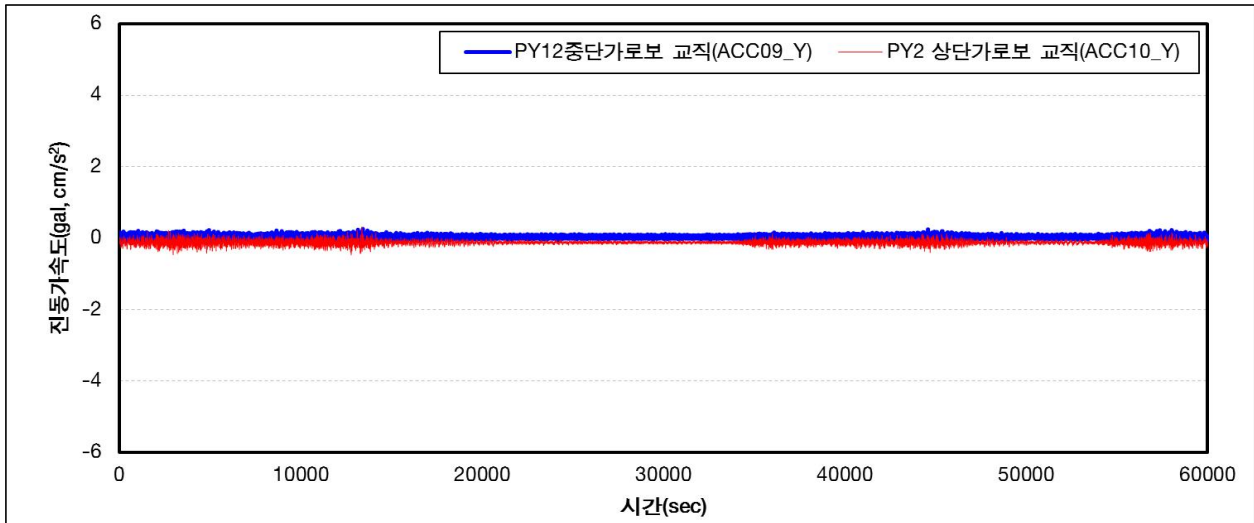


그림5.13 PY2 교직 방향 진동 가속도 변화 이력

표5.3 주탑 진동 가속도(RMS)

(단위 : gal)

PY1				PY2			
중단가로보 교축	상단가로보 교축	중단가로보 교직	상단가로보 교직	중단가로보 교축	상단가로보 교축	중단가로보 교직	상단가로보 교직
0.49	0.71	0.16	0.43	0.46	0.46	0.05	0.14

데이터 분석 구간 중 주탑의 최대 진동 가속도는 PY1 상단 가로보에서 교축 방향으로 0.71gal로 나타났다. 관측치 획득실험 시의 평균 진동 가속도 0.06~0.72gal과 비교하면 평균 이하의 매우 안정적인 상태인 것을 볼 수 있다.

### 5.3.4 풍속 대비 주탑 진동 가속도 변화

양 주탑의 교축 및 교직 방향의 진동 가속도 변화 이력을 같은 시간대의 풍속변화 이력과 함께 아래 그림과 같이 도시하여 풍속이 주탑의 진동에 미치는 영향을 검토하였다.

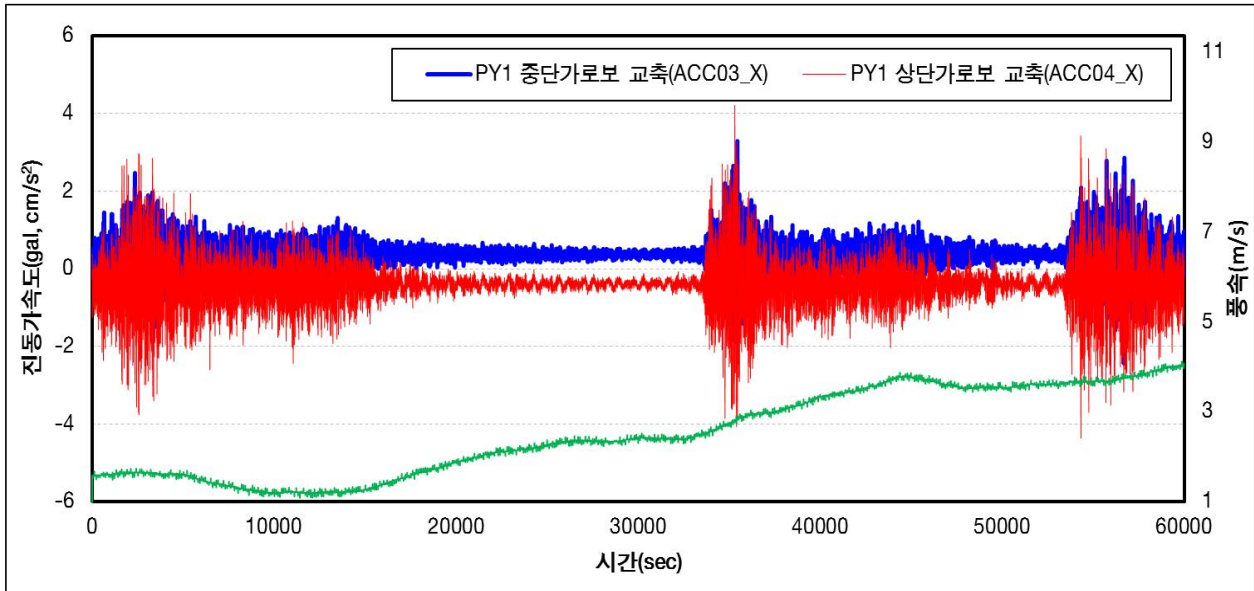


그림5.14 PY2 탑정 풍속 대비 PY1 교축 방향 진동 가속도 변화 이력

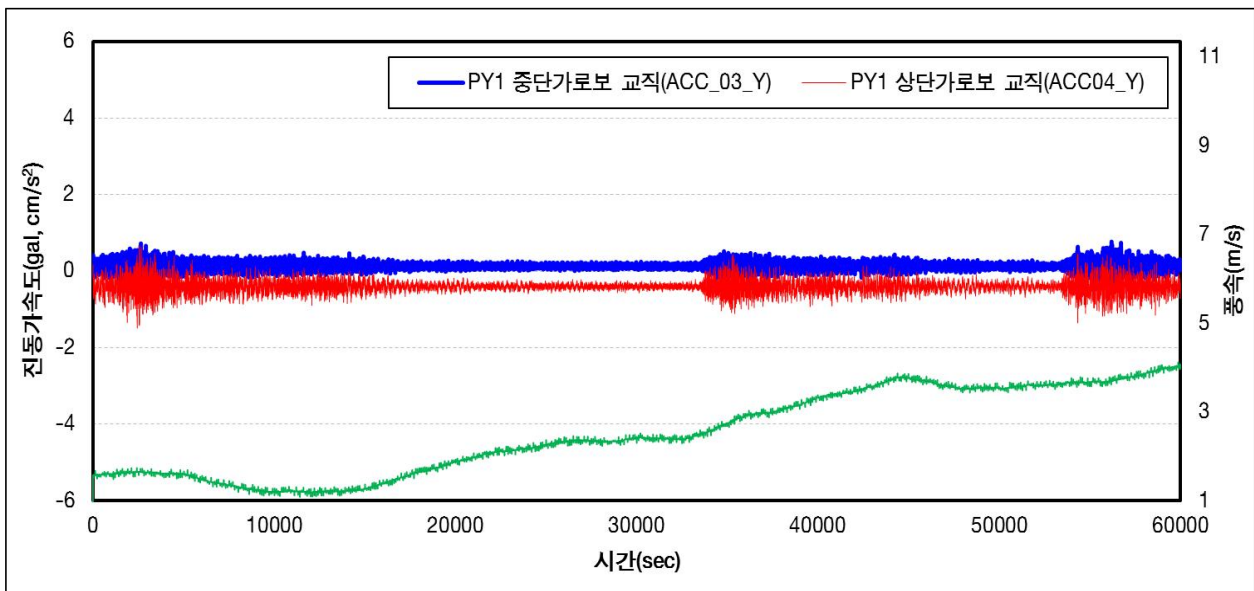


그림5.15 PY2 탑정 풍속 대비 PY1 교직 방향 진동 가속도 변화 이력

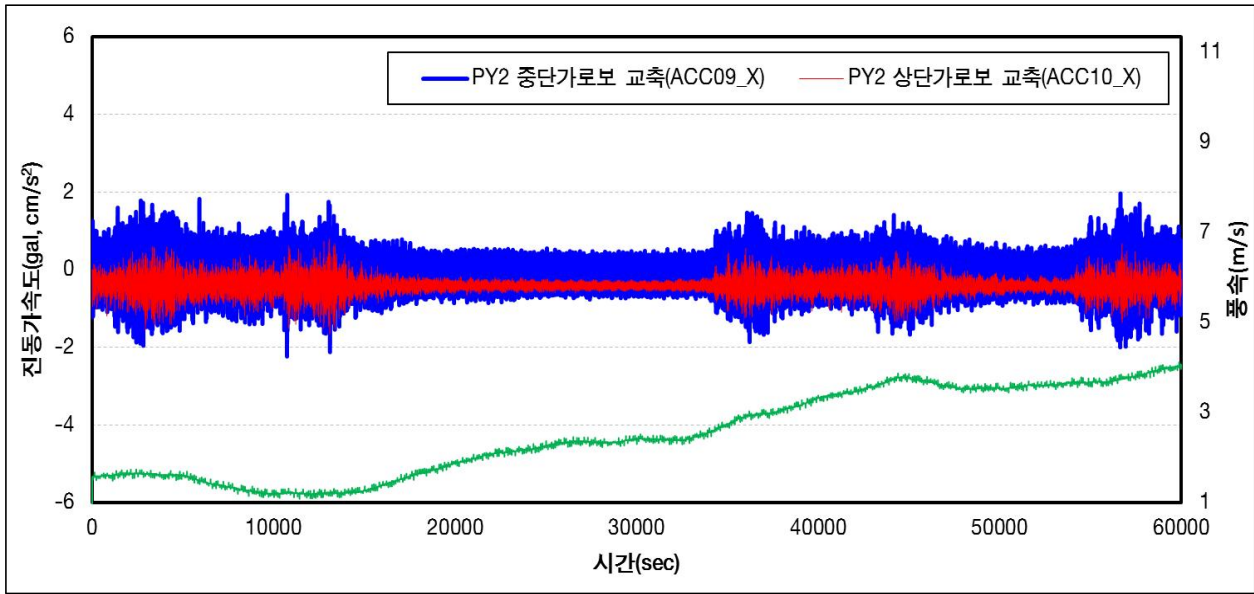


그림5.16 PY2 탑정 풍속 대비 PY2 교축 방향 진동 가속도 변화 이력

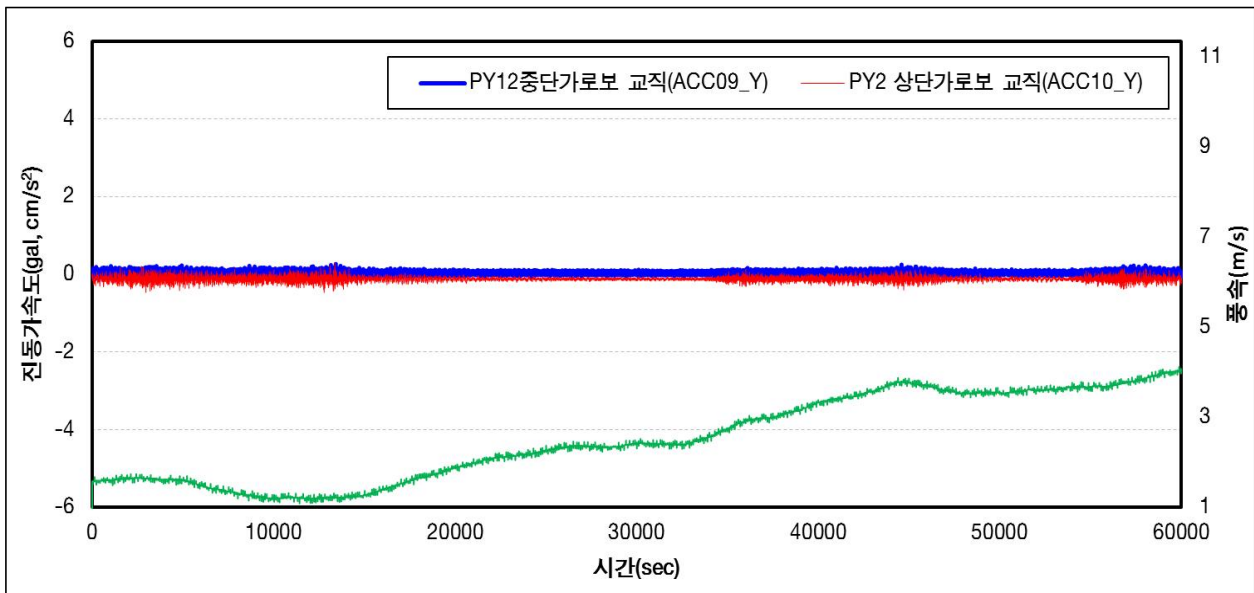


그림5.17 PY2 탑정 풍속 대비 PY2 교축 방향 진동 가속도 변화 이력

데이터 분석 구간 중 큰 진동이 발생한 구간은 바람에 의한 것이 아니라 차량의 운행으로 인한 것으로 보인다. A대교와 같이 초장대 현수교량 구조물은 바람에 의하여 거동의 변화가 발생하기도 하지만 분석 당시의 바람은 구조물의 거동에 영향을 미치기에는 부족한 풍속 4m/s 이내의 약한 바람으로 주탑의 거동에는 별다른 영향을 주지 못한 것으로 판단된다.

### 5.3.5 행어로프 진동 가속도 변화와 장력과의 관계

데이터 분석 구간 중 행어로프의 진동 가속도 변화 이력을 측경간 행어로프와 주경간 행어로프로 구분하여 아래 그림5.18, 그림5.19와 같이 도시하였다.

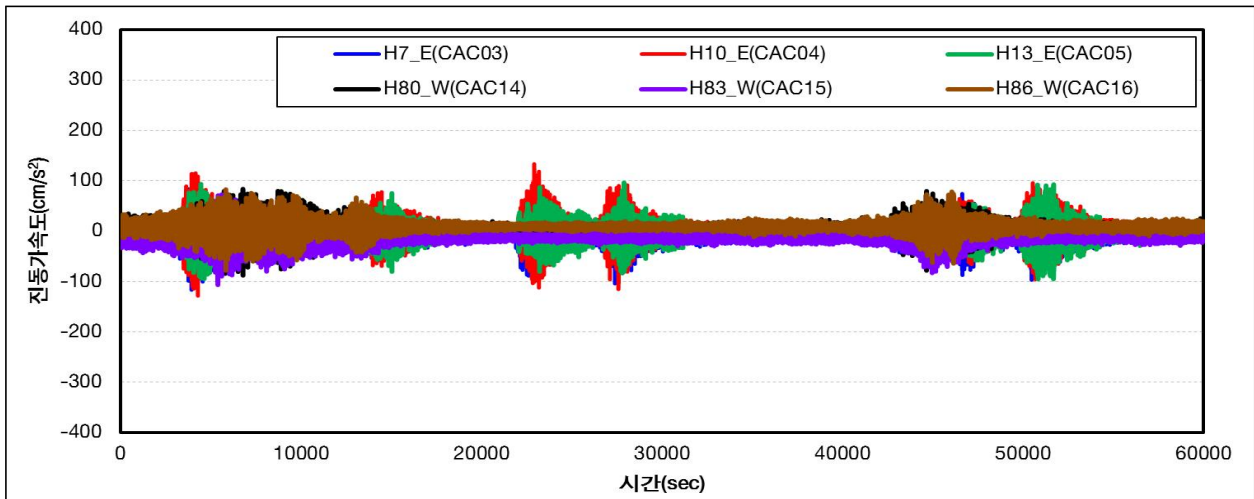


그림5.18 측경간 행어로프 진동 가속도 변화 이력

간헐적으로 바람이나 차량의 운행 등으로 인해 순간적으로 진동이 크게 발생한 이력들을 확인할 수 있으며 그 당시의 파형을 보면 +방향과 -방향으로 대칭을 이루고 있어 행어로프와 보강형의 구조는 안정적인 것으로 판단할 수 있다.

진동 가속도의 크기 또한 PY1, PY2 양 측경간에서  $\pm 120\text{gal}$  가량의 유사한 수준으로 나타났으며 데이터 분석 구간 중 행어로프의 거동은 특별한 변화는 없는 것으로 판단된다.

행어로프의 직접적인 진동 가속도 크기는 행어로프의 상태를 평가하는 지표로 사용하지 않고 진동방정식을 이용하여 간접적으로 장력을 추정하는 용도로 데이터를 분석, 활용하며 계산한 장력은 표5.4와 같다.

표5.4 측경간 행어로프 장력

(단위 : kN)

구 분	PY1			PY2		
	H7_E	H10_E	H13_E	H80_W	H83_W	H86_W
계산장력	754.94	788.39	797.94	841.67	770.34	717.56
설계장력	835.18	856.62	883.09	883.91	856.29	834.21
오차율(%)	9.61	7.96	9.64	4.78	10.04	13.98

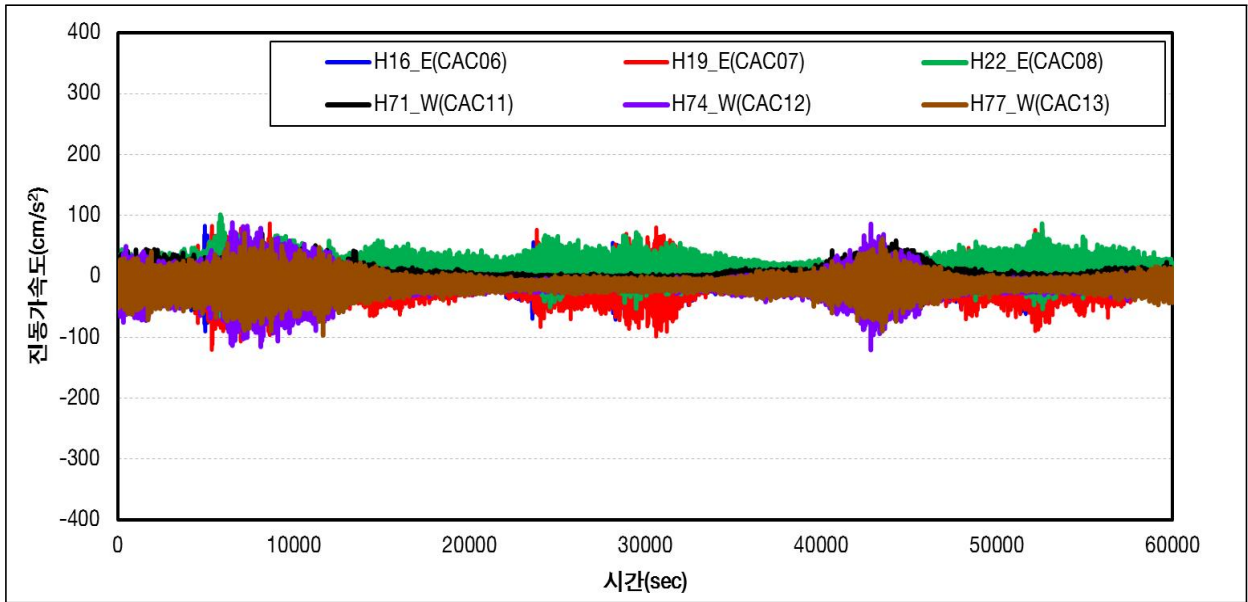


그림5.19 주경간 행어로프 진동 가속도 변화 이력

측경간 행어로프와 같이 주경간 행어로프의 진동 가속도도  $\pm 120\text{gal}$  수준의 진동 가속도 크기를 나타냈다.

진동 가속도의 크기와 대칭성을 볼 때 행어로프는 정상적인 범위 내의 거동을 보이는 것으로 보이며, 데이터 분석 당시의 특이사항은 나타나지 않았다.

장력 또한 설계장력 대비 최대 15% 이내의 오차율을 보였다. 행어로프의 진동에 영향을 미치는 바람과 차량의 운행을 제어할 수 없는 상태에서 취득한 것과 진동방정식을 이용하여 간접적으로 장력을 추정할 때 충분히 발생할 수 있는 오차율로 볼 수 있다. 따라서 데이터 분석 구간 중 행어로프의 거동은 일상적인 수준의 안정적인 상태인 것으로 판단된다.

표5.5 주경간 행어로프 장력

(단위 : kN)

구 분	PY1			PY2		
	H7_E	H10_E	H13_E	H80_W	H83_W	H86_W
계산장력	857.82	792.46	713.06	793.09	821.51	810.03
설계장력	888.27	858.98	835.00	835.00	858.98	888.28
오차율(%)	3.43	7.74	14.60	5.02	4.36	8.81



### 5.3.6 풍속 대비 행어로프 진동 가속도 변화

행어로프의 거동에 풍하중이 미치는 영향을 검토하기 위하여 아래 그림과 같이 행어로프의 진동 가속도 변화 이력과 풍속 변화 이력을 함께 도시하고 두 인자의 변화 경향에 대한 상호 관계를 검토하였다.

데이터 분석 구간 중 큰 진동이 발생한 구간은 바람에 의한 것이 아니라 차량의 운행으로 인한 것으로 보인다.

A대교와 같이 세장한 초장대 현수교량 구조물은 바람에 의하여 거동의 변화가 발생하기도 하지만 분석 당시의 바람은 구조물의 거동에 영향을 미치기에는 약한 풍속 4m/s 이내의 바람으로 행어로프의 거동에는 영향을 주지 못한 것으로 판단된다.

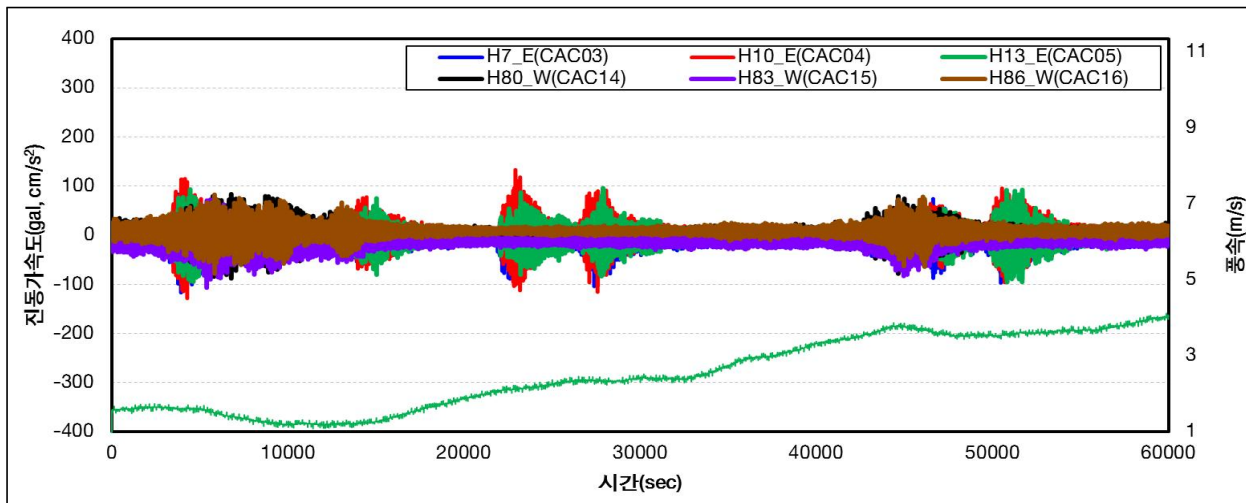


그림5.20 PY2 타점 풍속 대비 측경간 행어로프 진동 가속도 변화 이력

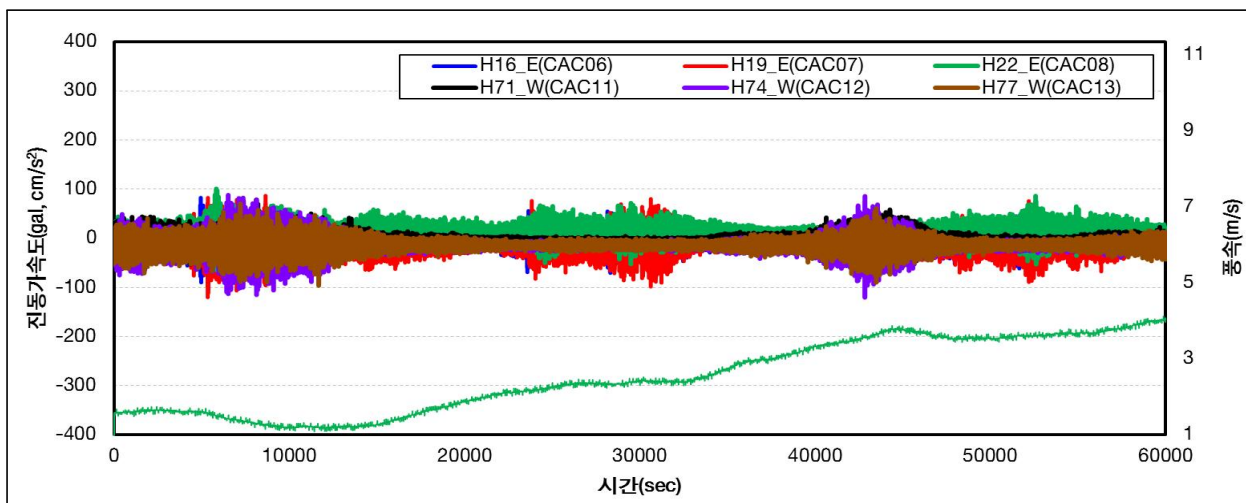


그림5.21 PY2 타점 풍속 대비 주경간 행어로프 진동 가속도 변화 이력

보강형의 진동 가속도와 주탑 및 행어로프의 진동 가속도 변화 이력을 아래 그림 5.22, 그림5.23과 같이 도시하였다.

두 부재의 진동은 보강형의 진동과 연관성 없이 거동하는 것으로 보인다. 구조적으로 본다면 주탑과 행어로프, 보강형 모두 연결되어 있지만 부재별로 규모나 재질이 모두 다르고 연결구조도 다르므로 세 부재 모두의 거동에 영향을 미칠만한 큰 외력이 작용하지 않는 한, 각 부재는 각기의 고유한 거동을 보이는 것으로 판단된다.

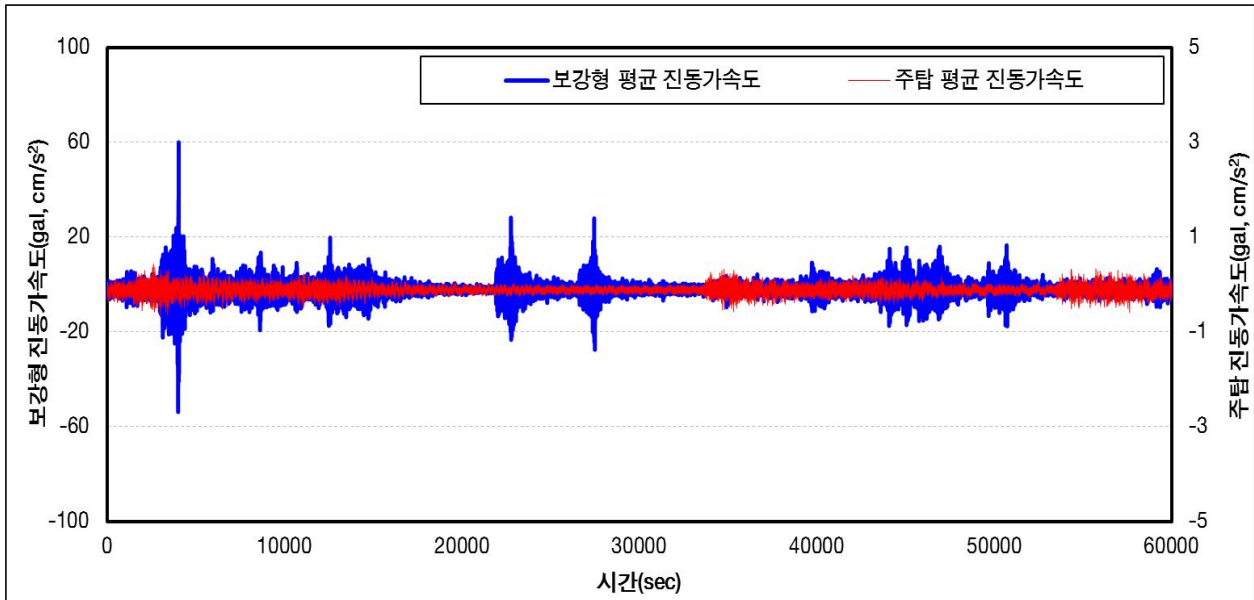


그림5.22 보강형 평균 진동 가속도 대비 주탑 평균 진동 가속도 변화 이력

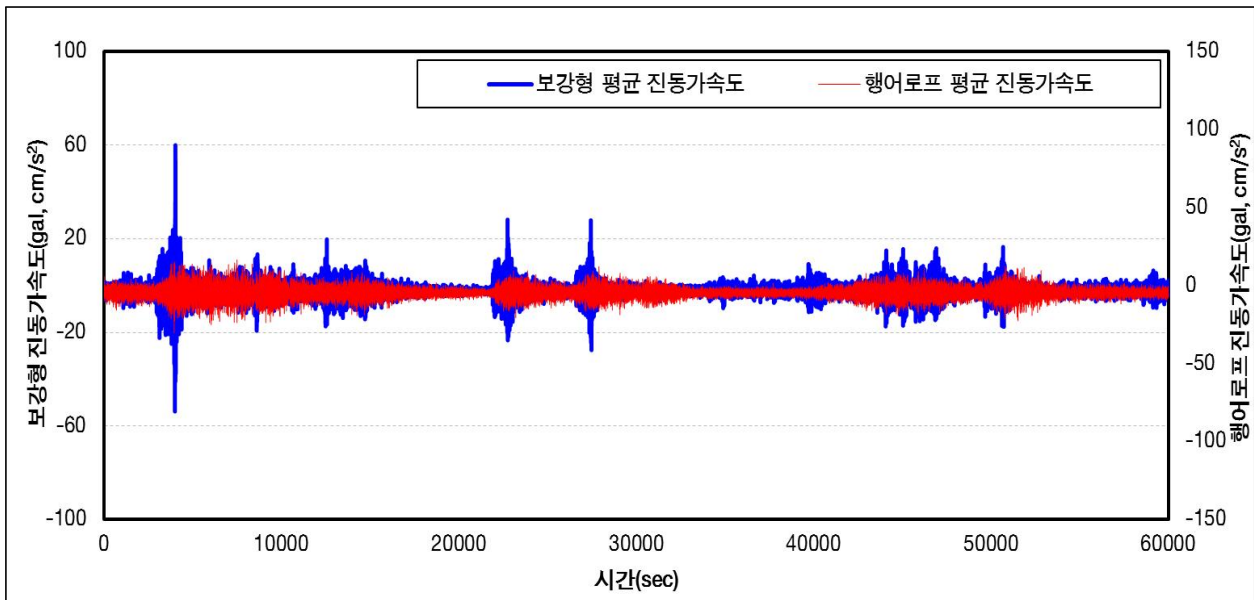


그림5.23 보강형 평균 진동 가속도 대비 행어로프 평균 진동 가속도 변화 이력

## 5.4 보강형 동적 특성 분석

교량의 진동 특성은 사용성 및 안전성에 밀접한 관계가 있다. 따라서 교량에서 발생하는 진동을 보다 효과적으로 분석할 필요가 있으며 특별히 사용 중인 교량의 관리 측면에서 본다면 교량의 노후화나 강성도의 저하에 따른 진동 특성 변화를 감시하는 일은 교량의 건전도와 경제성을 확보하는 데 중요한 역할을 감당할 수 있다.

단자 유도계에서 에너지가 손실되는 메커니즘은 계의 운동에 저항하는 감쇠력이 계의 속도에 비례한다고 여겨지므로 점착력 있는 감쇠기(damper)로 나타낼 수 있다.

그러나 공학 구조물의 감쇠는 점성으로 이상화하는 것보다는 좀 더 복잡하고 다른 여러 가지 요인에 의해서도 발생할 수 있기 때문에 감쇠량의 계산은 매우 어려운 일이며 구조물에 따라 다양하게 나타난다.

이런 감쇠 특성은 고유진동수와 함께 교량의 상태를 평가하는 주요 항목이다. 본 절에서는 감쇠 특성에 관해 기술한다.

### 5.4.1 감쇠 특성 일반 이론

가속도 파형으로부터 감쇠 특성을 구할 수 있다. 그림5.24는 감쇠 자유진동 파형으로, 이로부터 고유진동수와 대수감쇠율 및 감쇠비를 구하는 방법은 아래와 같다.

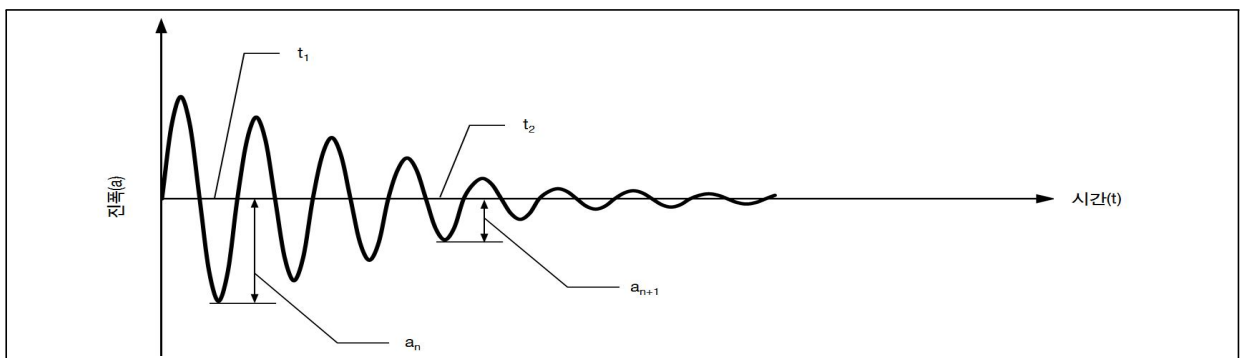


그림5.24 감쇠 자유진동 파형

$$\text{고유진동수} : f = \frac{n}{t_2 - t_1} \quad \text{대수감쇠율} : \delta = \frac{1}{n} \times \ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right) \quad \text{감쇠비} : h = \frac{\delta}{2\pi}$$

이것은 하나의 고유진동수로 감쇠진동을 일으킬 때 적용되는데, 여러 개의 고유진동수 성분이 중첩된 경우는 Band pass filter를 사용하여 해당 고유진동수 대역만을 분리해내어 감쇠 특성을 구한다.

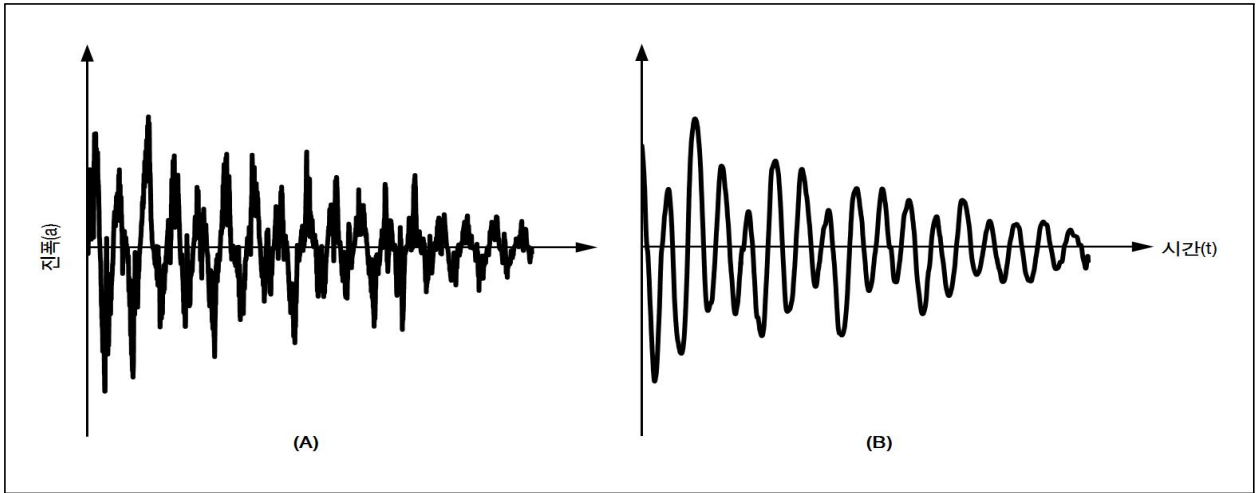


그림5.25 Raw data(filter 적용 전, A), Refined data(filter 적용 후, B)

감쇠 파형은 차량 통행 등의 충격 이후 진동이 감소하는 시점의 파형을 선정하였다. 위치별로 진동 가속도 파형이 다르므로 감쇠 파형을 추출한 구간 및 시간은 상이하며 감쇠 파형이 명확한 구간 내의 1~3초 가량의 데이터를 선정하여 분석하였다.

그림5.26은 PY1 측경간 1/2지점의 진동 가속도 변화 이력 중 감쇠 구간을 선정한 예시이다.

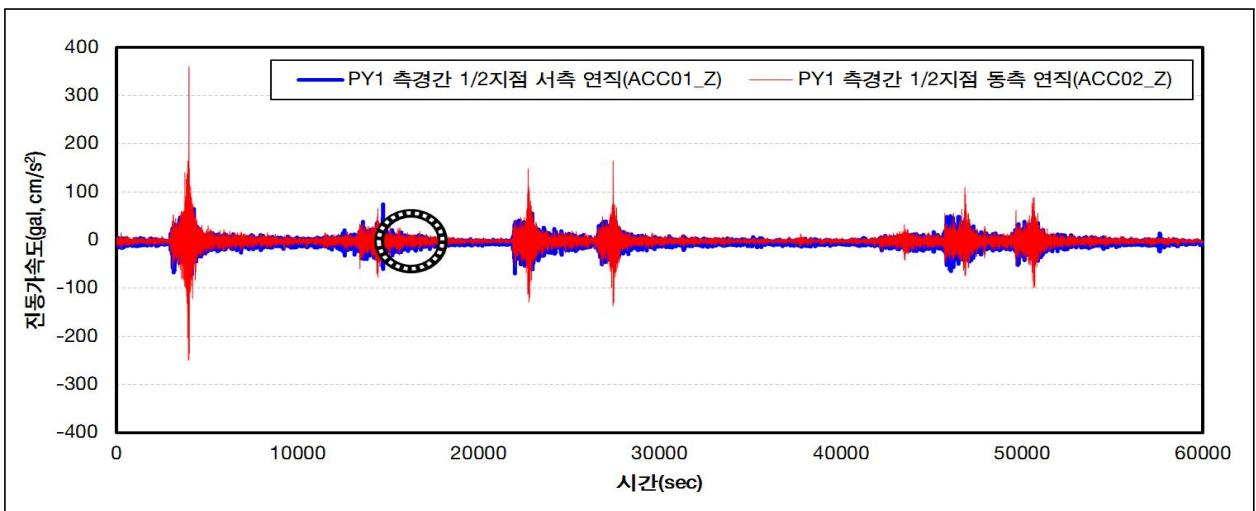


그림5.26 감쇠 파형 추출 구간 설정

## 5.4.2 감쇠비 계산

대상 교량의 감쇠비 산정을 위하여 GPS 신호, 동적 계측 신호의 센싱 신호처리 과정을 이용한다. 감쇠비 분석을 수행하면서 실제 교량에 대한 진동 파형들은 매우 다양한 영향 인자들에 의하여 중첩되어 나타나므로 정확한 감쇠비 계산을 위해서는 필터링과 샘플링 등을 통하여 정현파(sine wave)를 유도하는 작업이 선행된다.

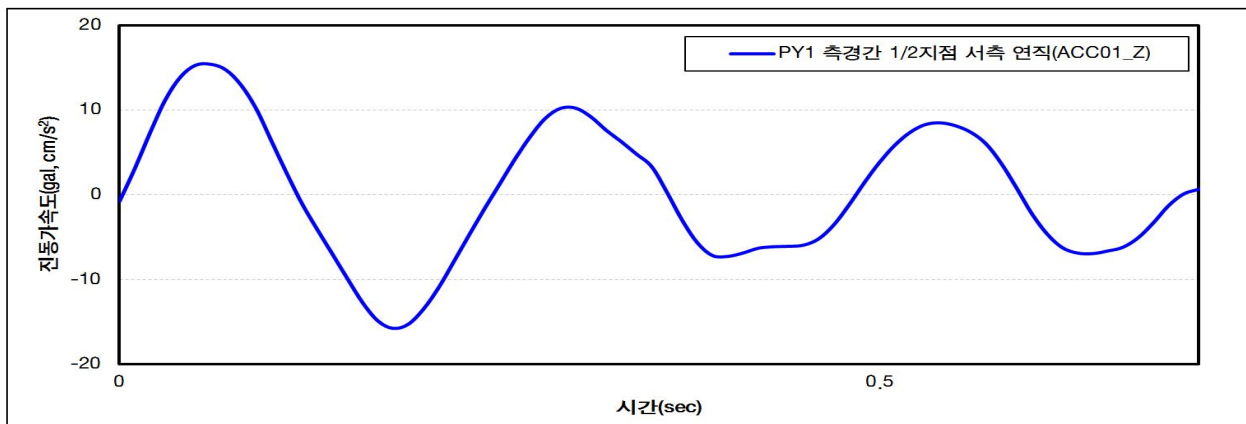


그림5.27 PY1 측경간 1/2지점 서측 감쇠진동 파형

$$\begin{aligned}
 a_n &= 14.85 \\
 a_{n+1} &= 6.69 \\
 n &= 3 \\
 \delta &= \frac{1}{n} \times \ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right) = \frac{1}{3} \times \ln\left(\frac{14.85}{6.69}\right) = 0.266 \\
 h &= \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0.266}{2\pi} = 0.042
 \end{aligned}$$

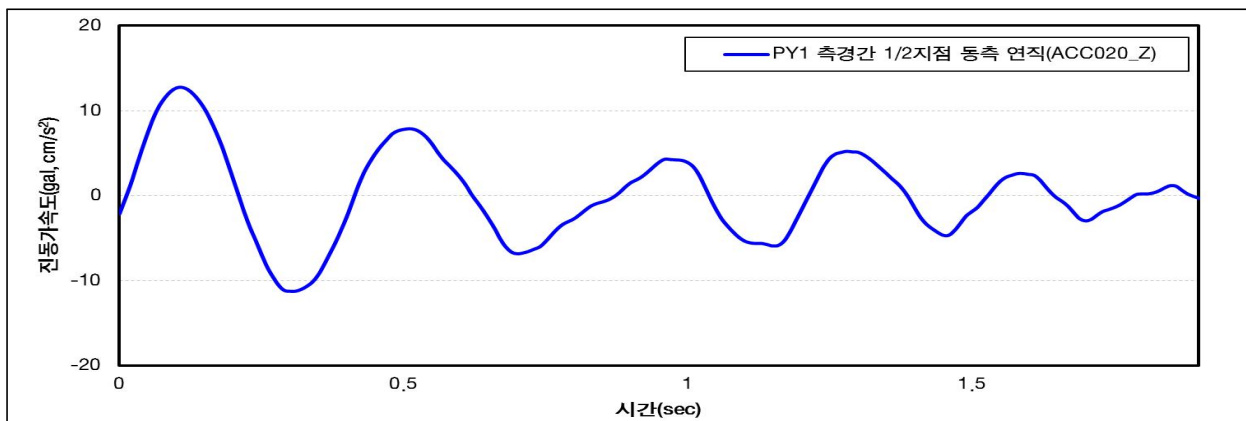


그림5.28 PY1 측경간 1/2지점 동측 감쇠진동 파형

$$\begin{aligned}
 a_n &= 11.25 \\
 a_{n+1} &= 2.96 \\
 n &= 5 \\
 \delta &= \frac{1}{n} \times \ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right) = \frac{1}{5} \times \ln\left(\frac{11.25}{2.96}\right) = 0.267 \\
 h &= \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0.267}{2\pi} = 0.043
 \end{aligned}$$

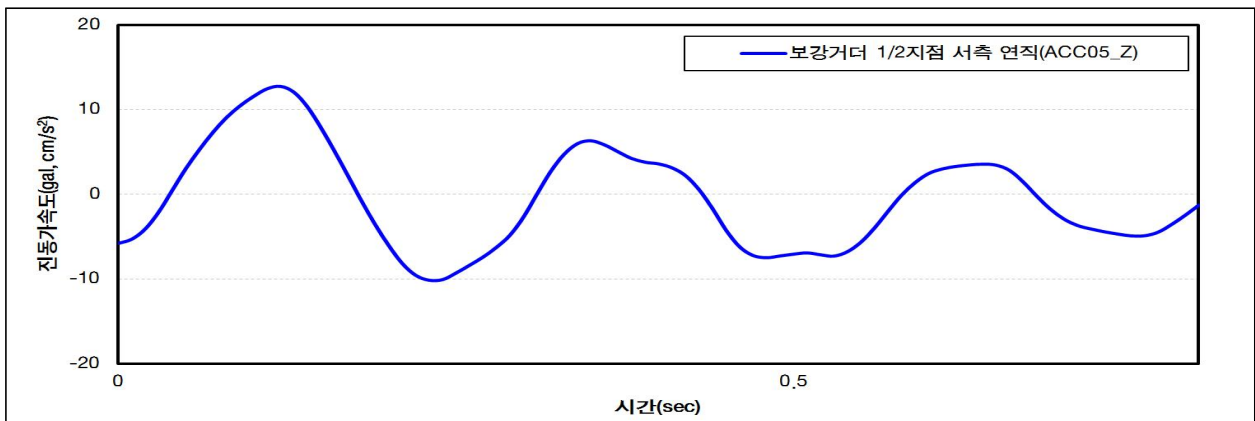


그림5.29 보강거더 1/2지점 서측 감쇠진동 파형

$$\begin{aligned}
 a_n &= 10.08 \\
 a_{n+1} &= 4.98 \\
 n &= 3 \\
 \delta &= \frac{1}{n} \times \ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right) = \frac{1}{3} \times \ln\left(\frac{10.08}{4.98}\right) = 0.235 \\
 h &= \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0.235}{2\pi} = 0.037
 \end{aligned}$$

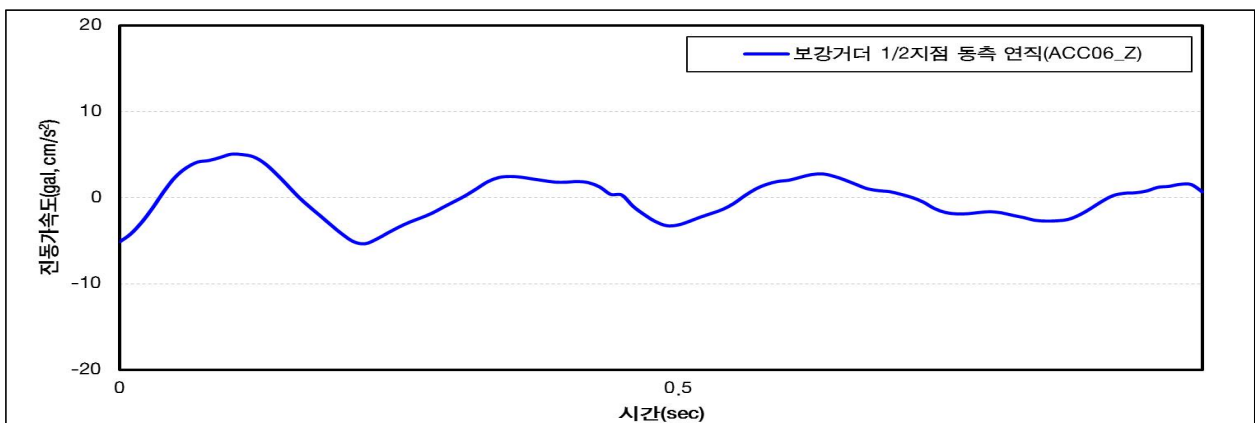


그림5.30 보강거더 1/2지점 동측 감쇠진동 파형

$$\begin{aligned}
 a_n &= 5.30 \\
 a_{n+1} &= 2.68 \\
 n &= 3
 \end{aligned}$$

$$\delta = \frac{1}{n} \times \ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right) = \frac{1}{3} \times \ln\left(\frac{5.30}{2.68}\right) = 0.227$$

$$h = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0.227}{2\pi} = 0.036$$

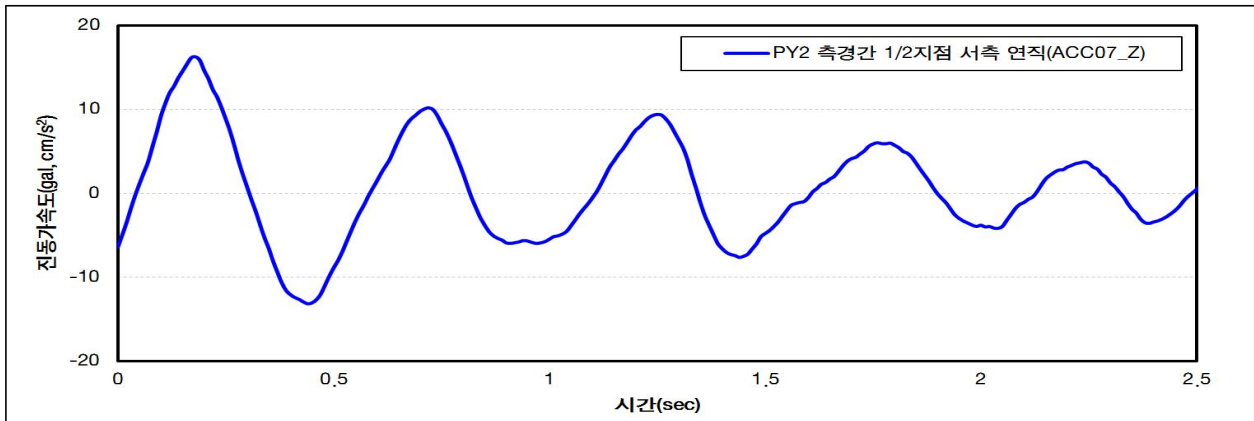


그림5.31 PY2 축경간 1/2지점 서측 감쇠진동 파형

$$\begin{aligned}
 a_n &= 13.06 \\
 a_{n+1} &= 3.42 \\
 n &= 5
 \end{aligned}$$

$$\delta = \frac{1}{n} \times \ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right) = \frac{1}{5} \times \ln\left(\frac{13.06}{3.42}\right) = 0.268$$

$$h = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0.268}{2\pi} = 0.043$$

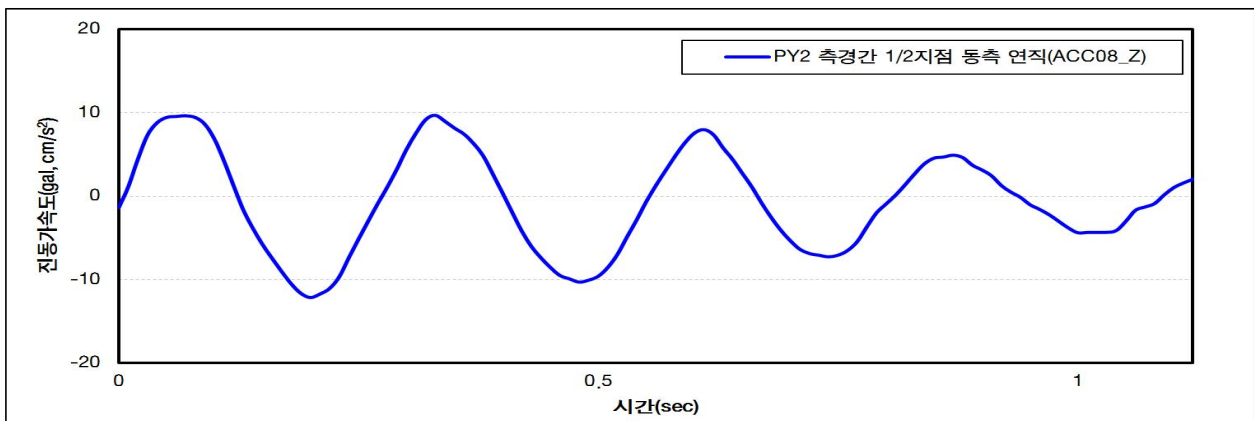


그림5.32 PY2 축경간 1/2지점 동측 감쇠진동 파형

$$\begin{aligned}
 a_n &= 12.16 \\
 a_{n+1} &= 4.34 \\
 n &= 4 \\
 \delta &= \frac{1}{n} \times \ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right) = \frac{1}{4} \times \ln\left(\frac{12.16}{4.34}\right) = 0.258 \\
 h &= \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0.258}{2\pi} = 0.041
 \end{aligned}$$

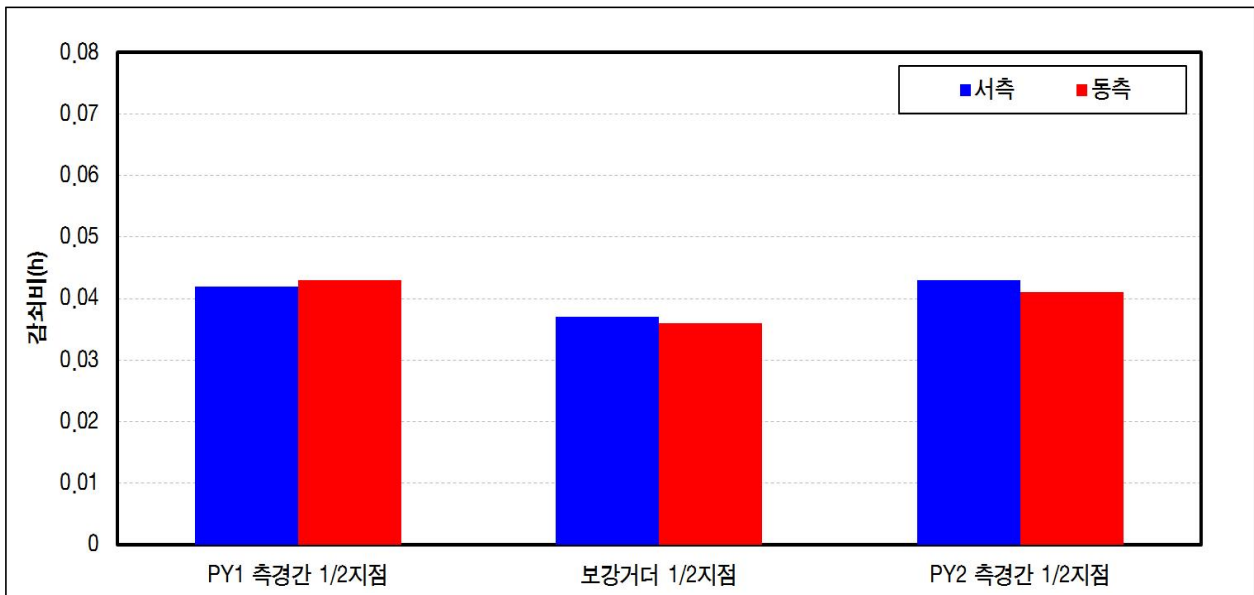


그림5.33 보강거더 위치별 감쇠비

표5.6 보강거더의 감쇠율 및 감쇠비

구분	PY1 측경간 서측	PY1 측경간 동측	중앙경간 서측	중앙경간 동측	PY2 측경간 서측	PY2 측경간 동측
감쇠율	0.266	0.267	0.235	0.227	0.268	0.258
감쇠비	0.042	0.043	0.037	0.036	0.043	0.041

일반적으로 교량의 구조부재 감쇠비는 약 5% 이하인 것으로 보고되고 있다.

특히 케이블 강교의 경우 감쇠비는 약 2% 수준으로 알려져 있다. A대교 보강거더의 감쇠비는 약 3.5~4.0% 수준으로 계산되어 신뢰할 수 있는 범위 내로 산정되었다.

교량에 있어 감쇠현상은 동적 특성과 더불어 손상도와 같은 교량의 건전성을 파악할



수 있는 지표로 활용되기도 한다.

일반적으로 교량의 강성이 강할수록 감쇠현상을 빨리 나타나게 되며, 반면에 강성이 약할수록 진동이 오래 지속되고 감쇠현상도 완만하게 지속된다.

즉 감쇠비가 클수록 진동이 바로 소멸함을 의미하며, 이는 교량이 충분한 강성도를 확보함에 따라 교량의 건전도가 양호하다고 판단할 수 있다.

A대교의 보강거더 감쇠비는 케이블 강교의 감쇠비보다는 다소 크게 산정되었으며, 이는 A대교의 강성도가 충분히 높고 교량 상태 또한 건전하다는 것을 의미한다.

한편, 본 절에서 수행한 진동 감쇠현상 중심의 동적 특성 분석에서는 감쇠비 계산을 위해 신호처리 과정이 포함되었다.

실제 현장에서는 다양한 원인에 의한 진동 파형들이 중첩되어 나타나기 때문에 감쇠비 분석을 위해 필터링과 샘플링 등을 통하여 정현파를 유도하는 작업이 수반되었다.

감쇠비 계산을 위해 사용된 데이터는 차량 통행을 완벽하게 통제하지 못한 상황에서 취득된 데이터이므로 산정된 감쇠비 값은 일정 수준의 오차가 포함될 수 있는 수치이다.

그러나 주경간 보강형의 3곳의 위치에서 모두 유사한 범위 내에서 감쇠비가 계산되었고, 계산된 감쇠비 값 자체도 일반적인 교량의 감쇠비 범위 내인 것을 고려할 때, 본 연구에서 수행된 진동 감쇠비는 충분히 신뢰성을 확보하였다고 판단된다.

## 제 6 장 FE Model과 IoT를 활용한 현수교의 건전도 분석

### 6.1 개요

A대교 준공 후 가장 동적 변위가 크게 발생할 것으로 예상되는 교면 재포장 공사를 전후로 수집된 데이터를 이용하여 교량의 건전도를 분석하였다.

A대교 1/2지점에 설치된 GPS 데이터를 통해 연직방향 변위를 확인하였고, 구조해석 모델과 비교를 통해 재포장 공사 전후의 건전도를 분석하였다. 이와 함께 공사 기간 내 센서 정상 작동 여부와 계측기 성능 검증 및 계측기 정밀도 확인도 병행 수행하였다.

A대교는 서남해안 관광 개발 여건을 개선하기 위해 최상의 기술이 집약된 초장대 현수교로 계획되어 지역 및 지형적 특성과 교량의 조형미, 시공성, 경제성 및 유지관리 등 제반 조건에 대한 면밀한 검토와 분석을 통해 설계하고 건설된 교량 구조물이다.

시·종점 접속노선과의 주행 연속성을 도모하고 장래 연계 방안 구축 시 광역교통축을 형성하는 도로의 기능성을 확보하기 위하여 통행속도는 60km/hr로 적용되었고 아래와 같은 특성이 있다. 표6.1은 A대교 구조기준이며, 표6.2는 종단 및 폭원이다.

- 기능별 구분 : 지방지역 간선도로
- 성격별 구분 : 산업도로 간선 기능과 관광도로 기능
- 위계상 구분 : 여수국가산업단지 진입도로
  - 여수축 : 도시계획도로 중로 1-27호선(L=6.750km)
  - 광양축 : 도시계획도로 중로 1호선(L=1.802km)

표6.1 A대교 구조기준

구 분		단 위	구조·시설기준	실시설계 적용	비 고
설 계 속 도		km / hr	60	60	
최대종단경사	평 지	%	5	4	
최소종단곡선 변 화 비 율	볼록(凸)	m / %	15	150	
	오목(凹)	m / %	15	-	
종단곡선 최소길이		m	50	1,200	

표6.2 A대교 종단 및 폭원

구분	형식				폭원	경간구성 및 연장
	상부	하부	기초	앵커리지		
현수교	타정식 현수교	H형 주탑	RCD 기초말뚝	지중식(묘도측) 중력식(광양측)	25.7m (연석포함)	357.5+1,545+357.5 =2,260m
현수교 주경간부						
<p>Twin 강박스 거더 적용</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 내풍 특성이 우수한 단면 (플러터 발현 풍속이 높음)</li> <li>→ 단면 최적화로 경제성 도모</li> </ul>						
현수교 측경간부						
<p>Single 강박스 거더 적용</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 중분대 변이구간 수용 (인지 반응시간을 고려 접속)</li> <li>→ 긴급 회차시설 설치장소 제공</li> </ul>						
인접공구 접속부						
<p>인접공구(제2,4공구)와의 폭원일치</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 원활한 접속으로 주행 연속성 도모 (신축이음 제3공구내에서 수용)</li> <li>→ 점진적 단면변화 :주행쾌적성 향상</li> </ul>						

## 6.2 FE Model

각 구조 요소의 변위 및 단면력 산출을 위한 3차원 모델을 기초로 구조해석을 수행하였다. 해석 모형은 실제 현수교의 형상을 모형화하는 것이 아니고 교량의 거동을 모사할 수 있도록 모델링 하였다.

3차원 해석모형의 케이블과 보강거더의 연결은 Fish Bone 모델에 근거하여 행어와 보강거더 도심에 연결하고, 하중은 비틀림 모멘트를 정확하게 산정하기 위해 전단중심을 고려하여 하중을 재하 하였다.

해석상의 기본방침은 다음과 같다.

- 고정하중 상태에서 계획 형상으로 한다.
- 해석 모형은 보강형, 주 케이블, 행어, 주탑, 부탑, 링크를 포함한다.
- 주 케이블, 행어는 탄성 현수선 요소로 한다.
- 받침 및 링크는 거동을 잘 표현할 수 있도록 스프링 요소를 적절히 모형화한다.

해석프로그램은 RM Bridge V11.04로써 교량전용 구조해석 프로그램을 이용하였다. 그림 6.1은 A대교 구조해석 유한요소 모델이며, 그림6.2는 A대교의 선형이다.

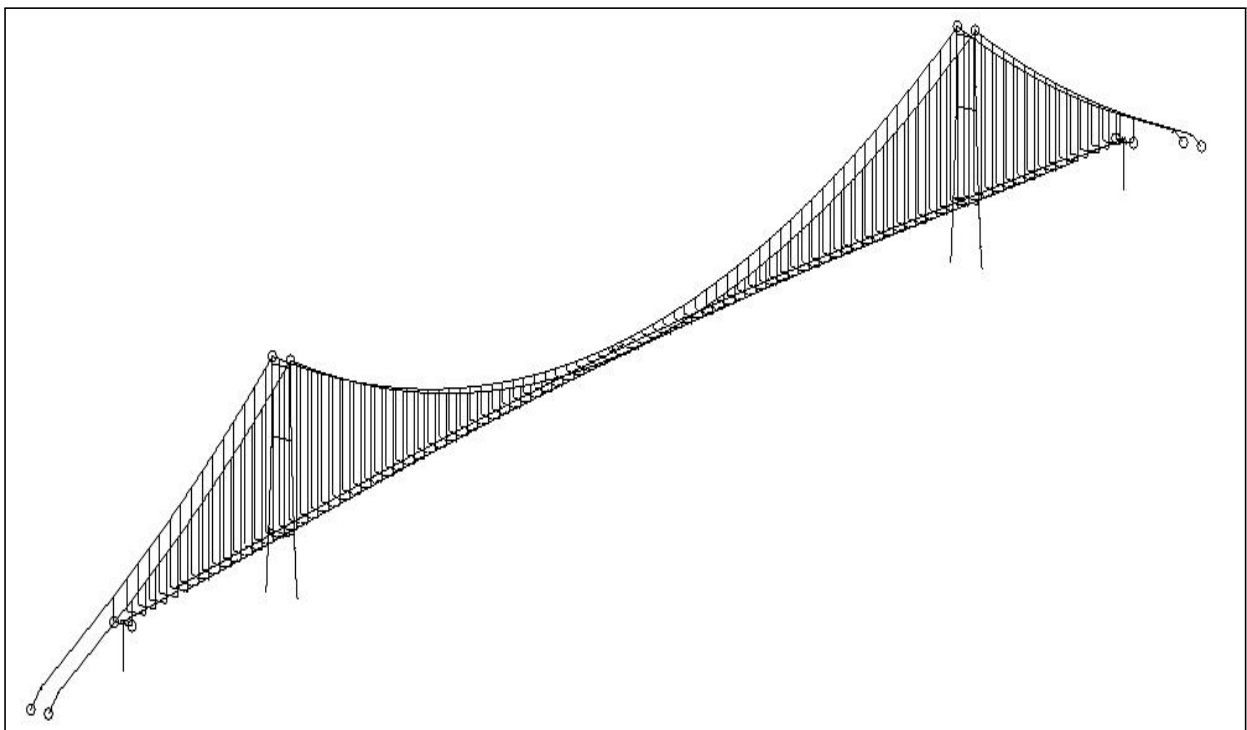


그림6.1 FE Model

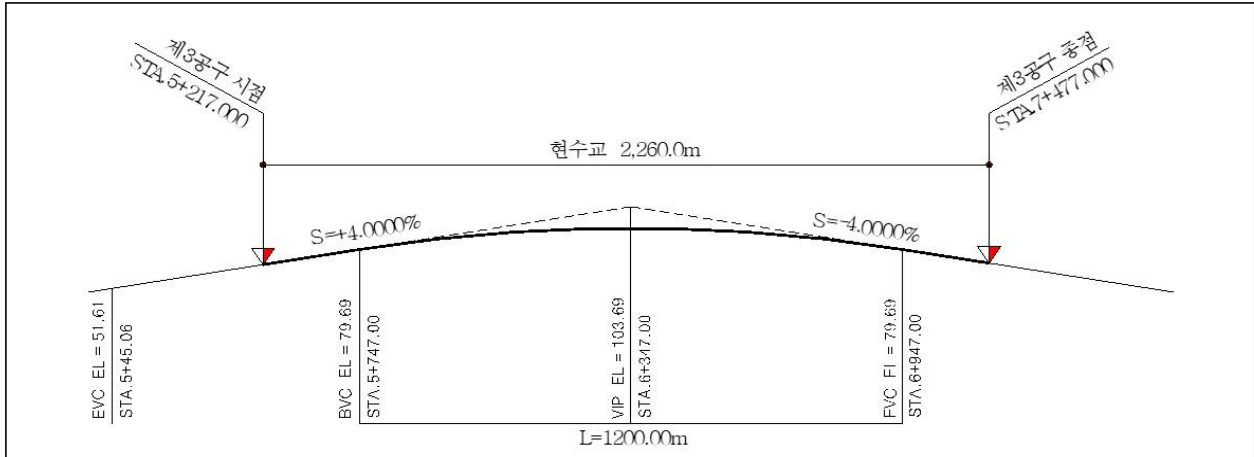


그림6.2 A대교의 선형

### 6.3 교면 포장 보수공사에 따른 교량 응답 검토

2021년 11월 A대교는 재포장 공사를 시행하였다. 그림6.3과 같은 공사 구간에 대한 교면 재포장 공사로 인해 교량에 발생한 구조물의 비정상 변위 응답을 구조해석을 통해 확인하고, 실제 계측값과 비교검토 하였다.

검토 하중은 고정하중과 포장 하중, 구조해석 프로그램은 Bentley사의 RM Bridge를 사용하였고, 해석모델은 실시설계 모델을 적용하였다.

검토단계는 보수공사 검측 대장을 기준으로 단계별로 하중을 구성하여 검토하였다.

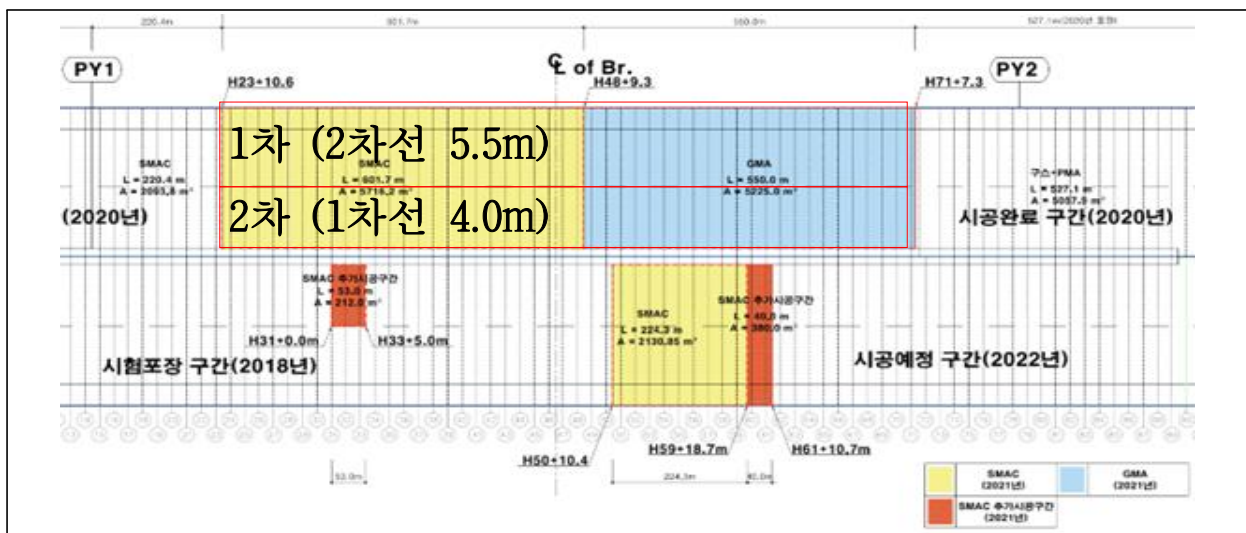


그림6.3 재포장 공사 구간

포장 하중 산정은 다음과 같으며, 재포장 공사 시공순서는 표6.3과 같다.

① 재료

- 단위중량 :  $2.5 \text{ tonf/m}^3 = 24.525 \text{ kN/m}^3$
- 포장두께 : 50 mm

② 적용하중

- 2차선 포장폭 5.5m = 6.744 kN/m
- 1차선 포장폭 4.0m = 4.905 kN/m

표6.3 A대교 재포장 공사 시공순서

구분		작업일수	시공순서
여수방향 H23~H48 5176.2m <sup>2</sup>	1차 (2차선)	1	구조물 깨기 및 면정리
		1	샷블라스팅 및 프라이머 도포, 성형줄눈제
		2	포장 - 하부, 상부
	2차 (1차선)	1	구조물 깨기 및 면정리
		1	샷블라스팅 및 프라이머 도포, 성형줄눈제
		2	포장 - 하부, 상부
	총계	8	

구분		작업일수	시공순서
광양방향 H50~H61 H31~H33 2722.85m <sup>2</sup>	1차 (2차선)	1	구조물 깨기 및 면정리
		1	샷블라스팅 및 프라이머 도포, 성형줄눈제
		2	포장 - 하부, 상부
	2차 (1차선)	1	구조물 깨기 및 면정리
		1	샷블라스팅 및 프라이머 도포, 성형줄눈제
		2	포장 - 하부, 상부
	총계	8	

A대교 교면 재포장 공사로 인한 구조물의 비정상 변위 응답을 구조해석을 통해 확인한 결과를 정리하면 표6.4에서 표6.7까지와 같다.

A대교 재포장 공사 시공에 따른 2차선 포장 하중 제거를 가정한 구조해석 결과는 여수방향 1654.62mm, 광양방향 1188.45mm, 중앙값 1421.53mm의 연직 방향 변위가 발생하는 것으로 계산되었다.

실제 재포장 공사 시공 당시 여수방향 1/2지점에 설치된 GPS 테이더는 그림6.4, 그림6.5와 같이 최대 1,627mm의 변위가 발생한 것으로 계측되어 구조해석 결과 대비 98.4% 수준의 관측치 신뢰성을 확보하였다.

시공 당시 공사용 중장비가 거더 상부에서 작업 중이었다는 점을 고려하더라도, 구조물은 건전한 상태를 유지하고 있고, 포장 공사도 양호하게 진행되었음을 확인할 수 있었다.

**표6.4 A대교 재포장 공사 여수방향 2차선 포장제거 구조해석 변위**

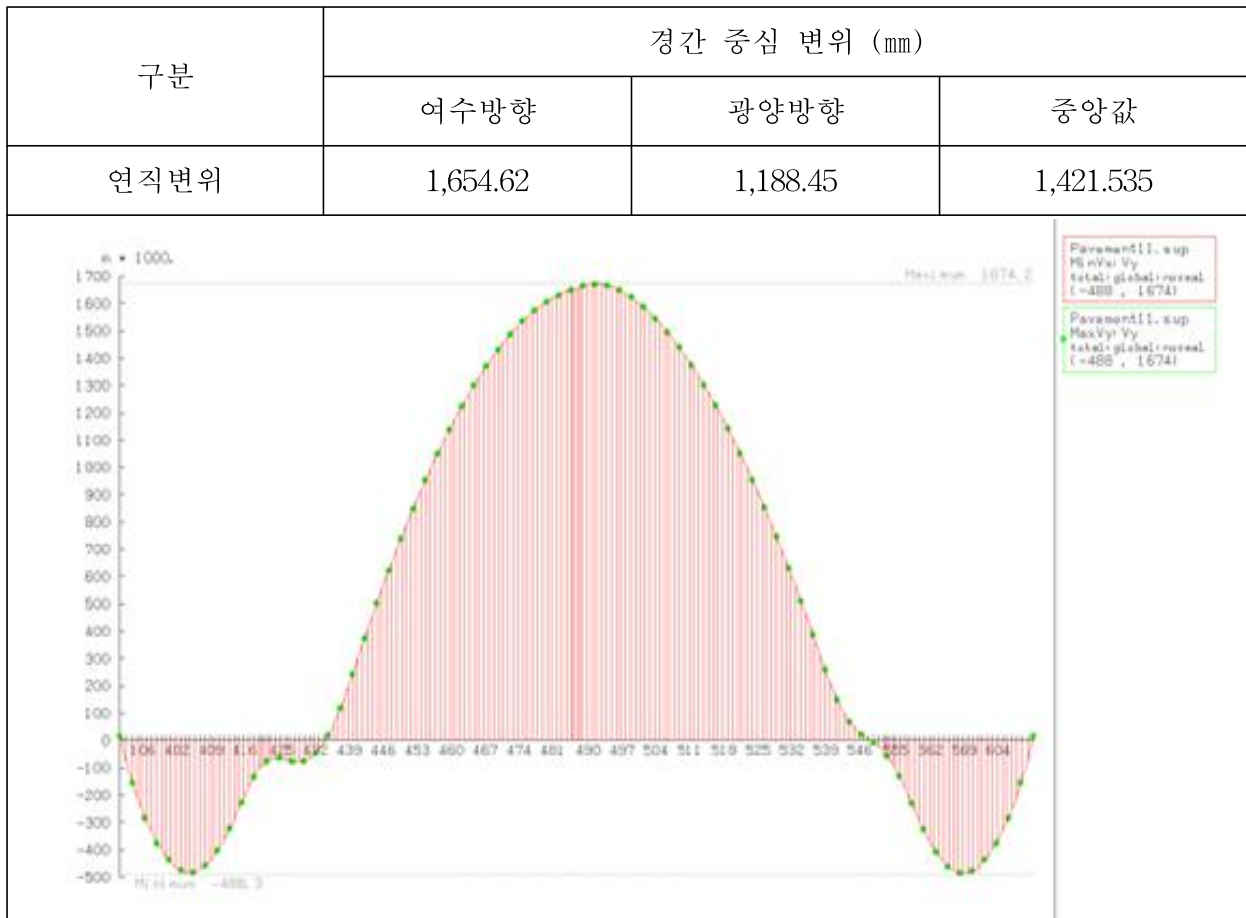


표6.5 A대교 재포장 공사 여수방향 1차선 포장제거 구조해석 변위

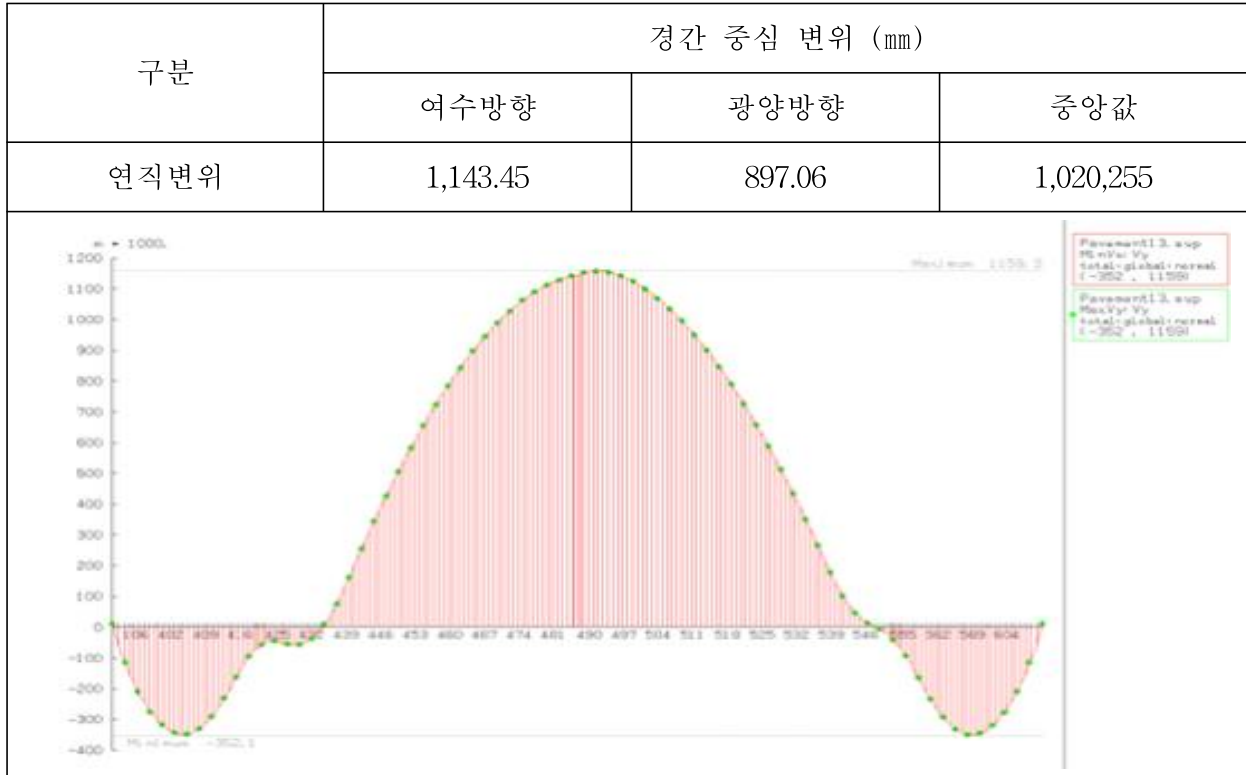


표6.6 A대교 재포장 공사 광양방향 2차선 포장제거 구조해석 변위

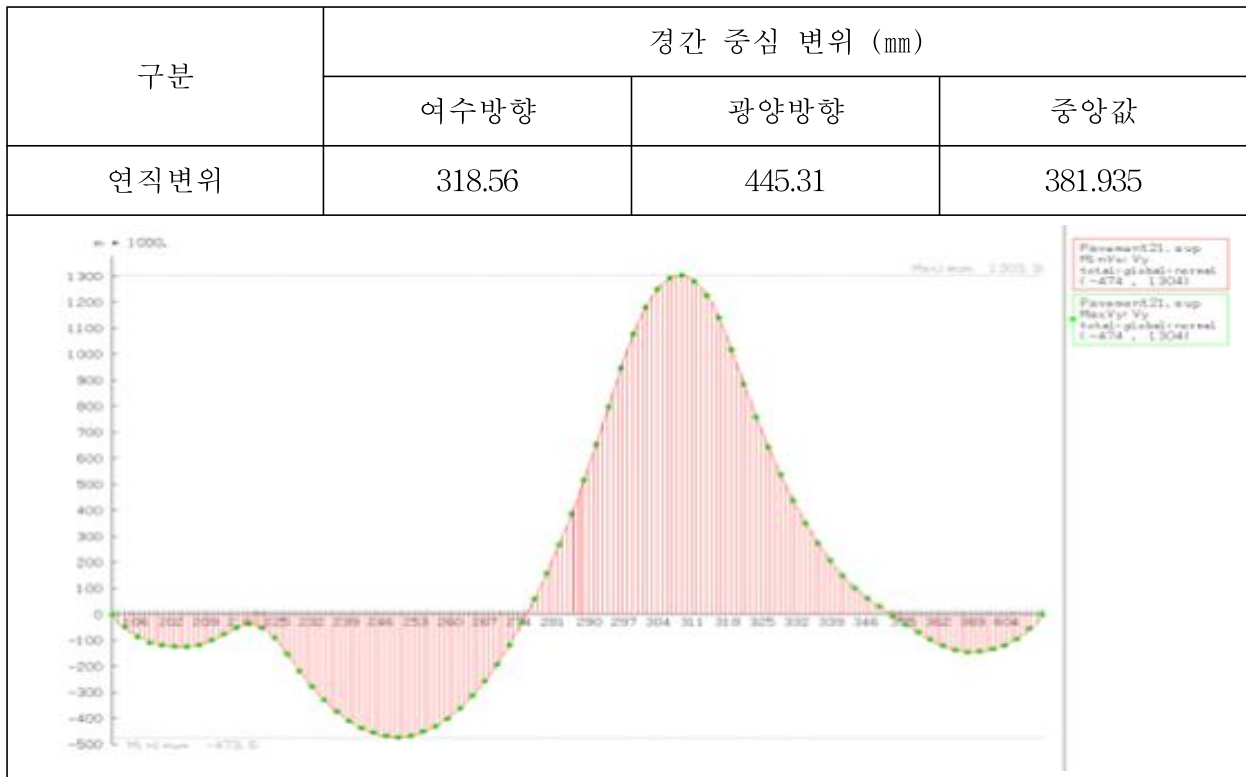




표6.7 A대교 재포장 공사 광양방향 1차선 포장제거 구조해석 변위

구분	경간 중심 변위 (mm)		
	여수방향	광양방향	중양값
연직변위	243.75	317.58	280.665

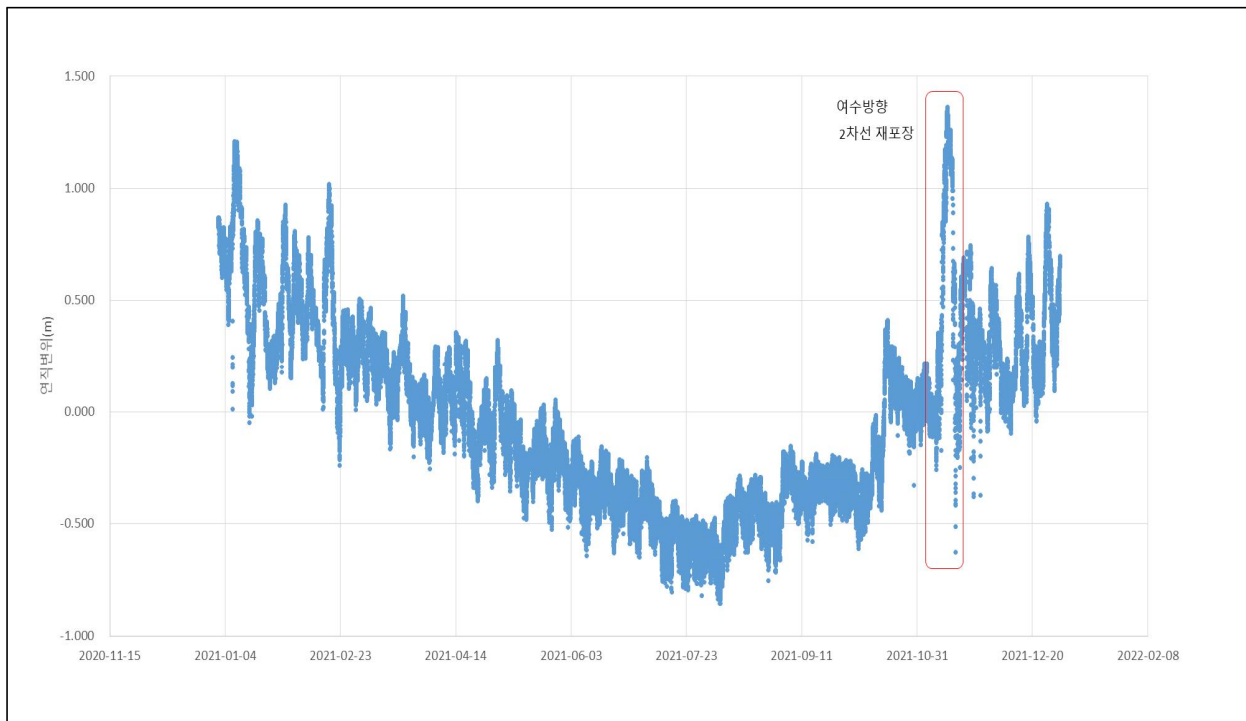
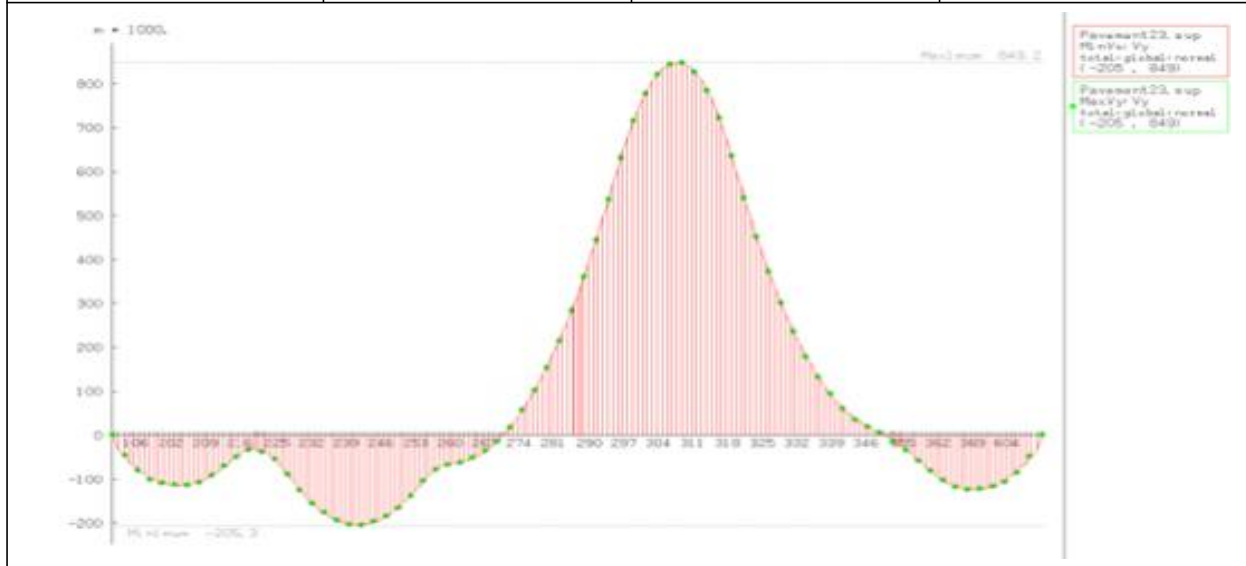


그림6.4 2021년 연직변위 관측 데이터

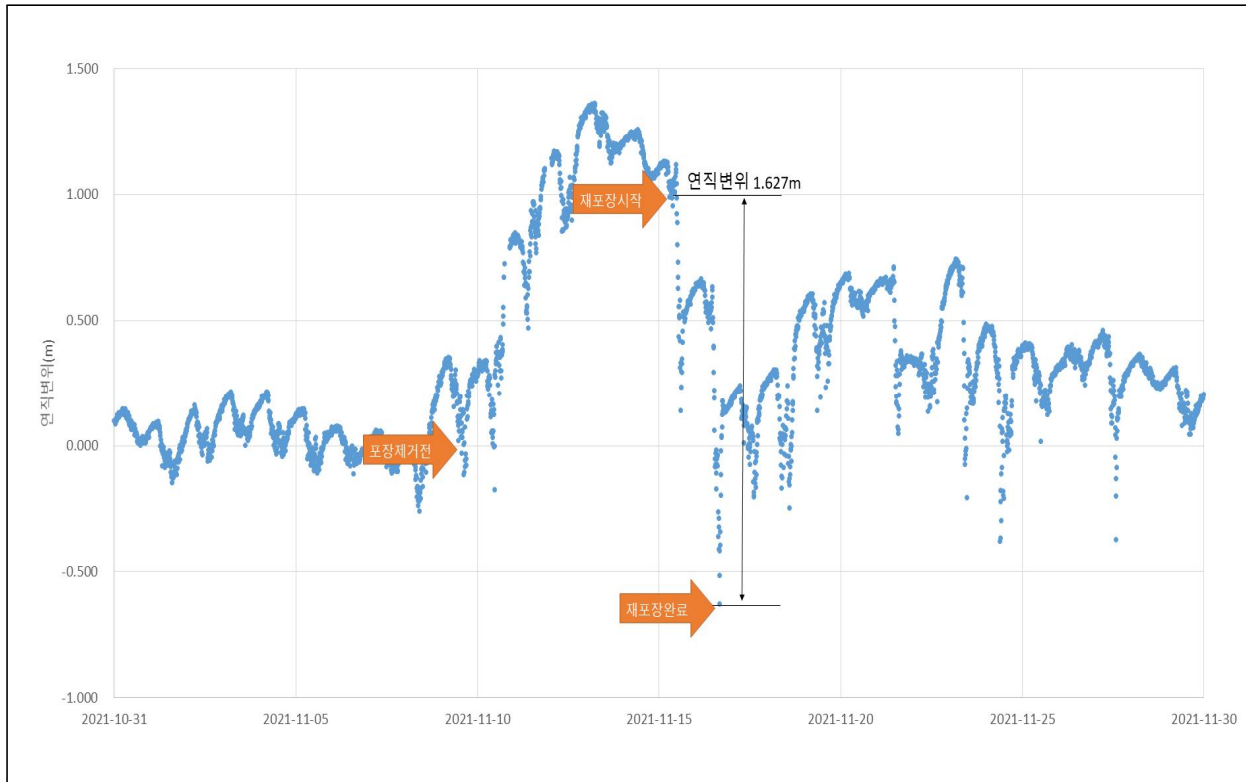


그림6.5 재포장 공사 기간 관측 데이터 변화

## 6.4 소결

IoT 센서 시스템의 일부인 GPS 계측데이터와 구조해석 결과를 비교하여 2021년 11월 실시한 교면 재포장 공사의 포장 하중을 재하 하중으로 건전성을 분석한 결과 A대교는 안전성을 확인할 수 있었다.

이와 같은 결과를 바탕으로 IoT 센서와 FE Model을 활용한 디지털 트윈 기반의 교량 안전관리 및 공사관리 시스템 구축이 가능한 것으로 판단된다.

## 제 7 장 결 론

본 연구에서는 A대교에 구축된 IoT 센싱으로 획득한 계측데이터를 정리하여 관리자가 시설물 안전과 유지관리를 원활히 할 수 있는 기준값을 제시하였다.

그리고 획득한 자료를 비교 분석하여 IoT 센싱 기술의 도입 가능성을 평가하고 이를 활용하여 교량 동적 거동에 능동적으로 대체할 수 있는 IoT 센싱 제어시스템의 개발 필요성을 검증하였는바, 현수교 등 장대교량의 안전관리 효율성을 향상하는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 교량의 계측자료에 있어서 온도변화와 풍속변화와 관련된 계측항목은 구조물의 거동에 영향을 미치는 중요한 계측항목으로서, 타 계측항목의 분석에 있어서 보조자료로 사용되기 때문에 정밀한 계측값 획득이 중요하다. 풍속변화를 관찰한 결과 보강거더에 비하여 주탑 정부의 풍속이 더 크게 발생하는 것으로 확인되었으며, 관측치 획득 시험 기간 내 최대풍속은 주탑 정부에서 15.98m/s로 확인되었으며, 보강거더에서도 같은 시간대 10.51m/s의 최대풍속이 확인되었다.
2. 계측 모니터링 데이터 분석을 통해 2축 경사계 변위 측정 결과 PY1 윈드슈의 경우 광양(중앙경간)측으로 285.37mm, 중단 가로보의 경우 광양(중앙경간)측으로 495.41mm, 상단가로보의 경우 광양(중앙경간)측으로 378.43mm의 최대 변위가 발생하였으며, PY2 윈드슈의 경우 광양(측경간)측으로 213.60mm, 중단 가로보의 경우 여수(중앙경간)측으로 316.78mm, 상단 가로보의 경우 여수(중앙경간)측으로 282.77mm의 최대 변위가 발생하였다. 이는 교량 구조물의 안정성 및 건전도에 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.
3. 계측 모니터링 데이터 분석을 통해 2축 가속도계 계측 결과 차량 통행량이 많은 시간대에 진동이 크게 나타났으며, 이는 산업단지를 잇는 A교량의 특성상 대형차 통행이 잦아 교량 진동에 미치는 차량의 영향이 크다고 판단된다. 주탑의 경우 미진(0.8~2.5gal), 보강거더 교축 직각 방향의 경우 경진(2.5~8gal), 보강거더 연직

방향의 경우 약진(8~25gal)으로 관측되었으며, 이러한 진동들은 교량의 구조적 안정성이나 건전도에는 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

4. 계측 모니터링 데이터 분석을 통해 PY1의 교축 방향의 경우 0.046gal, 교축 직각 방향의 경우 0.000gal, 연직 방향의 경우 0.020gal의 진동이 증가한 것으로 확인되었으며, PY1은 교축 방향의 경우 최대 0.041gal, 교축 직각 방향의 경우 0.044gal, 연직 방향의 경우 0.039gal의 최대 진폭이 발생하였다. 이는 차량 통행으로 인한 주탑 기초부에 발생하는 진동의 경우 주탑 건전성에 영향을 미칠만한 수준의 진동이 아닌 것으로 판단된다.
5. 행어로프의 장력을 감시하기 위하여 PY1 측경간 행어로프 7번, 10번, 13번 동측에 3개소, PY2 측경간 행어로프 80번, 83번, 86번 서측에 3개소, 총 6개소에 1축 가속도계가 설치되어 있다. H7번의 경우 809.24kN, H10번의 경우 820.74kN, H13번의 경우 892.47kN, H80번의 경우 890.90kN, H83번의 경우 798.18kN, H86번의 경우 728.87kN의 최대 장력이 확인되었다. 또한 설계장력 대비 최대 장력과의 오차를 확인해보면 H7번에서 3.1%, H10번에서 4.2%, H13번에서 1.1%, H80번의 경우 0.8%, H83번의 경우 6.8%, H86번의 경우 12.6%의 오차가 확인되었다. 이는 간접적인 방법을 통해 로프의 장력을 유추하므로 인해 다소 오차가 발생한 것으로 판단된다.
6. 동적 특성 분석을 위한 계측 결과 행어로프의 진동 가속도는 측경간, 주경간 모두  $\pm 120$ gal 수준의 진동 가속도 크기를 나타내어 정상적 범위 내에서 행어로프의 구조적 거동이 이루어지고 있음을 확인하였다. 또한, 행어로프 장력의 경우 설계장력 대비 3~15% 정도의 오차율을 보였으나, 이는 풍하중과 차량 하중에 의한 오차와 진동방정식을 통해 간접적으로 획득한 장력 값임을 고려하면 충분히 발생할 수 있는 오차율로서 행어로프의 거동은 안정적 수준임을 확인하였다.
7. 스트랜드의 장기적인 장력 변화 및 거동을 감시하기 위하여 정적 변형률계가 설치되어 있다. AN1 서측의 경우 29번 스트랜드 하부에서 166.22kN, 상부에서 159.26kN의 최대 장력이 발생하였으며, 동측의 경우 29번 스트랜드 하부에서 154.06kN, 상부에서 146.61kN의 최대 장력이 발생하였으며, AN2 동서 측 스트랜드

최대 장력 변화를 살펴보면, 서측의 경우 5번 스트랜드 하부에서 147.49kN, 상부에서 142.88kN의 최대 장력이 발생하였으며, 동측의 경우 17번 스트랜드 하부에서 148.67kN, 상부에서 137.88kN의 최대 장력이 발생하였다. 이는 온도가 상승하면서 상부구조 하중의 증가로 인하여 이와 같은 거동이 발생하는 것으로 판단된다.

8. 본 연구에서 수행한 진동 감쇠현상 중심의 동적 특성 분석에서는 감쇠비 계산을 위해 GPS 신호, 동적 계측 신호 등의 센싱 과정이 포함되었다. 감쇠현상 분석을 통하여 교량의 건전성을 파악할 수 있으며, 본 연구에서는 차량 통행을 완벽히 차단하지 않은 상황에서 획득된 데이터로 감쇠비 값은 일정 수준의 오차가 포함될 수 있다. 주경간 보강형에서 모두 근사한 범위에서 감쇠비가 산출되었으며, 감쇠비 값 자체도 일반적인 교량의 감쇠비 범위 내인 것을 고려할 때, 진동 감쇠비는 충분히 신뢰성을 확보한 것으로 확인되었다. 또한, 교량의 구조부재의 감쇠비는 약 5% 이하인 것으로 나타났다. 특히 A대교 보강거더의 감쇠비는 약 3.5~4.0% 수준으로 계산되어 신뢰할 수 있는 범위 내로 산정되었다.
9. 최근 실시한 A대교 교면 재포장 공사로 인해 교량에 발생한 구조물의 비정상 변위 응답을 FE 구조해석을 통해 산정하였고, 산정값과 실제 계측데이터와의 비교 검토를 수행한 결과, 구조해석 결과 대비 98.4% 수준의 계측값이 확인되었다. 따라서 현재 구조물은 건전 상태를 유지하고 있고 포장 공사도 양호하게 진행되었음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 IoT센싱과 FE Model을 활용 디지털 트윈 기반의 교량 안전 및 공사관리 시스템 구축이 가능함을 검증하였다.

센서를 통한 계측 모니터링 데이터 분석은 신뢰성을 확보할 수 있다. 더욱 정밀한 실시간 IoT 센싱 기술로 얻은 데이터의 수집을 통한 빅데이터는 교량 거동 분석에 있어 신뢰성 큰 값의 예측이 가능하다고 할 것이다.

교량 유지관리의 효율성과 정밀성·경제성 향상을 위해서는 IoT 센서를 기반한 소규모 계측장비를 국내 주요 교량에 설치하고 그 계측값을 수집하여 교량 거동 분석 비교 자료로 활용하는 것이 필요하다고 판단된다.

센싱을 통한 실시간 측정 데이터를 거동 형태나 상태 이상을 읽어낼 수 있는 분석기술 개발의 토대로 활용할 수 있게 하기 위해서도 현수교를 비롯한 다양한 교량에 IoT 센싱 구축은 필요과제가 될 것이다.

또한, IoT 계측관리 기술을 통해 얻은 데이터의 더 효율적 관리를 위해 Data 유지관리 센터 설치도 필수적이다. 서울시설공단은 청담대교와 탄천2 고가교에 무선 센싱장비 구축을 시작으로 구조물 안전상태와 사고상황을 모니터링하는 작업을 이어가고 있다.

이처럼 주요 교량을 대상으로 IoT 센싱 기술을 활용한 디지털 트윈을 구축하고 이를 효율적으로 관리할 수 있는 가칭 교량 관리공단이 설립된다면, 케이블 교량 등 장대교량(연도·연륙교)이 건설되는 시점에서 교량 관리공단 내 디지털 센터의 구축과 아울러 수집된 자료를 실시간으로 분석하여 상태 이상을 감지하고 즉각적인 보수가 이어질 때 안전사고 예방은 물론 유지관리 비용 감소와 더불어 교량 분석·관리 전문인력 양성에도 도움을 줄 것으로 예상된다.

끝으로 본 연구를 통해 검증된 현수교의 IoT 계측 분석 결과는 센서와 ICT (Information and Communication Technology) 기술을 융합한 실시간 교량 상태감시 및 예측 대응체계 구축의 필요성에 대한 근거로 활용할 수 있고, 향후 다양한 교량과의 접목은 물론 대형 SOC 등 도시기반시설의 안전감시, 공사관리, 통합관리 및 기대수명을 예측하는 지능형 IoT 계측체계가 건설 분야에 확대·발전하는 토대가 될 것이다.

본 연구의 결과를 바탕으로 향후 지속해서 케이블 교량의 안전성과 사용성을 확보하기 위한 지능형 IoT 계측관리 체계를 발전시키는 연구가 지속된다면, 이를 통해 연륙·연도교 등 초대형 교량은 물론 통행량이 많은 시가지 내 노후 교량의 유지관리 체계에도 많은 발전이 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. AASHTO. (2010). AASHTO LRFD Bridge Design Specification. American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. Park K J, Hwang E S. (2016). Assessment of Vibration Serviceability for Steel Cable-Stayed Bridges Using GNSS Data. *International Journal of Steel Structures*, 16(4), 1251-1262.
3. Reliable Multihop Routing in Sensor Networks, SenSys Los Angeles, California, 4-27
4. 구정호 (2012). 처짐 이론을 이용한 타정식 및 자정식 현수교의 간략 해석법. 성균관대학교 석사학위 논문.
5. 국토교통부 (2020). 국내외 사물인터넷 산업 동향. 경제산업통계 제4호, 1-7.
6. 국토교통부 (2022). 건설공사 표준시방서.
7. 김남식 (2022). 진동법을 이용한 인장 케이블의 장력 추정에 관한 연구. **한국소음진동학회 논문집** 제12권 제12호, 956-963.
8. 김은진, 조수진, 심성한 (2015). 구조물 건전성 모니터링을 위한 스마트센서 관련 최근 연구 동향. **한국 구조물진단 유지관리공학회 논문집** 제19권 제3호, 11-12.
9. 김정훈, 송재호 (2009). 계측 모니터링 시스템을 활용한 자정식 현수교의 구조성능 평가. **한국 구조물진단 유지관리공학회** 제13호 2권, 191-192.
10. 김종춘, 박원주, 박진오, 박상현 (2018). 실시간 모니터링을 위한 LoRa LPWAN 기반의 센서네트워크 시스템과 그 제어 방법. **한국 전산구조공학회 논문집** 제31권 제6호, 360.
11. 권태호, 정규산, 박기태, 김병철, 김재환 (2020). 중소교량의 지리적 특성을 고려한 무선 전력 및 통신 기술 기반 교량 장기 계측시스템 구축 방안 연구. **한국 구조물진단 유지관리공학회 논문집** 제27권 제4호, 86-93.
12. 박상기, 김재환, 서동우 (2023). 해상교량 통행 안전을 위한 IoT 기반 재난 정보 제공 스마트 플랫폼 개발. **한국방재안전학회 논문집** vol. 16 No.1, 109-110.
13. 박지현, 신성우, 김수용 (2018). 교량 모니터링 빅데이터를 이용한 광안대교의 교통량 의존 변위 추정 모델. **대한토목학회 논문집** vol. 38 No. 2, 183-184.
14. 배인환, 김성태 (2022). 3차원 자정식 현수교의 장기 구조 거동 특성 분석. **한국 구조물진단 유지관리공학회** 논문집 제26권, 240.

15. 연상호, 김종수, 연춘흠 (2019). 스마트센서 기반의 교량 시설물 안전 모니터링 기법 연구. *한국 지리 정보학회지* vol. 22 No 2, 98-99.
16. 이명재, 김재홍, 정승욱, 권호철 (2007). 묘도-광양 간 초장대 현수교의 동적 설계 및 진동 사용성 평가. *한국 강구조공학회* vol.79 No. 3, 28-37.
17. 임준성, 유세복, 김양수 (2020). 빅데이터 플랫폼 기반 도로 시설물 안전관리 모니터링 시스템. *한국정보기술학회 논문지* vol. 18 No 11, 143.
18. 조병완, 김현, 이윤성, 김도근 (2016). 센서네트워크 기반 실시간 교량 안전관리를 위한 지능형 구조 건전성 모니터링시스템 개발. *한국 콘텐츠 학회논문지* vol.16 No 2, 228.
19. 송정걸, 김학수, 정영화, 이상우, 남왕형, 장동휘 (2008). 무선센서네트워크 환경의 웹 기반 교량 모니터링시스템. *한국 방재학회 논문집* 제8권 5호, 35-36
20. 허광희, 전준용 (2015). 장대교량의 구조 건전도 모니터링을 위한 구조식별 기술(최적 센싱 및 FE 모델 개선 중심으로). *한국소음진동공학회 논문집* 제25권 제12호, 840.
21. 박기정 (2019). 케이블 교량의 처짐 및 진동에 대한 사용성 기준 연구. 경희대학교 박사학위 논문.
22. 최 현 (2008). 상시모니터링 데이터를 이용한 케이블 교량의 장력 관리 방법 연구. 서울시립대학교 석사학위 논문.
23. 스마트방재시스템(주) (2023). IoT 기반의 지능형 연기 입자 분석 센서 및 화재 안전 플랫폼 구축을 위한 개발 연구. 국토교통기술사업화지원사업 보고서.
24. 이재운 (2021). 빅데이터 개론(빅데이터 활용 요소와 데이터 사이언티스트), <http://blog.naver.com>.
25. 장병준 (2005). RFID/USN 기술개발 동향 및 발전 전망. *한국 인터넷 정보학회* 제5권 제3호, 76-77.
26. 전라남도 (2006). 여수국가산업단지 진입도로(3공구) 실시설계 보고서.
27. 전황수 (2016). 국내외 공공부문에서의 IoT 적용사례. 정보 통신 기술 진흥센터 주간 기술 동향 2월, 8-10.
28. 정보통신전략위원회 (2021). DNA(Data, Network, AI)가 융합된 대형 교량 디지털 트윈 구축(디지털 트윈 활성화 전략), 1-2, 26-27.
29. 강성인, 이원우, 송미화, 길홍배 (2021). 고속도로 IoT 센서 수용을 위한 디바이스 표준모델 연구. 한국도로공사 도로교통연구원 연구보고서, 26-28.
30. 정유석, 오주삼, 강태욱, 김영진, 정도영 (2020). IoT 기반 구조물의 예방적 손상 진단



- 기술개발. 한국건설기술연구원, 4-5.
31. 중앙대학교 산학협력단, 반석 안전 주식회사 (2023). 스마트 브리지 Level 3을 위한 IoT센싱 및 클라우드 시스템 개발. 국토교통기술사업화지원사업 보고서, 12-13, 19.
  32. 큐센텍, 에스큐엔지니어링(주) (2023). IoT 저전력 통신 기반 디바이스를 통한 시설물 데이터 수집분석 및 모니터링 기술. 국토교통기술사업화지원사업 보고서, 1-2.
  33. 한국건설기술연구원 (2022). 건설 IoT 시장 및 기술 동향. 스마트 건설 리포트 제5호, 7-11.
  34. 한국건설기술연구원 (2022). DNA 기반 노후 교량 구조물 스마트 유지관리 플랫폼 및 활용 기술개발, 323-326.
  35. 홍상연, 이석민, 임희지, 김상일, 박희석, 황민섭, 주재욱 (2021). 서울시 사물인터넷 활용방안. 서울연구원 정책과제연구보고서, 1-124.
  36. 행정안전부 (2018). 지진가속도계측기 설치 및 운영기준(행정안전부 고시 제2018-72호).
  37. 황의승, 권영철, 박기정, 김도영 (2014). 장경간 현수교의 처짐 사용성. 한국 교량 및 구조공학회 2014년도 총회 및 기술 컨퍼런스, 129-130.