3㎝

16RTRP-B070588-04

4㎝

도시철도 역사에너지 절감기술 개발 최종보고서

2018

국토교통과학기술진흥원

국토교통부

Energy Saving Technology Development of Urban Railroad Station

3 ㎝

발간등록번호
11-B551201-000111-01

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )

철도기술연구사업 최종보고서

R&D / 16RTRP-B070588-04

도시철도 역사에너지 절감기술 개발 최종보고서

2018. 04.

주관연구기관/한국철도기술연구원
공동연구기관/고려대학교
공동연구기관/한양대학교
공동연구기관/한국건설생활환경시험연구원
공동연구기관/서울교통공사
공동연구기관/벽산파워(주)
공동연구기관/(주)피앤이솔루션
공동연구기관/(주)지필로스
공동연구기관/금오전력(주)
공동연구기관/(주)비엔텍아이엔씨
공동연구기관/(주)이에이엔테크놀로지

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘도시철도 역사에너지 절감기술 개발’(연구개발 기간 : 2013. 12. 27 ~ 2018. 4. 26) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018. 04. .

주관연구기관명 : 한국철도기술연구원 나희승 (인)
공동연구기관명 : 고려대학교 고제상 (인)
공동연구기관명 : 한양대학교 안진호 (인)
공동연구기관명 : 한국건설생활환경시험연구원 김경식 (인)
공동연구기관명 : 서울교통공사 김태호 (인)
공동연구기관명 : 벽산파워(주) 최중인 (인)
공동연구기관명 : ㈜피앤이솔루션 정대택/김용은 (인)
공동연구기관명 : (주)지필로스 박가우 (인)
공동연구기관명 : 금오전력(주) 오정교 (인)
공동연구기관명 : (주)비엔텍아이엔씨 이호석 (인)
공동연구기관명 : (주)이에이엔테크놀로지 신지웅 (인)

주관연구기관책임자 : 정호성 책임
공동연구기관책임자 : 주성관 교수
공동연구기관책임자 : 김주형 교수
공동연구기관책임자 : 이상문 센터장
공동연구기관책임자 : 김진영 부장
공동연구기관책임자 : 이재규 상무
공동연구기관책임자 : 이재민 이사
공동연구기관책임자 : 박가우 대표이사
공동연구기관책임자 : 오종빈 이사
공동연구기관책임자 : 이호석 대표이사
공동연구기관책임자 : 고정림 부사장

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>16RTRP-
-B070588-04</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td>2013.12.27
~ 2018.4.26</td><td>단계구분</td><td>1단계/1단계</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">철도기술연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">도시철도 역사 운영 효율화 및 상태기반 유지보수 기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">-</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">도시철도 역사에너지 절감기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">정호성 책임</td><td>해당단계
참여
연구원 수</td><td>총 : 91명
내부 : 84명
외부 : 7명</td><td>해당단계
연구개발비</td><td>정부 : 6,919,662천원
기업 : 2,409,500천원
정부 외 : 천원
계 : 9,329,162천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여
연구원 수</td><td>총 : 91명
내부 : 84명
외부 : 7명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부 : 6,919,662천원
기업 : 2,409,500천원
정부 외 : 천원
계 : 9,329,162천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속 부서명</td><td colspan="3">한국철도기술연구원
스마트전기신호본부</td><td colspan="2">참여기업 : 벽산파워㈜,
㈜피앤이솔루션, ㈜지필로스,
금오전력㈜, ㈜비엔텍아이엔씨,
㈜이에이엔테크놀로지</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명:</td><td colspan="2">연구책임자:</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약

○ 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템
- 400kWh급 ESS 및 계통연계형 200kW급 PCS
- 500kW급 모듈형 회생에너지 전력변환장치(DC/DC)
○ 전력저장장치 연계형 도시철도 역사용 경량 태양광 발전시스템
- 경량형 4×9 실리콘 결정질 경량모듈(10.8kW)
- 곡면 적용 플렉시블 태양광 모듈(7.2kW)
○ 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템
- TLS 흡열모듈
○ 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템
- 고효율 IE4 SynRM, 가변제어 인버터
○ 도시철도 통합 에너지 운영시스템
- 태양광 및 전력수요 고려한 에너지저장장치 최적 충·방전 알고리즘
- MESA/SunSpec Energy Storage 표준 및 분산형 oBIX(EIG) 기반 EMS 플랫폼
○ 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션
- 객체정보기반 도시철도 역사 에너지모델 연동 모듈 및 해석 UI
○ 실증 테스트베드 구축
- 수락산역 : 회생컨버터, ESS, PCS, 고효율 환기시스템, TOS
- 도봉산역 : 경량 태양광, ESS, 인버터</td><td colspan="2">보고서 면수 : 594</td></tr>
</table>

연구의 목적 및 내용	○ 도시철도 역사의 에너지 자립화를 위한 전력저장장치 기반의 에너지 최적 운영 기술 및 에너지 절감시스템 개발 - 도시철도 지하/지상역사에 대한 에너지 절감시스템 개발 및 테스트베드 구축 - 역사 전력사용량 30%(피크전력 5% 포함), 전력요금 10% 이상 절감 - 도시철도 에너지절감 시스템 사업화 모델 개발 및 제도화 지원
연구개발성과	○ 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템 - 400kWh급 ESS 및 계통연계형 200kW급 PCS - 500kW급 모듈형 회생에너지 전력변환장치(DC/DC) ○ 전력저장장치 연계형 도시철도 역사용 경량 태양광 발전시스템 - 경량형 4×9 실리콘 결정질 경량모듈(10.8kW) - 곡면 적용 플렉시블 태양광 모듈(7.2kW) ○ 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템 - TLS 흡열모듈 ○ 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템 - 고효율 IE4 SynRM, 가변제어 인버터 ○ 도시철도 통합 에너지 운영시스템 - 태양광 및 전력수요 고려한 에너지저장장치 최적 충·방전 알고리즘 - MESA/SunSpec Energy Storage 표준 및 분산형 oBIX(EIG) 기반 EMS 플랫폼 ○ 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션 - 객체정보기반 도시철도 역사 테스트베드 에너지모델 연동 모듈 및 해석 UI ○ 실증 테스트베드 구축 - 수락산역 : 회생컨버터, ESS, PCS, 고효율 환기시스템 - 도봉산역 : 경량 태양광, ESS, 인버터
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 활용방안 - 도시철도 운영기관에서의 에너지 절감대책 및 능동적인 전력활용 대책으로 활용 - 도시철도 역사 운영비 절감방안으로 활용 - 도시철도 에너지 절감관련 제도 개선 및 신규 시장확보 방안으로 활용 ○ 기대효과 - 회생에너지 및 신재생에너지원을 연계한 전력저장장치 활용 기술 확보 - 연간 1억원 정도의 경제적 효과 발생(테스트베드 구축 역사 대상) - 국가차원의 에너지 절감대책 및 기후변화 대응 기술 확보

핵심어 (5개 이내)	ESS/PCS	회생컨버터	경량 태양광모듈	고효율 환기시스템	통합 에너지 운영시스템

〈 SUMMARY 〉

<table>
<tr><td>Purpose & Contents</td><td colspan="5">○ Development of optimal operation of energy technology and energy-saving system in the urban railway station
○ Development of optimal energy management and energy saving system
- Power conversion, regenerative energy devices based on ESS
- 50-90% weight/vertical slope flexible solar power system
- Development of Thermal lining system and ventilation technology
- Urban railway operating system developed integrated energy
- Development of energy performance assessment solutions</td></tr>
<tr><td>Results</td><td colspan="5">○ Regenerative energy system based on power storage device (ESS, PCS, regenerative energy device)
- 400kWh ESS and grid-connected 200kW PCS
- 500kW modular regenerative energy power converter (DC/DC)
○ 50~90% weight/vertical slope flexible solar power system
- Lightweight 4×9 silicon crystalline modules (10.8kW)
- Curved flexible solar modules (7.2kW)
○ Thermal lining system and ventilation technology
- TLS module
- High efficiency motors and blowers (IE4 SynRM + inverter)
○ Total operating system in urban railway station
- Optimal charge/discharge algorithms of energy storage considering power demand
- MESA/SunSpec standard and distributed oBIX(EIG) based EMS platform
○ Energy performance solution based on 3-dimensional spatial information
- Energy performance evaluation function of railway station
- ISO13790 / DIN V 18599 algorithm-based analysis engine
○ Standard testbed(Seoul Subway Line 7 Suraksan Station/Dobongsan Station)
- Energy saving system model for commercialization and institutionalized support</td></tr>
<tr><td>Expected Contribution</td><td colspan="5">○ Utilization
- Use of energy-saving in the urban railway operating company
- Utilized urban railway station operational savings plan
- Energy savings related to urban rail system utilization and commercialization
○ Benefits
- The power storage technology using the regenerative/renewable energy sources
- 1 billion won of economic effect per year (test-bed)
- Ensuring national energy saving and climate change technology</td></tr>
<tr><td>Keywords</td><td>ESS : Energy Storage System</td><td>Regenerative Converter</td><td>Light Weight Solar-Cell Modules</td><td>High efficiency ventilation technology</td><td>TOS : Total Operating System</td></tr>
</table>

〈 Contents 〉

1. Introduction ·····1

2. Development Status of Technology ·····6

3. Research and Development Output ·····38

4. Achievement and Level of Contribution in related fields ·····579

5. Application plan of R&D Output ·····586

6. Collection of Science Technology Information in Overseas Country ···591

7. Security Level Information ·····592

8. Research Installation Status of NTIS Registration ·····592

9. Implementation performance for safety measures of laboratory in performing R&D ···592

10. Typical Research and Development Result ·····592

11. Other detail ·····593

12. Reference ·····593

〈 목 차 〉

제1장. 연구개발과제의 개요 ····· 1
1. 연구개발 목적 ····· 1
2. 연구개발의 필요성 ····· 1
3. 연구개발 범위 ····· 2

제2장. 국내외 기술 개발 현황 ····· 6
제1절. 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템 ····· 6
1. 국내 기술 개발 현황 ····· 6
2. 국외 기술 개발 현황 ····· 8

제2절. 전력저장장치 연계형 도시철도 역사용 경량 태양광 발전시스템 ····· 13
1. 국내 기술 개발 현황 ····· 13
2. 국외 기술 개발 현황 ····· 14

제3절. 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템 ····· 18
1. 국내 기술 개발 현황 ····· 18
2. 국외 기술 개발 현황 ····· 22

제4절. 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템 ····· 27
1. 국내 기술 개발 현황 ····· 27
2. 국외 기술 개발 현황 ····· 29

제5절. 도시철도 통합 에너지 운영시스템 ····· 31
1. 국내 기술 개발 현황 ····· 31
2. 국외 기술 개발 현황 ····· 32

제6절. 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션 ····· 34
1. 국내 기술 개발 현황 ····· 34
2. 국외 기술 개발 현황 ····· 36

제3장. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 38
제1절. 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템 ····· 38
1. 시스템 개요 ····· 38
2. 500kWh급 전력저장장치 및 PCS ····· 39
3. 회생에너지 전력변환시스템 ····· 91

제2절. 전력저장장치 연계형 도시철도 역사용 경량 태양광 발전시스템 ···· 154
1. 시스템 개요 ···· 154
2. 태양광 모듈 및 구조물 제작 및 시험 ···· 155
3. 현장구축을 위한 시뮬레이션 및 태양광 발전시스템 구성 ···· 174
4. 도봉산 역사 태양광 발전 시스템 현장구축 ···· 182
5. 경량화 태양광 모듈 및 플렉서블 CIGS 시스템 성능평가 및 유지보수 ···· 187

제3절. 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템 ···· 198
1. 시스템 개요 ···· 198
2. 도시철도 냉난방 부하특성 ···· 199
3. TLS(Thermal Lining System) 동작원리 및 효과분석 ···· 209
4. 설계 및 제작 ···· 222
5. 현장구축 계획 ···· 264
6. TLS 성능시험 및 현장 구축용 시스템 제작 ···· 286

제4절. 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템 ···· 373
1. 시스템 개요 ···· 373
2. 지하철역사에 고효율 전동기 도입의 타당성 검토 ···· 374
3. 경제성 및 실시간 실내환경 반영 환기시스템 구현을 위한 기존 설비 개선방안 검토 ··· 397
4. 경제성 및 실내환경 분석 기반 환기시스템 최적운전패턴 도출 알고리즘 ···· 410
5. 최적의 운전패턴 구현을 위한 환기시스템 제안 및 시범 제작 ···· 425

제5절. 도시철도 통합에너지 운영시스템 ···· 447
1. 시스템 개요 ···· 447
2. 도시철도 통합 에너지 운영시스템 ···· 448
3. 설계 및 제작 ···· 453
4. 현장구축 ···· 457
5. 운영시험 및 종합 성능평가 ···· 460
6. 도시철도 복합에너지 시스템 에너지저장장치 최적 스케줄링 알고리즘 ···· 463
7. 최적 스케줄링 알고리즘 설계 및 제작 ···· 464
8. 현장적용 및 종합 성능평가 ···· 486

제6절. 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션 ···· 514
1. 솔루션 개요 ···· 514
2. 테스트베드 모델 구축 및 설계대안 평가 ···· 515
3. 설계 및 제작 ···· 518
4. 현장적용 및 평가 ···· 529

제7절. 도시철도 역사 테스트베드 구축 및 성능평가 ····· 536
1. 테스트베드 구축 ····· 536
2. 성능평가 ····· 541
3. 철도산업에서의 에너지원에 따른 절감 사업화모델 ····· 549
4. 도시철도 에너지 관련 기술기준 적용(안) ····· 571

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 579
1. 목표 달성도 ····· 579
2. 관련 분야 기여도 ····· 584

제5장. 연구개발성과의 활용계획 ····· 586
1. 고려 사항 ····· 586
2. 활용 사례 ····· 588
3. 활용 계획 ····· 590

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 591

제7장. 연구개발성과의 보안등급 ····· 592

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 ··· 592

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ··· 592

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 592

제11장. 기타 사항 ····· 593

제12장. 참고 문헌 ····· 593

< 표 차례 >

<표 1-1-1> 도시철도 역사 수 ····· 1
<표 1-1-2> 서울교통공사 요금인상 추이 ····· 1
<표 1-1-3> 요금제 변경 사례 ····· 2
<표 1-1-4> 실증역사 3년간 일평균 전력사용량 ····· 3
<표 2-1-1> ELDC(슈퍼캡) 사양 ····· 7
<표 2-1-2> ELDC(슈퍼캡) 설치사례 ····· 8
<표 2-1-3> 스페인의 빌바오(BILBAO) 지하철 설치 사양 ····· 8
<표 2-1-4> 가선전압에 따른 리튬이온 배터리 회생시스템의 사양(히타치) ····· 11
<표 2-1-5> ESS용량 ····· 12
<표 2-4-1> 고효율급 효율/ 프리미엄급 효율/ 슈퍼 프리미엄급 효율 ····· 28
<표 2-6-1> 국내외 친환경 인증제도 에너지성능평가 현황 ····· 34
<표 2-6-2> 국내외 BIM 가이드라인 현황 ····· 35
<표 2-6-3> BIM 에너지성능분석 연구동향 ····· 35
<표 2-6-4> 국외 BIM 기술 동향 분석 자료 ····· 36
<표 2-6-5> 국내외 BIM 가이드라인 현황 ····· 37
<표 3-1-1> 개발 목표 ····· 39
<표 3-1-2> 저장매체 선정 사유 ····· 40
<표 3-1-3> 전기적 및 일반적 특징 ····· 41
<표 3-1-4> 전기적 및 일반적 특징 ····· 41
<표 3-1-5> H/W 설계 파라미터 ····· 42
<표 3-1-6> 고효율인증 시험 항목 ····· 55
<표 3-1-7> 전력저장장치 고효율인증 효율기준 ····· 56
<표 3-1-8> PCS 사양 ····· 61
<표 3-1-9> H/W 설계 파라미터 ····· 61
<표 3-1-10> 인증항목 ····· 70
<표 3-1-11> 400kW급 전력저장장치의 랙 구성품 ····· 73
<표 3-1-12> 배터리 모듈 사양 ····· 74
<표 3-1-13> BPU 사양 ····· 75
<표 3-1-14> BMS 규격 ····· 76
<표 3-1-15> 셀테스트 항목 ····· 77
<표 3-1-16> SURT6000XLI UPS 사양 ····· 81
<표 3-1-17> 3상 4선식 트랜스 용량별 설계 ····· 82
<표 3-1-18> 회생에너지 시스템 모듈화 장점 ····· 93
<표 3-1-19> 회생전력량 및 배터리 용량 선정 ····· 95
<표 3-1-20> 회생컨버터 시스템 설계 사양 ····· 96
<표 3-1-21> 단위 모듈 H/W 사양 ····· 96

<표 3-1-22> 제어 회로 기능 ····· 101
<표 3-1-23> CPU B/D 기능 및 사양 ····· 102
<표 3-1-24> Base B/D 기능 및 사양 ····· 102
<표 3-1-25> Gate Driver B/D 기능 및 사양 ····· 103
<표 3-1-26> Voltage Sensor B/D 기능 및 사양 ····· 103
<표 3-1-27> Control Power SMPS 사양 ····· 104
<표 3-1-28> 회생 Converter Module 사양 ····· 105
<표 3-1-29> 제어기 응답 속도 ····· 106
<표 3-1-30> Fault Test 결과 ····· 108
<표 3-1-31> 정격 운전 Test 결과 ····· 109
<표 3-1-32> 측정 포인트 ····· 109
<표 3-1-33> 응답 속도 Test 결과 ····· 110
<표 3-1-34> 측정 결과 ····· 110
<표 3-1-35> 측정 결과 ····· 111
<표 3-1-36> 측정 결과 ····· 111
<표 3-1-37> 측정 결과 ····· 112
<표 3-1-38> 측정 채널 ····· 112
<표 3-1-39> 운전 조건 ····· 112
<표 3-1-40> 측정 채널 ····· 113
<표 3-1-41> 회생 컨버터 Module 효율 측정 결과 ····· 114
<표 3-1-42> 회생 컨버터 Unit H/W 설계 사양 ····· 116
<표 3-1-43> Gating Delay에 따른 Unbalancing 계산 결과 ····· 117
<표 3-1-44> 전류오차에 따른 Unbalancing 계산 결과 ····· 118
<표 3-1-45> Unbalancing 제어기 및 하드웨어 개발 사양 ····· 118
<표 3-1-46> 시뮬레이션 설정 값 ····· 118
<표 3-1-47> 사이즈 및 중량 ····· 121
<표 3-1-48> 회생 컨버터 Module 운전 설정 값 ····· 123
<표 3-1-49> 회생 컨버터 유닛 운전 결과 ····· 124
<표 3-1-50> 측정 채널 ····· 124
<표 3-1-51> 측정 채널 ····· 125
<표 3-1-52> 측정 채널 ····· 125
<표 3-1-53> 측정 채널 ····· 126
<표 3-1-54> 측정 채널 ····· 126
<표 3-1-55> Incoming 사양 ····· 128
<표 3-1-56> 측정 채널 ····· 128
<표 3-1-57> Capacitor사양, Capacitor Bank 사양 ····· 131
<표 3-1-58> 측정 채널 ····· 131
<표 3-1-59> 회생에너지 시스템 사양 ····· 132
<표 3-1-60> Control Master 특징 ····· 134
<표 3-1-61> 회생에너지 시스템 ↔ 상위제어기 통신 Test 세부 항목 ····· 135

<표 3-1-62> 현장 구축 시스템 사양 ····· 138
<표 3-1-63> 제어기 설정 값 ····· 140
<표 3-1-64> 설정 값 ····· 143
<표 3-1-65> 측정 채널 ····· 144
<표 3-1-66> Test 결과 BMS 화면 ····· 145
<표 3-1-67> 회생에너지 시스템 발전량 ····· 148
<표 3-1-68> 회생에너지 시스템 절감 목표량 산출근거 ····· 150
<표 3-1-69> 회생에너지 시스템 구축 비용(1,000kWh급) ····· 152
<표 3-1-70> 회생에너지 시스템 ROI(620kWh 기준) ····· 152
<표 3-1-71> 회생에너지 시스템 ROI(성능 업그레이드 기준) ····· 153
<표 3-2-1> 표준설치 운영결과(2015년 3월 01일～31일) ····· 171
<표 3-2-2> 일반 사양 ····· 172
<표 3-2-3> 일조시간비교(1～6월) ····· 174
<표 3-2-4> 일조시간비교(7～12월) ····· 175
<표 3-2-5> 태양광 발전량 시뮬레이션 결과 ····· 176
<표 3-2-6> 태양광 설치용량 및 예상발전량 검토 (20.25kW) - A구역 ····· 176
<표 3-2-7> 시스템 구성 요약 ····· 186
<표 3-2-8> 철도역사 테스트베드 현장평가 결과 ····· 187
<표 3-2-9> 철도역사 테스트베드 Lab-test 결과 ····· 188
<표 3-2-10> 도봉산 태양광 모듈 성능 ····· 189
<표 3-2-11> 도봉산 태양광 모듈 ····· 189
<표 3-2-12> 경량화 태양광 모듈 EL(Electroluminescence) 측정(서쪽) ····· 190
<표 3-2-13> 경량화 태양광 모듈 EL(Electroluminescence) 측정(동쪽) ····· 191
<표 3-2-14> 도봉산 태양광 (c-Si) module 발전량 ····· 193
<표 3-2-15> 도봉산 태양광 (CIGS) module 발전량 ····· 194
<표 3-3-1> 일반적인 부하 산정 기준과 설계 기준 ····· 199
<표 3-3-2> 외기온습도 기준 (국토해양부 고시 제2008-5호) ····· 200
<표 3-3-3> 실내 온습도 기준 ····· 200
<표 3-3-4> 인체 발열량 기준 (단위 : W/㎡) ····· 200
<표 3-3-5> 실내 부하기준 ····· 201
<표 3-3-6> 지중온도 기준(서울특별시 지하철건설본부 도시철도 기술 자료집) ····· 201
<표 3-3-7> 실내 발생열 기준 ····· 201
<표 3-3-8> 차량제원 ····· 201
<표 3-3-9> 여름 외기 온습도 기준(국토해양부 고시 제2008-5호 인천) ····· 201
<표 3-3-10> 터널 열부하(열차주행발열) ····· 202
<표 3-3-11> 터널 열부하(열차주행보조기기발열) ····· 202
<표 3-3-12> 터널 열부하(열차냉방기발열) ····· 202
<표 3-3-13> 지중흡열 ····· 202
<표 3-3-14> 선로 환기 설계조건 ····· 203
<표 3-3-15> 부하 및 소요 환기량(9호선 B～C 구간) ····· 203

<표 3-3-16> 부하 및 소요 환기량(9호선 C~D 구간) ····· 203
<표 3-3-17> 부하 및 소요 환기량(9호선 C, D 정거장 선로부 환기량 선정) ····· 203
<표 3-3-18> 9호선 C, D 정거장 선로부 환기팬 선정(C 정거장) ····· 204
<표 3-3-19> 9호선 C, D 정거장 선로부 환기팬 선정(D 정거장) ····· 204
<표 3-3-20> 대합실 냉난방 특성 ····· 204
<표 3-3-21> 승강장 냉난방 특성 ····· 205
<표 3-3-22> 직원근무실 냉난방 특성 ····· 205
<표 3-3-23> 기능실 냉난방 특성 ····· 205
<표 3-3-24> 선로 환기부하 특성 ····· 205
<표 3-3-25> 역사 내 실별 단위면적당 냉방부하 ····· 206
<표 3-3-26> 역사 내 실별 단위면적당 난방부하 ····· 206
<표 3-3-27> 부하집계 ····· 207
<표 3-3-28> 냉방부하 발생 요인과 특징 ····· 207
<표 3-3-29> TLS의 정의 및 원리 ····· 209
<표 3-3-30> TLS의 세부 구조 및 작동원리 ····· 210
<표 3-3-31> TLS 설치 목적 ····· 211
<표 3-3-32> 복사 냉방 기술의 적용 및 응용 ····· 211
<표 3-3-33> TLS 흡열모듈의 승강장 선로부 설치 시 고려사항 ····· 211
<표 3-3-34> 기존 설치 사례 ····· 212
<표 3-3-35> 기존 복사 패널 단점 ····· 212
<표 3-3-36> 표면 곡률 적용 1 ····· 213
<표 3-3-37> 표면 곡률 적용 2 ····· 213
<표 3-3-38> 열전달 활성화 표면 ····· 214
<표 3-3-39> TLS 후면 공간 확보 ····· 214
<표 3-3-40> 곡면형 TLS 모세관 ····· 215
<표 3-3-41> TLS 주요 부품 개요 ····· 216
<표 3-3-42> TLS 예상 설치 형태 ····· 217
<표 3-3-43> TLS 모듈 형태 및 설치 형태 ····· 218
<표 3-3-44> 승강장 배기덕트 미 적용 ····· 218
<표 3-3-45> 승강장 배기덕트 적용 ····· 218
<표 3-3-46> 분석조건 ····· 219
<표 3-3-47> 흡열량 분석 결과_일반조건 ····· 219
<표 3-3-48> 흡열량 분석 결과_Periodic 조건 ····· 219
<표 3-3-49> 승강장 배기덕트 미 적용 시 결과 ····· 220
<표 3-3-50> 승강장 배기덕트 적용 시 결과 ····· 220
<표 3-3-51> 승강장 배기덕트 주변 유동 ····· 221
<표 3-3-52> TLS 시스템 개요 ····· 222
<표 3-3-53> TLS 순환 및 열교환 장비 설치위치 ····· 222
<표 3-3-54> 역사 내 TLS 설치 대상 공간 ····· 223
<표 3-3-55> TLS 설치 위치 ····· 223

<표 3-3-56> TLS 배치 방식 ····· 224
<표 3-3-57> 흡열체 특징 ····· 224
<표 3-3-58> 흡열체 시스템 구성 ····· 225
<표 3-3-59> 모세관 매트 흡열체 구성 방식 ····· 226
<표 3-3-60> Thermally conductive paste 특징 ····· 226
<표 3-3-61> 패널식 ····· 227
<표 3-3-62> TLS 소재 및 부속 검토 개요 ····· 228
<표 3-3-63> 금속 방속 도색 순서 ····· 230
<표 3-3-64> 방청 소재 종류 ····· 230
<표 3-3-65> 방청 도색 제품 종류 ····· 231
<표 3-3-66> 결합재 종류 ····· 231
<표 3-3-67> TLS 시작품 제작 개요 ····· 232
<표 3-3-68> TLS System 형태 ····· 233
<표 3-3-69> 판 어셈블리 형태 ····· 233
<표 3-3-70> 절곡된 알루미늄 판 형태 ····· 234
<표 3-3-71> 알루미늄 판 제원 ····· 234
<표 3-3-72> 모사된 충진재 제원 ····· 234
<표 3-3-73> TLS System (절곡된 형태) 무게 ····· 235
<표 3-3-74> TLS System의 알루미늄 판 ····· 235
<표 3-3-75> 알루미늄 판 제원 ····· 236
<표 3-3-76> 모사한 충진재 제원 ····· 236
<표 3-3-77> TLS System (라운드형) 무게 ····· 237
<표 3-3-78> TLS System의 알루미늄 판 ····· 237
<표 3-3-79> 제작 결과 ····· 240
<표 3-3-80> 주차별 진행 내용 ····· 242
<표 3-3-81> 모듈 형태 및 구성 ····· 243
<표 3-3-82> 내부 배관 소재 ····· 244
<표 3-3-83> 실험용 챔버 제원 ····· 245
<표 3-3-84> 오리피스 차압 측정으로 통한 송풍기 유량 측정 ····· 246
<표 3-3-85> 냉각수 순환 시스템, 컨트롤 패널 ····· 246
<표 3-3-86> 예비시험 결과 ····· 247
<표 3-3-87> 실험 설정 검토 1 ····· 248
<표 3-3-88> 실험 설정 검토 2 ····· 249
<표 3-3-89> 실험 case ····· 250
<표 3-3-90> 실험 결과 ····· 251
<표 3-3-91> 도메인 ····· 252
<표 3-3-92> 물 설치 ····· 252
<표 3-3-93> Parametric 분석용 CFD 분석 Case ····· 253
<표 3-3-94> Workbench Parameter 구성 및 모델링 ····· 253
<표 3-3-95> 험 설정에 따른 TLS 흡열 모듈 성능의 경향 ····· 254

<표 3-3-96> CFD 결과 비교 ····· 255
<표 3-3-97> IDA Tunnel Long-Term 분석 방식 개요 ····· 257
<표 3-3-98> SR005 차량 편성정보 ····· 260
<표 3-3-99> 열차 입력 제원 ····· 261
<표 3-3-100> 터널 벽체 온도 비교 (연간 대표 값) ····· 262
<표 3-3-101> 승강장 선로부 온도비교 (운영 30년 후, 7월 중순) ····· 262
<표 3-3-102> TLS 흡열량 (하절기 최대 흡열환경) ····· 263
<표 3-3-103> 수락산역 실사 ····· 264
<표 3-3-104> 마들역 집수정 현장사진 : 개·보수 미실시 ····· 265
<표 3-3-105> 노원역 집수정 현장 사진 ····· 266
<표 3-3-106> 마들 승강장 하부 현장사진 : 흡열모듈 설치위치 ····· 267
<표 3-3-107> 노원 승강장 하부 현장사진 : 흡열모듈 설치위치 ····· 267
<표 3-3-108> 마들역 실측 내용 ····· 269
<표 3-3-109> 노원역 실측 내용 ····· 269
<표 3-3-110> 요소별 배관 길이 ····· 271
<표 3-3-111> 순환장치 제작 사양 ····· 272
<표 3-3-112> TLS 패널 및 지지대 설계 개요 ····· 274
<표 3-3-113> TLS 패널 설계(ㄱ형강 및 날개) ····· 275
<표 3-3-114> TLS 패널 받침대 설계(ㄱ형강 및 날개) ····· 275
<표 3-3-115> TLS 패널 설계(고정 브라켓) ····· 276
<표 3-3-116> TLS 패널 받침대 설계(고정 브라켓) ····· 276
<표 3-3-117> TLS 패널 받침대 설계(ㄱ형강으로 구성된 고정 브라켓) ····· 277
<표 3-3-118> TLS 패널 설계(보강대) ····· 278
<표 3-3-119> TLS 패널 받침대 설계(보강대) ····· 278
<표 3-3-120> TLS 패널 설계 ····· 279
<표 3-3-121> TLS 패널 받침대 설계 ····· 279
<표 3-3-122> 보관 랙 설계 (3030 프로파일 랙) ····· 280
<표 3-3-123> 보관 랙 설계 (4040 프로파일 랙) ····· 281
<표 3-3-124> 마들역 실사결과 (배수펌프실) ····· 283
<표 3-3-125> 마들역 실사결과 (지하역사 선로부) ····· 283
<표 3-3-126> 노원역 실사결과 (배수펌프실) ····· 284
<표 3-3-127> 노원역 실사결과 (지하역사 선로부) ····· 284
<표 3-3-128> TLS 성능 시험 방법론 검토 ····· 286
<표 3-3-129> 테스트베드 역사 제원 ····· 287
<표 3-3-130> 테스트베드 역사 본선환기팬 제원 ····· 288
<표 3-3-131> 테스트베드 역사 열차 주행발열량 계산결과 ····· 289
<표 3-3-132> 테스트베드 역사 열차 냉방기 발열량 계산결과 ····· 290
<표 3-3-133> 테스트베드 역사 지중흡열량 계산 ····· 290
<표 3-3-134> 테스트베드 역사 선로부 총 발열량 계산 ····· 290
<표 3-3-135> TLS 설치 ····· 291

<표 3-3-136> 운영시 시스템 에너지 사용 ····· 291
<표 3-3-137> 테스트베드 역사 에너지 절감량 도출 ····· 292
<표 3-3-138> TLS 시스템 ····· 293
<표 3-3-139> 시스템별 경제성 검토 ····· 293
<표 3-3-140> 성능시험 Case ····· 295
<표 3-3-141> Case 01 성능시험결과 ····· 296
<표 3-3-142> Case 02 성능시험결과 ····· 297
<표 3-3-143> Case 03 성능시험결과 ····· 297
<표 3-3-144> Case 04 성능시험결과 ····· 298
<표 3-3-145> Case 05 성능시험결과 ····· 298
<표 3-3-146> Case 06 성능시험결과 ····· 299
<표 3-3-147> Case 07 성능시험결과 ····· 299
<표 3-3-148> Case 08 성능시험결과 ····· 300
<표 3-3-149> Case 09 성능시험결과 ····· 300
<표 3-3-150> Case 10 성능시험결과 ····· 301
<표 3-3-151> Case 11 성능시험결과 ····· 301
<표 3-3-152> Case 12 성능시험결과 ····· 302
<표 3-3-153> Case 13 성능시험결과 ····· 302
<표 3-3-154> Case 14 성능시험결과 ····· 303
<표 3-3-155> Case 15 성능시험결과 ····· 303
<표 3-3-156> Case 16 성능시험결과 ····· 304
<표 3-3-157> Case 17 성능시험결과 ····· 304
<표 3-3-158> Case 18 성능시험결과 ····· 305
<표 3-3-159> Case 19 성능시험결과 ····· 305
<표 3-3-160> Case 20 성능시험결과 ····· 306
<표 3-3-161> Case 21 성능시험결과 ····· 306
<표 3-3-162> Case 22 성능시험결과 ····· 307
<표 3-3-163> Case 23 성능시험결과 ····· 307
<표 3-3-164> Case 24 성능시험결과 ····· 308
<표 3-3-165> Case 25 성능시험결과 ····· 308
<표 3-3-166> Case 26 성능시험결과 ····· 309
<표 3-3-167> Case 27 성능시험결과 ····· 309
<표 3-3-168> Case 28 성능시험결과 ····· 310
<표 3-3-169> Case 29 성능시험결과 ····· 310
<표 3-3-170> Case 30 성능시험결과 ····· 311
<표 3-3-171> Case 31 성능시험결과 ····· 311
<표 3-3-172> Case 32 성능시험결과 ····· 312
<표 3-3-173> Case 33 성능시험결과 ····· 312
<표 3-3-174> Case 34 성능시험결과 ····· 313
<표 3-3-175> Case 35 성능시험결과 ····· 313

<표 3-3-176> Case 36 성능시험결과 ····· 314
<표 3-3-177> Case 별 흡열성능 시험 결과 - 1/4 ····· 317
<표 3-3-178> 1차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 2/4 ····· 318
<표 3-3-179> 1차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 3/4 ····· 319
<표 3-3-180> 1차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 4/4 ····· 320
<표 3-3-181> 성능시험 Case ····· 322
<표 3-3-182> Case 10 성능시험결과 ····· 323
<표 3-3-183> Case 11 성능시험결과 ····· 323
<표 3-3-184> Case 12 성능시험결과 ····· 324
<표 3-3-185> Case 13 성능시험결과 ····· 324
<표 3-3-186> Case 14 성능시험결과 ····· 325
<표 3-3-187> Case 15 성능시험결과 ····· 325
<표 3-3-188> Case 16 성능시험결과 ····· 326
<표 3-3-189> Case 17 성능시험결과 ····· 326
<표 3-3-190> Case 18 성능시험결과 ····· 327
<표 3-3-191> Case 19 성능시험결과 ····· 327
<표 3-3-192> Case 20 성능시험결과 ····· 328
<표 3-3-193> Case 21 성능시험결과 ····· 328
<표 3-3-194> Case 22 성능시험결과 ····· 329
<표 3-3-195> Case 23 성능시험결과 ····· 329
<표 3-3-196> Case 24 성능시험결과 ····· 330
<표 3-3-197> Case 25 성능시험결과 ····· 330
<표 3-3-198> Case 26 성능시험결과 ····· 331
<표 3-3-199> Case 27 성능시험결과 ····· 331
<표 3-3-200> Case 28 성능시험결과 ····· 332
<표 3-3-201> Case 29 성능시험결과 ····· 332
<표 3-3-202> Case 30 성능시험결과 ····· 333
<표 3-3-203> Case 31 성능시험결과 ····· 333
<표 3-3-204> Case 32 성능시험결과 ····· 334
<표 3-3-205> Case 33 성능시험결과 ····· 334
<표 3-3-206> Case 34 성능시험결과 ····· 335
<표 3-3-207> Case 35 성능시험결과 ····· 335
<표 3-3-208> Case 36 성능시험결과 ····· 336
<표 3-3-209> 2차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 1/6 ····· 338
<표 3-3-210> 2차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 2/6 ····· 339
<표 3-3-211> 2차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 3/6 ····· 340
<표 3-3-212> 2차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 4/6 ····· 341
<표 3-3-213> 2차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 5/6 ····· 342
<표 3-3-214> 2차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 6/6 ····· 343
<표 3-3-215> 도시철도 지하수 연구결과 - 1 ····· 347

<표 3-3-216> 도시철도 지하수 연구결과 - 2 ····· 348
<표 3-3-217> 도시철도 터널 열환경 연구결과 - 1 ····· 348
<표 3-3-218> 도시철도 터널 열환경 연구결과 - 2 ····· 349
<표 3-3-219> 도시철도 터널 열환경 연구결과 - 3 ····· 349
<표 3-3-220> 수락산 역사 실측 결과 비교 ····· 350
<표 3-3-221> 마들역사 온도 실측 개요 ····· 351
<표 3-3-222> 수락산 역사 실측 장비 설치 ····· 352
<표 3-3-223> 시간대별 수락산 역사 실측 결과 - 1/2 ····· 352
<표 3-3-224> 시간대별 수락산 역사 실측 결과 - 2/2 ····· 353
<표 3-3-225> 도시철도 터널구간 온도 특성 ····· 356
<표 3-3-226> 터널내 기류속도 1m/s 시 TLS 패널 유량별 흡열성능 예측 선도 ····· 357
<표 3-3-227> 터널내 기류속도 3m/s 시 TLS 패널 유량별 흡열성능 예측 선도 ····· 358
<표 3-3-228> 터널내 기류속도 5m/s 시 TLS 패널 유량별 흡열성능 예측 선도 ····· 359
<표 3-3-229> 스테인리스 특성 1 ····· 364
<표 3-3-230> 스테인리스 특성 2 ····· 365
<표 3-3-231> 형강 특성 1 ····· 365
<표 3-3-232> 형강 특성 2 ····· 365
<표 3-3-233> 기계적 특성 ····· 365
<표 3-3-234> 앵커의 설계저항강도 ····· 365
<표 3-3-235> 하중 조합 ····· 366
<표 3-3-236> 지점조건 ····· 367
<표 3-3-237> 부재력 ····· 368
<표 3-3-238> 지점의 반력 ····· 369
<표 3-3-239> 변형도 ····· 369
<표 3-3-240> TLS패널 프레임 ····· 370
<표 3-3-241> 앵커 설계 ····· 370
<표 3-4-1> 재료비 산정 ····· 378
<표 3-4-2> 계절별, 시간대별 부하구분 ····· 379
<표 3-4-3> 부하별 전력요금단가(원) ····· 379
<표 3-4-4> 기존전동기 에너지소비량(kWh) 및 비용(원) ····· 379
<표 3-4-5> 경부하 시간대별 공기질 상태 확률 ····· 380
<표 3-4-6> 중간부하 시간대별 공기질 상태 확률 ····· 380
<표 3-4-7> 최대부하 시간대별 공기질 상태확률 ····· 380
<표 3-4-8> 경부하 시간대별 에너지소비량 및 비용 ····· 381
<표 3-4-9> 중간부하 시간대별 에너지소비량 및 비용 ····· 381
<표 3-4-10> 최대부하 시간대별 에너지소비량 및 비용 ····· 382
<표 3-4-11> 가변운전방식 에너지소비량 및 비용 ····· 382
<표 3-4-12> 발전부분 에너지별 비중 ····· 382
<표 3-4-13> 에너지 소비량 ····· 382
<표 3-4-14> 에너지별 단가 ····· 382

<표 3-4-15> 연간 화석연료 절감량 ····· 383
<표 3-4-16> 에너지종류별 환산계수 ····· 383
<표 3-4-17> 대기오염물질 절감량 ····· 383
<표 3-4-18> 대기오염물질 절감량 ····· 383
<표 3-4-19> 대기오염물질 절감비용 ····· 383
<표 3-4-20> 기존방안 생애주기비용 ····· 384
<표 3-4-21> 신규방안 생애주기비용 ····· 384
<표 3-4-22> 편익 총비용 1 ····· 384
<표 3-4-23> 편익 총비용 2 ····· 385
<표 3-4-24> CBA분석결과 ····· 385
<표 3-4-25> 전동기 유형별 가격 ····· 391
<표 3-4-26> 기존유도기 ON/OFF운전시 소비전력량(kWh) ····· 393
<표 3-4-27> 방법 2: 기존 유도전동기 (가변운전) 기존유도기 가변운전시 소비전력량 ····· 394
<표 3-4-28> 방법 3: SynRM 가변운전시 소비전력량(kWh) ····· 395
<표 3-4-29> 운전유형에 따른 기존유도기의 소비전력 시뮬레이션 결과 비교 ····· 396
<표 3-4-30> ON/OFF운전시 기존유도기와 가변운전시 SynRM의 시뮬레이션 결과 비교 ····· 396
<표 3-4-31> 가변운전시 기존유도기와 SynRM의 시뮬레이션 결과 비교 ····· 397
<표 3-4-32> 시간대별 승강장 냉방부하 산정 결과 ····· 399
<표 3-4-33> 승강장 환기량 계산 결과 ····· 400
<표 3-4-34> 시간대별 승강장 환기량 산정 결과 ····· 401
<표 3-4-35> 승강장 환기설비 정압 산정 결과 ····· 402
<표 3-4-36> 배기팬 사양 ····· 404
<표 3-4-37> 수락산역 승강장 필요 배기압 검토결과 ····· 404
<표 3-4-38> 가변운전시 배기팬 성능변화 ····· 405
<표 3-4-39> ON/OFF운전 시 상행선 승강장 1구역 취출구별 풍속 및 풍량 ····· 412
<표 3-4-40> 5월 7일 서울특별시 노원구 대기미세먼지농도(PM10) ····· 414
<표 3-4-41> 가변운전시 상행선 승강장 2구역 취출구별 풍속 및 풍량 ····· 416
<표 3-4-42> 가변운전시 기존유도기와 SynRM의 시뮬레이션 결과 비교 ····· 421
<표 3-4-43> 가변운전방식 도입결과 ····· 424
<표 3-4-45> 회전자 설계 파라미터 ····· 429
<표 3-4-46> 최적설계모델 유한요소해석 결과 ····· 431
<표 3-4-47> 30kW SynRM 전력 및 효율 시험 결과 ····· 433
<표 3-4-48> 30kW SynRM 설치 후 시험결과 ····· 435
<표 3-4-49> 고효율 전동기 외형 비교 ····· 436
<표 3-4-50> 도시철도역사 환기설비 가변운전시 인버터 스위칭 손실절감방안 프로세스 ····· 437
<표 3-4-51> 상위제어기 기능 시험_1 ····· 443
<표 3-4-52> 상위제어기 기능 시험_2 ····· 444
<표 3-4-53> 상위제어기 프로토콜(Modbus/IP) 시험 ····· 444
<표 3-4-54> 상위제어기 프로토콜(BACnet/IP) 시험 ····· 444
<표 3-4-55> 상위제어기와 관리서버 인터페이스 테스트 항목 ····· 446

<표 3-5-1> EIG과 PLC기반 컨트롤러 비교 표 ····· 453
<표 3-5-2> 직류전기철도 시스템 전력조류해석을 위한 필요 데이터 ····· 466
<표 3-5-3> 도시철도 복합에너지 시스템 부하 표현 변수 ····· 471
<표 3-5-4> 도시철도 복합에너지 시스템 회생전력 및 에너지저장장치 표현 변수 ····· 472
<표 3-5-5> 도시철도 복합에너지 시스템 태양광 발전기 표현 변수 ····· 473
<표 3-5-6> 도시철도 복합에너지 시스템 변수 ····· 474
<표 3-5-7> 도시철도 복합에너지 시스템 변수 ····· 474
<표 3-5-8> 목적함수, 제약조건 ····· 483
<표 3-5-9> 스케줄링 결과 저장 테이블 ····· 502
<표 3-5-10> 2018년 2월 23일 오전 1시~2시 사이 스케줄 및 방전량 비교 ····· 504
<표 3-5-11> 2017년 7월 이후 5%이상 피크저감을 달성한 날짜의 데이터(변전소 기준) ··· 505
<표 3-5-12> 출력제한을 고려하지 않은 연구 전체기간의 피크저감량 ····· 509
<표 3-5-13> 변전소 기준 에너지사용량 절감량 상위 20일 (%기준) ····· 511
<표 3-5-14> 변전소 기준 전력량 요금 절감량 상위 20일 (%기준) ····· 512
<표 3-5-15> 수락산 및 도봉산역 전력량 요금 절감량 상위 5일 (%기준) ····· 512
<표 3-5-16> 실증 결과 요약 ····· 513
<표 3-6-1> 에너지성능평가 단계별 업무내용 ····· 517
<표 3-6-2> 도시철도 역사 에너지성능분석 및 대안 평가 시스템 연구 방법론 정립 ····· 518
<표 3-6-3> ISO 113790+DIN V 18599 알고리즘 기반 해석엔진 결과 값 ····· 519
<표 3-6-4> 역사 별 출입구 수 ····· 522
<표 3-6-5> 역사 별 지하 층 수 ····· 522
<표 3-6-6> 건축 형상 정보에 대한 건축 및 IFC 관점 비교 ····· 523
<표 3-6-7> 시뮬레이션 수행을 위한 변수 설정 ····· 527
<표 3-6-8> 시뮬레이션 수행 결과 ····· 527
<표 3-6-9> 다중회귀계수 도출결과 ····· 528
<표 3-6-10> 태양광에너지 생산량 및 보정계수 ····· 528
<표 3-6-11> 설계 변경 요소별 영향(안) ····· 530
<표 3-6-12> 면적당 에너지 사용량 비교 ····· 535
<표 3-7-1> 5, 7호선의 표고차 및 구배조건 ····· 537
<표 3-7-2> 3개 역사의 평균값 ····· 538
<표 3-7-3> 회생에너지 발전량 산출 ····· 541
<표 3-7-4> 회생에너지 발전량 산출(시스템 개선 후) ····· 542
<표 3-7-5> 피크전력 변화량 비교 ····· 542
<표 3-7-6> 가변운전방식 도입결과 ····· 544
<표 3-7-7> 에너지 사용량 비교(연간) ····· 547
<표 3-7-8> 에너지 사용량 비교(9월) ····· 547
<표 3-7-9> 피크전력 및 전력량 요금 측정 결과 ····· 547
<표 3-7-10> 에너지 절감량 환산 ····· 548
<표 3-7-11> 태양광발전 사업화모델 구축사양 ····· 550
<표 3-7-12> 회생전력 사업화모델 구축사양 ····· 552

<표 3-7-13> 고효율 환기 사업화모델 구축사양 ····· 554
<표 3-7-14> 회생전력 사업화모델 구축사양 ····· 555
<표 3-7-15> 폐열회수 사업화모델 구축사양 ····· 557
<표 3-7-16> 태양광발전 설치사양 ····· 558
<표 3-7-17> 태양광발전 사업화모델 설치비용 ····· 559
<표 3-7-18> 태양광발전 에너지 절감효과 ····· 559
<표 3-7-19> 회생에너지 설치사양 ····· 560
<표 3-7-20> 역사 회생전력 절감 사양 ····· 561
<표 3-7-21> 회생전력 설치비용 ····· 561
<표 3-7-22> 회생전력 사업화모델 에너지 절감효과 ····· 561
<표 3-7-23> 고효율 환기 사업화모델 설치사양 ····· 562
<표 3-7-24> LCCA 및 LCA 분석항목 ····· 563
<표 3-7-25> 고효율 환기 사업화모델 설치비용 ····· 563
<표 3-7-26> 고효율 환기 사업화모델 절감효과 ····· 563
<표 3-7-27> 회생전력 사업화모델 설치사양 ····· 565
<표 3-7-28> 역사 회생에너지 절감 사양 ····· 565
<표 3-7-29> 회생전력 사업화모델 설치비용 ····· 565
<표 3-7-30> 회생전력 사업화모델 에너지 절감효과 ····· 566
<표 3-7-31> 폐열회수 사업화모델 설치사양 ····· 567
<표 3-7-32> 폐열회수 사업화모델 설치비용 ····· 567
<표 3-7-33> 폐열회수 사업화모델 에너지 절감효과 ····· 568
<표 3-7-34> 지상역사 사업화모델 비용대비 효과분석 결과 ····· 569
<표 3-7-35> 지하역사 사업화모델 투자대비 효과분석 결과 ····· 570
<표 4-1-1> 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템 성과목표 및 달성도 ····· 579
<표 4-1-2> 전력저장장치 연계형 도시철도 역사용 경량 태양광 발전시스템 성과목표 및 달성도 ····· 580
<표 4-1-3> 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템 성과목표 및 달성도 ····· 581
<표 4-1-4> 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템 성과목표 및 달성도 ····· 581
<표 4-1-5> 도시철도 통합 에너지 운영시스템 성과목표 및 달성도 ····· 582
<표 4-1-6> 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션 성과목표 및 달성도 ····· 583
<표 4-1-7> 실증 테스트베드 구축 및 평가 기술 성과목표 및 달성도 ····· 584
<표 5-1-1> 전력저장장치 시스템 활용 사례 ····· 589

< 그림 차례 >

<그림 1-1-1> 수락산변전소 전력계통도 ····· 3
<그림 1-1-2> 지하역사, 지상역사 테스트베드 개념도 ····· 5
<그림 2-1-1> 광주지하철 1호선 김대중 컨벤션센터역에 설치된 750kW급 인버터 ····· 6
<그림 2-1-2> ELDC(슈퍼캡) 설치형 설계도면 ····· 7
<그림 2-1-3> 설치사례 - 시청변전소/봉은사역 ····· 7
<그림 2-1-4> 설치사례 - 스페인의 빌바오(BILBAO) 지하철 ····· 8
<그림 2-1-5> 바르샤바 전철 2호선 설치사례 ····· 9
<그림 2-1-6> 슈퍼커패시터 방식 ····· 9
<그림 2-1-7> 슈퍼커패시터 차량 설치 설계도면 ····· 10
<그림 2-1-8> 일본에서 활용되는 슈퍼 커패시터 기반 전동차량 ····· 10
<그림 2-1-9> 배터리 방식 회생에너지 저장시스템의 회로도(히타치 제공) ····· 11
<그림 2-1-10> 일본 토부 전철에 설치된 도시바의 1000[kW] 시스템의 배치도 ····· 12
<그림 2-1-11> 일본 덴엔토시선에 설치한 카와사키 니켈수소전지 기반 에너지저장시스템 ····· 12
<그림 2-1-12> ESS 설치 사진 ····· 12
<그림 2-2-1> 태양광 발전 적용사례 ····· 13
<그림 2-2-2> DRI의 경사지붕 BIPV 적용 사례 ····· 14
<그림 2-2-3> 일본 JR East 다카사키 신간선 역사 승강장 지붕 태양광 적용(200kW) ····· 15
<그림 2-2-4> 태양전지가 설치된 뉴욕 지하철 Coney Island Still Well Avenue 역(210kW) ····· 15
<그림 2-2-5> 독일 베를린 Hauptbahnhof 철도 역사 태양광 발전(189kW) ····· 15
<그림 2-2-6> 독일 도로변의 다양한 태양광 방음벽 ····· 16
<그림 2-2-7> 스위스 철도 선로변 태양광 방음벽(9.65kW) ····· 16
<그림 2-2-8> 프랑스 철도 역사 태양광 리모델링(SNCF) ····· 16
<그림 2-3-1> 하절기 부전역 불쾌지수 현황 ····· 18
<그림 2-3-2> 하절기 자갈치역 불쾌지수 현황 ····· 18
<그림 2-3-3> Diagram of AHU ····· 19
<그림 2-3-4> Diagram of Automatic Controller ····· 19
<그림 2-3-5> 직원 근무실 냉난방을 위한 공기조화기의 열원공급용 지열 열펌프 ····· 19
<그림 2-3-6> 기능실 냉방전용 지열 열펌프 및 별도 환기장치 ····· 19
<그림 2-3-7> 소사-원시 선 지열 및 지하수열원 적용 ····· 21
<그림 2-3-8> 폐열의 흡수 및 전송: 중앙역 승객 및 부대시설 ····· 22
<그림 2-3-9> London Underground 의 환기용 수직통로 흡열장치 ····· 23
<그림 2-3-10> Bad Lauterberg 기차역 ····· 24
<그림 2-3-11> 승강장 하부에 설치된 열매체 이송관 ····· 24
<그림 2-3-12> 하계: 흡열 및 축열 ····· 24
<그림 2-3-13> 동계: 열 추출 및 융설 ····· 24
<그림 2-3-14> 승강에서의 태양열 흡열 및 제설을 위한 흡열보드의 제작 ····· 25

<그림 2-3-15> 융설 시스템 적용 전 ····· 25
<그림 2-3-16> 융설 시스템 적용 후 ····· 25
<그림 2-3-17> Jenbach 터널 내 흡열 터널 구간의 설치 위치 및 공공시설로의 연결 ····· 26
<그림 2-3-18> Thermal Lining System - 매립식 TBM 콘크리트 세그먼트 형 ····· 26
<그림 2-4-1> 일반 승강장 공조시스템 구성도 ····· 27
<그림 2-4-2> 일반 승강장 공조시스템 개념도 ····· 27
<그림 2-4-3> 고효율 전동기 개발 추이 ····· 29
<그림 2-4-4> 고효율 전동기 ····· 30
<그림 2-5-1> 지능형 철도 전력망 구성도 ····· 31
<그림 2-5-2> 도시철도 에너지 종합 관리시스템> ····· 32
<그림 2-5-3> 도시철도 전력량 모니터링 시스템 ····· 32
<그림 2-5-4> 통합관리 시스템 구동화면 ····· 32
<그림 2-5-5> TRECS & TIMS ····· 33
<그림 2-5-6> Train Energy Management, Toshiba Corporation, 2013 ····· 33
<그림 3-1-1> 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템 개요 ····· 38
<그림 3-1-2> 전력저장장치 적용 전·후 변전소 전력사용량 해석사례 ····· 40
<그림 3-1-3> 시스템 구성도 ····· 41
<그림 3-1-4> PCS 사양서 ····· 42
<그림 3-1-5> PCS 회로 설계 ····· 43
<그림 3-1-6> 입력 필터부 설계 ····· 43
<그림 3-1-7> IGBT 모듈 열손실 분석 ····· 44
<그림 3-1-8> 전력변환부 설계 ····· 44
<그림 3-1-9> 출력 필터부 설계 ····· 45
<그림 3-1-10> DSP 및 I/O Board 설계 ····· 45
<그림 3-1-11> 기존 모듈 구조 ····· 45
<그림 3-1-12> Heat pipe를 포함한 모듈 구조 ····· 45
<그림 3-1-13> 온도 센서 위치 ····· 46
<그림 3-1-14> 기존 모듈의 온도 시험 ····· 46
<그림 3-1-15> Heat pipe를 포함한 모듈의 온도 시험 ····· 46
<그림 3-1-16> 인덕터를 포함한 변압기 ····· 46
<그림 3-1-17> Space Vector PWM 스위칭 제어 개념도 ····· 47
<그림 3-1-18> 제어기 구성 ····· 47
<그림 3-1-19> 제어 개선 ····· 48
<그림 3-1-20> 충전 방전PI제어 개선에 따른 응답속도 ····· 48
<그림 3-1-21> 전력변환부 제작 ····· 48
<그림 3-1-22> 필터부 및 냉각팬 ····· 49
<그림 3-1-23> Control Board 제작 ····· 49
<그림 3-1-24> 기구 도면 ····· 49
<그림 3-1-25> PCS 50kW 구성 ····· 49
<그림 3-1-26> 통신인터페이스 구성 ····· 50

<그림 3-1-27> PMS와 BSC간 통신 시퀀스 ····· 50
<그림 3-1-28> ESS 통신 프로토콜 ····· 50
<그림 3-1-29> PCS 통신 프로토콜 ····· 50
<그림 3-1-30> 시험 구성 ····· 50
<그림 3-1-31> 통신 연동 시험 ····· 50
<그림 3-1-32> SVPWM 스위칭 타임 연산 및 위상 검출 ····· 51
<그림 3-1-33> 스위칭 타임 연산에 따른 게이트 신호 ····· 51
<그림 3-1-34> 충/방전 시험 파형 ····· 51
<그림 3-1-35> 충/방전 출력성능 확인 ····· 52
<그림 3-1-36> 전력저장장치 시스템 구성 ····· 52
<그림 3-1-37> 전력저장장치 사양서 ····· 53
<그림 3-1-38> 전력저장장치 사양 ····· 53
<그림 3-1-39> 통신사양 및 시퀀스 검토 ····· 54
<그림 3-1-40> 전력저장장치 제품 구성 ····· 54
<그림 3-1-41> 135kWh급 전력저장장치 제작 ····· 55
<그림 3-1-42> 스마트그리드 전기저장시스템 단체표준안 ····· 56
<그림 3-1-43> 한국전지산업협회 단체표준안 ····· 56
<그림 3-1-44> 한국전지산업협회 단체표준 제정(안) ····· 57
<그림 3-1-45> 전력저장장치 성능 시험절차 수립 ····· 57
<그림 3-1-46> 전력저장장치 성능평가 환경 셋업 ····· 58
<그림 3-1-47> 전력저장장치 충/방전(@0.3C, 0.5C) 시험 결과 ····· 58
<그림 3-1-48> 전력저장장치 충/방전 (@0.5C) 시험결과 ····· 59
<그림 3-1-49> 단체표준표시인증 "KBIA-10104-02" (단전지/모듈/전지시스템) ····· 59
<그림 3-1-50> 전지시스템 성능 및 안정성 공인 시험성적서 ····· 60
<그림 3-1-51> 도시철도 복합에너지 시스템 구성도 ····· 60
<그림 3-1-52> PCS 회로 설계 ····· 62
<그림 3-1-53> 입력 필터 설계 파라미터 ····· 62
<그림 3-1-54> IGBT 모듈 열손실 분석 ····· 62
<그림 3-1-55> IGBT 모듈 방열판 장착 사진 ····· 63
<그림 3-1-56> 출력 필터부 설계 ····· 63
<그림 3-1-57> DSP 및 I/O 보드 설계 ····· 63
<그림 3-1-58> 설계된 기구 외형사이즈 ····· 64
<그림 3-1-59> 3레벨 NPC 제어 개념도 ····· 65
<그림 3-1-60> 제어기 구성 ····· 65
<그림 3-1-61> 전력변환부 및 입력/출력 필터 제작 ····· 65
<그림 3-1-62> 제작된 제어 보드 ····· 66
<그림 3-1-63> 200kW 개선품 PCS ····· 66
<그림 3-1-64> 250kW 개선품 PCS ····· 66
<그림 3-1-65> SGSF 규격 ····· 67
<그림 3-1-66> 200kW PCS 전자파 공인 성능 시험 파형 ····· 67

<그림 3-1-67> 200kW PCS 전자파시험 파형 ····· 68
<그림 3-1-68>온도 상승 시험 ····· 68
<그림 3-1-69> 200kW급 PCS 충/방전 온도 시험 그래프 ····· 69
<그림 3-1-70> 200kW급 PCS 케이스 상판 개선전 및 개선후 발열상태 ····· 69
<그림 3-1-71> 성능 인증 시험 진행 ····· 70
<그림 3-1-72> KTL 성능 시험성적서 ····· 71
<그림 3-1-73> 전력저장장치 사양서 ····· 72
<그림 3-1-74> 통신사양 및 시퀀스 검토 ····· 72
<그림 3-1-75> 랙 사양 ····· 74
<그림 3-1-76> BMS 통신 계층구조의 블록도 ····· 76
<그림 3-1-77> 400kWh 배터리 시스템 셋업 ····· 78
<그림 3-1-78> 전력선 연결 및 통신선 연결 구조 ····· 78
<그림 3-1-79> PMS와 BSC간에 통신 시퀀스 ····· 78
<그림 3-1-80> 통신 프로토콜 ····· 79
<그림 3-1-81> BMS ↔ BSC ↔ TOS 통신 연계 모습 ····· 79
<그림 3-1-82> 수락산 역사 시스템 구축 설치도 ····· 80
<그림 3-1-83> 수락산역 현장 설치 사진 ····· 80
<그림 3-1-84> DC 접속반의 사양 및 구조 ····· 80
<그림 3-1-85> LS산전 GIMAC-i 사양 및 모드버스 맵 ····· 81
<그림 3-1-86> UPS 사진 ····· 81
<그림 3-1-87> 200kW PCS의 트랜스 추가 설치 사진 ····· 82
<그림 3-1-88> 수락산 역사 시스템 구축 사진 ····· 82
<그림 3-1-89> 200kW PCS 결선 체크 및 절연 사진 ····· 83
<그림 3-1-90> 200kW PCS 및 배터리 저장 장치 결선 체크 및 절연 자체 시험 성적서 ····· 83
<그림 3-1-91> 200kW PCS 운영메뉴얼 ····· 83
<그림 3-1-92> 200kW PCS와 서버간에 연동 시험 ····· 84
<그림 3-1-93> 배터리 저장장치 BSC와 서버간에 연동 시험 ····· 84
<그림 3-1-94> 200kW PCS 충전 시험 파형 ····· 84
<그림 3-1-95> 200kW PCS 방전 시험 파형 ····· 85
<그림 3-1-96> 200kW PCS 충/방전시 Power 및 역률 측정 Data ····· 85
<그림 3-1-97> PCS 충/방전 시험시 PCS 및 분전반 온도 시험 ····· 85
<그림 3-1-98> BSC와 BPU CAN 통신 파형(PCS 미동작) ····· 86
<그림 3-1-99> PCS 동작시 BSC와 BPU간에 통신파형 ····· 86
<그림 3-1-100> 회생컨버터 및 배터리 저장장치와 연동 시험시 발생한 BSC Fault ····· 87
<그림 3-1-101> 회생컨버터 및 배터리 저장장치와 연동 시험시 CAN 파형 ····· 87
<그림 3-1-102> 실증 베드 연동 시험 ····· 88
<그림 3-1-103> 실증 베드 PMS & EMS 운영 ····· 88
<그림 3-1-104> 전자파 및 성능 시험 성적서 ····· 88
<그림 3-1-105> 전력저장장치 운영화면 ····· 89
<그림 3-1-106> 전력저장장치 피크전력제어 그래프 ····· 89

<그림 3-1-107> 수락산역 피크전력 절감량 및 전력저장장치 충·방전 그래프 ····· 90
<그림 3-1-108> 시스템 개요 ····· 91
<그림 3-1-109> 회생컨버터 System ····· 92
<그림 3-1-110> 회생컨버터 모듈(DC/DC 컨버터 모듈) ····· 93
<그림 3-1-111> 회생컨버터 모듈 회로도 ····· 100
<그림 3-1-112> Control B/D 구성 ····· 101
<그림 3-1-113> CPU & Base B/D 사진 ····· 102
<그림 3-1-114> Gate Driver B/D 사진 ····· 103
<그림 3-1-115> Voltage Sensor B/D 사진 ····· 103
<그림 3-1-116> Control Power SMPS 사진 ····· 104
<그림 3-1-117> Converter 모듈 설계 및 제작 1 ····· 105
<그림 3-1-118> Converter 모듈 설계 및 제작 2 ····· 105
<그림 3-1-119> 회생 Converter Module 사진 ····· 105
<그림 3-1-120> S/W 제어 알고리즘 구성도 ····· 106
<그림 3-1-121> 시험 환경 구성도 ····· 108
<그림 3-1-122> 슬라이닥스, Diode 정류기 & LC Filter ····· 108
<그림 3-1-123> 저항 부하 ····· 108
<그림 3-1-124> 회생 컨버터 모듈 정격 운전 Test - 입출력 파형 ····· 109
<그림 3-1-125> 응답 속도 Test 결과 ····· 110
<그림 3-1-126> 측정 결과 ····· 110
<그림 3-1-127> 측정 결과 ····· 111
<그림 3-1-128> 측정 결과 ····· 111
<그림 3-1-129> 측정 결과 ····· 112
<그림 3-1-130> 측정 파형_0[msec] ····· 113
<그림 3-1-131> 측정 파형_ 1[msec] ····· 113
<그림 3-1-132> 측정 파형_ 5[msec] ····· 113
<그림 3-1-133> YOKOGAWA WT3000 ····· 114
<그림 3-1-134> 회생 컨버터 Module #1 ~ #25 효율 측정 결과 ····· 114
<그림 3-1-135> 회생 컨버터 Unit H/W 구성 ····· 115
<그림 3-1-136> 100[kW] 회생컨버터 Unit 시스템 회로도 ····· 116
<그림 3-1-137> 시뮬레이션 구성 ····· 119
<그림 3-1-138> Gating Delay 따른 입력 & 출력 전압 시뮬레이션 결과 ····· 119
<그림 3-1-139> Gating Delay 따른 입력 & 출력 전압 시뮬레이션 결과 ····· 120
<그림 3-1-140> 회생 컨버터 모듈 평면도 ····· 120
<그림 3-1-141> 회생 컨버터 모듈 전면 ····· 121
<그림 3-1-142> 회생 컨버터 모듈 후면 ····· 121
<그림 3-1-143> 회생 컨버터 모듈 측면도 ····· 121
<그림 3-1-144> 100[kW] 회생에너지 Unit 1 ····· 121
<그림 3-1-145> 100[kW] 회생에너지 Unit 2 ····· 121
<그림 3-1-146> 100[kW] 회생에너지 Unit Test 구성 ····· 122

<그림 3-1-147> 가변 슬라이닥스 ····· 123
<그림 3-1-148> Diode Rectifier) ····· 123
<그림 3-1-149> 5직렬 Capacitor Bank ····· 123
<그림 3-1-150> 부하 저항 ····· 123
<그림 3-1-151> 입력 전압 측정 파형 ····· 124
<그림 3-1-152> 입력 전류 측정 파형 ····· 125
<그림 3-1-153> 출력 전압 측정 파형 ····· 125
<그림 3-1-154> 출력 전류 측정 파형 ····· 126
<그림 3-1-155> 출력 전류 측정 파형 ····· 126
<그림 3-1-156> Incoming Part 회로 ····· 127
<그림 3-1-157> Incoming 제작 및 주요 적용 부품 사진 ····· 127
<그림 3-1-158> Incoming Part Test 결과 ····· 128
<그림 3-1-159> Capacitor Bank 구성 회로도 ····· 129
<그림 3-1-160> Module 기구 설계 및 제작 사진 ····· 129
<그림 3-1-161> Capacitor Bank 기구 설계 ····· 130
<그림 3-1-162> Capacitor Bank 제작 ····· 130
<그림 3-1-163> Capacitor Bank Test 결과 ····· 131
<그림 3-1-164> 회로 설계 ····· 132
<그림 3-1-165> 시스템 구성 사진 ····· 133
<그림 3-1-166> 시스템 구성 및 계략도 ····· 133
<그림 3-1-167> 시스템 구성 및 제어기 Part 전체 블록도 ····· 134
<그림 3-1-168> 회생에너지 시스템 ↔ 상위제어기 통신 블록도 ····· 135
<그림 3-1-169> 회생에너지 시스템 ↔ 상위제어기 통신 블록도 - 통신 항목 ····· 135
<그림 3-1-170> Trend 시스템 블록도 ····· 136
<그림 3-1-171> Trend 데이터 수집 ····· 136
<그림 3-1-172> 현장 구축 배선도 ····· 137
<그림 3-1-173> 현장 구축 배치도 ····· 137
<그림 3-1-174> 현장 구축 사진 ····· 138
<그림 3-1-175> 회생에너지 전력변환장치 현장 설치 완료 및 시험 절차서 ····· 139
<그림 3-1-176> 시험 환경 구성 및 운전 Level 설정 ····· 139
<그림 3-1-177> Module Test 결과 ····· 140
<그림 3-1-178> DC 1800[V] 인가 시험 Test 결과 ····· 141
<그림 3-1-179> 광 인터페이스 블록도 ····· 142
<그림 3-1-180> 광 인터페이스 운전 순서도 및 시뮬레이션 결과 ····· 142
<그림 3-1-181> 광 인터페이스 시험 결과 (테스트 베드) ····· 143
<그림 3-1-182> 측정 포인트 ····· 144
<그림 3-1-183> Test 결과 파형 ····· 144
<그림 3-1-184> 충전 화면 200[kW] ····· 145
<그림 3-1-185> 충전 화면 250[kW] ····· 145
<그림 3-1-186> 충전 화면 300[kW] ····· 146

<그림 3-1-187> 충전 화면 375[kW] ····· 146
<그림 3-1-188> 9월 30일 - 약 620kWh ····· 146
<그림 3-1-189> 10월 02일 - 약 594kWh ····· 146
<그림 3-1-190> 일일 평균 발전량 비교(2017년 8월~12월) ····· 147
<그림 3-1-191> 일일 평균 발전량 비교(2018년 2월~5월) ····· 147
<그림 3-1-192> 월별 전차선 전력사용량 ····· 148
<그림 3-1-193> 월별 대표일 동작시간 ····· 149
<그림 3-1-194> 월별 대표일 회생에너지 충전량 ····· 149
<그림 3-1-195> 회생컨버터 밸런싱 개선시 회생에너지 충전량 ····· 151
<그림 3-1-196> 배터리 교체시 회생에너지 충전량 ····· 151
<그림 3-2-1> 전력저장장치 연계형 태양광 발전시스템 개요 ····· 154
<그림 3-2-2> 소형모듈 설계도면 ····· 155
<그림 3-2-3> 소형모듈 사진 ····· 155
<그림 3-2-4> 구조물 모형 및 개념도 ····· 157
<그림 3-2-5> 소형모듈의 기초시험 ····· 157
<그림 3-2-6> Laminator 공정조건 ····· 158
<그림 3-2-7> gel test 시험결과 ····· 158
<그림 3-2-8> 결정질 태양광 모듈 설계도면 ····· 165
<그림 3-2-9> 결정질 태양광 모듈(면적 660×1,460㎟, 발전량 150W, 셀수 4×9, 무게 15kg) ····· 165
<그림 3-2-10> 결정질 태양광 모듈 실증화를 위한 옥외 발전량 시험 ····· 166
<그림 3-2-11> 결정질 태양광 모듈 실증화를 위한 옥외 강풍 및 우수 시험 ····· 166
<그림 3-2-12> CIGS Flexible Solar Cell 및 단층구조 ····· 167
<그림 3-2-13> 45W급 모듈 개념 및 설계 ····· 167
<그림 3-2-14> CIGS Flexible 모듈 ····· 167
<그림 3-2-15> CIGS Flexible 태양광 모듈 시제품 ····· 168
<그림 3-2-16> 시제품 및 발전·전기적 특성 ····· 168
<그림 3-2-17> 자연광 파장 및 CIGS 흡수파장대역> ····· 169
<그림 3-2-18> 설치된 인버터 및 측정기 ····· 169
<그림 3-2-19> 시제품 시험결과 ····· 170
<그림 3-2-20> 표준설치 운영시험 ····· 170
<그림 3-2-21> 사용된 접착용재 및 규격 ····· 171
<그림 3-2-22> 부하 시험 구성도 ····· 173
<그림 3-2-23> 입력 전압 변동에 따른 효율(Vin = 500V) ····· 173
<그림 3-2-24> 발전소 예정부지 구역 구분 ····· 174
<그림 3-2-25> A, B구역 1월 그림자 형태 ····· 175
<그림 3-2-26> C, D구역 1월 그림자 형태 ····· 175
<그림 3-2-27> 도봉산 역사 태양광 적용 전체 계획도 ····· 177
<그림 3-2-28> 도봉산 역사 실리콘(SI) 결정질 모듈 표준 ····· 177
<그림 3-2-29> 도봉산 역사 평면도 분석 : 횡단면 상세도 ····· 178
<그림 3-2-30> 도봉산 역사 평면도 분석 : 종단면 상세도 ····· 178

<그림 3-2-31> 도봉산 역사 동쪽 선로벽면 태양광 모듈 설치도 ····· 179
<그림 3-2-32> 도봉산 역사 서쪽 선로벽면 태양광 모듈 설치도 ····· 179
<그림 3-2-33> 도봉산 역사 태양광-계통도 ····· 180
<그림 3-2-34> 태양광 컨버터 성능검증 시뮬레이터 ····· 180
<그림 3-2-35> 태양광 컨버터 입력 전압, 전류파형 ····· 181
<그림 3-2-36> 태양광 컨버터 출력 전압, 전류파형 ····· 181
<그림 3-2-37> 도봉산 역사 결정질 태양광 모듈 재료 운반 ····· 182
<그림 3-2-38> 결정질 태양광 모듈 경량 지지대 및 구조물 ····· 182
<그림 3-2-39> 결정질 태양광 모듈 경량 구조물 및 태양광 모듈 ····· 182
<그림 3-2-40> 도봉산 역사 태양광(동쪽 면) ····· 183
<그림 3-2-41> 도봉산 역사 태양광(서쪽 면) ····· 183
<그림 3-2-42> CIGS 플렉시블 모듈 설치를 위한 재료 운반 ····· 183
<그림 3-2-43> 역사 지붕 시공(특수 접착제 이용하여 별도의 추가 장비 및 하중 없음) ····· 183
<그림 3-2-44> 도봉산 역사 결정질 및 CIGS 플렉시블 태양광 발전소 ····· 183
<그림 3-2-45> DC/DC컨버터(좌측), 저장장치 및 인버터(우측) ····· 184
<그림 3-2-46> AC 전력 케이블(좌) 및 DC 차단기/AC분전반 ····· 184
<그림 3-2-47> AC차단기 및 DC차단기 내부 구성 ····· 184
<그림 3-2-48> DC차단기 및 50kW 인버터 및 90kWh 에너지저장장치 ····· 185
<그림 3-2-49> 통합 모니터링 시스템(좌) 및 발전량 모니터링(우) ····· 185
<그림 3-2-50> 시스템 구성 사진 ····· 186
<그림 3-2-51> 철도역사 테스트베드 ····· 187
<그림 3-2-52> EL 이미지 측정 ····· 187
<그림 3-2-53> 도봉산 태양광 모듈 ····· 189
<그림 3-2-54> 도봉산 역사 태양광 발전량 실측 ····· 195
<그림 3-3-1> 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템 개요 ····· 198
<그림 3-3-2> TLS 형태 ····· 215
<그림 3-3-3> TLS 조립도 ····· 217
<그림 3-3-4> TLS 설계도면 ····· 225
<그림 3-3-5> Prefabricated unit ····· 227
<그림 3-3-6> 모사된 충진재 (절곡된 형태) ····· 234
<그림3-3-7> TLS System (절곡된 형태) ····· 235
<그림 3-3-8> 알루미늄 판 (절곡된 상판) ····· 235
<그림 3-3-9> 알루미늄 판 (절곡된 하판) ····· 235
<그림 3-3-10> 모사된 충진재 (라운드형) ····· 236
<그림 3-3-11> TLS System (라운드형) ····· 236
<그림 3-3-12> TLS System 해석조건 (절곡된 형태) ····· 237
<그림 3-3-13> TLS System 해석조건 (라운드형) ····· 237
<그림 3-3-14> TLS 제작도면 ····· 239
<그림 3-3-15> TLS 시작품 실험장치 도면 ····· 241
<그림 3-3-16> 석고 주입 작업 ····· 250

<그림 3-3-17> CFD 분석 결과 ····· 253
<그림 3-3-18> 1단계 - Main long term simulation ····· 258
<그림 3-3-19> 2단계 - Season simulation (옵션1) ····· 258
<그림 3-3-20> 2단계 - Season simulation (옵션2) ····· 259
<그림 3-3-21> 측정개요 ····· 269
<그림 3-3-22> 선로 배관 배치 계획 ····· 270
<그림 3-3-23> 배수펌프실 설치안 ····· 270
<그림 3-3-24> 승강장 선로부 TLS 모듈 설치안 ····· 270
<그림 3-3-25> 배관도면 ····· 271
<그림 3-3-26> 순환장치 개념 설계 ····· 271
<그림 3-3-27> 순환장치 제작도면 ····· 273
<그림 3-3-28> 수락산역 진입선로 ····· 282
<그림 3-3-29> 수락산역 승강장 하부 선로배기시스템 댐퍼 ····· 282
<그림 3-3-30> TLS 시험장치 개요 ····· 285
<그림 3-3-31> TLS 제작 사진 ····· 286
<그림 3-3-32> 승강장 하부 TES ····· 287
<그림 3-3-33> TES 가동시 ····· 288
<그림 3-3-34> TES 미가동시 ····· 288
<그림 3-3-35> TES 가동시 ····· 292
<그림 3-3-36> TLS 성능시험장치 전경 ····· 293
<그림 3-3-37> 시험챔버 말단부 온도센서 ····· 294
<그림 3-3-38> 시험챔버 내부 ····· 294
<그림 3-3-39> 시험챔버 점검창 ····· 294
<그림 3-3-40> TLS 공기빼기 밸브 ····· 294
<그림 3-3-41> 기류조절 댐퍼 ····· 294
<그림 3-3-42> 온도조절용 히터 ····· 294
<그림 3-3-43> 성능시험장치 개요 ····· 296
<그림 3-3-44> 지하수 유량 2LPM 적용시 챔버내 유속에 따른 흡열량 분석 ····· 314
<그림 3-3-45> 지하수 유량 4LPM 적용시 챔버내 유속에 따른 흡열량 분석 ····· 315
<그림 3-3-46> 지하수 유량 4LPM 적용시 챔버내 유속에 따른 흡열량 분석 ····· 315
<그림 3-3-47> 챔버내 유속 1m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석 ····· 315
<그림 3-3-48> 챔버내 유속 3m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석 ····· 316
<그림 3-3-49> 챔버내 유속 5m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석 ····· 316
<그림 3-3-50> 성능시험장치 개요도 ····· 317
<그림 3-3-51> TLS 패널내 지하수 유량에 따른 흡열량 분석 ····· 321
<그림 3-3-52> 챔버내 기류속도에 따른 흡열량 분석 ····· 321
<그림 3-3-53> 지하수 유량 2LPM 적용시 챔버내 유속에 따른 흡열량 분석 ····· 336
<그림 3-3-54> 지하수 유량 4LPM 적용시 챔버내 유속에 따른 흡열량 분석 ····· 337
<그림 3-3-55> 지하수 유량 6LPM 적용시 챔버내 유속에 따른 흡열량 분석 ····· 337
<그림 3-3-56> 챔버내 유속 1m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석 ····· 337

<그림 3-3-57> 챔버내 유속 3m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석 ····· 338
<그림 3-3-58> 챔버내 유속 5m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석 ····· 338
<그림 3-3-59> TLS 패널내 지하수 유량에 따른 흡열량 분석 ····· 343
<그림 3-3-60> 챔버내 기류속도에 따른 흡열량 분석 ····· 344
<그림 3-3-61> 지하수 유량 2LPM 적용시 기류속도에 따른 흡열량 분석(종합결과) ····· 345
<그림 3-3-62> 지하수 유량 2LPM 적용시 기류속도에 따른 흡열량 분석(종합결과) ····· 345
<그림 3-3-63> 지하수 유량 6LPM 적용시 기류속도에 따른 흡열량 분석(종합결과) ····· 345
<그림 3-3-64> 챔버내 유속 1m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석(종합결과) ····· 346
<그림 3-3-65> 챔버내 유속 3m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석(종합결과) ····· 346
<그림 3-3-66> 챔버내 유속 5m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석(종합결과) ····· 346
<그림 3-3-67> 마들역사 개요 ····· 351
<그림 3-3-68> 2016/10/09 14:00 ~ 14:18 온도변화 ····· 354
<그림 3-3-69> 2016/10/10 선로 중앙부 온도변화 ····· 355
<그림 3-3-70> 선로부 일별 온도분포 ····· 355
<그림 3-3-71> 성능예측선도(기류속도 1m/s) ····· 360
<그림 3-3-72> 성능예측선도(기류속도 3m/s) ····· 360
<그림 3-3-73> 성능예측선도(기류속도 5m/s) ····· 360
<그림 3-3-74> TLS 성능예측 소프트웨어 개발 ····· 361
<그림 3-3-75> 평면도 하부 ····· 361
<그림 3-3-76> 평면도-1 ····· 362
<그림 3-3-77> 평면도-2 ····· 362
<그림 3-3-78> 모듈 배치도 ····· 363
<그림 3-3-79> 공사 원가 계산서 ····· 363
<그림 3-3-80> 내역서 ····· 364
<그림 3-3-81> TLS패널 정면도, 측면도, 제원 ····· 364
<그림 3-3-82> 프레임 해석모델 ····· 366
<그림 3-3-83> 패널+프레임 해석모델 ····· 366
<그림 3-3-84> 지점조건 ····· 367
<그림 3-3-85> TLS패널 Frame S.F.D ····· 367
<그림 3-3-86> TLS패널의 Frame B.M.D ····· 368
<그림 3-3-87> TLS패널의 Frame Axial Force ····· 368
<그림 3-3-88> 변형도 ····· 369
<그림 3-3-89> TLS 패널 도면1 ····· 371
<그림 3-3-90> TLS 패널 도면2 ····· 371
<그림 3-3-91> 메달기식 ····· 372
<그림 3-3-92> 벽부착식 ····· 372
<그림 3-4-1> 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템 개념도 ····· 373
<그림 3-4-2> 시스템 구성도 및 동작흐름도 ····· 386
<그림 3-4-3> LCCA 분석 시스템 ····· 387
<그림 3-4-4> 에너지비용 산출 모듈 ····· 387

<그림 3-4-5> LCA 분석 시스템 ····· 388
<그림 3-4-6> 전동기 가동 시간 설정 ····· 391
<그림 3-4-7> 전동기 종류 설정 ····· 391
<그림 3-4-8> 시스템 시범 구동 결과 ····· 392
<그림 3-4-9> 기존유도기 가변운전시 시간대별 입력 전력 ····· 394
<그림 3-4-10> 기존유도기 가변운전시 시간대별 효율 ····· 394
<그림 3-4-11> SynRM 가변운전 시 시간대별 입력 전력 ····· 395
<그림 3-4-12> SynRM 가변운전 시 시간대별 효율 ····· 395
<그림 3-4-13> 지하역사 승강장 환기량 산정 프로세스 ····· 398
<그림 3-4-14> 시간대별 승강장 냉방부하 변화 ····· 400
<그림 3-4-15> 시간대별 승강장 환기량 변화 ····· 401
<그림 3-4-16> 현 수락산역 승강장 환기설비 구성도 ····· 403
<그림 3-4-17> 수락산역 공조 및 환기계통도 1 ····· 403
<그림 3-4-18> 수락산역 공조 및 환기계통도 2 ····· 404
<그림 3-4-19> 환기시스템 구성도 ····· 405
<그림 3-4-20> 기존 모터 설치 모습 ····· 406
<그림 3-4-21> 기존 모터 해체 ····· 406
<그림 3-4-22> 고효율 전동기 교체 (1호 공조기) ····· 407
<그림 3-4-23> 고효율 전동기 교체 (2호 공조기) ····· 407
<그림 3-4-24> MCC 판넬 공사전 ····· 407
<그림 3-4-25> MCC 판넬 부분 철거 ····· 407
<그림 3-4-26> 인버터 및 판넬 제작 ····· 407
<그림 3-4-27> 인버터 판넬 설치 ····· 407
<그림 3-4-28> 미세먼지센서 설치 사진 ····· 408
<그림 3-4-29> 상위제어기 설치 모습 ····· 408
<그림 3-4-30> 상위제어기 및 서버컴퓨터 모습 ····· 408
<그림 3-4-31> 상위제어기 연결 개념도 ····· 409
<그림 3-4-32> 환기시스템 구성도 ····· 409
<그림 3-4-33> 일반 승강장공조시스템 구성도 ····· 410
<그림 3-4-34> 일반 승강장공조시스템 개념도 ····· 410
<그림 3-4-35> 승강장 취출구 풍량 측정 모습 ····· 411
<그림 3-4-36> 수락산역 승강장 취출구 ····· 411
<그림 3-4-37> 상행선 승강장 1구역 취출구 위치 ····· 412
<그림 3-4-38> ON/OFF운전 스케줄 ····· 413
<그림 3-4-39> 실내환경측정기 ····· 413
<그림 3-4-40> 미세먼지측정기 ····· 413
<그림 3-4-41> Y-△기동 시퀀스 도면 ····· 415
<그림 3-4-42> 인버터2차측과 MC2차측 결선도 ····· 415
<그림 3-4-43> 전력분석기와 인버터 ····· 415
<그림 3-4-44> 인버터를 이용한 블로워의 회전수 제어 ····· 415

<그림 3-4-45> 상행선 승강장 1구역 취출구 위치 ····· 416
<그림 3-4-46> 가변운전실험시 가변운전 스케줄 ····· 417
<그림 3-4-47> 운전방식에 따른 시간별 미세먼지농도 상행선 X19축 ····· 419
<그림 3-4-48> 운전방식에 따른 시간별 미세먼지농도 상행선 X28축 ····· 419
<그림 3-4-49> 운전방식에 따른 시간별 미세먼지농도(산술적으로 감안) 상행선 X19축 ····· 420
<그림 3-4-50> 운전방식에 따른 시간별 미세먼지농도(산술적으로 감안) 상행선 X28축 ····· 420
<그림 3-4-51> 전산유체역학 시뮬레이션을 이용한 환기설비 가동시 승강장 공기유동분석 ····· 421
<그림 3-4-52> 미세먼지 측정기 ····· 422
<그림 3-4-53> 미세먼지센서 ····· 422
<그림 3-4-54> 미세먼지 측정 값 ····· 422
<그림 3-4-55> 비례제어 ····· 423
<그림 3-4-56> 실제 승강장 가변운전시 시스템 모니터링 화면 ····· 423
<그림 3-4-57> 가변운전실험 4월13일～4월27일까지 15일 측정 ····· 424
<그림 3-4-58> 4월16일～4월17일 승강장 미세먼지 측정결과 ····· 425
<그림 3-4-59> 4월21일～4월22일 승강장 미세먼지 측정결과 ····· 425
<그림 3-4-60> 고효율 전동기 발전사 ····· 426
<그림 3-4-61> 고효율 전동기 특성 비교 ····· 427
<그림 3-4-62> 동기형 릴럭턴스 전동기의 설계 순서도 ····· 428
<그림 3-4-63> 정격 포인트 운전 시 SynRM 철심 (a) 자속밀도 (b)철손분포 ····· 430
<그림 3-4-64> 철심의 포화 영향에 따른 단위 전류당 최대 토크(MTPA) 전류 위상각 이동 ····· 430
<그림 3-4-65> 최적설계모델 ····· 430
<그림 3-4-66> 전류/전류위상별 토크 (b) 전류/전류위상별 효율 (c) 전류/전류위상별 역률 ····· 431
<그림 3-4-67> 30kW급 SynRM (a)회전자 (b)회전자 코어 (c)고정자(하우징) ····· 432
<그림 3-4-68> (a)설계 전동기 (b)ABB 전동기 (c)ABB 인버터 ACS880 ····· 432
<그림 3-4-69> 계측 장치 ····· 433
<그림 3-4-70> 계측값 모니터링 ····· 433
<그림 3-4-71> 설계 전동기 및 설계 인버터 시험 세트 ····· 433
<그림 3-4-72> 송풍기의 특성 ····· 434
<그림 3-4-73> MCC연결 ····· 434
<그림 3-4-74> 인버터 연결 ····· 434
<그림 3-4-75> 동기형릴럭턴스 전동기 세트 설치 (a) 전원 (b) 인버터 (c) 전동기, 풀리 ····· 435
<그림 3-4-76> 동기형 릴럭턴스 전동기 세트 설치 후 시험 결과 ····· 435
<그림 3-4-77> 인버터 제어 보드의 하드웨어 구성도 ····· 438
<그림 3-4-78> SynRM 드라이브를 위한 인버터의 제어 알고리즘 순서도 ····· 439
<그림 3-4-79> 상위제어기 구성도 ····· 440
<그림 3-4-80> DDC 생산 공정표 ····· 441
<그림 3-4-81> 상위제어기 조립사진 ····· 441
<그림 3-4-82> 상위제어기 TEST 사진 ····· 441
<그림 3-4-83> 상위제어기 판넬 제작사진-2 ····· 441
<그림 3-4-84> 상위제어기 프로그램 작성사진-1 ····· 445

<그림 3-4-85> 상위제어기 관리서버 인터페이스 화면 ····· 445
<그림 3-4-86> 상위제어기 프로그램 작성사진-2 ····· 446
<그림 3-5-1> 통합에너지 운영시스템 개념 ····· 447
<그림 3-5-2> EIG 하드웨어 플랫폼의 구조 ····· 448
<그림 3-5-3> EIG 외형과 구성요소 ····· 449
<그림 3-5-4> EIG 회로도 ····· 449
<그림 3-5-5> TOS의 5계층 구조 ····· 450
<그림 3-5-6> Raspberry Pi ····· 451
<그림 3-5-7> 분산처리 프레임워크 ····· 451
<그림 3-5-8> EIG와 통합에너지 운영시스템 ····· 452
<그림 3-5-9> IOT유닛, EIG 설계 ····· 454
<그림 3-5-10> 시스템 단위 설계 ····· 454
<그림 3-5-11> EIG가 취득한 국제표준 인증 ····· 455
<그림 3-5-12> SunSpec 상호운용성 표현 ····· 456
<그림 3-5-13> 통신 프레임워크 개선 ····· 457
<그림 3-5-14> 테스트베드 구축 계획 ····· 457
<그림 3-5-15> 지상역사 테스트베드 구축 ····· 458
<그림 3-5-16> 지하역사 테스트베드 구축 ····· 458
<그림 3-5-17> TR용량을 고려한 방전 전략 ····· 459
<그림 3-5-18> TR용량을 고려한 충전 전략 ····· 459
<그림 3-5-19> PCS 통신 테스트 결과 ····· 460
<그림 3-5-20> 개별시험 및 연동시험 ····· 460
<그림 3-5-21> 개별시험 및 연동시험 ····· 461
<그림 3-5-22> 시험 운영 ····· 461
<그림 3-5-23> 에너지 절감량 산출 ····· 462
<그림 3-5-24> 역사에너지 통합 운영시스템 UI ····· 462
<그림 3-5-25> 직류전기철도시스템 운전 개략도 ····· 464
<그림 3-5-26> 직류도시철도 시스템 개략도 ····· 465
<그림 3-5-27> 직류 도시철도 시스템 등가회로 ····· 465
<그림 3-5-28> 조류계산 알고리즘의 flowchart ····· 467
<그림 3-5-29> 도시철도 복합에너지 시스템 구성도 ····· 469
<그림 3-5-30> 도시철도 복합에너지 시스템의 부하 ····· 470
<그림 3-5-31> 복합에너지 시스템 회생전력 모델링 ····· 471
<그림 3-5-32> 도시철도 복합에너지 시스템의 태양광 발전기 모델링 ····· 473
<그림 3-5-33> 기본요금의 특성을 반영한 피크저감량 산정 ····· 475
<그림 3-5-34> 방전비용 적용 유무에 따른 충·방전량 변화 ····· 475
<그림 3-5-35> 도시철도 복합에너지 시스템 스케줄링 알고리즘 ····· 476
<그림 3-5-36> 피크전력 제한량 산정 알고리즘 ····· 477
<그림 3-5-37> 에너지저장장치 충·방전 모델링 ····· 479
<그림 3-5-38> 태양광 발전기 및 태양광 에너지저장장치 모델링 ····· 480

<그림 3-5-39> 도시철도 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 알고리즘의 입출력 데이터 ····· 482
<그림 3-5-40> 에너지 저장장치 정격 산정 절차 ····· 484
<그림 3-5-41> 복합에너지원 적정용량 산정 절차 ····· 484
<그림 3-5-42> 에너지 저장장치 적정용량 산정 절차 ····· 485
<그림 3-5-43> 일 단위 해석 수행 절차 ····· 486
<그림 3-5-44> 현장구축을 위한 추가 모듈 설계 ····· 487
<그림 3-5-45> 도시철도 복합에너지 시스템 관리자용 UI ····· 487
<그림 3-5-46> rollup 요청에 대한 응답의 데이터 구조 ····· 488
<그림 3-5-47> 2014년 8월 1일 취득 지점별 수요실적 ····· 490
<그림 3-5-48> 에너지저장장치 충·방전량 효과 제거 전후의 도봉산역 수요 ····· 491
<그림 3-5-49> 도봉산역 요일별 수요 패턴 ····· 491
<그림 3-5-50> 마들역 요일별 수요 패턴 ····· 492
<그림 3-5-51> 수락산역의 수요패턴 ····· 492
<그림 3-5-52> 열차의 수요패턴 ····· 493
<그림 3-5-53> 변전소 부하 ····· 493
<그림 3-5-54> 회생전력 발생량 ····· 494
<그림 3-5-55> 가중이동평균법을 이용한 수요예측 ····· 494
<그림 3-5-56> 과거 실적 선정 예시 ····· 495
<그림 3-5-57> 수요 및 신재생 발전량 예측 알고리즘 ····· 495
<그림 3-5-58> 이상 데이터를 포함하는 수요 실적 ····· 496
<그림 3-5-59> 아웃라이어 제거 알고리즘 ····· 496
<그림 3-5-60> 아웃라이어 제거 알고리즘 적용 전 ····· 497
<그림 3-5-61> 아웃라이어 제거 알고리즘 적용 후 ····· 497
<그림 3-5-62> 예측오차 해소를 위한 재 스케줄링 과정 ····· 497
<그림 3-5-63> 도시철도 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 알고리즘 운영자 UI ····· 498
<그림 3-5-64> 도시철도 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 알고리즘 운영자 UI 설명 ····· 499
<그림 3-5-65> 매뉴얼모드 화면 ····· 500
<그림 3-5-66> 매뉴얼모드 화면 설명 ····· 500
<그림 3-5-67> 예측량 수정 화면 ····· 501
<그림 3-5-68> 예측량 수정 화면 설명 ····· 501
<그림 3-5-69> 저장된 스케줄링 결과 조회(터미널) ····· 502
<그림 3-5-70> 저장된 스케줄링 결과 조회(UI) ····· 503
<그림 3-5-71> 2018년 2월 23일의 스케줄 ····· 503
<그림 3-5-72> 2018년 2월 23일의 동작결과 ····· 503
<그림 3-5-73> 2017년 11월 3일 메인 에너지저장장치 방전 결과 ····· 505
<그림 3-5-74> 2017년 11월 3일 태양광 에너지저장장치 충·방전 결과 ····· 506
<그림 3-5-75> 2017년 11월 3일 부하 및 전력 구매량 ····· 506
<그림 3-5-76> 2018년 2월 23일 메인 에너지저장장치 충·방전 결과 ····· 507
<그림 3-5-77> 2018년 2월 23일 태양광 에너지저장장치 충·방전 결과 ····· 507
<그림 3-5-78> 2018년 2월 23일 부하 및 전력 구매량 ····· 508

<그림 3-5-79> 2018년 4월 5일 ~ 6일 충·방전 결과 ····· 508
<그림 3-5-80> 2017년 3월 16일 메인 에너지저장장치 충·방전 결과 ····· 510
<그림 3-6-1> BIM 기반 도시철도 역사 에너지성능평가 솔루션 기본개념 및 성능평가 프로세스 ····· 514
<그림 3-6-2> 도시철도 역사 에너지성능평가 솔루션의 사용자 프로세스 개념도 ····· 516
<그림 3-6-3> ISO+DIN 기반 에너지 성능평가 프로세스 ····· 519
<그림 3-6-4> ISO+DIN 알고리즘의 기본 클래스 ····· 520
<그림 3-6-5> ISO+DIN 에너지 해석 모듈별 클래스 ····· 521
<그림 3-6-6> 에너지 해석모듈 작성 과정 ····· 521
<그림 3-6-7> 모델링 기법에 대한 예시 이미지 ····· 524
<그림 3-6-8> 속성 설정에 대한 예시 화면 ····· 525
<그림 3-6-9> 수락산 역사 디자인빌더 이미지 ····· 526
<그림 3-6-10> 테스트베드 현장평가 및 모델 구축절차 ····· 529
<그림 3-6-11> 에너지 성능평가 프로세스(안) ····· 530
<그림 3-6-12> 프로세스를 통한 대안평가 보고서(안) ····· 531
<그림 3-6-13> 테스트 모델 구축 ····· 532
<그림 3-6-14> 기본정보 입력 ····· 532
<그림 3-6-15> 설비정보 입력 ····· 533
<그림 3-6-16> 시뮬레이션 결과 ····· 534
<그림 3-6-17> 수락산 역사도면 ····· 534
<그림 3-6-18> 설비 및 전기시스템 현황 ····· 535
<그림 3-7-1> 5호선 선로 구배도 ····· 536
<그림 3-7-2> 7호선 선로 구배도 ····· 536
<그림 3-7-3> 실증역사 전력계통도 ····· 537
<그림 3-7-4> 수락산변전소에서 공급하는 전력 ····· 538
<그림 3-7-5> 도봉산, 수락산, 마들역사의 월별 전력 소비 패턴 ····· 538
<그림 3-7-6> 테스트베드 구축을 위한 전체 계획 ····· 539
<그림 3-7-7> 회생전력 흡수전력량 ····· 541
<그림 3-7-8> 회생전력 흡수전력량(시스템 개선 후) ····· 542
<그림 3-7-9> 태양광 발전량 ····· 543
<그림 3-7-10> 가변운전실험 4월13일~4월27일까지 15일 전력사용량 ····· 543
<그림 3-7-11> 가변운전실험 4월21일~4월22일까지 공기질 모니터링 ····· 543
<그림 3-7-12> 모의시험장치 ····· 544
<그림 3-7-13> 유량별 흡열량 비교 ····· 545
<그림 3-7-14> 시뮬레이션 결과 ····· 546
<그림 3-7-15> 지상역사용 에너지 절감 개발시스템 ····· 549
<그림 3-7-16> 태양광발전 사업화모델(SBM/G) 구성도 ····· 550
<그림 3-7-17> 태양광발전 사업화모델 구축도 ····· 551
<그림 3-7-18> 회생전력 사업화모델(RBM/G) 구성도 ····· 551
<그림 3-7-19> 회생전력 사업화모델 구축도 ····· 552
<그림 3-7-20> 지하역사용 에너지 절감 개발시스템 ····· 553

<그림 3-7-21> 고효율 환기 사업화모델(HBM/UG) 구성도 ····· 553
<그림 3-7-22> 고효율 환기 사업화모델 구축도 ····· 554
<그림 3-7-23> 회생전력 사업화모델(RBM/UG) 구성도 ····· 555
<그림 3-7-24> 회생전력 사업화모델 구축도 ····· 556
<그림 3-7-25> 폐열회수 사업화모델(TBM/UG) 구성도 ····· 556
<그림 3-7-26> 폐열회수 사업화모델 구축도 ····· 557
<그림 3-7-27> 도봉산역 태양광발전 설치도 ····· 558
<그림 3-7-27> 분산형전원 계통연계설비 기준 ····· 573
<그림 4-1-1> 200kW급 PCS ····· 579
<그림 4-1-2> 400kWh급 ESS(리튬) ····· 579
<그림 4-1-3> 500kW급 회생컨버터 ····· 579
<그림 4-1-4> 도봉산역 결정질 태양광 ····· 580
<그림 4-1-5> 도봉산역 플렉시블 설치사진 ····· 580
<그림 4-1-6> ESS 연계 전력컨버터 ····· 580
<그림 4-1-7> 흡열모듈 성능 시험장치 ····· 581
<그림 4-1-8> 흡열모듈 성능검증 챔버 ····· 581
<그림 4-1-9> 성능시험 결과 ····· 581
<그림 4-1-10> 환경센서 ····· 582
<그림 4-1-11> 고효율SynRM 전동기 ····· 582
<그림 4-1-12> 가변제어 인버터 ····· 582
<그림 4-1-13> 통합 에너지모니터링 화면 ····· 583
<그림 4-1-14> EIG/IoT측정Unit ····· 583
<그림 4-1-15> 에너지 스케줄링 UI ····· 583
<그림 4-1-16> 에너지 성능평가 솔루션 입력/평가결과 화면 ····· 583
<그림 4-1-17> 실증 테스트베드 구축 개념도 ····· 584
<그림 4-1-18> 도봉산역 태양광 설치사진 ····· 584
<그림 5-1-1> 시범역사 CIGS 태양광모듈 설치제안 도면 ····· 588
<그림 5-1-2> 시범역사 스마트 전력시스템 설치제안 도면 ····· 589

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 본 연구에서는 도시철도 역사의 에너지 자립화를 위해 도시철도 지하역사, 지상역사에 대한 에너지 절감시스템 개발 및 실증 테스트베드 구축을 통해 기존 도시철도 역사의 전력사용량을 절감하는 것을 목적으로 함.

2. 연구개발의 필요성

- 도시철도는 국토 이용의 효율적 활용 측면에서 대부분 지하에 건설, 운영되고 있으며, 도시철도 변전소에서는 전기공급사업자(한국전력공사)로부터 전력을 공급받아 해당 구간에 운행되는 전동차와 역사(3~5개)에 전력을 공급하고 있음. 일반적으로 도시철도에서의 전력소비는 크게 전동차용 전력(50%~70%)과 역사운영 전력(30%~50%)으로 소비하고 있음.

<표 1-1-1> 도시철도 역사 수

구분	서울	인천	부산	대구	광주	대전	합계
지상역사	24	2	25	1	2	0	54 (10%)
지하역사	277	27	83	58	18	22	485 (90%)
합계	301	29	108	59	20	22	539

※ 통계로 보는 한국철도

- 최근 들어 도시철도 역사 내 편의시설 및 임대업 확대와 및 쾌적성 유지를 위한 공조·냉난방 부하의 증가에 따른 도시철도 역사의 에너지 소비가 지속적으로 증가하고 있으며, 또한 전력 요금제 변경 등으로 전력 요금단가도 인상되고 있어 전반적인 전력요금 상승으로 인한 도시철도 역사의 운영비가 급증하고 있음. 한 사례로 2012년 11월 1일 전력요금 적용 종별 변경으로 22.8%의 요금인상 효과 발생함

<표 1-1-2> 서울교통공사 요금인상 추이

구 분	'08.1.	'08.11.	'09.6.	'10.8.	'11.8.	'11.12.	'12.8.	'12.11.	'13.1.	'13.11.
인상 효과	1%	8.1%	5%	7.1%	6.3%	6.6%	6%	22.8%	4%	6.4%
누적	-	9.2%	14.6%	22.8%	30.5%	39.1%	47.5%	81.1%	88.3%	100.4%

<표 1-1-3> 요금제 변경 사례

기본요금	사용량요금		
	여름철 (7~8월)	봄·가을철 (3~6, 9~10월)	겨울철 (11~2월)
5,110	60.6	45.0	50.7

▶

기본요금	사용량요금			
	시간대	여름철 (6~8월)	봄·가을철 (3~5, 9~10월)	겨울철 (11~2월)
8,320	경부하	56.1	56.1	63.1
	중간부하	109.0	78.6	109.2
	최대부하	191.1	109.3	166.7

- 이와 같이 전력요금 절감을 위해 도시철도 운영기관에서는 최대전력제어시스템을 구축하여 부하 급증으로 인한 최대수요전력 목표값을 단계별로 설정하고 역사부하설비를 순차적으로 자동 제어하여 피크전력을 목표값 이하로 유지하여 최대수요전력(15분 평균 피크전력) 절감을 통해 도시철도 전력요금의 20% 가량을 차지하는 최대수요전력에 의한 기본요금을 절감하고 있음. 또한 회생에너지 저장장치 및 회생인버터 등 도시철도 차량에서 발생하는 회생에너지를 활용하기 위한 설비를 일부 도입하고 있으며, 최근 지하공간의 조명에너지 절감을 위해 LED조명으로 대체하고 있음.
- 기존의 철도차량 운행에 따른 에너지를 절감하는 방안은 회생에너지 저장장치 등을 이용한 회생에너지의 저장 및 활용, 에코 드라이빙 등 능동적인 방식을 검토하고 있으나 도시철도 역사에 대한 에너지 절감대책은 환기설비 및 냉방설비의 운전시간 감소 및 조명제어를 통한 격등, 구간별 소등 등 전력설비의 사용시간을 감소시키는 수동적인 대책을 운영하고 있음.
- 따라서 도시철도 역사의 에너지 사용을 획기적으로 절감하기 위해서는 전기공급사업자 전력원 이외에 신재생에너지 및 차량 회생에너지 등 자체적인 전력원 확보와 전력저장장치를 이용하여 최적의 시간대에 저장된 전력을 사용하는 능동적인 에너지 절감방안이 필요함.
- 본 연구에서는 도시철도 역사의 피크전력을 저감하고 전력사용량을 줄이기 위해 도시철도 지하역사와 지상역사별로 적용 가능한 에너지원(신재생에너지, 차량 회생에너지원 등)의 활용 기술과 도시철도 역사용 전력저장장치와 복합에너지 최적 제어시스템을 개발하고, 도시철도 운영 역사의 실증 구축을 통해 성능평가 및 에너지 절감 활용 모델을 개발하고자 함.

3. 연구개발 범위

가. 최종 목표

○ 도시철도 역사의 에너지 자립화를 위한 전력저장장치 기반의 에너지 최적 운영 기술 및 에너지 절감시스템 개발

- 도시철도 지하역사, 지상역사에 대한 에너지 절감시스템 개발 및 테스트베드 구축
- 역사 전력사용량 30%(피크전력 5% 포함), 전력요금 10% 이상 절감
- 도시철도 에너지절감 시스템 사업화 모델 개발 및 제도화 지원

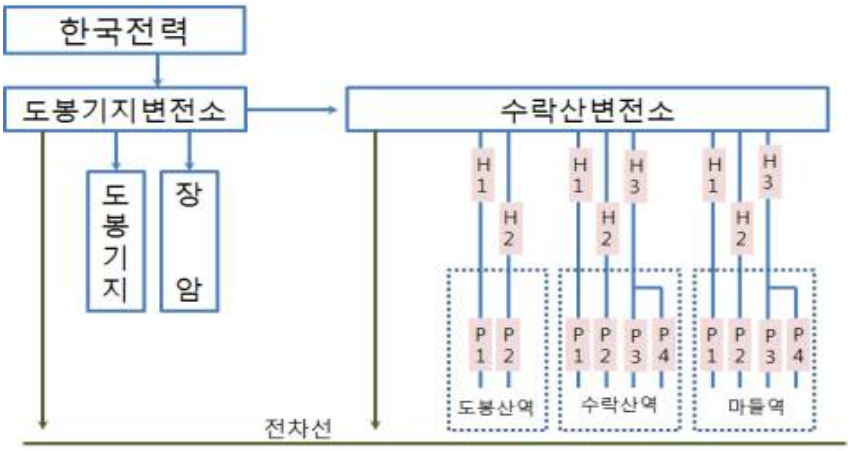
(1) 최종목표 설정 근거

- 도시철도 역사의 전력사용량 30% 절감 목표는 테스트베드 구축을 위한 실증역사로 선정된 서울 7호선 수락산역(지하)과 도봉산역(지상)의 3년간 일평균 전력사용량을 대상으로 선정하였으며, 전력사용량이 많은 수락산역 전력사용량의 30%인 1,395[kWh/일]을 절감목표로 선정함. 다만, 해당 전력절감량은 2011년~2013년 3년간의 일평균 전력사용량을 기준으로 산정하였으나 최근 편의시설 증가 및 지하 공기질 개선을 위한 환기 부하 급증으로 점차 증가되고 있는 추세임.

<표 1-1-4> 실증역사 3년간 일평균 전력사용량

구 분	일평균 전력사용량 (kWh/일)	설정 근거
수락산역 (지하역사)	4,650	대상연도 : 3년간(2011~2013)
도봉산역 (지상역사)	1,865	

- 절감 대상역사인 수락산역과 도봉산역은 수락산변전소로부터 전기를 공급받고 있으며, 수락산변전소는 인근 도봉기지변전소로부터 연락수전을 받아 역사 및 전동차에 전력을 공급하고 있음. 수락산변전소는 도봉산역, 수락산역 이외에 마들역까지 3개 역사에 전력을 공급하고 있음.



<그림 1-1-1> 수락산변전소 전력계통도

(2) 에너지절감설비별 에너지 절감량

- 전력저장장치 기반의 복합에너지(회생에너지) 생산시스템 개발(ESS, PCS, 회생에너지 변환장치)
  - 전력피크 5%를 절감 목표 달성을 위해 시간당 최대 200kWh(2시간)로 선정하여 ESS용량을 400kWh로 산정(시간당 평균 150kWh 이상 절감)
  - 차량에서 발생하는 회생에너지를 역사에 활용하기 위해 회생에너지변환장치를 500kW로 산정하였으며, 1일 회생에너지를 활용한 역사 에너지 절감량은 800kWh~900kWh를 목표로 산정

- 1회 회생에너지 전력 변환량 : 400[kW] - 1회 정차시 10초 동안 회생에너지 발생량 : 1,111[Wh] - 회생에너지 발생 주기 : 1분 30초 (1시간에 40회 정차) - 1시간당 회생에너지 발생량 : 44.4[kW] - 1일 열차 운행시간 동안 회생에너지 총 발생량(19시간) : 840[kWh]

- 전력저장장치 기반의 복합에너지(회생에너지) 생산시스템은 수락산역에 설치하여 현장시험을 통한 에너지 절감 및 피크전력 절감량을 검증

• 도시철도 역사용 경량화/플렉시블 수직경사면 태양광발전 시스템
  - 태양광발전 시스템은 지상역사인 도봉산역사의 설치 공간을 고려하여 선로변, 역사 벽면에 Si결정질 태양광모듈(23kW)과 역사 지붕에 플렉시블 태양광 모듈(7kW) 설치하여 에너지 생산량 검증(현장 설치조건에 따라 용량 변경 가능)
  - 에너지 절감량은 태양광 발전의 일일 유효전력 생산시간(3.5h)을 고려해 일일 105kWh를 목표로 산정

• 선로흡열장치(TLS, Thermal Lining System)
  - 승강장 전 개소에 설치시 176kWh를 절감 목표로 산정
  - 수락산역에 신재생에너지원 및 폐열원 설치에 대한 연구내용 조정으로 현장구축이 불가함에 따라 단위 모듈에 대한 흡열량을 실험실에 실험값을 통해 목표 성능 검증

• 고효율 환기시스템(개량형 SynRM, 가변제어 인버터, 최적 환기제어기술)
  - 수락산역 승강장 및 대합실 급배기팬(블로워 적용 환기설비)의 전력사용량인 3,174kWh의 5%의 절감량인 일일 158kWh 절감을 목표로 산정
  - 기존 승강장 환기설비를 개선하여 모터, 인버터, 제어기를 현장 설치하여 기존 전력소비량인 340kWh의 10% 절감량인 일일 34kWh 절감량을 통해 성능 검증

• 도시철도 통합 에너지 운영시스템(TOS, Total Operation System)
  - 전력저장장치 충방전 및 기존 전력부하 최적 운영을 통해 기존 전력사용량의 5% 절감량인 232kWh를 목표로 선정
  - 수락산역에 설치된 TOS의 전력사용량 총 절감량 측정을 통해 성능 검증

• 도시철도 지하역사(수락산역) 및 지상역사(도봉산역) 1개소를 대상으로 에너지 절감 시스템을 구축하고, 종합적인 에너지 성능평가를 통해 사업화 모델을 발굴

나. **연구목표 및 내용(총괄)**

(1) 신재생에너지와 회생에너지를 연계한 전력저장장치 기반의 복합에너지 생산기술
  - 전력저장장치가 결합된 계통연계형 PCS 개발
  - 전력저장장치 연계용 회생에너지 전력변환장치 개발
  - 도시철도 역사용 경량화된 태양광 모듈 및 연계시스템 개발
  - 도시철도 역사 복합에너지 최적 스케줄링 알고리즘 개발

(2) 도시철도 역사 에너지 최적관리 및 에너지 절감 기술

- 전력 공급원, 부하설비를 통합 에너지 감시 및 제어를 위한 에너지 통합 운영시스템(TOS, total operation system) 개발
- 선로흡열장치(TLS, Thermal Lining System) 개발
- 도시철도역사용 고효율 환기시스템 설계 및 구축기술
- 3차원 공간정보 기반 도시철도 역사 에너지 성능평가 솔루션 개발

(3) 도시철도 역사 실증표준 테스트베드 구축 및 평가기술

- 실증표준 테스트베드 구축 및 시범 운영
  - · 지하역사(수락산역) 테스트베드 구축
    - 200kW 계통연계형 PCS
    - 400kWh 전력저장장치(리튬)
    - 500kW 회생에너지 전력변환장치
    - 통합에너지운영시스템(TOS)
    - 고효율 환기시스템(30kW SynRM)
  - · 지하역사(도봉산역) 테스트베드 구축
    - 태양광 모듈 (23kW Si결정질 모듈, 7kW CIGS 플렉시블 모듈)
    - 태양광 컨버터(12kW 3대)
    - 90kWh 전력저장장치(리튬) 및 PCS(50kW)
- 테스트베드 시험평가기법 및 비용대비 효과분석
- 사업화 모델 개발 및 제도화 지원



<그림 1-1-2> 지하역사, 지상역사 테스트베드 개념도

제2장. 국내외 기술 개발 현황

제1절. 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템

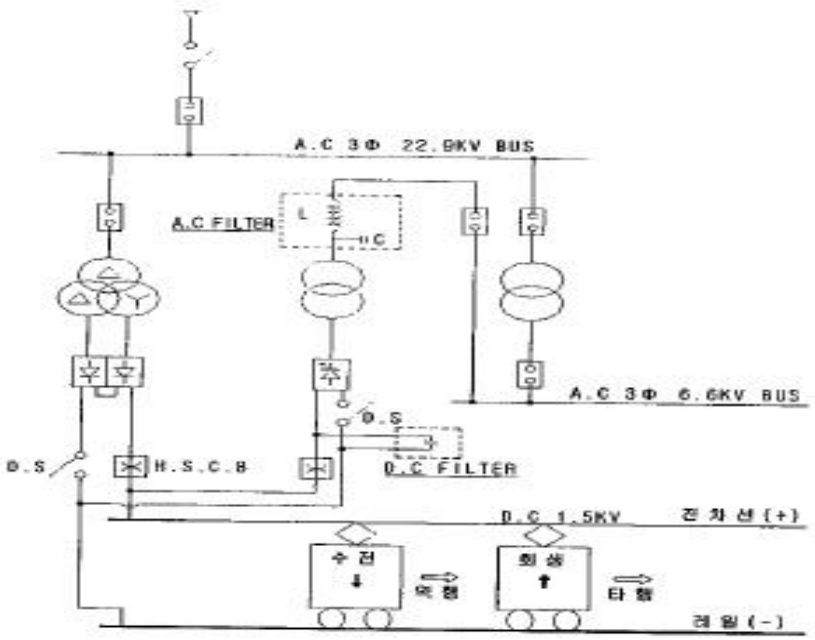
1. 국내 기술 개발 현황

가. 인버터를 통한 변전소 회송방식

- 변전소에서 회생전력을 수전하여 별도 인버터를 통해 변전소 송전계통에 투입하는 방식이며, 회생인버터의 전원계통 접속방법은 6.6[kV] 계통접속과 22.9[kV] 계통접속의 2가지 방식이 있음. 국내 대표적인 사례로는 광주지하철 1호선 김대중 컨벤션센터역에 설치된 750kW급 인버터가 있음.



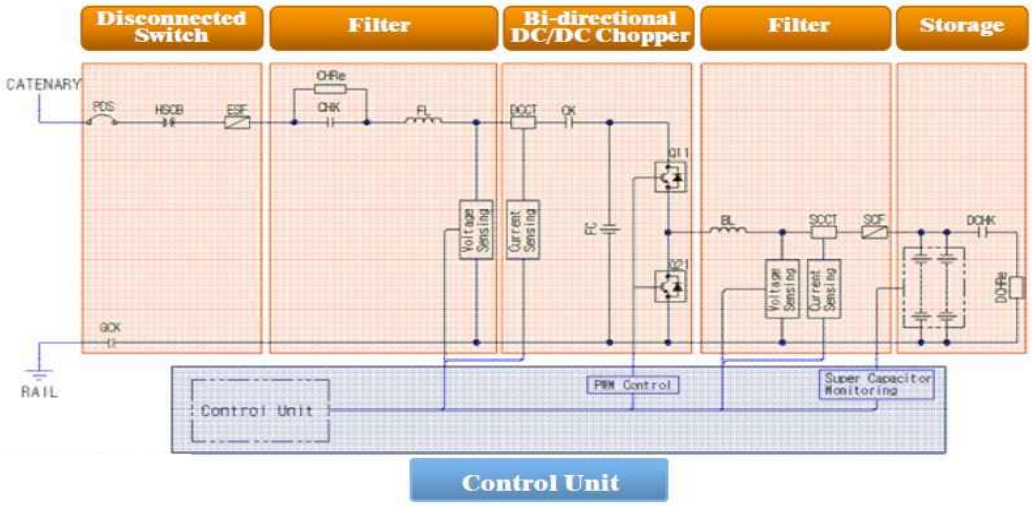




<그림 2-1-1> 광주지하철 1호선 김대중 컨벤션센터역에 설치된 750kW급 인버터

나. **ELDC(슈퍼캡) 설치형**

- 변전소 급전설비와 별도로 가선과 연계된 양방향 컨버터를 통해 직류전력 형태로 회생에너지를 저장하는 방식이 있음. 이 중에서 슈퍼커패시터를 사용하여 회생전력을 일시적으로 저장한 후 역행하는 열차에 바로 공급하는 방식이 2010년대 초반부터 2010년대 중반까지 주로 적용되었으며 국내에서는 2009년부터 최근까지 국내 8건 설치사례가 있음.



<그림 2-1-2> ELDC(슈퍼캡) 설치형 설계도면

<표 2-1-1> ELDC(슈퍼캡) 사양

슈퍼커패시터	항목	값	양방향쵸퍼	항목		값
	크기	1.83mX1.2mX1.3m		크기	메인	1.83mX1.2mX1.3m
	최대전압	1,166[V]			서브	1.83mX0.7mX1.3m
	최대전류	1,600[A]		충전전압		1,750[V]
	커패시턴스	55.0[F]		방전전압		1,500[V]
	최대용량	37.39 [MJ]				



<그림 2-1-3> 설치사례 - 시청변전소/봉은사역

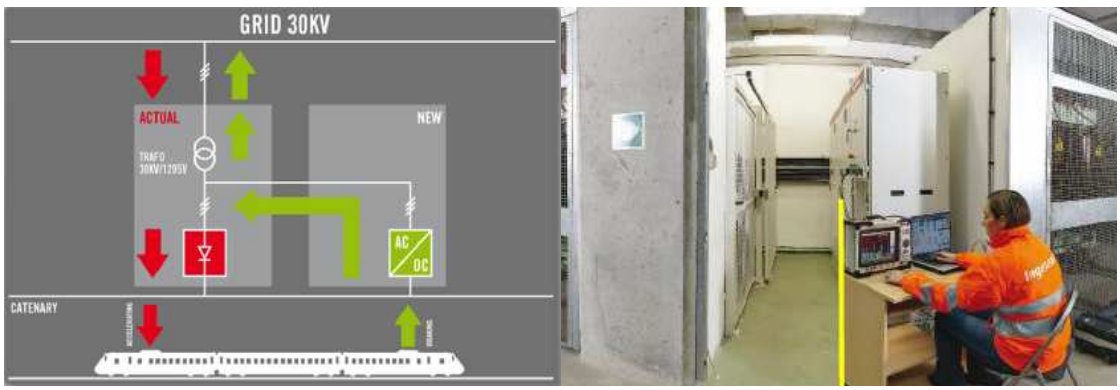
<표 2-1-2> ELDC(슈퍼캡) 설치사례

번호	용량[MJ]	설치 시점	설치 장소
1	37.39	'09.08	대전 1호선 대동변전소
2	28.04	'10.12	대전 1호선 시청변전소, 갑천변전소
3	37.39	'11.08	서울 7호선 상동변전소
4	46.73	'12.12	서울 2호선 서초변전소
5	46.73	'12.12	인천 1호선 테크노파크변전소
6	21.03	'13.06	대구 2호선 죽전변전소
7	46.73	'13.12	서울 4호선 쌍문역
8	37.39	'14.11	서울 9호선 봉은사역

2. 국외 기술 개발 현황

가. 인버터를 통한 변전소 회생에너지 전달 방식

- 스페인의 빌바오(BILBAO) 지하철에 2009년부터 2011년까지 5개 변전소에 설치되어 운영되고 있으며, 그 외 해외 기업체가 유럽, 미국, 일본의 일부 선로에 적용하고 있음. 하지만 DC/AC 전력변환을 통해 변전소로 회송하는 방식은 상대적으로 구조가 간단하고 설치 시 공간을 적게 차지하는 장점이 있으나, 고조파 발생 및 계통 역송전이나 순환전류 등 계통간섭 현상이 발생할 우려가 있음.



<그림 2-1-4> 설치사례 - 스페인의 빌바오(BILBAO) 지하철

<표 2-1-3> 스페인의 빌바오(BILBAO) 지하철 설치 사양

항 목	값	항 목	값
Max. Instant Power	1,500kW	Voltage AC nom.	1,200Vac [±7%]
DC Nominal voltage	1,800Vdc	Max. AC current	750Aac
Max. DC Voltage	2,000Vdc	AC current TDD%	<5%
Max. DC current	1,000A	Output frequency	50Hz
Cooling	Forced air		

나. **ELDC(슈퍼캡) 설치형**

- 해외에서는 지멘스, 알스톰, ABB 등 철도 및 전장업체가 다수 참여하고 있음. ABB는 폴란드 바르샤바 공대와의 협업으로 2014년 바르샤바 전철 2호선(가선전압 825V)에 40[MJ]용량의 슈퍼커패시터 기반 에너지저장장치를 설치하였으며, 캐나다 봄바르디어사의 경우 역사 옆 선로변에 설치할 수 있는 시스템을 제작한 특이한 사례인데, 송전계통과 직접 연계될 필요가 없는 직류전력저장방식의 장점을 최대한 활용하고 있다고 할 수 있음.



Technical data

EnerGstor Wayside Energy Storage (for 1kWh unit)

Voltage	600Vdc or 750 Vdc, 1500 Vdc (optional)
Max Energy (kWh)	1.0
Max output power (kW)	650
Cooling	Cooling/Ventilation unit
Dimension (mm)	1800H x 1800W x 2000L
Operating Ambient Temperature	-30C to +40C

<그림 2-1-5> 바르샤바 전철 2호선 설치사례

- 슈퍼커패시터 방식은 용량 대비 에너지를 저장할 수 있는 기간이 짧기 때문에, 제동하는 전차로부터 흡수한 회생에너지를 전차가 역행할 때 바로 전달해주지 못하거나 용량을 넘어서는 회생에너지를 흡수하지 못하는 문제점이 발생할 수 있음.

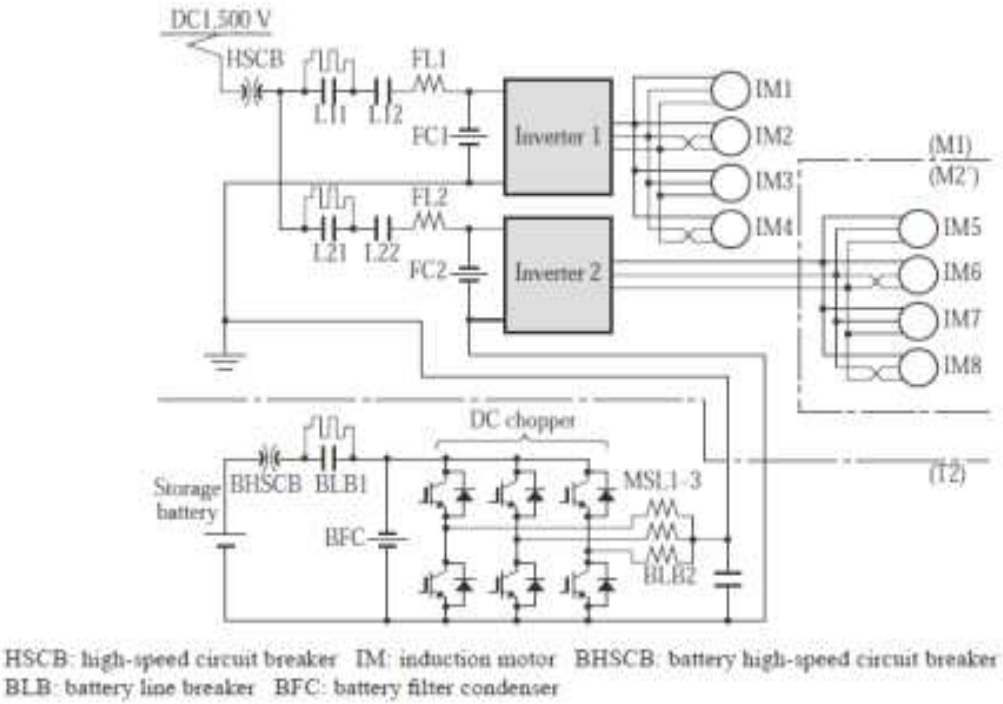


Commissioning year:	2014
Supply voltage:	15 kV, 50 Hz
Traction system:	DC
Traction voltage:	825 V
Installed power:	35 MVA
Energy recuperation:	40 MJ energy storage system
Application:	Metro System

<그림 2-1-6> 슈퍼커패시터 방식

다. **슈퍼커패시터 차량 설치방식**

- 전동차량 내부에 회생에너지 저장매체나 별도 컨버터를 설치하는 방식으로 전동차가 가선으로부터 전력을 수전하지 못하는 경우를 대비한 저장장치 및 하이브리드 운전 시스템에 관해서 이전부터 많은 연구가 진행되어 왔으며, 회생제동을 결합한 에너지 저장 시스템의 개발은 그 연장선상에 있다고 할 수 있음.



<그림 2-1-7> 슈퍼커패시터 차량 설치 설계도면

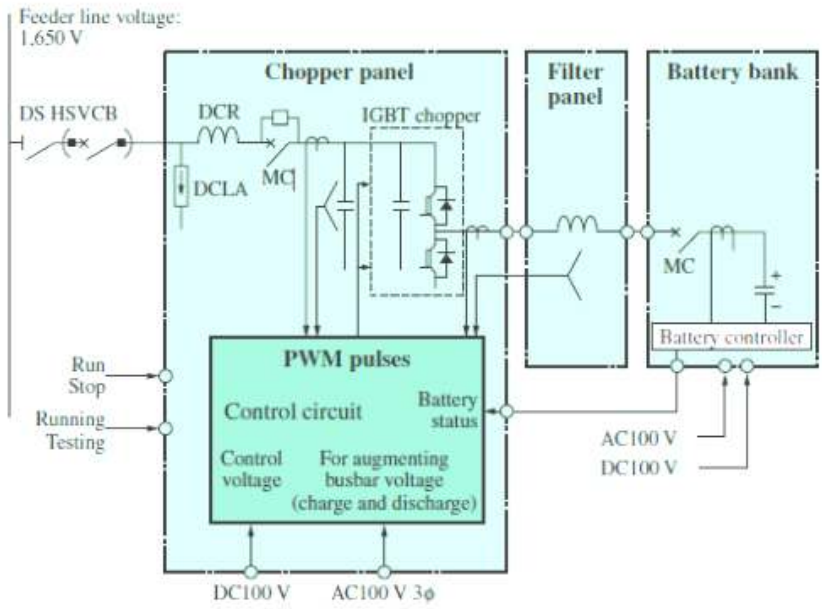
- 슈퍼커패시터 차량 설치 운전 방식은 회생에너지를 내부에서 소모하기 때문에 외부 송전선이나 에너지저장장치에 송전/수전할 때 발생하는 손실이 없다는 장점이 있으나, 차량의 무게가 증가하게 되므로 운전 시 발생하는 에너지 소모가 증가하는 단점을 가지고 있으며, 선로구배에 따라 에너지 소비의 차이가 크기 때문에 현재는 경전철과 가선설치비용이 큰 일부 구간에 한정하여 활용되고 있음.



<그림 2-1-8> 일본에서 활용되는 슈퍼 커패시터 기반 전동차량
(왼쪽)EV-E 801 / (오른쪽)BEC 819

라. **배터리 저장형 1-Cycle 운전 방식**

- 2010년 이전의 배터리 저장방식은 낮은 전력밀도 등으로 슈퍼커패시터에 비해 경쟁력이 낮았으나, 리튬 배터리 기술의 성장과 보급으로 최근 들어 폭넓게 쓰이고 있음.



<그림 2-1-9> 배터리 방식 회생에너지 저장시스템의 회로도(히타치 제공)

<표 2-1-4> 가선전압에 따른 리튬이온 배터리 회생시스템의 사양(히타치)

Rated voltage*1 (V)	Rated capacity (kWp)	Rated current (A)	Load pattern*2	Lithium-ion batteries			
				Module rating	Module configuration	Rating	Storage capacity
820 V	500	600	charging: 600 A 10 s + 300 A 10 s discharging: 300 A 30 s	173 V 55 Ah	2 S×10 P	346 V 55 Ah	19 kWh
820 V	1,000	1,200	charging: 1,200 A 10 s + 600 A 10 s discharging: 600 A 30 s	173 V 55 Ah	2 S×20 P	346 V 110 Ah	38 kWh
820 V	2,000	2,400	charging: 2,400 A 10 s + 1,200 A 10 s discharging: 1,200 A 30 s	173 V 55 Ah	2 S×40 P	346 V 220 Ah	76 kWh
1,650 V	1,000	600	charging: 600 A 10 s + 3000 A 10 s discharging: 300 A 30 s	173 V 55 Ah	4 S×10 P	692 V 55 Ah	38 kWh
1,650 V	2,000	1,200	charging: 1,200 A 10 s + 600 A 10 s discharging: 600 A 30 s	173 V 55 Ah	4 S×20 P	692 V 110 Ah	76 kWh
1,650 V	3,000	1,800	charging: 1,800 A 10 s + 900 A 10 s discharging: 900 A 30 s	173 V 55 Ah	4 S×30 P	692 V 165 Ah	114 kWh

*1: The charging and discharging start voltages can be modified on-site (remote control is available as an option).
*2: Indicates the basic pattern (180-s interval)

- 일본에서는 2010년대 초반부터 도시바, 히타치, 가와사키중공업 등 철도관련 노하우를 갖추고 있는 업체를 중심으로 배터리를 활용한 에너지저장시스템을 설치 운영하고 있는 등 배터리 ESS부분을 선도하는 역할을 하고 있음.



<그림 2-1-10> 일본 토부 전철에 설치된
도시바의 1000[kW] 시스템의 배치도



<그림 2-1-11> 일본 덴엔토시선에 설치한 카와사키 니켈수소전지 기반
에너지저장시스템

- ABB는 배터리 방식과 슈퍼캡-배터리 하이브리드 ESS의 사업화에도 적극적으로 나서고 있으며, 2012년부터 회생겸용 주파수 제어 ESS를 남동 펜실베이니아 교통국이 운영하는 필라델피아 도시철도 및 경전철에 공급하고 있음.

<표 2-1-5> ESS용량

설치 년도	전력 용량	저장 용량	설치 사이트
2012	2.2MW	420kWh	Letterly
2015	1MW	580kWh	Griscom
2016	8.75MW	4.3MWh	CNE Line(7대)



<그림 2-1-12> ESS 설치 사진

제2절. 전력저장장치 연계형 도시철도 역사용 경량 태양광 발전시스템

1. 국내 기술 개발 현황

가. 태양광 발전 적용사례

- 한국철도기술연구원에서는 2009년 10월에 1kW 풍력발전기와 180W 태양전지 4기를 활용한 하이브리드 시스템을 경부선 의왕역 선로변에 설치하여 운영 중임.
- 국내 철도 분야에서도 시범적인 태양광, 풍력 발전 등을 활용한 신재생에너지 활용을 위한 시도가 진행되고 있으며, 초기에는 정동진 역사, 구로 차량사업소, 의왕역에 태양광 가로등 설비를 시범 구축하였으며, 서울9호선 검사고(70kW), 서울2호선 한양대역(3kW)에 태양광 발전설비를 설치하였음.
- 특히, 한국철도시설공단은 철도 5개 노선 총 65개 역사 승강장 지붕에 신재생에너지 시설(연간 1천758kWh 생산)을 설치할 계획을 가지고 있으며, 2012년부터는 전국 주요 철도역사 승강장 지붕 및 폐선 부지로 신재생에너지 시설 설치를 확대할 계획을 가지고 있음.



<서울2호선 한양대역 태양광설비>



<서울9호선 검사고 태양광설비>



<풍력발전기 및 태양전지(의왕역)>

<그림 2-2-1> 태양광 발전 적용사례

나. 태양광 발전 시험인증 동향

- 국내 신재생에너지원에 대한 시험평가 기술은 활발히 이루어지고 있으나, 건물 및 역사에 적용되는 태양광 에너지 분야 및 회생에너지의 발전성능 등에 관한 시험 평가 연구는 초보단계임, 또한 통합운영 시스템에 대한 시험 평가 기술 개발은 전무한 실정임.
- 국내에서는 S-Energy가 국내 업계 최초로 BIPV에 대한 GtoG 인증과 한국건자재시험연구원(現 한국건설생활환경시험연구원)의 DIN52338 / EN12600 기준을 통과하여 시스템 풍하중 및 자체 모듈 구조 안정성을 확보함.

- 국내에서는 GtoG 혹은 GtoB 태양광 모듈에 대하여 건물에 적용될 경우 KS C 8577:2016 표준을 최근 제정하여 적용하고 있으며 서울시 미니태양광 보급지원사업을 중심으로 건물에 적용되는 태양광 모듈에 대하여 구조성능 및 안전성에 대한 가이드라인을 적용하고 있음.

2. 국외 기술 개발 현황

가. 태양광 발전 적용사례

- 태양광 시장에서 건물에 설치되는 태양광 모듈의 선점 비중이 '12년 394.3 MW이고 '19년에 약 13,607 MW로 34 배 증가할 것으로 예상되며(Solar & Energy 2012), BIPV의 설치시장은 2011년 378.9 MW로 전년대비 약 40% 성장하였으며, 2020년 BIPV 시장은 8.45 GW까지 성장할 것으로 예상되어 공공기관과 주택용 건물에서 창고 및 대형 건물, 초고층 건물(대형 역사 포함) 등 광범위하게 적용될 것으로 기대됨.
- 독일의 Schott Solar 社의 결정질 실리콘인 InDaxTM214/225 모델이 주로 주택의 지붕위에 적용되고 있으며, ASI Glass에서 투명한 형태의 박막실리콘 태양전지(ASITHRU/OPAK series) BIPV가 건물 외벽이나 지붕에 주로 설치되고 있음.
- 미국의 DRI사는 기존의 콘크리트나 점토타일의 지붕재를 대체할 수 있는 BIPV를 주로 미국의 서부해안에 설치 적용되고 있음. 경사지붕에 적용되는 Solar Flat/S Tile 제품은 유리기판을 사용한 Superstrate형의 단결정 실리콘 태양전지로 최대 전력(Pmax)은 28 W이며 UL 1703 등 건자재 안전성능에 관한 인증을 보유하고 있음.



<Lumeta Solar Flat Tile> <Lumeta Solar S Tile>

<그림 2-2-2> DRI의 경사지붕 BIPV 적용 사례

- Sunpower의 SunTile, Arnold사의 Voltarlux®, Atlantis Energy Systems의 Sunslate, 교세라의 MyGen Meridian이 결정질 실리콘 태양전지를 사용한 BIPV 제품을 제조 및 설치하고 있으며, 박막형 CIGS 태양전지의 경우, 미국의 DOW Solar 社의 PowerhouseTM solar shingle와 HelioVolt 社의 제품이 지붕재와 커튼월로 적용하고 있음.
- 일본 JR East 다카사키 역사 승강장에 2001년 100kWp, 2004년 100kWp 용량의 태양광 발전시스템을 설치하여 전력을 생산하고 있음.



<그림 2-2-3> 일본의 JR East 다카사키 신간선 역사 승강장 지붕
태양광 적용 (200kW)

- 미국의 뉴욕 지하철 Coney Island Still Well Avenue역사에는 210kW 태양광 발전 시스템을 설치하여 전력을 생산하고 있음.



<그림 2-2-4> 태양전지가 설치된 뉴욕 지하철 Coney Island Still Well Avenue 역(210kW)

- 독일 베를린 Hauptbahnhof 철도 역사에도 태양광 발전 적용 중임.(발전 용량 = 189kW, 적용 면적 = 1870㎡, 투자비용 = €3.7 million(약 55억원))



<그림 2-2-5> 독일 베를린 Hauptbahnhof 철도 역사 태양광 발전(189kW)

- 독일의 경우 철도/도로변에 다양한 형태의 태양광 방음벽을 설치하여 시험을 진행 중임.



<그림 2-2-6> 독일 도로변의 다양한 태양광 방음벽

- 스위스의 경우에도 철도 선로변에 지그재그 태양광 방음벽을 설치하여 전력을 생산 중임. (적용 길이 : 약 72m, 전력 생산량 : 9.65kW)



<그림 2-2-7> 스위스 철도 선로변 태양광 방음벽(9.65kW)

- 프랑스의 철도 역사의 경우 태양광 발전을 리모델링함.(프랑스 SNCF)



<그림 2-2-8> 프랑스 철도 역사 태양광 리모델링(SNCF)

나. **태양광 발전 시험인증 동향**

- NREL(National Renewable Energy Laboratory, 미국)는 신재생에너지 및 에너지 효율 기술의 연구, 시험, 상용화와 배포하는 미국의 유일한 연방 연구소임. 태양 에너지 연구 분야의 경우 태양광 개발 및 여러 물질 시스템의 태양광 전지 개선, 집광형 태양전지 및 유기 태양전지와 같은 첨단 기술 개발, 성능과 안정성 향상을 위한 전지, 모듈, 시스템의 특성화, 태양광 발전 장치를 위한 표준화 시험, 성과 모델 산업 지원, 생산용량 증설 및 상용화 가속으로 인한 태양광 산업 협조의 업무 수행중임.
- TUV Rheinland와 TUV SUD는 태양광발전 시스템 인증분야의 글로벌 리더로서 독일, 일본, 중국 등에 태양광발전 시스템의 성능 및 안전성을 평가하는 시험소를 갖추었으며 적합성 평가에 따라 테스트 및 인증서를 제공하고 있음. 태양광 관련하여 현장 평가, 계획 및 모니터링, 시스템 인증, 성능 측정(발전기 I/V 특성 측정, 인버터에 대한 규정 대비 표준 시험조건 측정), 전기 안전(개인 및 시스템 보호, 운영 안전, 일반 방향에 관한 유효 표준 준수), 성능 특성(보장 성능 체크) 등을 실시
- UL (Underwriters Laboratories)은 미국에서 처음으로 풍력발전기 인증사업을 담당하고 있으며 성능 시험기관인 NWTC와 긴밀하게 협조하고 있으며, 또한 CB Scheme에 따라 PV 제품의 CB 인증 자격을 가지고 있는 미국 내 유일한 국가인증기관임.
- 독일의 프라운호퍼(Fraunhofer) 연구소는 응용기술연구를 위해 설립된 정부출연 연구소임. 태양광 모듈관련 연구 수행하며, 태양광 모듈 단위의 측정 연구 수행, 최고 수준의 품질을 보장하기 위해 정기적 국제 라운드 로빈 테스트 실행하며, 모노, 다중 또는 단일 층 비결정질 실리콘 뿐 아니라 CIS 와 CdTe 모듈 및 염료 감응형 태양 전지 모듈에 대한 연구 수행이며, 단일 셀 또는 다결정 실리콘, a-Si, CIS 등 다양한 PV셀 재료에 대한 셀 단위의 시험 평가 및 연구 수행하며, WPVS 표준 및 IEC 60904-2의 요구사항을 만족하는 표준 셀 교정 및 보정하고 있음.

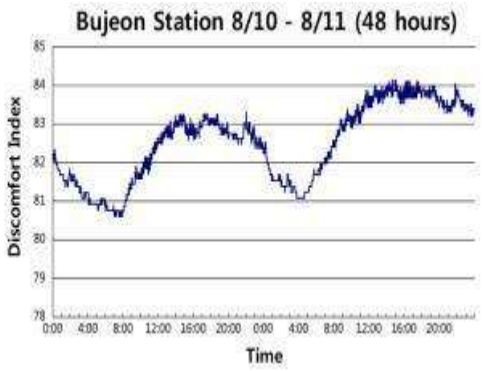
제3절. 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템

1. 국내 기술 개발 현황

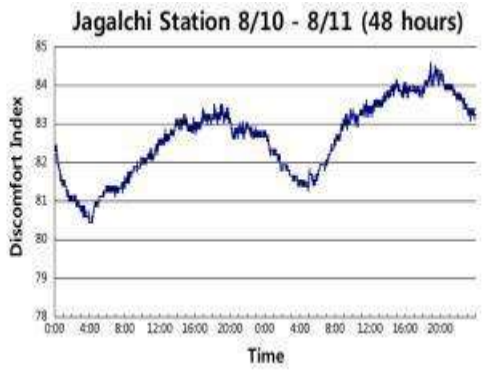
가. 부산지하철: 지하유출수를 활용한 역사 냉방시스템

(1) 개요

- 1985년부터 운행을 시작한 부산 도시철도는 지하 승강장의 공기질 유지를 위해 외부의 공기를 역사내부로 공급하는 환기방식이 적용되었음. 이러한 외기도입 환기방식은 하절기에는 역사 내부로 지상의 더운 공기가 유입되게 하여 냉방부하를 발생하게 하는 단점이 있으며, 또한 매년 증가하는 이용객 및 열차의 운행량으로 인해 역사 내 재실인원 및 열차로 부터 발생하는 발열에 의한 냉방부하가 점차 증가하여 여름철 승강장 이용객들이 불편을 겪는 사례가 증가하고 있음.



<그림 2-3-1> 하절기 부전역 불쾌지수 현황



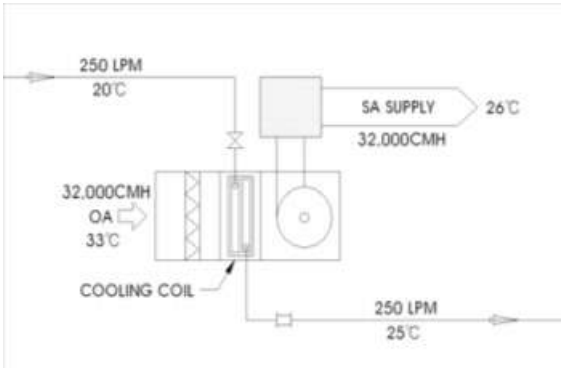
<그림 2-3-2> 하절기 자갈치역 불쾌지수 현황

- 따라서 부산도시철도에서는 하절기 승강장 실내온도의 적절한 유지를 위하여 역사 내 냉방설비 도입을 고려하게 되었음. 하지만 역사 내 냉방설비의 적용에 있어 냉동기의 적용 시 설비비용과 전력비 부담 등의 비용문제 및 설치시기가 오래된 역사 내 기계실 공간 확보가 문제가 되었음. 그리고 최근 하절기 마다 전력위기가 도래하여 지하역사의 냉방을 중단하는 경우가 잦고 지하역사의 에너지 절약이 중시되는 분위기가 형성되어, 부산 도시철도에서는 지하유출수를 활용, 역사 내 환기를 위해 공급되는 여름철의 더운 외기를 지하수를 통해 냉각하는 방식을 도입함.

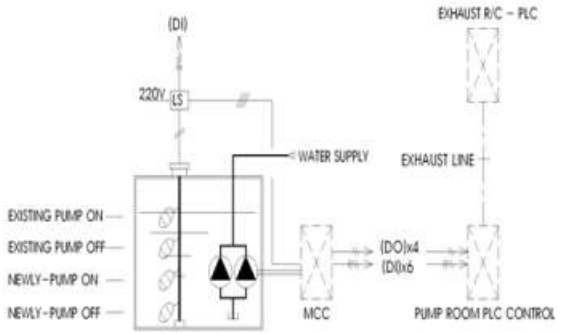
(2) 기술특징

- AHU 하나만 삽입하고 전 외기 방식으로 급기의 재순환 없이 급기량의 100%를 지상으로 부터 도입하며, 외기 도입 시 AHU(공조기) 내에 지하수 냉각코일을 설치하여 지하수를 통해 외기를 냉각하여 승강장 지역에 공급함.
- 지하유출수의 처리를 위해 설치되어있는 지하 집수정 설비에 펌프를 설치하여 냉각코일로 지하수를 공급하며, 지하역사 내 기존 지하집수정 설비를 활용하고 수중펌프, 배관 그리고 지하수 냉각코일 등의 추가만으로 간단하게 냉각시스템의 구성이 가능하며,

기존 설치되어 있던 공조기의 교체 없이 냉각성능 부여가 가능하고 냉동기를 위한 별도의 공간이 필요 없음.



<그림 2-3-3> Diagram of AHU



<그림 2-3-4> Diagram of Automatic Controller

(3) 효과

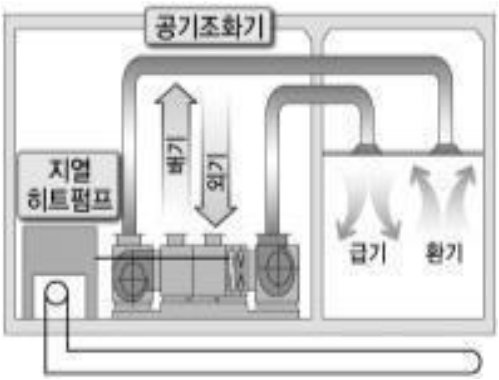
- 부전역과 자갈치역에 지하수 냉각 시스템으로 냉각한 외부공기를 공급할 경우 승강장 전체의 온도를 2도 가량 낮출 수 있는 것으로 분석되었음.
- 설치비의 경우 지하수 설비는 냉동기 설비의 47%이며, 연간운전비용의 경우 지하수 설비는 냉동기 운전의 25%에 불과하며, 부산도시철도의 15개역에 대한 지하수 냉방 설비 적용 시 대부분 폐기되고 있는 용출 지하수의 활용도를 30% 이상 향상 가능한 것으로 예상됨.

나. 서울 지하철 9호선: 지열 열펌프를 통한 역사 냉난방

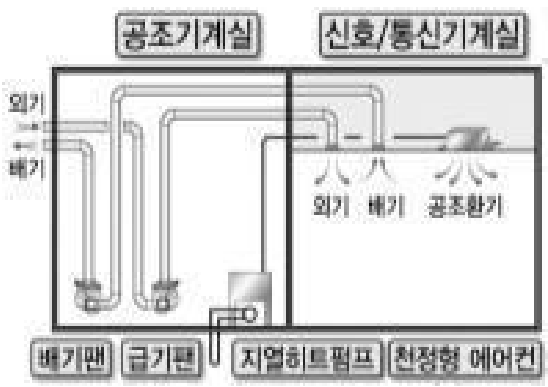
(1) 개요

- 9호선 지하 역사의 직원근무실의 냉난방 및 기능실의 냉방에 지열원을 활용한 열펌프를 도입하였음.

(2) 기술특징



<그림 2-3-5> 직원 근무실 냉난방을 위한 공기조화기의 열원공급용 지열 열펌프



<그림 2-3-6> 기능실 냉방전용 지열 열펌프 및 별도 환기장치

- 재실인원이 존재하여 냉난방 및 환기가 필요한 공간에 대하여 별도의 AHU(공조기) 계통으로 분리하고 AHU 내부의 히팅 및 쿨링 코일의 열원 공급 장치로 지열 히트펌프를 적용함
- 공조기를 통해 실내 공기질을 유지하는 승강장, 대합실, 직원근무실 중 냉난방 부하가 모두 발생하는 직원근무실의 공조장치에 지열 열펌프를 적용함으로서 하나의 열원설비로 냉방과 난방이 모두 가능하도록 하고 지열을 통해 냉방운전의 전력 사용량을 절감 할 수 있도록 하였음.
- 장비발열 등에 의해 상시적인 냉방부하가 발생하는 기능실을 대상으로 지열이 적용된 시스템 에어컨을 적용하고 별도의 환기장치를 적용함.
- 연중 지속적으로 냉방부하를 처리하여야 하는 기계실, 통신실 등은 냉방전용의 천장형 에어컨을 별도로 적용하여 타 공간의 공조계통과는 분리시킴으로서 부분부하 발생 시의 장비효율을 높이고 에어컨의 열원공급 장치로 지열 열펌프를 적용하여 냉방운전 시의 전력 소비량을 절감 할 수 있도록 하였음.
- 공조기 닥트가 설치되지 않고 에어컨이 적용된 공간은 별도의 환기팬을 적용하여 실내 공기질을 유지 할 수 있도록 하였음.

(3) 효과

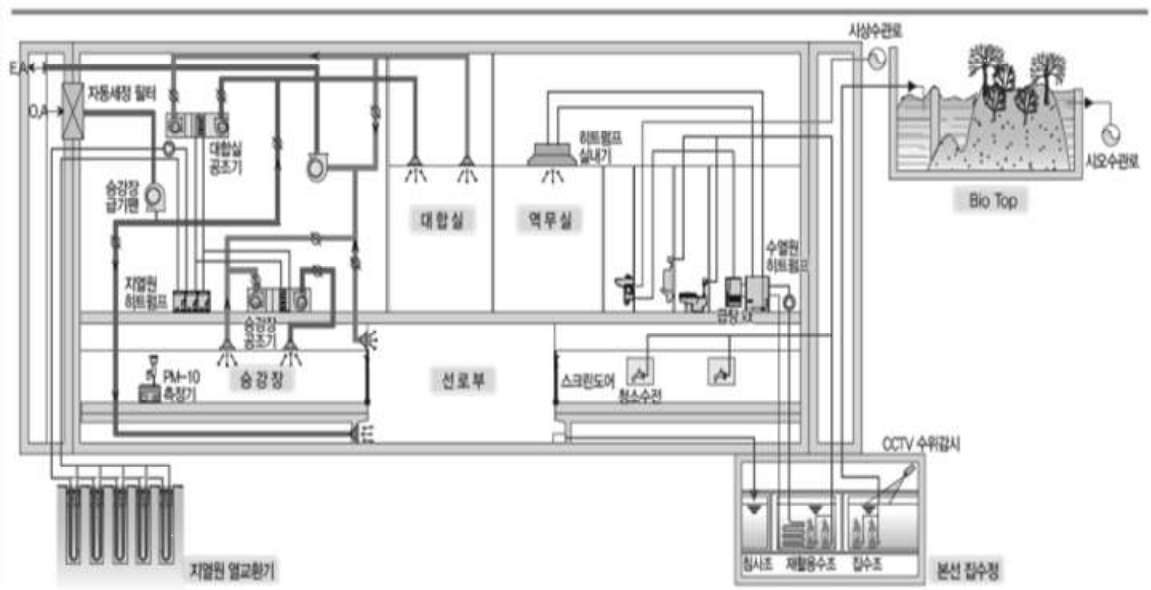
- 지하철 9호선 3단계 7개 역사의 냉난방을 위한 용량의 약 9%인 580kW를 지열 냉난방 시스템으로 구성하였음.
- 에너지 비용 절감액은 연간 1600만원에 해당하는 것으로 나타났으며, 또한 CO_2 감축량은 57t에 해당 하는 것으로 분석되었으며, 지열설비의 공기조화기 적용 시 기존 냉동기 방식과 비교하여 36.7%의 에너지 효율향상이 이루어 질 것으로 분석되었음.
- 천장형 에어컨에 대한 지열 히트펌프 적용 시 일반 에어컨과 비교하여 30%의 성능 향상이 이루어 질 것으로 분석되었음.

다. 소사-원시 선: 소사-원시 선 지열 및 지하수열원 적용사례

(1) 개요

- 소사-원시 복선 전철의 공조 설비 계획에 대하여 지열 및 지하수열을 활용한 열펌프를 열원 장치로 적용하여 에너지 비용의 절감을 추구하고 기타 친환경 설비의 적용을 통해 도시철도 운영에 따른 오염배출을 최소화 하고자 하였음.
- 승강장과 대합실의 공조기 및 직원근무실과 기능실의 에어컨 등 지하역사내 모든 공간의 공조장치에 대하여 열원설비로 열펌프 시스템을 적용하고 급탕 시스템에도 열펌프 스템을 적용하였으며, 열펌프 적용 시 지열 및 지중 및 지하수 수중배관을 통해 지열을 적극적으로 활용하였음.

(2) 기술특징



<그림 2-3-7> 소사-원시 선 지열 및 지하수열원 적용

- 대합실과 승강장은 AHU의 직팽식 냉각코일을 통해 냉방을 하고 열원장치로 냉동기의 적용 대신 지열 열펌프를 적용하였으며, 직원근무 지역은 에어컨 실내기를 통해 냉방 및 난방을 하고 열원장치로 지열 열펌프를 적용하였으며 환기유닛을 별도로 설치하였음.
- 전기실, 통신실, 신호기계실 등 기능유지를 위한 장비발열의 제거가 필요한 공간에 대하여 수랭식 패키지에어컨을 적용하고 에어컨의 냉각수로 지하철도 시설 용출 지하수를 활용하였으며, 여객화장실 및 직원 휴게실 등의 급탕공급 장치로 지열 히트펌프를 적용하였음.
- 대합실과 승강장의 냉방 시 공조기의 냉각코일로부터 흡수한 열을 지열배관을 통해 지하로 처리하여 냉각탑의 설치가 불필요함.
- 기능실 지역에 지열 수랭식 패키지 에어컨을 설치하여 에어컨의 작동효율을 높여 전력소비를 절감하였으며, 역무실, 휴게실, 수유실 등에 대한 냉난방 및 급탕을 지열 히트펌프를 통해 공급하고 실별 개별 제어를 적용하여 에너지 소비량을 절감하였음.

(3) 효과

- 냉난방 적용 대상 공간의 부분 부하 작동 시 효율적인 냉난방 운전 및 동절기 별도의 난방기기의 설치 없이 히트펌프를 통한 난방이 가능하였음.
- 지열 히트펌프의 높은 COP 및 일반 지상 건물에 비하여 냉방시간이 긴 지하철의 특성에 맞는 공조 설비의 적용으로 냉난방 설비의 설치비용 및 운전비용을 절감
- 냉각탑이 없어 공조실 면적 감소로 지하 구조물 설치비용이 절감되었음. (공조실 면적 20%, 환기구 풍도 면적 25% 감소)

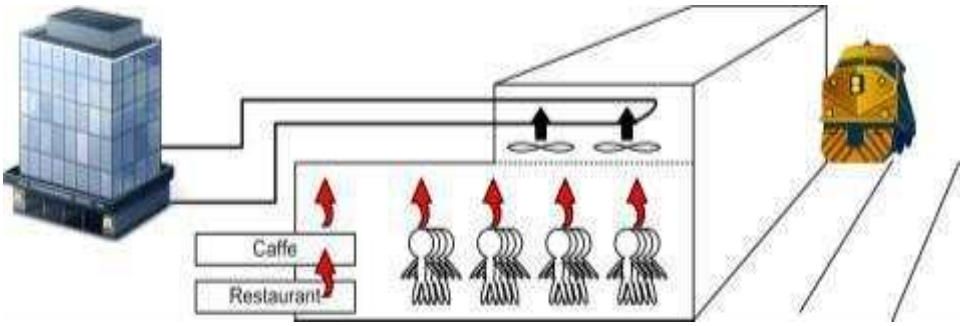
2. 국외 기술 개발 현황

가. 스웨덴 스톡홀름 : 스웨덴 스톡홀름 중앙역 환기폐열의 재사용

(1) 개요

- 스웨덴의 철도 역사 관리를 담당하는 국영기업 Jernhusen은 스톡홀름 중앙역의 리모델링과 중앙역 인근 자사 소유의 친환경 저에너지 소비 건축물의 신축을 기획하면서 매일 20만 명의 이용객으로 부터 발생하는 인체의 발열을 중앙역의 환기설비를 통해 흡수하여 신축건물의 난방에 이용할 수 있도록 하였음.
- 최신 에너지 절약 기술이 적용된 kungsbrohuset은 스톡홀름 중앙역에서 흡열한 폐열을 이용한 건축물의 난방을 실시하였음.

(2) 기술특징



<그림 2-3-8> 폐열의 흡수 및 전송: 중앙역 승객 및 부대시설

- 이용객 및 역사 내 부대시설에서의 발열로 인해 온도가 상승한 스톡홀름 중앙역의 실내 공기로 부터 열을 흡수하여 주변 건물에 전달 할 수 있는 시스템을 구성함.
- 물-공기 열교환기를 통해 역사 내 더운 공기로 부터 생산된 온수를 주변 건물로 이송하여 역사 내 폐열을 건물의 난방에 활용하며, 건물의 난방에 사용되면서 열을 방출한 물은 다시 스톡홀름 중앙역으로 순환되어 역사 내 발열을 다시 흡수 할 수 있도록 하였음.

(3) 효과

- 적용 대상 건물인 Kungsbrohuset은 연간 난방에너지의 15~25%를 스톡홀름 중앙역의 폐열로 부터 조달하였으며, 도심 철도역의 오전 운영 시작 시 발생되어 운영종료 후 서서히 대기 중으로 버려지게 되는 내부 발생열을 운영 시간 내 미리 흡수하여 재활용함으로써 철도역에서 발생하는 폐열을 난방용으로 재사용하였음.
- 주변 기차역으로 부터의 환기 폐열 재활용 시스템이 포함된 에너지 절약 열원 설비의 적용에 힘입어 Kungsbrohuset의 에너지 소비량은 스웨덴 정부규제 기준의 절반에 불과한 60 kW/㎡-yr를 달성하였으며, EU GreenBuilding 인증을 획득함.

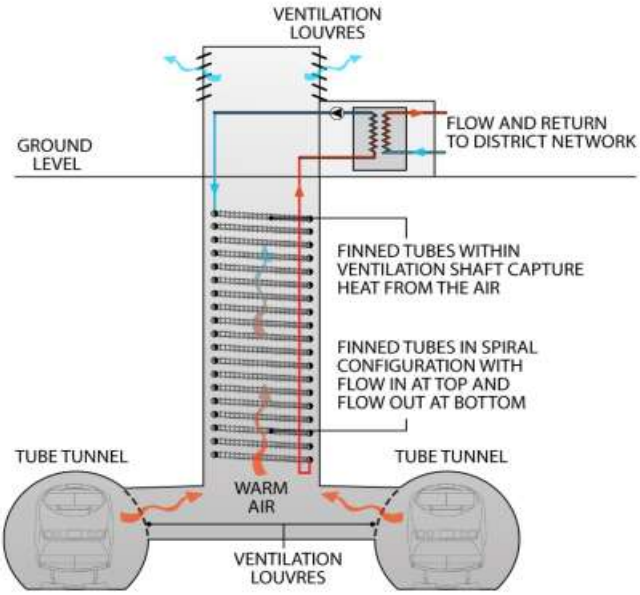
나. 영국 런던 지하철: Islington 지역의 난방 공급에 지하철도의 폐열을 활용

(1) 개요

- 영국 런던의 재생에너지 개발에 대한 연구 및 실증의 일환으로 지하철도와 전력공급 시설로부터의 발생하는 폐열을 가정의 난방열원으로 재사용하게 하였음.
- 지하철도의 환기용 수직 터널의 표면에 흡열관을 설치하여 터널 밖으로 배출되는 공기로 부터 열을 흡수하도록 하였음.

(2) 기술특징

- 지하철도의 환기 시 같이 배출되게 되는 열차발열, 승객 인체발열, 기타 장비 발열 등의 폐열을 대기 중으로 그대로 방출하는 대신 지하철도의 환기통로로 사용되는 수직터널에 흡열장치를 설치하여 폐열의 재이용이 가능 하도록 하였음.
- 수직터널을 통해 1차적으로 수집된 폐열은 히트펌프를 거치면서 냉방 및 급탕 등에 사용이 가능한 온도로 변환되어 지역냉난방 지역으로 공급되었음.
- 흡열장치로는 핀-튜브관을 사용하고 수직터널의 벽면을 따라 나선형으로 배치하였으며, 흡열을 위한 열매체(물)는 수직터널의 상부에서 유입되도록 하여 수직 터널 내 환기의 유동 방향과 교차 하도록 설계되었음.



<그림 2-3-9> London Underground 의 환기용 수직통로 흡열장치

(3) 효과

- Islington 지역의 500가구를 대상으로 하는 열 공급이 시작되어 보다 저렴하고 친환경적인 난방에너지를 공급 할 수 있게 되었으며, 런던 도심 내 지하철 환기 통로가 위치한 지역을 대상으로 잠재적인 재생에너지 수요 및 공급원이 새롭게 창출되었음.

다. 독일 Bad Lauterberg역 : 지열을 활용한 승강장 결빙방지 시스템

(1) 개요



<그림 2-3-10> Bad Lauterberg 기차역



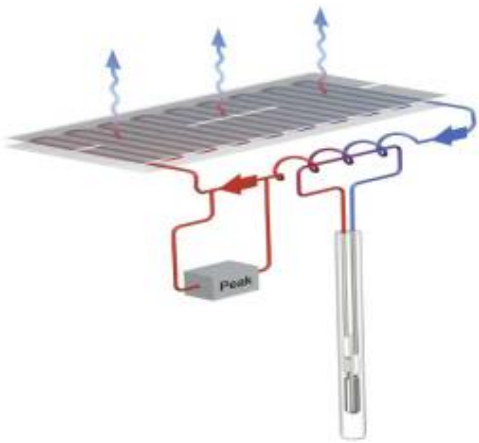
<그림 2-3-11> 승강장 하부에 설치된 열매체 이송관

- 지열과 태양열을 이용한 결빙방지 장치를 구성하여 값비싼 제설 및 제빙시설의 사용 없이 선로상의 결빙 및 적설을 방지 할 수 있도록 하였음.

(2) 기술특징



<그림 2-3-12> 하계: 흡열 및 축열



<그림 2-3-13> 동계: 열 추출 및 융설

- 하절기 승강장 표면에서 흡수한 태양열을 지하암반의 보온능력을 활용하여 지하에 장기간 저장 할 수 있게 하였으며, 동절기 지하에 저장되어있던 열을 지하암반으로부터 추출하여 승강장으로 전달함.
- 태양열의 지하암반 저장을 위하여 200m 깊이의 지중 열교환기 9개를 구성하였으며 동절기에는 지중열교환기의 열매체 이송을 역방향으로 하여 지하암반으로부터의 열 추출이 가능 하도록 하였음.



<그림 2-3-14> 승강에서의 태양열 흡열 및 제설을 위한 흡열보드의 제작

- 승강장 표면에서의 태양열취득을 위해 흡열관이 설치된 보드를 제작하여 승강장에 설치하였으며 2.5㎡ 의 흡열보드 내 20m 의 흡열관이 배치되도록 하였음.

(3) 효과



<그림 2-3-15> 융설 시스템 적용 전



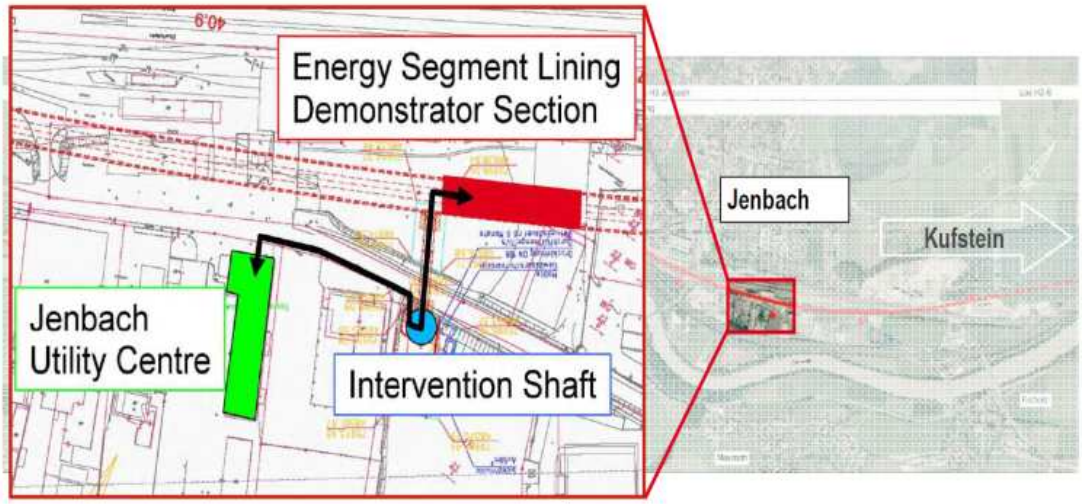
<그림 2-3-16> 융설 시스템 적용 후

- 지열 및 태양열의 장기 축열을 통한 에너지 획득으로 기존의 제설이나 제빙에 소요되는 에너지 소비 비용을 절감하였으며, 연중 상시적인 제빙 및 제설 능력을 확보하게 되어 철도 이용객의 안전과 편의를 개선하였음.

라. 오스트리아 Jenbach 터널: 오스트리아 Jenbach 지하 터널 흡열 시스템

(1) 개요

- TBM 방식으로 건설되는 신규 터널에 내부에 흡열관이 매설된 조립식 라이닝 세그먼트를 적용한 TLS(Thermal Lining System)을 구성하여 터널로 부터의 지열 및 열차 운행에 의한 폐열을 흡수하여 Jenbach시의 공공건물에 열을 공급하였음.
- 도시의 공공건물 인근을 지나는 3,470m 연장의 신규 복선 고속열차 지하터널 구간에 54m에 이르는 흡열 장치를 구성하고 지열 및 터널 내 폐열을 활용하였음.



<그림 2-3-17> Jenbach 터널 내 흡열 터널 구간의 설치 위치 및 공공시설로의 연결

(2) 기술특징



<그림 2-3-18> Thermal Lining System - 매립식 TBM 콘크리트 세그먼트 형

- 지하 터널 콘크리트 라이닝의 내부에 흡열 배관을 설치하여 열차의 주행으로 발생하는 터널 내 폐열과 주변 토양으로 부터의 지열을 흡수하는 장치를 구성하였으며, 하절기 터널 내부 온도의 과도한 상승을 억제하고 흡수한 열을 통해 온수를 생산하여 주변 수요처에서 사용 할 수 있게 하였음.

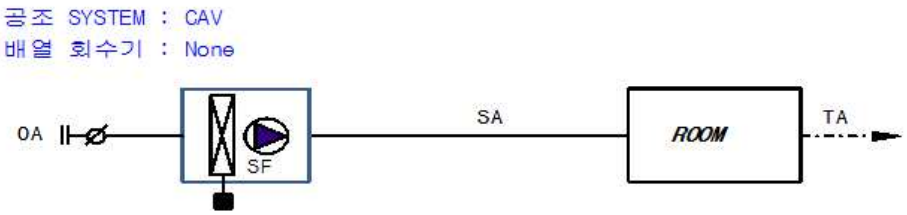
(3) 효과

- TBM 시공에 적합한 조립식 콘크리트 라이닝 세그먼트의 형식으로 구성하여 최신 터널의 공사에 적용 할 수 있도록 하였으며, 철도역사 위치한 지역이 아닌 곳임에도 불구하고 지하터널의 본선에 설치 가능한 TLS의 구축을 통해 터널 내 폐열을 회수하여 주변의 건축물에 저온열에너지를 공급하는 것이 가능하였음.
- 터널 내 온도 상승을 억제하여 열차와 지하역사 및 터널에 사용되는 환기 및 냉방 비용을 절감하였으며, TLS 설치 시 10~20 W/㎡의 흡열 성능이 예상되었음.

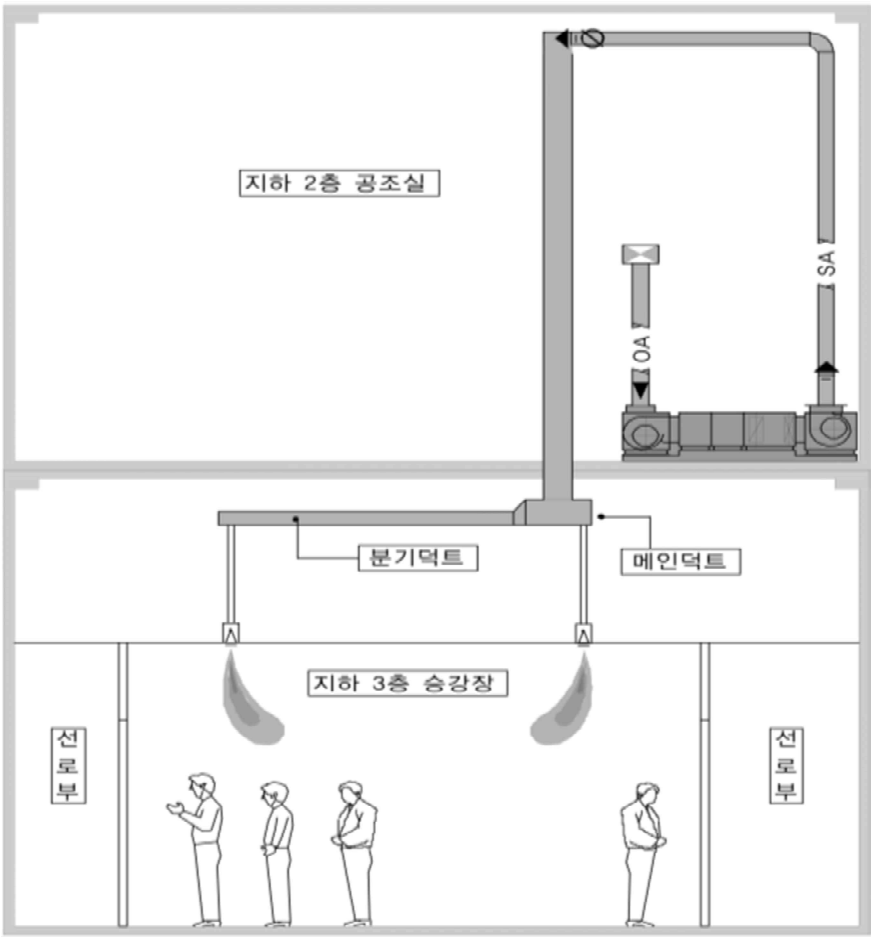
제4절. 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템

1. 국내 기술 개발 현황

- 지하철역사는 지하공간에 위치하여 있으므로 실내공기오염물질이 자연환기에 의해 쉽게 배출되기 어려움. 이런 경우 실내공기오염물질이 대량 축적되어 장기간 지하철 근무자 또는 승객에 노출되어 건강에 위험을 초래할 수 있음. 따라서 지하철역사에서는 환기시스템을 도입하여 기계적 환기에 의해 실내 공기질을 개선하고 있음.



<그림 2-4-1> 일반 승강장 공조시스템 구성도



<그림 2-4-2> 일반 승강장 공조시스템 개념도

- 지하철역사에 도입된 환기시스템의 에너지소비량은 전체 에너지소비량의 14~35% 정도를 차지하여 실내 환기뿐만 아니라 에너지절감문제도 주요 과제로 제기되고 있음. 대부분 지하철 역사의 환기시스템은 최대부하 상태에서 작동하도록 설계. 그러나 운영기간 중 최대부하를 필요로 하는 시간은 아주 짧음. 이는 환기시스템이 장시간 동안 적정 수요를 벗어나 최대 부하에서 작동하는 비효율적인 운영을 초래함.
- 이런 비효율적인 운영을 개선하는 방안으로는 인버터를 이용한 가변운전방식 있음. 그러나 지하철역사의 실내외 공기질을 반영하여 가변운전방식을 도입하는 연구는 수행된 바가 있지만, 실시간 공기질을 반영하여 속도제어를 진행하는 것이 아니라, 과거 공기질 데이터를 분석하여 요일별, 상황별 적정 스케줄을 도출하여 제어하는 방식으로 수행되어 있음. 실시간으로 데이터를 수집하여 스케줄을 도출하는 연구가 있었지만 고가의 측정기를 사용하였으며 이는 경제성 확보가 어려움으로 실제 운영기관의 도입에 어려운 점이 있음.
- 환기설비에너지를 절감하는 방안으로는 고효율 전동기를 사용하는 방법이 있음. 전동기는 환기시스템의 동력원이며, 환기시스템 에너지소비의 90%이상을 차지함. 일반적으로 도입되어 있는 전동기는 IE2(High Efficiency)등급 전동기이며, 이를 IE3 (Premium Efficiency) 등급, IE4(Super Premium Efficiency)등급 고효율 제품으로 교체시 약 2~4%가량 에너지를 절감 할 수 있음. 전동기의 최저 효율제가 시행되면서 현재 고효율 유도전동기가 생산 및 판매되고 있으며 2016년 10월부터는 프리미엄급 유도전동기를 대기업의 경우 의무적으로 생산하고 판매해야 함.

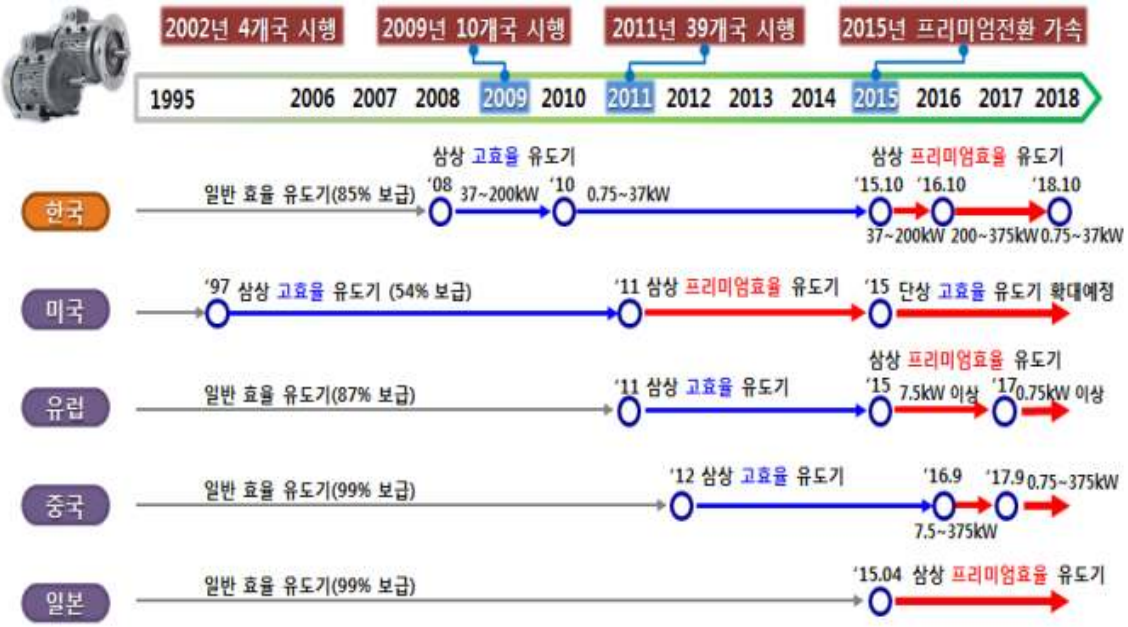
표 17 <표 2-4-1> 고효율급 효율/ 프리미엄급 효율/ 슈퍼 프리미엄급 효율

고효율급 효율/ 프리미엄급 효율/ 슈퍼 프리미엄급 효율			
Power[kW]	2 pole	4 pole	8 pole
0.75	75.5/77.0/-	82.5/85.5/85.9	80.0/82.5/85.4
1.1	82.5/84.0/96.1	84.0/86.5/87.6	85.5/87.5/87.5
1.5	84.0/85.5×87	84.0/86.5/88.4	86.5/88.5/88.5
2.2	85.5/86.5/88.5	87.5/89.5/89.8	87.5/89.5/89.5
3.7	87.5/88.5/89.9	87.5/89.5/91.1	87.5/89.5/90.8
5.5	88.5/89.5×91.1	89.5/91.7/92.2	89.5/91.0/92.0
7.5	89.5×90.2/91.6	89.5/91.7/92.7	89.5/91.0/92.5
11	90.2/91.0/92.6	91.0/92.4/93.6	90.2/91.7/93.4
15	90.2/91.7/93.4	91.0/93.0/94.1	90.2/91.7/93.8
18.5	91.0/91.7/93.8	92.4/93.6/94.4	91.7/93.0/94.2
22	91.0/91.7/93.8	92.4/93.6/94.8	91.7/93.0/94.5
30	91.7/92.4/94.1	93.0/94.1/95.1	93.0/94.1/94.8

- 현대중공업(주), 효성중공업(주) 등의 일부 대규모 중공업계들은 최저 효율제를 시행함에 따라 고효율(IE2) 뿐만 아니라 프리미엄 효율(IE3)까지 유도전동기로 양산 진행 중이나 유도전동기는 회전자부분의 2차회로에 전류가 흐르기 때문에 추가 동손이 발생하며 이로 인해 효율 개선에 한계가 있음.

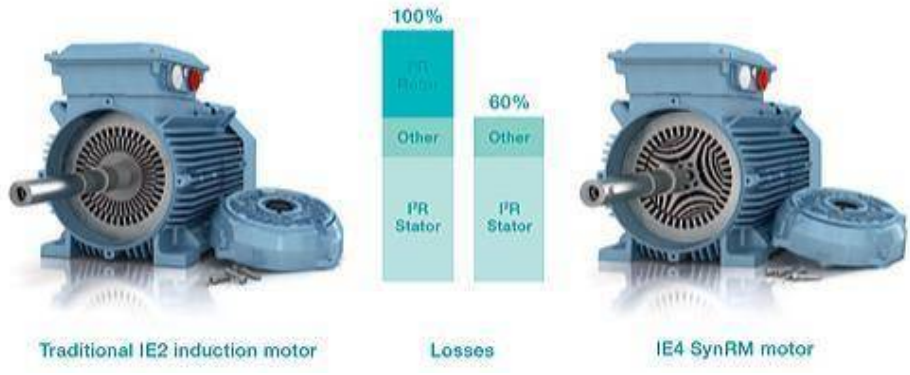
2. 국외 기술 개발 현황

- 세계 각국이 에너지 절감을 위한 정책을 시행중이고 그 기준을 강화하는 추세임.



<그림 2-4-3> 고효율 전동기 개발 추이

- 스위스 A사를 필두로 유도전동기의 효율개선을 위한 방안으로 동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)가 개발 및 양산이 진행되고 있음.
- 동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)는 기존의 유도전동기와 동일한 고정자 구조를 갖고 회전자만 변형하여 인버터를 통한 동기운전을 하는 기기로서 회전자 동손이 없고 구조가 간단함. 또한 SynRM는 구동을 위한 가변전압가변주파수(VVVF)의 벡터 인버터가 필수적이나 가변속 범위가 넓고 응용분야가 넓기 때문에 부하의 빈번한 속도 변동이나 크기변동 대응측변 등 여러 가지 측면에서 산업용으로 적합함. 또한 SynRM은 구조적으로 회전자에 추가적인 다이케스팅 작업이 불필요하고 금형으로 프레스 가공하여 적층을 하기 때문에 장기적으로 양산단가를 낮출 수 있는 장점도 있음. 기존의 유도전동기와 동일한 고정자 구조를 갖고 회전자만 변형하여 인버터를 통한 동기운전을 하는 기기로서 회전자 동손이 없고 구조가 간단해 “인버터-유도전동기” 시스템을 대체할 차세대 산업용 전동기로 적극 연구/검토가 되고 있음.



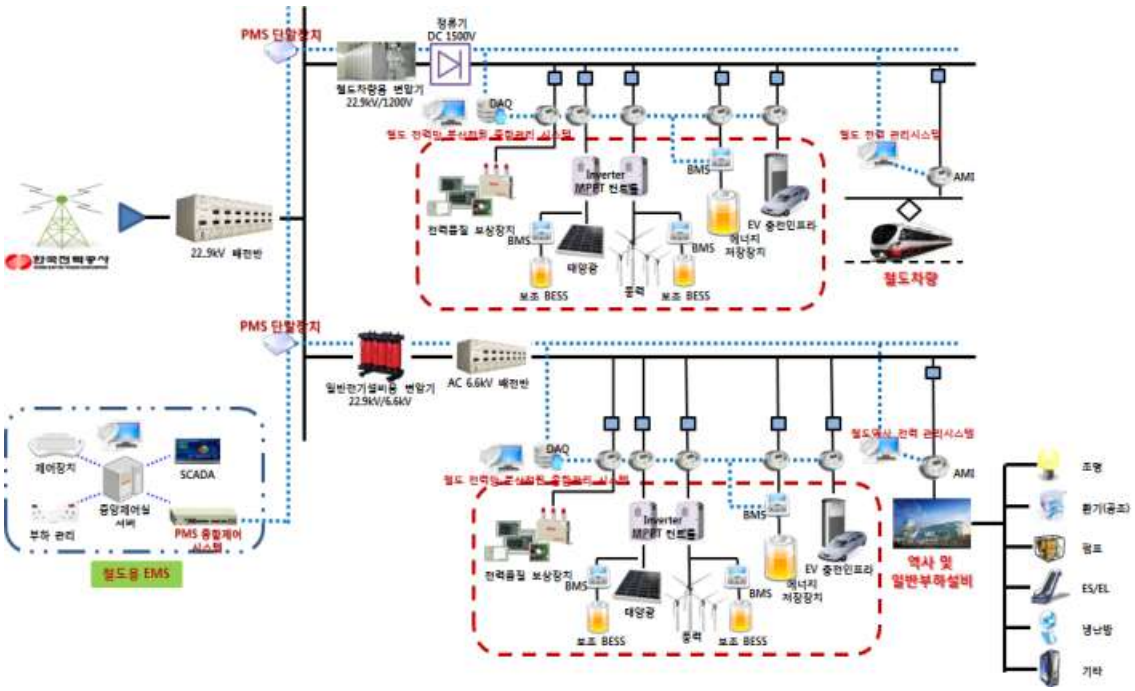
<그림 2-4-4> 고효율 전동기

- 그러나 현재 SynRM 양산 기술은 스위스A사에서 양산기술을 가지고 있으며 국내에서는 설계 및 제작을 진행한 바가 없음.
- 중국시장은 낮은 가격으로 시장공략을 하고 ABB, 지멘스 등과 같은 글로벌 업체는 품질과 기술력을 앞세워 시장 선점하고 있음. 국내 중소기업이 살아남기 위해서는 프리미엄 효율 기술 집약적 고부가가치 제품 개발이 필요하고 본 과제를 통해 진행하는 SynRM은 이러한 조건을 만족하는 최적의 개발대상 기술임.

제5절. 도시철도 통합 에너지 운영시스템

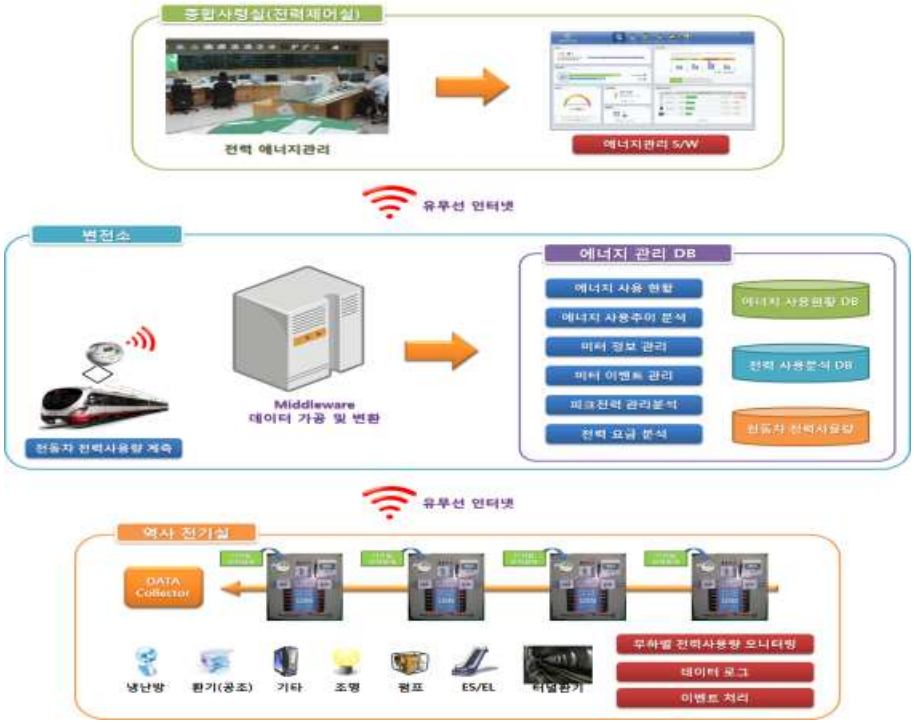
1. 국내 기술 개발 현황

- 현재까지는 도시철도 역사시스템에 회생에너지와 신재생에너지를 연계하여 모니터링하고 역사 에너지 관리시스템을 구축하고 개발되어 있지 않음
- 최근 에너지의 효율적 활용을 위해 철도에서도 태양광, 풍력 등의 신재생에너지원의 도입이 적극 검토되고 있음. 이러한 신재생에너지원의 도입 및 기존의 회생에너지 활용 장치, 자동부하제어설비 등을 통합적으로 관리, 제어하고 에너지의 사용을 최적화하기 위한 지능형 철도 전력망이 요구됨.
- 지능형 철도 전력망의 기본 개념은 기존의 철도 전력망에 신재생에너지원을 분산전원으로 활용되고 있으며, 기존의 SPADA에는 전력 통합관리 시스템을 도입하여 에너지를 통합 관리하는 시스템임.



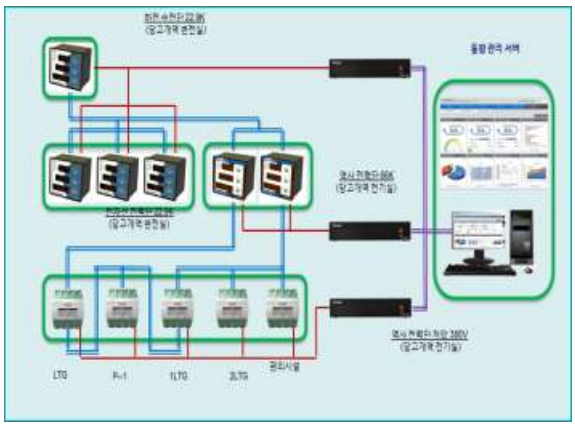
<그림 2-5-1> 지능형 철도 전력망 구성도

- 현재 도시철도에서 사용되는 에너지 관리시스템은 철도 변전소에 설치되어 전력계측 시스템의 데이터 수집기로부터 전송된 데이터를 기준값 및 이벤트를 적용하여 계산 정보를 저장하고 관리하며, 에너지 관리 시스템에서 정보를 조회하거나 보고서를 작성하기 위한 데이터베이스로 이용함.



<그림 2-5-2> 도시철도 에너지 종합 관리시스템

- 당고개역에 한국철도기술연구원이 개발한 에너지 관리시스템이 도시철도 역사에 시범적으로 구축한 사례가 있음. 이 에너지 관리시스템은 국내 최초로 국내 도시철도 역사에 적용되었으나 역사 변전소에 사용된 전력에너지를 측정하여 분석하는 시스템으로 특고압 22.9kV가 인가되는 당고개 변전소 한전 인입점 1개소와 전차선 전력공급용 3개소에 디지털 전력량계를 설치하여 전력을 모니터링 함.



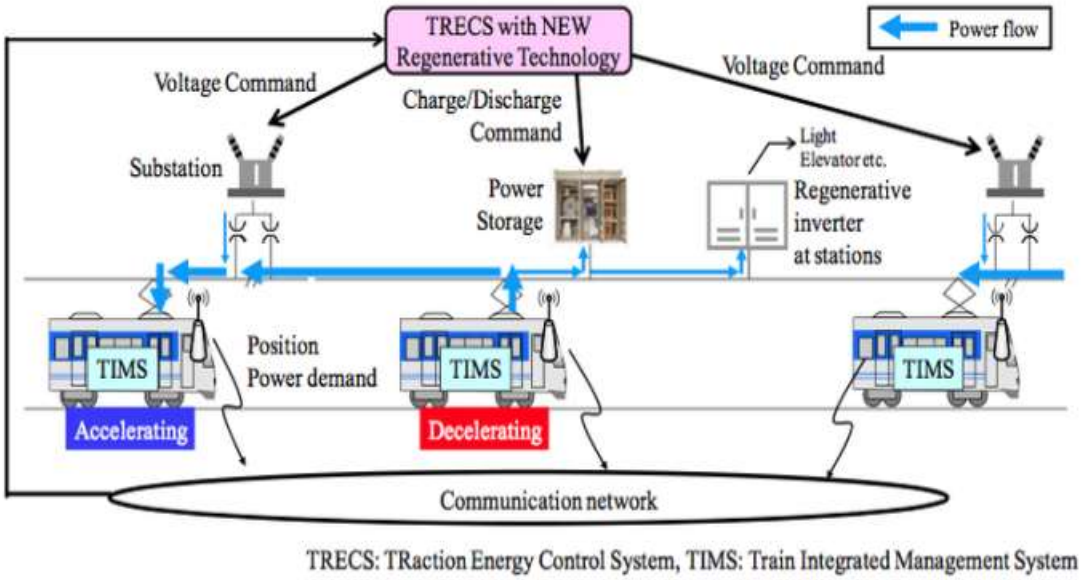
<그림 2-5-3> 도시철도 전력량 모니터링 시스템



<그림 2-5-4> 통합관리 시스템 구동화면

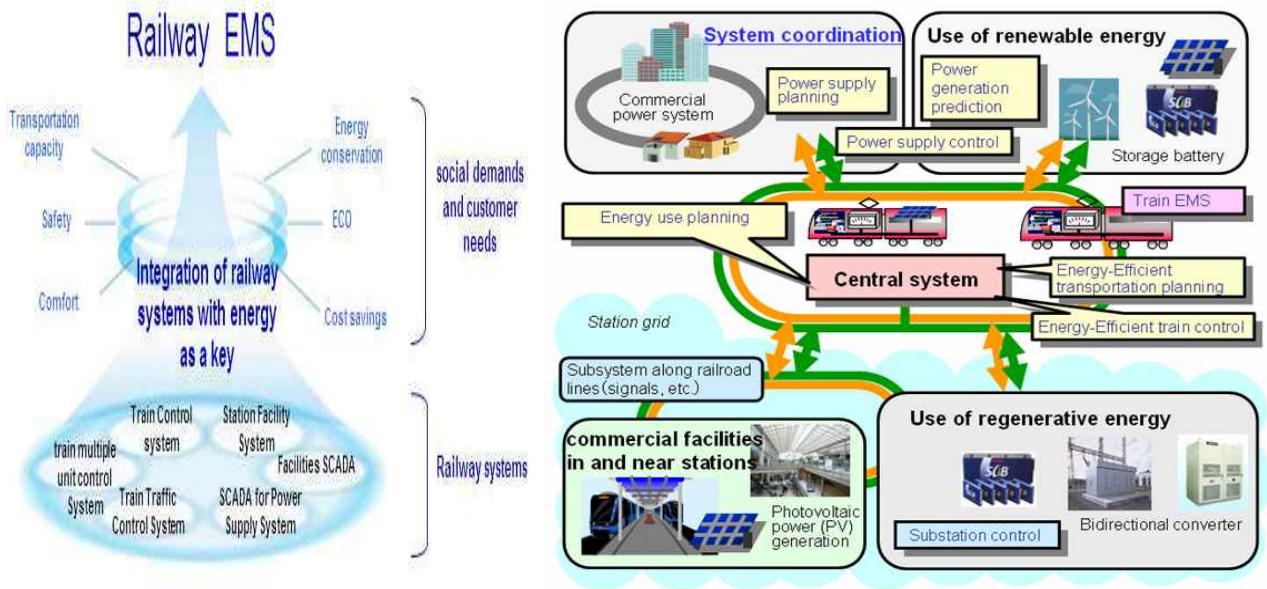
2. 국외 기술 개발 현황

- 미츠비시 전기(주)는 여러 철도 변전소에서 열차와 최적화된 전압 제어에서 재생 전력의 효율적인 사용을 통해 5%까지 총 철도의 에너지 소비를 줄이는 새로운 기술을 개발하여 2014년 4월에는 상용화 할 계획임.



<그림 2-5-5> TRECS & TIMS

- 도시바社를 중심으로 'Railway Energy Management Systems'라는 프로젝트로 도시철도 또는 전기철도의 통합 에너지 관리 운영 기술을 개발하고 있으며, 이 시스템은 에너지 소비 절감, 에너지 재생 활용 증가 및 저탄소 사회 공헌에 목표를 두고 서비스를 제공하고 있음.



<그림 2-5-6> Train Energy Management, Toshiba Corporation, 2013

제6절. 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션

1. 국내 기술 개발 현황

- 온실 가스 감축을 위해 친환경 및 에너지 절약 건축물을 위한 인증제도를 시행하고 있으며, 국내에서는 친환경건축물 인증제도, 주택성능 등급표시제도, 지능형 건축물 인증제도, 친환경주택의 건설기준 및 성능제도, 건물에너지효율등급제도, 신재생에너지 이용 건축물 인증제도 등이 다양하게 시행되고 있음.
- 이러한 국내외 제도들은 크게 총량평가방식(performance path)과 개별평가방식(prescri pti ve path)으로 나눌 수 있음. 총량평가방식은 각 평가제도의 평가도구를 활용하여 건물의 종합적인 에너지성능을 정량적으로 평가하는 방식이며, 이는 설계자에게 설계방법을 특별히 제한하지 않음으로써 궁극적인 에너지 성능 향상을 위한 다양한 설계 대안이 도출될 수 있는 환경을 제공함.

<표 2-6-1> 국내외 친환경 인증제도 에너지성능평가 현황

(▣ : 둘 중 하나 선택, □ : 필수사항 아님, ■ : 필수사항)

구분	에너지성능평가 Index	국가	평가방식	
			Performance Path	Prescriptive Path
LEED	HERS	미국	▣	▣
CSH	SAP2005	영국	□	□
Green Star	Ene Calculator	호주	■	■
친환경 인증	EPI	한국	-	■

- 개별평가방식은 평가항목과 배점을 정의하여 주요한 에너지항목에 대하여 개별적으로 평가/규제하는 방식으로, 설계자에게 에너지 성능을 향상시키는 데에 도움이 되는 설계항목과 정보를 제시해주는 장점이 있음. 국내의 대표적인 개별적평가방식의 예로는 국토해양부에 고시된 '건축물의 에너지절약 설계기준'의 에너지성능지표검토서(Energy Performance Index, EPI)가 있음. EPI는 건축부문, 기계부문, 전기부문, 신재생에너지부문으로 구분하여 점수를 산출하고, 총합을 통해 평가등급을 부여하는 방식임.
- 2010년 12월, 조달청은 2012년부터 Total Service로 발주되는 500억원 이상의 턴키·설계공모 건축공사에 BIM 적용을 의무화함으로써 설계단계에서의 BIM 활용, 시장형성 및 확장을 유도하고 있음. 각 국가에서는 실무에서 BIM 기반의 통합모델을 제대로 응용하고 활용할 수 있도록 주체들의 업무, 데이터 작성(모델링), 정보교환, BIM 데이터 납품 및 품질검토 등의 지침을 제시하고 있음. 이로부터 건물 에너지 성능평가는 BIM으로부터 생성되는 건물정보 모델을 바탕으로, 초기 설계단계에서부터 건물의 에너지 성능을 향상시키기 위한 다양한 설계 대안들의 검토가 가능함.

<표 2-6-2> 국내외 BIM 가이드라인 현황

국가	가이드라인 명	주체	발표일
한국	시설사업 BIM적용 기본지침서	조달청	2010.10
	건축분야 BIM 적용가이드	국토해양부	2010.1
	건설정보모델 작성·납품 공통기준	한국건설기술연구원	2011.10

- 국내에도 2007년 본격적으로 BIM도입이 시작되면서 2008년부터 2013년 현재 328편의 논문이 발표되었고, 그중에서도 BIM기반 에너지성능분석은 가장 중요한 이슈로써 적용을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있음

<표 2-6-3> BIM 에너지성능분석 연구동향

년도	논문 편수									
	총	소프트웨어 호환성	에너지 성능분석 기술개발	초기설계 단계 성능평가	친환경 건축물 인증	최적설계	에너지 효율등급 인증	설계 프로세스 및 모델 제시	설계기법	기타
2008	1									1
2009	8		1		2	2	1	2		
2010	8			2		1		4	1	
2011	17	6	3	3		1	1		2	1
2012	19	3	4	2	4	2	2		2	
2013	14	3	3	2	2	1	2		1	
총계	67	12	11	9	8	7	6	6	6	2

- BIM 기반의 건물 에너지 성능평가를 위해서는 우선적으로 BIM S/W와 에너지 분석 S/W와의 데이터 호환 즉, 상호운용성(interoperability)이 바탕이 되어야 함. BIM S/W와 건물 에너지 분석 S/W와의 정보교환은 BIM 표준 데이터 포맷인 IFC(Industry Foundation Classes) 및 gbXML(GreenBuildingXML)를 통해 이뤄짐. 기존 연구에서 상호운용성은 각각의 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램과 IFC 또는 gbXML에 대한 형상정보 및 에너지 관련 속성정보들의 변환에 대해서 단계적으로 연구되고 있음.
- 다른 측면으로는 BIM 기반의 통합설계 프로세스에서 건물 에너지 해석을 위한 구체적인 BIM 모델링 방법에 관한 가이드라인이 필요함. 이에 따라 추승연(2012)은 통합설계 프로세스 단계에서 요구되는 모델링 수준을 나타내는 LOD(Level of Development)를 기반으로 건물 에너지 성능 분석을 위한 업무범위 및 항목을 정의하였으며, BIM

모델에서 요구되는 구체적인 모델링 수준을 객체별로 제시하였음. 고인룡(2012)은 설계단계에 따른 BIM 모델의 정보 흐름(입력/출력)에 초점을 맞추어 설계단계별 BIM의 정보 수준을 나타내는 LOI(Level of Information)를 LOD를 기반으로 제시하였음.

2. 국외 기술 개발 현황

- 미국, 유럽 등 선진국에서는 BIM의 도입과 적용이 확대일로에 있음. AIA(American Institut e of Architects)의 2006년 자료에 의하면 대형 설계사무소의 80%가 BIM 도구를 보유, 수주 프로젝트의 50% 이상을 BIM으로 설계하고 있으며, 주요 공공발주 기관들은 개방형 BIM 표준형식을 납품표준으로 정하고 있음.
- 싱가포르에서는 공식적으로 IFC 표준을 납품 표준으로 제정하고 IFC 포맷을 납품 전 법규체크를 위한 용도로 활용하고 있으며, 일본에서는 BIM 소프트웨어의 일본 시장 적용방안에 대한 연구를 시행 중임.
- 건설 산업의 대형화, 복합화, 초고층화로 변화함에 따라 유비쿼터스, 친환경 건축, 지능형 도시 및 시설물 관리, 건설과 IT융합화에 따라 BIM기술과 연계하여 설계부터 시공, 관리까지 아우르는 통합될 것으로 판단됨.
- BIM의 활용성을 극대화 시기키 위하여 Auto-CAD, Revit, ArchiCAD와 같은 Big BIM 주도하에 이루어진 Close BIM에서 상호 호환성이 높은 Open BIM으로 점차 변화할 것으로 판단됨.

<표 2-6-4> 국외 BIM 기술 동향 분석 자료

<table>
<tr><th>국가</th><th>미국</th><th>핀란드</th><th>덴마크</th><th>오스트레일리아</th></tr>
<tr><td rowspan="11">적용 사례</td><td rowspan="11">· 모든 공공발주에 BIM 적용
· National BIM Standard(NBIMS) 제정
· COBIE(Construction to Operations Building Information Exchange) 프로젝트
· OGC(Open Geographical Consortium)
· ICC(International Code Council): SMARTcodes 제정
· 뉴욕, ‘프리덤 타워’
· 뉴올리언스 지역, ‘고밀도 주택혼합 프로젝트’
· 미국 제너럴 모터스(GM), 플린트·글로벌 V6 엔진 공장 확장공사
· 지역별로 BIM 전문가 모임 결성 활동</td><td>· 2007년 BIM Requirements 제정
· IFC 제출 의무화
· VTT 위주 개방형 BIM 프로젝트
· HUT600 프로젝트</td><td>· BIM(IFC-BIM) 기반 3D CAD-Manual 2006 개발
· IFC 포맷 납품 요구</td><td rowspan="3">· National BIM Guidelines and Case Studies
· IFC 중립 포맷 사용: 설계 전 과정에서 BIM 데이터 교환방법 제공
· CAFM(Computer Aided Facility Management) 분야에 적용
· 멜번 유레카 타워(Eureka Tower)</td></tr>
<tr><td>영국</td><td>독일</td></tr>
<tr><td>· 런던 시청 신축</td><td>· 뮌헨, 알리안츠 아레나 경기장 신축</td></tr>
<tr><td>노르웨이</td><td>중국</td><td>일본</td></tr>
<tr><td>· 트롬스 대학(HITOS) 프로젝트</td><td rowspan="2">· IFC(ISO/PAS 16739) 디자인 협업을 위한 표준으로 채택
· 5년 이내 IFC-BIM을 건설표준으로 채택
· ‘우한 블루스카이 프로토타입 프로젝트’
· 베이징 올림픽 수영경기장(Water Cube)</td><td rowspan="2">· JACIC (Japan Construction Information Center) 주도의 해외 건설 프로젝트
· BIM S/W의 일본 시장 적용방안 연구</td></tr>
<tr><td>싱가포르</td></tr>
<tr><td>· CORENET (Construction and Real Estate Network) e-Plan Checker 개발</td></tr>
</table>

- 미국과 유럽의 메이저 업체인 미국의 JCI(Johnson Controls), 하니웰(Honeywell), 유럽의 지멘스(Siemens), Schneider Electric이 해당 대륙별로 절대적 영향력을 행사하고 있으며, 특히 SBT의 BEMS 솔루션 Apogee는 전 세계 중대형 빌딩에서 가장 많이 채택되는 솔루션 중의 하나임.
- 주택과 상업용 건물의 에너지 성능 평가와 정보공개 정책을 위한 BuildingRating.org의 출범하였음.
- 국외 에너지성능평가 솔루션의 경우 EnergyPlus, TRNSYS, ESP-r과 같이 동적 열해석이 가능한 시뮬레이션이 주를 이루고 있으며, 국제 인증 취득기관(LEED 등)에서 솔루션 인증을 실시하고 있으며, 이를 통해서 인증된 솔루션을 적용한 인증을 실시하고 있음.
- 세계 각 국에서는 온실 가스 감축을 위해 친환경 및 에너지 절약 건축물을 위한 인증제도를 시행하고 있으며 국외 제도로는 LEED for homes(미국), BREEAM-CSH(영국), Green Star-Multi Unit Residential(호주) 등이 있음.

<표 2-6-5> 국내외 BIM 가이드라인 현황

국가	가이드라인 명	주체	발표일
미국	NBIMS (National Building Information Modeling Standard)	NIBS[1]	2007.12
	BIM Guide Series	GSA[2]	2006.11
	General Buildings Information Handover Guide	NIST[3]	2006.6
핀란드	BIM Requirements 2007	Senate Properties[4]	2007.12
덴마크	Digital Construction	NAEC[5]	2006.6
독일	BIM/IFC User Guide	독일 IAI	2006.6
싱가포르	CORE Net	싱가포르건설청	2000.
노르웨이	Information Delivery Manual	Statsbygg[6]	2009.2

1) National Institute of Building Sciences - 미국 표준화 기구
2) General Services Administration - 미국 조달청
3) National Institute of Standards and Technology - 미국 국립 표준 기술원
4) 자산 관리공사와 조달청의 부분적 역할을 담당
5) National Agency for Enterprise and Construction - 정부와 건물주, 설계사, 시공사, 기술연구소, 대학교 등 비영리 조직
6) 노르웨이 건설 및 부동산 관리 담당

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

제1절. 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템

1. 시스템 개요

가. 시스템 개요 및 구성

(1) 시스템 개요

- 배터리 연계형 회생에너지 활용시스템은 전동차 제동 시 발생하는 회생에너지를 회생컨버터를 통해 리튬배터리에 저장하는 기술임. 기존의 기술과 달리 대용량 에너지 저장매체인 리튬배터리로 구성된 ESS를 활용함으로써 저장된 에너지는 필요에 따라 다양한 방식으로 활용이 가능하므로 효율적인 에너지 활용이 가능한 시스템임.



<그림 3-1-1> 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템 개요

(2) 시스템 구성

- 500kW급 회생컨버터
  - 20kW 단위 모듈 직병렬 연결 방식
  - 1차/2차 절연방식
  - 용량 : 500kW(20kW 5직렬 x 5병렬)
- 200kW급 PCS
  - 고효율 소자 IGBT 적용
  - Single Level 및 MPPT 제어 적용
  - 무변압기용으로 제품 설계
  - Battery Charging Current 정밀도 1% 이내
  - 스마트그리드 단체표준(SGSF-025-4:2016)시험 만족, 고효율(95%이상)
- 400kWh 전력저장장치
  - 리튬전지, 45kWh(3.2kWh 14직렬) x 10병렬
    (기존 외산인 Super Capacitor를 국산인 리튬배터리로 교체 가능)

나. **시스템 기능 및 성능**

(1) 기능

- 회생에너지 회수, 피크부하 관리 및 심야전력 활용, 비상전원 활용 가능
  - 기존 Super Capacitor(1-Cycle 충·방전)를 대용량 배터리인 리튬배터리에 충전하여 Peak Save, Time Shift, Black Out 등의 대응할 수 있음.
- 회생컨버터의 단위 용량 모듈화를 통한 가격 경쟁력 확보
  - 단위 모듈화를 통한 범용성 고압소자 사용함으로써 가격 경쟁력을 확보할 수 있으며, 부피 감소 및 효율 향상과 단위 모듈화에 따라 활용처의 다양한 요구사항에 대해 대응 가능

(2) 목표 성능

- 회생에너지 일일 회수 가능 전력량 : 최대 860kWh/일
- 일일 역사단위 피크전력 저감량 : 최대 200kWh × 2시간

2. 400kWh급 전력저장장치 및 PCS

가. **시스템 사양 설정 근거**

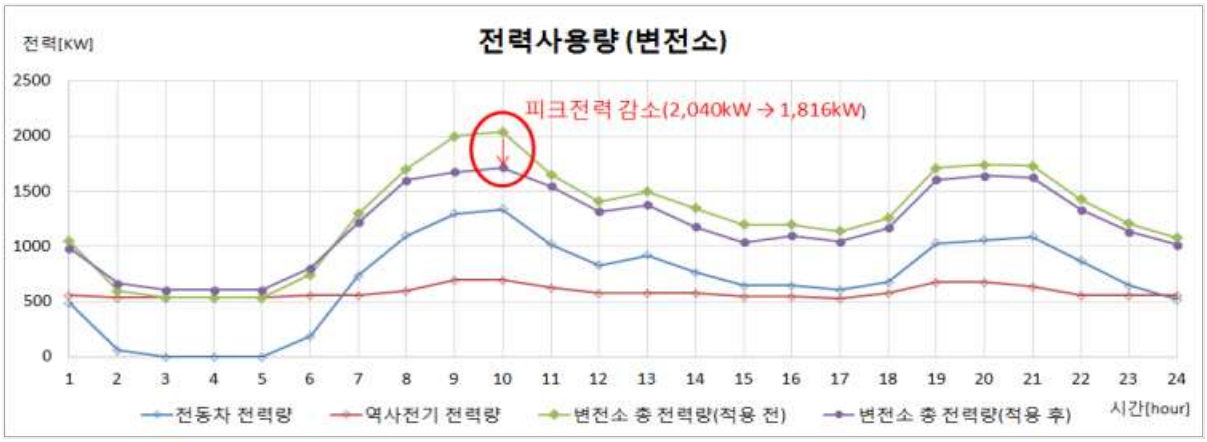
- 도시철도 피크전력은 실증역사인 수락산역사의 전력을 공급하는 수락산 변전소의 전력피크 5%를 절감하기 위해 시간당 최대 200kWh로 선정함.

<표 3-1-1> 개발 목표

항 목	사 양	사유
전력저장장치 용량	400kWh급 (공칭전압 DC725V/700Ah)※1	피크전력 5% 이상 절감
전력저장장치 매체	리튬이온 배터리※2	납산배터리 대비 고에너지 밀도, 고효율 설치 공간 약 50% 감소, 중량 약 60% 감소 수명 약2배 증가
PCS 용량	200kW급	2시간 이상 최대방전 가능
전력저장장치 전압	DC590V ~ DC820V	PCS 전압범위 고려
PCS 출력전압	삼상 AC 380V (변경 가능)	변압기를 적용하여 계통 연계 전압 변경 가능
PCS 효율	충, 방전 최대 효율 90% 이상※3	현재 고효율 인증대상 100kW급 PCS 기준 적용

※1) 용량선정 사유 :

- 목표 : 변전소 단위 5% 피크전력 절감 목표
- 변전소 최대 피크시간대 및 피크량 : 출근시간대 08시~10시대, 2,000kW이상 피크 발생
- 전력저장장치 2시간 방전량 : 400kWh(예측방전효율 약 80% 산정), 시간대별 100~200kW 피크전력 저감 가능



<그림 3-1-2> 전력저장장치 적용 전·후 변전소 전력사용량 해석사례

※2) 저장매체 선정 사유 :

- 납산배터리 대비 설치 공간 약 50% 감소, 중량 약 60% 감소, 수명은 약 2배 증가로 고에너지 밀도, 고효율의 저장 매체임.
- 리튬 배터리 가격은 납산에 비해 비교적 높아 초기 투자비용이 커질 수 있으나, 시스템 운영, 유지보수, 교체비용 등을 고려하여 10년간 운영하였을 경우 20~30% 비용이 절감 될 수 있음.
- 단주기(1시간 이내) ESS에 적용 가능한 저장장치 매체로는 리튬이온배터리, 납축전지, Super Capacitor 등이 있으며 장주기(1시간 이상) ESS에는 리튬이온, Flow Battery, NaS, CAES 등 다양하며, 다양한 출력기준, 사용용도, 사용시간(단시간, 장시간), 빠른 대응성 등을 고려하는 경우에 리튬이온 배터리가 적정함.

<표 3-1-2> 저장매체 선정 사유

<table>
<tr><th></th><th>1kW미만</th><th>10~100kW</th><th>100kW~1MW</th><th>1~10MW</th><th>10~100MW</th></tr>
<tr><td>30분</td><td colspan="2">UPS
[납축, LiB, 수퍼캐패시터, flywheel]</td><td>산업용
UPS[납축, LiB]</td><td colspan="2">유틸리티 주파수 조정용[LiB]</td></tr>
<tr><td>1~2시간</td><td colspan="5">신재생 에너지 품질 향상 및 백업용 ESS[납축,LiB]</td></tr>
<tr><td rowspan="2">5시간
이상</td><td rowspan="2">가정용
스마트그리드
[LiB]</td><td rowspan="2">상업용
스마트그리드
[LiB]</td><td>산업용 피크전력
대응[LiB]</td><td colspan="2">유틸리티 로드레벨링
[양수 발전[100MW 이상],
CAES[20MW], NaS, Flow battery]</td></tr>
<tr><td colspan="3">Off grid 신재생 발전 지원용[LiB]</td></tr>
</table>

자료 : 산업자료, 미래에셋증권 리서치센터

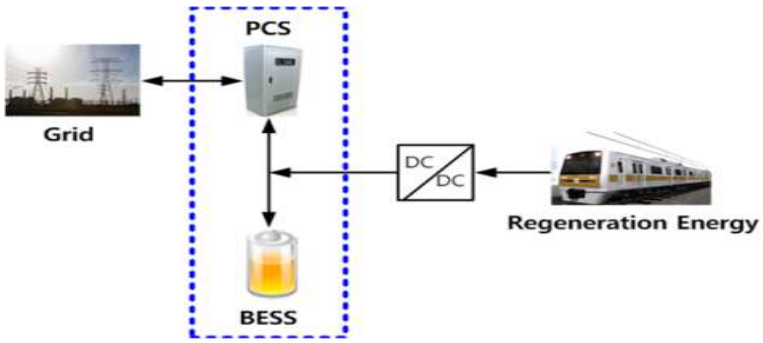
※3) PCS 효율 선정 사유 :

- 현재 추진 중인 고효율 인증 제도의 전력저장장치 고효율 기준에 의거하여 100kW급 이하까지 인증 대상범위로 지정하고 있으며 최대효율 90%로 규정하고 있음. 본 연구에서 개발되는 200kW급 PCS는 전력저장장치 고효율 기준 시험 절차 및 규정에 준하여 외부 공인기관에서 최대 효율 측정을 진행함.

나. 50kW급 PCS 제작 및 성능평가

(1) 시스템 구성

- 전동차의 제동 시에 발생하는 회생에너지원이나 계통 전원을 통하여 경부하시에 유효전력을 저장하고 과부하시에 사용함으로써 피크부하 관리 및 부하평준화(Load leveling)에 기여하는 시스템 구조를 가지는 전력저장장치 기반의 50kW급 PCS를 개발하였음.



<그림 3-1-3> 시스템 구성도

(2) 50kW PCS 사양

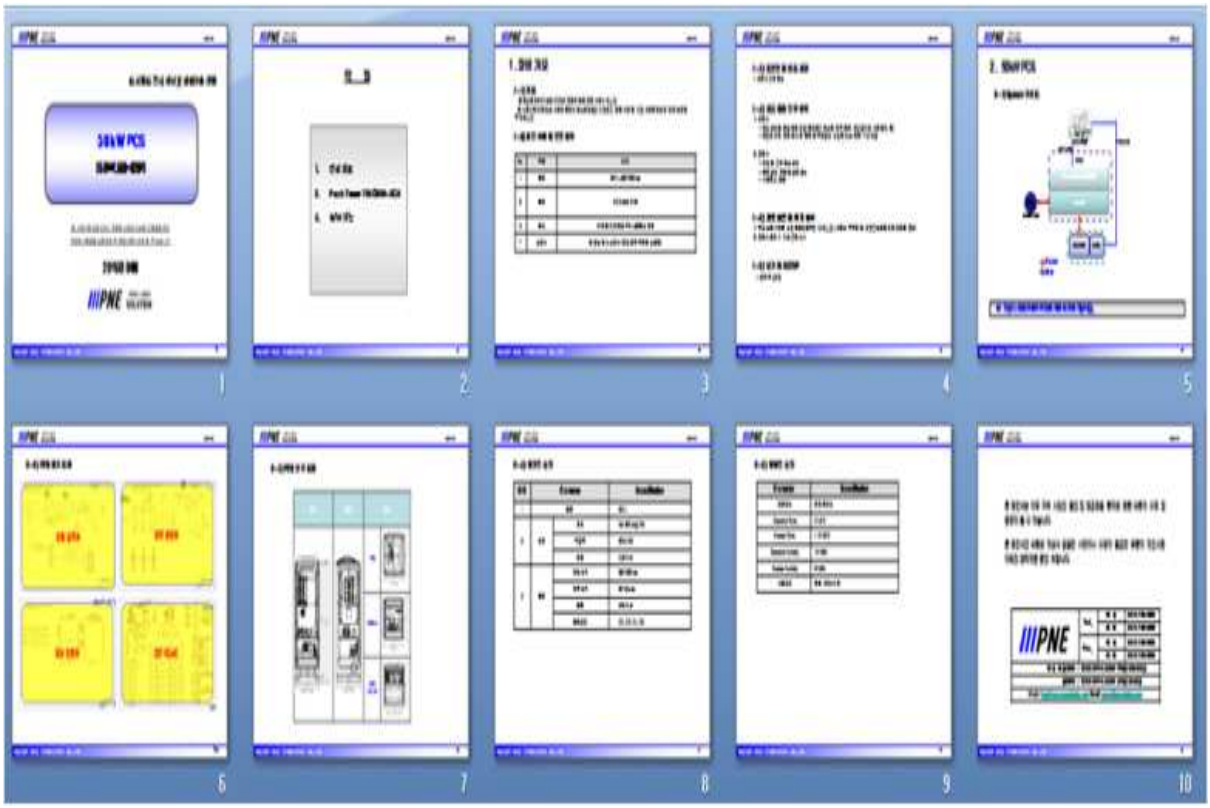
- 50kW급의 양방향 인버터의 주요 사양은 다음과 같음.

<표 3-1-3> 전기적 및 일반적 특징

항목	내용
교류 입력 전압	3상3선식 380Vac
주파수	50 / 60 Hz
입력 역률	0.95 이상
직류 출력전압 범위	550~820V
직류 출력전류 범위	60~90A
최대 출력전력	50kW 이상
효율	90% 이상
충전모드	CC, CC/CV, CP

<표 3-1-4> 전기적 및 일반적 특징

항목	내용
냉각 방식	강제 공냉식
Operating Temp.	0~40℃
Storage Temp.	-10~60℃
Operating Humidity	10~95%
Storage Humidity	5~95%
사용 고도	해발 1000m 이하



<그림 3-1-4> PCS 사양서

(3) 50kW 양방향 인버터 모듈 H/W 설계

(가) H/W 회로설계 파라미터

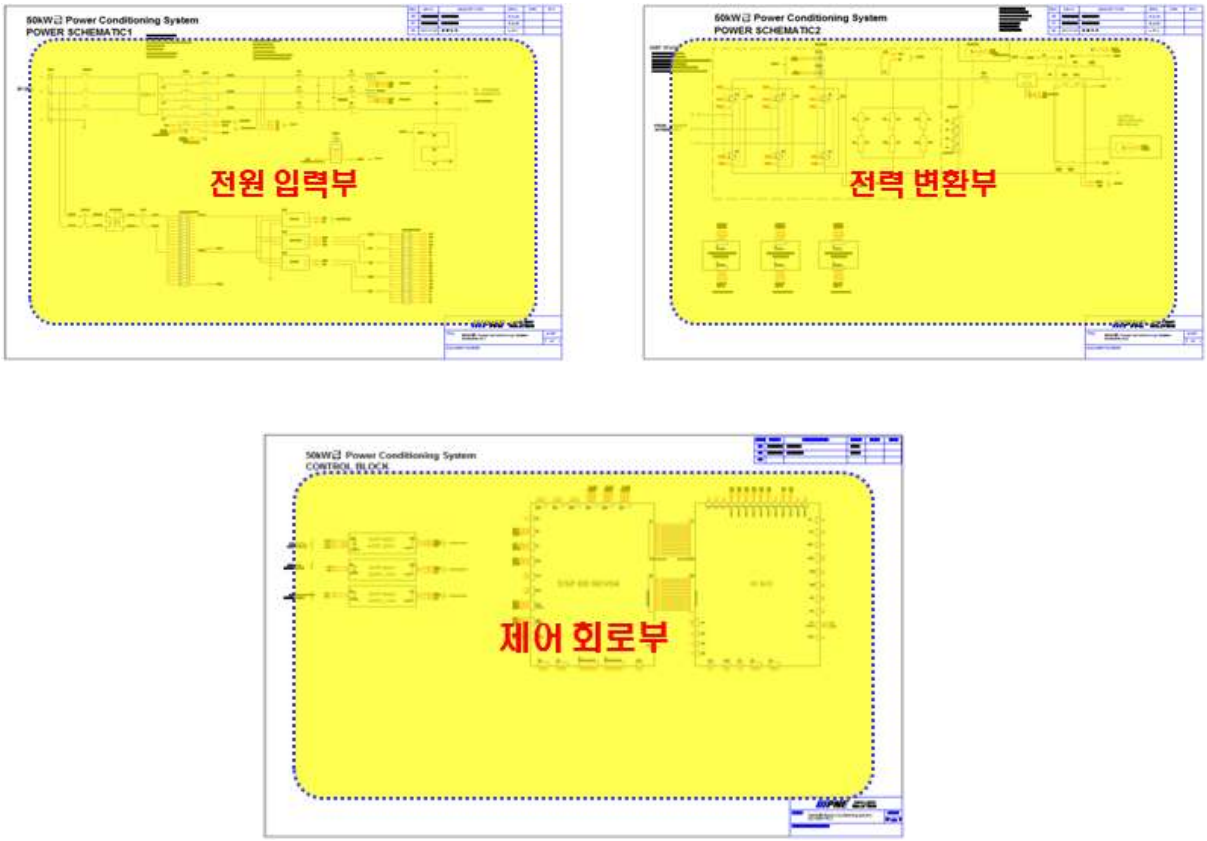
- PCS 입력필터부는 고조파 및 리플 저감을 위해 LCL필터로 구성되어 있으며 높은 변환 효율을 얻기 위해 IGBT 소자를 사용한 Single-Level 인버터 토폴로지를 사용하였고 15kHz의 스위칭 주파수로 스위치를 제어하여 AC/DC변환을 수행하도록 하였음. 다음은 입력필터부, 전력변환부, 출력전원부의 설계 파라미터를 제시함.

<표 3-1-5> H/W 설계 파라미터

입력필터부	전력 변환부	출력전원부
EMC 필터 LCL 필터 안전장치	IGBT Module	출력필터 안전장치
• 전력품질만족 • 역전압 보호 • 고조파 5% 이하 • 지락보호 • R, C 사양 설계 → 전류고조파 제한	• 380Vac→550~820Vac • IGBT 소자선정 • SVPWM제어 • PLL • 주파수 f_s=15kHz • 역률 0.95 이상 달성	• 출력리플 만족 • 출력 쇼트 보호 • 출력보호/차단 • R, C 사양 설계

(나) H/W 설계

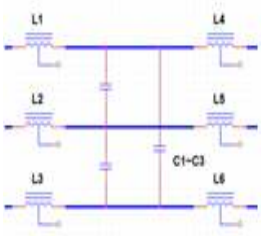
- Main Block 설계



<그림 3-1-5> PCS 회로 설계

(다) 입력필터 설계

- PCS H/W 설계상 입력 전류 리플 ±9%이내를 기준으로 L값을 선정하고 전류리플 ±2.5%이내를 기준으로 C값을 다음 그림과 같이 선정함.

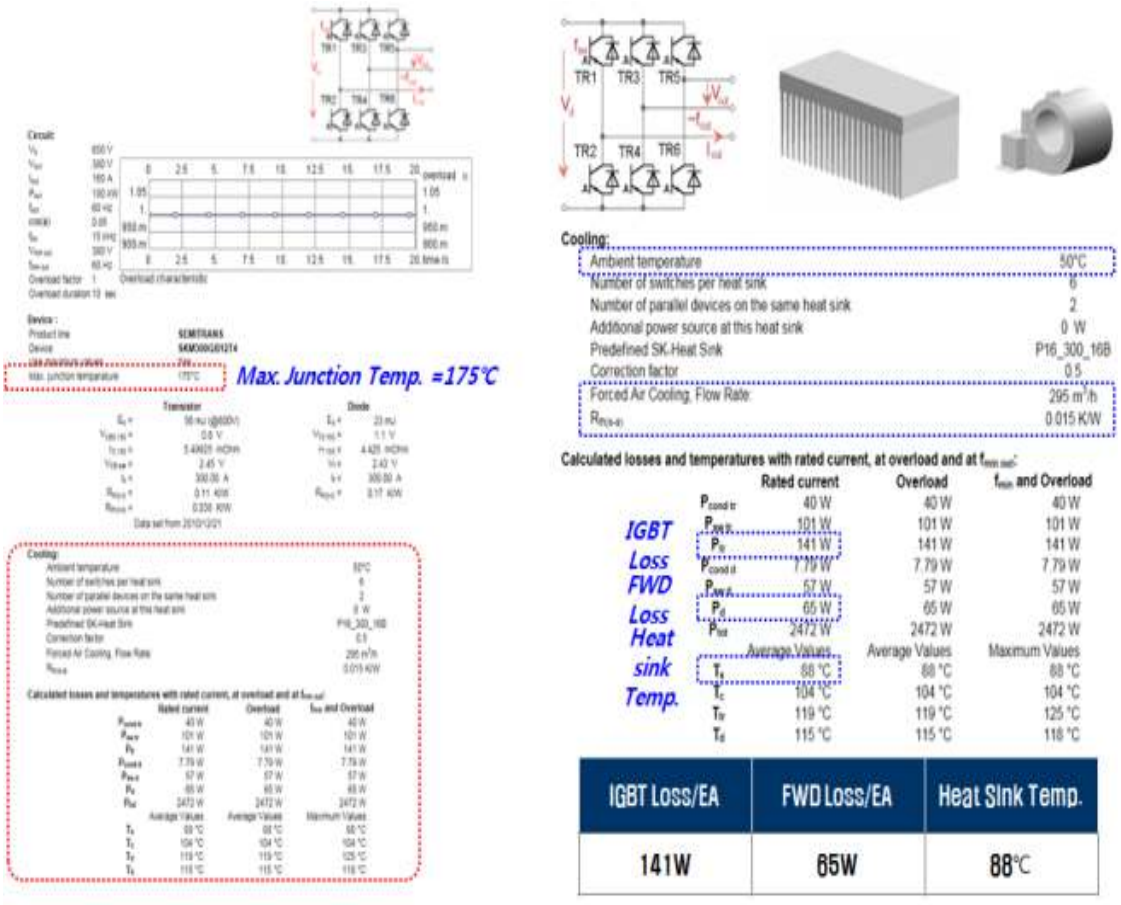


부품	설계 사양
L4~6	전압 Duty 50% 전류 Ripple ±9%
C1~3	전류Ripple이 ±2.5%

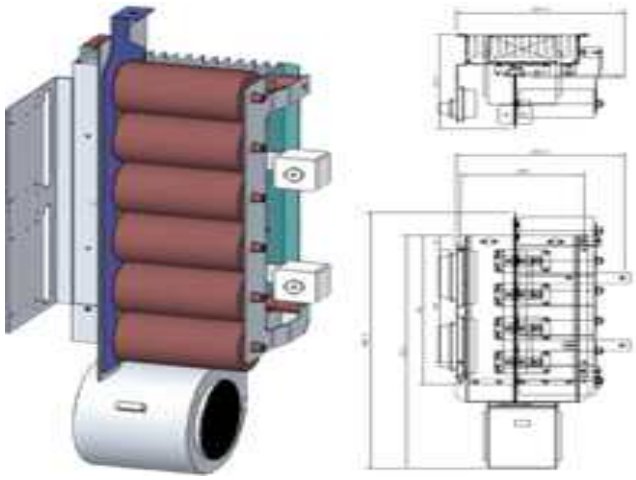
<그림 3-1-6> 입력 필터부 설계

(라) 전력변환부 설계

- 전력변환부 설계에서 가장 중요한 IGBT 전력변환 모듈의 발열을 최소화하는 방안과 제품 사이즈 또는 제품 중량에 영향을 주는 Heat Sink의 냉각구조를 설계하기 위한 방안으로 PCS 동작조건에서의 IGBT 소자 및 Heat Sink의 열손실 분석을 다음 그림과 같이 진행함.



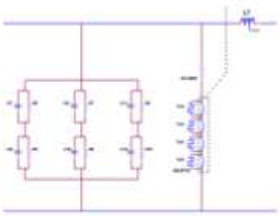
<그림 3-1-7> IGBT 모듈 열손실 분석



<그림 3-1-8> 전력변환부 설계

(마) 출력필터 설계

- 최종출력 전류리플 0.5%이내를 기준으로 L값을 선정하고 전압리플 ±0.03%이내를 기준으로 C값을 선정함.

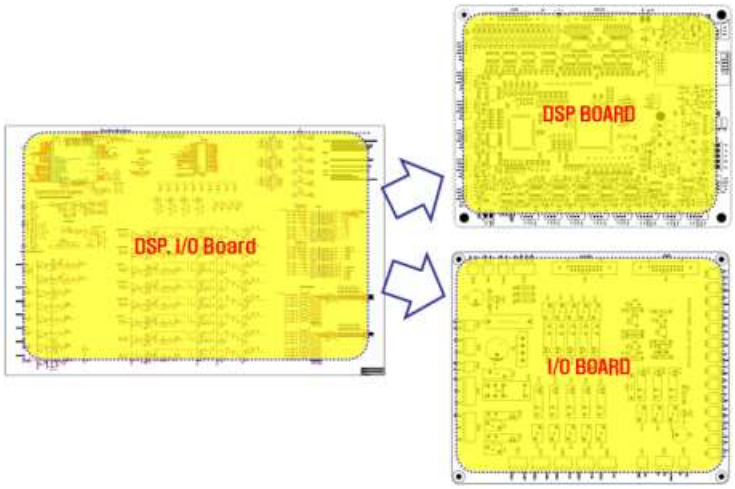


부품	설계 사양
L7	최종출력전류Ripple이 0.5% 이내로 설계 전압Duty 90% 리액터전류 Ripple이 ±9%.
C7~12	전압 Duty 90% 전압Ripple ±0.03%

<그림 3-1-9> 출력 필터부 설계

(바) DSP 기반의 통합 제어기 H/W 설계

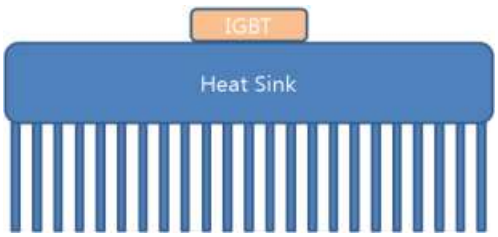
- 디지털 제어방식 기능구현을 위한 DSP 및 I/O Board 설계함.



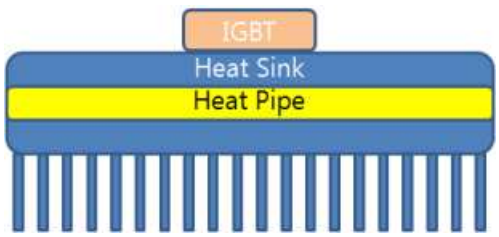
<그림 3-1-10> DSP 및 I/O Board 설계

(사) 방열판 설계

- 종래의 PCS는 알루미늄 방열판을 사용하였고 가격과 부피 문제가 있어 이를 해결하기 위해 온도 전도가 용이한 Heat pipe를 추가하여 방열판을 설계하였으며, 이러한 방열판의 경우 기존에 비해 부피를 50%가량 줄일 수 있으며 가격 또한 60% 가량 줄일 수 있음.

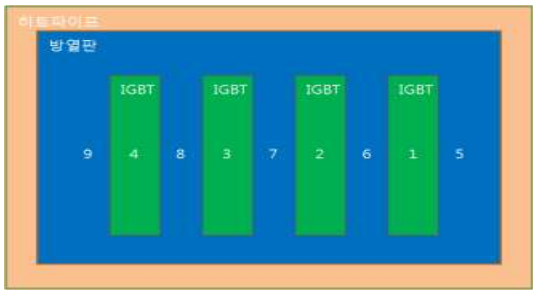


<그림 3-1-11> 기존 모듈 구조

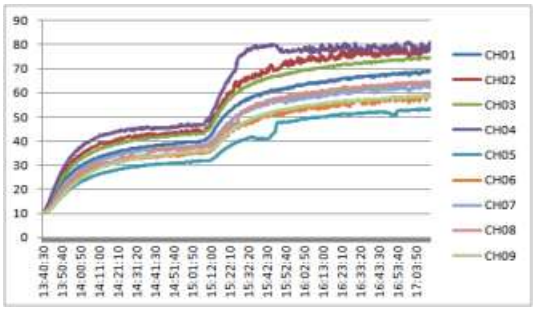


<그림 3-1-12> Heat pipe를 포함한 모듈 구조

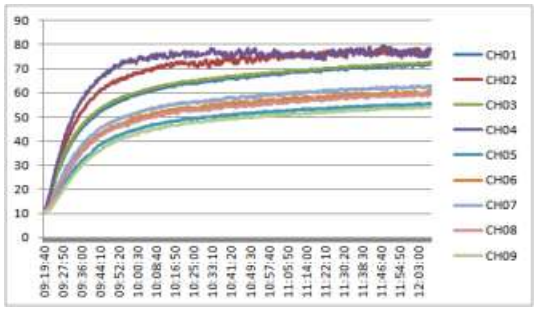
- 기존모듈 구조와 Heat pipe 모듈의 온도 시험을 통해 기존의 모듈과 Heat pipe를 포함한 모듈의 온도 특성이 동일함을 확인함.



<그림 3-1-13> 온도 센서 위치



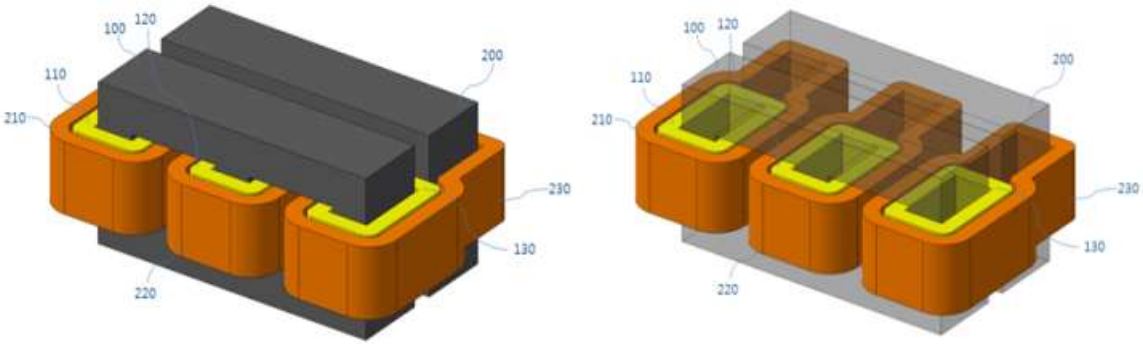
<그림 3-1-14> 기존 모듈의 온도 시험



<그림 3-1-15> Heat pipe를 포함한 모듈의 온도 시험

(아) 변압기 설계

- Test bed 구축 시 고려 사항으로 철도역사의 전원인 380Vac, 6,600Vac의 2가지 전원 모두 고려해야 함. 6,600Vac와 연계시 저주파 변압기를 별도로 설치해야 하며 부피와 무게 문제가 발생하며, 이러한 문제를 해결하기 위해 PCS의 입력 인덕터와 변압기를 일체형으로 설계하였음. 다음 그림은 변압기의 구조로 기존의 변압기에 사용되는 코어 1개와 코일 2개, 인덕터에 사용되는 코어 1개와 코일 1개의 총 코어 2개와 코일 3개의 구조에서 코어 2개와 코일 2개 의 형태 즉 코일 1개를 줄인 형태로 동일한 기능을 갖는 변압기임.

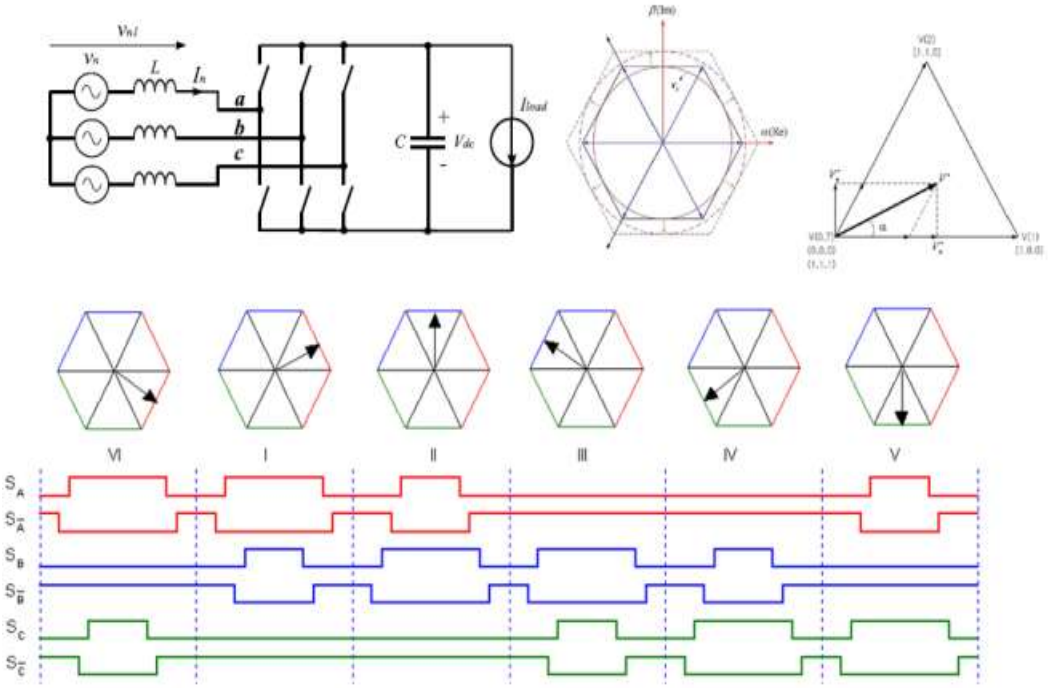


<그림 3-1-16> 인덕터를 포함한 변압기

(자) DSP제어 알고리즘 설계

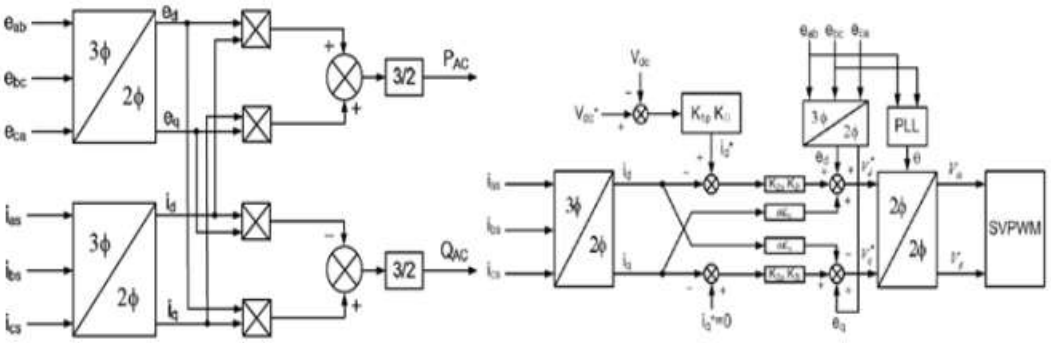
- PCS의 AC-DC 전력변환모듈의 PWM 제어방식은 DSP 기반의 Space Vector PWM 방식을 적용하였으며 PWM 제어방식은 AC입력전원과 동기화하여 무효전력을

최소화하고 유효전력을 충전전류로 활용할 수 있도록 SVPWM(Space Vector Pulse width modulation) 디지털 제어방식을 채택하여 응답특성 향상과 역률을 순시 제어하여 역률 0.95 이상을 만족할 수 있도록 제어함으로써 전력손실을 최소화하고 최적의 전력 품질을 유지할 수 있도록 알고리즘 설계를 하였음.

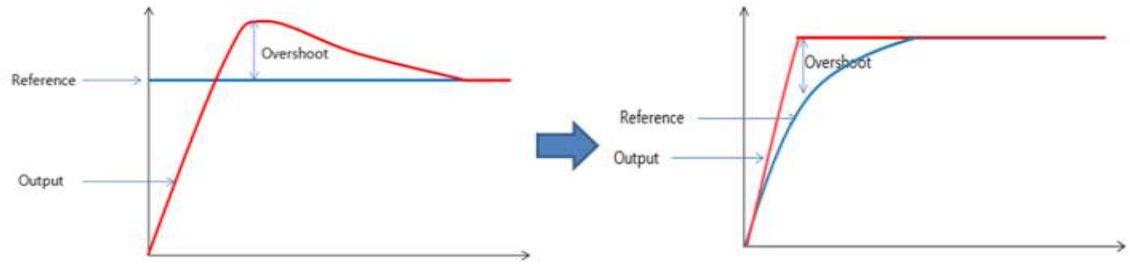


<그림 3-1-17> Space Vector PWM 스위칭 제어 개념도

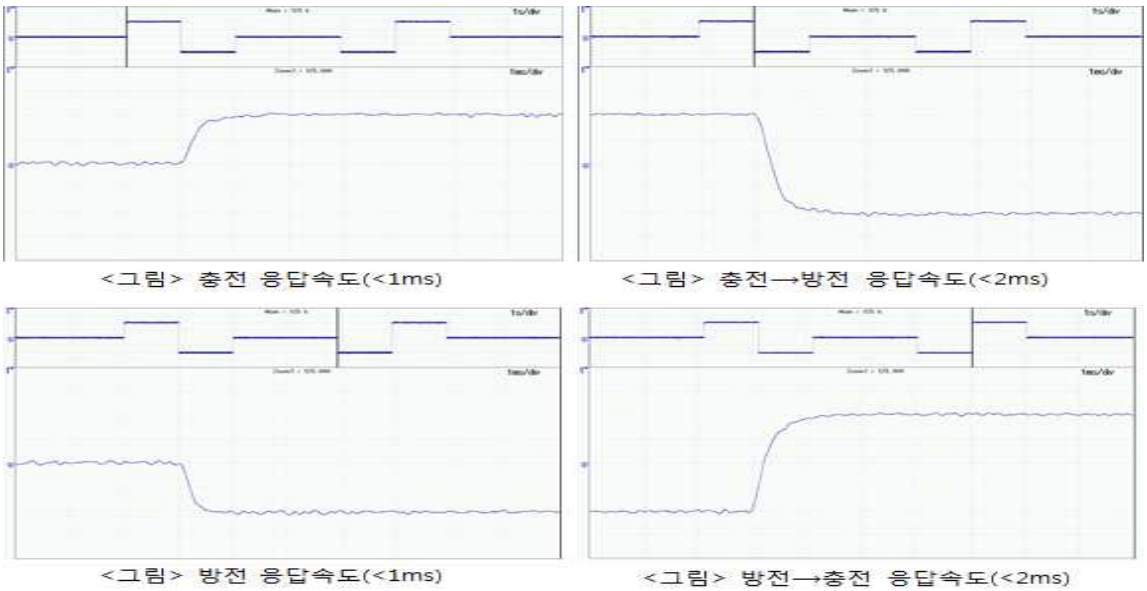
- PCS의 양방향 전력변환제어를 위한 PI 제어기를 설계함. PCS의 안전성 및 성능 개선을 위한 고속 Response time 제어 방식 진행하였으며, PI Gain 값을 조정하여 적당한 오버슈트를 생성하고 Reference를 조정하여 출력 파형의 응답성을 향상시킬 수 있도록 설계하여 다음 그림과 같이 PI 제어기의 성능이 개선됨. PCS의 일반적인 응답속도인 50ms에 비해 대폭 향상된 10ms로 측정되었으며 최고 1ms 응답성 Test까지 완료함.



<그림 3-1-18> 제어기 구성



<그림 3-1-19> 제어 개선

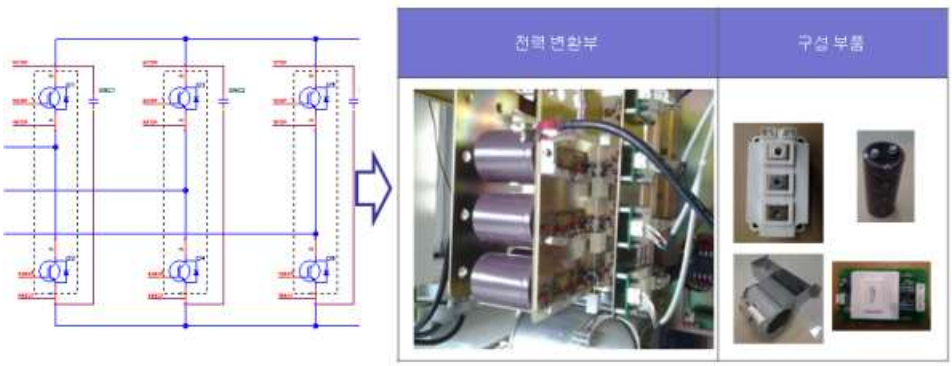


<그림 3-1-20> 충전 방전PI제어 개선에 따른 응답속도

(4) 50kW급 PCS 프로토타입 제작

(가) 전력변환부 제작

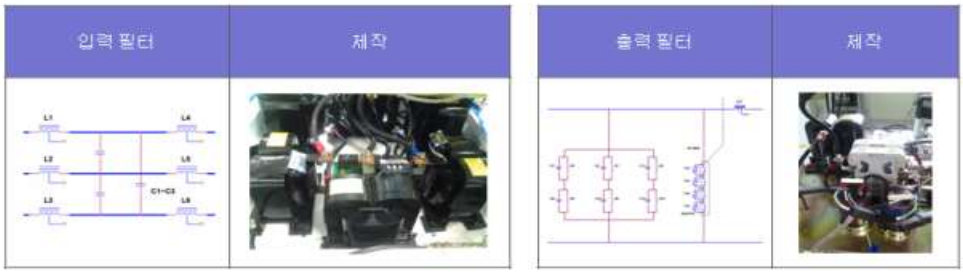
- 설계 파라미터에 적합한 IGBT, 커패시터 게이트 드라이버, 냉각팬 등의 부품을 사용하여 전력변환부를 제작함.



<그림 3-1-21> 전력변환부 제작

(나) 입력필터 및 출력필터 제작

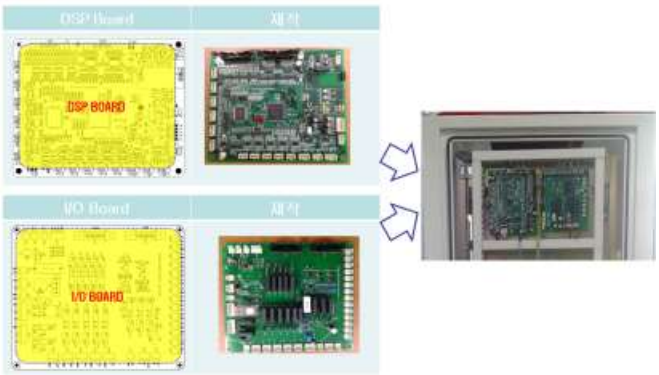
- 전압 및 전류리플을 고려하여 선정한 부품을 사용하여 입력 및 출력필터 제작함.



<그림 3-1-22> 필터부 및 냉각팬

(다) Control Board 제작

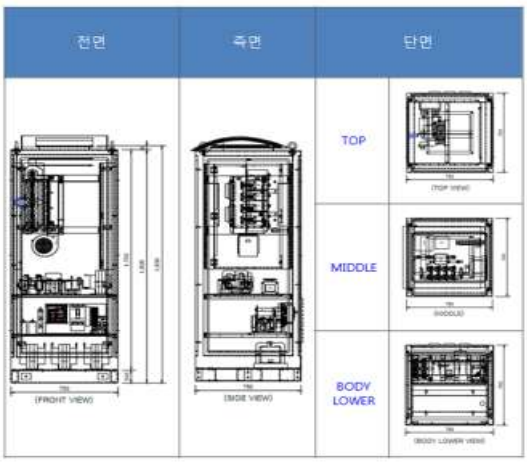
- 설계된 Control Board 도면을 기반으로 DSP Board 및 I/O Board 제작함.



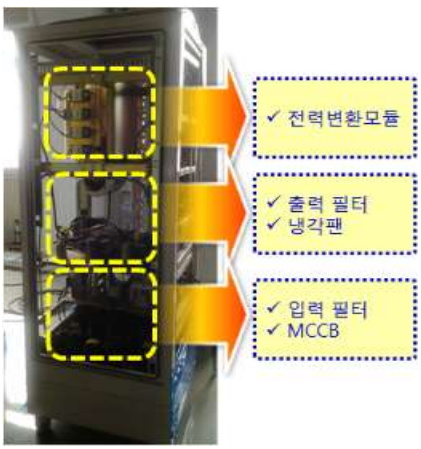
<그림 3-1-23> Control Board 제작

(라) 기구물 제작

- 50kW급 프로토타입 기구도면은 전면, 측면 및 상단, 중단, 하단의 단면 도면이며, 제작된 프로토타입의 상단부는 전력변환모듈을 중단부는 출력 필터 및 냉각팬을 하단부는 MCCB 및 입력필터를 포함하고 있음.



<그림 3-1-24> 기구 도면

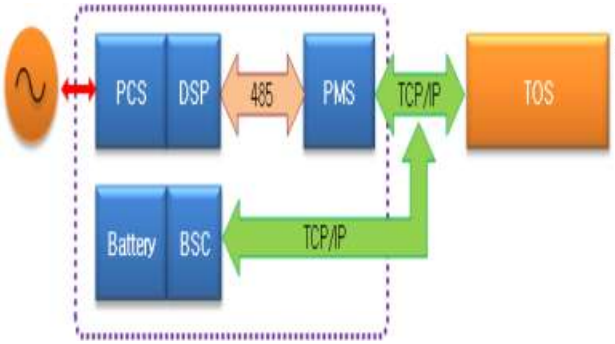


<그림 3-1-25> PCS 50kW 구성

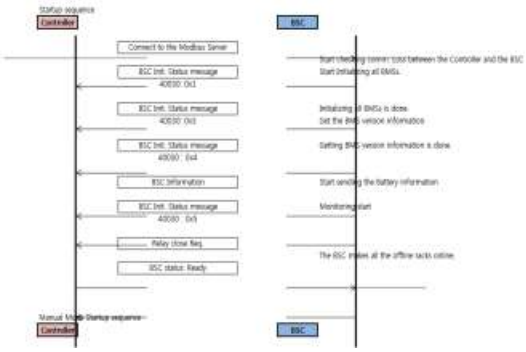
(5) 시험 및 성능평가

(가) 통신연동시험

- PCS와 PMS간 RS-485통신을 사용하며 PMS, TOS, BSC간 통신은 TCP/IP를 사용하도록 구성하였으며, PMS와 BSC 간에 통신프로토콜 및 시퀀스, PMS와 BSC간 프로토콜(TCP/IP), PMS와 PCS간 통신 프로토콜(RS-485)을 다음과 같이 인터페이스 구성 및 프로토콜을 정의하였음.



<그림 3-1-26> 통신인터페이스 구성



<그림 3-1-27> PMS와 BSC간 통신 시퀀스



<그림 3-1-28> ESS 통신 프로토콜



<그림 3-1-29> PCS 통신 프로토콜

- 통신시험을 통해 PCS, PMS, BSC간 통신연동이 정상적으로 동작함을 확인함.



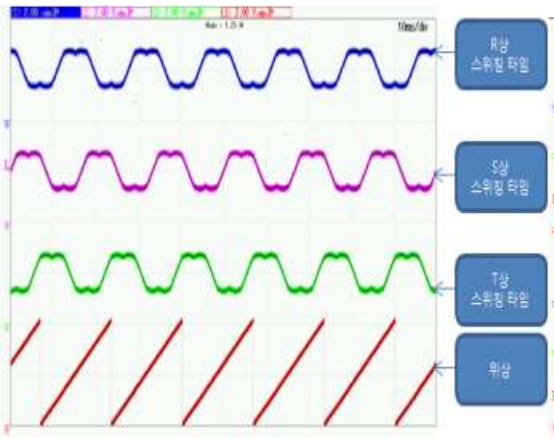
<그림 3-1-30> 시험 구성



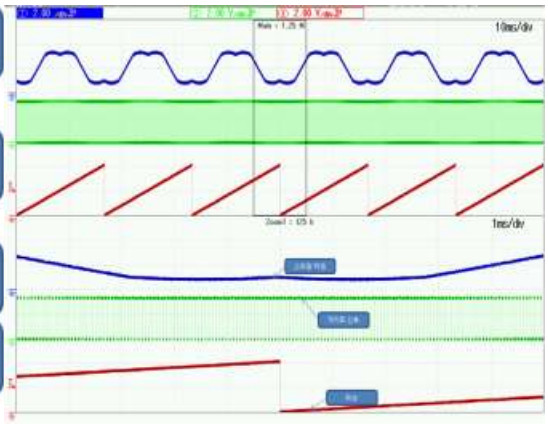
<그림 3-1-31> 통신 연동 시험

(나) PCS 기능시험

- SVPWM 제어의 정상 동작을 확인하기 위해 스위칭 타임 연산 Logic 파형을 확인하였으며 또한 역률 보정 제어의 정상 동작을 확인하기 위해 위상 검출 파형을 확인함. 또한 스위칭 타임 연산 Logic을 기반으로 한 게이트 신호 파형 정상 동작 확인 시험을 수행함.



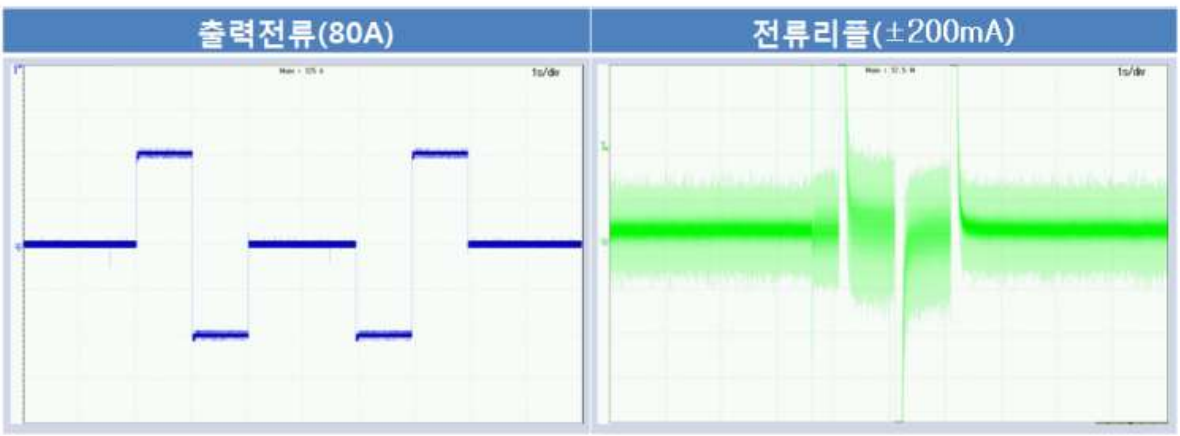
<그림 3-1-32> SVPWM 스위칭 타임 연산 및 위상 검출



<그림 3-1-33> 스위칭 타임 연산에 따른 게이트 신호

(다) 충전/방전 시험

- PCS의 성능을 시험하기 위해 충/방전의 연속 시험을 실시하였고 충/방전 시험의 전류리플을 확인하기 위해 AC모드로 전류 파형을 측정한 결과 출력전류 리플 값이 ±200mA로 충전 방전 전류인 80A의 ±1%미만 출력전류 리플 사양을 만족함.



<그림 3-1-34> 충/방전 시험 파형

(라) 효율 및 역률 측정

- 효율 측정 조건을 풀부하에서 충/방전 시험을 실시하여 효율과 역률을 측정하였으며, 풀부하 충전(사양:50kW, 실측:50.872kW) 시험 시 효율은 95.41%, 역률은 1이며 풀부하 방전(사양:50kW, 실측:50.593kW) 시험 시 효율은 95.88%, 역률은 1임을

확인함. 따라서 PCS의 목표 사양인 출력 50kW, 역률 0.95이상, 효율(충전 효율×방전 효율) 90% 이상을 모두 만족함.

항목	충전	
	사양	실측
출력	50kW	50.872kW
역률	0.95이상	1
효율	95%이상	95.88%

항목	방전	
	사양	실측
출력	50kW	-50.593kW
역률	0.95이상	1
효율	95%이상	95.41%

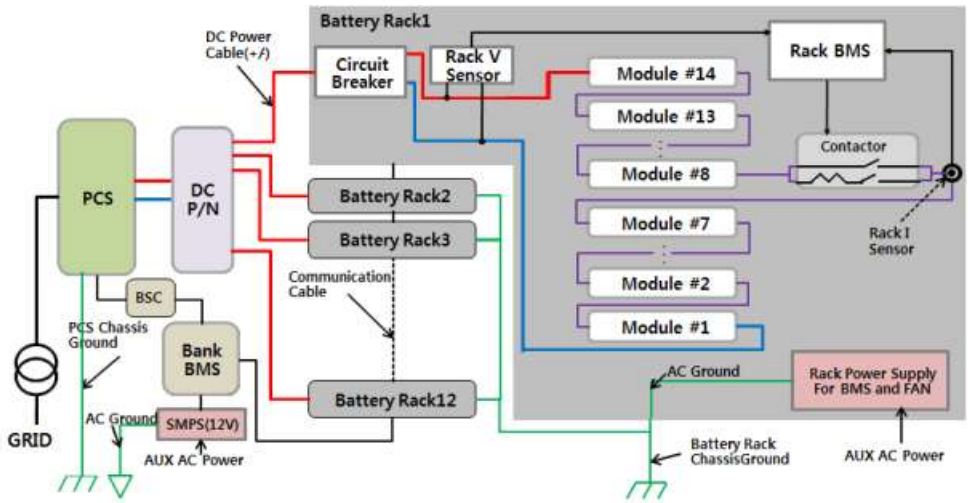


<그림 3-1-35> 충/방전 출력성능 확인

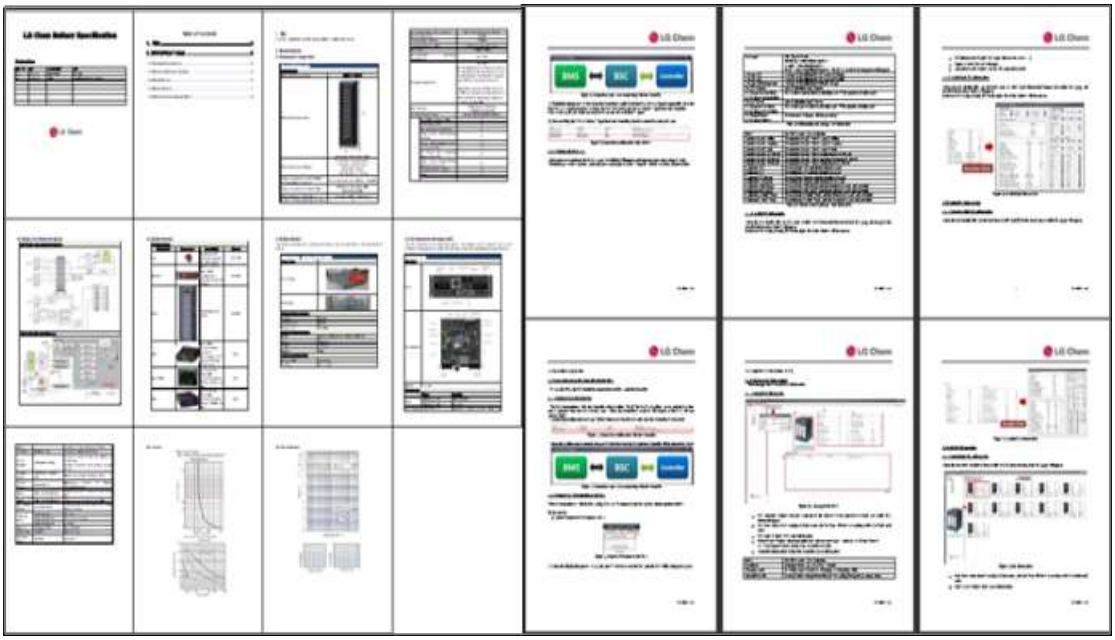
다. 100kWh급 전력저장장치 제작 및 성능평가

(1) 전력저장장치 시스템 구성

- 50kW PCS 연동을 위한 100kWh급 전력저장장치의 시스템 구성은 다음과 같으며, 배터리 제조사에서 제공하는 전력저장장치 사양에 따라 사양서를 확보함.



<그림 3-1-36> 전력저장장치 시스템 구성



<그림 3-1-37> 전력저장장치 사양서

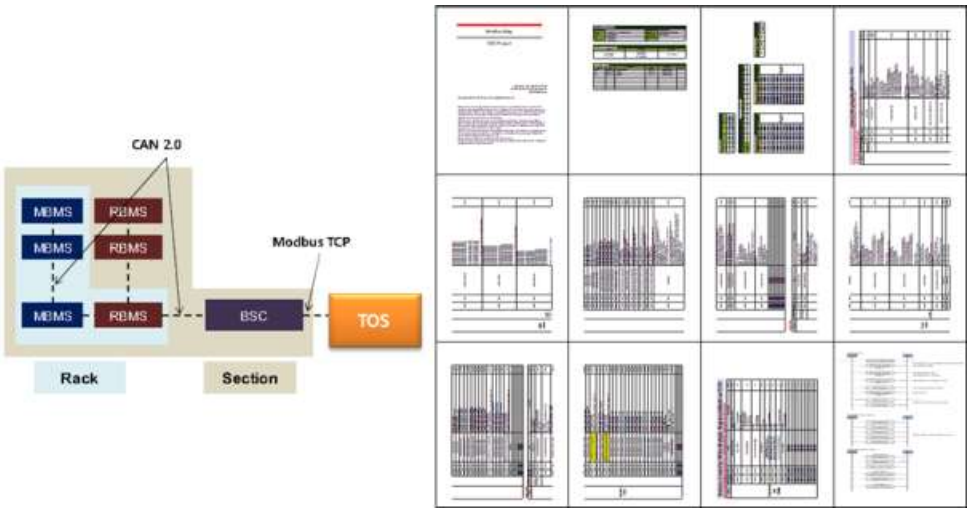
- 100kWh급 전력저장장치는 3.2kWh급 배터리모듈을 14개 직렬 연결하여 45kWh급 랙 시스템 구성하고 이를 3개 병렬 구성하는 135kWh 급의 전력저장장치를 구성함.



항 목	사 양		Remark
	45kWh (Rack 1ea)	135kWh (Rack 3ea)	
배터리타입	리튬 이온 배터리	리튬 이온 배터리	Polymer
모듈 구성	Rack(모듈 14개 직렬)	Rack 3개 병렬	
공칭전압	725.2V	725.2V	3.7V/Cell
정격용량	62Ah	186Ah	62Ah x 3P
총에너지	45kWh	135kWh	
전압범위	588~823.2V	588~823.2V	3~4.2V/Cell
최대 충전/방전 전류	62Ah	124Ah	1C-rate
운영온도	23±5℃	23±5℃	공조시설 연계필요
보관온도	-20~50℃	-20~50℃	
사이즈 (W x D x H)	600 x 600 x 2200	1200 x 600 x 2200	
중량	<720kg	<1440kg	

<그림 3-1-38> 전력저장장치 사양

- 통신시퀀스 및 프로토콜 검토를 진행하였으며 전력저장장치의 모듈에 장착된 BMS, Rack BMS와 전력저장장치를 통합 관리하는 BSC(Battery Section Controller)간은 CAN통신 방식이며 BSC와 TOS(Total Operating System)간 통신은 TCP/IP Modbus 방식으로 구성함.



<그림 3-1-39> 통신사양 및 시퀀스 검토

(2) 100kWh급 전력저장장치 제작

(가) 전력저장장치 시스템 제작

- 배터리팩 성능검토를 위한 100kWh급 전력저장장치 시스템 구성 부품은 랙 시스템의 신뢰성 확보를 위한 Battery Section Controller를 추가 구성하여 랙 단위 전력저장장치를 효율적으로 모니터링 및 관리할 수 있도록 하였음.



구성품	형상	Description
Module		3.2kWh급 모듈 51.8V/62Ah
Rack		45kWh급 Nominal 725.2V/62Ah 14 Module & 1 BPU (600 * 600 * 2200)
Battery Protection Unit (BPU)		Rack BMS Circuit Breaker, Contactor, Sensor, etc
Bank Battery Management System (BMS)		Rack BMS 제어 BSC와 통신
Battery Section Controller (BSC)		Bank BMS 제어 System Controller와 통신

<그림 3-1-40> 전력저장장치 제품 구성

• 45kWh급 전력저장장치 3세트 제작 및 135kWh급 랙 시스템을 구성함



<그림 3-1-41> 135kWh급 전력저장장치 제작

(나) 전력저장장치 성능평가 기준 검토

① 전력저장장치 관련 고효율에너지기자재 인증 기술기준안 개정현황 검토

• 2014년 12월 산업통상자원부는 고효율에너지기자재 보급촉진에 관한 규정이 개정되었으며, 전력저장장치 시험/평가/검증을 위한 기술검토를 진행하였으며 전지협회 표준 'SPS-KBIA-10104-01-02 배터리에너지저장장치용 리튬이차전지 안전성 및 성능 시험방법'에 의해 시험을 완료한 '리튬 이차전지'를 이용하고, 스마트그리드협회 표준 'SPS-SGSF-04-2012-07 에너지 저장시스템용 전력변환장치의 성능요구사항 중 안전성능시험 항목을 만족하는 PCS(Power conditioning system)로 제작한 전력저장장치를 검토함. PCS 출력용량은 50kW이며 전력저장장치 정격용량은 135kWh급으로 방전시간 2시간을 만족하며 효율 89%를 만족해야 함.

<표 3-1-6> 고효율인증 시험 항목

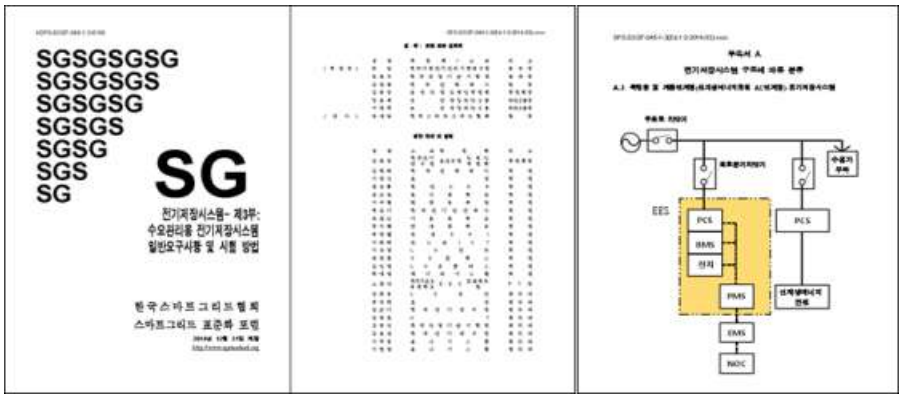
번호	고효율 시험항목	#1	비 고
1	효율측정	○	*
2	절연저항시험	○	*
3	절연내력시험	○	*
4	입력과전압 및 부족전압보호	○	*
5	출력과전압 및 부족전압보호	○	*

<표 3-1-7> 전력저장장치 고효율인증 효율기준

전력저장장치 용량 (PCS 기준)	효율(%)
10 kW 미만	84
10 kW이상 ~ 30 kW 미만	87
30 kW이상 ~ 100 kW 이하	89
100 kW초과 ~ 250 kW 이하	89.2
250 kW초과 ~ 500 kW 이하	89.0
500 kW초과 ~ 1000 kW 이하	88.6

② 전력저장장치 관련 스마트그리드 단체 표준안 개정현황 검토

- 2014년 12월 한국스마트그리드협회는 'KSPS-SGSF-045-1-3-6195 전기저장시스템-제3부 : 수요관리용 전기저장시스템 일반요구사항 및 시험방법'에 관한 표준안을 제정하였으며 전력저장장치 시험/평가를 위한 기술검토를 수행함.



<그림 3-1-42> 스마트그리드 전기저장시스템 단체표준안

③ 전력저장장치 관련 한국전지산업협회 단체 표준안 개정현황 검토

- 2014년 7월 한국전지산업협회는 'KBIA-10104-02 배터리에너지저장장치용 리튬이차전지-단저지 및 전지시스템-성능시험'에 관한 단체표준 인증심사기준을 개정하였으며 전력저장장치 시험/평가를 위한 기술검토를 수행함.



<그림 3-1-43> 한국전지산업협회 단체표준안

• 2014년 한국전지산업협회에서는 SPS-KBIA-10104-01-1998, SPS-KBIA-10 104-02-1999 단전지, 모듈, 전지시스템(랙) 제품 단체표준 제정(안)을 준비 중에 있으며 단체표준안 3건에 대한 제정 검토를 진행 중임.

- KBIA-10104-03 : 배터리에너지저장장치용 리튬이차전지-단전지
- KBIA-10104-04 : 배터리에너지저장장치용 리튬이차전지-모듈
- KBIA-10104-05 : 배터리에너지저장장치용 리튬이차전지-전지시스템(랙)



<그림 3-1-44> 한국전지산업협회 단체표준 제정(안)

(다) 전력저장장치 시험환경 구축 및 성능평가

• 고효율인증, 스마트그리드 단체표준, 한국전지협회 단체표준 등 리튬이차전지가 적용된 배터리시스템 관련 시험기준/절차를 검토하여 100kWh급 대용량 전력저장장치 성능평가를 위한 시험절차를 수립하였으며, 전력저장장치 성능시험을 위한 시험설비 세팅하고 시험 평가를 실시함.

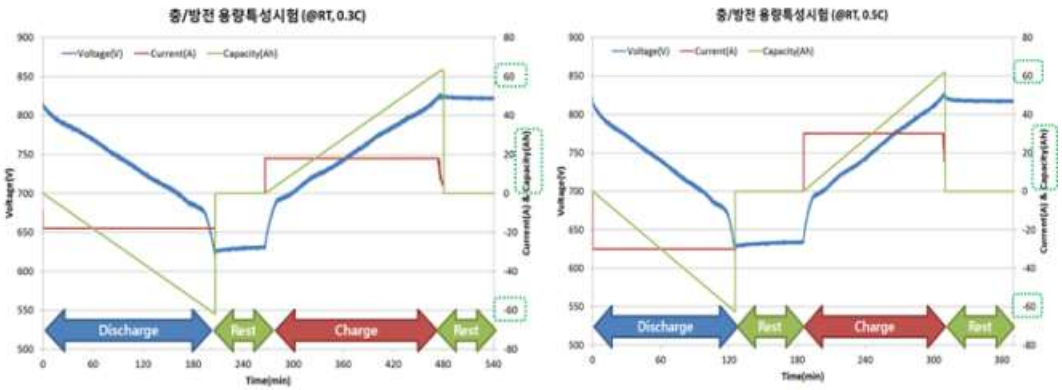


<그림 3-1-45> 전력저장장치 성능 시험절차 수립



<그림 3-1-46> 전력저장장치 성능평가 환경 셋업

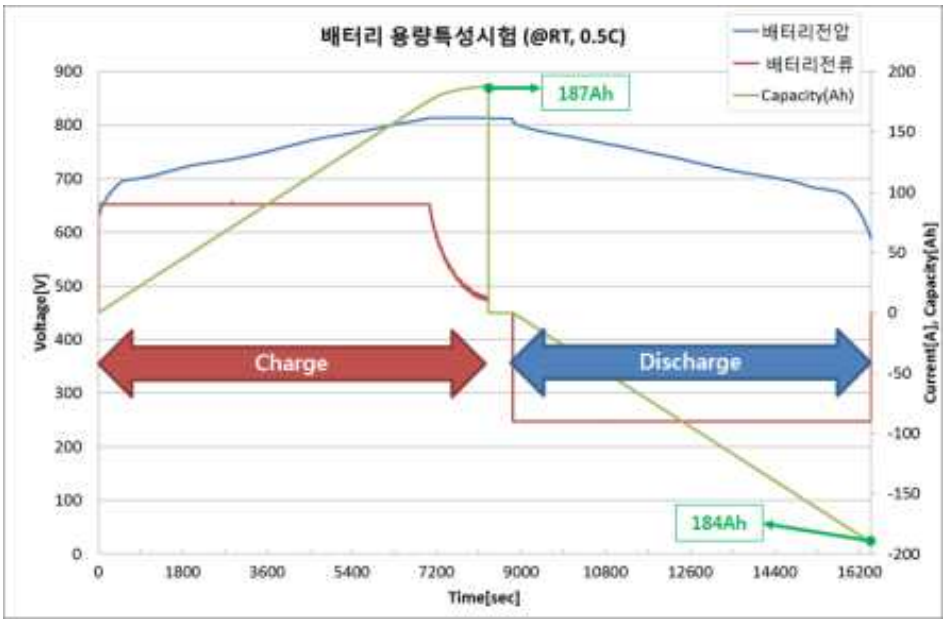
- 전력저장장치 Rack 1개에 대한 충/방전 시험을 진행하였으며 0.3C-rate(20A)조건으로 충/방전 시험결과 Rack 1개의 정격용량은 60Ah급으로 공칭전압기준으로 총 에너지를 산출하면 725.2V x 60Ah = 43,512Wh 으로 Rack 3개를 병렬 구성하여 사용할 경우 약 130.5kWh급으로 목표인 100kWh급을 만족함.



<그림> 전력저장장치 충/방전 (@0.3C) 시험결과 <그림> 전력저장장치 충/방전 (@0.5C) 시험결과

<그림 3-1-47> 전력저장장치 충/방전(@0.3C, 0.5C) 시험 결과

- 전력저장장치 Rack 1개에 대한 충/방전 시험을 진행하였으며 0.5C-rate(30A)조건으로 충/방전 시험결과 Rack 1개의 정격용량은 60Ah급으로 Rack 3개를 병렬 구성하여 사용할 경우 약 130.5kWh급으로 목표인 100kWh급을 만족함.
- 전력저장장치 Rack 3개를 병렬연결 구성하여 충/방전 시험을 진행하였으며 0.5C-rate(90A)조건으로 충/방전 시험결과 충전용량은 187Ah, 방전용량 184Ah로 충/방전 효율은 98.3%이며 방전용량 및 공칭전압기준으로 총에너지를 산출하면 725.2V x 184Ah = 133kWh급으로 전력저장장치 제작용량 목표인 100kWh급을 만족함.



<그림 3-1-48> 전력저장장치 충/방전 (@0.5C) 시험결과

- 배터리 셀 사양이 변경됨에 따라 배터리 제조사에서는 한국전지산업협회의 단체표준으로 제안된 기술기준, '배터리에너지저장장치용 리튬이차전지 - 단전지/모듈/전지시스템'에 대해 '제 1부 : 안전성 시험'과 '제 2부 : 성능시험'을 실시하여 국내 리튬이차 전지, 모듈 및 전지 시스템에 대한 인증을 획득함.



<그림 3-1-49> 단체표준표시인증 "KBIA-10104-02" (단전지/모듈/전지시스템)

- 한국전지산업협회의 단체표준안 '배터리에너지저장장치용 리튬이차전지 - 단전지 및 전지시스템' '제 1부 : 안전성 시험' 과 '제 2부 : 성능시험'에 대하여 배터리 제조사의 외부평가기관(KTR) 평가를 실시함.



<전지시스템 성능 시험성적서> <전지시스템 안정성 시험성적서>

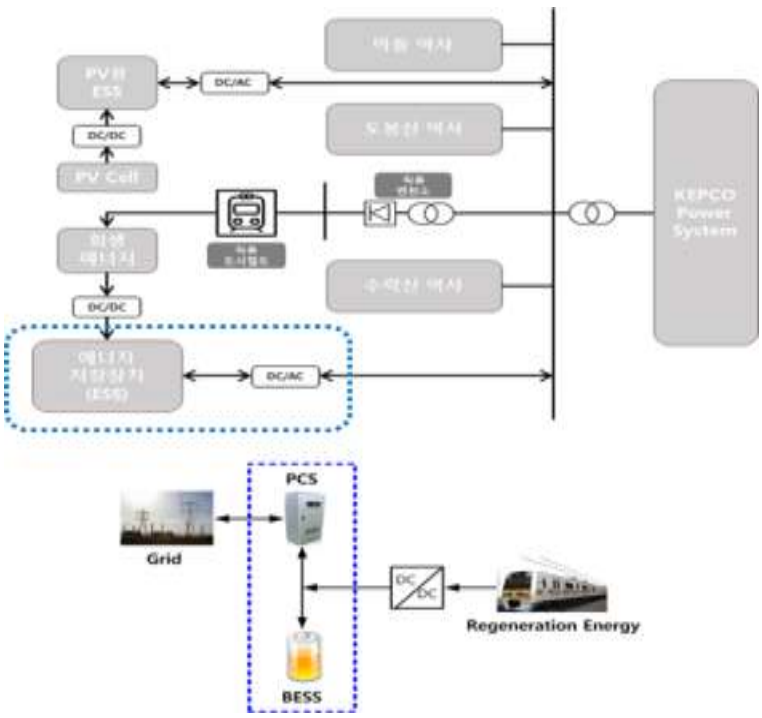
<그림 3-1-50> 전지시스템 성능 및 안정성 공인 시험성적서

라. 200kW급 양방향 PCS 제작 및 성능평가

(1) 복합에너지 생산시스템의 구성

(가) 시스템 구성

- 전동차의 제동 시에 발생하는 회생에너지원이나 계통 전원을 통하여 경부하시에 유효전력을 저장하고 과부하시에 사용함으로써 피크부하 관리 및 부하평준화(Load leveling)에 기여하는 시스템 구성은 다음과 같으며, 이를 위한 전력저장장치 기반의 200kW급 PCS 개발 사양을 제시함.



<그림 3-1-51> 도시철도 복합에너지 시스템 구성도

(나) 사양

<표 3-1-8> PCS 사양

구분	항목	사양
입력	입력전압범위	600~813V
출력	정격출력전력	200kW
	정격 출력 전압	3상 3선식 380Vac
	출력주파수	60Hz
	정격 출력 전류	303A
	역률	0.99
시스템	효율	96% 이상
	절연구현 방식	변압기형
	냉각방식	강제 공냉식(FAN)
	동작 온도	-10 ~ 45 ℃
보호기능	입력	과/저전압 보호, 과전류 보호, Fuse단선감지, 과열방지
	출력	단독운전방지, 계통 과/저전압 보호, 계통 과전류 보호, Fuse 단선 감지, 과열 방지
기구	외형 치수 및 중량	W1300×D1000×H2000. 830kg
UI	디스플레이	7인치 터치스크린
통신	통신	RS485, CAN

(2) 하드웨어 설계

(가) H/W 회로설계 파라미터

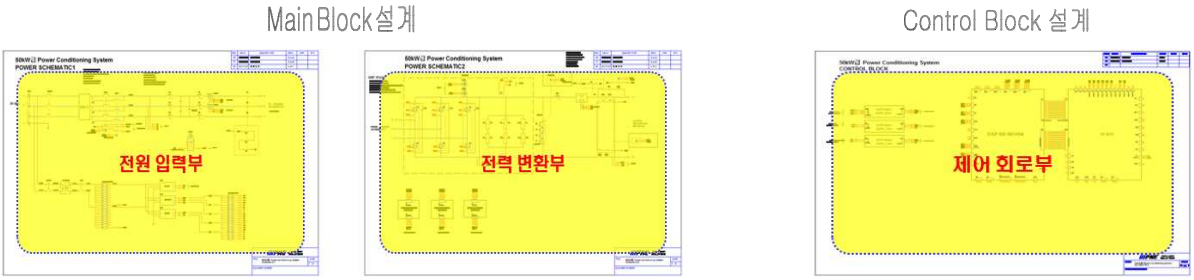
- 200kW급 PCS 전자파 방지 및 고조파 리플 저감을 위해 LCL 필터를 다음과 같이 설계함. 높은 변환 효율을 얻기 위해 IGBT 소자를 사용한 Single-Level 인버터 토폴로지를 사용하였고 15kHz의 스위칭 주파수로 스위치를 제어하여 AC/DC변환을 수행하였으며 입력필터부, 전력변환부, 출력전원부의 설계 파라미터는 다음과 같음.

<표 3-1-9> H/W 설계 파라미터

입력필터부	전력변환부	출력전원부
EMC필터 LCL 필터 안전장치	IGBT Module	출력필터 안전장치
• 전력품질 만족 • 역전압보호 • 고조파 5% 이하 • 지락보호 • R, C 사양 설계 → 전류고조파 제한	• 380Vac → 550~820Vac • IGBT 소자선정 • SVPWM 제어 • PLL • 주파수 15kHz • 역율 0.95이상 달성	• 출력리플 만족 • 출력 쇼트 보호 • 출력보호/차단 • R, C 사양설계

(나) H/W 회로 설계

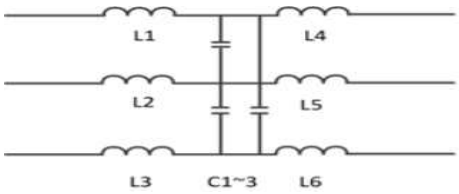
- 200kW급 PCS 회로 설계를 수행함.



<그림 3-1-52> PCS 회로 설계

(다) 입력필터 설계

- 입력 필터 설계는 전류리플 ±9%이내를 기준으로 L값을 선정하고 전류리플 ±2.5%이내를 기준으로 C값을 선정함.

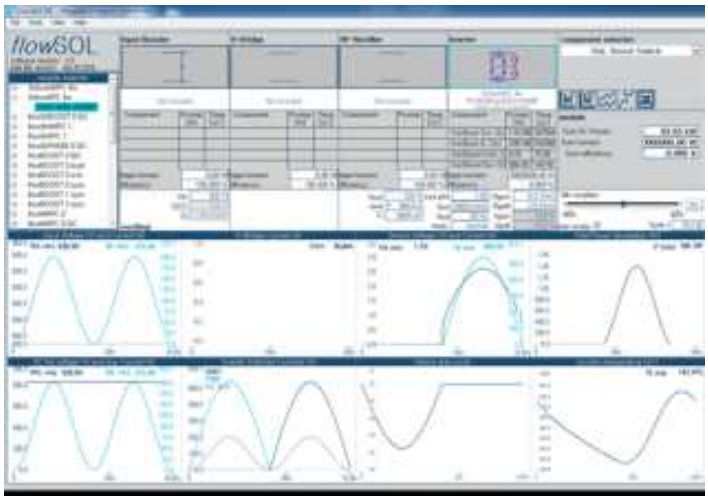


부품	설계사양
L1 ~ L6	전압 Duty 50% 전류 Ripple ±9%
C	전류 Ripple ±25%

<그림 3-1-53> 입력 필터 설계 파라미터

(라) 전력변환부 설계

- 200kW급 PCS을 설계하기 위해서 양방향 인버터 동작조건에서의 IGBT 소자 및 Heat Sink의 열손실 분석을 수행하였으며, 또한 열손실 분석 및 설계 파라미터에 맞는 소자를 선정하여 전력변환부를 설계함.



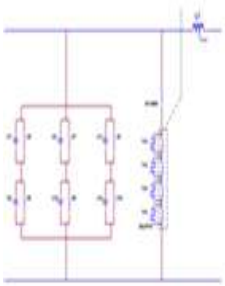
<그림 3-1-54> IGBT 모듈 열손실 분석



<그림 3-1-55> IGBT 모듈 방열판 장착 사진

(마) 출력필터 설계

- 최종 출력 필터는 전류리플 0.5%이내를 기준으로 L값을 선정하고 전압리플 ±0.03%이내를 기준으로 C값을 선정함.

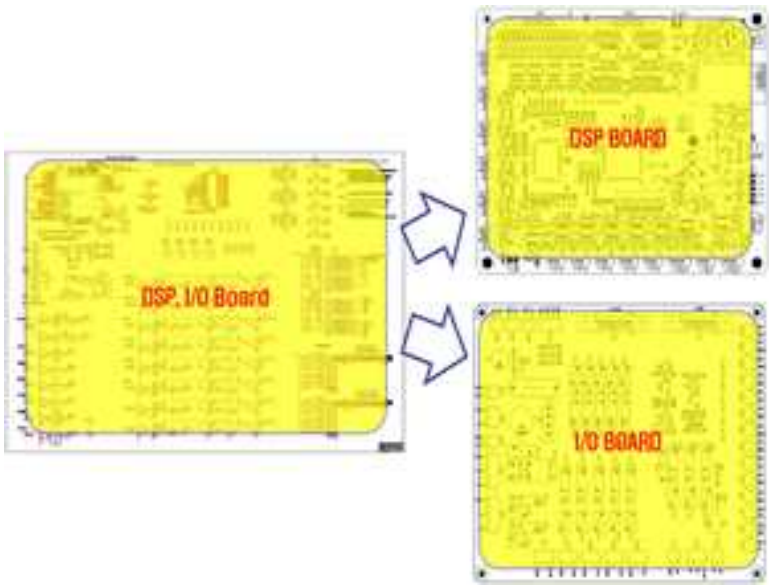


부품	설계 사양
L7	최종출력전류Ripple이 0.5% 이내로 설계 전압Duty 90% 리액터전류 Ripple이 ±9%.
C7~12	전압 Duty 90% 전압Ripple ±0.03%

<그림 3-1-56> 출력 필터부 설계

(바) DSP 기반의 통합 제어기 H/W 설계

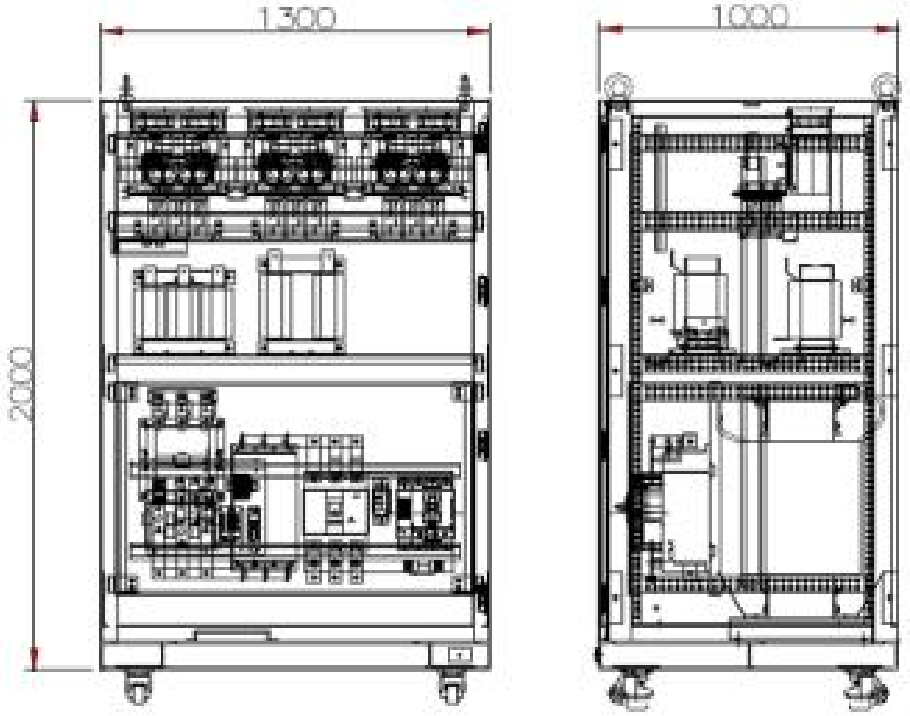
- 디지털 제어방식 기능구현을 위한 DSP 및 I/O Board 회로 설계를 수행함.



<그림 3-1-57> DSP 및 I/O 보드 설계

(사) 기구 설계

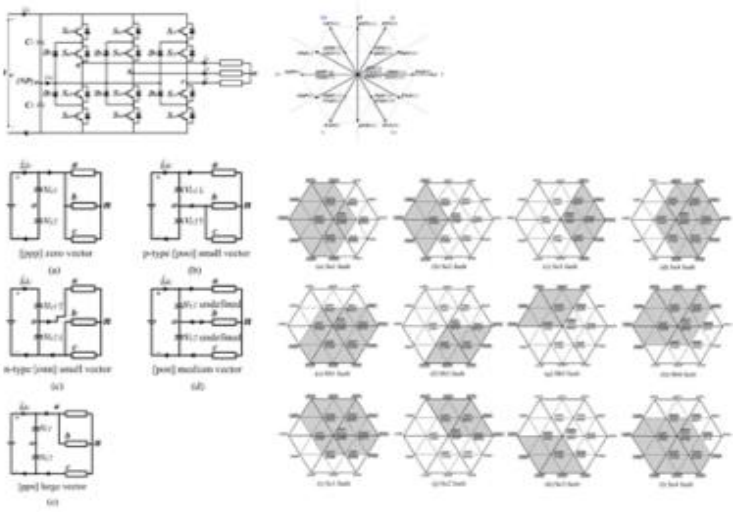
- 200kW급 PCS 기구 외형이며 방열 구조 및 유지보수가 용이하도록 설계함.



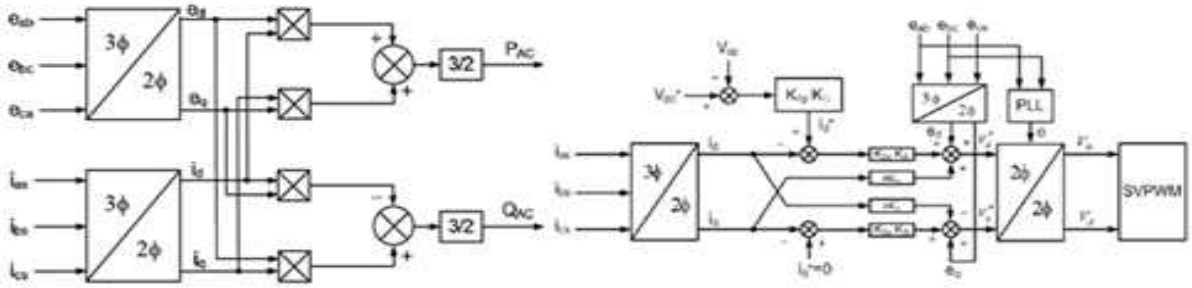
<그림 3-1-58> 설계된 기구 외형사이즈

(아) PCS 제어 회로부 및 DSP 제어 알고리즘 개선 개발

- 멀티레벨 인버터의 한 종류인 다이오드 클램프드 방식의 Neutral Point Clamped (NPC) 인버터는 다른 형태의 멀티레벨 인버터에 비해 부가적인 커패시터가 필요 없고, 단일 전원을 이용하여 구동시킬 수 있기 때문에 고압 직류 전송 시스템, 무효 전력 보상기, 고압 가변속 전동기 구동 시스템 등과 같이 다양한 응용분야에서 사용 가능하며 장점으로는 출력전압, 전류의 고조파 성분을 반 이상 줄일 수 있고 스위칭이 전동기 권선에 인가되는 전압 스트레스를 감소시킬 수 있음.
- 또한 소자의 직렬연결 구조와 달리 턴-오프시 균등 한 전압분배를 이룰 수 있으므로 턴-오프 동작의 동기화에 대한 고려를 할 필요가 없어 하드웨어 구성이 간단하며 각 스위칭소자의 차단전압이 DC-링크 전압의 반이므로 스위칭시의 급격한 전압 변동으로 인하여 발생하는 노이즈를 줄일 수 있음. 따라서 Neutral Point Clamped (NPC) 설계를 위하여 양방향 전력변환제어를 위한 DSP 제어로직 설계를 수행함.



<그림 3-1-59> 3레벨 NPC 제어 개념도



<그림 3-1-60> 제어기 구성

(3) 200kW급 PCS 시작품 제작

(가) PCS 제작

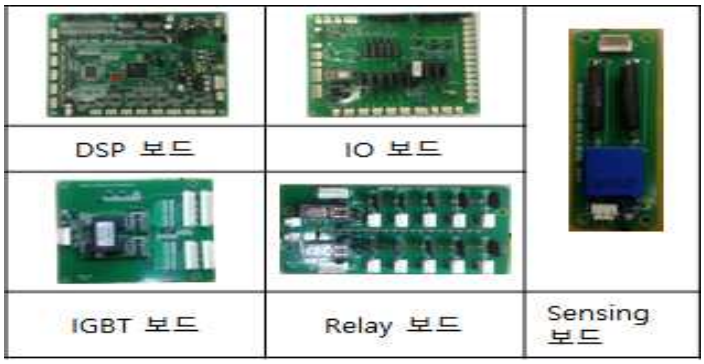
- 200kW급 전력변환부 및 입력출력 필터 등을 전압 및 전류리플을 고려하여 선정한 부품을 사용하여 제작함.



<그림 3-1-61> 전력변환부 및 입력/출력 필터 제작

(나) Control Board 제작

- 설계된 Control Board 도면을 기반으로 DSP Board 및 I/O Board 제작함.



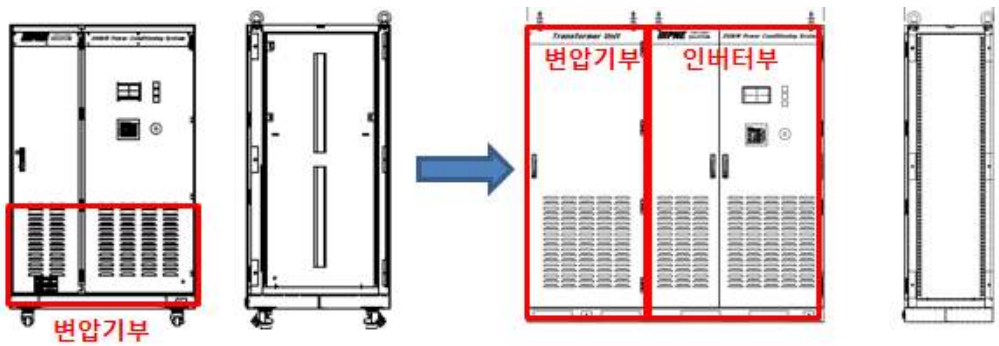
<그림 3-1-62> 제작된 제어 보드

(다) 기구물 및 시작품 제작

- PCS의 변압기 확장성을 고려하여 시제품을 개선하였으며, 기존 대비 체적을 8% 이상 줄였으며 만약 변압기를 제외 한다면 40%이상 체적을 감소하였으며, 출력은 20%이상 상승되어 용량은 최대 250kW까지 출력할 수 있도록 개선함.
- PCS의 변압기 확장성을 고려한 체적 개선 설계로 제작비 절감, 동일 성능 효과, 설치비 저감, 변압기 유/무에 따라 7~40% 이상의 체적이 감소함.



<그림 3-1-63> 200kW 개선품 PCS



<그림 3-1-64> 250kW 개선품 PCS

(4) 시험 및 성능평가

(가) SGSF 규격에 의한 전기자기 적합성 시험

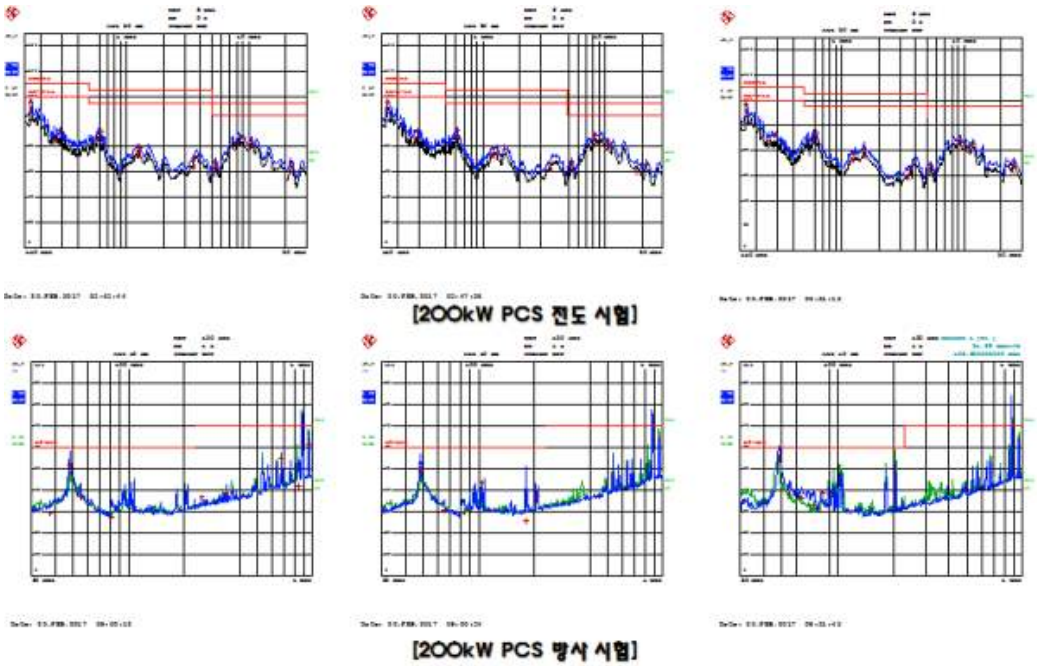
- 200kW PCS의 전기자기 적합성 시험을 수행하였으며, 문제가 없음을 확인함.



<그림 3-1-65> SGSF 규격



<그림 3-1-66> 200kW PCS 전자파 공인 성능 시험 파형



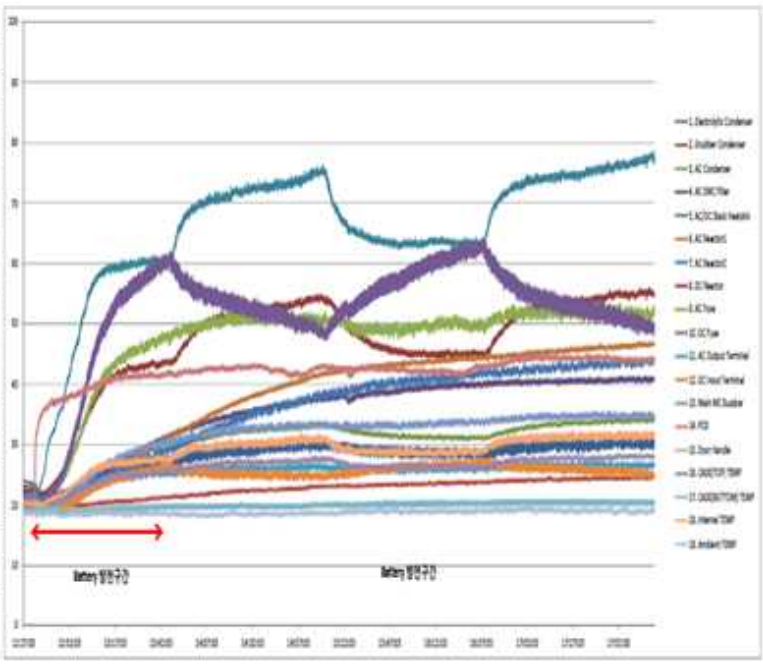
<그림 3-1-67> 200kW PCS 전자파시험 파형

(나) 온도 상승 시험

- 풀부하로 충전 시험을 실시하여 PCS의 내외부 및 여러 포인트를 찍어서 온도 측정을 수행하였으며, 가장 높은 온도 지점은 80℃로 측정됨.

채널	위치
1	Electrolytic Condenser
2	Snubber Condenser
3	AC Condenser
4	AC EMC Filter
5	AC/DC Stack Heatsink
6	AC Reactor1
7	AC Reactor2
8	DC Reactor
9	AC Fuse
10	DC Fuse
11	AC Output Terminal
12	DC Input Terminal
13	Main MC Busubar
14	PCB
15	Door Handle
16	CASE(TOP) TEMP
17	CASE(BOTTOM) TEMP
18	Internal TEMP
19	Ambient TEMP

<온도센서의 위치>

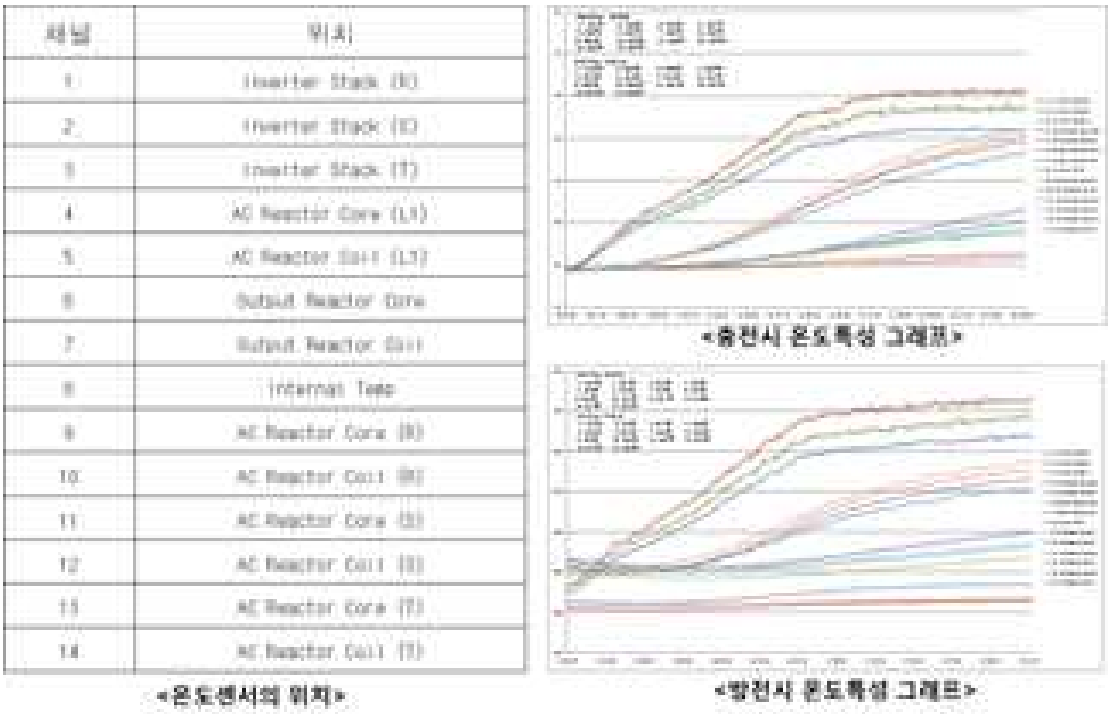


<에이징 온도 시험 그래프>

<그림 3-1-68> 온도 상승 시험

(다) 온도 특성 평가

- 200kW급 PCS에 대해 충/방전모드로 온도 시험을 진행하였으며 온도측정 포인트는 총 14포인트로 10초마다 측정하였으며 최고 높은 온도는 73℃로 측정됨.



채널	위치
1	Inverter Stack (R)
2	Inverter Stack (S)
3	Inverter Stack (T)
4	AC Reactor Core (L1)
5	AC Reactor Coil (L1)
6	Output Reactor Core
7	Output Reactor Coil
8	Internal Temp
9	AC Reactor Core (R)
10	AC Reactor Coil (R)
11	AC Reactor Core (S)
12	AC Reactor Coil (S)
13	AC Reactor Core (T)
14	AC Reactor Coil (T)

<온도센서의 위치>

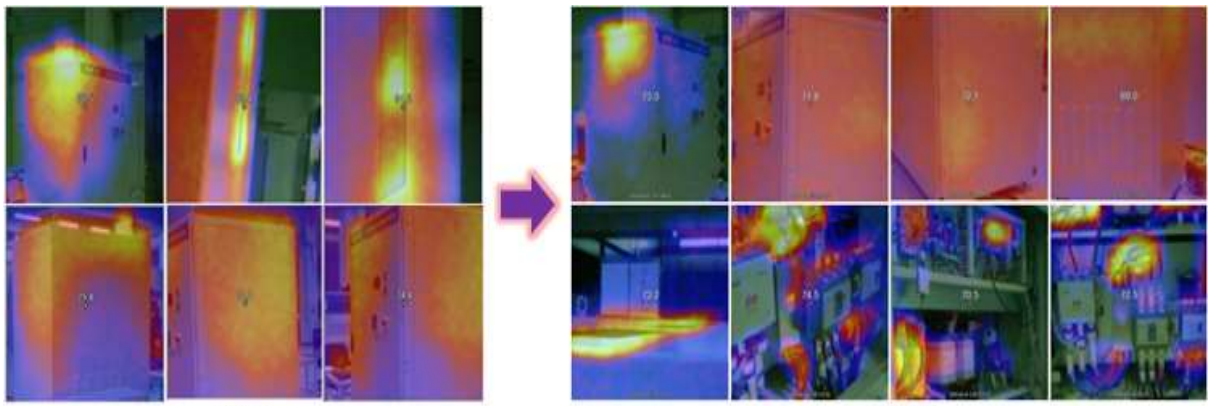
<충전시 온도특성 그래프>

<방전시 온도특성 그래프>

<그림 3-1-69> 200kW급 PCS 충/방전 온도 시험 그래프

(라) 온도실험을 통한 발열 현상 개선

- 200kW PCS 충/방전시험을 진행하면서 온도에 대하여 측정 결과 케이스 상판에 발열현상이 심하였으며 케이스 상판을 개선함으로써 발열이 현저히 감소됨을 확인함.



<개선전>

<개선후>

<그림 3-1-70> 200kW급 PCS 케이스 상판 개선전 및 개선후 발열상태

(마) 공인인증시험

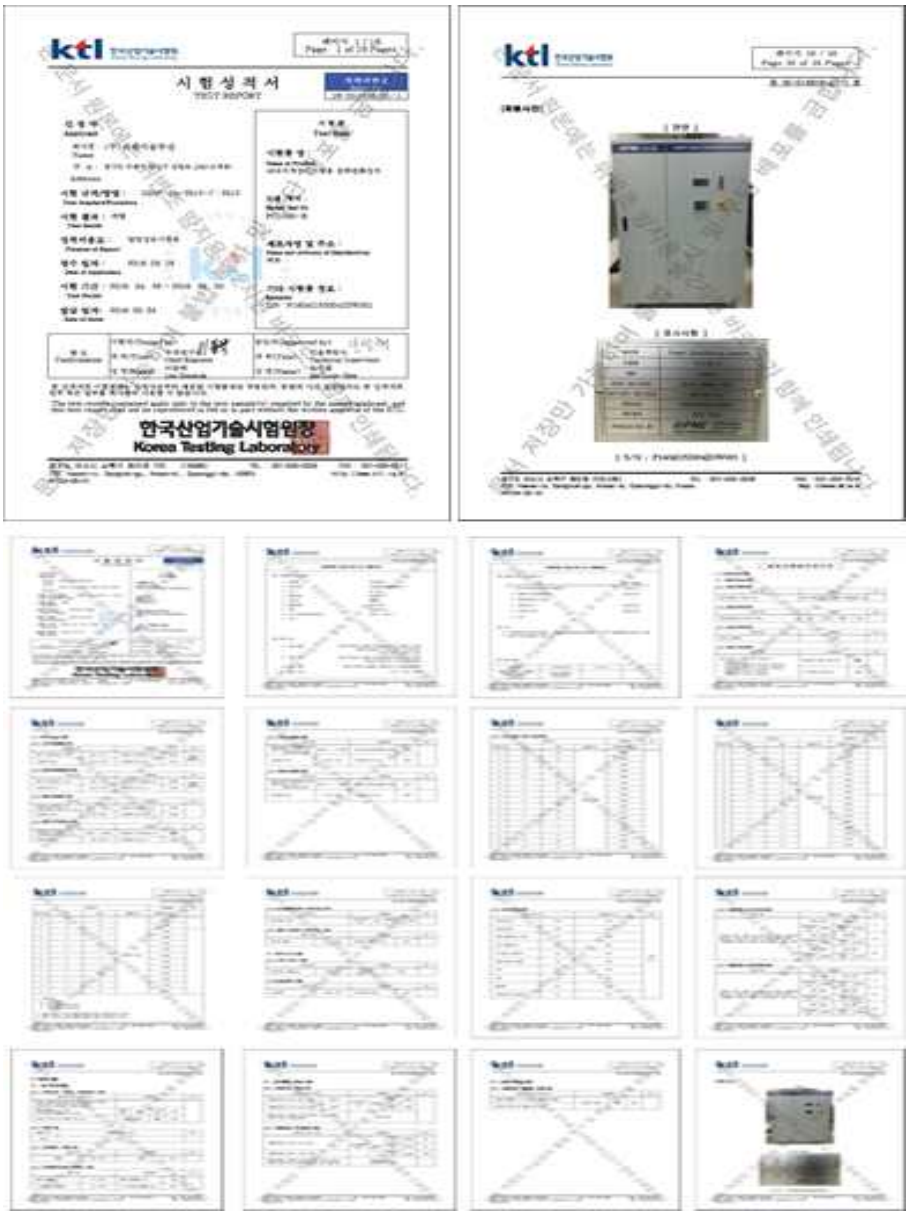
- 200kW PCS는 한국산업기술시험원(KTL)에서 공인인증성능시험을 진행하였으며, SGSF-04-2012-07 시험규격 중 총 19개 항목을 진행하여 모두 정상적으로 Pass 함.

<표 3-1-10> 인증항목

시험	검사항목
절연 성능 시험	● 절연저항 ● 절연내력 ● 절연거리 실험
보호기능 시험	● 일력과전압 및 부족전압 보호기능 ● 출력과전압 및 부족전압 보호기능 ● 주파수 상승 및 저하 보호 기능 ● 단독운전 방지 기능 ● 입력 돌입전류 보호 기능 ● 출력 과전류 보호기능
외부사고 시험	● 부하차단 시험 ● 누설전류 시험 ● 계통 전압 순간정전, 순간 강하 시험 ● 온도상승 시험
정상 특성 시험	● 교류전압, 주파수 추종범위 시험 ● 효율시험 ● 교류출력 역률 시험 ● 교류 출력 전류 왜형률 시험
과도 응답 특성 시험	● 계통전압 급변 시험 ● 계통전압 위상 급변 시험



<그림 3-1-71> 성능 인증 시험 진행

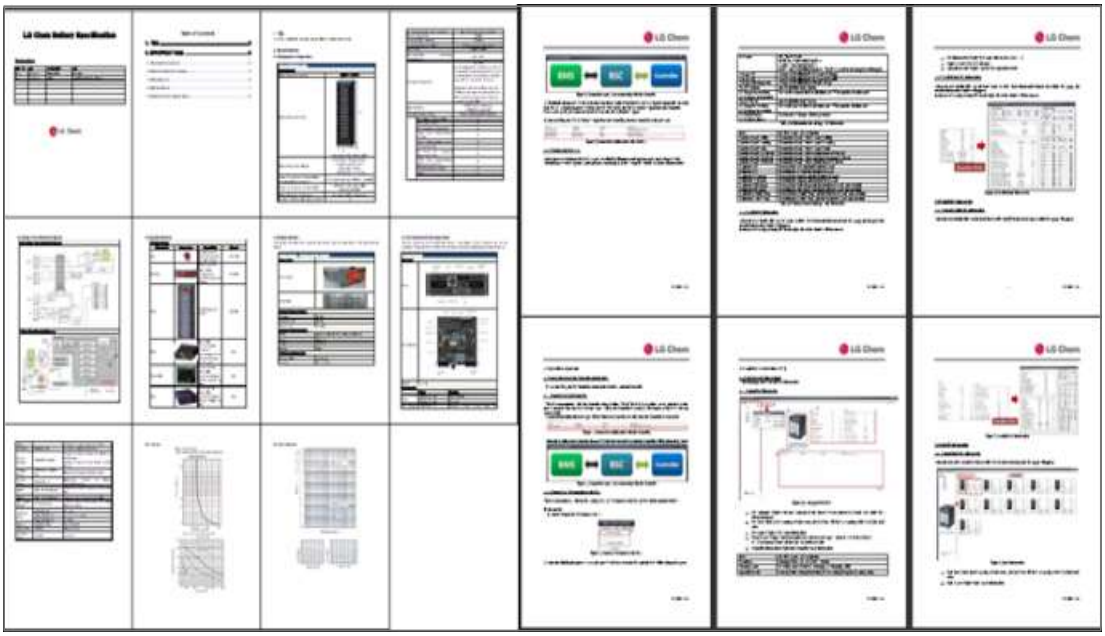


<그림 3-1-72> KTL 성능 시험성적서

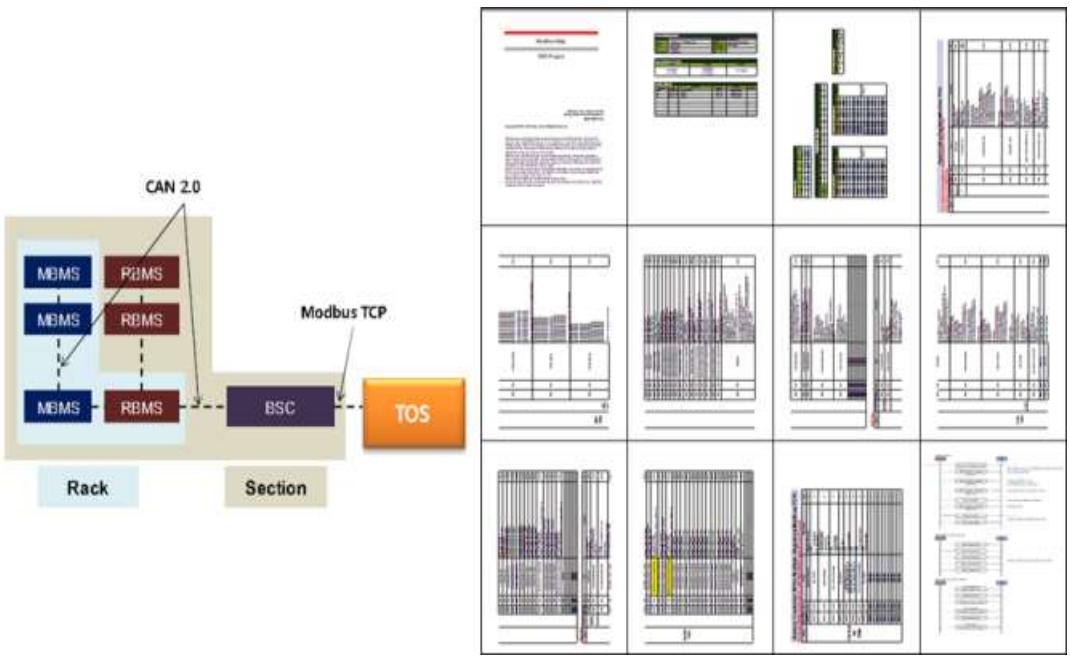
마. **전력저장장치 제작 및 연동시험**

(1) 전력저장장치 사양 선정

- 배터리 제조사에서 제공하는 전력저장장치 사양서 변경사항에 대하여 검토 후 400kWh급 전력저장장치 사양검토를 진행하였으며 3.2kWh급 배터리모듈을 14개 직렬 연결하여 45kWh급 랙 시스템 구성하고 이를 10개 병렬 구성하는 400kWh급의 전력저장장치 사양을 선정함. 통신시퀀스 및 프로토콜 검토를 진행하였으며 전력저장장치의 모듈에 장착된 BMS, Rack BMS 와 전력저장장치를 통합 관리하는 BSC(Battery Section Controller)는 CAN 통신방식이며 BSC와 TOS(Total Operating System)의 통신은 TCP/IP 방식으로 구성되어 있음.



<그림 3-1-73> 전력저장장치 사양서



<그림 3-1-74> 통신사양 및 시퀀스 검토

(2) 전력저장장치 사양

(가) 배터리 랙 구성사양

- 400kW급 전력저장장치의 랙 구성품에 대하여 사양은 다음과 같음.

<표 3-1-11> 400kW급 전력저장장치의 랙 구성품

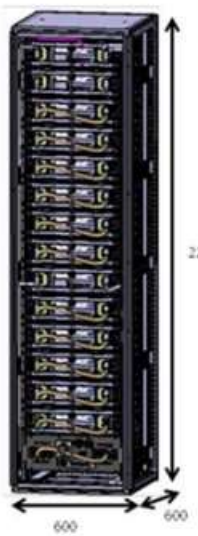
구성품	외관	상세	비고
셀		셀 모델: JH2 UL1642, UN38.3 인증	116Wh
모듈		UPB4860 GEN2 UL1973, UN38.3 인증	14S2P 구성 3.2kWh
랙		1랙= 14모듈 + 1BPU (600×600×2200mm - 냉각팬base제외)	45kWh
BPU		랙BMS Circuit Breaker Contactor Pre-charge circuit 전압/전류 센서	
BSC		랙BMS와 PCS Master controller와 통신	산업용 컴퓨터

(나) 배터리 모듈규격

<표 3-1-12> 배터리 모듈 사양

배터리 모듈 - LG화학 모듈 모델명 : GEN2 (JH2 14S2P)	
외관	
전면	옆면
	
주요 특징	
● 배터리 효율성 증대와 자가진단용 BMS내장 ● Flexible power and energy ratio ● 통합 용이성(19” 표준 랙과 호환 가능) ● 출력/에너지밀도를 극대화 시키는 효율적 크기	
크기 및 무게	
넓이	445 mm (W/O MTG) / 509mm (W MTG)
깊이	554 mm
높이	122 mm
무게	34kg
주요 사양	
전압	51.8 V
용량 (1C-rate 기준)	62 Ah
에너지 (1C-rate 기준)	3.2 kWh
모듈 BMS	내장
냉각	공기냉각

(다) 배터리 랙 규격



배터리 랙 - LG 화학 랙 Model 명 : SR22A1400AC2.0C/SR22A0014AC2.0C (196S2P)	
크기 및 무게	
배터리 장비 크기	랙 크기: 600(넓이) x 665(길이) x 2200(높이) (랙 후면부의 냉각 Fan 포함, Base 제외 기준)
배터리 장비 무게	720kg (14 모듈, 1 BPU, Power/통신 케이블)
주요 사양	
랙당 모듈 수	14 모듈/랙 (셀 196S 2P)
랙 용량 [kWh]	45 kWh
최대 방전 출력	1 CP 이하
팩 당 직류전압범위 [Vdc]	588 - 813 (Nominal 726V)
랙 당 배터리 모듈 수	14
냉각	자연냉각

<그림 3-1-75> 랙 사양

(라) BPU 규격

- BPU는 비정상 사고인 과전압, 저전압, 과전류, 과충전, 고온, 통신에러 발생시 배터리 시스템을 보호하기 위한 CB Open(BMS 제어)하며, 랙의 Isolation, 제거, 재연결이 가능하여 유지보수가 용이하며, 배터리시스템 중 일부 랙이 작동하지 않더라도 정상 상태의 랙은 정상적으로 작동함.

<표 3-1-13> BPU 사양

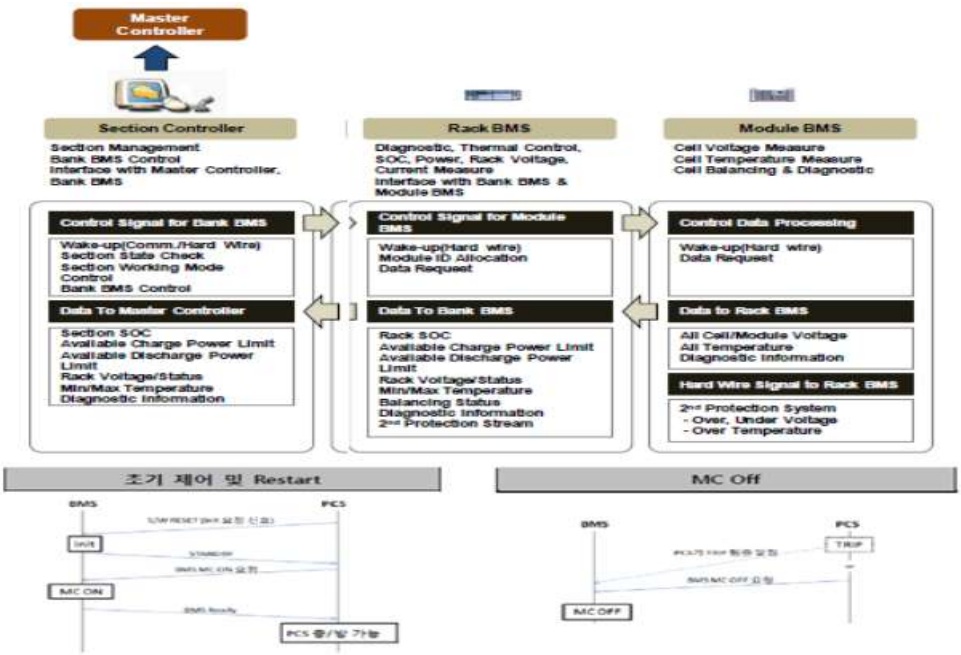
Battery Protection Unit		
외관		
전면	**옆면**	
		
크기 및 무게		
크기	495(넓이) X 550(길이) X 170.8(높이) mm	
무게	약 11kg	
부속품		
구분	**Function**	**적용 인증**
랙 BMS (RBMS Box)	모듈/랙 제어(배터리 보호, BSC 및 모듈 BMS와의 통신) 랙 상태 모니터링(전압, 전류, 온도, 진단, SOC)	
Pre-charge Relay	Contactor 폐쇄시 돌입전류(Inrush Current) 방지	VDE, CSA, UL
Pre-charge Resistor	Pre-charge Relay의 On 상태에서 돌입전류 제한	
Main Contactor(MC)	랙과 PCS간의 DC Power 연결	UL 508 JIS 5442
Circuit Breaker(CB)	CB, Shunt trip, 비상핸들(E-Handle)로 구성 배터리 또는 PCS/계통에 의한 과전류로부터 배터리 및 ESS 보호	
전압/전류센서	랙 전압 측정 및 충전/방전 랙 전류 측정 센서	
SMPS(12V, 24V)	랙 BMS, Contactor, 센서류, 냉각 Fan 전원 공급	
Fan Relay	Fan On/Off 제어	UL, CSA, VDE, TUV
24V LED Lamp	Rack 상태표시(녹색 : 정상, 적색 : 주의 또는 중지)	

(마) BMS 규격

- LG화학의 배터리시스템은 비정상상태에서의 운전을 사전에 예방하기 위해 BMS에서 배터리시스템의 상태를 모니터링하여 사전에 warning 신호를 전달하거나, 출력을 제한하거나 BPU를 가동하여 배터리를 보호하고 있음.

<표 3-1-14> BMS 규격

Battery Management System	
Interface	
- AC 전원 Line · 랙 BMS 와 FAN에 전력 공급(랙 당 AC 전원 1개) - Communication Line · PCS-System Controllers : Modbus TCP/IP · System Controller-Bank BMSs : CAN 2.0A (Optical Transceiver) 1 Ch / Modbus TCP/IP · 랙 BMS - 모듈 BMS : CAN 2.0A	
Safety and Protection	
- 수동차단	랙은 수동으로 조작할 수 있는 Circuit Braker를 장착
- System 경고/결함	셀의 과전압/저전압, 셀의 최소/최대 전압, 셀 전압차, 고온/저온, 셀 온도차, 충/방전 전류, 충전상태, 통신단절 등의 상태를 감시
Control	
- 외부 제어용 통신	Modbus TCP/IP(Section Controller) 또는 CAN(Bank BMS)
- Set Point	충/방전 출력 제한(kW)
- F/W	랙 BMS를 통해 Section controller를 업데이트
Status Information	
- 작동상태 감시	충전상태, 충/방전 출력 제한, 랙 전류, 랙 전압, System 전류, 셀의 최대/최소/평균 전압, 모듈 최대/최소/평균 온도



<그림 3-1-76> BMS 통신 계층구조의 블록도

(바) 배터리 성능 평가

- 배터리는 UL1642의 Abuse 테스트를 통해 다양한 조건에서의 안전성을 Test 하였고, 결과는 모든 항목에서 Pass를 하였음.

<표 3-1-15> 셀테스트 항목

Test Item	Test Condition	Criteria	Result
Short Circuit	- SOC 100%, - Short Circuit Condition: ≤ 1ohm (@20℃, 55℃) - Test termination condition: Cell Voltage ≤ 0.1V or the battery case temperature's returned to ± 10℃ of the primary temperature	NF, NE	Pass
Abnormal Charging	- Each sample is to be subjected to a charging current of the three times the cell's nominal charging current(15A). - Minimum Charging time: 7 hours (Conditions of Actual Test: 45A / 4.25V // 8h)	NF, NE	Pass
Crush	- Compression forces of 3 kN	NF, NE	Pass
Impact	- 15.8mm diameter bar is to be placed across the center of the sample and 9.1kg weight is to be dropped from a height of 61cm onto the sample.	NF, NE	Pass
Shock	- Duration :3ms, Acceleration : 125~175g	NL, NV, NF, NE	Pass
Vibration	- Amplitude 0.8mm, Total Max Excursion(p-p) 1.6mm, Frequency : 10Hz → 55Hz → 10Hz (1Hz/min), sine test, 90min	NL, NV, NF, NE	Pass
Heating	- Each sample is to be heated at a rate of 5℃/min up to 130℃ and remain for 10 minutes.	NF, NE	Pass
Temperature Cycling	- Each sample is to be heated at a rate of 5℃/min up -70℃(4h) → 20℃(2h) → -40℃(4h) → 20℃, 10cycle. - Temperature cycling time: 30min to 130℃ and remain for 10 minutes.	NL, NV, NF, NE	Pass
Altitude	- Each sample is to be stored for 6 hours at an absolute pressure of 11.6 kPa.	NL, NV, NF, NE	Pass
Projectile	- Each sample is to be placed on a screen covering a 102mm diameter hole in the center of a platform table. - The Hexagonal screen, constructed of steel wire mesh having 20 openings per inch (25.4mm) and a wire diameter of 0.43mm, is mounted above a burner. - The sample is to be heated by the burner.	In explosion, the sample shall be secured to the screen	Pass

(3) 400kWh 배터리 시스템 제작 및 성능시험

(가) 400kWh 배터리 시스템 제작

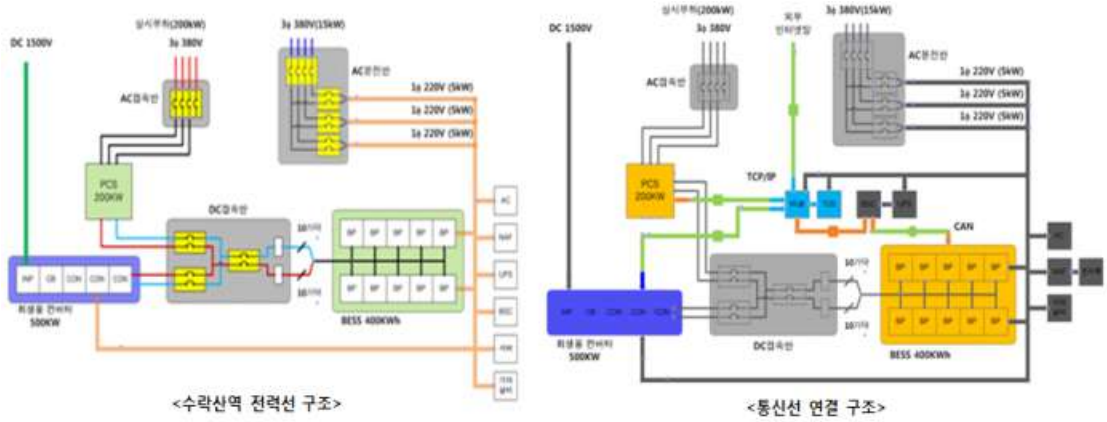
- 45kWh급 전력저장장치 10세트 제작 및 400kWh급을 설치함.



<그림 3-1-77> 400kWh 배터리 시스템 셋업

(나) PCS와 전력저장장치간 연동시험

- 전력선 연결 구조



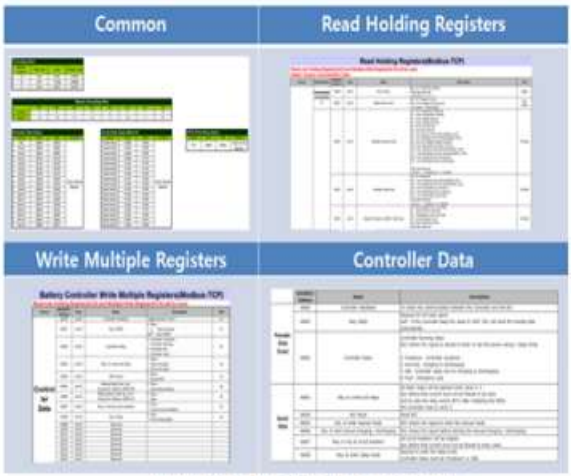
<그림 3-1-78> 전력선 연결 및 통신선 연결 구조

- PMS와 BSC간 통신 프로토콜 및 시퀀스

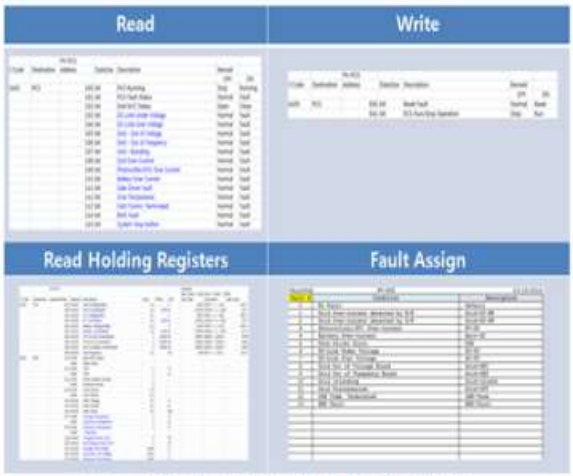


<그림 3-1-79> PMS와 BSC간에 통신 시퀀스

- PCS와 PMS, PMS와 BSC간 통신 프로토콜



<PMS와 BSC간 통신 프로토콜(TCP/IP)>



<PMS와 PCS간 통신 프로토콜(RS-485)>

<그림 3-1-80> 통신 프로토콜

- 수락산역 현장 설치하기 전에 배터리와 서버(TOS)와의 통신 연계를 위해 서버와 배터리간 자체 통신 시험을 진행하였으며 통신 연계 시험을 성공적으로 수행함.



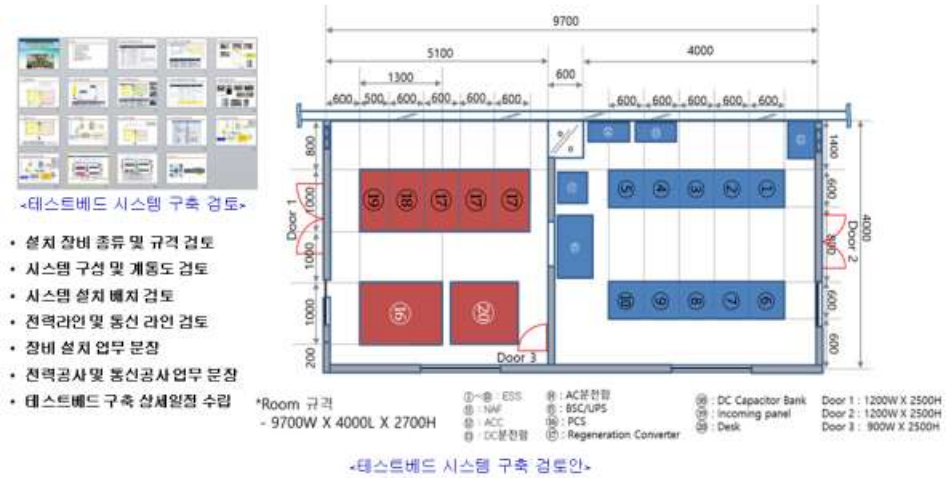
<그림 3-1-81> BMS ↔ BSC ↔ TOS 통신 연계 모습

바. **실증 테스트베드 구축 및 성능평가**

(1) 수락산역 현장 구축

(가) Layout

- 수락산역에 200kW PCS 및 400kWh 배터리 저장장치를 설치하여 테스트베드를 구축하였음.



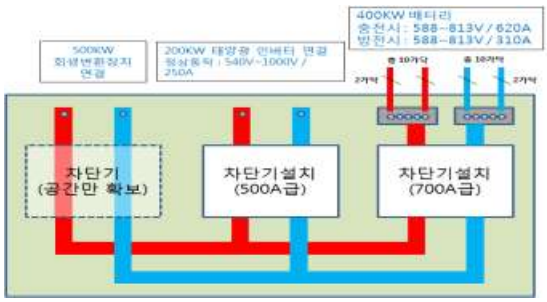
<그림 3-1-82> 수락산 역사 시스템 구축 설치도



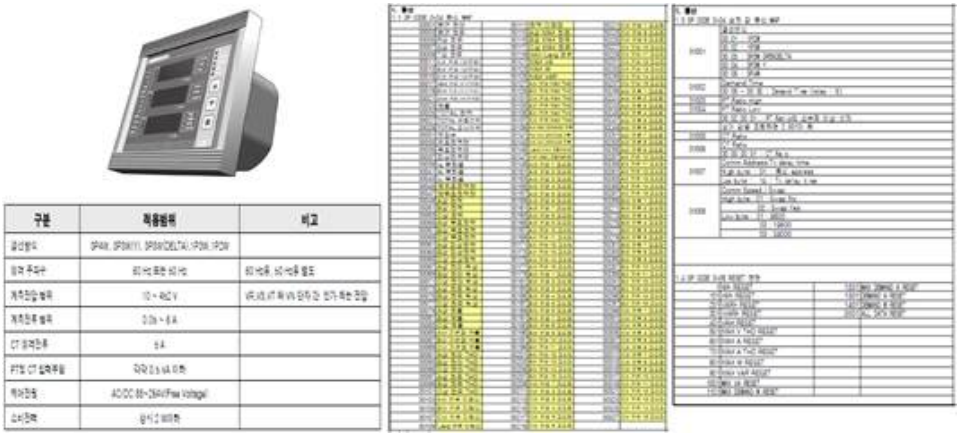
<그림 3-1-83> 수락산역 현장 설치 사진

(나) PCS 및 전력저장장치 현장설치

- 수락산역 현장 설치를 위하여 PCS와 배터리 랙을 연결하기 위한 DC 접속함이 필요하며, DC 접속반의 사양 및 구조는 다음과 같으며, PCS에서 계통으로 발생전력과 소모전력을 계측하기 위해 LS산전 GIMAC-i 디지털 적산전력량계 설치하였음.



<그림 3-1-84> DC 접속반의 사양 및 구조



<그림 3-1-85> LS산전 GIMAC-i 사양 및 모드버스 맵

(다) UPS 설치

- 수락산역사에 설치되는 200kW급 PCS 및 400kWh 배터리 저장장치, 회생컨버터가 연동되면 항시 동작상태가 유지되어야 하며 유지보수 및 PCS 및 배터리, 회생컨버터 상태에 대해 모니터링이 필요하다. 상시 전원의 정전 대비를 위해 UPS 사용을 검토하였고, APC사의 SURT6000XLI를 선정하였음.

<표 3-1-16> SURT6000XLI UPS 사양

항목	사양
출력전력 용량	4200W / 6000VA
최대 구성 전력	4200W / 6000VA
공칭출력전압	230V
출력전압 노트	220:230 또는 240 공칭출력 전압에 대한 구성 가능
출력전압 왜곡	3% 이하
출력주파수	50/60Hz +/-3Hz~+/-0.1
기타출력전압	220, 240
파고율	3:1
토폴로지	이중변환 온라인
파형유형	정현파
출력연결	IEC320 C13. IEC320 C19, IEC jumper
바이패스	내부 바이패스(자동 및 수동)



<그림 3-1-86> UPS 사진

(라) 200kW PCS의 절연 트랜스 설계 및 추가 설치

- 수락산역에 설치된 200kW PCS는 내부에 절연용 트랜스가 설치되어 있지 않았으나 실증 사이트인 수락산 역사에서는 3상4선식 부하가 다수로 존재하므로 이 부하를 감당하기 위해서 200kW용 트랜스를 설치하였음.

<표 3-1-17> 3상 4선식 트랜스 용량별 설계

No	Item		3P 60Hz 200kVA 380V/380V(Y/D)	3P 60Hz 250kVA 380V/340V(Y/D)
1	LOSS (W)	COIL LOSS (W)	3010	3209
2		CORE LOSS (W)	396	514
3		TOTAL LOSS (W)	3406	3723
4	PRI. 전류밀도 (A/㎟)		2.1	2.1
5	SEC. 전류밀도 (A/㎟)		2.1	2.0
6	자속밀도(GAUSS)		14482	14283
7	임피던스(%)		3.57(%)	3.02(%)
8	전압변동율(%)		1.56(%)	1.32(%)



<그림 3-1-87> 200kW PCS의 트랜스 추가 설치 사진

- 수락산역에 최종적으로 설치된 사진이며, 화재를 대비하기 위한 소화설비 시스템도 구축하였음.



<그림 3-1-88> 수락산 역사 시스템 구축 사진

(2) 시험 및 성능평가

(가) 수락산역 전기 안전 자체 시험

① PCS 및 배터리저장장치 절연 및 결선 체크 시험

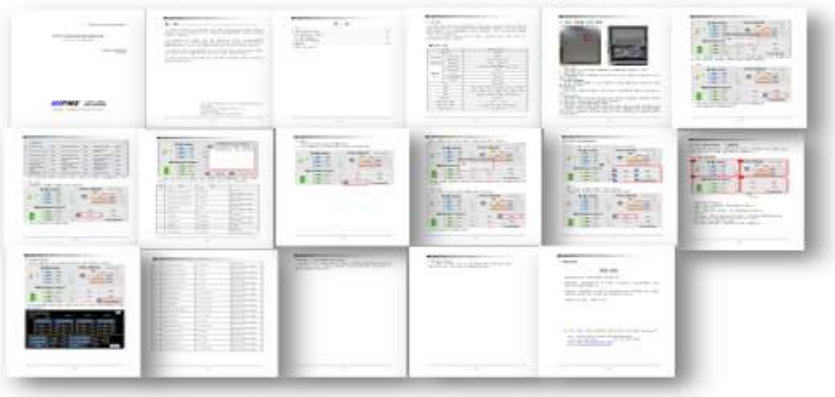
- 수락산역 현장 실증을 하기 위해서는 전기적인 안전성을 검사하기 위해 결선 체크 및 절연저항 등을 시험하여 자체시험에 대한 시험성적서를 작성함. 또한 200kW PCS에 대한 운영 메뉴얼을 작성함.



<그림 3-1-89> 200kW PCS 결선 체크 및 절연 사진



<그림 3-1-90> 200kW PCS 및 배터리 저장 장치 결선 체크 및 절연 자체 시험 성적서



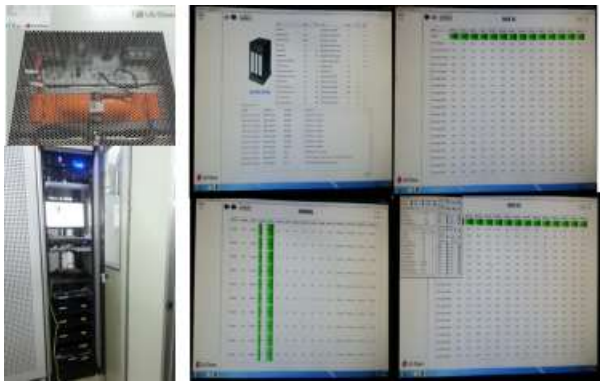
<그림 3-1-91> 200kW PCS 운영메뉴얼

② PCS, 배터리 저장장치 간에 서버 통신 시험

- PCS와 서버간에 통신 시험을 통해 PCS의 상태 및 Fault 등에 메시지가 서버로 전송되는지와 PCS 터치모니터 화면에 Fault에 대한 화면이 표출되는지 확인함. 배터리 저장장치 BSC와 서버간에 연동시험을 진행하였으며 배터리 상태가 BSC 모니터에 표출되는 것을 확인하였고 서버의 Relay on/off 제어가 되는지를 확인함.



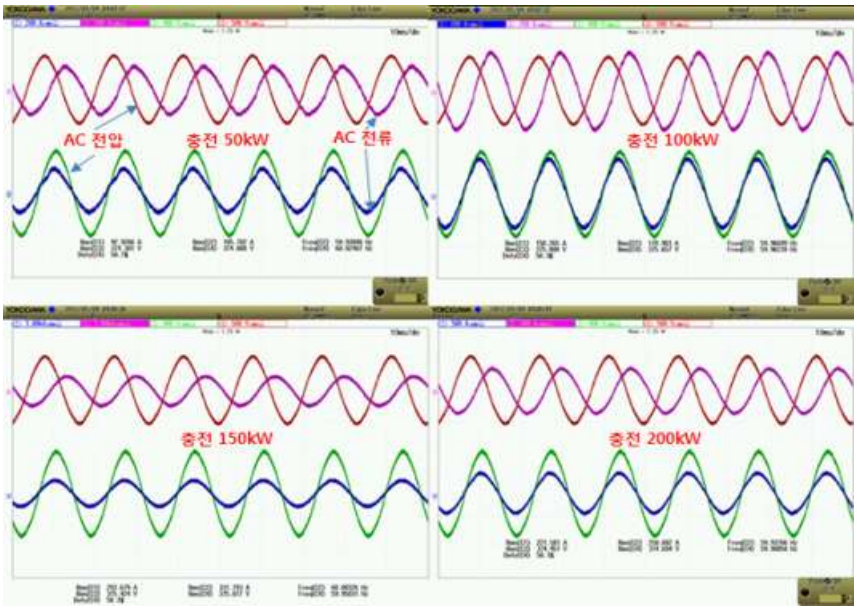
<그림 3-1-92> 200kW PCS와 서버간에 연동 시험



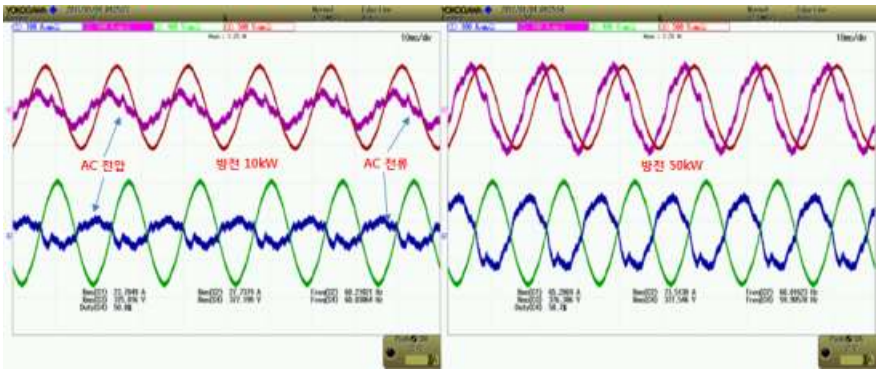
<그림 3-1-93> 배터리 저장장치 BSC와 서버간에 연동 시험

③ PCS 충전 및 방전 시험

- 설치된 PCS 충방전 시험을 진행하였으며, 충전 200kW 및 방전 150kW까지 수행하였으며 방전은 수락산역의 계통 조건이 150kW 이하의 로드이므로 방전에 대한 제어를 하였음.



<그림 3-1-94> 200kW PCS 충전 시험 파형



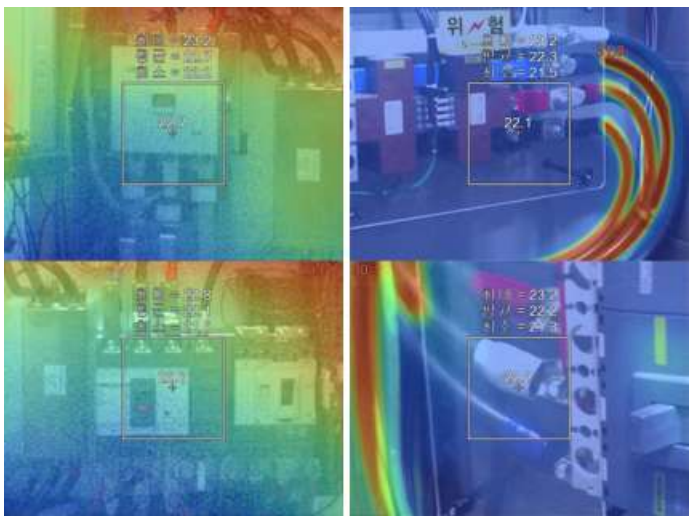
<그림 3-1-95> 200kW PCS 방전 시험 파형

- 또한 파워 메터로 PCS 충/방전에 대한 전력분석을 아래와 같이 진행하였으며 역률은 0.95 이상임을 확인하였음.



<그림 3-1-96> 200kW PCS 충/방전시 Power 및 역률 측정 Data

- 200kW PCS의 충/방전 시험시 PCS 및 분전반에 대해 온도 시험을 수행하였으며, 가장 높은 온도는 분전반의 PCS 출력 배선의 온도가 31.8℃로 측정되었으며, 이 결과로 설치된 PCS 및 배선, 분전반에 대한 검증함.



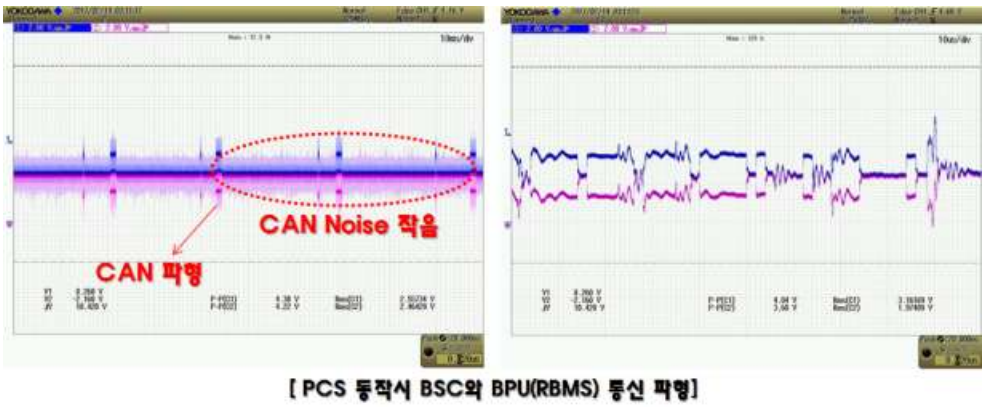
<그림 3-1-97> PCS 충/방전 시험시 PCS 및 분전반 온도 시험

- PCS와 배터리장치와 연동 시험시의 BSC와 배터리 랙에 있는 BPU와 CAN 통신 신뢰성에 대한 시험을 수행하였으며, CAN 통신 로직에 대해서 나타내었으며 CAN 통신은 기본적으로 2.5V DC Level에서 Low/High 인식 방법이 다른 통신과 다르며 Noise에 강한 통신임. 다음은 PCS가 동작하지 않았을 때 CAN 파형으로 정확하게 송수신되는 파형을 확인함.



<그림 3-1-98> BSC와 BPU CAN 통신 파형(PCS 미동작)

- 다음은 PCS가 동작했을 때 CAN 파형으로 Noise가 발생하지만 우측 파형의 경우 Low/High 인식에 대해서 정확하게 동작하는 모습을 볼 수 있음.



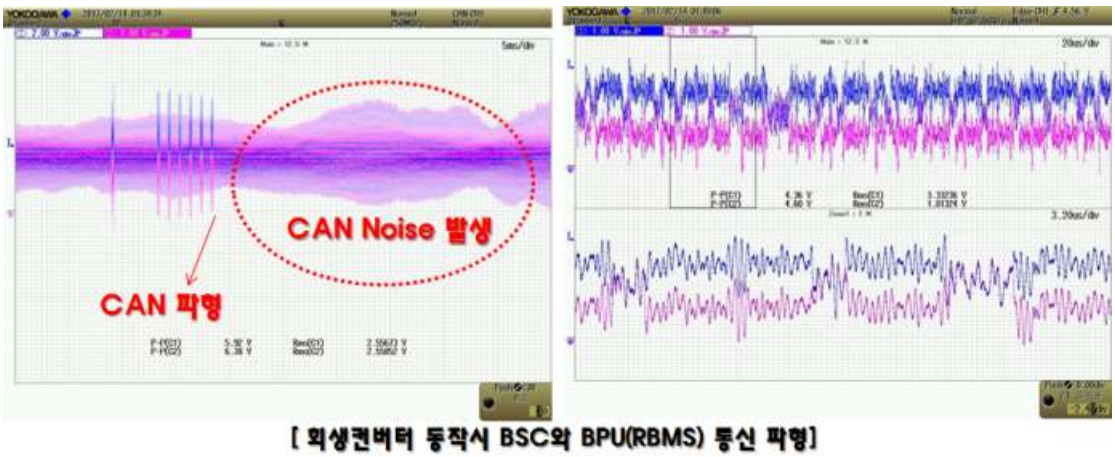
<그림 3-1-99> PCS 동작시 BSC와 BPU간에 통신파형

(나) 회생컨버터 연동 시험

- 400kWh 배터리 저장장치와 회생컨버터간에 연동시험을 진행하였으나 회생컨버터가 동작시 배터리 저장장치의 BSC와 BPU간에 CAN 통신이 끊어지는 현상이 일부 발생하여 이를 개선하기 위해 기존에 설치되어 있는 회생컨버터의 출력단에 Noise Filter를 장착하였음. 우측 파형을 분석하였을 경우 CAN Low/High 인식은 될 수 있으나 Noise 및 동기가 맞지 않을 경우 CAN 통신 불능으로 Fault를 발생할 수 있음. 따라서 회생컨버터의 방사 Noise를 최소화하기 위해서 BSC 위치를 변경하였고 CAN 통신라인에 대해서 추가적으로 실드케이블을 적용하여 이러한 문제를 개선함.



<그림 3-1-100> 회생컨버터 및 배터리 저장장치와 연동
시험시 발생한 BSC Fault

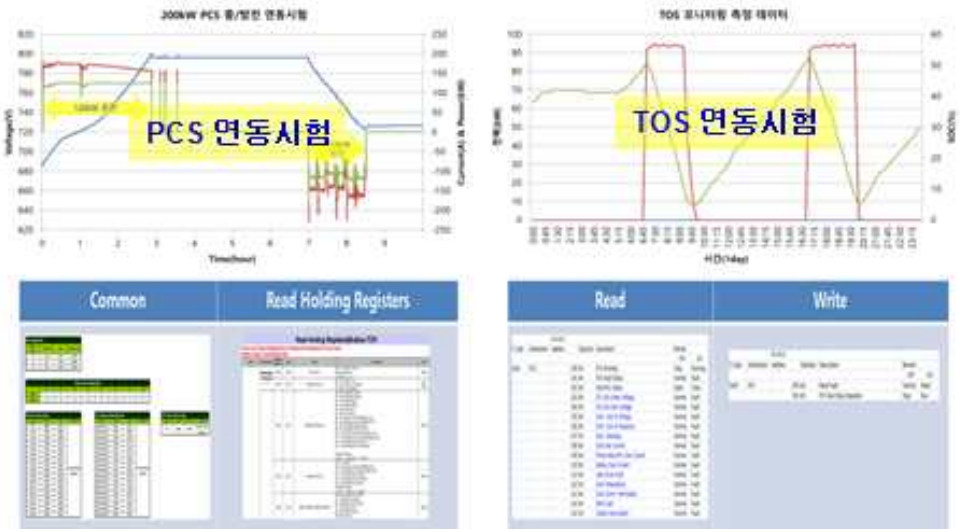


<그림 3-1-101> 회생컨버터 및 배터리 저장장치와 연동 시험시 CAN 파형

- PCS 및 ESS와 회생컨버터 연계시 가장 큰 고려사항은 회생컨버터로부터 발생한 회생에너지가 전력저장장치로 저장되는 과정에서 DC 전압의 리플이 안정화되지 못하고 전력저장장치로 유입되는 경우가 발생함. 이러한 노이즈 인해 각 설비간의 통신 불능 및 장애가 발생할 수 있어 그에 대한 방지 대책이 추가로 필요함.

(3) 200kW급 PCS 및 400kWh급 전력저장장치 역사실증운영 및 성능 평가

- 200kW급 PCS와 400kWh급 전력저장장치의 역사실증운영 및 평가를 위해 수락산 역사 통신 구성을 검토하였고, 실증 테스트베드를 통해 성능 평가를 수행함. PCS 연동시험과 TOS 연동시험을 통해 통신 성공률을 확인하였고, PMS 및 EMS로 시스템을 제어하고 PCS 출력과 전력저장장치의 에너지 저장을 확인함.
- 200kW급 PCS 출력 성능을 확인하기 위하여 TOS 실측 자료를 통해 출력 성능을 확인함.



<그림 3-1-102> 실증 베드 연동 시험



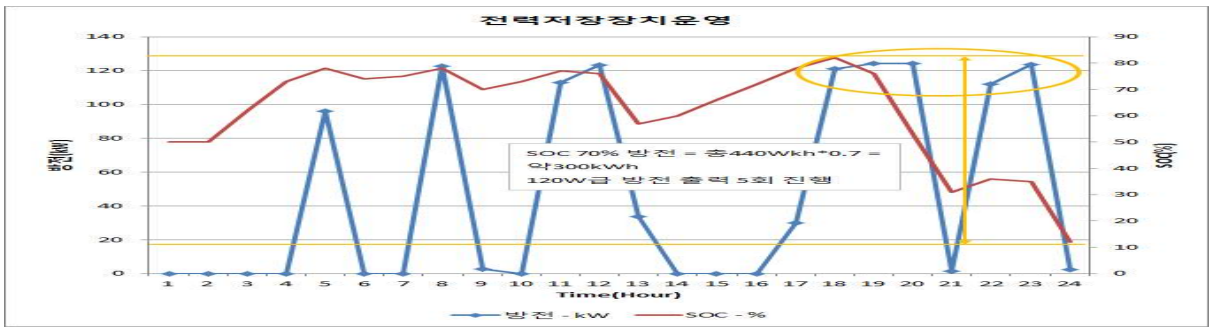
<그림 3-1-103> 실증 베드 PMS & EMS 운영



<그림 3-1-104> 전자파 및 성능 시험 성적서



<그림 3-1-105> 전력저장장치 운영화면



<그림 3-1-106> 전력저장장치 피크전력제어 그래프

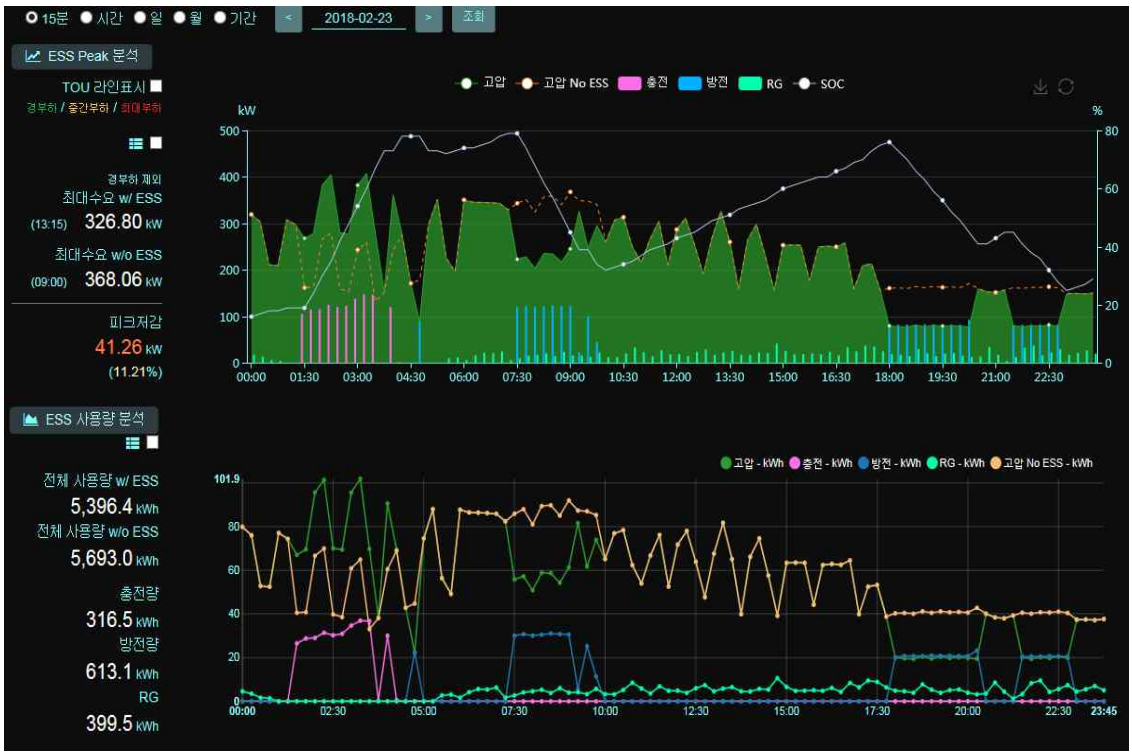
(4) 200kW급 PCS의 전력변환장치 운전 조건

- 출력전압이 공칭전압의 110%를 초과하거나 88%미만일 시 이상을 감지하여 운전 정지하며, 출력전압의 주파수가 표준주파수 +0.2Hz를 초과하거나 표준주파수 -0.2Hz 미만일 시 이상을 감지하고 운전 정지함.
- 문제 발생 시 동작중지가 되며, 문제가 해결되기 전까지는 재투입이 될 수 없는 구조이며, 배전계통의 정전, 점검 또는 사고 등에 의하여 전력공급이 차단된 경우, 전력생산 또는 전력변환 동작을 방지하기 위한 단독운전 방지 보호기능을 가지고 있음. 돌입전류 방지를 위해 배터리의 전원이 PCS에 인가되었을 경우 전류는 정격전류 이하임.
- 출력전류가 정격전원의 90%를 초과할 경우 0.5초 이내로 고장을 감지하여 운전정지 하며, 계통이 정전에서 복전이후에 바로 전원을 공급하지 않고 5분 이후에 전원을 공급함.
- 출력측에 단락전류를 감지하고 운전을 정지하여 시스템에 영향을 주지 않도록 하며, 부하차단을 검출하여 PCS가 운전 정지함, PCS가 정격으로 정상운전 시 누설전류는 5mA이하이며, 계통전압이 정전되거나 강압될 경우 운전정지하며 순간 정전 시에도 이를 감지하여 바로 운전하지 않고 5분 후 운전함.

- KS 표준안인 KS C CISPR 11, KS C CISPR 22m KS C IEC 61000-4의 규격에 따라 PCS에서 발생된 노이즈는 주변기기에 영향을 주지 않으며, 장치의 외부 노이즈에 대하여도 내성을 갖는 구조로 제작함. 제어전원 문제 발생시 배터리 전원을 사용하여 이중화 장치를 통해 PCS의 제어보드에 연속적인 전원을 공급 함.
- PCS는 배터리를 연결하여 정상적인 동작을 하며, 충방전시에 배터리 특성에 적합한 정전압 및 정전류 제어모드 등의 지원함.
- PCS는 계통고장을 감시하고 시스템 고장 검출 기능을 수행하며, 계통보호는 시스템이 계통연계 운전 경우에만 유효하며 PCS는 설비 보호를 위하여 PCS의 인버터 Stack 방열판이 과열 되었을 경우 보호 동작을 수행하는 인버터 Stack 과열 보호와 전력소자 내부 사고에 의한 단락전류, 비정상적인 제어동작에 의해 발생된 과전류, 외부사고에 의한 단락 전류로부터 PCS 자체 보호를 위해 적절한 차단기 기능을 구비함.

(5) 전력저장장치 충·방전 및 피크전력량 절감 결과

- 전력피크 5%를 절감 목표 달성을 위해 시간당 최대 150kWh로 선정에 따른 확인하였으며, TOS 연동을 통한 전력피크 감소를 확인함.
- 다음 그림은 수락산역(2018년 2월 23일 운영 데이터) 기준 전력소비량과 전력저장장치 충·방전 동작 현황을 나타낸 것으로, 피크전력을 관리하는 경부하시간을 제외하고 최대수요가 366.06kW에서 326.80kW로 최대 11.21%(41.26kW)이 절감됨을 확인할 수 있으며, 일일 전력사용량의 경우 399.5kWh 전력사용량이 절감됨.



<그림 3-1-107> 수락산역 피크전력 절감량 및 전력저장장치 충·방전 그래프

3. 회생에너지 전력변환시스템

가. 시스템 개요

- 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템은 전동차 제동 시 발생하는 회생에너지를 회생컨버터를 통해 배터리에 저장하는 기술임. 기존의 기술과는 달리 대용량 에너지 저장매체인 리튬배터리로 구성된 ESS를 활용함으로써 저장된 에너지는 필요에 따라 다양한 방식으로 활용이 가능하므로 효율적인 시스템임.
- 회생에너지 전력변환시스템인 회생컨버터의 경우 대전력 고전압 용량의 시스템을 모듈화로 구성하여 시스템 구축 용량 및 전압에 유동적으로 시스템 구성가능 하게 구성할 수 있으며, 저압 저용량 범용 소자 적용을 통해 시스템 효율 상승, 사이즈 축소를 가능하게 개발하였음.



<그림 3-1-108> 시스템 개요

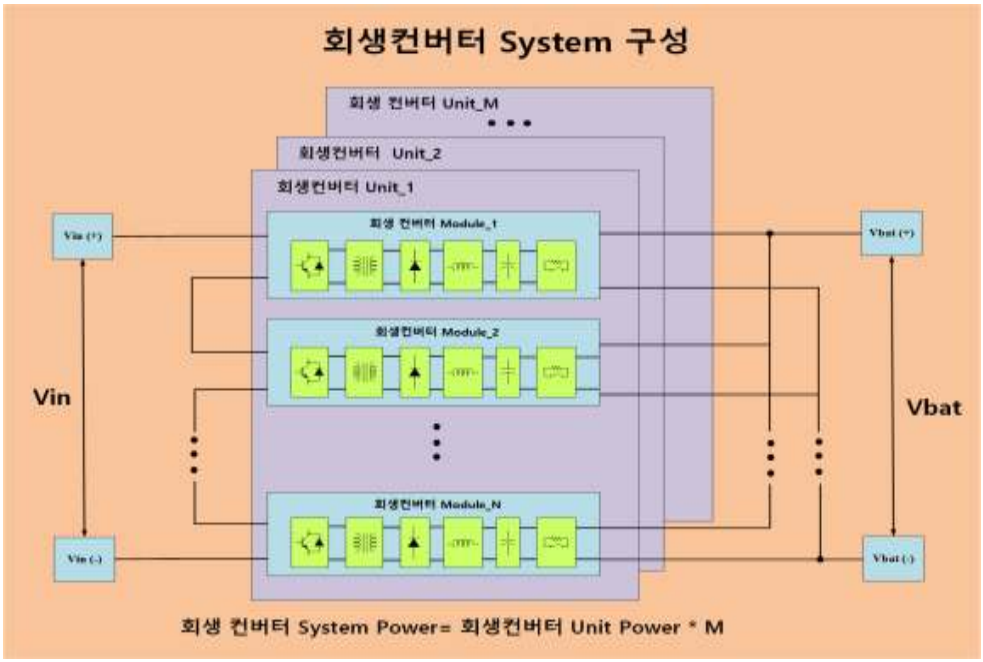
나. 회생에너지 시스템 적용기술

(1) 회생에너지 활용기술

- 기존의 회생에너지 활용기술은 철도차량에서 발생하는 회생에너지를 변전소에 회생에너지저장장치 및 회생 인버터를 설치하여 다시 도시철도 역사로 에너지를 송전하는 방식인대 반해 철도차량 내부와 도시철도 역사에 에너지 저장장치를 만들어 에너지 수요량이 적은 시간에 에너지저장장치에 저장하여 수요량이 많은 피크 시간에 에너지를 효율적인 분배 할 수 있음.
- 도시철도 역사에 에너지 저장장치를 만들어 회생에너지의 활용을 높여 한전으로부터 공급받는 최대 전력을 최소화 할 수 있으며, 배전 시 소모되는 전력량을 최소화하여 전기사용요금을 절감하며, 에너지 저장장치의 결합으로 정전사고 등에 대비 할 수 있는 예비 전력을 확보 할 수 있음.

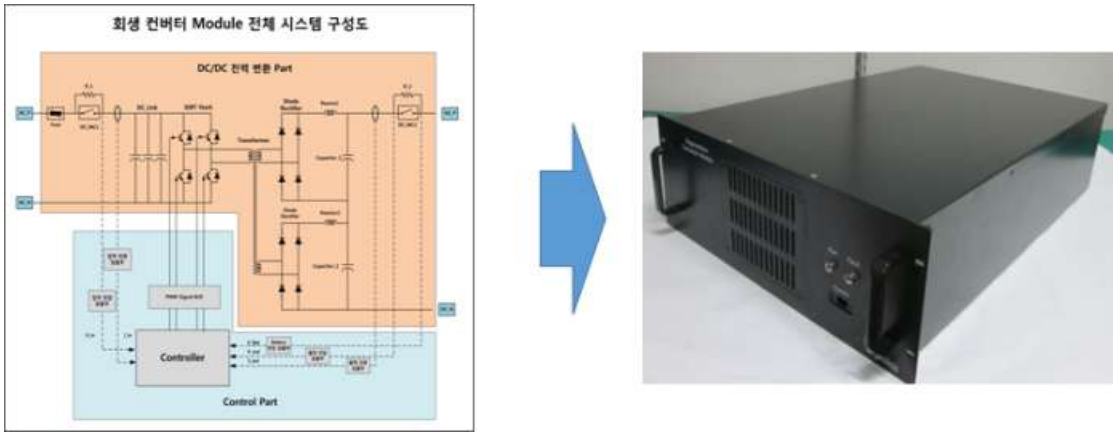
(2) 고전압 전력변환을 위한 전압분배 모듈화 설계 기술

- 일반적으로 도시철도의 가선전압은 약 1,500Vdc에서 최대 약 2,000Vdc 정도이므로 전동차의 제동 시 발생하는 회생에너지를 배터리에 저장하기 위해서는 최대 약 2,000Vdc의 고전압에 견딜 수 있도록 회생컨버터 회로를 설계해야 함.
- 회생에너지 전력변환장치(회생 컨버터)는 가선으로부터 고전압의 직류전력을 공급 받아 이를 배터리에 저장하기 위한 전압으로 변환(DC/DC 전력변환)하게 됨. DC/DC 전력변환기에 적용되는 스위칭 소자는 최대 약 2,000Vdc 정도의 전압에서 견딜 수 있어야 하므로 실제 적용될 소자는 이러한 정격 내압의 최소 1.5 배인 3,000Vdc 이상에서 견딜 수 있는 소자를 선정해야 하나 현실적으로는 전력변환장치의 스위칭 소자로 사용되는 적력반도체의 경우 정격 내압이 높을수록 부품수급이 어려울 뿐 아니라 가격 또한 매우 고가임. 또한, 전력변환 회로의 설계에 있어서도 전압이 높을수록 고전압에 따른 절연구조를 고려해야 하므로 설계가 매우 까다로운 문제점이 있음.



<그림 3-1-109> 회생컨버터 System

- 이러한 문제점을 해결하기 위하여 회생컨버터를 설계함에 있어 입력전압이 최대 $400V_{dc}$인 모듈형태로 설계하여 그림과 같이 회생컨버터 모듈을 5직렬 구성하여 가선으로부터 입력되는 약 $2,000V_{dc}$의 전압이 각각의 모듈에 의해 균일하게 분배되도록 설계하며, 회생컨버터의 출력은 배터리의 충전전압과 동일한 전압으로 5병렬로 구성되도록 설계하였음.



<그림 3-1-110> 회생컨버터 모듈(DC/DC 컨버터 모듈)

- 회생컨버터를 모듈형태로 설계하여 이를 직병렬 형태로 구성하도록 설계되었으므로 이러한 구성방식을 통해 가선 전압의 크기와 회생에너지의 용량에 따라 직렬로 구성되는 모듈의 개수를 조절함으로써 설계의 유연성을 확보함.

- 회생에너지 시스템 모듈화 장점

<표 3-1-18> 회생에너지 시스템 모듈화 장점

저압 범용 소자	3300[V]급 대용량 소자 → 600[V]급 소용량 소자 적용 가능
고주파 스위칭	저전압 저전력 소자 적용 → 스위칭 주파수 상승 (소음 감소 및 효율 증가)
절연 Topology 적용	고주파 스위칭 Topology 적용 → Isolation 전력 변환 (가선과 에너지저장 매체간의 절연을 통한 전기적 안정성 확보)
용량 확장성 확보	모듈화 제품의 직렬 & 병렬 구성 방식 적용 (현장 적용성 및 용량 확장성 확보)
주요 부품의 국산화	범용 소자 적용 및 주요 전장품 국산화률 → 80[%]
설치 및 A/S 편의성 증대	인력 이용한 시스템 운반 및 설치 가능 → 현장 이동 편의성 증가 직병렬 시스템 단순 조립 → 현장 설치 시간 단축 설치 사이트 공간적 한계 → 시스템 용량 변경 구축 가능 설치 사이트 용량 전압 변동 → 시스템 직, 병렬 구성 방식 변경 시스템 고장 A/S 발생 → 해당 모듈 단순 교체- AS 편의성 증가

(3) 시스템의 소형화 및 제조원가 절감기술

- 일반적으로 반도체 소자의 스위칭 손실은 해당 소자의 정격내압이 클수록 증가하게 되므로 정격내압이 높으면 스위칭 주파수를 높이는데도 한계가 있음. 스위칭 주파수가 낮아질수록 변압기 및 LC 필터 회로 등 전력변환회로를 구성하는 수동소자의 크기 및 가격은 상대적으로 증가하며, 주파수가 낮아질수록 가청 주파수대에 운전을 함으로 스위칭 소음이 발생하게 됨.

- 전동차의 제동 시 발생하는 회생에너지의 용량은 전동차의 정차빈도에 따라 크게 달라지므로 시스템이 구축되는 장소에 따라 필요한 회생에너지시스템의 설계용량도 그에 맞게 달라져야 하나 기존의 기술과 같이 시스템을 구성함에 있어 모듈화 되지 않은 단일시스템으로 구성될 경우 용량이 고정되므로 설치될 장소에 따른 용량변화에 능동적인 대응이 어려움이 있음. 또한, 단일 시스템으로 구성할 경우 시스템에 장애가 발생할 경우 시스템 전체의 작동이 멈추게 될 뿐 아니라 장애복구를 위한 유지보수에도 많은 시간과 인력이 소요됨.
- 이러한 문제점들을 해결하기 위해 적용된 회생에너지시스템은 회생컨버터 유닛을 구성하는 최소 단위인 회생컨버터 모듈과 회생컨버터 모듈을 직렬로 구성한 회생에너지 전력 변환장치의 최소 운전 단위인 회생컨버터 유닛 그리고, 회생에너지의 용량에 맞게 회생컨버터 유닛을 용량에 맞게 병렬로 구성한 회생컨버터 시스템으로 구성함.
- 회생컨버터 모듈은 고압의 가선전압이 낮은 전압으로 분배되어 입력되므로 일반적으로 널리 사용되는 낮은 정격내압을 갖는 스위칭소자의 사용이 가능하여, 부품수급이 원활하고 가격 또한 저렴한 이점이 있을 뿐만 아니라, 낮은 정격내압의 스위칭 소자를 사용함으로 인해 고속 스위칭(예를 들어, 약 20 ~ 50 [㎑])이 가능해지게 되면, 고주파 스위칭을 통해 변압기와 LC 필터를 구성하는 수동부품의 사이즈와 가격을 줄일 수 있음. 또한, 저압 스위칭 소자(약 20 ~ 50kHz)는 고압 스위칭 소자(약 500 ~ 2,000kHz)에 비해 스위칭 손실이 줄어들고, 이를 통해 스위칭 주파수를 상승시킬 수 있으므로, 가청 주파수대 운전범위를 벗어나게 되어 스위칭에 따른 소음발생 또한 방지할 수 있음.

(4) 시스템 구축용량의 유연성 확보를 위한 모듈화 설계기술

- Hybrid 회생에너지시스템의 전체적인 구성 개념도를 통해 회생에너지시스템은 $600V_{dc}$급의 낮은 내압을 갖는 전력반도체로 구성된 회생컨버터 모듈과, 가선으로부터 입력되는 고전압을 서로 분배하기 위한 회생컨버터의 직렬구성으로 이루어진 회생컨버터 유닛, 그리고 시스템이 구축될 장소에 따라 회생컨버터 유닛의 병렬 구성으로 이루어진 회생컨버터시스템으로 구성됨.
- 회생컨버터 모듈은 기본적으로 낮은 내전압의 전력반도체 사용을 통한 가격저감 및 높은 스위칭 주파수를 통한 소형화를 실현하였으며, 전력변환 회로를 구성함에 있어 고주파 Isolation Transformer 기술적용을 통해 전동차 가선과 에너지 저장매체인 배터리 사이에 전기적 절연을 통해 시스템의 안전성을 확보함.
- 또한 다수의 회생컨버터 모듈을 직·병렬 구성하여 시스템을 구성함으로써 일부의 회생컨버터 모듈에 장애가 발생하여도 해당모듈의 단순교체만으로 조치가 가능하므로 신속한 장애복구가 가능함. 특히, 운전 중 특정 회생 컨버터 모듈에 고장이 발생한 경우, 해당 회생 컨버터 모듈을 포함하는 회생 컨버터 유닛을 제외한 나머지 회생컨버터 유닛을 통해 지속적인 회생 에너지를 생산할 수 있음.
- 마지막으로 복수 개의 회생 컨버터 모듈을 직·병렬 구성하여 전력변환장치를 구성하므로, 입력되는 회생 에너지의 용량의 변화에도 유동적으로 회생 컨버터 모듈의 개수 및 구성을 조절하여 필요 용량에 따라 회생 에너지 전력변환장치의 구성을 최적화 할 수 있음.

(5) 고전압, 대전력 전력변환 및 완충기술

- 일반적으로 전동차 정차 시 발생하는 회생에너지는 짧은 시간동안(10 여초 내외) 매우 큰 전력(최대 약 500kW)이 발생한다. 기존의 기술들은 이와 같이 짧은 시간동안 발생하는 고전압, 대전력의 회생에너지를 단순한 전력변환장치를 통해 에너지를 단순 저장하는 방식으로 설계되어 있음. 이러한 방식으로 설계할 경우 전력변환장치는 최대로 발생하는 회생에너지와 동일한 용량(500kW급)으로 설계되어 있으며, 에너지 저장매체도 가격이 매우 고가인 Super Capacitor를 사용하고 있음.
- 기존기술의 문제점을 개선하기 위해서 짧은 시간동안 발생하는 대용량의 전력을 저전력으로 완충시켜 저장하는 방식으로 설계되어 있음. 이를 위해 회생컨버터 회로를 모듈화하여 직렬로 구성함으로써 고전압이 각각의 모듈에 분배되도록 설계했으며, 대용량의 전력 또한 각각의 모듈화 된 회생컨버터의 출력을 병렬로 구성함으로써 낮은 전력으로 충전되도록 설계함. 이러한 기술을 구현함에 있어 각각의 모듈에 분배되는 전압과 전류의 Balance를 유지하기 위한 고도의 Balancing 제어기술이 적용되었으며, 기존 기술이 적용하고 있는 고가의 Super Capacitor를 대신하여 저가의 Film Capacitor를 적용한 Capacitor Bank를 구성하여 적용했으며, 대전력을 저장하기 위한 리튬배터리로 구성된 대용량의 배터리가 적용됨.

다. **회생전력 에너지 회수량 및 용량선정**

<표 3-1-19> 회생전력량 및 배터리 용량 선정

항 목	절감 목표량		비 고
	300[kWh]	1000[kWh]	
회생 전력량	500[kW]	500[kW]	회생 제동 시 에너지 발생량
회생 전력 발생 시간	10초간	10초간	전동차 제동 시간
발생 빈도	5분 간격	1분 30초 간격	전동차 제동 주기
1회 회생 전력량	약 1.4[kWh]	약 1.4[kWh]	500[kW] X 10[sec] X 1/3600
1시간 회생 전력량	16.7[kWh]	55.5[kWh]	1회 회생 전력량 X 시간당 발생 빈도
1일 회생 전력량	300[kWh]	1,000[kWh]	18시간 운전 기준
컨버터 용량	500[kW]	500[kW]	회생 에너지 발생량
Battery 용량	500[kWh]	500[kWh]	1일 2시간 Peak 전력 방전량

- 회생전력 에너지 회수량 및 용량 선정 - Ideal한 상황 가정 Data
  - Battery 전력 저장 응답 속도 미반영
    (이온 반응 속도에 따른 회생 에너지 발전에 따른 전력 손실량 미반영)
  - 전동차의 정차 횟수 = 1분 30초 추기로 시간당 40회, 일일 720회 발생 가정
  - 전동차 전동 시 발생하는 회생전력량이 10초 동안 500[kW]의 에너지 발생 가정

라. **회생컨버터 단위모듈 제작 및 성능평가**

(1) H/W 사양 설계

(가) 회생컨버터 시스템 설계 사양

<표 3-1-20> 회생컨버터 시스템 설계 사양

항 목	절감 목표량	비 고
정격 용량	500[kW]	회생제동 순간 최대 전력
정격 입력 전압	DC 1800[V]	가선 최대 전압
입력 전압 범위	DC 1500 ~ 1800[V]	회생 제동 시 가선전압 변동 범위
정격 입력 전류	310[A]	회생 제동 시 가선 전류
최대 출력 전력	450[kW] 이상	최소 효율 90[%] 이상
정격 출력 전압	815[V]	Battery Bank 최대 충전 전압
출력 전압 운전 범위	588 ~ 815[V]	Battery 충전 범위
정격 출력 전류	850[A]	시스템 최대 출력 전류

(나) 회생컨버터 단위 모듈 사양

<표 3-1-21> 단위 모듈 H/W 사양

항 목		사 양	비 고
회로 방식		Phase Shift Full Bridge DC/DC Converter	Isolation Transformer를 이용한 입, 출력 절연 방식
전력 제어 방식		입력 전류, 출력 전압 제어	
스위칭 주파수		40[kHz]	
운전시간		최대 20초 운전	회생제동 시 전력 발생 최대 시간
입력	정격용량	22[kW]	
	정격전압	360[Vdc]	회생제동 시 가선전압 : 1800Vdc
	전압범위	300 ~ 400[Vdc]	가선 전압범위 : 1500 ~ 2000Vdc
	전류범위	50 ~ 70[Adc]	
	최대전류	80[Adc]@10초 이내	평균 회생제동 시간 : 10초 내외
출력	정격용량	20[kW]	시간당 회생 평균전력 : 약 55.6[kW]
	정격전압	700[Vdc]	저장장치 Battery 전압
	전압범위	600 ~ 800[Vdc]	
	정격전류	25 ~ 35[Adc]	
	최대전류	40[Adc]@10초 이내	10 sec 이내

(다) 회생컨버터 모듈 하드웨어 설계

- 회생 컨버터 단위 모듈 하드웨어 설계

20[kW] 회생 컨버터 모듈 Ver.03 설계

Parameter	최소 입력 전압	최대 입력 전압	
전체 용량 [kW]	500.0	500.0	Ptotal
입력 전압 [Vdc]	1500.0	2000.0	Vin
입력 전류 [Adc]	333.3	250.0	Iin
DC_Link 직렬 구성[개]	5.0	5.0	
판넬별 입력 용량 [kW]	100.0	100.0	
판넬별 입력 전압 [Vdc]	300.0	400.0	
판넬별 입력 전류 [Adc]	333.3	250.0	
F.B Converter DC_Link 전압 [Vdc]	300.0	400.0	Vdc
F.B Converter DC_Link 전류 [Adc]	333.3	250.0	Idc
직렬 Capacitor당 모듈 병렬 수 [개]	5.0	5.0	
F.B Converter 모듈 용량 [kW]	20.0	20.0	P
F.B Converter 입력전압 [Vdc]	300.0	400.0	V_cov-in
F.B Converter 입력전류 [Adc]	66.7	50.0	I_cov-in
최대 Duty F.B Converter 출력전압 [Vrms]	235.7	235.7	Vs
최대 Duty F.B Converter 출력전류 [Arms]	84.8	84.8	Is
최대 Duty F.B Converter 출력전압 [Vpeak]	300.0	400.0	Vp
최대 Duty F.B Converter 출력전류 [Apeak]	95.7	110.5	Ip
최소 Duty F.B Converter 출력전압 [Vrms]	168.0	168.0	Vs
최소 Duty F.B Converter 출력전류 [Arms]	119.0	119.0	Is
최소 Duty F.B Converter 출력전압 [Vpeak]	300.0	400.0	Vp
최소 Duty F.B Converter 출력전류 [Apeak]	159.1	183.7	Ip
최대 Duty F.B Converter [%]	78.6	58.9	D
최소 Duty F.B Converter [%]	56.0	42.0	D
최대 Duty Tr 1차측 전압 [Vrms]	235.7	235.7	Vtr-1
최대 Duty Tr 1차측 전류 [Arms]	84.8	84.8	Itr-1
최대 Duty Tr 1차측 전압 [Vpeak]	300.0	400.0	Vtrp-1
최대 Duty Tr 1차측 전류 [Apeak]	95.7	110.5	Itrp-1
최소 Duty Tr 1차측 전압 [Vrms]	168.0	168.0	Vtr-1
최소 Duty Tr 1차측 전류 [Arms]	119.0	119.0	Itr-1
최소 Duty Tr 1차측 전압 [Vpeak]	300.0	400.0	Vtrp-1
최소 Duty Tr 1차측 전류 [Apeak]	159.1	183.7	Itrp-1
Turn Ratio	3.5	3.5	Turn
최대 Duty Tr 2차측 전압 [Vrms]	825.0	825.0	Vtr-2
최대 Duty Tr 2차측 전류 [Arms]	24.2	24.2	Itr-2
최대 Duty Tr 2차측 전압 [Vpeak]	1050.0	1400.0	Vtrp-2
최대 Duty Tr 2차측 전류 [Apeak]	27.3	31.6	Itrp-2
최소 Duty Tr 2차측 전압 [Vrms]	588.0	588.0	Vtr-2
최소 Duty Tr 2차측 전류 [Arms]	34.0	34.0	Itr-2
최소 Duty Tr 2차측 전압 [Vpeak]	1050.0	1400.0	Vtrp-2
최소 Duty Tr 2차측 전류 [Apeak]	45.5	52.5	Itrp-2
최소 Duty Ratio 다이오드 전압 [Vrms]	825.0	825.0	Vd
최소 Duty Ratio 다이오드 전류 [Arms]	24.2	24.2	Id
최소 Duty Ratio 다이오드 전압 [Vp-p]	1050.0	1400.0	Vd-p
최소 Duty Ratio 다이오드 전류 [Ap-p]	27.3	31.6	Id-p
최대 Duty Ratio 다이오드 전압 [Vrms]	588.0	588.0	Vd
최대 Duty Ratio 다이오드 전류 [Arms]	34.0	34.0	Id
최대 Duty Ratio 다이오드 전압 [Vp-p]	1050.0	1400.0	Vd-p
최대 Duty Ratio 다이오드 전류 [Ap-p]	45.5	52.5	Id-p
최대 Duty F.B Converter 출력 전압 [Vdc]	930.7	1074.7	V_con-out
최대 Duty F.B Converter 출력 전류 [Adc]	21.5	18.6	I_con-out
최소 Duty F.B Converter 출력 전압 [Vdc]	785.7	907.3	V_con-out
최소 Duty F.B Converter 출력 전류 [Adc]	25.5	22.0	I_con-out
Battery Bank 최소 전압	588.0	588.0	V_Bat
Battery Bank 최대 전압	825.0	825.0	I_Bat

- 회생 컨버터 단위 모듈 주요 부품 사양 설계

a. DCMC 선정 사유

DCMC			
선정 기준	용량 [kW]	20.0	20.0
	입력 전압 [Vdc]	300.0	400.0
	입력 전류 [Adc]	66.7	50.0
소자 사양	EVR-100		
	소자 정격 전압[V]	450	
	소자 정격 전류[A]	120	

b. Input Current 선정 사유

Input Current Senser			
선정 기준	용량 [kW]	20.0	20.0
	입력 전압 [Vdc]	300.0	400.0
	입력 전류 [Adc]	66.7	50.0
소자 사양	NA-100P		
	소자 정격 전류	100[A]	

c. DC_Link Capacitor 선정 사유

DC_Link			
선정 기준	용량 [kW]	20.0	20.0
	입력 전압 [Vdc]	300.0	400.0
	입력 전류 [Adc]	66.7	50.0
소자 사양	필름 커패시터 E50.N15-115NT0 or W22.E09-1207D5		
	소자 정격 전압[V]	600	
	소자 정격 전류[A]	60 or 80	
	소자 Capacitance[uF]	1080 or 1200	

d. DC_Input Fuse 선정 사유

Fuse			
선정 기준	판넬별 용량 [kW]	20.0	20.0
	입력 전압 [Vdc]	300.0	400.0
	입력 전류 [Adc]	66.7	50.0
소자 사양	FWP700-100B		
	소자 정격 전압[V]	700[V]	
	소자 정격 전류[A]	100[A]	

e. IGBT 선정 사유

IGBT			
선정 기준	용량 [kW]	20.0	20.0
	입력 전압 [Vdc]	300.0	400.0
	입력 전류 [Adc]	66.7	50.0
	최대 Duty Ratio [%]	83.3	62.5
	최소 Duty Ratio [%]	59.4	44.5
	최대 Duty Ratio 소자 전압 [Vrms]	250.0	250.0
	최대 Duty Ratio소자 전류 [Arms]	80.0	80.0
	최대 Duty Ratio 소자 전압 [Vp-p]	300.0	400.0
	최대 Duty Ratio 소자 전류 [Ap-p]	87.6	101.2
	최소 Duty Ratio 소자 전압 [Vrms]	178.2	178.2
	최소 Duty Ratio소자 전류 [Arms]	112.2	112.2
	최소 Duty Ratio 소자 전압 [Vp-p]	300.0	400.0
	최소 Duty Ratio 소자 전류 [Ap-p]	145.6	168.2
	Converter 최소 출력 전압 [Vdc]	588.0	588.0
	Converter 최대 출력 전압 [Vdc]	825.0	825.0
	Transformer Turn Ratio	3.3	3.3
소자 사양	BSM200GB60DLC		
	소자 정격 전압[V]	600	
	소자 정격 전류[A]	200	

f. Transformer 선정 사유

Transformer			
선정 기준	용량 [kW]	20.0	20.0
	입력 전압	300.0	400.0
	최대 Duty Ratio 소자 1차측 전압 [Vrms]	250.0	250.0
	최대 Duty Ratio소자 1차측 전류 [Arms]	80.0	80.0
	최대 Duty Ratio 소자 1차측 전압 [Vpp]	300.0	400.0
	최대 Duty Ratio 소자 1차측 전류 [Ap-p]	87.6	101.2
	최소 Duty Ratio 소자 1차측 전압 [Vrms]	178.2	178.2
	최소 Duty Ratio소자 1차측 전류 [Arms]	112.2	112.2
	최소 Duty Ratio 소자 1차측 전압 [Vp-p]	300.0	400.0
	최소 Duty Ratio 소자 1차측 전류 [Ap-p]	145.6	168.2
	Turn Ratio	3.5	3.5
	최대 Duty Ratio 소자 2차측 전압 [Vrms]	875.0	875.0
	최대 Duty Ratio소자 2차측 전류 [Arms]	22.9	22.9
	최대 Duty Ratio 소자 2차측 전압 [Vp-p]	1050.0	1400.0
	최대 Duty Ratio 소자 2차측 전류 [Ap-p]	25.0	28.9
	최소 Duty Ratio 소자 2차측 전압 [Vrms]	623.6	623.6
	최소 Duty Ratio소자 2차측 전류 [Arms]	32.1	32.1
	최소 Duty Ratio 소자 2차측 전압 [Vp-p]	1050.0	1400.0
	최소 Duty Ratio 소자 2차측 전류 [Ap-p]	41.6	48.1
	슈퍼캡 충전 최소 전압 [Vdc]	588.0	588.0
	슈퍼캡 충전 최대 전압 [Vdc]	825.0	825.0
소자 사양	코어텍 주문 제작의뢰 - UU100 * 2Set		
	1차측 정격 전압[V]	250.0	
	1차측 정격 전류[A]	112.2	
	Turn Ratio	3.5	
	2차측 정격 전류[A]	875.0	
	2차측 정격 전류[A]	32.1	

g. Diode 선정 사유

Diode			
선정 기준	최소 Duty Ratio 다이오드 전압 [Vrms]	623.6	623.6
	최소 Duty Ratio 다이오드 전류 [Arms]	32.1	32.1
	최소 Duty Ratio 다이오드 전압 [Vp-p]	1050.0	1400.0
	최소 Duty Ratio 다이오드 전류 [Ap-p]	41.6	48.1
	최대 Duty Ratio 다이오드 전압 [Vrms]	875.0	875.0
	최대 Duty Ratio 다이오드 전류 [Arms]	22.9	22.9
	최대 Duty Ratio 다이오드 전압 [Vp-p]	1050.0	1400.0
	최대 Duty Ratio 다이오드 전류 [Ap-p]	25.0	28.9
소자 사양	DH2x61-18A (모듈)		
	소자 정격 전압[V]	1800	
	소자 정격 전류[A]	60*2	
	DH60-18A (딥타입)		
	소자 정격 전압[V]	1800	
	소자 정격 전류[A]	60	

h. LC 필터 선정 사유

LC 필터		
선정 기준	최대 전류 [A]	32.1
	최대 전압 [V]	875.0
	LC Filter 주파수 [Hz]	4000
	Inductance[uH]	1200.0
	Capacitance [uF]	1.3
소자 사양	Capacitor - E62.G85-303G10	
	소자 정격 전압 [V]	1000
	Capacitance [uF]	50
	Reactor - ER6062 (코어텍 샘플 제작 의뢰)	
	소자 정격 전류 [A]	35
	Inductance [uH]	25

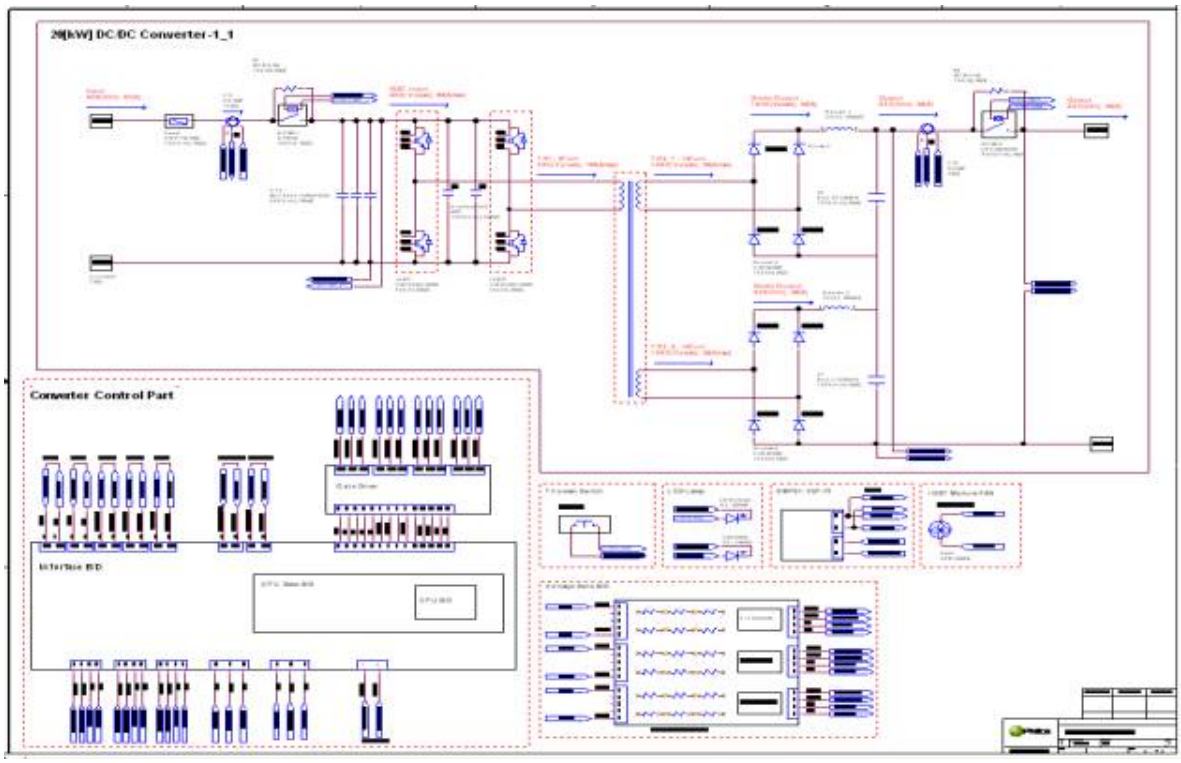
i. 출력센서 선정 사유

Output Senser		
선정 기준	정격 용량 [kW]	20.0
	최소 전압 [V]	623.6
	최대 전류 [A]	32.1
소자 사양	NA-50P	
	소자 정격 전류	50[A]

j. 출력단자 선정 사유

Output DC Contactor		
선정 기준	정격 용량 [kW]	20.0
	최대 전압 [V]	875.0
	최대 전류 [A]	32.1
소자 사양	LEV100A5ANH	
	소자 정격 전압 [V]	900
	소자 정격 전류 [A]	100

(라) 20[kW] 회생컨버터 Module 시스템 회로도

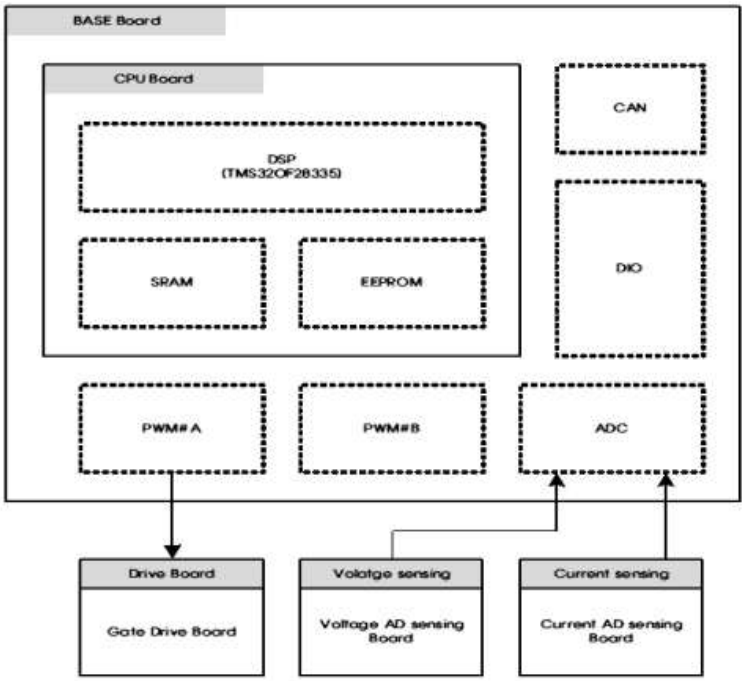


<그림 3-1-111> 회생컨버터 모듈 회로도

(2) 제어용 Control B/D 제작

- 제어회로는 회로의 집적화와 외부 노이즈의 영향을 받지 않도록 다층 회로 기판으로 CPU, RAM 및 VLSI등으로 구성되며 마이크로 프로세스를 사용한 PWM 파형 발생 기능, 각종 경보 및 상태 표시 기능 등이 복합 구성되도록 개발함.

(가) 제어용 Control B/D 전체 구성



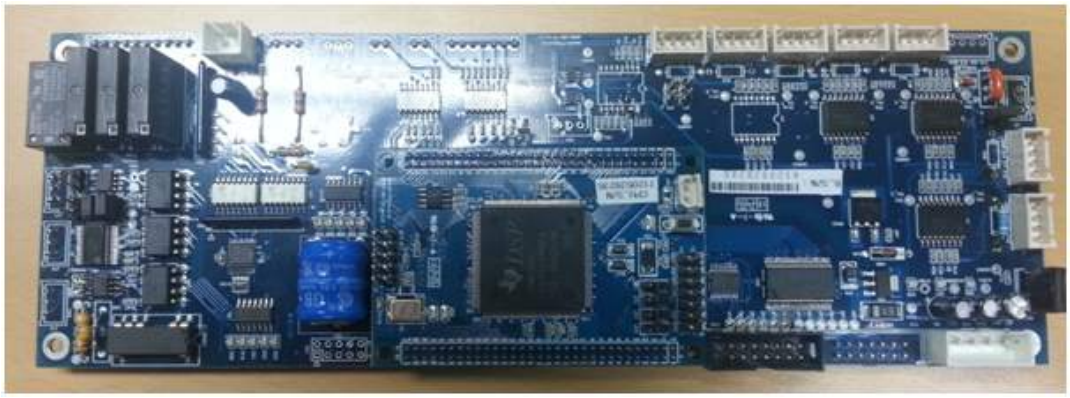
<그림 3-1-112> Control B/D 구성

(나) 제어 회로의 구성 및 기능

<표 3-1-22> 제어 회로 기능

종 류	기 능
CPU 보드	- CPU (DSP28335) 및 메모리부(SRAM) - Parameter 저장용 EEPROM - PWM 발생 - 통신지원
BASE 보드	- PWM Output (12-ch) - Analog Input (8-ch) - Digital Input (7-ch) - Digital Output (6-ch) - Relay Output (2-ch) - SPI (DA Board Interface) - Serial Communication Port (RS-232/485) - CAN (eCAN Standard)
Gate Drive 보드	- 전력 제어 소자 : IGBT - Base 보드의 게이팅 신호를 받아 IGBT를 구동 - IGBT에 과전류가 흐를 때 소자보호 에러 신호 발생
전류 센싱 보드	- 전류 센싱 기능
전압 센싱 보드	- 전압 센싱 기능

(다) CPU & Base B/D



<그림 3-1-113> CPU & Base B/D 사진

(라) CPU B/D 기능 및 사양

<표 3-1-23> CPU B/D 기능 및 사양

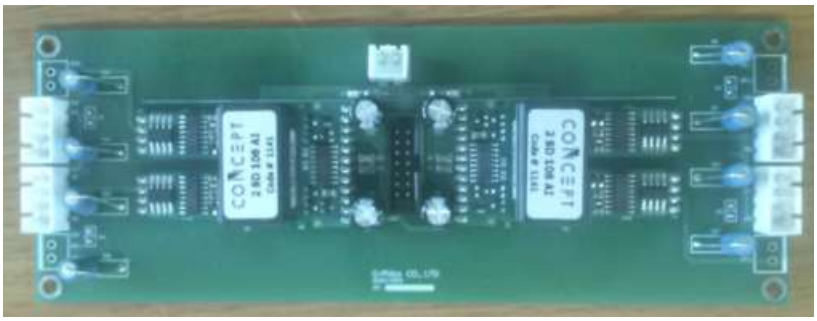
항 목	기 능	비 고
CPU	TMS320F28335	- 32bit Micro controller - 3.3 [V]/ 1.9 [V] - 150 [MHz] - ePWM - GPIO - SCI - SPI - eCAN - ADC (12bit)
SRAM	K6R4016V	
EEPROM	AT24C16	
Power	+5 [V], +3.3 [V], +1.9 [V]	

(마) Base B/D 기능 및 사양

<표 3-1-24> Base B/D 기능 및 사양

항 목	기 능	비 고
PWM	PWM_A00～05	전력소자 스위칭용
	PWM_B00～05	전력소자 스위칭용
ADC	ADC00～07	센싱용
Digital Input	DI_01～06	입력 접점
Digital Output	DO_01～05	출력 접점
SPI	SPI	DA Board 통신용
SCI	RS232	-
	RS485	-
CAN	CAN Standard	상위 통신용
Power	+5 [V], +3.3 [V], +1.9 [V]	

(바) Gate Driver B/D 기능 및 사양



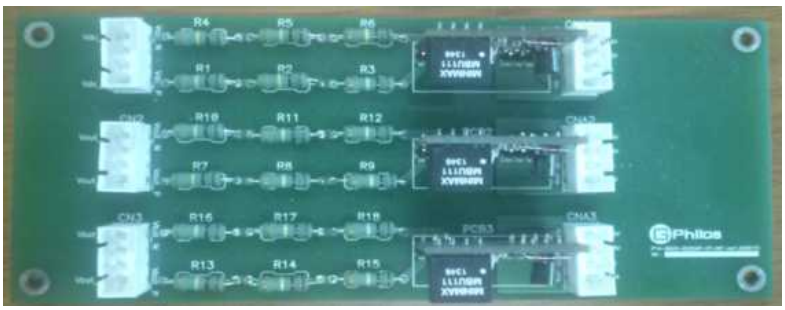
<그림 3-1-114> Gate Driver B/D 사진

<표 3-1-25> Gate Driver B/D 기능 및 사양

항 목	기 능	비 고
Gate Source	24[Vdc]	센싱용
PWN	4Channel	2High, 2Low
Fault	Gate Short 보호	
SW_Frequency	100[kHz]	

(사) Voltage Sensor B/D 기능 및 사양

- 입력 전압, 출력 전압, Battery 전압을 센싱하며 3Channel로 구성됨.



<그림 3-1-115> Voltage Sensor B/D 사진

<표 3-1-26> Voltage Sensor B/D 기능 및 사양

항 목	기 능	비 고
Input Channel	1000[Vdc] Sensing	3Channel
Output Channel	10[Vdc] Output	3Channel

(아) Control Power SMPS 기능 및 사양

- 20[kW] 회생 컨버터 구동에 필요한 제어 전원 공급



<그림 3-1-116> Control Power SMPS 사진

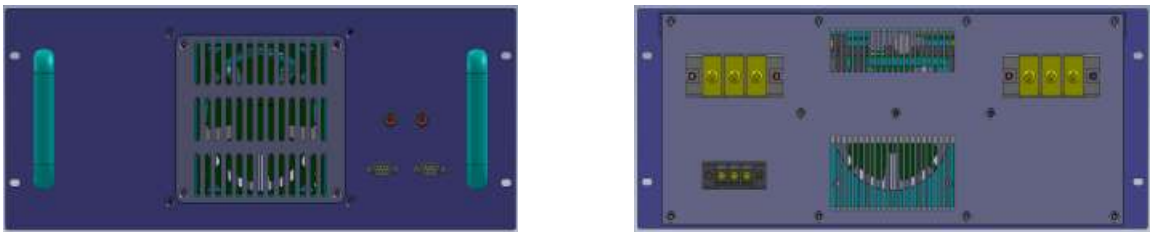
- SMPS 개발 사양

<표 3-1-27> Control Power SMPS 사양

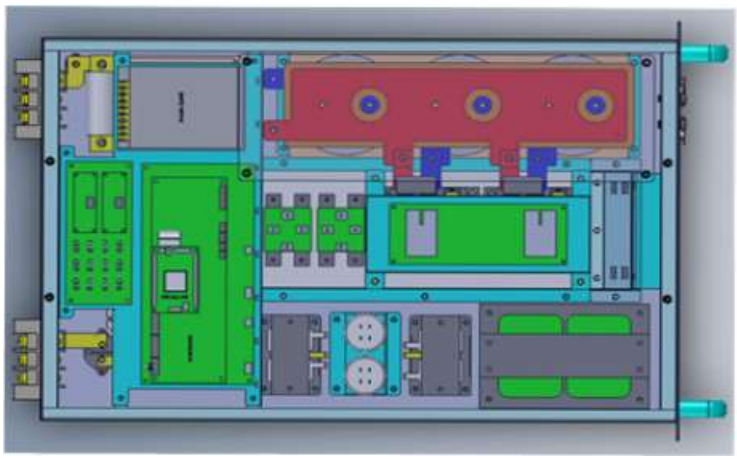
	출력 사양				
항목	+5[V]	+15[V]	-15[V]	+24[V]	+15[V]
출력 용량	5[W]	2[W]	1[W]	54.5[W]	20[W]
최대출력 리플	80[mV]	150[mV]	150[mV]	240[mV]	150[mV]
출력 전압	4.9 ~ 5.1[V]	14.4 ~15.6[V]	-14.4 ~ 15.6[V]	22.0 ~ 26.0[V]	14.4 ~ 15.6[V]
접지 구분	GND1			GND3	GND2
정격 전압	24[V]				
입력 전력	100[W]				
입력전압 범위	18 ~ 52[V]				
동작개시전압	DC 18[V] 이상				
효율	85[%] 이상				
보호회로	정격의 150[%] 이상에서 과전류 보호 동작 개시 / 출력단락 시 보호 동작 (1[sec]기준)				
보존 온도	-30 - 80[℃]				
보존 습도	10 - 95[%]RH				
동작 주위 온도	-10[℃] - 60[℃]				
동작 주위 습도	30[%] ~ 95[%]RH				
냉각 방식	자연 냉각 방식				
PCB 사양	94 * 130 * 30mm				
절연 전압	1차 ~ 2차 2000[Vrms], 1분				

(3) Converter 모듈 제작

(가) 기구 설계 및 제작



<그림 3-1-117> Converter 모듈 설계 및 제작 1

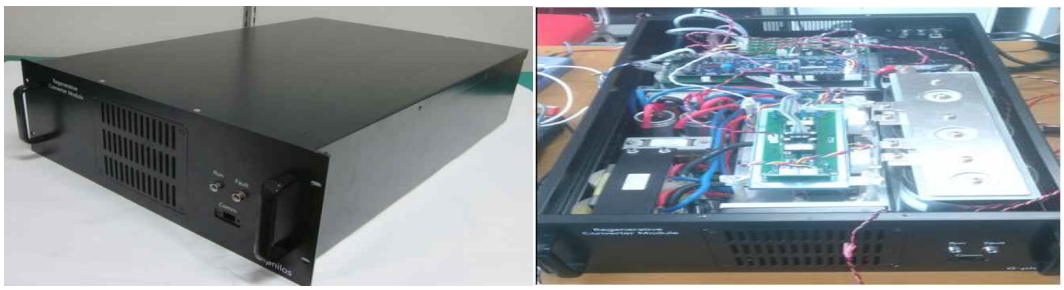


<그림 3-1-118> Converter 모듈 설계 및 제작 2

(나) 회생 Converter Module 제작

<표 3-1-28> 회생 Converter Module 사양

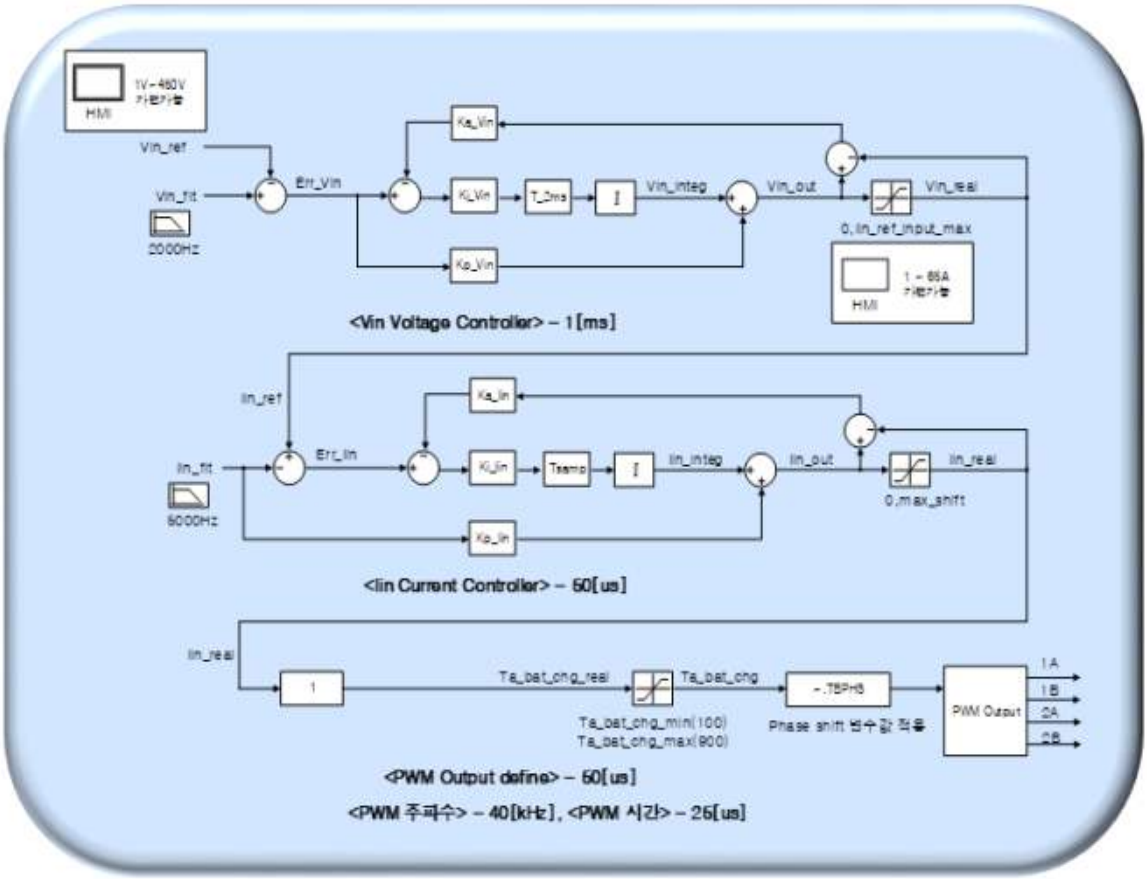
사이즈	W:480mm, D:740mm H:175mm	비고
중량	30[kg]	



<그림 3-1-119> 회생 Converter Module 사진

(4) 회생 Converter Module S/W 설계

(가) S/W 제어 알고리즘 구성도



<그림 3-1-120> S/W 제어 알고리즘 구성도

(나) 제어기 응답 속도

<표 3-1-29> 제어기 응답 속도

항 목	필터링 주파수	제어기 응답
출력 전류 제어	2[kHz]	50[usec]
입력 전압 제어	5[kHz]	200[usec]

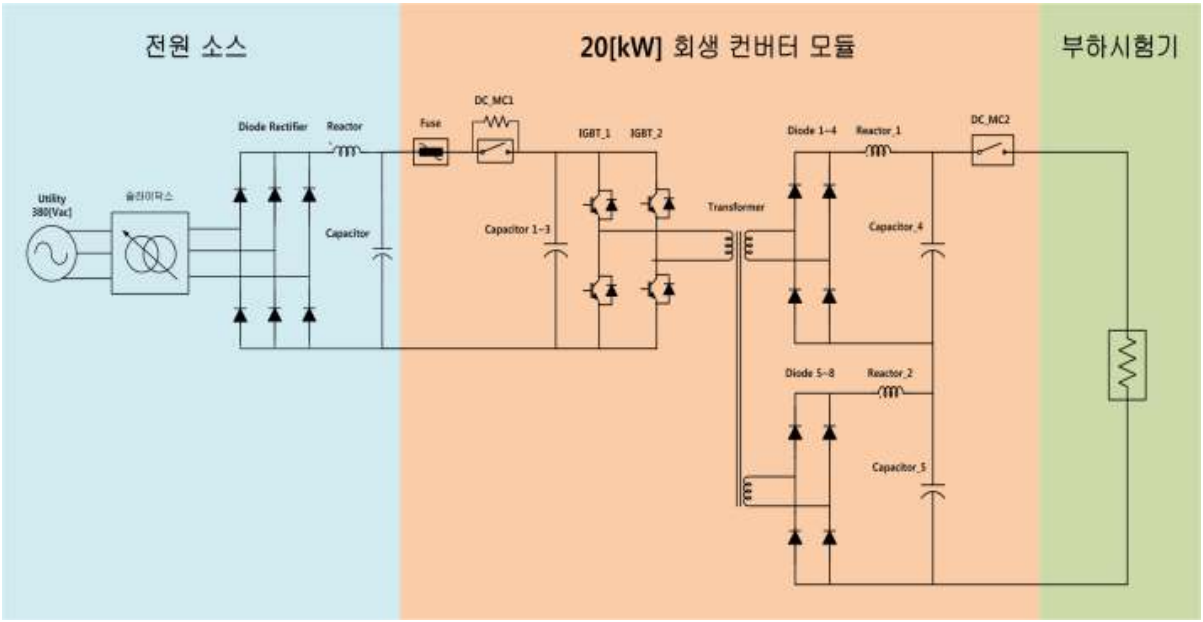
(다) 회생 Converter Module 제어 알고리즘 - Balancing Control 알고리즘

- 회생에너지 시스템의 모듈은 Vin_ref 전압과 Iin_limit 값을 설정함. 예를 들어 Vin_ref = 320[V]로 설정하고 Iin_limit = 60[A]로 설정하게 운전 설정을 하면 회생에너지 시스템의 입력전원인 가선 전압이 1800[V]가 인가되면, 5직렬 구성된 회생에너지 시스템의 각 모듈은 1800[V]/5[EA] = 360[V]의 전압이 인가되게 됨.

- 회생에너지 시스템의 회생 컨버터 모듈의 Vin_ref와 감지된 Vin 전압의 오차 값 = -40[V]는 제 1 PI제어기를 통해 Iin_ref로 변하게 되며, Iin_ref는 Iin_limit 설정 값인 60[A]를 상회할 수 없음.
- Vin_ref와 감지된 Vin의 비교 값과 제 1 PI제어기를 통한 Iin_ref와 감지된 Iin과 비교 연산된 값은 제 2 PI 제어기로 연산되어 회생 컨버터 모듈의 PWM 신호를 발생하게 됨.
- 제어기를 통해 직렬로 구성된 회생에너지 시스템의 각 모듈은 전압 불평형 제어를 하게 됨. 1800[V]의 가선 전압이 인가되면 커패시터 뱅크의 전체 전압은 1800[V]로 충전되게 되며, 회생 컨버터 모듈과 병렬로 구성된 각 모듈에는 1800[V]/5[EA]= 360[V]의 전압이 인가됨. 각 회생 컨버터 모듈은 각 입력 전압과 설정된 Vin_ref전압의 오차와 감지된 Iin전류량을 비교하여 PWM을 발생하게 되어 전력 운전을 함. 이상적일 경우 동일한 Vin_ref와 동일한 감지된 Vin을 통해 동일한 Iin_ref가 발생하게 되며, 동일한 감지된 Iin전류가 발생하여 동일한 PWM을 출력하여 각 모듈간의 밸런싱 오차가 발생할 수 없음.
- 하지만 실제 시스템에서는 각 모듈간의 임피던스 오차, 전압 전류 센싱 스케일 오차, 제어기의 상승 시간 등의 차이에 따라 직렬 구성된 각 모듈간의 전압 밸런싱 오차가 발생하게 됨. 가령 가선 전압이 1800[V]의 전압이 인가 되게 되고 회생 에너지 시스템을 구성하는 5직렬 모듈간의 전력 운전 오차가 발생하게 되면, 각 모듈의 360[V]의 입력 전압이 아닌 밸런싱 오차로 인해 각기 다른 전압을 가진 전압을 입력 전압으로 가지게 되지만 상기 제어기를 통해 이러한 밸런싱 상황 발생시 자동적으로 밸런싱을 복구 할 수 있도록 설계 되어 있음.
- 예를 들어 직렬로 구성된 회생 컨버터 모듈의 밸런싱 오차 발생으로 1, 2, 3, 4번 모듈의 전압이 380[V]가 되면, 5번 모듈은 1800[V] - (380[V]×4[EA]) = 280[V]가 된다. 이러한 상황이라면 모듈 1~4전까지의 모듈은 제어기 구성에 따라 Vin_ref와 감지된 전압의 오차에 따라 Iin_ref를 limit로 발생하게 되며, 최대 PWM 동작을 통해 최대 전력량운전을 하게 되어 각 모듈의 입력 전압을 하강시키게 되며, 280[V]의 5번 모듈은 Vin_ref보다 작은 감지된 Vin 전압이므로 Iin_ref값이 0[A]가 됨. 그러므로 PWM 전력 운전을 하지 않으며, 병렬로 구성된 커패시터 뱅크의 모듈 전압은 상승하게 되며, 입력 전압이 320[V] 초과되게 되면, Vin_ref와 감지된 Vin 값의 연산 값이 +[V]로 변하게 되며, Iin_ref 값이 +[A]값으로 생성되게 되며, 감지된 Iin값과 연산을 통해 PWM을 발생하게 되며, 전력 운전을 시작하게 됨.
- 위와 같이 각 회생 컨버터 모듈은 Capacitor Bank와 병렬로 구성되어, 각 모듈의 Vin_ref 전압과 감지된 Vin 값의 오차에 의해 자동으로 전력 운전량을 조절하여 각 모듈 1~5번의 밸런싱 제어 동작을 하게 됨.

(5) 회생 Converter Module 성능 평가

(가) 시험 환경 구성도



<그림 3-1-121> 시험 환경 구성도

(나) 20[kW] 시험 환경 구성



<그림 3-1-122> 슬라이닥스, Diode 정류기 & LC Filter





<그림 3-1-123> 저항 부하

(다) 회생 컨버터 모듈 - Fault Test 결과

<표 3-1-30> Fault Test 결과

항 목	설정 값	운전 값	Test 결과
입력 Over Voltage	400[V]	410[V]	ok
입력 Under Voltage	320[V]	300[V]	ok
입력 Over Current	80[A]	85[A]	ok
출력 Over Voltage	830[V]	840[V]	ok
출력 Under Voltage	585[V]	580[V]	ok
출력 Over Current	35[A]	40[A]	ok

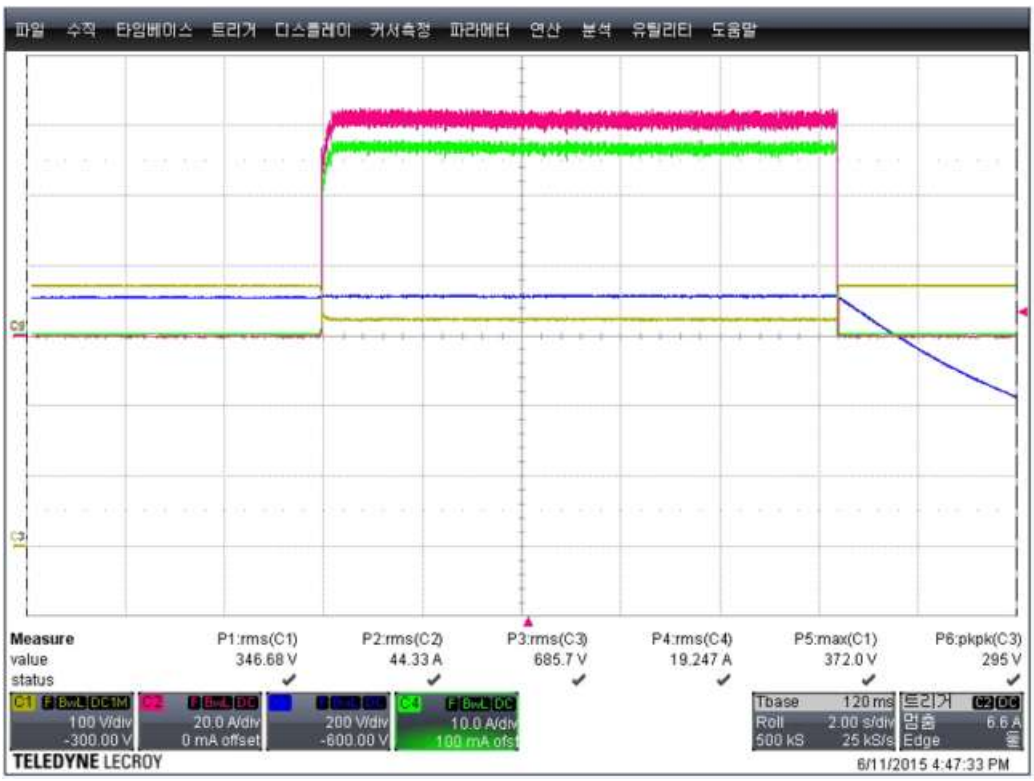
(라) 회생 컨버터 모듈 정격 운전 Test 결과

<표 3-1-31> 정격 운전 Test 결과

Parameter	Value	Parameter	Value
입력 전압	323.1[V]	Battery 전압	712[V]
입력 전압	61.3[A]	충전 전류	26.6[A]
입력 전력	19.8[kW]	출력 전력	18.94[kW]
운전 시간 지령 값	10[sec]	동작 확인	10.4[sec]
운전 전압 지령 값	320[V]	동작 확인	323[V]
운전 전류 지령 값	60[A]	동작 확인	61.3[A]

(마) 회생 Converter Module 설정 및 운전 결과 파형

① 회생 Converter Module 정격 운전 입, 출력 파형 측정 결과



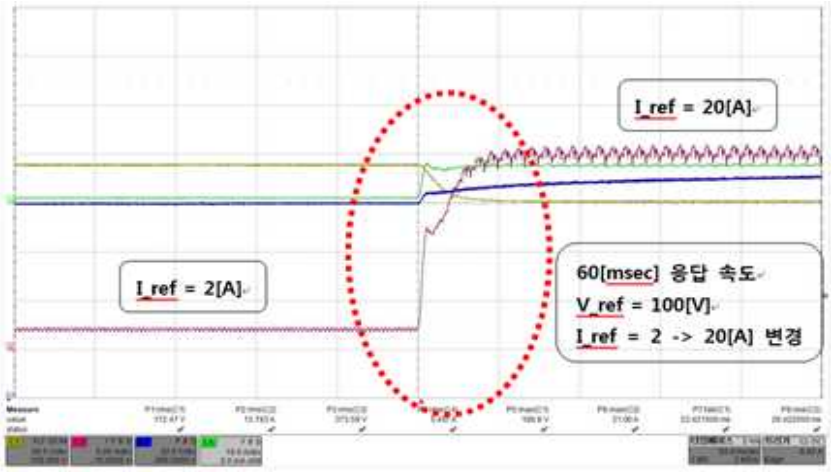
<그림 3-1-124> 회생 컨버터 모듈 정격 운전 Test - 입출력 파형

<표 3-1-32> 측정 포인트

측정채널	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4
측정 포인트	입력 전압	입력 전류	출력 전압	출력 전류
Div/Offset	100/-300V	20/0A	200/-600V	10/0A
Time Div	2sec/Div	2sec/Div	2sec/Div	2sec/Div

② 회생 Converter Module 응답 속도 Test 결과

- 회생 컨버터 모듈 #1 ~ #25번 응답 Test 결과 - 60msec



<그림 3-1-125> 응답 속도 Test 결과

<표 3-1-33> 응답 속도 Test 결과

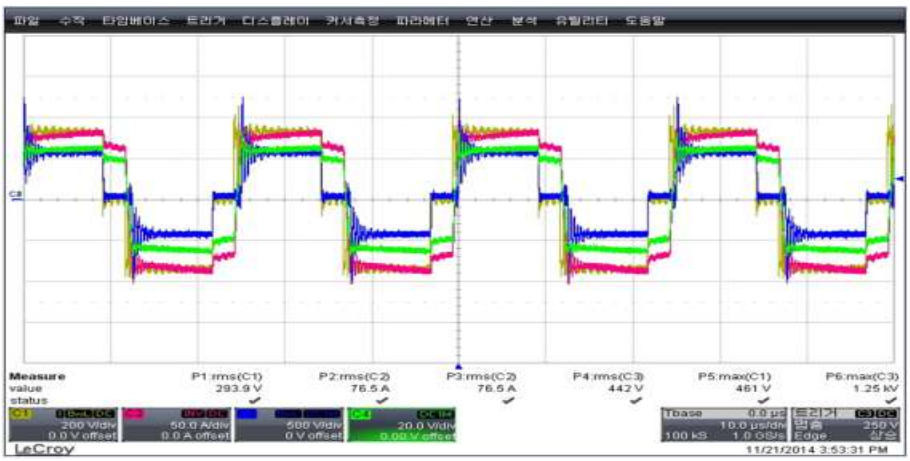
측정채널	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4
측정 포인트	입력 전압	입력 전류	출력 전압	출력 전류
Color	YELLOW	RED	Blue	Green
Value	320[Vdc]	60[Vdc]	700[Vdc]	28[A]

③ 회생 Converter Module 정격 운전 시 Transformer 1,2차 측정 결과 파형

- Full Bridge Duty 변환 및 고주파 Transformer 1,2차 파형

<표 3-1-34> 측정 결과

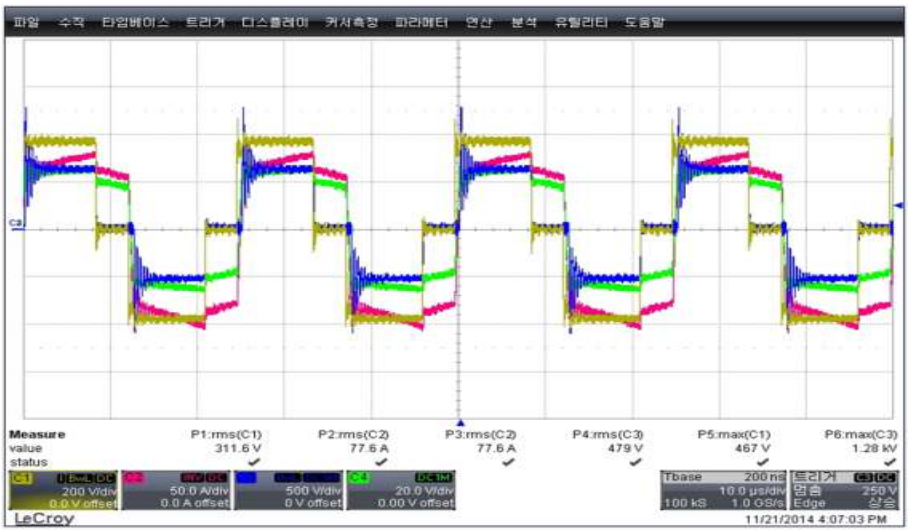
Parameter	Value
스위칭 주파수	40[[kHz]
Phase Shift	약 84[%]
Top - Bottom Dead Time	300[nsec]



<그림 3-1-126> 측정 결과

<표 3-1-35> 측정 결과

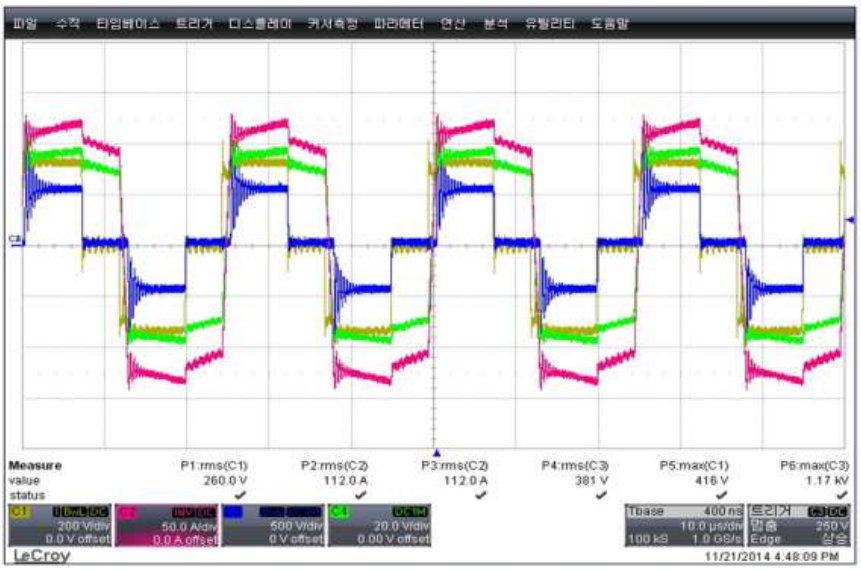
Parameter	Value
스위칭 주파수	40[[kHz]
Phase Shift	약 67[%]
Top - Bottom Dead Time	300[nsec]



<그림 3-1-127> 측정 결과

<표 3-1-36> 측정 결과

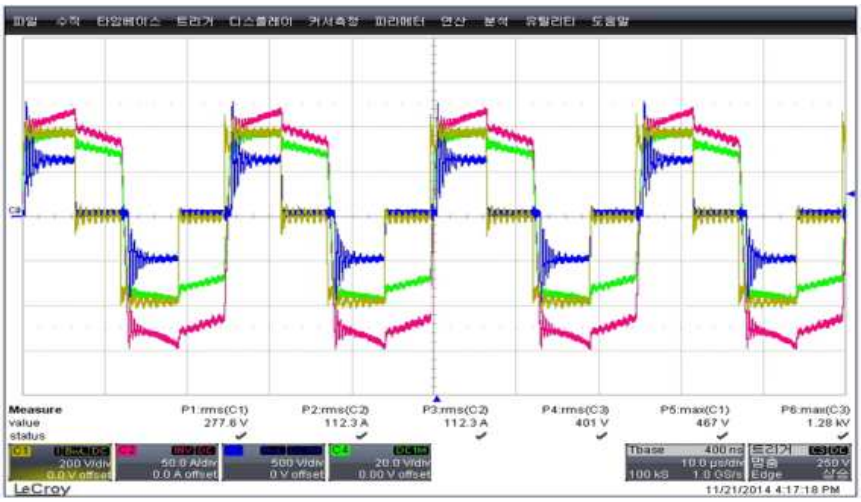
Parameter	Value
스위칭 주파수	40[[kHz]
Phase Shift	약 62[%]
Top - Bottom Dead Time	300[nsec]



<그림 3-1-128> 측정 결과

<표 3-1-37> 측정 결과

Parameter	Value
스위칭 주파수	40[[kHz]
Phase Shift	약 53[%]
Top - Bottom Dead Time	300[nsec]



<그림 3-1-129> 측정 결과

<표 3-1-38> 측정 채널

측정채널	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4
측정 포인트	Tr_1차 전압	Tr_1차 전류	Tr_2차 전압	Tr_2차 전류

④ 회생 컨버터 모듈 초기 기동 시 Transformer 여자 전류 Test

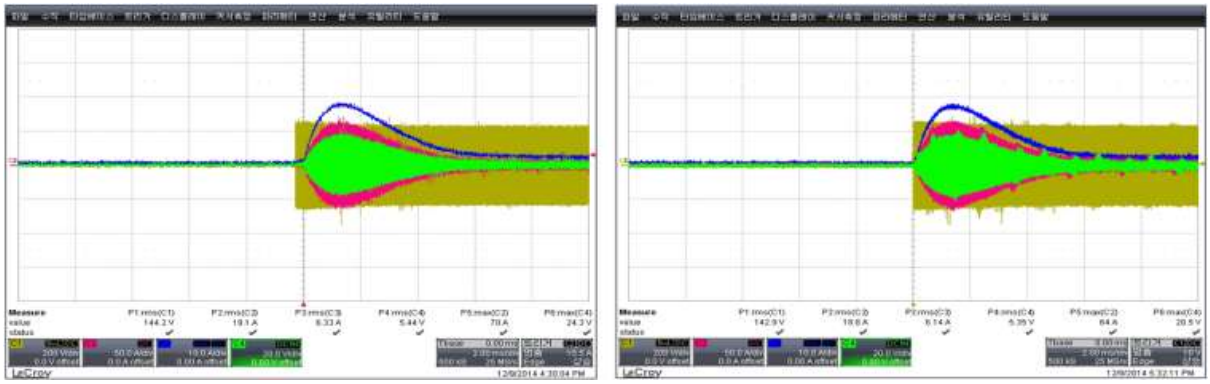
- Isolation Transformer의 경우 초기 기동 시 자화 전류에 의해 제품의 고장을 유발할 수 있음으로 초기 기동 시 여자전류의 측정이 필요함. 초기 Phase Shift 변환률 및 Gating Delay 조정을 통한 측정 결과 고주파 회생 컨버터 모듈의 과도한 여자전류에 의한 시스템 소손 및 응답 특성결정에 문제가 되지 않음을 확인 할 수 있음.

- 운전 조건_1

<표 3-1-39> 운전 조건

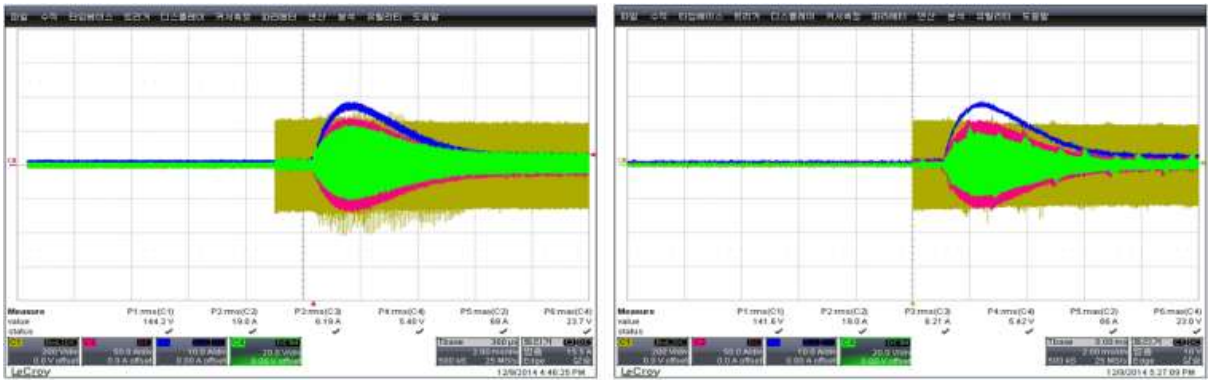
Parameter	좌측	우측	비고
Gating Delay	0~5[msec]	0~5[msec]	변동 TEST
PWM Count(Phase Shift)	100	500	Max:740
운전 전력	5[kW]	5[kW]	

- 측정 파형: Gating Delay - 0[msec]



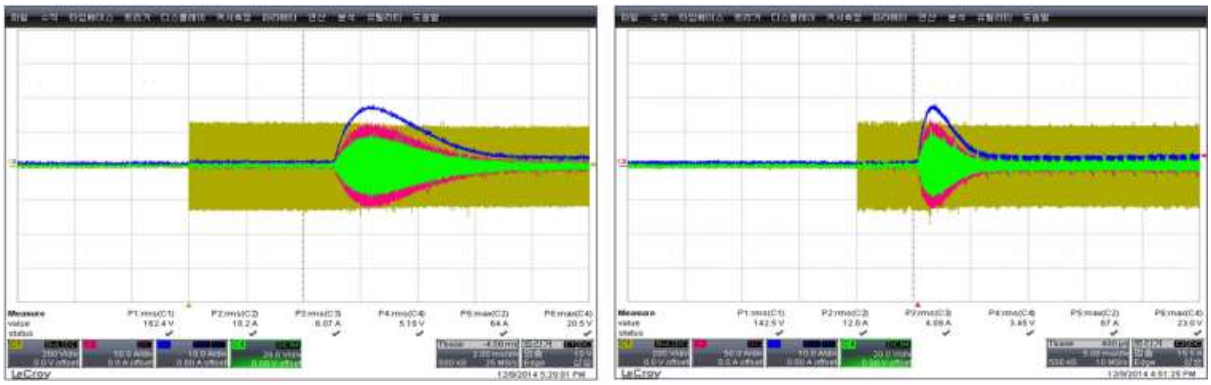
<그림 3-1-130> 측정 파형_0[msec]

- 측정 파형: Gating Delay - 1[msec]



<그림 3-1-131> 측정 파형_ 1[msec]

- 측정 파형: Gating Delay - 5[msec]



<그림 3-1-132> 측정 파형_ 5[msec]

<표 3-1-40> 측정 채널

측정채널	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4
측정 포인트	Tr_1차 전압	Tr_1차 전류	입력 전류	Tr_2차 전류

(바) 회생 컨버터 Module 정격 운전 효율 측정 결과

① 회생 컨버터 Module - 운전 설정 값

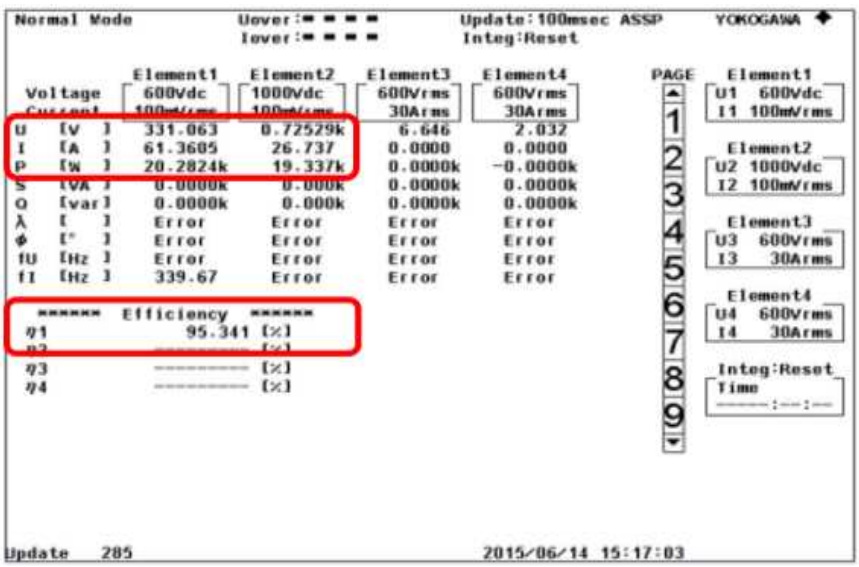
<표 3-1-41> 회생 컨버터 Module 효율 측정 결과

Parameter	Value	Parameter	Value
입력 전압	331[V]	출력 전압	725[V]
입력 전압	61.36[A]	출력 전압	26.7[A]
입력 전력	20.28[kW]	출력 전력	19.34[kW]
효율	94.5 ~ 95.5 [%]		

② 측정 장비 YOKOGAWA WT3000 (공인 검교정 제품)



<그림 3-1-133> YOKOGAWA WT3000



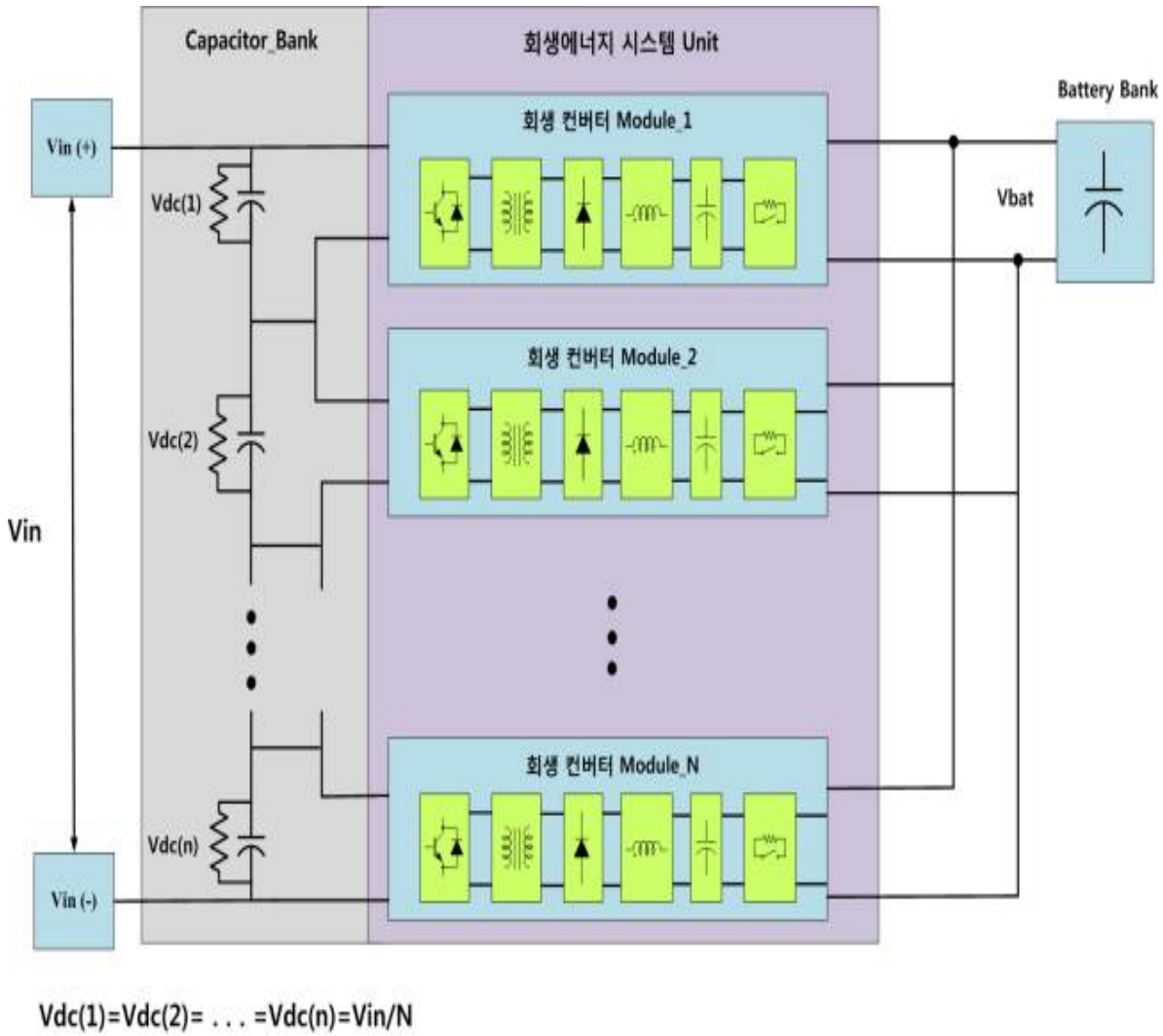
<그림 3-1-134> 회생 컨버터 Module #1 ~ #25 효율 측정 결과

마. **회생 컨버터 Unit 개발**

- 100 [kW] 회생 컨버터 Unit은 가선에서 발생하는 회생 에너지를 배터리에 충전 할 수 있는 단위 전력 변환 장치로 회생 전력량이 100[kW]급 이하의 전력 변환 장치가 필요한 곳에서는 단일 회생 컨버터 Unit으로 시스템을 구성할 수 있으며, 내부 구성은 20[kW] 회생 컨버터 모듈 5직렬 방식임.

(1) 회생 컨버터 Unit H/W 구성

- 전력 회로 설계 및 작성 : 20[kW] 단위 Module 5직렬 적층 방식
- 3D 기구 설계를 통한 최적 사이즈 구조 및 고압 절연 방식 구조 설계



<그림 3-1-135> 회생 컨버터 Unit H/W 구성

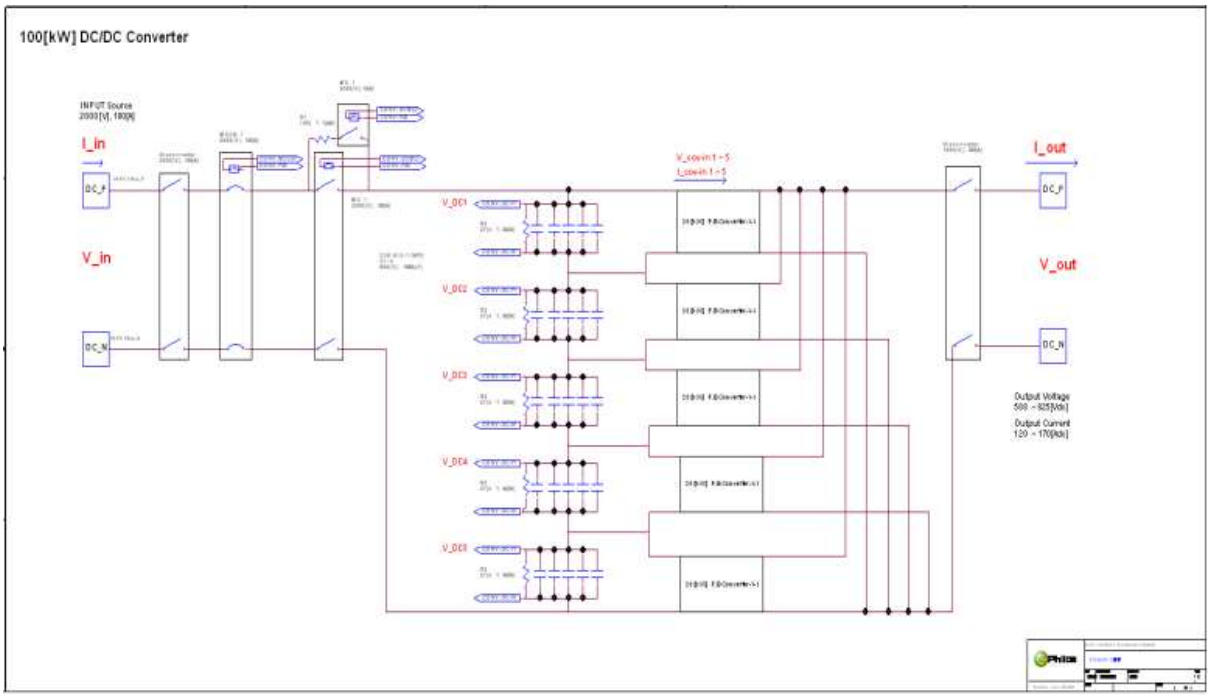
(2) 회생 컨버터 Unit H/W 설계 사양

- 회생컨버터 모듈은 가선전압을 5개의 모듈로 직렬로 분압하여 구성되며, 각각의 모듈은 20[kW]의 용량을 가지게 됨.

<표 3-1-42> 회생 컨버터 Unit H/W 설계 사양

항 목		사 양	비 고
회로 방식		Phase Shift Full Bridge DC/DC Converter	회생 컨버터 모듈 5직렬 방식 구조
전력 제어 방식		입력 전압, 출력 전류 제어	
스위칭 주파수		40[kHz]	
운전시간		최대 20초 운전	회생제동 시 전력 발생 최대 시간
입력	정격용량	110[kW]	
	정격전압	1800[Vdc]	회생제동 시 가선전압 : 1800Vdc
	전압범위	1600 ~ 1800[Vdc]	가선 전압범위 : 1500 ~ 2000Vdc
	전류범위	50 ~ 70[Adc]	
	최대전류	80[Adc]@10초 이내	평균 회생제동 시간 : 10초 내외
출력	정격용량	100[kW]	시간당 회생 평균전력 : 약 55.6[kW]
	정격전압	700[Vdc]	저장장치 Battery 전압
	전압범위	588 ~ 815[Vdc]	Battery 운전 전압
	정격전류	120 ~ 170[Adc]	
	최대전류	40[Adc]@10초 이내	10 sec 이내

(3) 100[kW] 회생컨버터 Unit 시스템 회로도



<그림 3-1-136> 100[kW] 회생컨버터 Unit 시스템 회로도

(4) 제어용 B/D 개발

- 회생 컨버터 유닛의 제어기는 별도로 존재 하지 않으며, 회생 컨버터 유닛의 전력 제어는 회생 컨버터 유닛을 구성하는 회생컨버터 모듈의 개별 제어를 통해 통합 제어가 됨.

(5) Balancing 제어기

- 회생 컨버터 유닛의 제어기는 별도로 존재 하지 않으며, 회생 컨버터 유닛의 전력 제어는 회생 컨버터 유닛을 구성하는 회생컨버터 모듈의 개별 제어를 통해 통합 제어가 되며, 회생 컨버터 유닛의 Balancing은 각 회생 컨버터 모듈의 내부 Balancing 제어기를 통해 제어가 됨.
- 회생 컨버터 유닛을 구성하는 각 회생컨버터 Module중 Master Converter Module의 제어기에서 CAN통신을 통해 100[usec]이네 Slave Module 1~4에 동작 지령 값을 전송하여 각 Converter Module의 Gating Delay Time을 최소화 한다.

(6) 각 모듈별 Balancing 하드웨어 설계 자료

- 각 모듈별 Gating Delay 따른 Capacitor의 Balancing 오차 계산
- Capacitor_bank 구성에 따른 회생 컨버터 Gate Delay에 따른 Unbalancing
  - 20[kW] 회생 컨버터 Module 내부 DC_Link = 2280[uF]
  - 스위칭 주기 = 0.025[msec]
  - 시스템 정상상태 도달 시간 = 10[msec]

(가) Gating Delay에 따른 Unbalancing 계산 결과

<표 3-1-43> Gating Delay에 따른 Unbalancing 계산 결과

항목	Gating Delay Time에 따른 Unbalancing 전압 오차	
	100[usec]	1[msec]
2.3[mF]	13.2[V]	41.7[V]
4.0[mF]	10[V]	31.6[V]
6.0[mF]	8.2[V]	25.8[V]
10.0[mF]	6.3[V]	20.0[V]
14.0[mF]	5.3[V]	16.9[V]
18.0[mF]	4.7[V]	14.9[V]

(나) Capacitor_bank 구성과 시스템 응답 속도에 따른 Unbalancing

- 20[kW] 회생 컨버터 Module 내부 DC_Link = 2280[uF]
- 스위칭 주기 = 0.025[msec]
- 시스템 응답 속도 = 1[msec]
- Gating Delay에 따른 Unbalancing 계산 결과

<표 3-1-44> 전류 오차에 따른 Unbalancing 계산 결과

항목	전류 오차 (전력량 오차)에 따른 Unbalancing 전압 오차		
	오차 2[%]	오차 3[%]	오차 5[%]
2.3[mF]	18.7[V]	22.8	29.5
4.0[mF]	14.1[V]	17.3	22.4
6.0[mF]	11.5[V]	14.1	18.3
10.0[mF]	8.9[V]	11.0	14.1
14.0[mF]	7.6[V]	9.3	12.0
18.0[mF]	6.7[V]	8.2	10.5

(다) 계산 값을 통한 Unbalancing 제어기 및 하드웨어 개발 사양

<표 3-1-45> Unbalancing 제어기 및 하드웨어 개발 사양

항목	사양
Capacitor_bank	6[mF]
Gating Delay	100[usec]
통신속도	100[usec]
제어기 응답 속도	1[msec]
전력량 허용 오차	2[%]
Unbalancing 범위	11.5[V]

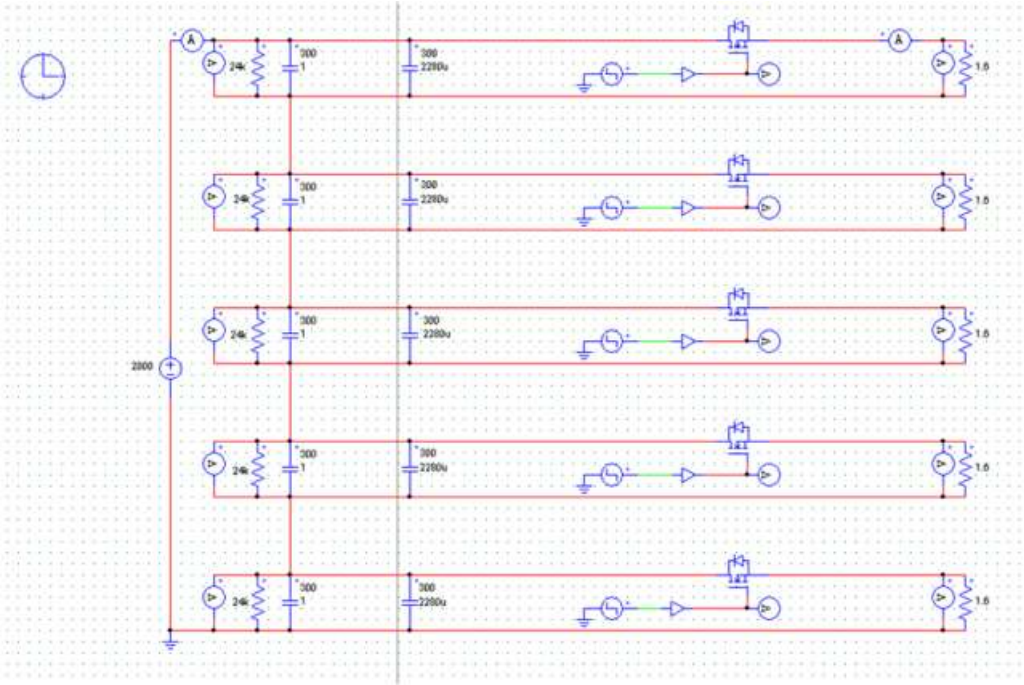
(라) 100[kW] 회생에너지 유닛 시뮬레이션

- 20[kW] 회생 컨버터의 단위 모듈당 System 응답 속도에 따른 Capacitor Bank의 Unbalancing 시뮬레이션
- 시뮬레이션 설정 값

<표 3-1-46> 시뮬레이션 설정 값

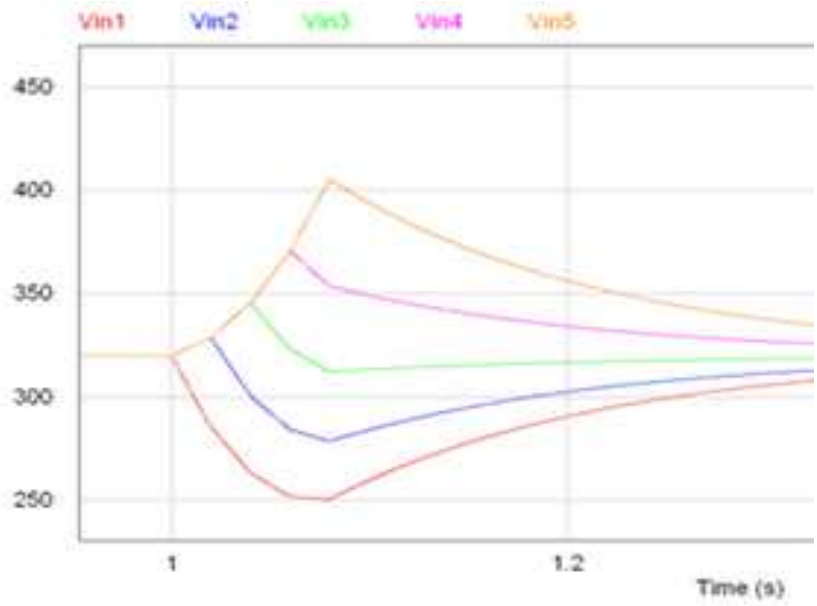
항목	사양
DC_Bank 설정값	15.6[mF]
초기 DC_Bank 전압	1500[Vdc]
입력 전압	1600[Vdc]
운전 용량	100[kW]
Module Delay Time	20[msec]
Balancing 수렴 시간	약 600[msec]
최대 Unbalancing 전압	150[Vdc]

- 시뮬레이션 구성

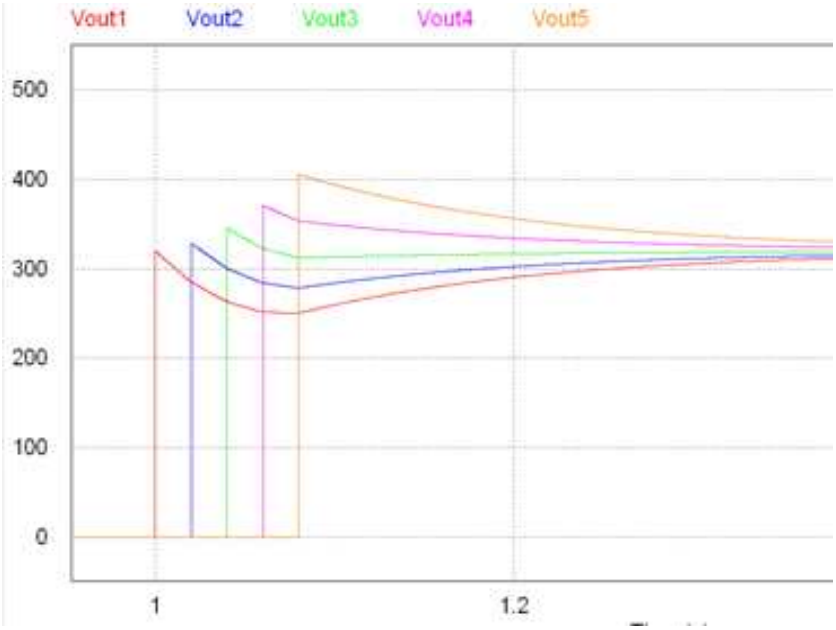


<그림 3-1-137> 시뮬레이션 구성

- Gating Delay 따른 입력 & 출력 전압 시뮬레이션 결과



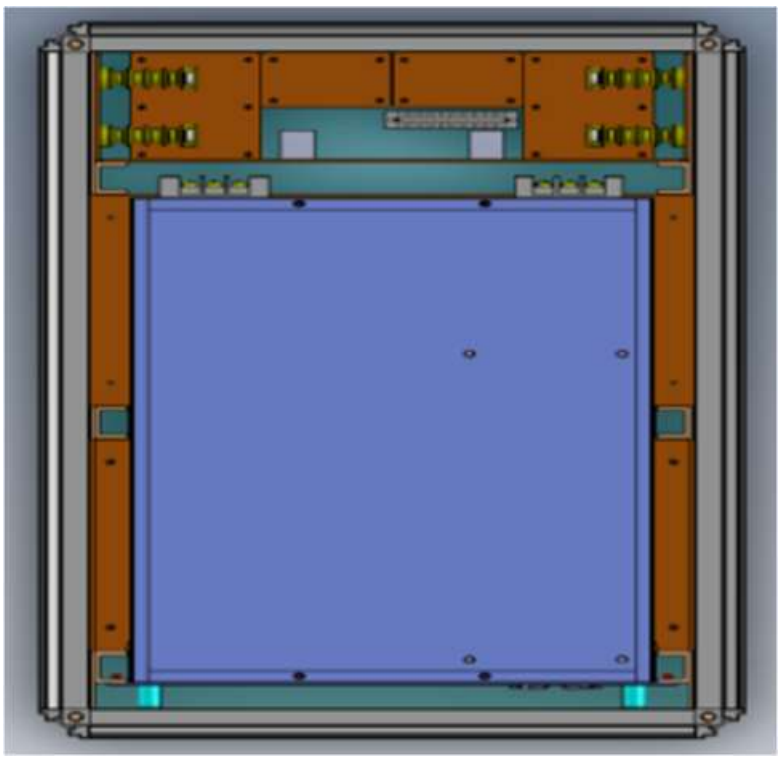
<그림 3-1-138> Gating Delay 따른 입력 & 출력 전압 시뮬레이션 결과



<그림 3-1-139> Gating Delay 따른 입력 & 출력 전압 시뮬레이션 결과

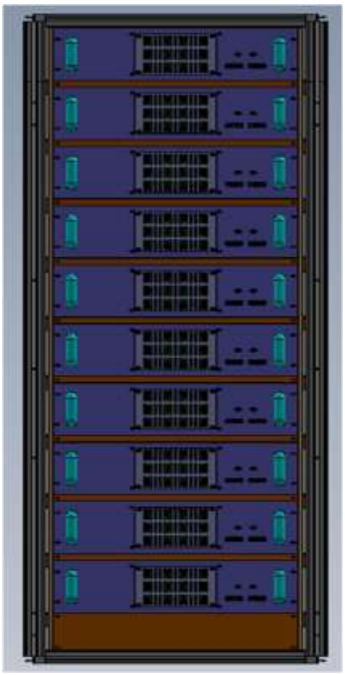
(7) 기구 설계 및 제작

(가) 회생 컨버터 모듈 평면도

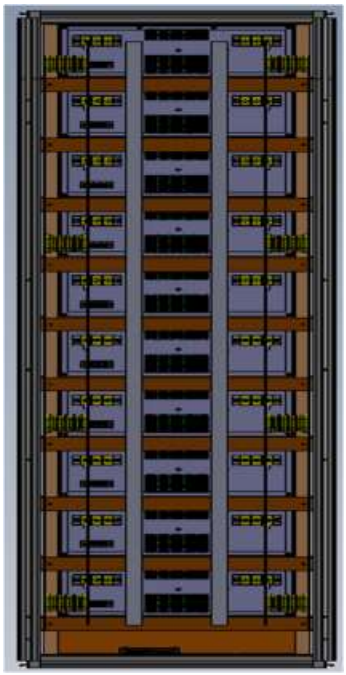


<그림 3-1-140> 회생 컨버터 모듈 평면도

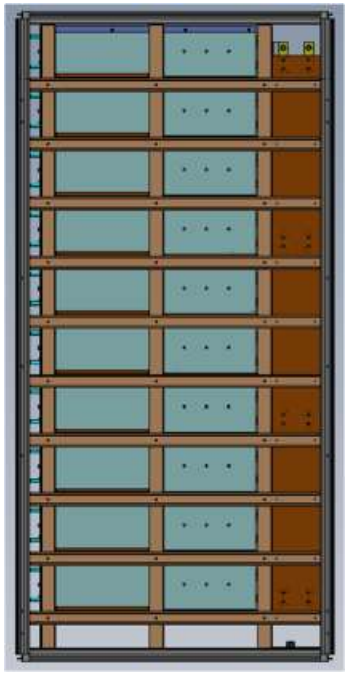
(나) 회생 컨버터 모듈 전면(왼쪽), 후면(중간), 측면도(오른쪽)



<그림 3-1-141> 회생 컨버터 모듈 전면



<그림 3-1-142> 회생 컨버터 모듈 후면



<그림 3-1-143> 회생 컨버터 모듈 측면도

(8) 100[kW] 회생에너지 Unit 제작

- 사이즈 및 중량

<표 3-1-47> 사이즈 및 중량

사이즈	W:600mm, D:1000mm H:2200mm	비고
중량	300[kg]	



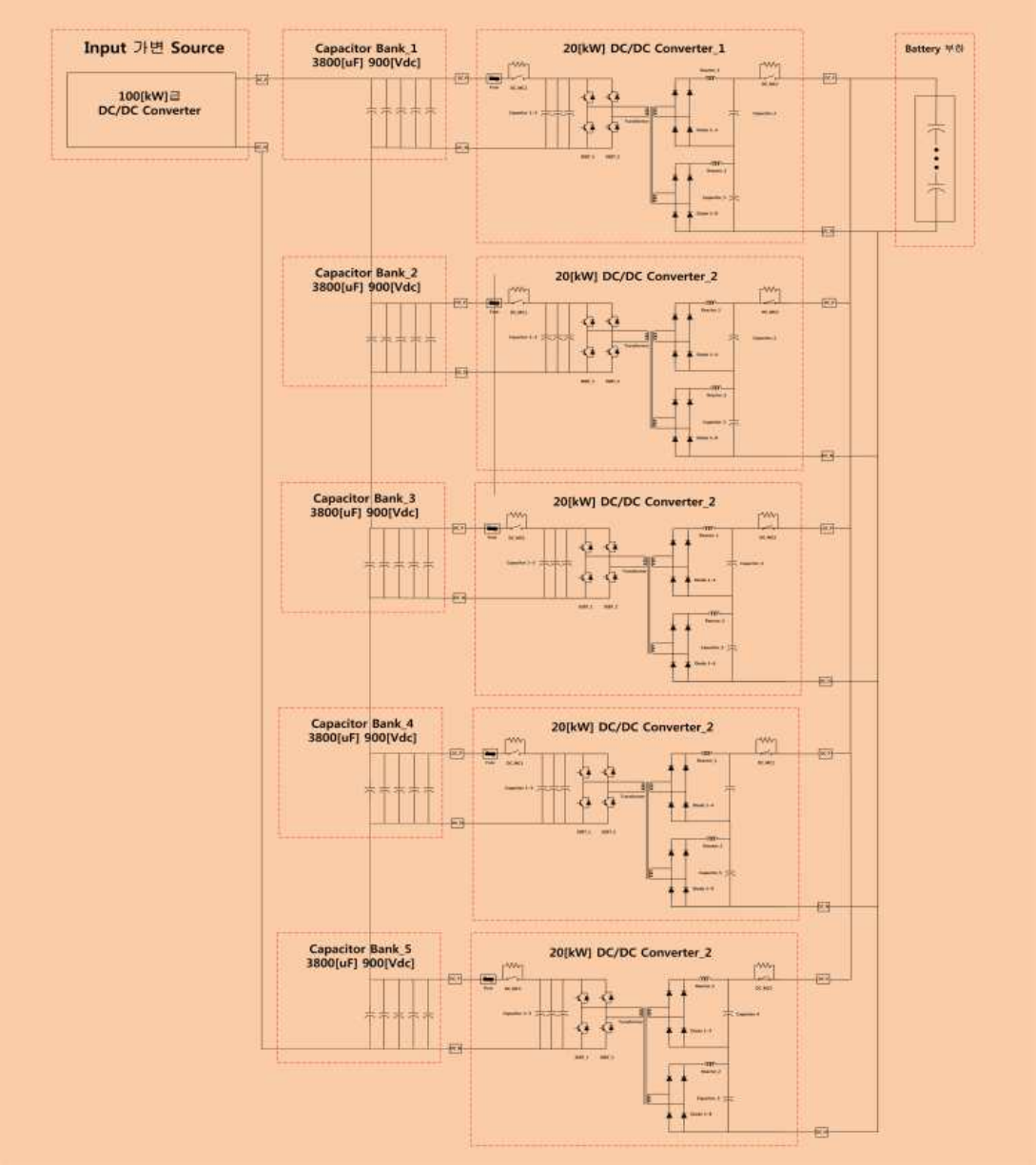
<그림 3-1-144> 100[kW] 회생에너지 Unit 1



<그림 3-1-145> 100[kW] 회생에너지 Unit 2

(9) 100[kW] 회생 컨버터 Unit 시험 결과

(가) 100[kW] 회생에너지 Unit Test 구성도



<그림 3-1-146> 100[kW] 회생에너지 Unit Test 구성

(나) 100[kW] 회생에너지 Unit Test 구성 사진

- 전원 소스 (가변 슬라이닥스 및 Diode Rectifier)



<그림 3-1-147> 가변 슬라이닥스



<그림 3-1-148> Diode Rectifier)

- 5직렬 Capacitor Bank 및 부하 저항



<그림 3-1-149> 5직렬 Capacitor Bank



<그림 3-1-150> 부하 저항

(다) 100[kW] 회생컨버터 유닛 Test - 5직렬 전력 운전 Test 결과

- 각 회생 컨버터 Module 운전 설정 값

<표 3-1-48> 회생 컨버터 Module 운전 설정 값

Parameter	Value	비고
입력 전압 지령 값	120[Vdc]	
출력 전류 지령 값	5[A]	
운전 시간 설정	10[sec]	
운전 용량	2[kW]	

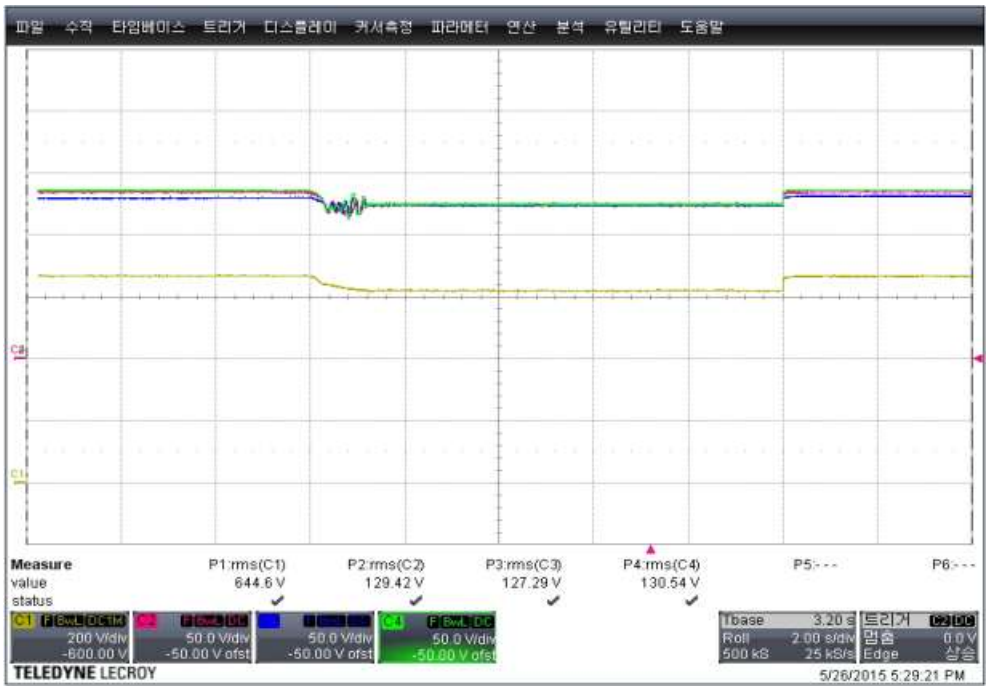
- 회생 컨버터 유닛 운전 결과

<표 3-1-49> 회생 컨버터 유닛 운전 결과

Parameter	Value	비고
입력 전압	620[Vdc]	모듈 당 124[Vdc]
입력 전류	17[A]	모듈 당 17[A]
출력 전압	390[Vdc]	모듈 당 390[Vdc]
출력 전류	5[A]	모듈 당 5[A]
회생 전력량	10[kW]	
운전 시간	10[sec]	
정상 상태 도달 시간	1.0[sec]	
입력 전압 Unbalancing	2[%]미만	

(라) 회생 컨버터 유닛 시험 결과 파형

- 각 회생 컨버터 모듈 - 입력 전압 측정 파형

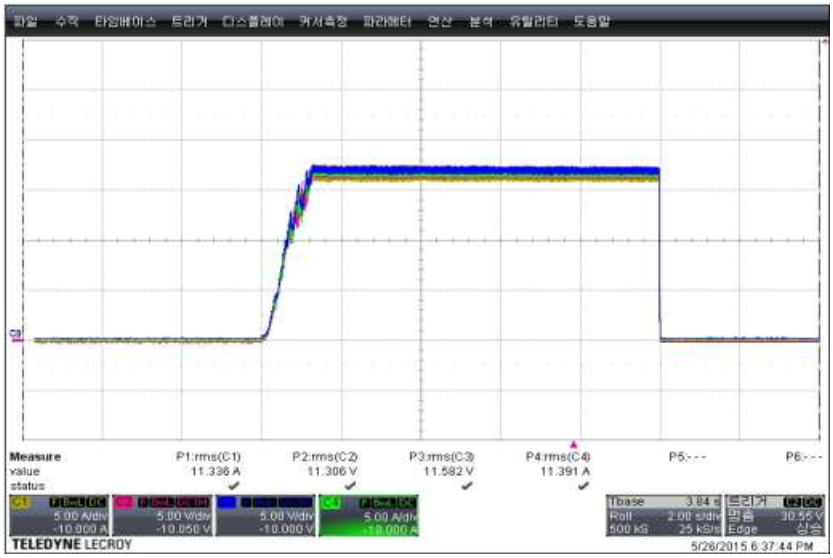


<그림 3-1-151> 입력 전압 측정 파형

<표 3-1-50> 측정 채널

측정채널	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4
측정 포인트	Unit 입력 전압	Module_1 입력 전압	Module_2 입력 전압	Module_3 입력 전압

- 각 회생 컨버터 모듈 - 입력 전류 측정 파형



<그림 3-1-152> 입력 전류 측정 파형

<표 3-1-51> 측정 채널

측정채널	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4
측정 포인트	Module_1 입력 전류	Module_2 입력 전류	Module_3 입력 전류	Module_4 입력 전류

- 각 회생 컨버터 모듈 - 출력 전압 측정 파형

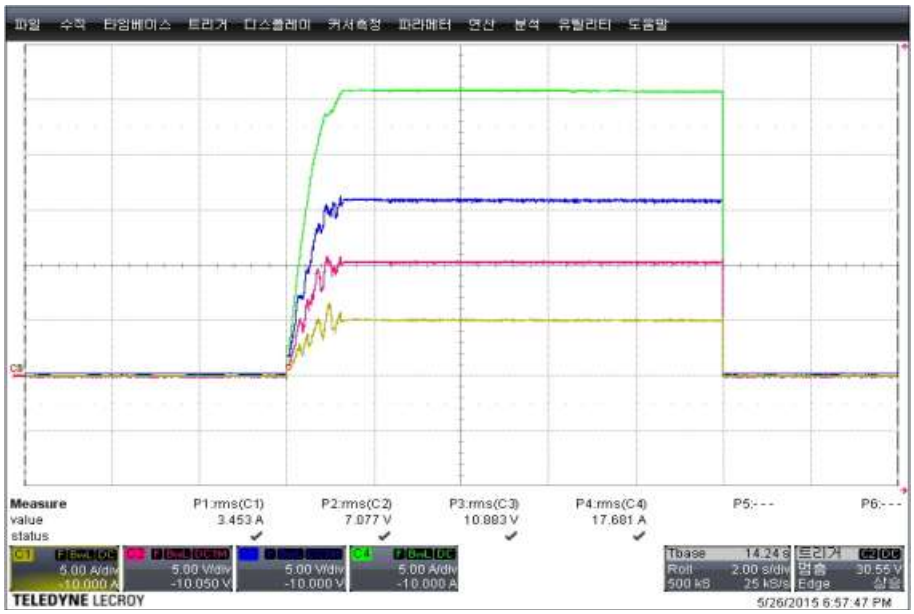


<그림 3-1-153> 출력 전압 측정 파형

<표 3-1-52> 측정 채널

측정채널	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4
측정 포인트	Module_1 출력 전압	Module_2 입력 전류	Module_3 입력 전압	Module_4 입력 전류

- 회생 컨버터 모듈 - 출력 전류 측정 파형

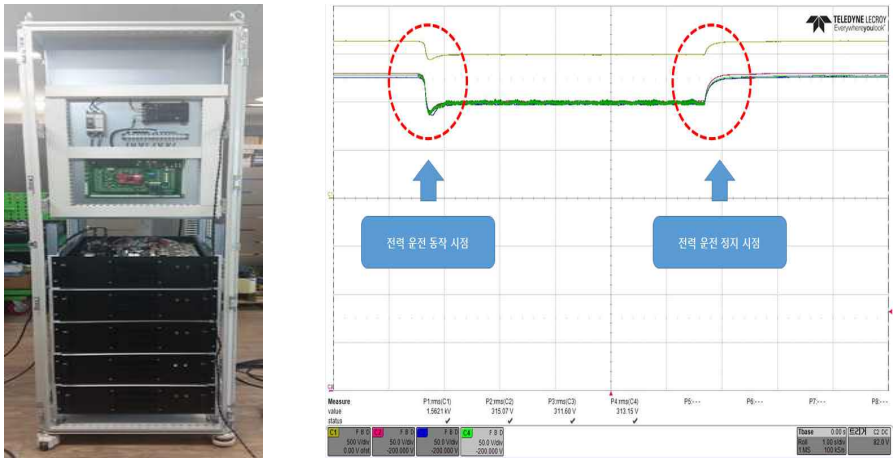


<그림 3-1-154> 출력 전류 측정 파형

<표 3-1-53> 측정 채널

측정채널	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4
측정 포인트	Module_1 출력 전류	Module_2 출력 전류	Module_3 출력 전류	Module_4 출력 전류

- 각 회생 컨버터 모듈 - 출력 전류 측정 파형 (정격 전압 TEST)



<그림 3-1-155> 출력 전류 측정 파형

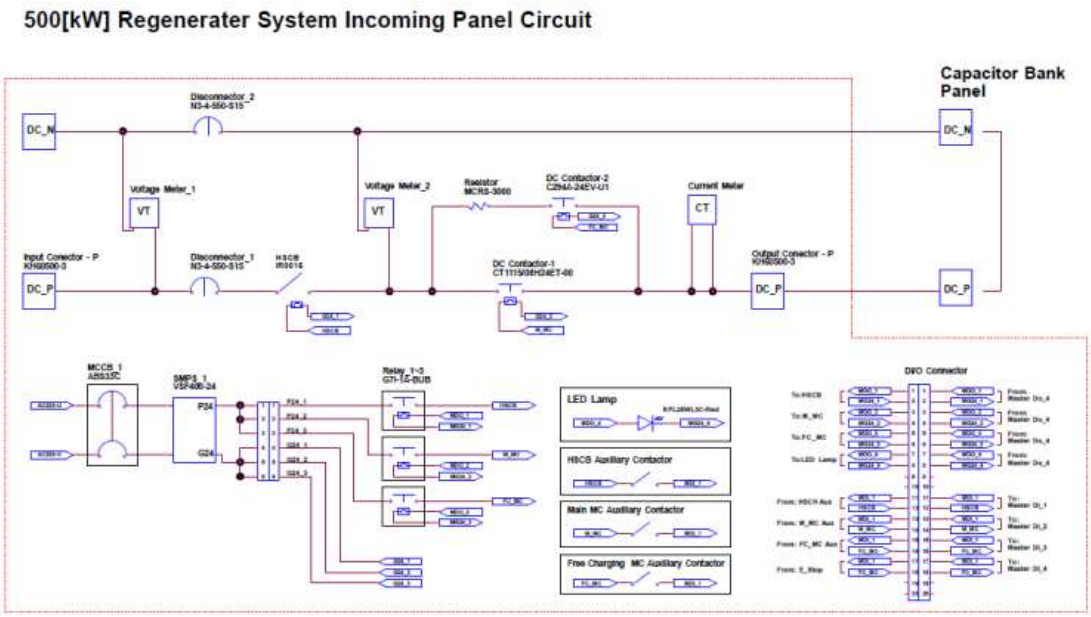
<표 3-1-54> 측정 채널

측정채널	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4
측정 포인트	입력 전압	입력 전류	출력 전압	출력 전류
Color	YELLOW	RED	Blue	Green
Value	1700[Vdc]	300[Vdc]	300[Vdc]	300[A]

(10) Incoming Part 개발

- 500[kW] 회생 에너지 시스템과 가선전압을 절체하기 위한 Part
- 안정적으로 전력 차단을 위한 차단기 및 Fuse 용량 선정
- 정격 전압 운전을 통해 각 전장 품 및 Incoming Part를 검증하며, 인위적인 시스템 Fault를 통해 정상 동작을 검증
- 가선 혹은 시스템의 문제 발생 시 가선과 시스템의 절체시간 측정을 위해 각 Part별 차단 시간 검증

(가) Incoming Part 회로



<그림 3-1-156> Incoming Part 회로

(나) Incoming 제작 및 주요 적용 부품 사진



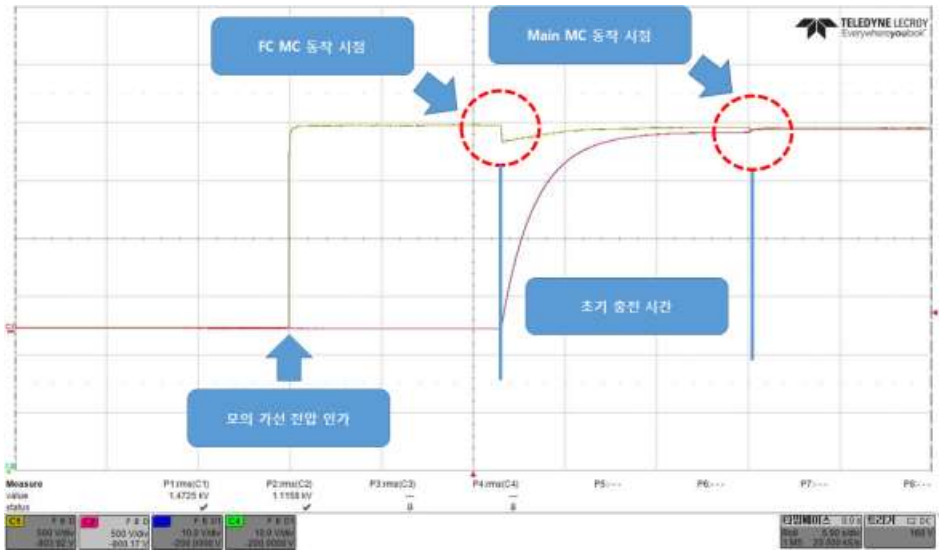
<그림 3-1-157> Incoming 제작 및 주요 적용 부품 사진

<표 3-1-55> Incoming 사양

Part	품명	제조사	사양
Disconnector_1	N3-4-550-S15	EATON	1500[V], 500[A]
Disconnector_2	N3-4-550-S15	EATON	1500[V], 500[A]
HSCB	IR3015	MICROEKCTTRICA	1800[V], 1500[A], O.P Time < 50[msec]
DC_Fuse		Mersen	2000[V], 400[A]
DC MC_1	CT1115	SCHALTBAU	1500[V], 800[A], O.P Time < 50[msec]
DC MC_2	C294A	SCHALTBAU	1500[V], 50[A]

(다) Incoming Part Test

- 시퀀스 운전별 초기 동작 및 정격 전압 Test = 1800[Vdc] 인가 시 전체 전장 구성품의 내전압 문제가 없으며, 초기 충전 시간 및 이에 따른 전위차에 따른 과전류 현상이 발생 하지 않음.



<그림 3-1-158> Incoming Part Test 결과

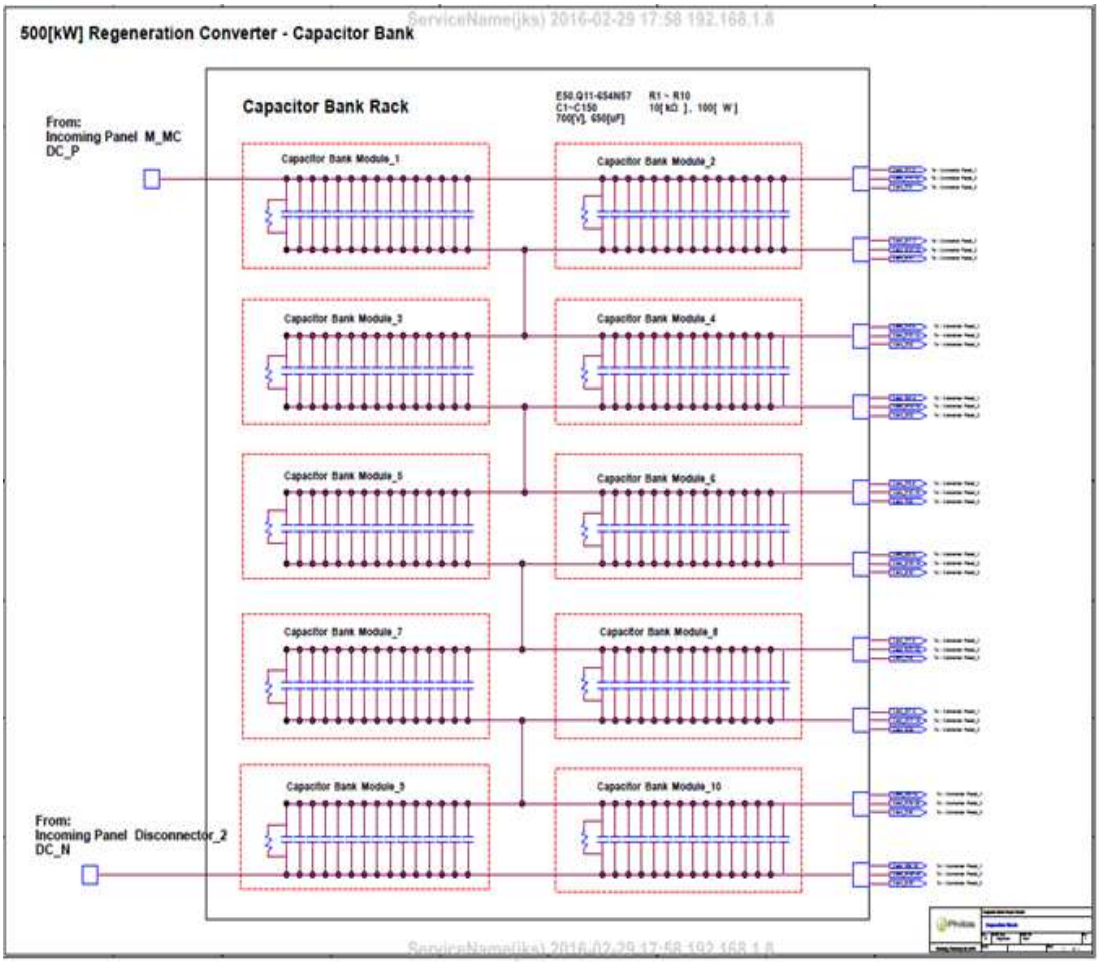
<표 3-1-56> 측정 채널

측정채널	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4
측정 포인트	가선 전압	Cap Bank 전압		
Color	YELLOW	RED		
Value	1750[Vdc]	1750[Vdc]		

(11) Capacitor Bank 개발

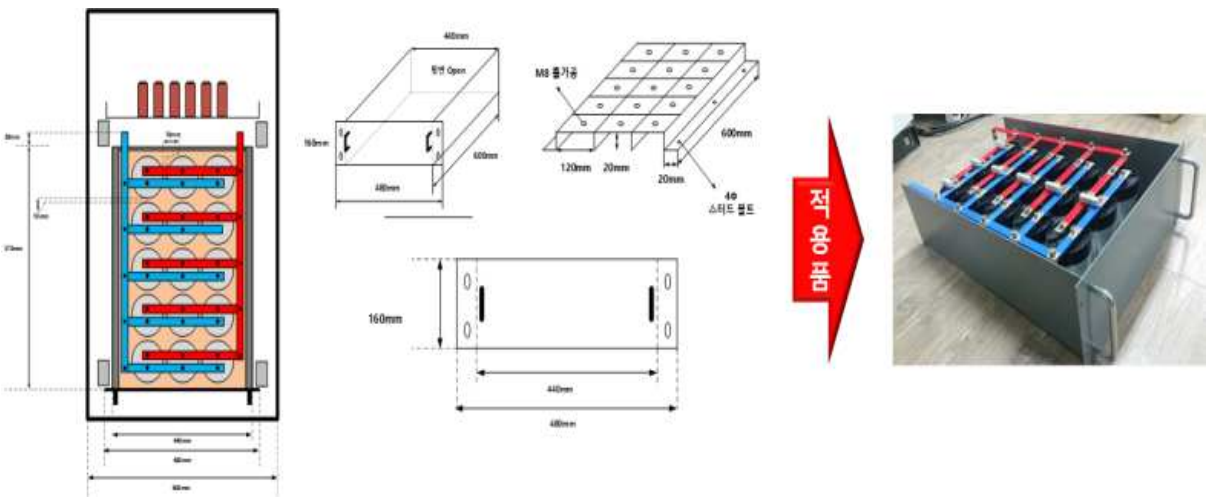
- 회생에너지 시스템의 산정을 하며, 시스템 구동 시 필요한 에너지 량을 산출하며, 그에 따른 Capacitor Bank 용량 설계
- 모의 가선 전압인가를 통한 Capacitor Bank 모듈별 전압 분압 Test
- 모의 가선 전압 인가 및 회생 컨버터 동작을 통해 Capacitor Bank의 전압 밸런싱 검증

(가) Capacitor Bank 구성 회로도



<그림 3-1-159> Capacitor Bank 구성 회로도

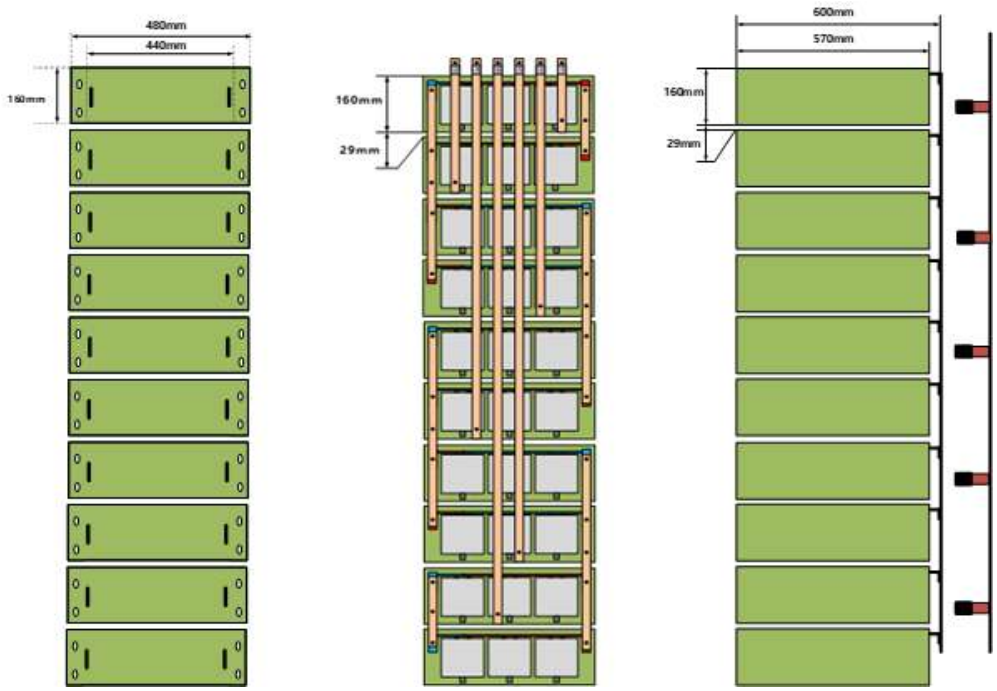
(나) Capacitor Bank - 구성 단위 Module 기구 설계 및 제작 사진



<그림 3-1-160> Module 기구 설계 및 제작 사진

(다) Capacitor Bank Rack 기구 설계 및 제작 사진

- Capacitor Bank 기구 설계



<그림 3-1-161> Capacitor Bank 기구 설계

- Capacitor Bank 제작 사진



<그림 3-1-162> Capacitor Bank 제작

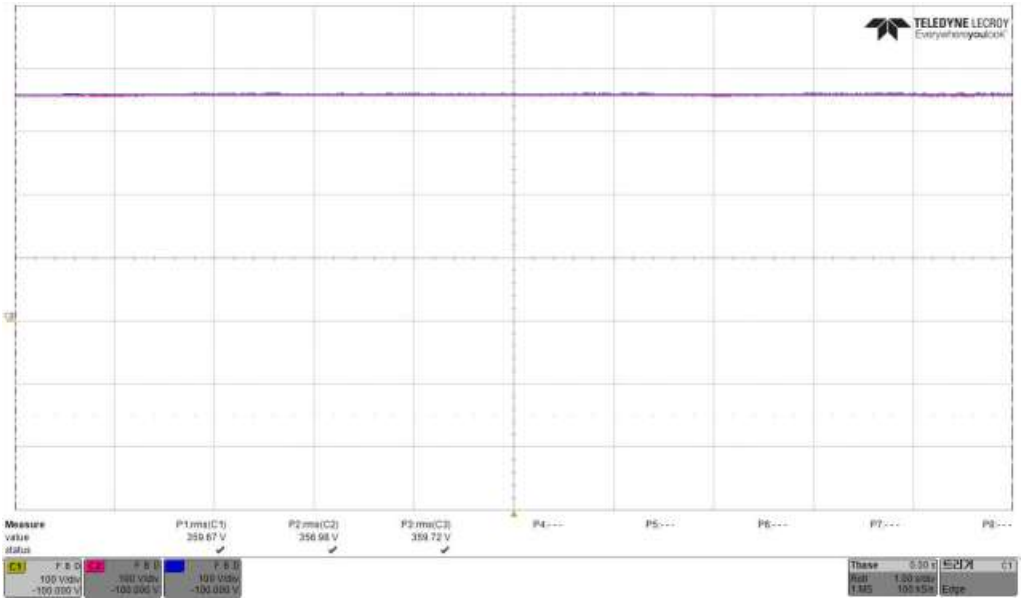
<표 3-1-57> Capacitor사양, Capacitor Bank 사양

Capacitor 사양	
품명	E50.Q11-654N57
제조사	Electronicon
용량	650uF
Rated Voltage	700Vdc
Rated Current	40A
Temperature	-45 ~ 80°C

Capacitor Bank 사양	
직, 병렬 구성	5직렬, 30병렬
모듈 운전 전압	300 ~ 400V
최대 운전 전류	1000 ~ 1200[A]
전압 Ripple	10% 이하

(라) Capacitor Bank Test 결과

- 정격 전압 인가 시 5직렬로 구성된 Capacitor Bank 분압 Test 결과
- 각 모듈별 1[%] 이내 오차발생으로 분압 됨을 확인 할 수 있음.



<그림 3-1-163> Capacitor Bank Test 결과

<표 3-1-58> 측정 채널

측정채널	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4
측정 포인트	Cap Module_1 전압	Cap Module_3 전압	Cap Module_5 전압	
Color	YELLOW	RED	Blue	
Value	360[Vdc]	357[Vdc]	360[Vdc]	

바. **시스템 단위 설계, 제작, 성능평가**

- 회생컨버터 시스템은 가선전압을 5개의 모듈로 직렬로 분압하여 100[kW] 회생컨버터 Unit으로 구성되며, 100[kW] 회생컨버터 Unit을 5Set를 5병렬로 구성하여 500[kW] 회생 컨버터 System으로 구성됨.

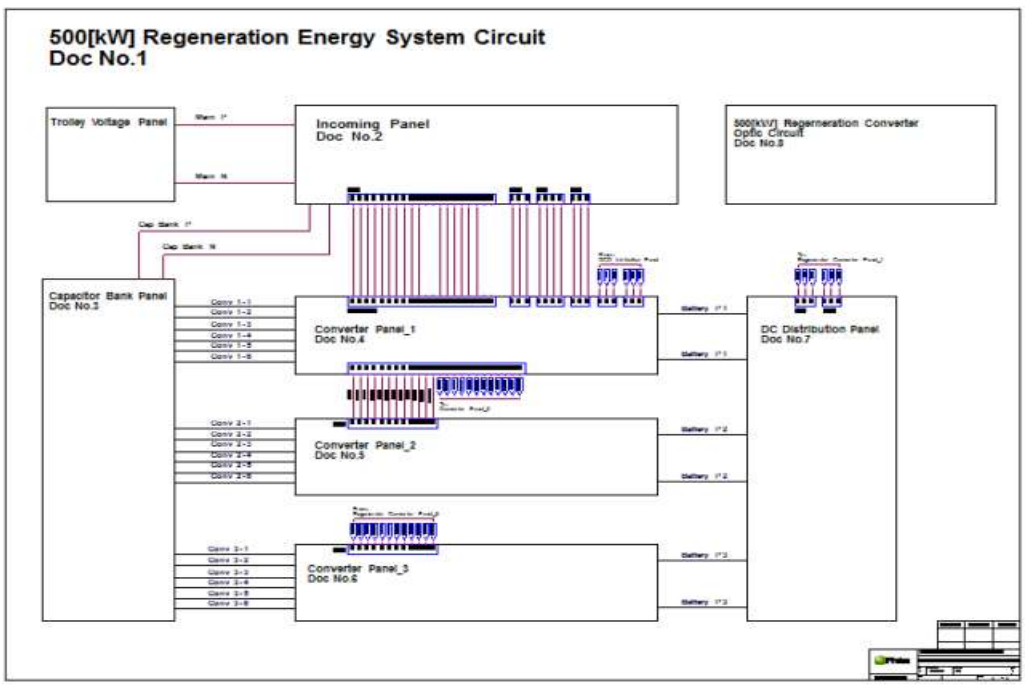
(1) 500[kW] 회생에너지 System H/W 설계

(가) 회생에너지 시스템 - 사양 설계

<표 3-1-59> 회생에너지 시스템 사양

항 목		사 양	비 고
회로 방식		Phase Shift Full Bridge DC/DC Converter	회생 컨버터 모듈 5직렬 방식 구조 회생 컨버터 유닛 5병렬 방식 구조
전력 제어 방식		입력 전압, 출력 전류 제어	
스위칭 주파수		40[kHz]	
운전시간		최대 20초 운전	회생제동 시 전력 발생 최대 시간
입력	정격용량	550[kW]	
	정격전압	1800[Vdc]	회생제동 시 가선전압 : 1800Vdc
	전압범위	1600 ~ 1800[Vdc]	가선 전압범위 : 1500 ~ 2000Vdc
	전류범위	305 ~ 350[Adc]	
	최대전류	400[Adc]@10초 이내	평균 회생제동 시간 : 10초 내외
출력	정격용량	500[kW]	시간당 회생 평균전력 : 약 55.6[kW]
	정격전압	700[Vdc]	저장장치 Battery 전압
	전압범위	588 ~ 815[Vdc]	Battery 운전 전압
	정격전류	600 ~ 850[Adc]	
	최대전류	900[Adc]@10초 이내	10 sec 이내

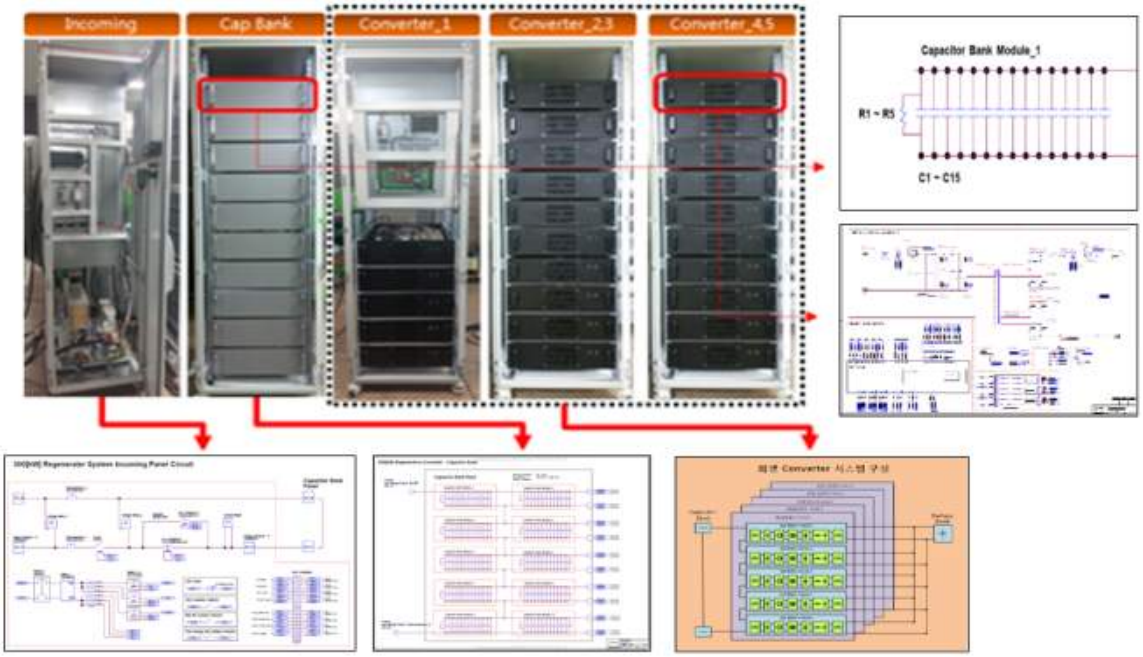
(나) 회생에너지 시스템 - 회로 설계



<그림 3-1-164> 회로 설계

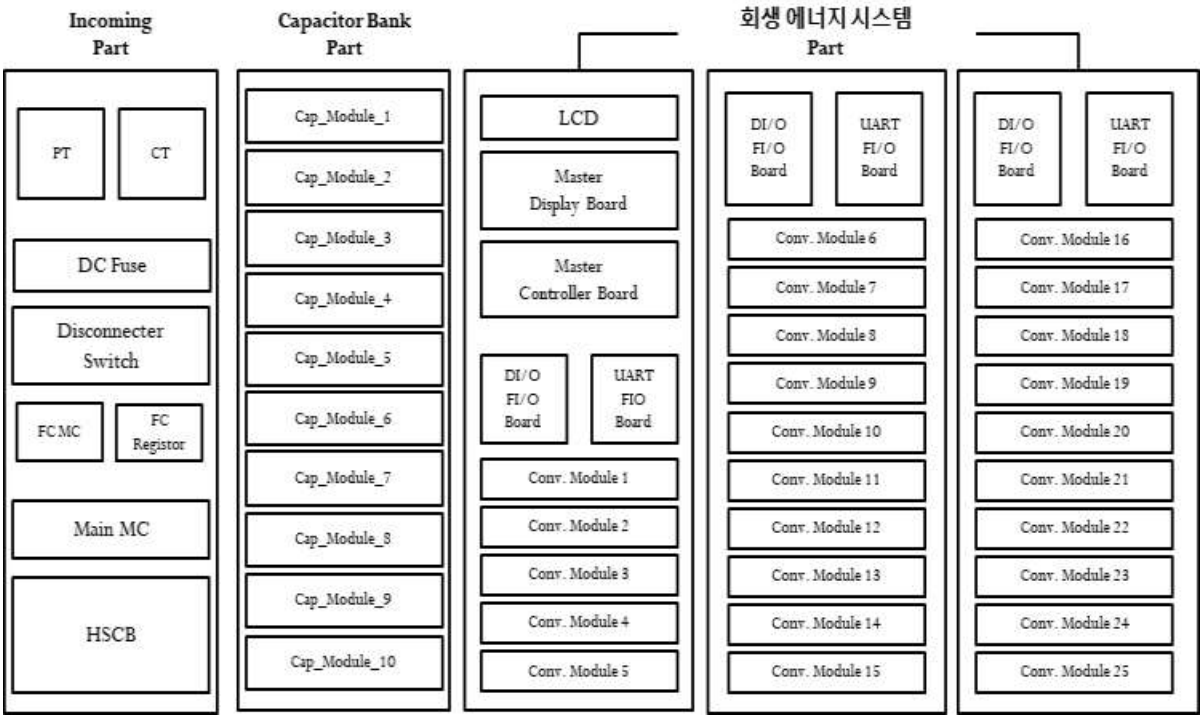
(다) 회생에너지 시스템 - 시스템 구성

- 시스템 구성 사진 및 구성품



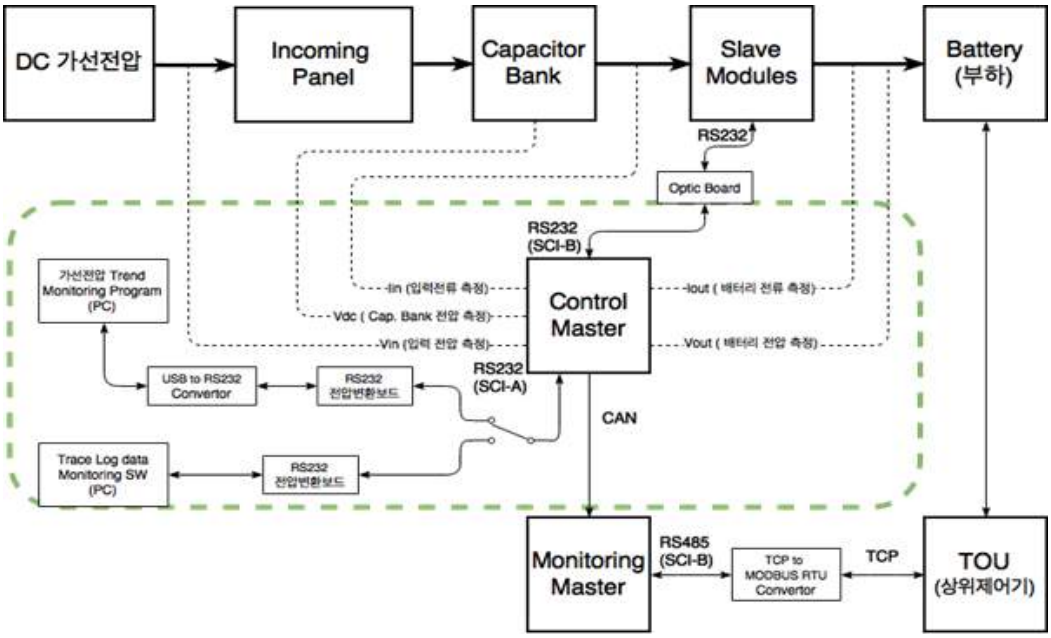
<그림 3-1-165> 시스템 구성 사진

- 시스템 구성 전체 및 각 Part 구성 항목 계략도



<그림 3-1-166> 시스템 구성 및 계략도

• 시스템 구성 및 제어기 Part 전체 블록도



<그림 3-1-167> 시스템 구성 및 제어기 Part 전체 블록도

(2) 회생에너지 시스템 S/W Part 설계

(가) Control Master 정의

• Control Master(CM)는 MC 접점(HSCB, FC_MC, Main_MC)과 센싱된 데이터(가선전압(Vin), Cap. Bank전압(Vcap), 배터리전압(Vout), 입력전류(Iin), 배터리전류(Iout))를 검출하여 상태 진단을 한 후 Slave 모듈에 Run/Stop 신호를 주며, 각 Slave 모듈들의 센싱 데이터와 Fault 상태를 모니터링 하면서 TOU(상위제어기)로 데이터를 전송하기까지 시스템 전반에 걸친 제어 시퀀스 및 모니터링 역할을 담당하고 있음.

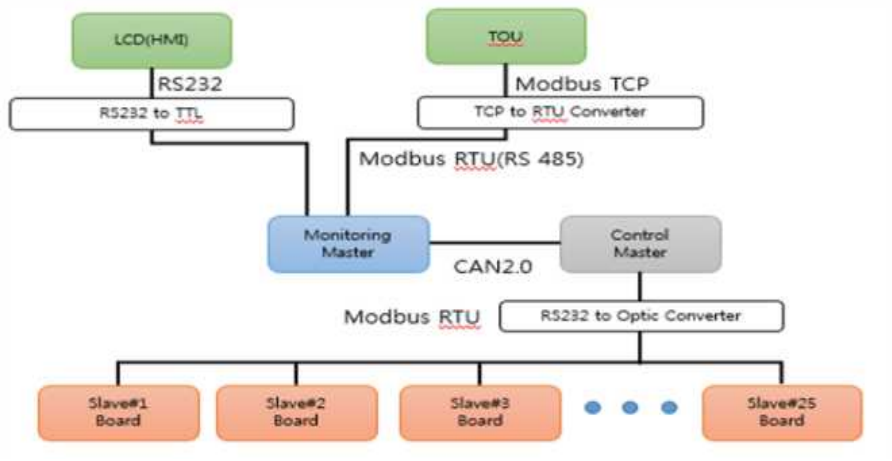
(나) Control Master의 기능

<표 3-1-60> Control Master 특징

기본 동작 제어	· 운전전압 : 1620V · 최대 운전 시간 : 15초 · 정지전압 : 1580V (운전 정지 전압 및 운전 시간 가변 가능)
상태 정보에 따른 전력 운전 제어	· 가선전압 설정 레벨에 따라 Incoming Panel의 HSCB, FC_MC, Main_MC를 On/Off 시키고 Cap.bank전압과 배터리전압을 확인하여 전력 운전 준비가 완료되면, Slave 모듈에 Run/Stop 신호를 보내어 회생에너지를 충전함.
입출력 신호 제어	· HSCB, FC_MC, Main_MC 로 On/Off 명령을 보내고, DI 포트로 접점신호를 받아 제어 조건으로 활용 · Run/Stop 신호를 Slave모듈에게 DO로 지령을 내리고, Optic보드에서 전체 Slave모듈의 Ready신호의 DO와 AND로 연결하여 Fault 발생 시 Run/Stop 신호의 DO를 차단해 전력 운전을 정지시킴.
고장 발생 시 대응	· Slave 모듈 중 하나라도 Fault가 발생되면 기동을 멈춤. · 타 장비에서 Fault가 발생 시 TOU로부터 지령을 받아 기동을 멈춤. (통신 동작 확인, 시퀀스 구현 예정)

(3) 회생에너지 시스템과 상위제어기 통신 설계

(가) 회생에너지 시스템 ↔ 상위제어기 통신 블록도



<그림 3-1-168> 회생에너지 시스템 ↔ 상위제어기 통신 블록도

(나) 회생에너지 시스템 ↔ 상위제어기 통신 블록도 - 통신 항목



<그림 3-1-169> 회생에너지 시스템 ↔ 상위제어기 통신 블록도 - 통신 항목

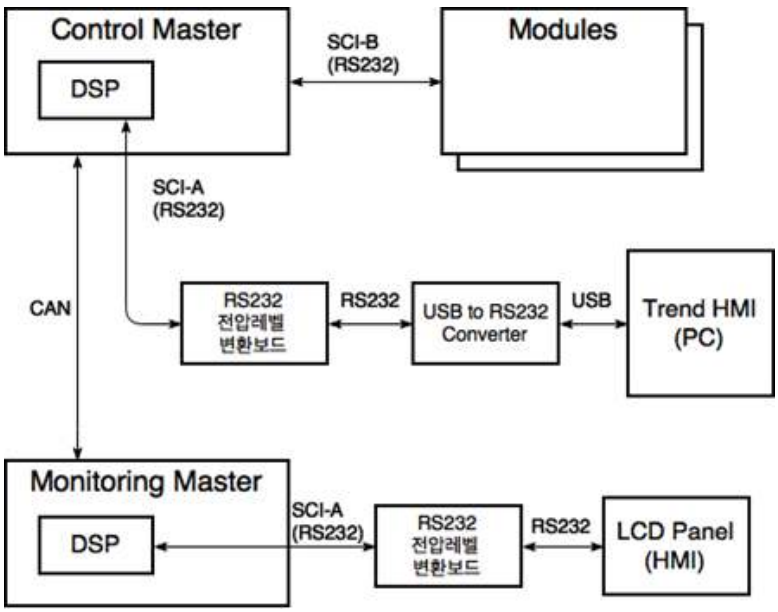
(다) 회생에너지 시스템 ↔ 상위제어기 통신 Test 세부 항목

<표 3-1-61> 회생에너지 시스템 ↔ 상위제어기 통신 Test 세부 항목

항목	통신 Test 세부 항목
Slave ↔ Control Master	입력전압/출력전압/Battery 전압/입력전류/출력전류/상태정보/고장 정보
Control Master ↔ Monitoring Master	Slave 통신 입력전압/출력전압/Battery 전압/입력전류/출력전류/상태정보/고장정보 Master 가선전압/DC Link전압/배터리전압/State of PCS/고장/가선전류/가선전력
TOU (상위제어기) ↔ Monitoring Master	Slave / Master 항목 통신 확인 완료
LCD(HMI) ↔ Monitoring Master	Slave / Master 항목 통신 확인 완료

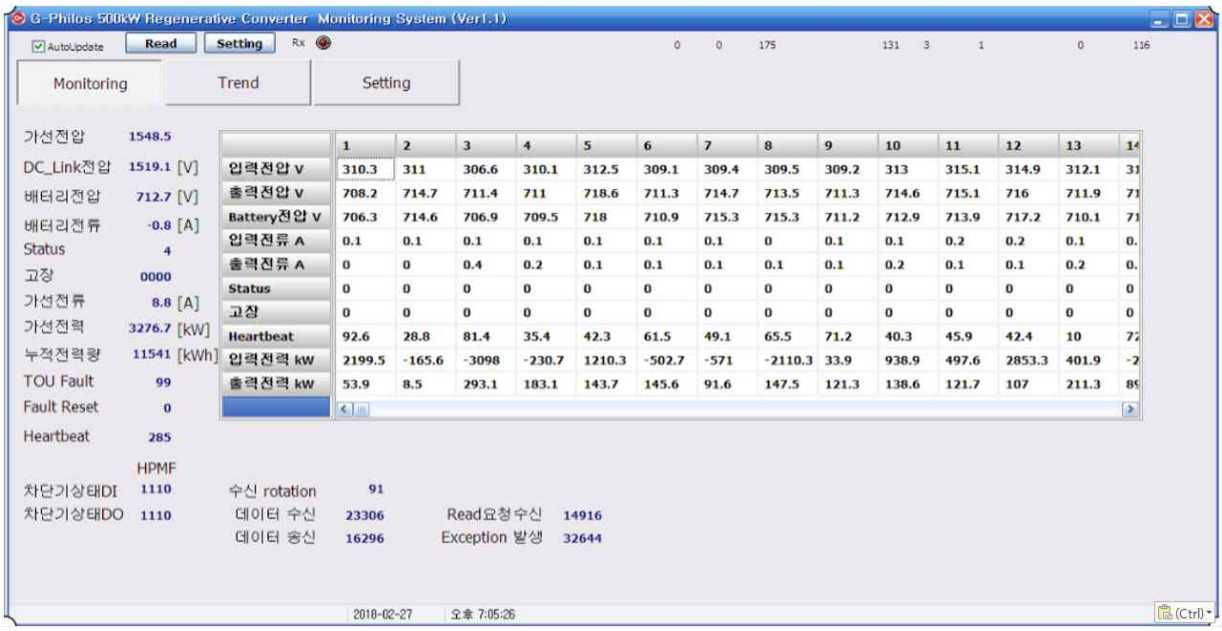
(라) Trend - 원격 Data 확인 기능

- 회생 시스템의 시간별, 일별, 월별, Data 분석용으로 활용
- Monitoring Master에서 Trend HMI를 연결하여 Slave 모듈뿐만 아니라 Control Master의 센싱 데이터 모두를 History로 엑셀파일에 저장하는 기능. 주로 Slave의 입력 전압, 전류의 변화를 실시간으로 관찰하는 용도로 0.5초 주기로 통신, 로그 데이터 저장 주기는 1초임.



<그림 3-1-170> Trend 시스템 블록도

- Trend Data 모니터링 화면 - 현장 실시간 운전 Data 원격 확인

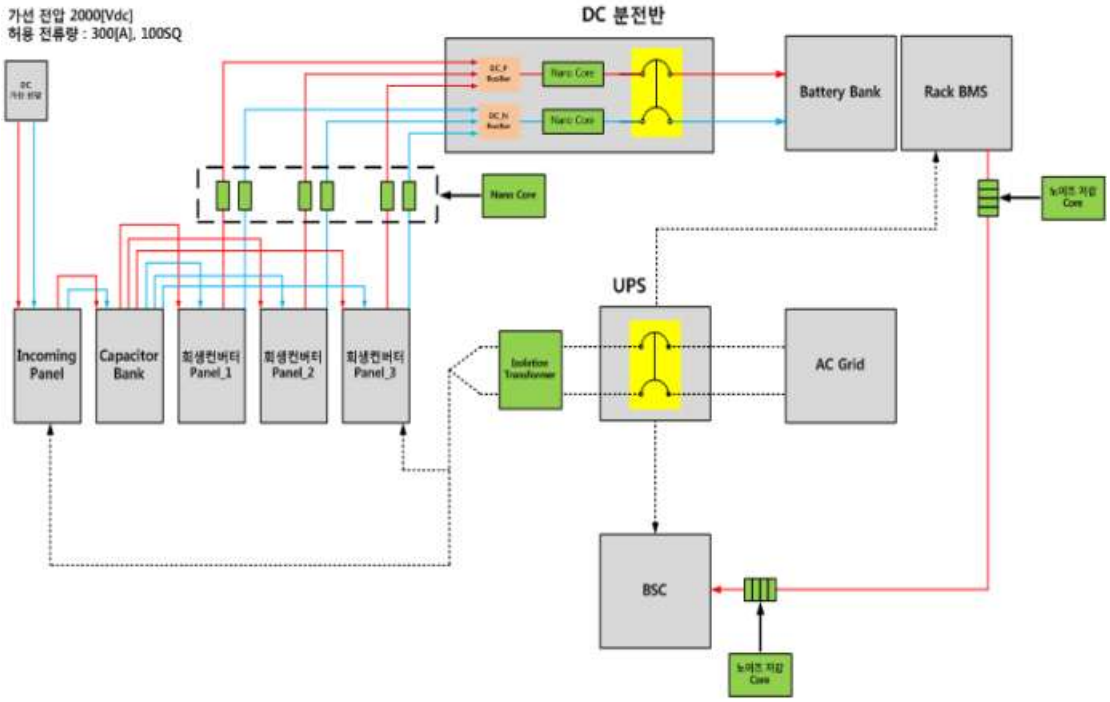


<그림 3-1-171> Trend 데이터 수집

사. 테스트베드 구축

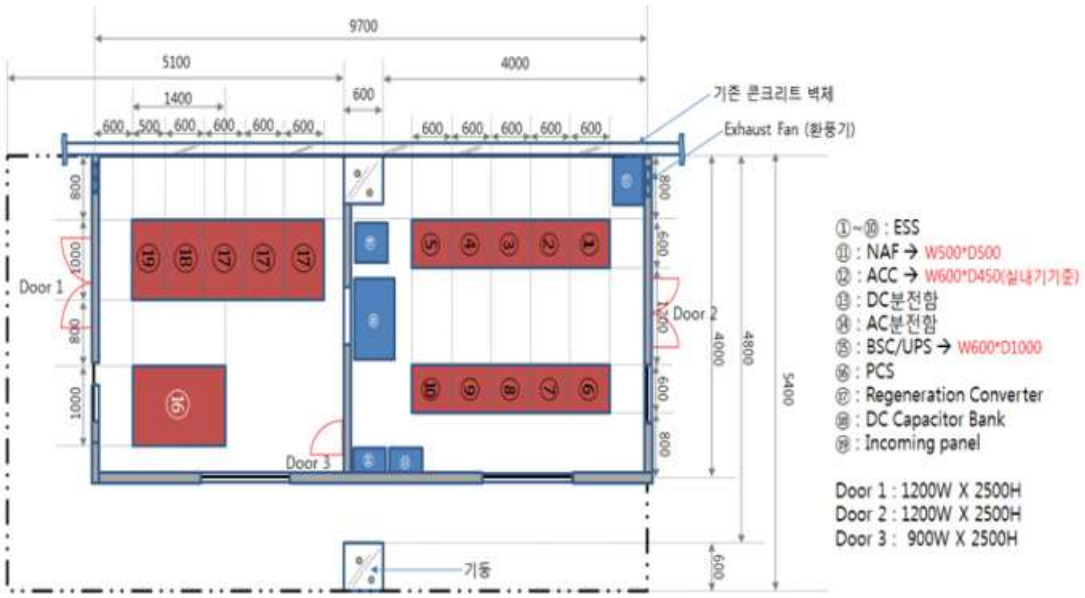
(1) 테스트베드 구축

- 현장 구축 배선도



<그림 3-1-172> 현장 구축 배선도

- 현장 구축 배치도



<그림 3-1-173> 현장 구축 배치도




<그림 3-1-174> 현장 구축 사진

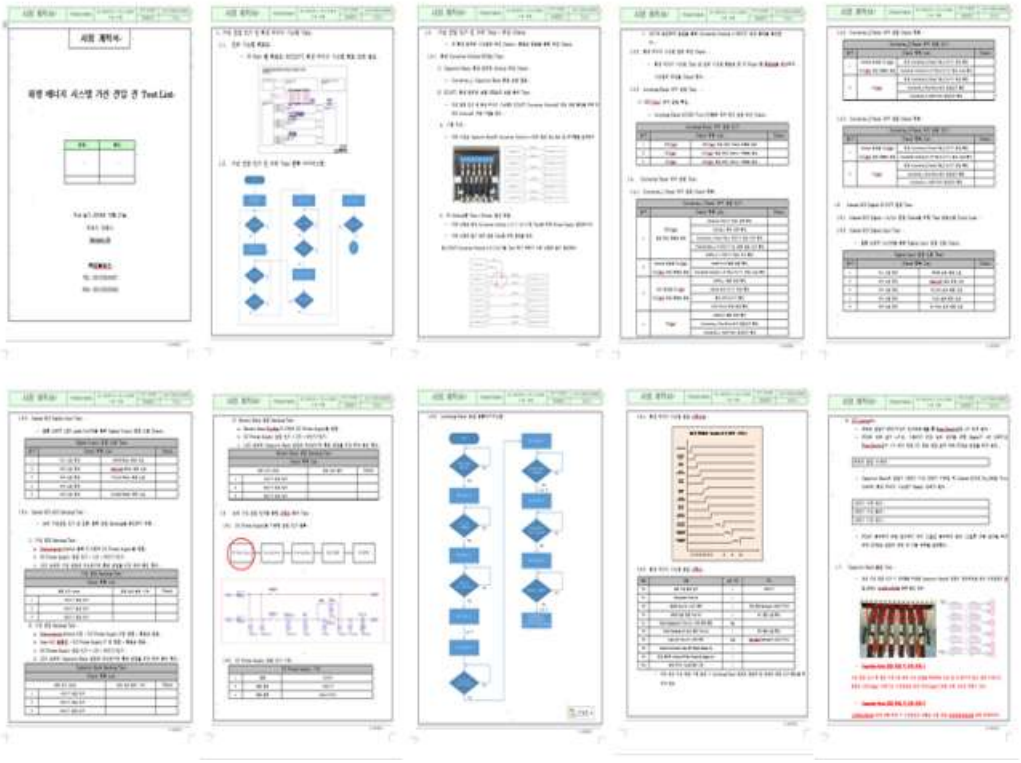
(2) 현장 구축 시스템 사양

<표 3-1-62> 현장 구축 시스템 사양

항 목	사 양	비고
정격 용량	500[kW]	시스템 용량
입력 전압 운전 범위	1600 ~ 1800[V]	가선전압 범위
정격 전류	310[A]	최대 입력 전류
출력 전압 운전 범위	588 ~ 815[V]	Battery 운전 범위
정격 출력 전류	850[A]	최대 충전 전류
시스템 구성	20[kW] 회생 컨버터 모듈 5직렬 × 5병렬 (5 Unit)	시스템 용량 구성
전력 제어 방식	컨버터 모듈 개별 제어	Master Run/Stop Optic 지령
시스템 효율	94[%] 이상	정격 운전 기준
적용처 및 용도	회생 에너지 Battery 저장 장치	개발 목적

(3) 현장 구축 시스템 운영시험 및 종합 성능평가

(가) 회생에너지 시스템 - 회생에너지 전력변환장치 현장 설치 완료 및 시험 절차서

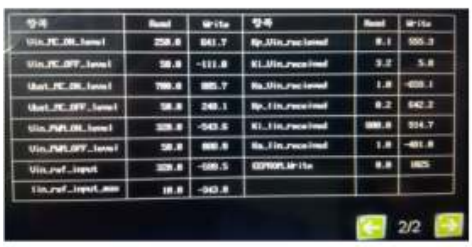


<그림 3-1-175> 회생에너지 전력변환장치 현장 설치 완료 및 시험 절차서

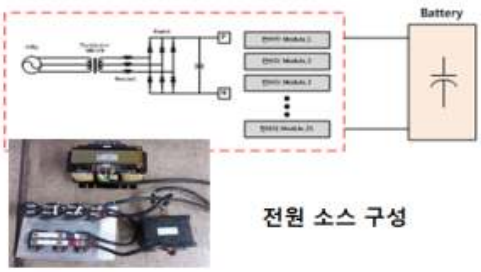
(나) 회생 시스템 단독운전 TEST 시험 결과

① 시험 환경 구성 및 각 모듈 운전 Level 설정

Module 동작 설정 LCD 화면



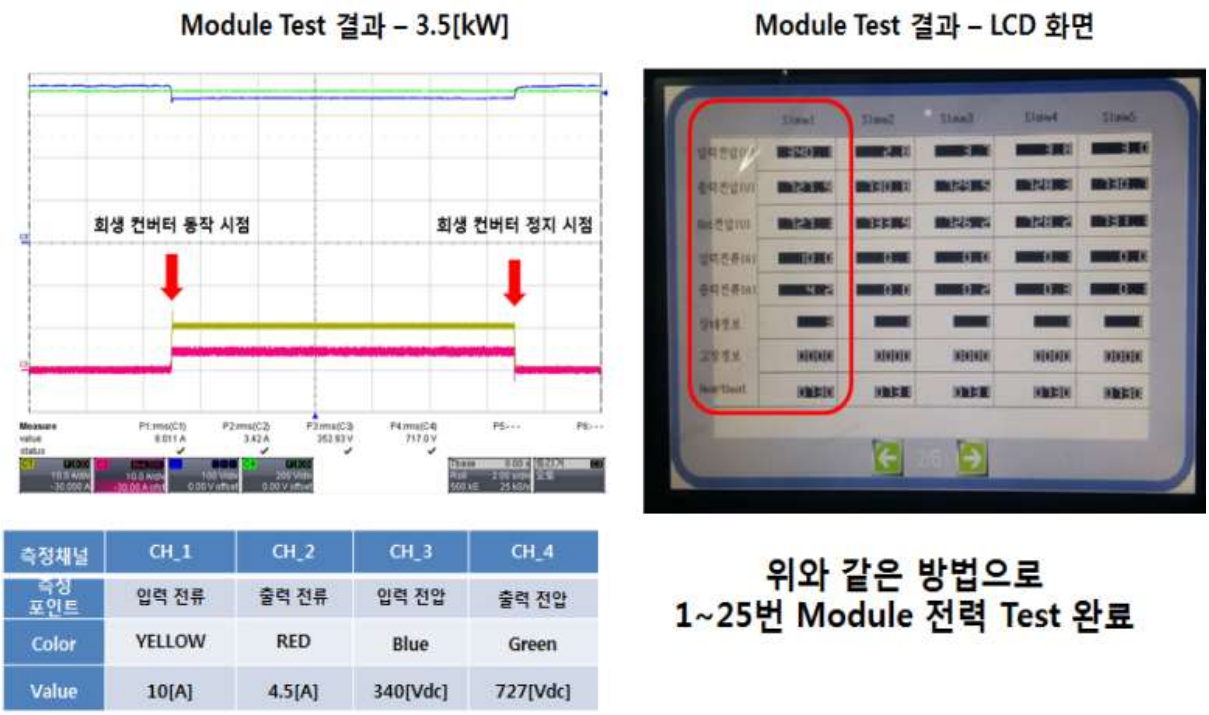
Module 시험 구성



설정 Parameter	Value	비고
Vin MC On Level	250[V]	입력 전압이 250[V]이상 일 때 10초 후 Input MC Turn On
Vin MC Off Level	50[V]	전압 도달 즉시 Input MC Off
Vbat MC On Level	700[V]	Battery 전압이 700[V]이상 일 때 10초 후 Output MC Turn On
Vbat MC Off Level	50[V]	전압 도달 즉시 Output MC Off
Vin PWM On Level	320[V]	입력 전압이 320[V] 이상 일 때 PWM On 조건이 만족한다.
Vin PWM Off Level	50[V]	입력 전압이 50[V] 이하 일 때 PWM은 동작 하지 않는다
Vin ref input	320[V]	입력 전압 제어 320[V]
Iin ref input	10[A]	입력 전류 제어 10[A]

<그림 3-1-176> 시험 환경 구성 및 운전 Level 설정

② 회생 컨버터 단위 모듈 25[EA] Module Test



측정채널	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4
측정 포인트	입력 전류	출력 전류	입력 전압	출력 전압
Color	YELLOW	RED	Blue	Green
Value	10[A]	4.5[A]	340[Vdc]	727[Vdc]

<그림 3-1-177> Module Test 결과

- 회생 컨버터 단위 모듈 운전 Level 설정 및 제어 블록도
  - 입력 전압 전류 제어 방식 - 제어기 Reference 설정 값

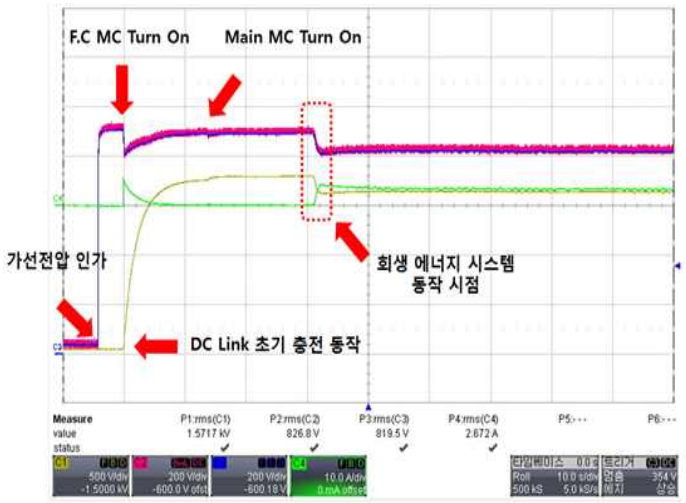
<표 3-1-63> 제어기 설정 값

항 목	사 양
입력 전압 Ref	320[V]
입력 전류 Ref	50[A]

- 회생 컨버터당 모듈 운전 범위 = 320 ~ 380[V]
- 회생 컨버터 최대 운전 전력량 = 1800 / 5 = 360 × 50 = 18kWh
- 회생 컨버터 시스템 최대 운전 가능 전력량 = 18 × 25 = 450kWh

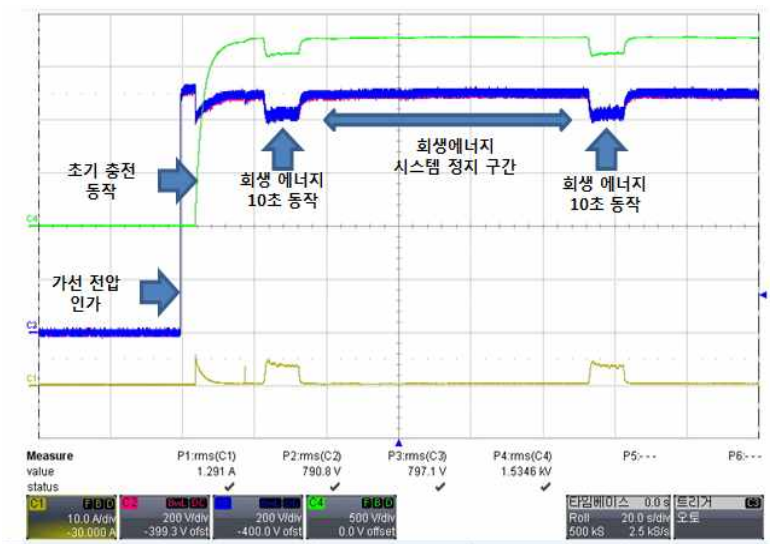
③ 회생에너지 시스템 - 모의 가선 전압 인가 전력 Test

- 회생에너지 시스템 - DC 1800[V] 인가 시험 Test



Parameter	사양
모의 가선 인가 용량	4[kW]
모의 가선 전압	1800[Vdc]
시스템 입력 전류	약 4[A]
Battery Bank 충전 전력	약 7~8[kW]
Battery Bank 전압	720[Vdc]
Battery Bank 충전 전류	약 10[A]

Ch_No.	Ch_1	Ch_2	Ch_3	Ch_4
Ch_1	DC Bank 전압	입력 Top	입력 Bottom	입력 전류
Color	Yellow	Red	Blue	Green



모의 가선 자동 충전 Test

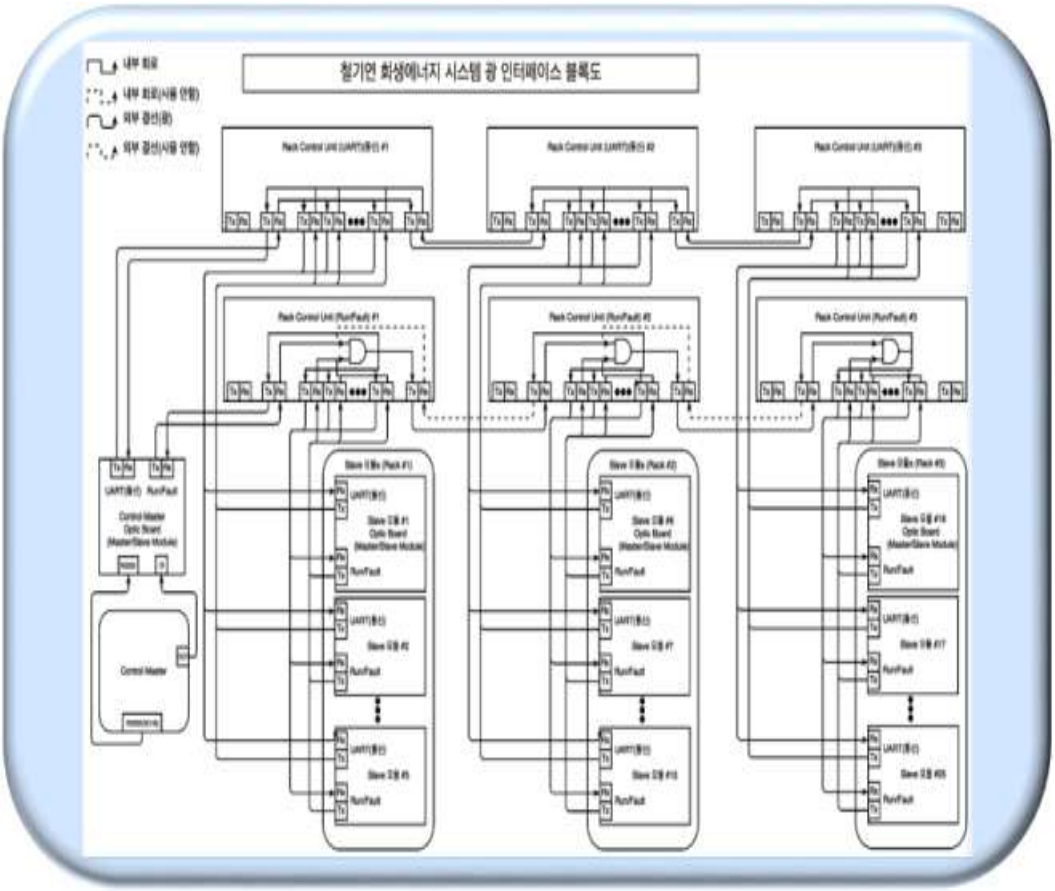
운전 주기 1분 30초

회생에너지 시스템
기동 시간 10초

Ch_No.	Ch_1	Ch_2	Ch_3	Ch_4
Ch_1	DC Bank 전압	입력 Top	입력 Bottom	입력 전류
Color	Yellow	Red	Blue	Green

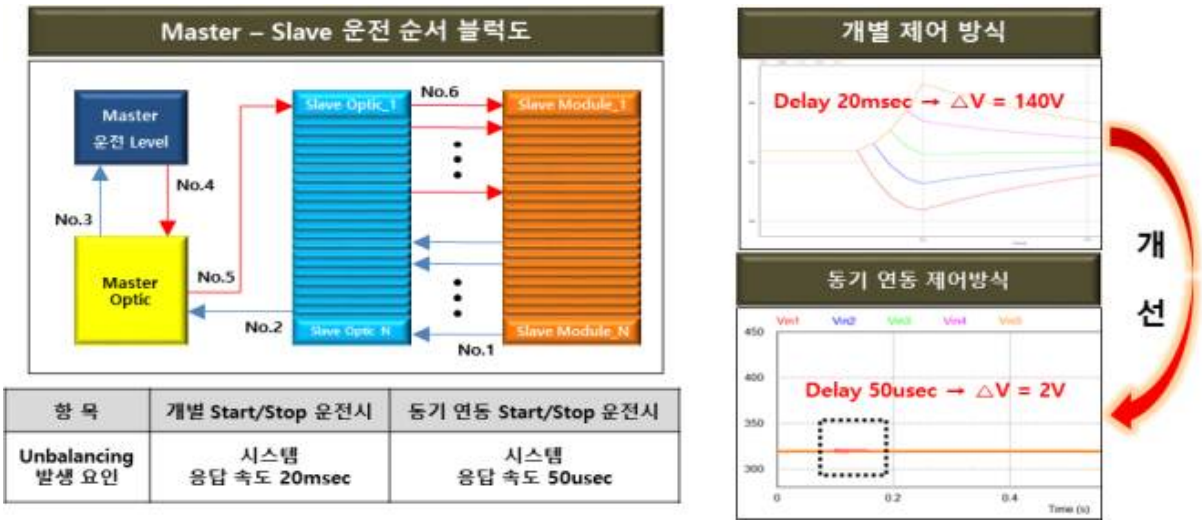
<그림 3-1-178> DC 1800[V] 인가 시험 Test 결과

- 회생에너지 시스템 - 광 인터페이스 블록도



<그림 3-1-179> 광 인터페이스 블록도

- 회생에너지 시스템 - 광 인터페이스 운전 순서도 및 시뮬레이션 결과

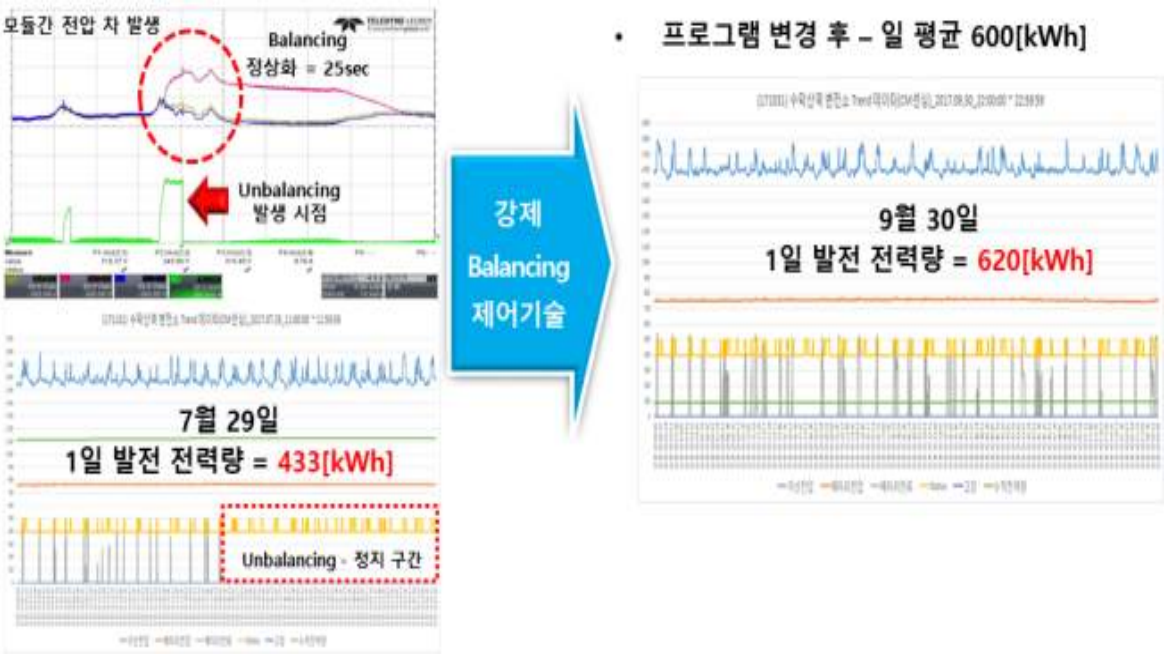


항 목	개별 Start/Stop 운전시	동기 연동 Start/Stop 운전시
Unbalancing 발생 요인	시스템 응답 속도 20msec	시스템 응답 속도 50usec

<그림 3-1-180> 광 인터페이스 운전 순서도 및 시뮬레이션 결과

- 회생에너지 시스템 - 광 인터페이스 시험 결과 (테스트베드)

  - 약 30 ~ 40[%] 회생에너지 발전 전력량 상승효과 발생



<그림 3-1-181> 광 인터페이스 시험 결과 (테스트 베드)

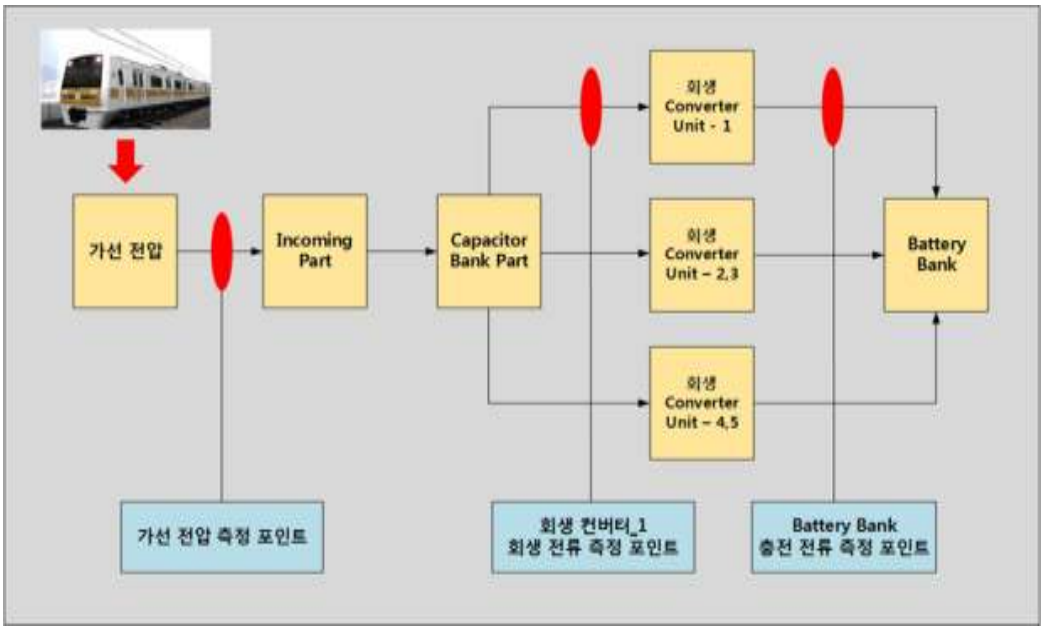
④ 회생에너지 시스템 - 가선 전압 인가 Test 결과 및 진행 사항

- 회생 에너지 시스템 정격 운전 - 설정 값

<표 3-1-64> 설정 값

Parameter	Value	비고
Master Controller 운전 시작 전압	1700[V]	회생 에너지 시스템 동작 가선 전압
Master Controller 운전 정지 전압	1650[V]	회생 에너지 시스템 동작 가선 전압
Converter Module 운전 시작 전압	320[V]	회생 에너지 시스템 구성 25[EA] 모듈 가선 분압전압
Converter Module Vin Ref 전압	340[V]	가선 전압 1700[V] / 5S = 340[V]
Converter Module Iin Ref 전압	50[A]	회생 에너지 시스템 정격 운전 설정 값 340[V] × 50[A] × 25[EA] = 425[kW]

• 회생에너지 시스템 정격 운전 - 측정 포인트

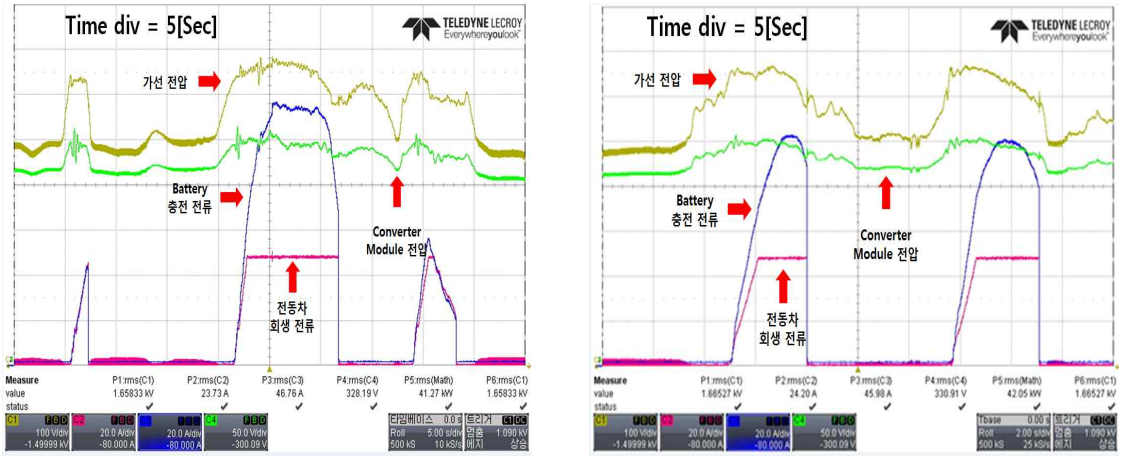


<그림 3-1-182> 측정 포인트

(다) 회생 시스템 ESS 연동 - 충전 TEST 시험 결과

① 회생에너지 시스템 정격 운전 - Test 결과 파형

• Battery 충전 에너지 약 350 ~ 400[kW]



<그림 3-1-183> Test 결과 파형

<표 3-1-65> 측정 채널

측정채널	CH_1	CH_2	CH_3	CH_4
측정 포인트	가선전압	회생전류	Battery 충전 전류	Module 입력 전압
Color	Yellow	Red	Blue	Green

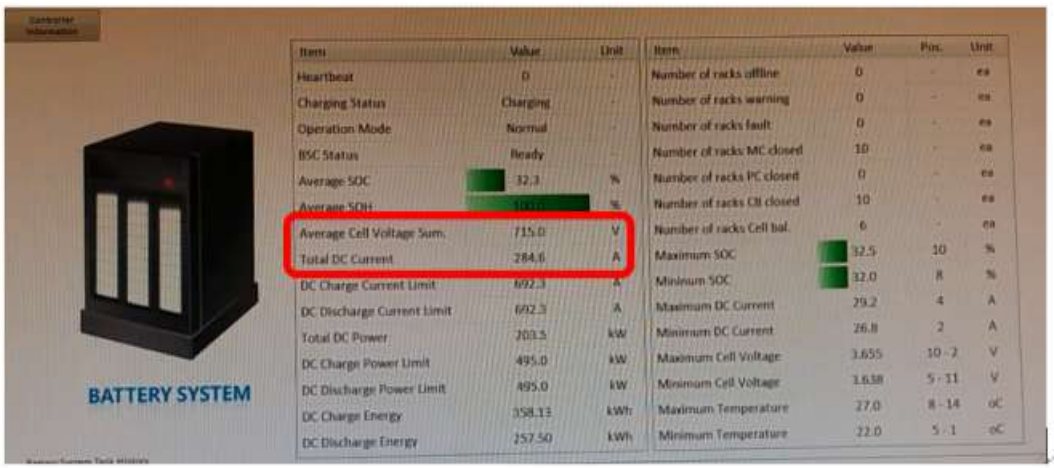
② 회생에너지 시스템 정격 운전_ Test 결과 BMS 화면

• Battery 충전 화면은 BMS 통신 주기가 1초이므로 실제 회생 에너지 시스템의 충전 전류량을 정확히 표시 할 수 없지만 전체 충전량 확인을 위해 사진으로 첨부

<표 3-1-66> Test 결과 BMS 화면

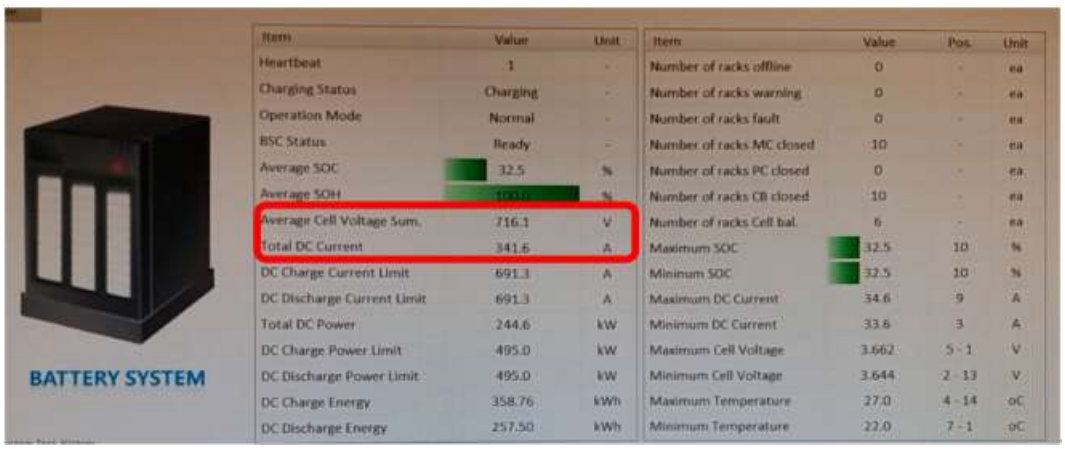
Parameter	Value	비고
Master Controller 운전 시작 전압	1700[V]	회생 에너지 시스템 동작 가선 전압
Master Controller 운전 정지 전압	1650[V]	회생 에너지 시스템 동작 가선 전압
Converter Module 운전 시작 전압	320[V]	회생 에너지 시스템 구성 25[EA] 모듈 가선 분압전압
Converter Module Vin Ref 전압	340[V]	가선 전압 1700[V] / 5S = 340[V]
Converter Module Iin Ref 전압	25 ~ 50[A]	회생 에너지 시스템 정격 운전 설정 값 212.5 ~ 400[kW]

- 회생에너지 시스템 BMS 충전 화면
  Battery 전압 715[V] × 284.6[A] = 약 200[kW]



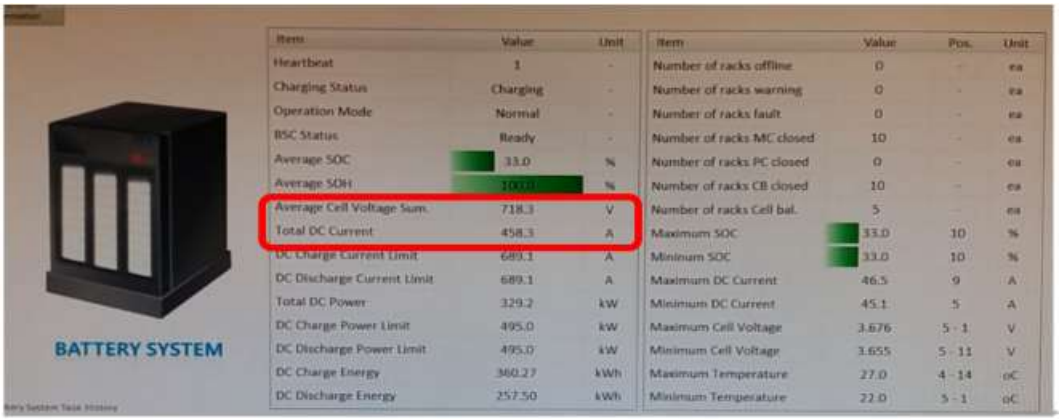
<그림 3-1-184> 충전 화면 200[kW]

- 회생에너지 시스템 BMS 충전 화면
  Battery 전압 716.1[V] × 341.6[A] = 약 250[kW]



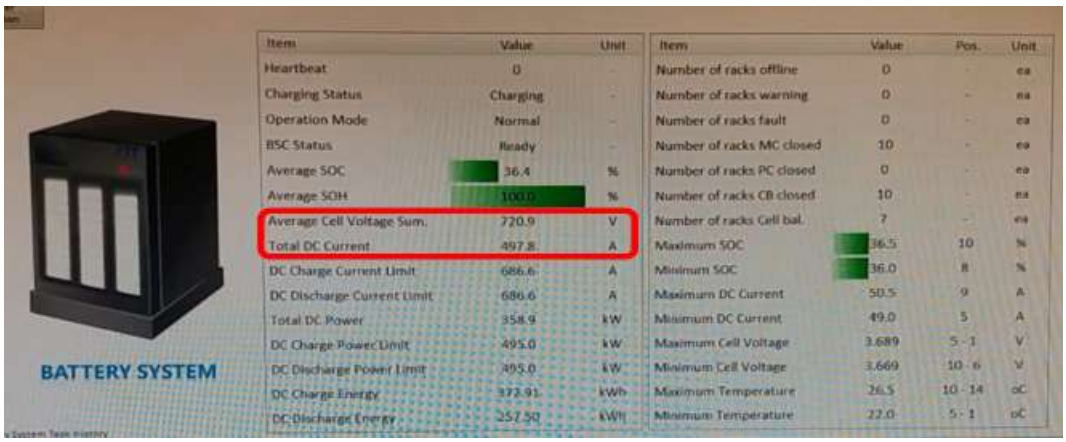
<그림 3-1-185> 충전 화면 250[kW]

- 회생에너지 시스템 BMS 충전 화면
  Battery 전압 718.3[V] × 458.3[A] = 약 330[kW]



<그림 3-1-186> 충전 화면 300[kW]

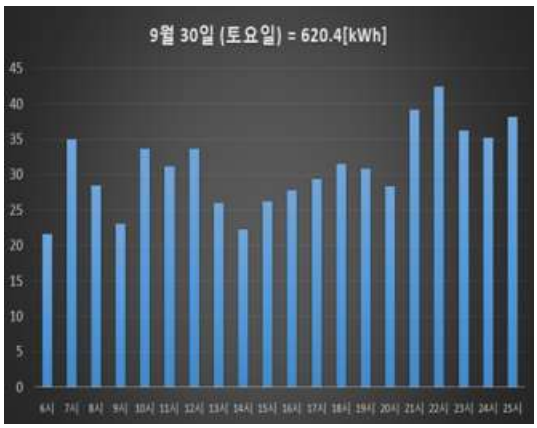
· 회생에너지 시스템 BMS 충전 화면
  Battery 전압 720.9[V] × 520[A] = 약 375[kW]



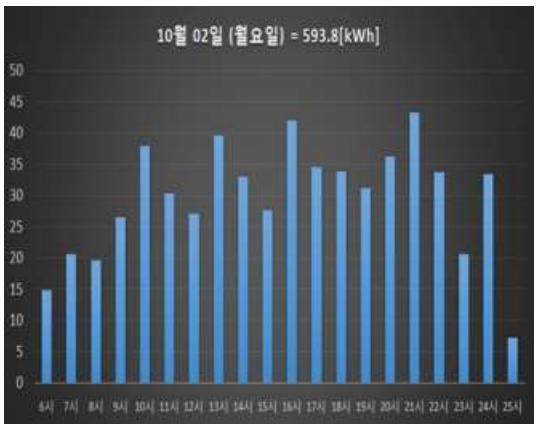
<그림 3-1-187> 충전 화면 375[kW]

(라) 회생 시스템 누적 발전량 일일 최대 발전량 Check

- 회생 시스템 일 일 누적 발전 전력량 - 시간당 평균 30[kWh] 발전



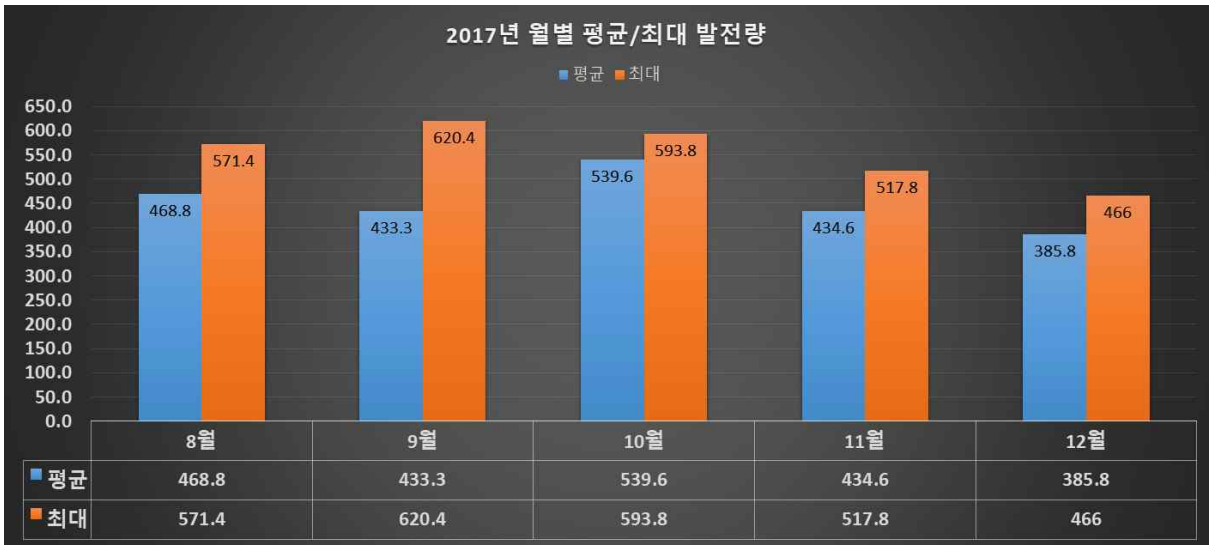
<그림 3-1-188> 9월 30일 - 약 620kWh



<그림 3-1-189> 10월 02일 - 약 594kWh

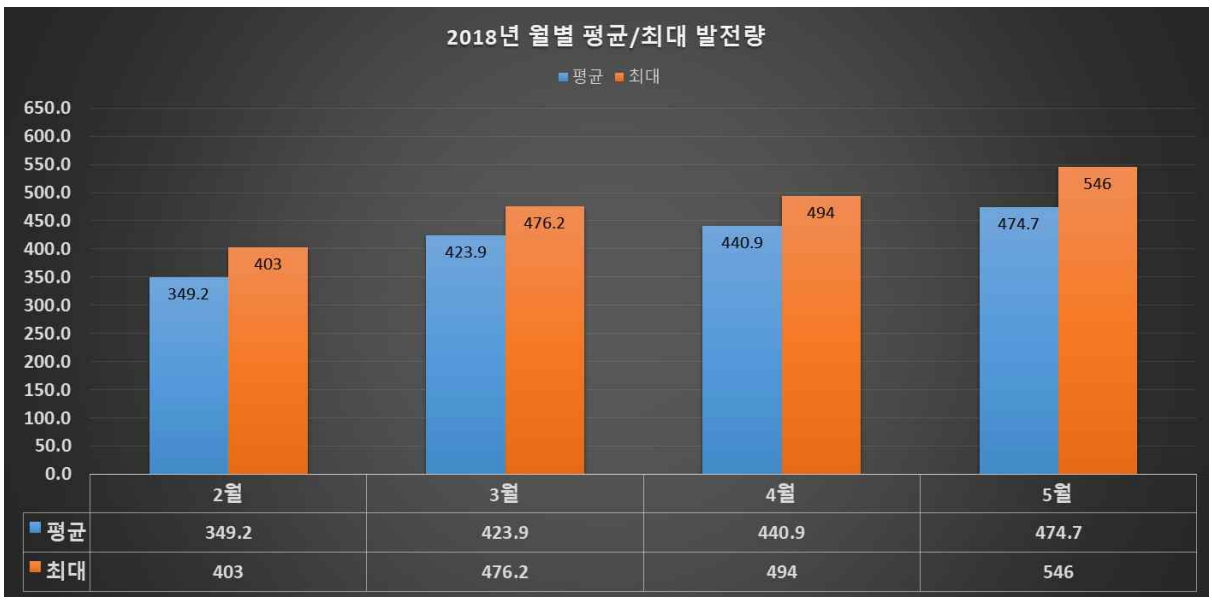
(마) 회생에너지 시스템 일일 평균 발전량 비교 Data

- 2017년 8월 ~ 12월까지 월별, 일일 평균 및 최대 전력 발전량 운전 Data



<그림 3-1-190> 일일 평균 발전량 비교(2017년 8월~12월)

- 2018년 2 ~ 05월까지 월별, 일일 평균 및 최대 전력 발전량 운전 Data



<그림 3-1-191> 일일 평균 발전량 비교(2018년 2월~5월)

(바) 회생에너지 운전 Data 분석 및 발전량 예측

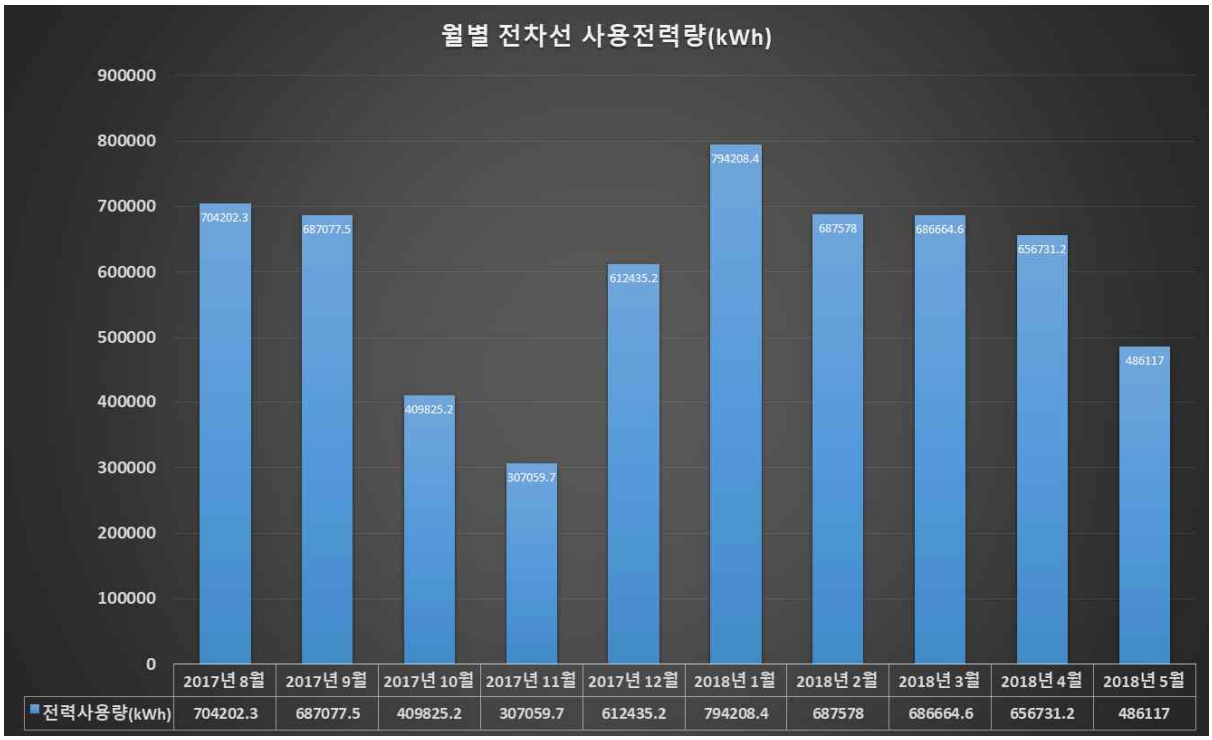
① 회생에너지 시스템 - 발전량 분석 자료

- 테스트베드 회생에너지 시스템 발전량 Data 취합

<표 3-1-67> 회생에너지 시스템 발전량

	월간 누적량	평균 발전량	일 최대 발전량	정상 동작률
17년 09월	12.5MWh	460.4kWh	620.4kWh	90[%]
17년 10월	7.6MWh	539.6kWh	593.8kWh	27[%]
17년 11월	10.3MWh	434.6kWh	517.8kWh	70[%]
17년 12월	10.1MWh	385.8kWh	466kWh	86[%]
18년 02월	9.2MWh	349.2kWh	403kWh	93[%]
18년 03월	12.3MWh	423.9kW	476.2kWh	93[%]
18년 04월	10.2MWh	440.9kWh	494.0kWh	73[%]
18년 05월 17일	3.5MWh	474.7kWh	546.0kWh	23[%]

- 수락산 변전소 - 월별 전차선 사용 전력량
  - 그래프를 통해 월별 전동차에서 소요되는 전력량이 차이나는 것을 확인 할 수 있음.

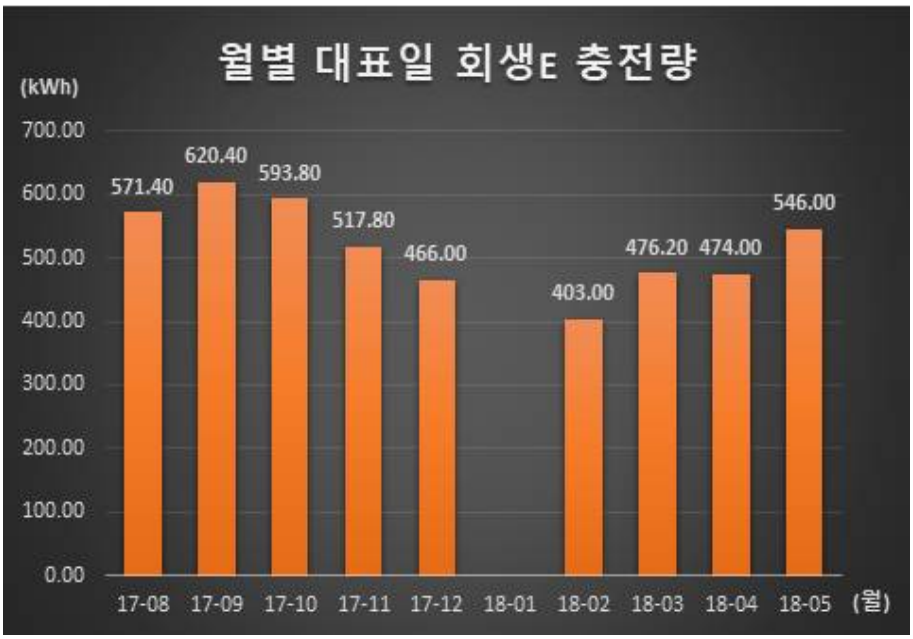


<그림 3-1-192> 월별 전차선 전력사용량

- 테스트베드 - 회생에너지 시스템 운전 시간 측정 Data 분석
  - 그래프를 통해 월별 회생에너지 시스템의 동작 시간이 차이나는 것을 확인 할 수 있으며, 회생 에너지발전량은 발생 시간과 비례적으로 발생량이 증가한다는 것을 확인 할 수 있음.
  - 회생에너지 시스템 절감 목표량 산출 시 1일 7,600 ~ 8,000(초) 발생을 예상하였지만, 실측 운영 결과 월별, 일별 발전량은 최대 40[%]까지 오차가 발생하는 것을 확인 할 수 있음.



<그림 3-1-193> 월별 대표일 동작시간



<그림 3-1-194> 월별 대표일 회생에너지 충전량

② 회생에너지 시스템 - 목표 발전량 = 1,000[kWh]

- 회생에너지 시스템 절감 목표량 산출 근거

<표 3-1-68> 회생에너지 시스템 절감 목표량 산출근거

항 목	절감 목표량 1,000[kWh]	비 고
회생 전력량	500[kW]	회생 제동 시 에너지 발생량
회생 전력 발생 시간	10초간	전동차 제동 시간
발생 빈도	1분 30초 간격	전동차 제동 주기
1회 회생 전력량	약 1.4[kWh]	500[kW] X 10[sec] X 1/3600
1시간 회생 전력량	55.5[kWh]	1회 회생 전력량 X 시간당 발생 빈도
1일 회생 전력량	1,000[kWh]	18시간 운전 기준
컨버터 용량	500[kW]	회생 에너지 발생량
Battery 용량	500[kWh]	1일 2시간 Peak 전력 방전량

③ 테스트베드 구축 사이트 용량 변경에 따른 절감량 변경 사유

- 일일 발전량 목표량 변경 = 약 840[kWh]

항 목	설정 값	변경 값	비고
Battery Bank 용량	500[kWh]	450[kWh]	10[%] 용량 감소
회생에너지 시스템 설정 용량	1,600 ~ 1,780[V] X 300[A] = 480 ~ 534[kW]	1,600 ~ 1,780[V] X 250[A] = 400 ~ 445[kW]	16.6[%] 감소 운전
발전 용량 목표(일일)	1,000[kWh]	1,000[kWh] × 83.4[%] = 834[kWh]	목표량 변경 사유

④ 테스트베드 구축 사이트 - 회생 시스템 목표 달성 미달 사유 분석

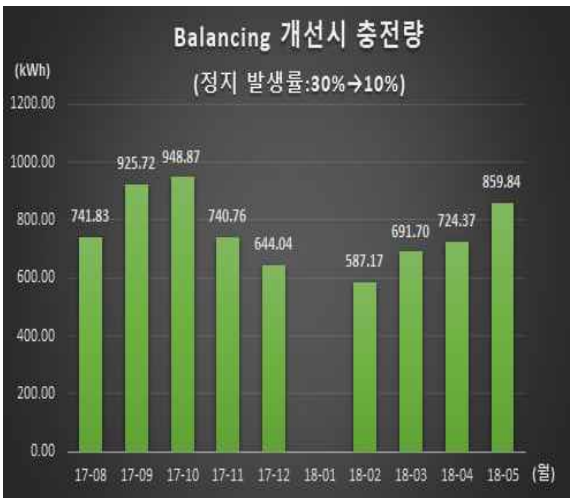
- 회생에너지 시스템 발전량 선정 시 - Ideal한 조건에서 발전 용량 산출
- 테스트베드 실증 사이트 구축 - 운전 Data 분석을 통한 미달사유 분석
- 현장 실증 운전 Data 적용을 통한 측정 값 분석 자료
  - 시스템 전력 변환 효율 적용
  - Battery Bank 용량 변경에 따른 회생시스템 운전 용량 변경 적용
  - Battery Bank와 회생 시스템의 응동 속도 적용 실측 Data 분석 적용
  - 예상 발전 시간과 실제 발전 시간 오차 적용
  - 10초간 500[kW] 연속 운전과 실증 사이트 플렉시블 운전 Data 분석 적용

항 목	측정 값
2017년 9월 30일 - 최대 발전 용량	620[kWh/day]
발전 목표량	1,000[kWh/day]
회생 시스템 발전 용량 설정 변경	1,000[kWh] X 90[%] = 900[kWh]
회생 시스템 Unbalancing 발생 빈도	900[kWh] X 72[%] = 648[kWh]
회생 시스템 효율 적용	648[kWh] X 94[%] = 609.1[kWh]
Battery Bank 응동 속도 및 발전량 반응 속도	609.1[kWh] X 80[%] = 487.3[kWh]
회생 에너지 발전 증가량	487.3[kWh] X 127[%] = 618.9[kWh]

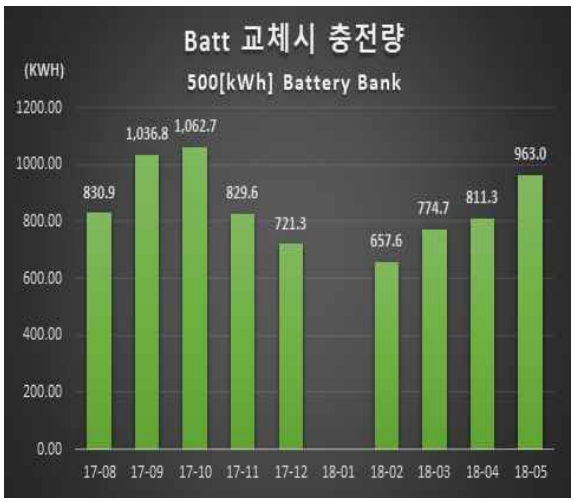
⑤ 회생 에너지 시스템 - 향후 발전 가능량 예측

- 테스트베드 실증 Data를 근거하여 발전량 감소 원인 및 향후 개선 시 회생 전력 발생 가능량 분석 결과 회생 에너지 시스템의 Balancing 제어기 Upgrade 및 Battery Bank 추가 증설을 통해 최소 20 ~ 최대 30[%]의 평균적인 회생 에너지 발전량 증가가 가능할 것으로 판단 할 수 있음.

항 목	설치 Data	변경 값	비고
Battery Bank 용량	450[kW]	500[kWh]	10[%] 증가
회생 시스템 Unbalancing 발생 빈도	28 ~ 30[%]	10[%]	18 ~ 20[%] 증가
효율 개선 가능	93 ~ 94[%]	94 ~ 95[%]	1[%] 증가



<그림 3-1-195> 회생컨버터 밸런싱 개선시 회생에너지 충전량



<그림 3-1-196> 배터리 교체시 회생에너지 충전량

(사) 회생에너지 경제성 평가

- 회생에너지 시스템 구축 비용
  - 시스템 구축 비용: 1,000kWh급 제품 구축 비용

<표 3-1-69> 회생에너지 시스템 구축 비용(1,000kWh급)

구분	규격	예상비용(천원)	기존기술(천원)
DC 배전반	500kW	15,000	1,200,000 ~ 1,500,000
Capacitor Bank	500kW@10sec	30,000	
회생컨버터시스템	500kW(20kW x 25모듈)	188,000	
PMS	1식	30,000	
ESS PCS	250kW	37,000	
ESS Battery	1,000kWh	500,000	
구축 공사비	1식	50,000	
비용합계		850,000	

- 620kWh 발생(2017. 09. 30 기준)
  * 구축 비용 대비 요금 절감량으로 인해 현 620[kWh] 일일 발전량
  * ROI = 약 5년 미만으로 평가

<표 3-1-70> 회생에너지 시스템 ROI(620kWh 기준)

회생전력	일일 전력량	620kWh	2017.09.30. 실증데이터
	월간 발생량	18,600kWh	620kWh x 30 day
	연간 발생량	223.2MWh	18,200kWh x 12 month
	피크저감	180kW	620kWh / 3.4 hr
전력요금 절감액 (천원)	기본요금 절감	17,971	180kWh x 8,320 x 12 month
	사용량요금 절감	27,847	620kWh x (최대부하요금 x 20 + 경부하요금 x 8)
	ESS 촉진요금 할인	123,298	1,000kWh x 8,320 x 12 month x 1.2
투자효과	요금절감 총액	169,116	
	ROI	4.73년	800,000 / 169,116(시스템 구축비용:8억 기준)

- 시스템 운영효과 분석 - 향후 성능 업그레이드 기준

<표 3-1-71> 회생에너지 시스템 ROI(성능 업그레이드 기준)

회생전력	일일 전력량	800kWh	향후 성능 업그레이드 기준
	월간 발생량	24,000kWh	800kWh x 30 day
	연간 발생량	288.0MWh	24,000kWh x 12 month
	피크저감	235kW	800kWh / 3.4 hr
전력요금 절감액 (천원)	기본요금 절감	23,462	235kWh x 8,320 x 12 month
	사용량요금 절감	35,932	800kWh x (최대부하요금 x 20 + 경부하요금 x 8)
	ESS 촉진요금 할인	119,808	1,000kWh x 8,320 x 12 month x 1.2
	요금절감 총액	179,202	
투자효과	ROI	4.46년	800,000 / 179,202(시스템 구축비용:8억 기준)

(아) 회생에너지 기술적 평가

- 제품 효율 상승 : 기존 제품 대비 10% 이상 효율 상승
- 에너지 저장매체 국산화 : 슈퍼커패시터 → 리튬전지
- 사이즈 축소를 통한 공간 활용성 증대
  - 저장 매체 사이즈: 50[%]이상 감소
  - 전력 변환 장치: 50[%]이상 감소
- 시스템 모듈화를 통한 확장성 증대
  - 3,300[V]급 고압소자→600[V]급 저압소자(비용절감, 대체품 적용 용이, 부품 국산화)
  - 직렬구성: 수전단 전압에 유동적 시스템 구성
  - 병렬구성: 역사별 회생 에너지양에 따른 확장성
- 에너지 활용성 확대
  - 피크전력 대응으로 전력요금 대응
  - 비상용 전원 공급원으로 활용 가능(비상 디젤발전기 대체)

(자) 회생컨버터 기술적 고려사항

- 회생컨버터의 경우 회생에너지를 빠르게 흡수하기 위해 가선전압을 직렬로 연결된 커패시터에 일정하게 분압한 후 전력저장장치를 충전
- 분압된 가선전압의 unbalancing으로 인해 충전 효율이 저하되는 한계가 있음(현재 30% 비율 발생 → 알고리즘 개선을 통해 향후 10% 이내로 감소 가능)
- 회생에너지로부터 발생된 에너지의 직류 리플 등 노이즈로 인해 전력저장장치, PCS 등 주변설비의 통신 장애를 일으킬 우려가 있어 노이즈 차폐가 중요한 기술적 고려사항임.

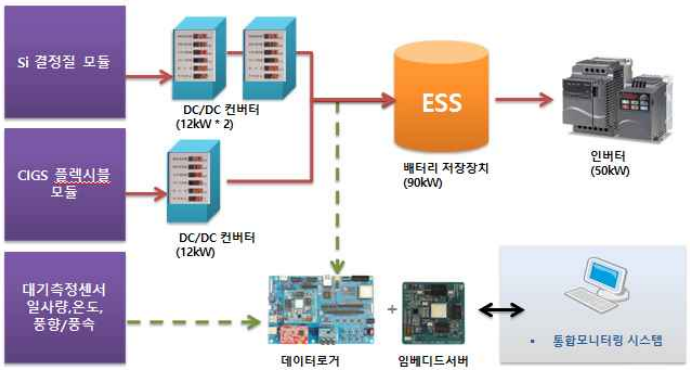
제2절. 전력저장장치 연계형 도시철도 역사용 경량 태양광 발전시스템

1. 시스템 개요

가. 시스템 개요 및 구성

(1) 시스템 개요

- 기존 도시철도 역사 구조물에 하중을 최소화하고 다양한 역사 구조물의 형태에도 적용 가능한 경량화/플렉시블 구조의 태양광 모듈의 적용 기술과 전력저장장치와 연계하여 발전된 전력을 저장하고 최적의 시점에서 전력을 활용하는 시스템임.



<그림 3-2-1> 전력저장장치 연계형 태양광 발전시스템 개요

(2) 시스템 구성

- SiC 결정질 모듈 및 구조물
  - 4x9 경량모듈(660㎜ x1,460㎜, 15kg, 150w)
  - 7.7KG/136W(단위 용량 1W당 44% 경량화)
  - 72모듈 10.8kW 설치
- CIGS 플렉시블 모듈
  - 플렉시블 타입 2m x 0.45m
  - 0.3KG/45W(기존 대비 90% 경량)
  - 30모듈 7.2kW 설치
- 전력저장장치 연계형 태양광 전력설비
  - 12kW DC/DC 컨버터 3 set
  - 90kWh 리튬 배터리
  - 50kW PCS(인버터)

나. 시스템 기능 및 성능

(1) 기능

- 기존 도시철도 역사에 추가적인 보강공사가 필요 없는 경량화/단순화 모듈
  - SiC 결정질 모듈 및 구조물 : 기존대비 1W 당 44% 경량화
  - CIGS 플렉시블 모듈 : 기존 모듈의 1/10

- 기존 도시철도 역사의 다양한 구조물에서 설치 가능
  - SiC 결정질 모듈 및 구조물 : 기존 역사 외벽, 방음벽, 역사건물 지붕 등에 설치 가능
  - CIGS 플렉시블 모듈 : 기존 역사 캐노피 등 곡면 지붕에 설치 가능
- 계통 직접 연계형이 아닌 전력저장장치(90kWh) 연계형 방식
  - 태양광 발전 계통 직접 연결시 발생하는 전력품질 문제 개선 가능
  - 전력저장장치 저장을 통한 유연한 전력 활용 가능

(2) 목표 성능

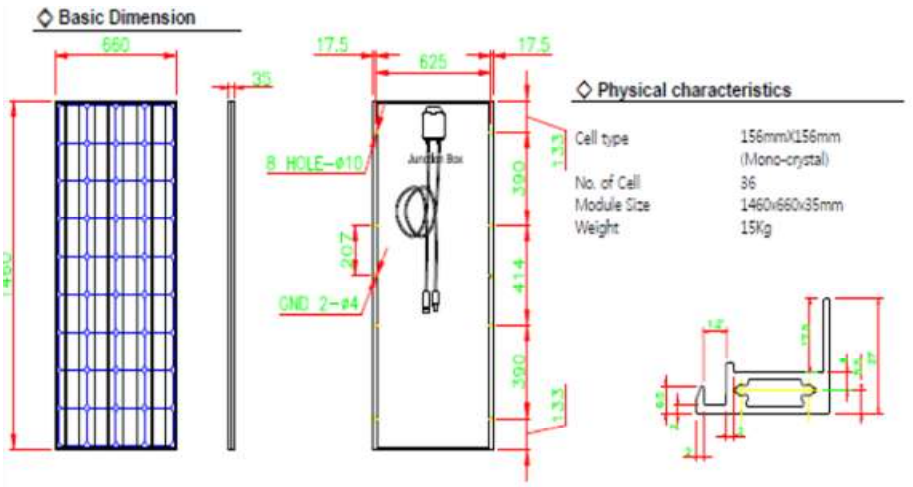
- 일일 태양광 발전량 : 최대 98kWh/일(실 설치기준, 28kWp × 3.5h)

2. 태양광 모듈 및 구조물 제작 및 시험

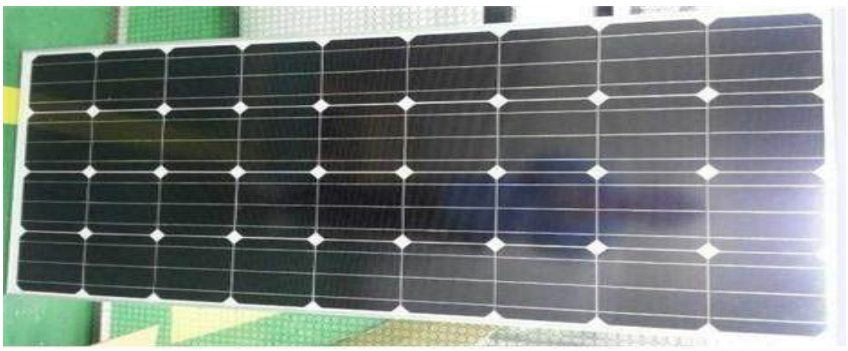
가. 모듈 및 구조물

(1) 모듈설계 및 제작

- 모듈을 경량화하기 위하여 기존의 대형 모듈보다 우리나라의 다양한 역사에 보다 폭넓게 적용 할 수 있도록 소형모듈이 필요하여 Cell 구성 4×9 150W/h의 소형 모듈을 새로이 설계하였음.



<그림 3-2-2> 소형모듈 설계도면



<그림 3-2-3> 소형모듈 사진

(2) 모듈시험

- KS규정이나 공인인증기관(한국에너지관리공단)에서 요구하는 사항에 따라 생산단계에서 수행 가능한 시험을 수행함.

(가) Gel test

- 목적 : 모듈의 내구성 확인
- 라미네이션(Lamination) 공정 중에 교차결합(Cross-linking)된 EVA의 양의 물성변화가 일어났는지 확인하는 시험

(나) Pell test

- 목적 : 셀과 리본의 접착여부
- Lamination 공정 이후 Film소재와 Glass면의 접합력 적정여부를 판단하기 위한 시험

(다) MLT(Mechanical Load Test)

- 목적 : 기계적 하중 지탱
- 모듈의 바람, 눈, 정지하중, 또는 얼음하중에 대한 내구성을 검토 조사하는 시험

(라) 신뢰성 테스트

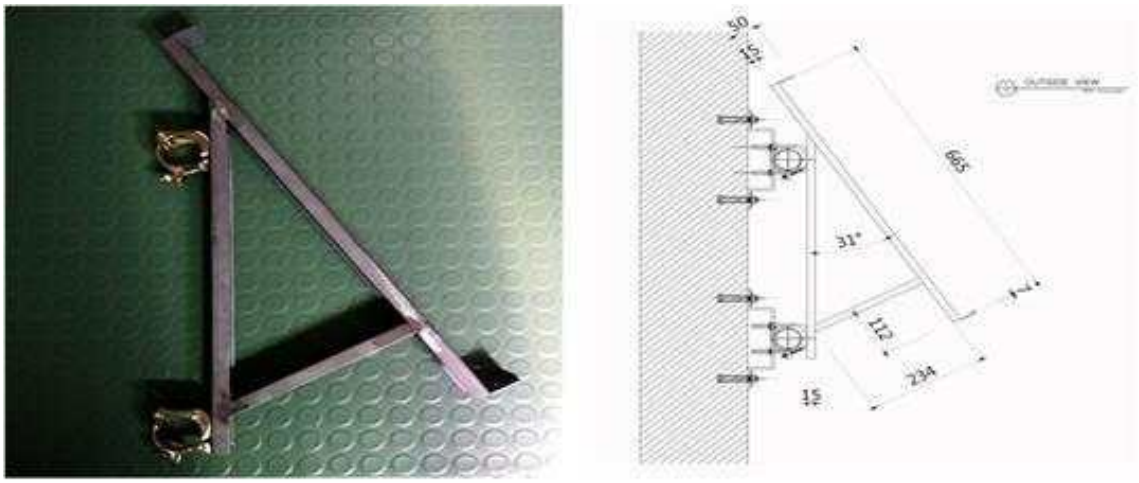
- 목적 : 온도변화에 따른 사이클의 변화
- 온도변화 반복에 따라 일어나는 열적 부정합, 피로, 기타 스트레스에 대한 모듈의 내구성을 조사하는 시험

(마) Damp Heat Test

- 목적 : 고온 고습 시험
- 습도의 장기간 침투에 대한 모듈의 내구성을 조사하는 시험

(3) 구조물 설계 및 제작

- 새로운 형태의 태양광 모듈을 쉽게 부착하고 고정할 수 있는 구조물(받침대)을 개발하여 역사의 벽체, 슬래브, 옹벽 등 다양한 형태의 적용
- 얇은 철판(2mm)을 절곡 가공하여 강도를 높임으로 제작비와 중량을 현저히 줄임.
- 경량화된 4×9 셀 형태의 태양광 모듈을 쉽게 부착 할 수 있는 구조물로 기존의 구조물을 대체 할 수 있음.
- 고정부품과 조립하면 벽체, 슬래브, 옹벽 등에 쉽게 탈부착 할 수 있음.



<그림 3-2-4> 구조물 모형 및 개념도

나. 적정성 시험

(1) 모듈 기초시험

- 소형화한 태양광 모듈(660×1460×35-150W)의 성능을 검증하기 위한 인증 시험 전에 실험실에서 기초 테스트를 시행함.



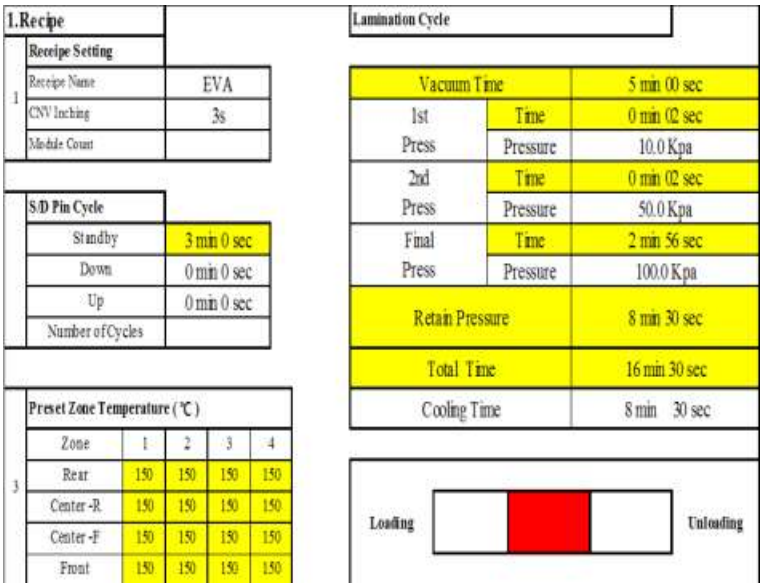
<그림 3-2-5> 소형모듈의 기초시험

(2) 모듈 시험부문

(가) 신규 제작모듈 관련(4 x 9matrix) 기초테스트 실시

- 태양전지 모듈 제작시 기존 양산품 태양전지 모듈을 투입하여 제작되었던 공정조건 등을 고려하여 신규사이즈 4x9 matrix의 라미네이터 공정변경 등을 이용하여 최적조건을 찾고자 함.

- 신규 사이즈 변경에 대한 변경조건으로 Sheet 내 수축률을 고려한 수치 안정화가 필요하기에 Sheet Cutting 장비에 투입하여 기본 봉지재와 신규 봉지재의 수치를 규격화 함. 현재 기존 봉지재인 EVA 라미네이터 Recipe는 다음과 같음.



1.Recipe

	Receipe Setting	
1	Receipe Name	EVA
	CNV Inching	3s
	Module Count	

S/D Pin Cycle	
Standby	3 min 0 sec
Down	0 min 0 sec
Up	0 min 0 sec
Number of Cycles	

3 Preset Zone Temperature (℃)

Zone	1	2	3	4
Rear	150	150	150	150
Center-R	150	150	150	150
Center-F	150	150	150	150
Front	150	150	150	150

Lamination Cycle

Vacuum Time		5 min 00 sec
1st Press	Time	0 min 02 sec
	Pressure	10.0 Kpa
2nd Press	Time	0 min 02 sec
	Pressure	50.0 Kpa
Final Press	Time	2 min 56 sec
	Pressure	100.0 Kpa
Retain Pressure		8 min 30 sec
Total Time		16 min 30 sec
Cooling Time		8 min 30 sec

Loading Unloading

<그림 3-2-6> Laminator 공정조건

- 총 공정시간 16분 30초에 온도조건은 150도이며, 압력상태는 대기압부터 0~1000Kpa (1013~0mbar)까지임. 이와 같은 공정조건으로 주기적으로 합/부 판정을 진행하고 있으며 시험목록은 다음과 같음.

(나) Gel test 시험 결과

3.Result

Position	Before Weight	After Weight	Rate (%)	Result		Pass / Acceptance Criteria
5-1	1.0037	0.9087	90.5350	Contents	Rate (%)	※Routine Test
5-2	1.0015	0.8903	88.8967	Maximum	90.54	1. Total Average : 80~92%
5-3	1.0072	0.8819	87.5596	Minimum	87.56	2. Standard deviation : less than 3%
5-4	1.0057	0.9076	90.2456	Stand.Dev	1.22	3. Maximum deviation : less than 8%
5-5	0.9986	0.8979	89.9159	Max.Dev	2.98	※First Test (Model change)
Average			89.43	G	NG	1. Total Average : 85~92%
						2. Standard deviation : less than 2%
						3. Maximum deviation : less than 5%

<그림 3-2-7> gel test 시험결과

- Gel Content(%) 분포가 평균 89.43으로 매우 양호한 상태이며 분포도 역시 합격 기준 안에 포함됨.

(다) Peel test(film 부분)

- 테스트 방법으로는 Back sheet 샘플을 폭 1cm, 길이 20cm로 3장 준비한 후 EVA 필름을 올려놓은 유리판에 Back sheet 샘플의 인쇄면이 EVA 필름에 닿도록 하여 진공 라미네이터로 접합시킴.(온도 : 150℃, 압력 : 1mbar, 시간 : 18분) 이후 30분간 상온에서 냉각시킨 후 인장시험기로 1000mm/min 속도로 180° 방향으로 test 이후 박리력을 측정하여 평균을 구하며, 테스트결과 47 N/cm로 합격 기준인 40 N/cm를 초과하는 결과치를 얻음.

(라) MLT(Mechanical Load Test)

- MLT의 시험목적은 태양전지 모듈의 바람, 눈, 정지하중 또는 얼음하중에 대한 내구성 조사를 위한 테스트 항목이나 이미 Crosslinking이 완료된 제품의 출력 저하율을 측정하여 확인하고자 함.
- 시험규격은 IEC 61215의 기준으로 진행하며 합격 기준으로서 '초기 출력값 대비 5% 미만의 저하율일 것'으로 시험결과 약 1.2%대의 저하율을 얻음.

(마) 온도사이클 200(Thermal cycle 200) 및 Damp heat test

- IEC 61215의 규격 중 하나이며 시험목적으로는 온도변화의 반복에 따라 일어나는 열적 부정합, 피로, 기타 스트레스에 대한 모듈의 내구성을 조사하는 것을 목표로 함. 복합시험 시 진행되었던 온도사이클 50에 비하여 약 4배 정도의 시간을 더 많이 진행하며 가장 가혹한 시험임.
- 온도사이클 및 Damp heat test 결과에서도 성능이 기존 6x10 matrix인 면적 대비 동등 혹은 이상의 출력저하율로 표현되었으며 이는 신규면적인 4x9 matrix로 태양전지 모듈의 제조하는데 아무런 이상이 없다는 것을 의미함.

(3) 모듈 받침대 안정성 검토-구조검토(midas Gen 소프트웨어사용)

태양광 거치대 구조 검토서

1. 구조물 개요

본 구조물은 펜스에 설치되는 태양광판을 지지하는 구조물임

본 구조물의 설치위치는 서울임

2. 검토범위

구조물의 검토 과정은 단면가정 및 하중산정 후 각부재의 휨응력에 대하여

검토하였으며, 접합부의 안정성 검토를 수행하였음.

3. 구조해석

1) 사용프로그램 : MIDAS Gen

2) 설 계 법 : 한계상태설계법(LSD, KBC2009)

3) 구조물재원 : 각파이프 B-50x15x2t, 태양광판 660x1460(15kgf)

4) 하중조합 : 1.2DL + 1.3WL

5) 해석결과 요약

구 분	B-50x15x2t						
	휨응력 (N/mm^2)	전단응력 (N/mm^2)		조합응력 (휨+압축)			
허용값	752.094.0	22.334.0		-			
최대값	11.736.0	22.3		-			
응력비	0.02	0.00		0.02			
판 정	O.K	O.K		O.K			

4. 결 론

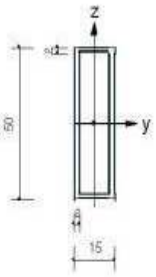
1) 태양광 지지프레임에 대한 구조검토 결과 허용내력 이내임

3) 본구조물에는 태양광판 이외의 부착물이 부착되어서는 안됨

5. 구조 검토

5.1 사용재료

(1) 지지부재



Depth	50.0000	Web Thick	2.00000
Flg Width	15.0000	Top F Thick	2.00000
Web Center	13.0000	Bot.F Thick	2.00000
Area	244.000	Asz	200.000
Qyb	444.500	Qzb	177.625
Iyy	67025.3	Izz	8960.33
Ybar	7.50000	Zbar	25.0000
Syy	2681.01	Szz	1194.71
ry	16.5739	rz	6.05992

(2) 강재의 재질

○ 주지주 : F_y = 235 N/mm^2 (SS400)

5.2 설계하중

(1) 고정하중 ○ 태양판자중 : 0.15 kN/m^2

(2) 풍하중

$W_f = P_f * A$: 풍하중 $P_f = q_z * G_f * C_f$: 설계풍압

$q_z = 1/2 * \rho * V_z^2$: 설계 속도압 ρ : 공기의 밀도 = 1.25 N·s^2/m^4

$V_z = V_0 * K_{zr} * K_{zt} * I_w$: 설계풍속

- 설계 속도압(q_z) 산정

지역 : 서울 **30** m/s 노풍도 : B ; 설계기준 풍속은 부록 참조

중요도계수 : **0.90**

K_{zr} = **0.81** G_f = **2.2**

K_{zt} = **1.0** C_f = **1.2**

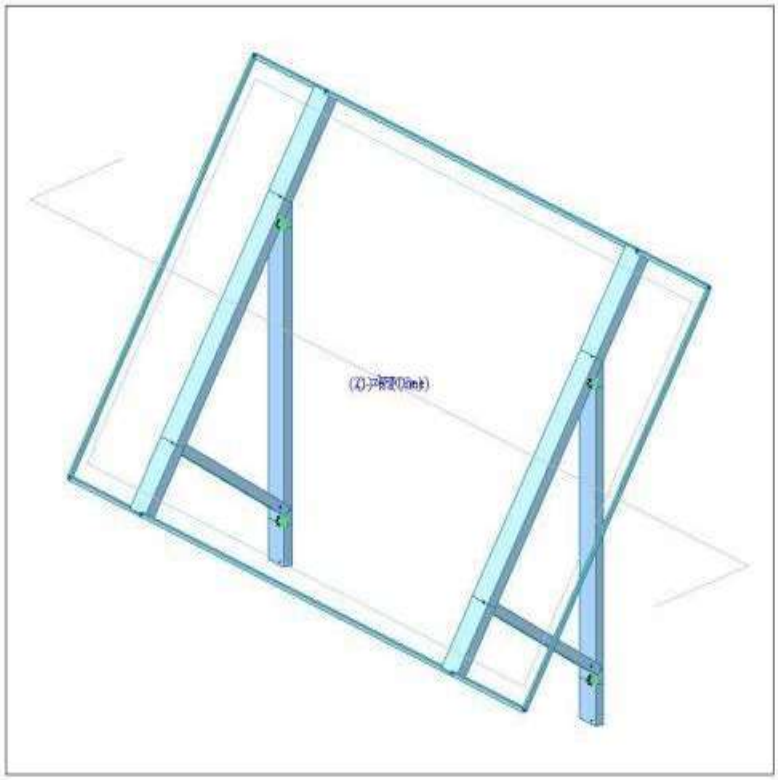
① V_z = 30 * .8 * 1.0 * .9 = **21.9** m/s

② q_z = 1/2 x 1.25 x 21.9 * 21.87 = **298.9** N/m^2

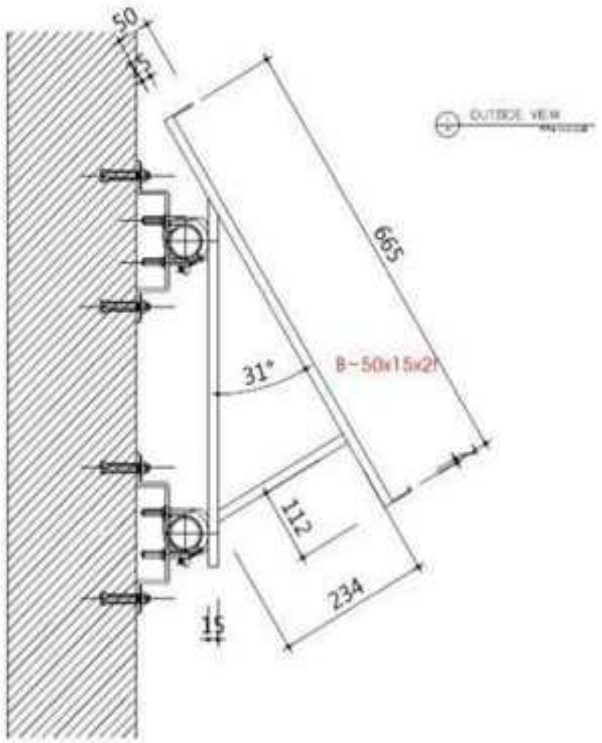
- 설계 풍압(p_f) 산정

① p_f = 298.9 * 2.2 * 1.2 = **789.2** N/m^2 = 0.789 kN/m^2

(3) 하중 입력 및 모델링



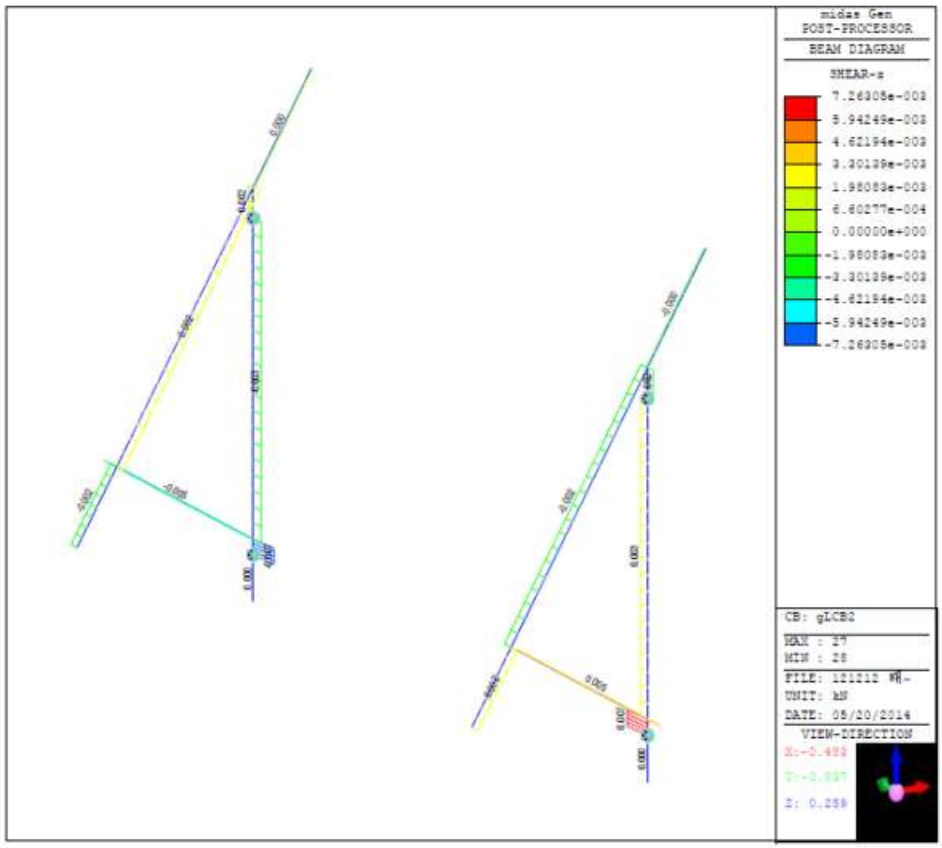
5.3 부재 설치도



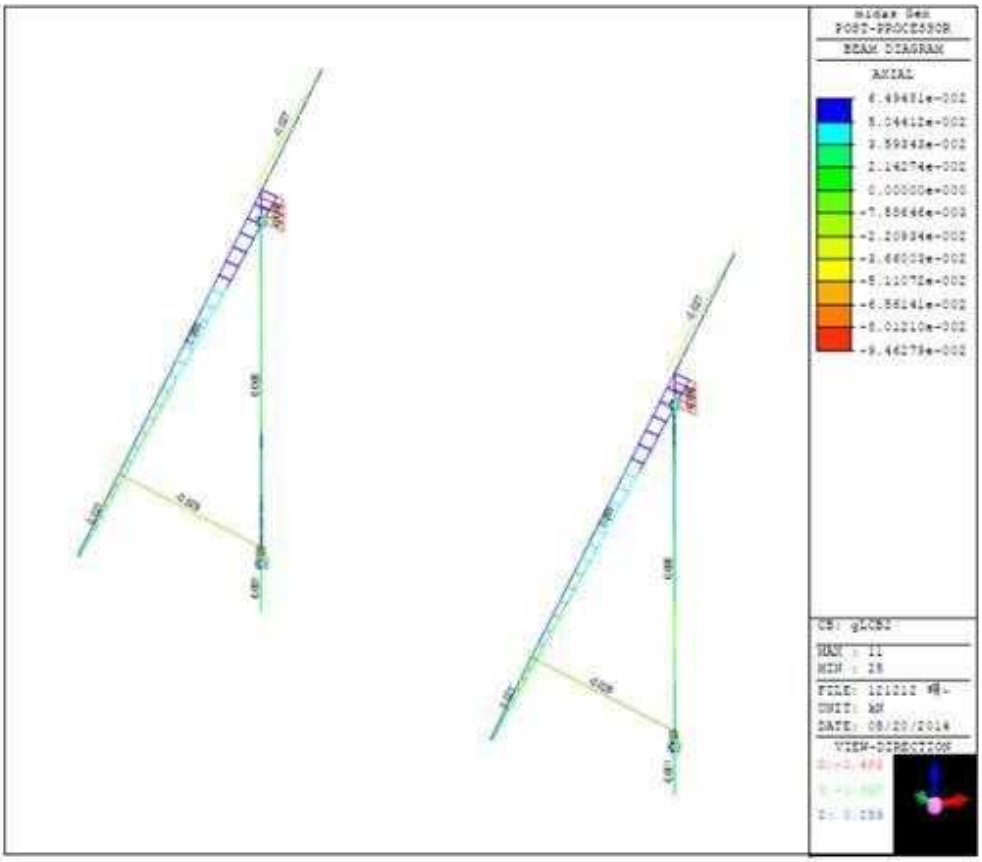
5.4 해석 결과



<모멘트>



<전단력>


midas Gen
POST-PROCESSOR
BEAM DIAGRAM
AXIAL

<축력>

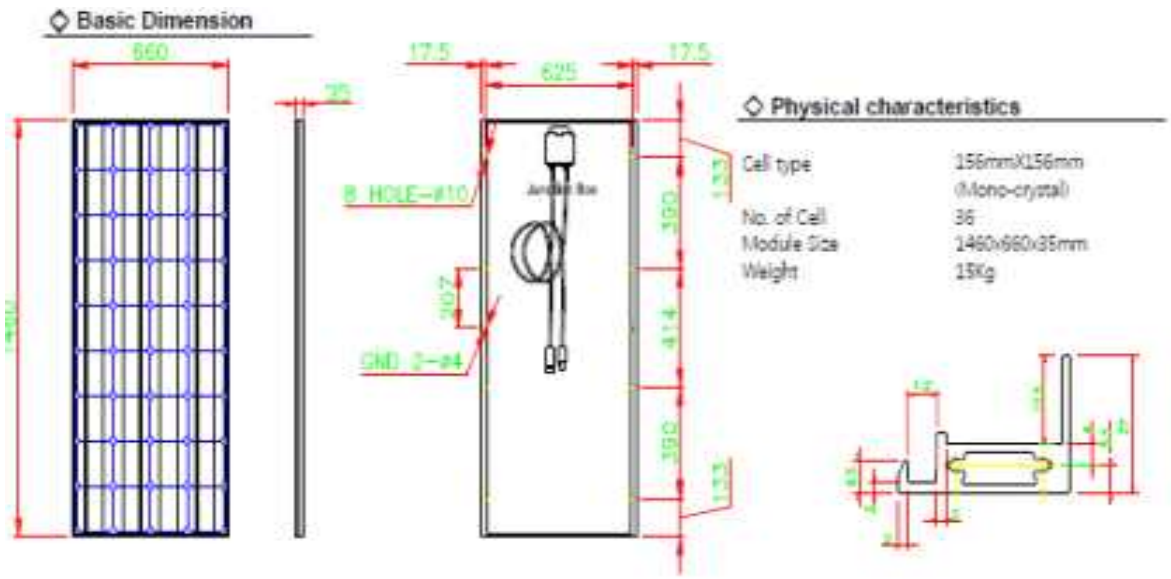

midas Gen
POST-PROCESSOR
STEEL DESIGN
COMBINED (Max)

<응력비>

(4) 태양광 모듈 성능시험

(가) 결정질 모듈 제작 및 성능시험

① 수직 벽면 부착용 태양광 모듈 제작 및 시험



<그림 3-2-8> 결정질 태양광 모듈 설계도면



<그림 3-2-9> 결정질 태양광 모듈(면적 660×1,460㎜, 발전량 150W, 셀수 4×9, 무게 15kg)

② 수직 벽면 부착 태양광 모듈 발전량 시험



<그림 3-2-10> 결정질 태양광 모듈 실증화를 위한 옥외 발전량 시험



<그림 3-2-11> 결정질 태양광 모듈 실증화를 위한 옥외 강풍 및 우수 시험

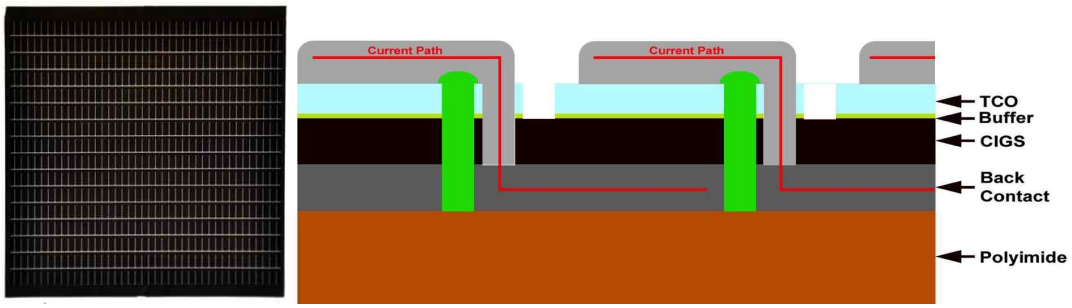
※ 풍속 50m/sec까지 실험하였으며 앞면과 뒷면 동일한 조건하에서 실험 수행

※ 실험 결과 태풍급(2012년도 곤파스 태풍 최고 풍속=52m/sec) 강풍에도 안전한 것을 확인하였음.

(나) 플렉시블(CIGS) 모듈 제작 및 성능시험

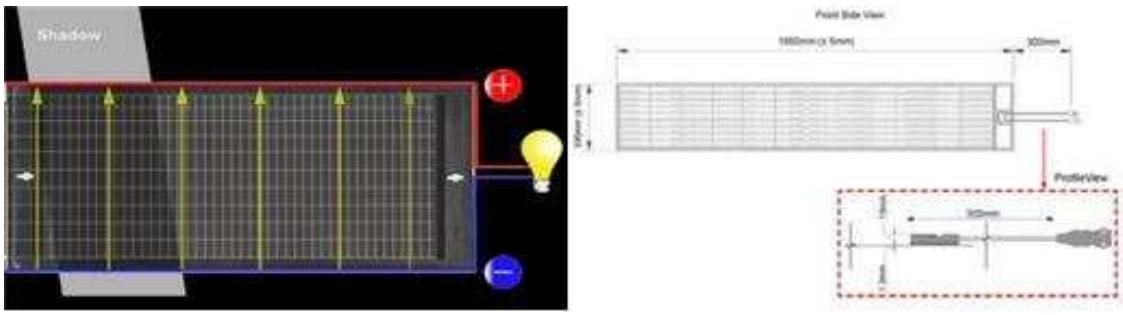
① CIGS Flexible 태양전지 모듈링

- CIGS는 4가지 원소를 기본으로 하는 플라즈마 증착방식 및 결합 방식인 Monolithically Integrated 방식을 기본으로 함.
- CIGS Flexible Solar Cell의 특성상 기존 Si Solar Cell이 가지는 모듈 설계 방식으로는 구성이 불가능하여 CIGS Solar Cell 모듈구성 방식을 개발함.



<그림 3-2-12> CIGS Flexible Solar Cell 및 단층구조

- 해당 CIGS Solar Cell의 방식은 완전히 절단되지 않으면 그 성능이 보전되는 안정성, 효율 및 미려한 외관 등이 특징임.



<그림 3-2-13> 45W급 모듈 개념 및 설계

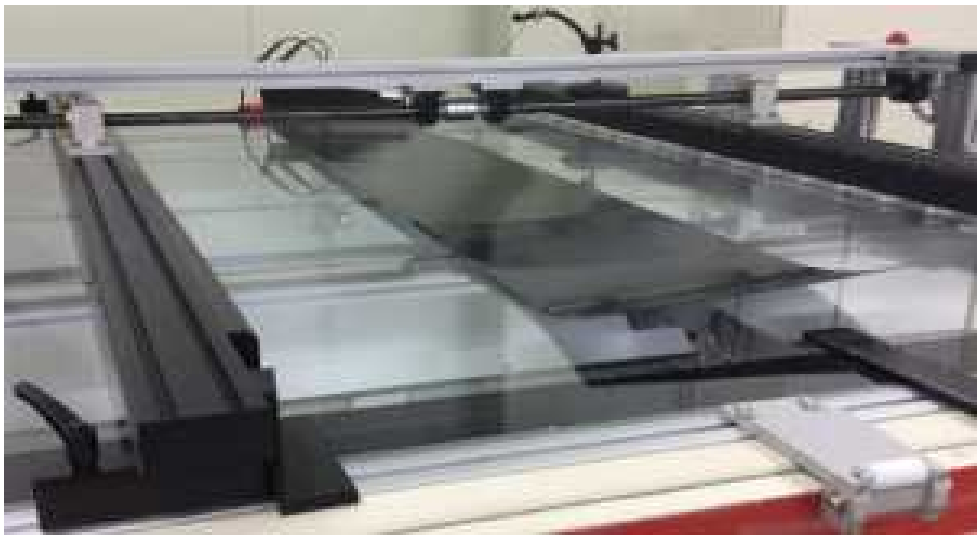


<그림 3-2-14> CIGS Flexible 모듈

- 새로 설계된 45W급 모듈은 기존 결정질의 단층구조로 인하여 어쩔 수 없이 셀 과 구조물을 종횡했던 방식과는 다르게 외곽라인을 이용하여 Flexible한 특성을 잘 반영한 방식임.



<그림 3-2-15> CIGS Flexible 태양광 모듈 시제품



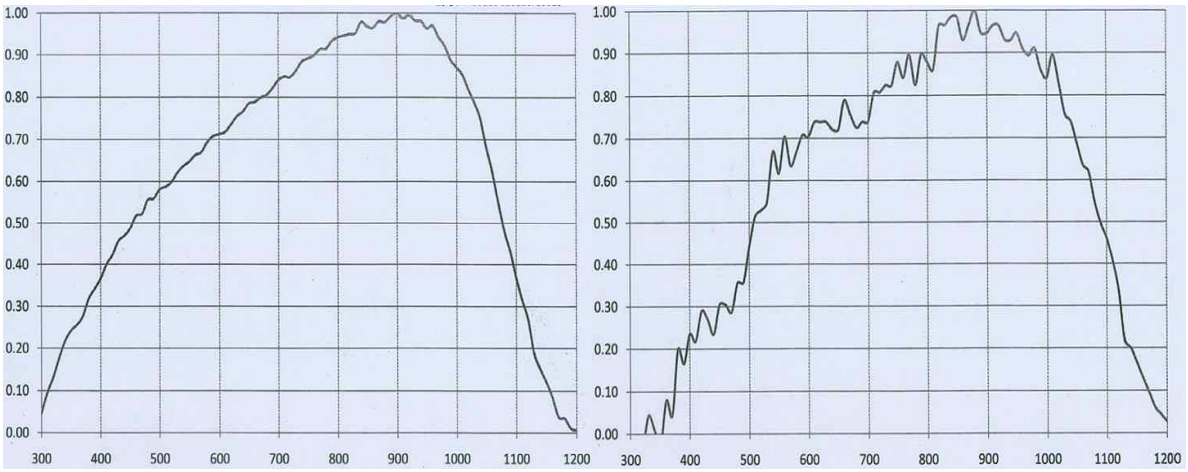
Electrical Specifications (Measured under Standard Test Conditions)	
Nominal Power (Pmax in Watts)	45.0
Voltage at Pmax (Vmp in Volts)	47.1
Current at Pmax (Imp in Amps)	1.60
Open Circuit Voltage (Voc in Volts)	33.3
Short Circuit Current (Isc in Amps)	1.35
Power Tolerance not to exceed	± 10%
Electrical Tolerance not to exceed	± 10%
External Dimensions	
Length	1960 mm
Width	360 mm
Weight	
Temperature Coefficients	
Power	- 0.51%/°C (±10%)

<그림 3-2-16> 시제품 및 발전·전기적 특성

※ 위 특성은 표준 시험조건(섭씨 25℃, 1kW/m2, AM1.5)의 값임.

② CIGS의 전기적 특성(흡수파장대역) 및 인버터 개발

- CIGS의 흡수파장대역에 따른 시제품의 전기적 특성을 분석하여 45W급 시제품에 작동하는 인버터를 개발함.



<그림 3-2-17> 자연광 파장 및 CIGS 흡수파장대역>

○ 인버터 특성

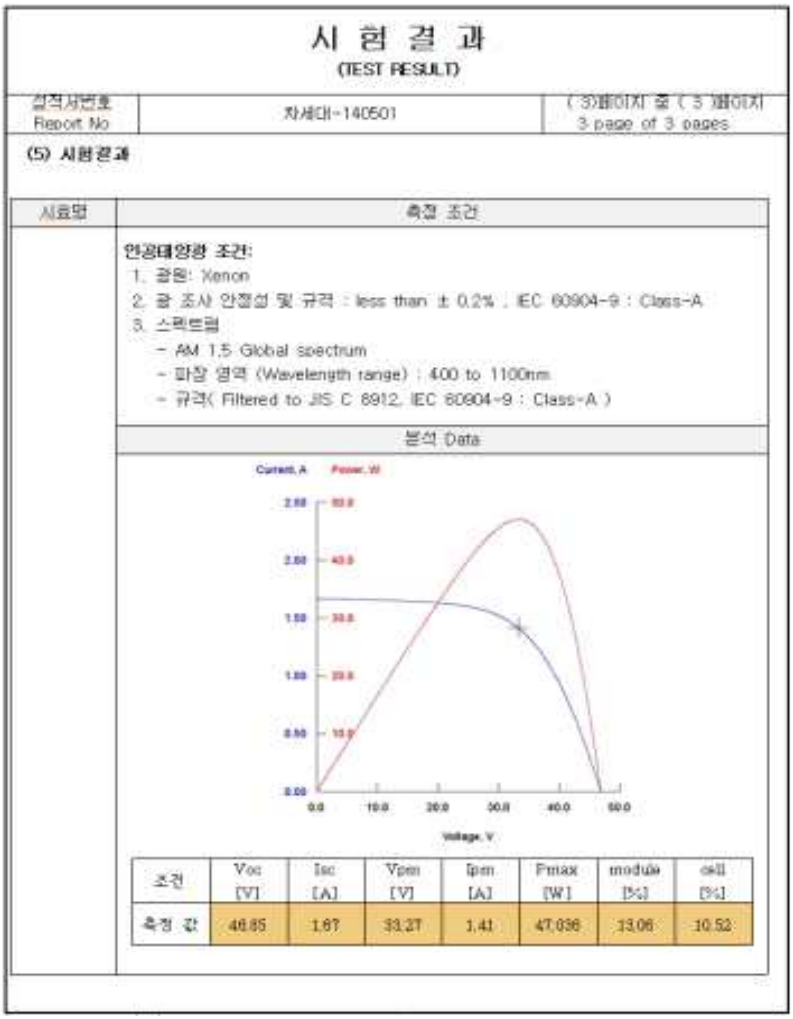


<그림 3-2-18> 설치된 인버터 및 측정기

- 구성형태 : 연계발전형
- 전력입력형태 : 직접연결식
- 전력출력형태 : 220V 상용코드접촉식
- 입력 : 20~52VDC MAX 30A
- 출력 : 220VAC

- 해당 인버터는 파워코드를 이용하여 주위에서 흔하게 볼 수 있는 220V코드에 꽂으면 발전되어 출력된 전류가 연계된 전력시스템에 공급되는 형태임.

③ CIGS 태양전지 최대출력결정시험



시 험 결 과
(TEST RESULT)

성적서번호 Report No	차세대-140501	(3)페이지 중 (3)페이지 3 page of 3 pages

(5) 시험결과

시료명	측정 조건

인공태양광 조건:
1. 광원: Xenon
2. 광 조사 안정성 및 규격 : less than ± 0.2% , IEC 60904-9 : Class-A
3. 스펙트럼
- AM 1.5 Global spectrum
- 파장 영역 (Wavelength range) : 400 to 1100nm
- 규격(Filtered to JIS C 8912, IEC 60904-9 : Class-A)

분석 Data

조건	Voc [V]	Isc [A]	Vpm [V]	Ipm [A]	Pmax [W]	module [%]	cell [%]
측정 값	46.85	1.67	33.27	1.41	47.036	13.06	10.52

<그림 3-2-19> 시제품 시험결과

④ CIGS 태양전지 설치운영시험

- 방위각 및 경사각을 확인하고 음영발생조건을 확인하여 설치하며, 설치방법은 선정된 3M 본딩재료를 활용한 직접접착방식으로 설치하여 운영실험을 실시함. 방위각은 정남향 30°, 설치각은 20~40°가 되도록 설치하여 운용함.



<그림 3-2-20> 표준설치 운영시험

○ CIGS 태양전지의 접착방식 : HelioBond PVA 600BT



Physical Properties		
	Typical Values	Test Method
Color	Black	Visual
Brittleness Temperature	-50° F	ASTM D746
Elongation (tape)	>1000%	ASTM D412
Specific Gravity	0.97	ASTM D71
Application Properties		
Service Temperature	-40° F - 250° F (-40° C -121° C)	ASTM D3359
Application Temperature	40° F -120° F (4° C - 49° C)	ASTM C603
Minimum Shelf Life	1 Year	ASTM D1337

Values are typical performance properties and characteristics based on laboratory testing. This is intended as a guide for comparison purposes and does not constitute a specification or specification range.

<그림 3-2-21> 사용된 접착용재 및 규격

<표 3-2-1> 표준설치 운영결과(2015년 3월 01일~31일)

요일	일	월	화	수	목	금	토
날씨	비	맑음	비	맑음	맑음	맑음	맑음
누적	3	157	1	158	160	158	155
	맑음	흐림	맑음	맑음	맑음	비	맑음
	158	11	159	160	161	0	158
	맑음	맑음	구름	비	비	맑음	맑음
	158	158	142	8	3	151	159
	맑음	맑음	맑음	맑음	맑음	맑음	맑음
	160	161	162	161	155	158	160
	비	구름	비				
	25	89	1				

- 결과 : 우천시를 제외한 나머지 일수에서 시간당 45W발전량을 토대로 45W × 3.5시간 = 157.5W(일 발전량), 각 일일 발전량은 기상상태 및 음영비율에 따라 달라지지만 해당 결과는 CIGS 플렉시블 태양광 모듈 및 인버터가 설계에 따라 제대로 구성되어 작동함을 확인 함.

다. Battery 충전용 DC/DC 컨버터

(1) 컨버터 사양

- 태양광 발전전원으로부터 PCS 입력전압 DC 750V전원으로 전력변환을 위한 DC-DC Interleaved Boost 컨버터이며, DC-DC 컨버터는 태양광 발전의 직류 출력 전압 강하에 따른 인버터 입력전압 DC750V를 유지하기 위하여 12kW급 3-병렬 Module 컨버터로 구성됨.

<표 3-2-2> 일반 사양

항 목	사 양	비 고
정격 입력 전압	DC 600V	
정격 입력 전류	DC 16A	
허용 입력 전압	DC 0V ~ 1000V	
허용 입력 최대전류	33A	
운전 가능 입력전압	DC 300V ~ 600V	
운전 가능 입력전류	16A	정격전압시
정격 출력	12kW	
정격 출력 전압	750V	
정격 출력 전류	DC 0~15A	
주위 온도※1,2	−10~+40℃	정격운전 가능 (40~50℃은 출력 제한에서 운전 계속)
습도※1,2	25% RH ~ 95% RH	이슬 맺힘 없을 것
표고	해발1000m 이하	단 표고에 대응한 주위온도 저감 고려
진동※1,2	설계 가이드라인에 근거해 가능한 범위에서 고려	
효율	90%이상	
사이즈	-	협의 후 확정 요함
냉각 방식	강제 공냉	
설치 장소	옥내 설치	분진 또는 유독성 가스가 없는 곳
내용연수※1,2	10년(주위 온도25℃)	전해 콘덴서, 팬 수명 고려※3

※1 설계시에 고려, ※2 내환경 시험은 실시하지 않음.
※3 수명 부품인 전해 콘덴서 및 팬 제외

(2) 컨버터 동작

- Boost 컨버터 운전: 부하율10kW 이하
- 인버터 입력전압이 DC 700V 이하로 감소하면, 3-병렬 Boost 컨버터로 구성된 보조 회로가 연결되고, 보조회로의 동작으로 인해 인버터의 최소 입력전압 DC 750V를 유지하도록 제어함.

(3) 실험 결과

- 12kW급 3병렬 부스트 컨버터에 대한 부하시험 동작을 확인하고, 입력전압(300V~500V) 변동에 따른 입·출력 전압, 전류 파형과 출력 전압 추종 응답 시간을 측정하며 모듈 각각의 인덕터 전류와 효율을 확인함.

(가) 실험 절차

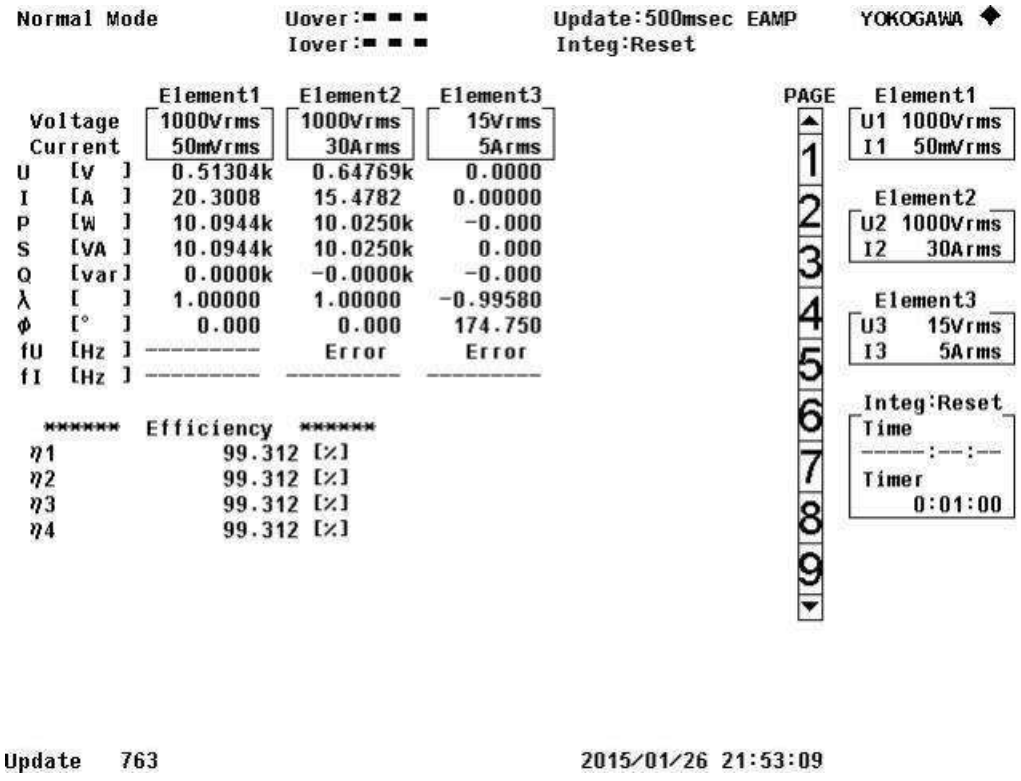
- 부스트 컨버터의 입력 소스는 슬라이닥스를 이용하였고, 정격 출력(10kW)을 위해서 부하 저항 값을 설정함.
- 입력 전압의 변동에 따른 각 모듈의 입·출력 전압, 전류와 출력전압(650V) 추종 응답 시간을 측정하고, 각 모듈의3병렬로 연결된 인덕터 전류 및 효율을 측정함. (@ Vin = 300V, 400V, 500V)
- 12kW 부하 시험을 위한 전체 구성도



<그림 3-2-22> 부하 시험 구성도

(나) 실험 결과

- 입력전압 300V ~ 500V 인가한 경우 입력전력 대비 출력전력에 대한 효율 제시



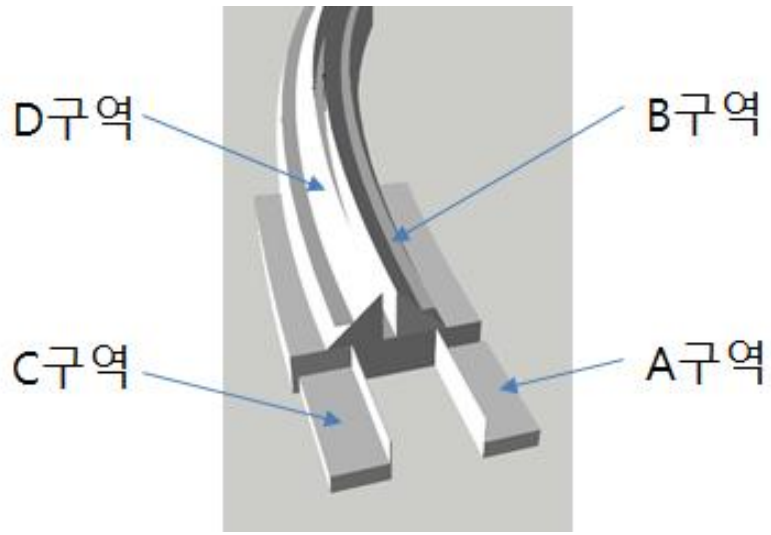
<그림 3-2-23> 입력 전압 변동에 따른 효율(Vin = 500V)

3. 현장구축을 위한 시뮬레이션 및 태양광 발전시스템 구성

가. 도봉산 역사 음영 및 발전량 시뮬레이션

(1) 태양광발전시설 음영분석

- 태양광 발전설비를 구축할 서울 7호선 도봉산역에 대해 태양광이 설치될 구역을 4구역으로 구분하고 각 구역에 대한 음영분석을 통해 예상 발전시작 시간 및 종료시간을 정리함.



<그림 3-2-24> 발전소 예정부지 구역 구분

- 일조시간비교

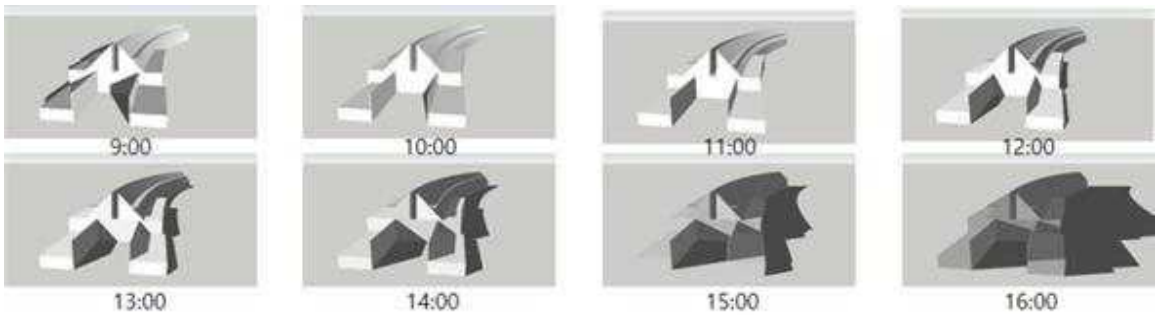
<표 3-2-3> 일조시간비교(1~6월)

		1월	2월	3월	4월	5월	6월
A구역	발전시작시간	8:00	7:40	7:30	7:00	6:50	6:30
	발전종료시간	12:50	13:00	13:50	14:00	14:20	14:50
	발전시간	4시간50분	5시간20분	6시간20분	7시간00분	7시간30분	8시간20분
B구역	발전시작시간	8:00	7:40	8:00	7:00	6:50	6:30
	발전종료시간	14:00	15:12	15:50	16:00	16:30	16:50
	발전시간	6시간10분	6시간30분	7시간00분	7시간20분	7시간40분	8시간00분
C구역	발전시작시간	10:20	10:00	9:40	9:30	9:00	8:40
	발전종료시간	17:10	17:20	17:40	18:00	18:10	18:30
	발전시간	6시간50분	7시간20분	8시간00분	8시간30분	9시간10분	9시간50분
D구역	발전시작시간	11:00	10:50	10:40	10:40	10:30	10:30
	발전종료시간	17:10	17:20	17:40	18:00	18:10	18:30
	발전시간	6시간00분	7시간32분	7시간50분	9시간00분	9시간40분	10시간20분

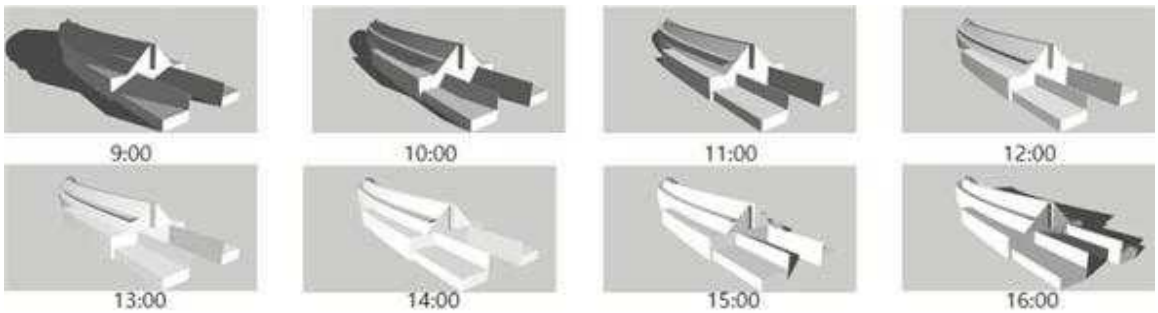
<표 3-2-4> 일조시간비교(7~12월)

		7월	8월	9월	10월	11월	12월
A구역	발전시작시간	6:10	6:30	7:00	7:30	7:40	8:00
	발전종료시간	15:00	14:50	13:30	12:50	13:00	12:50
	발전시간	8시간50분	8시간20분	6시간30분	5시간20분	5시간20분	4시간50분
B구역	발전시작시간	6:10	6:30	7:00	7:30	7:40	8:00
	발전종료시간	17:00	16:20	15:40	14:40	14:00	14:00
	발전시간	8시간00분	8시간20분	7시간40분	6시간50분	5시간50분	5시간00분
C구역	발전시작시간	9:00	9:10	9:20	9:30	10:00	10:10
	발전종료시간	18:40	19:00	18:20	17:40	16:50	16:20
	발전시간	9시간40분	9시간50분	9시간00분	8시간10분	6시간50분	6시간10분
D구역	발전시작시간	10:40	10:40	10:40	10:50	11:00	11:20
	발전종료시간	18:40	19:00	18:20	17:40	16:50	16:20
	발전시간	10시간50분	9시간50분	8시간40분	7시간10분	6시간20분	6시간00분

- 시간별 음영형태



<그림 3-2-25> A, B구역 1월 그림자 형태



<그림 3-2-26> C, D구역 1월 그림자 형태

나. **각 위치별 발전량 시뮬레이션 결과**

(1) 시뮬레이션 적용 기준

- 150Wp 태양광 모듈을 대상으로 설치 위치에 배치하여 Solarpro ver.3.0을 이용하여 발전량을 해석함.

(2) 일사/일조량 자료(기상청 제공 자료 참조)

- 예정부지 입지조사의 기후자료 데이터를 사용함.

(3) 대상 태양광 모듈

- 150Wp(모듈) 및 BIPV로 사용
- 음영분석에 따른 이격 거리를 산정하여 모듈을 배치하였으며, 음영분석에 따른 태양광 발전 정상 작동시간은 오전 8시부터 오후 4시까지로 정함.

(4) 시뮬레이션 결과

<표 3-2-5> 태양광 발전량 시뮬레이션 결과

구분	대상건물	설치용량 (kWp)	PV출력 (kWh)	INV출력 (kWh)	손실량 (3%,kWh)	예상발전량 (kW/year)	일평균 발전시간 (hour)
1	A구역	20.25	18,620.68	17,131.03	513.93	16,617.10	2.25
2	B구역	6.75	3279.04	3016.71	90.50	2926.21	1.19
3	C구역	20.25	21,285.7	19,582.85	587.49	18,995.36	2.57
4	D구역	6.75	4,226.71	3,888.57	116.66	3,771.91	1.53
총 합계		54	47,412.13	43,619.16	1,308.58	42,310.58	2.15

※ 예상발전량 계산과정

- 예상발전량 = INV출력-변압기손실(2%)-선로손실(1%)

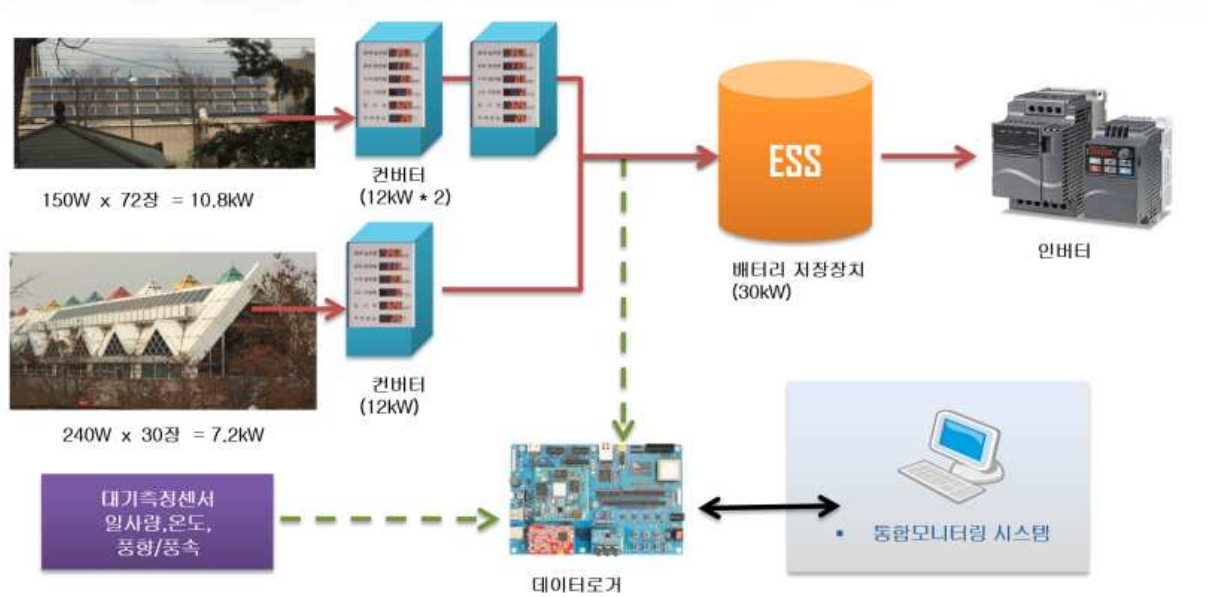
■ 태양광 설치용량 및 예상발전량 검토 (20.25kW) - A구역

<표 3-2-6> 태양광 설치용량 및 예상발전량 검토 (20.25kW) - A구역

태양광 설치용량 및 예상발전량 검토														
Date	Direct Irradiation	Total Irradiation	Horizontal Irradiation	Diffuse Irradiation	Reflected Irradiation	PV Energy	INV Energy	PV Voltage	PV Current	PV Temperature	Temperature	PV Efficiency	Specific PV Energy	Specific INV Energy
Month	kWh/㎡	kWh/㎡	kWh/㎡	kWh/㎡	kWh/㎡	kWh	kWh	V	A	C-Deg	C-Deg	%	kWh/kWp	kWh/kWp
Jan	59.09	73.29	60.95	20.96	1.74	1297.2	1193.42	273.3	16.96	2	-2.43	13.4	64.06	58.93
Feb	60.87	83.07	76.97	27.98	2.16	1478.37	1360.1	246.52	16.16	5.2	-0.36	12.07	73.01	67.17
Mar	69.05	105.5	107.35	41.24	2.97	1794.82	1651.23	244.36	17.93	11.65	5.27	11.09	88.63	81.54
Apr	68.75	119.49	131.33	53.37	3.58	1921.7	1767.96	242.46	17.29	19.52	12.06	10.29	94.9	87.31
May	65.7	124.41	143.27	59.63	3.88	1937.29	1782.3	229.06	17.84	24.92	17.4	10.62	95.67	88.02
Jun	55.98	110.73	129.95	54.77	3.5	1711.48	1574.57	227.26	15.37	28.99	22.07	10.12	84.52	77.76
Jul	44.75	87.15	101.62	42.65	2.74	1333.28	1226.62	225.13	12.49	30.32	25.05	10.59	65.84	60.57
Aug	53.83	97.93	110.39	45.49	3	1535.96	1413.08	227.14	14.18	31.44	25.52	10.11	75.85	69.78
Sep	61.6	100.33	106.41	42.11	2.92	1585.44	1458.6	236.01	15.69	27.16	20.89	10.42	78.29	72.03
Oct	67.39	96.89	94	35.15	2.62	1651.43	1519.31	237.81	18.41	20.46	14.6	11.01	81.55	75.03
Nov	54.16	69.61	60.34	21.26	1.71	1231.72	1133.18	242.9	13.88	11.49	7.14	12.24	60.83	55.96
Dec	53.3	64.85	52.47	17.89	1.5	1142.01	1050.65	244.33	13.5	4.46	0.37	12.03	56.4	51.88
Max Value	69.05	124.41	143.27	59.63	3.88	1937.29	1782.3						95.67	88.02
Time	Mar	May	May	May	May	May	May						May	May
Mean Value								239.69	15.81	18.13	14.75	11.17		
Sum Value	714.46	1133.24	1175.06	462.5	32.33	18620.68	17131.03						919.54	845.98

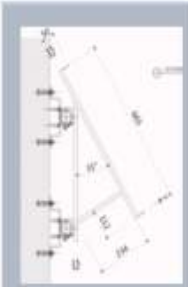
다. **도봉산 역사 태양광 발전 구성도**

○ 도봉산 역사 태양광 발전 구성도



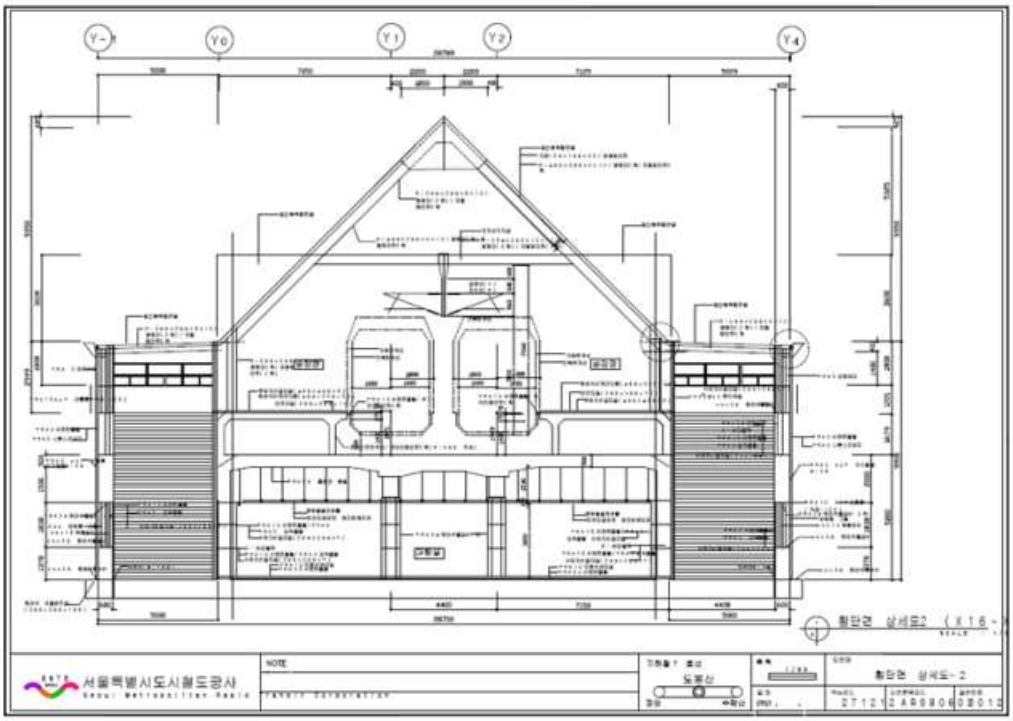
<그림 3-2-27> 도봉산 역사 태양광 적용 전체 계획도

○ 도봉산 역사 실리콘(SI) 결정질 모듈 표준

구분		사양	비고
태양광 모듈		- 면적 : 660 x 1,460 mm² - 셀수 : 4 x 9 - 발전량 : 150W - 무게 : 15kg	-전압 : 22.8V -셀타입: 156mm x 156mm
지그		- 규격 : 경사바=665mm 수직바=550mm 받침바=234mm 각도(경사∠수직)=31° 경사 위막음=50mm 경사 아래막음=50mm - 도장 : 불소 수지 도장 (20년) - 재료 : 강철 - 두께 : 2mm - 무게 : 2.7kg	
클램프		- 아시바 클램프 (기존 제품) - 직경 : 48Φ - 무게 : 350g	

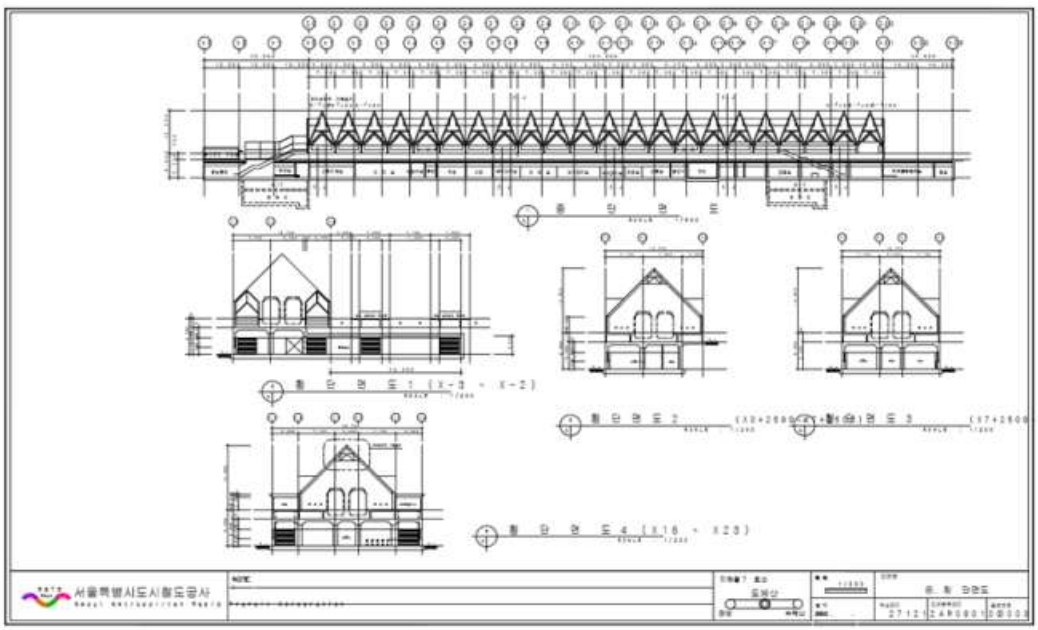
<그림 3-2-28> 도봉산 역사 실리콘(SI) 결정질 모듈 표준

○ 도봉산 역사 평면도 분석 : 횡단면 상세도



<그림 3-2-29> 도봉산 역사 평면도 분석 : 횡단면 상세도

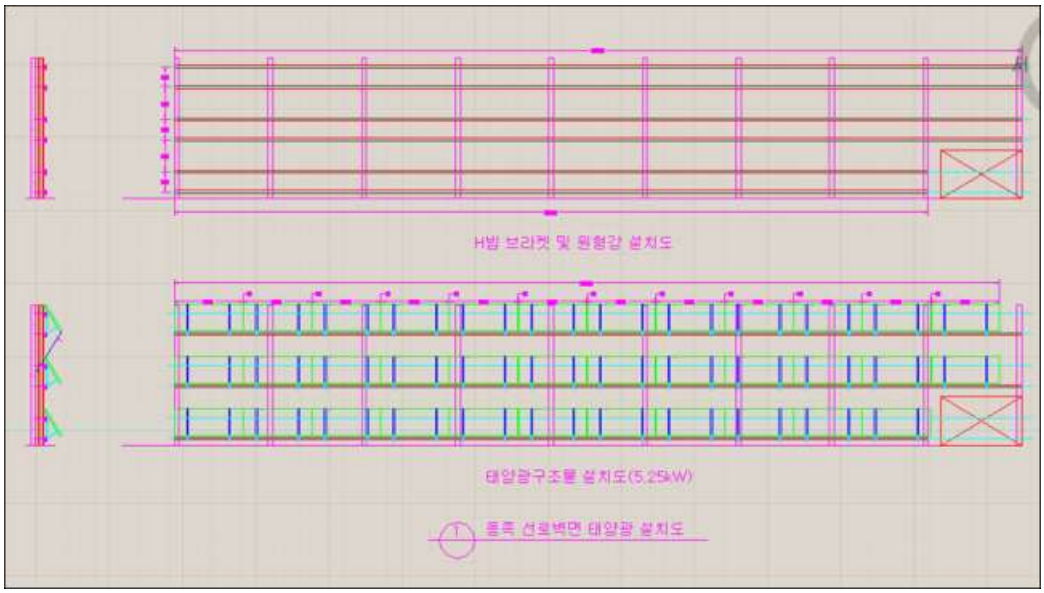
○ 도봉산 역사 평면도 분석 : 종단면 상세도



<그림 3-2-30> 도봉산 역사 평면도 분석 : 종단면 상세도

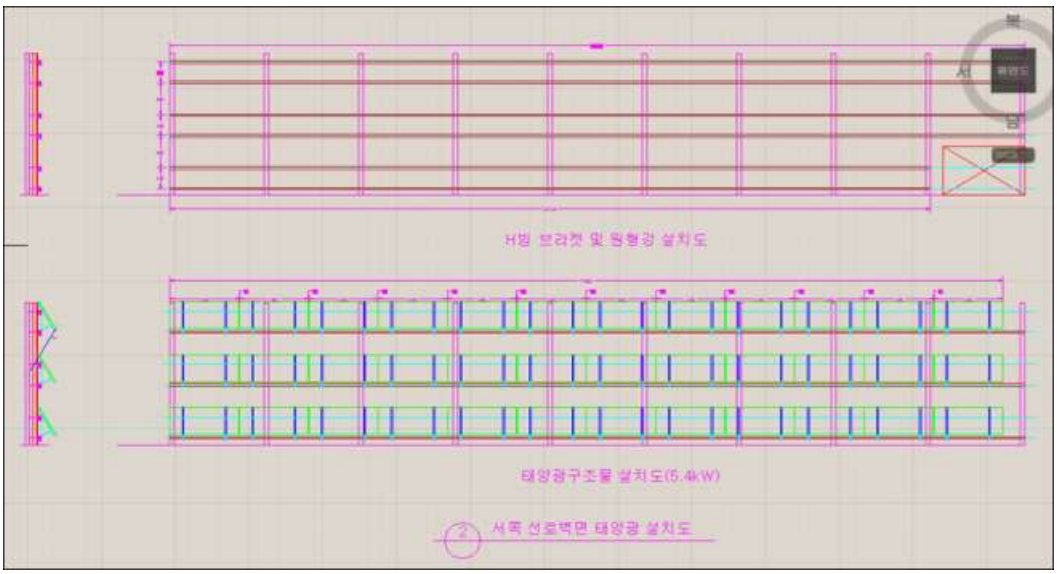
○ 도봉산 역사 결정질 태양광 설치 도면 작성

- 도봉산 역사 동쪽 선로벽면 태양광 모듈 설치도



<그림 3-2-31> 도봉산 역사 동쪽 선로벽면 태양광 모듈 설치도

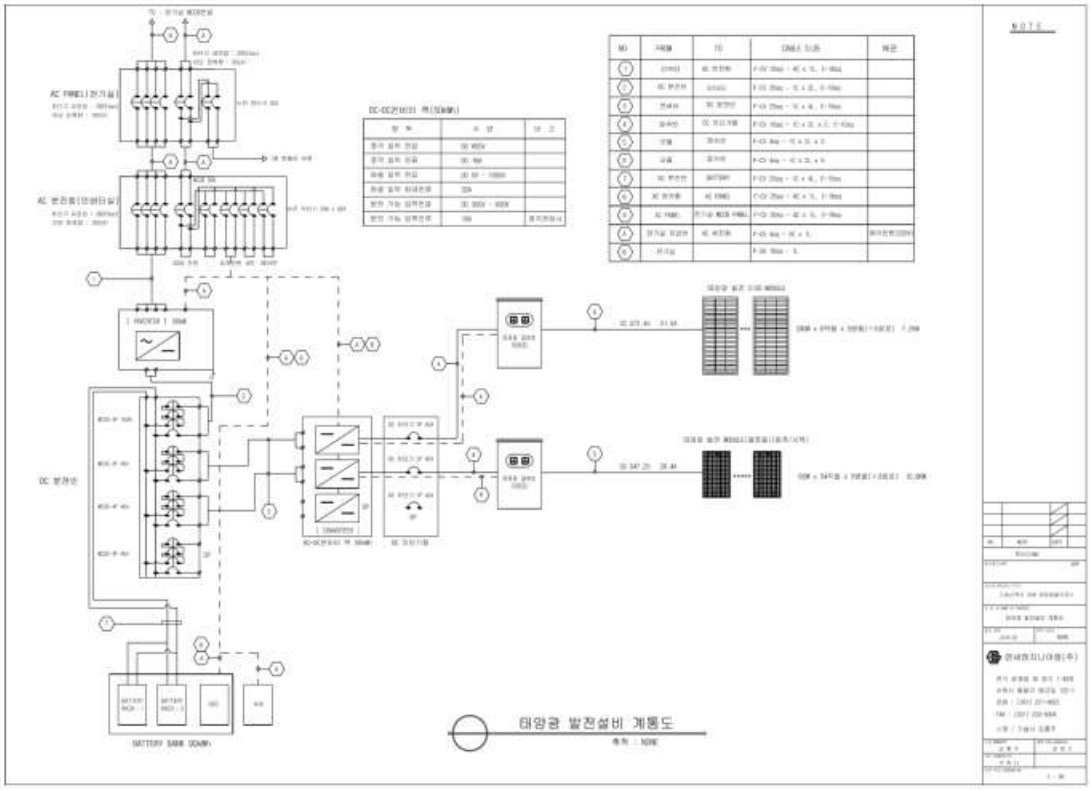
- 도봉산 역사 서쪽 선로벽면 태양광 모듈 설치도



<그림 3-2-32> 도봉산 역사 서쪽 선로벽면 태양광 모듈 설치도

○ 도봉산 역사 태양광발전시스템 및 ESS 시스템 연계방안 구축

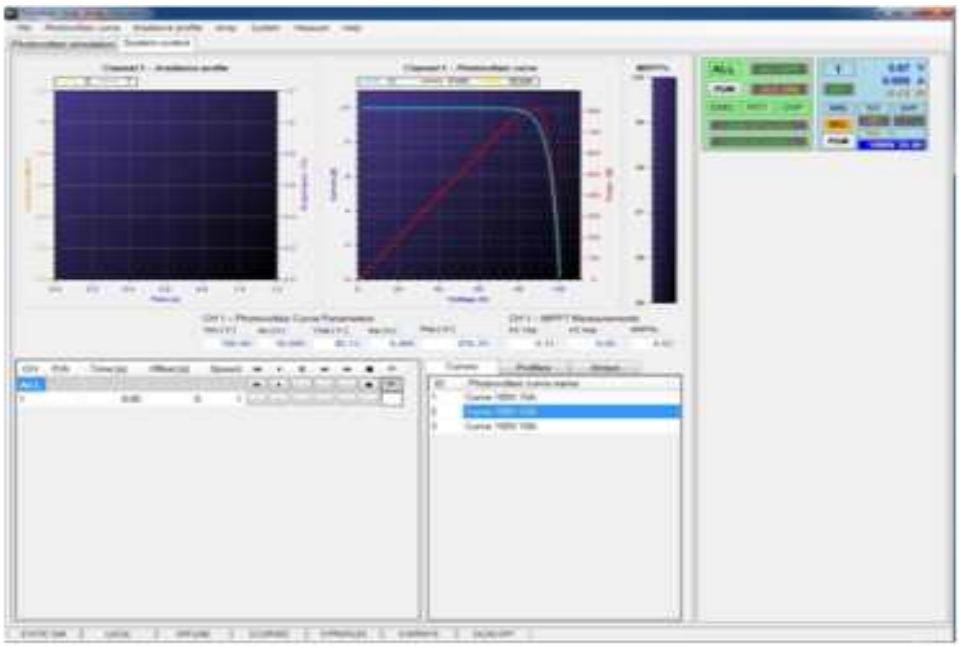
- 도봉산 역사 태양광-계통도



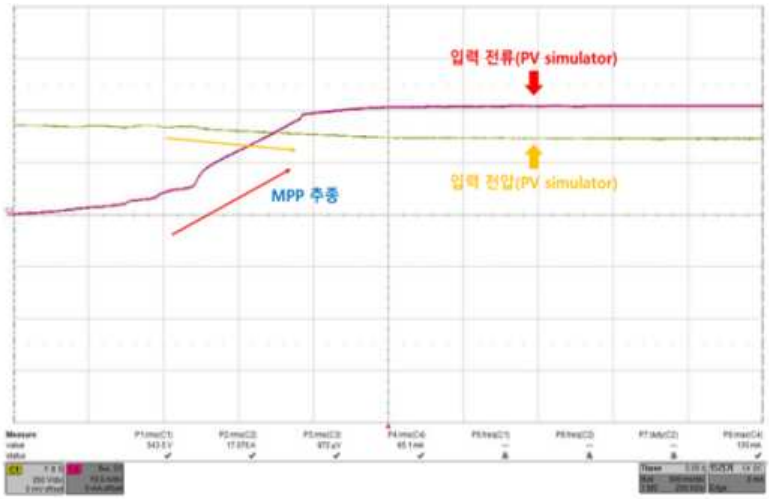
<그림 3-2-33> 도봉산 역사 태양광-계통도

○ 12kW급 DC/DC 컨버터 입력 전류/전압 및 출력 전류/전압 측정시험

- 도봉산 역사 태양광 컨버터 (12kW) 시험



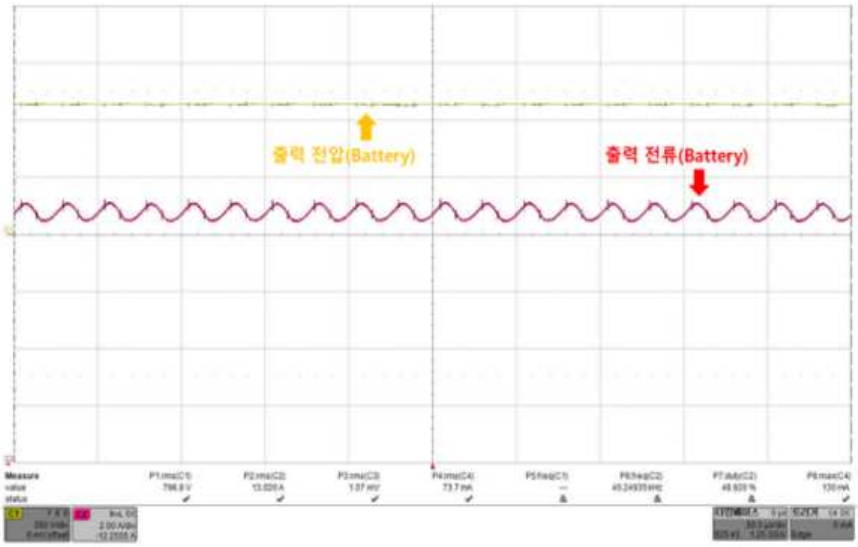
<그림 3-2-34> 태양광 컨버터 성능검증 시뮬레이터



측정채널	CH_1	CH_2	Time Base
측정 포인트	입력 전압	입력 전류	500ms/div
Color	YELLOW	RED	

<그림 3-2-35> 태양광 컨버터 입력 전압, 전류파형

- PV simulator는 일정한 일사량과 온도 조건에서 초기 조건에서 최대전력점까지 2.5초 추종시간이 소모되며, MPP 도달시 효율 99~100%사이를 500ms 주기로 유지함.



측정채널	CH_1	CH_2	Time Base
측정 포인트	출력 전압	출력 전류	500ms/div
Color	YELLOW	RED	

<그림 3-2-36> 태양광 컨버터 출력 전압, 전류파형

- 컨버터 출력을 통해 배터리 전압은 796V까지 상승하며 전류는 13A이며, 출력 전류 리플은 1A정도임.

4. 도봉산 역사 태양광 발전 시스템 현장구축

가. 설치 현황

- 결정질 모듈 : 150W × 72장 = 10.8kW
- 플렉시블 모듈 : 240W × 30장 = 7.2kW
- DC/DC컨버터 : 12kW × 3대
- 에너지저장장치 : 90kWh × 1대
- 인버터 : 50kW × 1대

나. 도봉산 역사 태양광 모듈 적용 설치

- 도봉산 역사 결정질 태양광 모듈 적용 설치



<그림 3-2-37> 도봉산 역사 결정질 태양광 모듈 재료 운반



<그림 3-2-38> 결정질 태양광 모듈 경량 지지대 및 구조물



<그림 3-2-39> 결정질 태양광 모듈 경량 구조물 및 태양광 모듈



<그림 3-2-40> 도봉산 역사 태양광(동쪽 면)



<그림 3-2-41> 도봉산 역사 태양광(서쪽 면)

- 도봉산 역사 CIGS 플렉시블 모듈 적용 설치



<그림 3-2-42> CIGS 플렉시블 모듈 설치를 위한 재료 운반



<그림 3-2-43> 역사 지붕 시공(특수 접착제 이용하여 별도의 추가 장비 및 하중 없음)

- 도봉산 역사 태양광 모듈 적용 설치 결과



<그림 3-2-44> 도봉산 역사 결정질 및 CIGS 플렉시블 태양광 발전소

다. 도봉산 역사 태양광 발전 전력변환장치



<그림 3-2-45> DC/DC컨버터(좌측), 저장장치 및 인버터(우측)



<그림 3-2-46> AC 전력 케이블(좌) 및 DC 차단기/AC분전반



<그림 3-2-47> AC차단기 및 DC차단기 내부 구성



<그림 3-2-48> DC차단기 및 50kW 인버터 및 90kWh 에너지저장장치



<그림 3-2-49> 통합 모니터링 시스템(좌) 및 발전량 모니터링(우)

라. 도봉산 역사 태양광 발전 모니터링 시스템

- 도봉산 태양광 발전설비 프로젝트 내 발전량 및 발전 환경 모니터링 시스템을 구축
- 발전 전력의 컨버팅 이후 배터리와 인버터로 전달되는 발전량을 모니터링 하고 일사량을 포함한 외기 환경과의 발전 영향을 평가하고 수집된 발전 정보를 현황 알림판을 통해 게시함.

<표 3-2-7> 시스템 구성 요약

전류/전압 모니터링 시스템	현황알림판	외기센싱
Monitoring system Board 전류/전압 센서 Nand Memory part sensor signal Converter	FND View Panel	풍향/속 센서 온도 센서 일사량 센서



<그림 3-2-50> 시스템 구성 사진

마. **도봉산 역사 태양광 발전 현장구축 시 한계**

- 도봉산 역사와 같이 기존 역사에 태양광 모듈을 설치하는 경우 기존 시설물과의 간섭 및 역사 구조물의 노후화로 인해 실질적인 한계가 있음.
- 도봉산 역사의 경우 태양광 모듈 설치시의 지상역사 바닥면의 방수 문제로 인해 일부 구간의 설치에 한계가 있었으며, 가로수, 냉방장치 실외기 등 기 설치된 설비로 인해 태양광 발전을 위한 일조량에 한계가 있어 설치가 효과가 미비할 수 있음.(당초 계획 용량 : 23kWp → 실제 설치 용량 10.8kW)
- 기존 역사 구조물에 설치하는 경우 최대 발전효율을 위한 입사각 확보가 매우 중요함. 따라서 설치 위치를 고려하여 가능한 한 남향이면서 입사각 30도를 확보하기 위한 설계 및 시뮬레이션이 선행되어야 함.

5. 경량화 태양광 모듈 및 플렉서블 CIGS 시스템 성능평가 및 유지보수

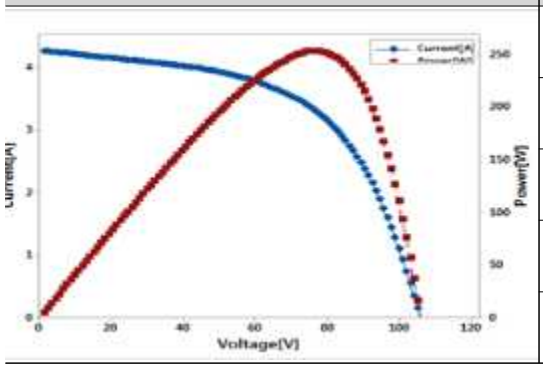
가. 철도역사 테스트베드 현장평가 (CIGS Flexible module)(시공 전)

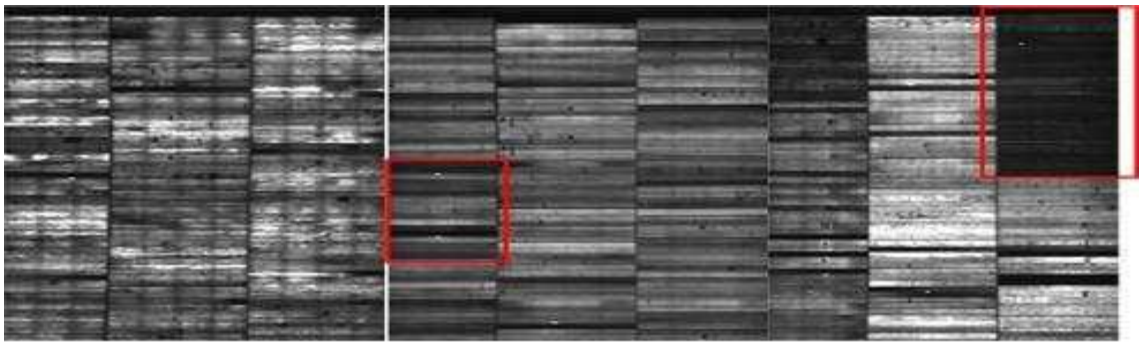
- 철도역사 테스트베드 대상 중 총 30매 중 5매 샘플링 테스트 수행함.



<그림 3-2-51> 철도역사 테스트베드

<표 3-2-8> 철도역사 테스트베드 현장평가 결과

전류-전압 곡선	샘플	Voc(V)	Isc(A)	Pmax(W)	FF(%)
	1	105.9	4.26	253.7	56.23
	2	102.1	4.38	250.6	56.02
	3	106.3	4.24	256.7	56.93
	4	105.3	4.23	251.0	56.38
	5	106.3	4.27	269.2	59.28



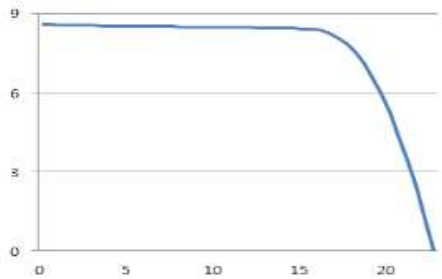
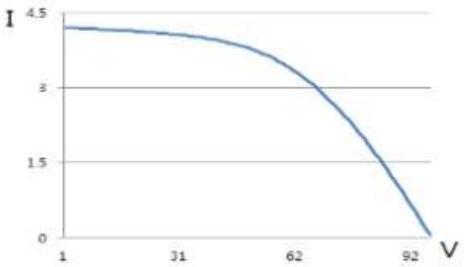
<그림 3-2-52> EL 이미지 측정

- 240W CIGS Flexible type 모듈에 대하여 약 250W 이상의 높은 발전량을 나타내며, 샘플링 모듈 중 일부에서 Hot-spot 등이 나타나지만 최대전력량 이상의 양호한 모듈인 것으로 판단됨.

나. 철도역사 테스트베드 Lab-test (CIGS Flexible module, c-Si module)

- 철도역사 테스트베드 Lab-test 수행함.

<표 3-2-9> 철도역사 테스트베드 Lab-test 결과

구분	사진		전류-전압 곡선	
c-Si				
	Voc(V)	Isc(A)	Pmax(W)	FF(%)
	22.7	8.59	141.5	72.5
구분	사진		전류-전압 곡선	
Type 2				
	Voc(V)	Isc(A)	Pmax(W)	FF(%)
	96.6	4.21	202.2	50.1

- 결정형 모듈의 경우 140 W의 발전량을 나타내었으나 CIGS 모듈의 경우 202 W의 발전량을 나타내었음.
- CIGS 모듈의 경우 240 W로 인증을 받았으나 본 연구에서 평가한 결과 약 40 W가 낮게 나타남을 확인하였음.
- 본 결과는 기존 현장평가에서 240 W 초과하여 발전하는 결과와 다소 다른 결과이나 광원이 LED와 Xe-lamp로 상이하고 흡수파장이 결정형 모듈에 맞추어져 있어 차이가 나는 것으로 판단되며 현장평가와의 종합적 분석이 필요할 것으로 판단됨.

다. **경량화 태양광 모듈 및 플렉서블 CIGS 시스템 성능평가 (시공 후)**

- 태양광 모듈 시공 후 도봉산 역사 현장 평가 수행함.

<표 3-2-10> 도봉산 태양광 모듈 성능

모듈	직병렬	성능					
		모듈 수(장)		전압(V)	전류(A)	발전량(kW)	비고
CIGS Flexible module	6직렬 5병렬	30		572.4	21.5	7.2	
c-Si module	24직렬 3병렬	동쪽	34	547.2	26.4	10.8	에어컨 실외기로 인해 동쪽에 설치될 모듈(2)을 서쪽에 설치
		서쪽	38				



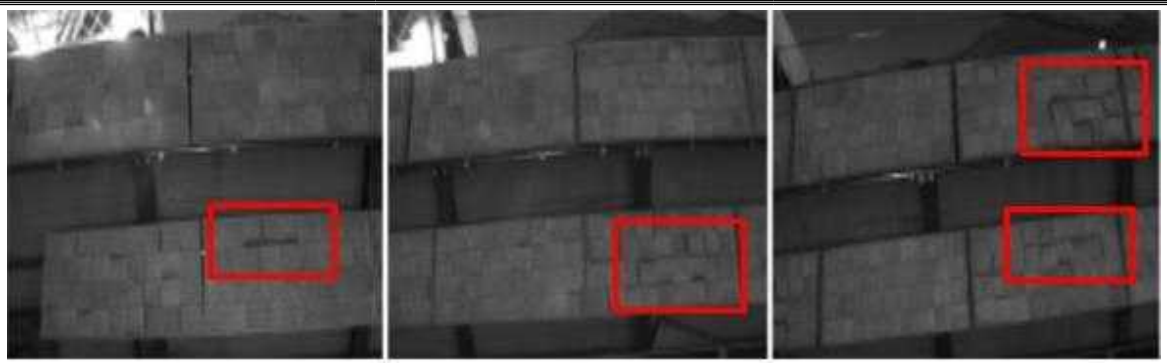
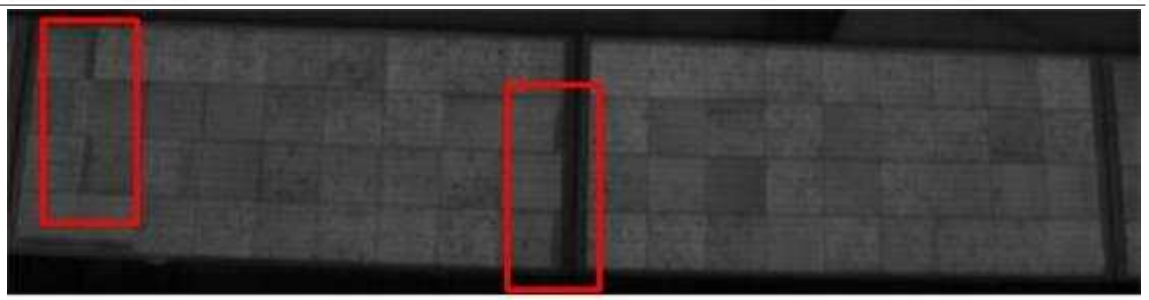
<그림 3-2-53> 도봉산 태양광 모듈

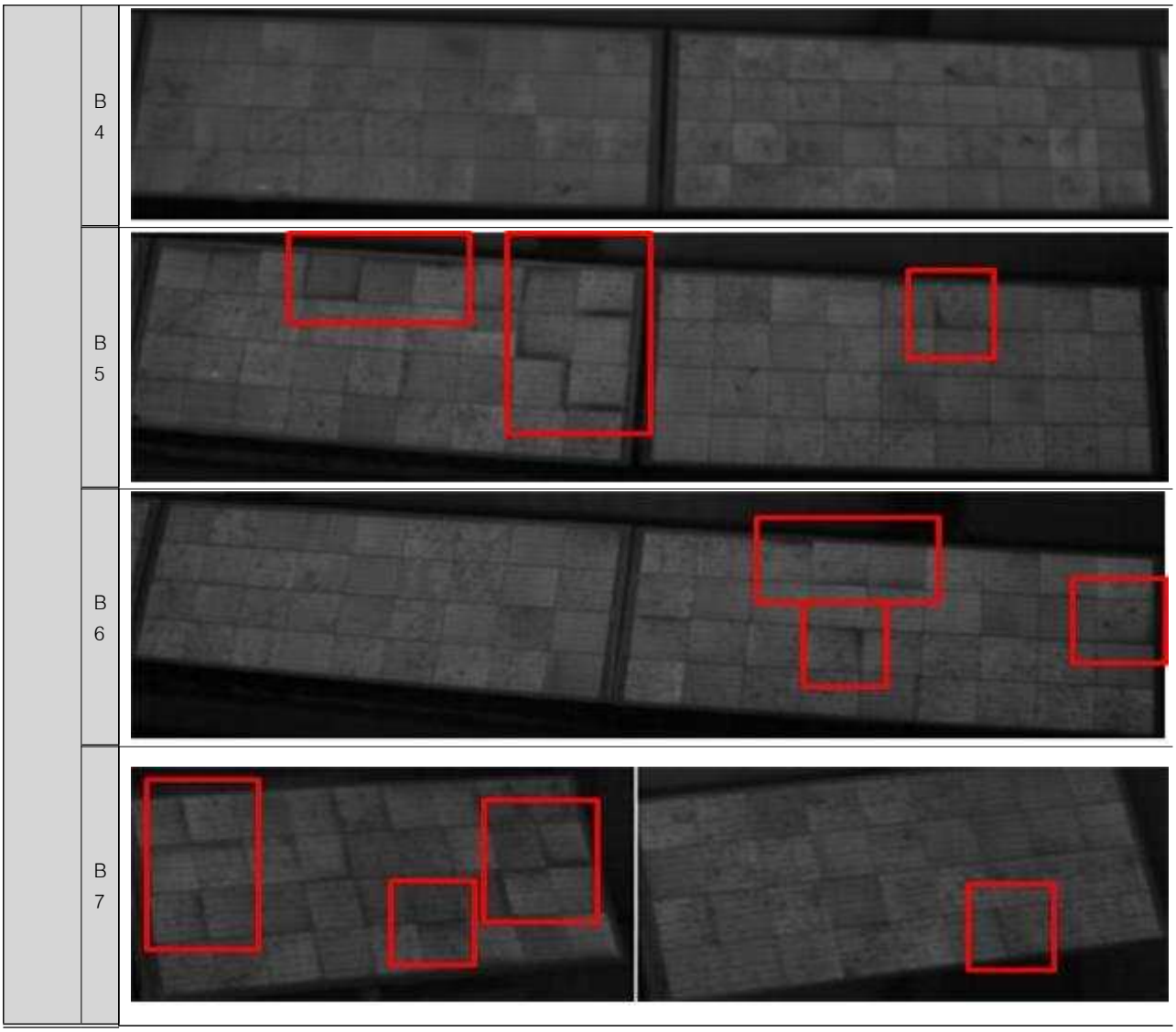
<표 3-2-11> 도봉산 태양광 모듈

CIGS Flexible module		
c-Si module		

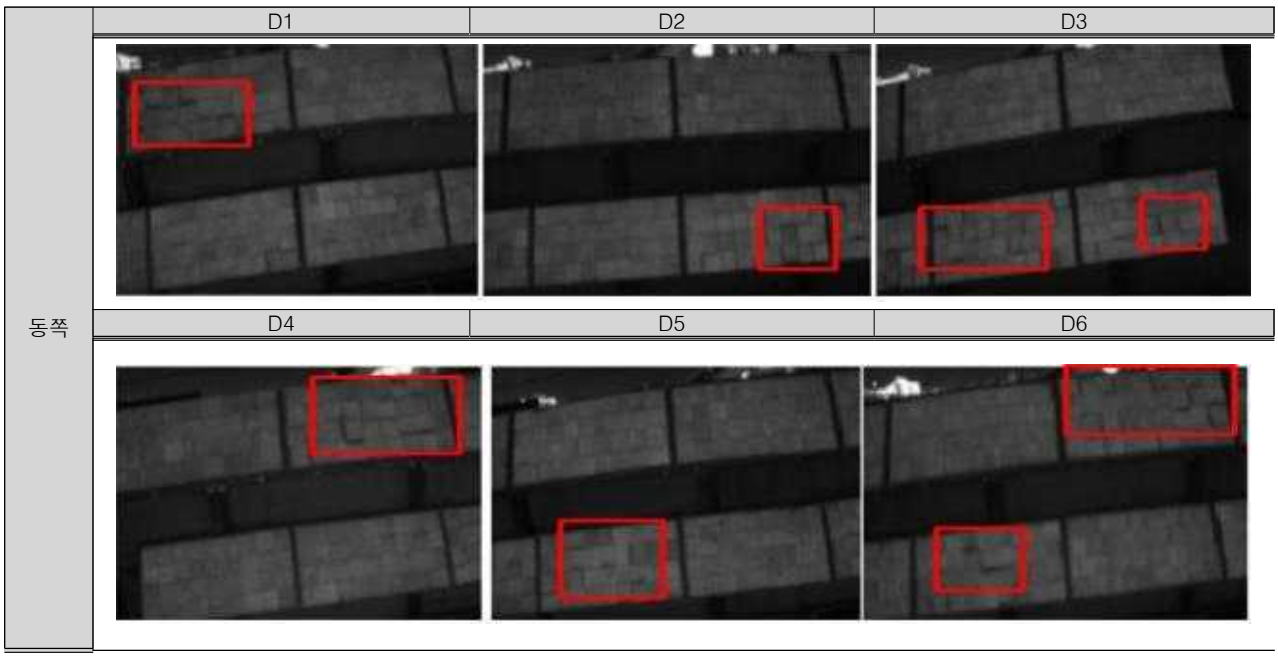
(1) 경량화 태양광 모듈 EL(Electroluminescence) 측정

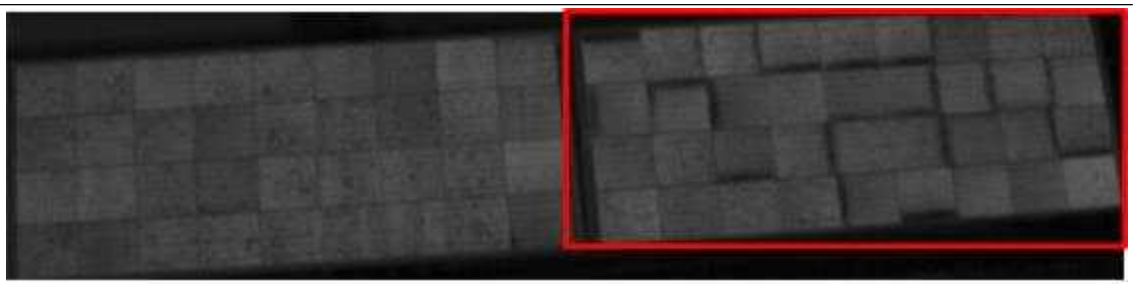
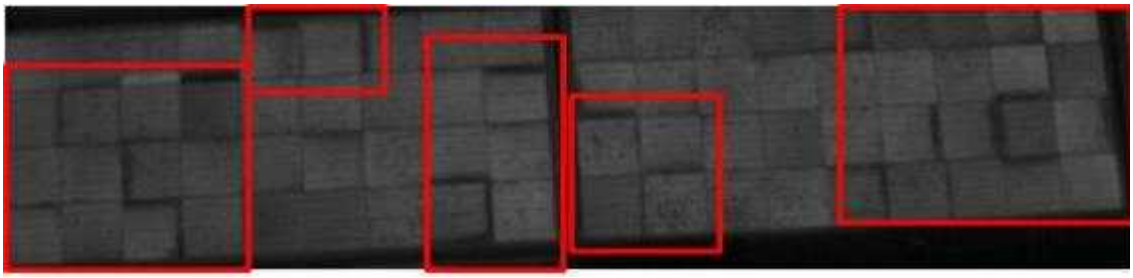
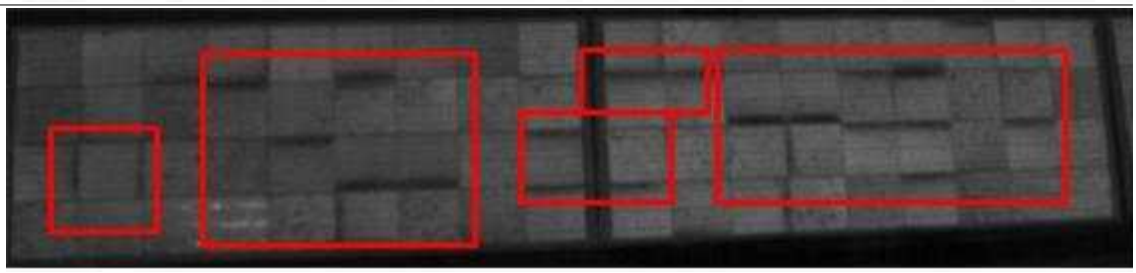
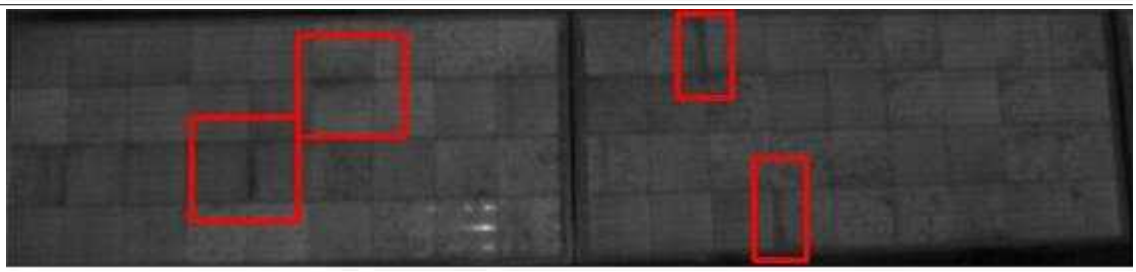
<표 3-2-12> 경량화 태양광 모듈 EL(Electroluminescence) 측정(서쪽)

서쪽	A1	A2	A3
			
	A4	A5	A6
			
	B1		
	B2		
	B3		



<표 3-2-13> 경량화 태양광 모듈 EL(Electroluminescence) 측정(동쪽)

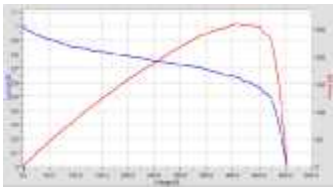
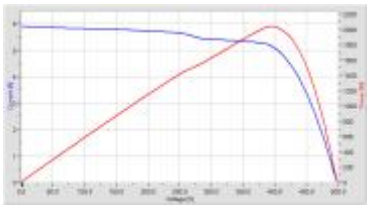
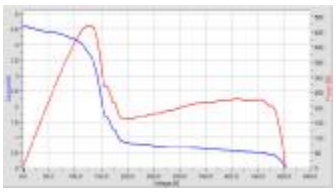
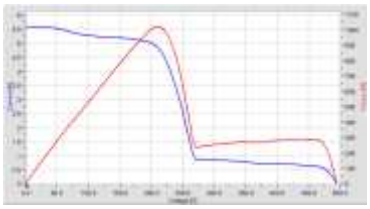
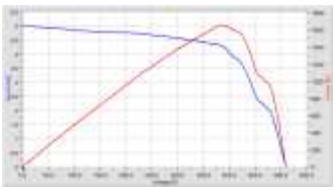
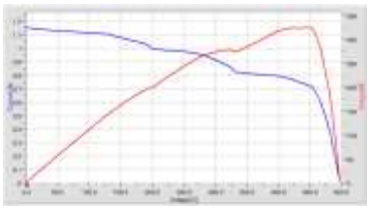
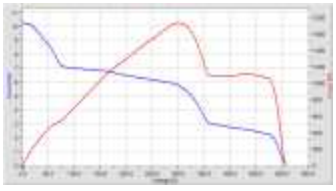
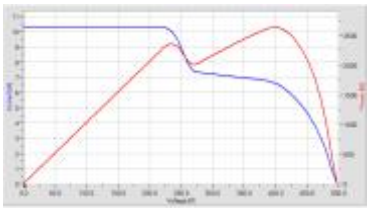


	C 1	
	C 2	
	C 3	
	C 4	
	C 5	

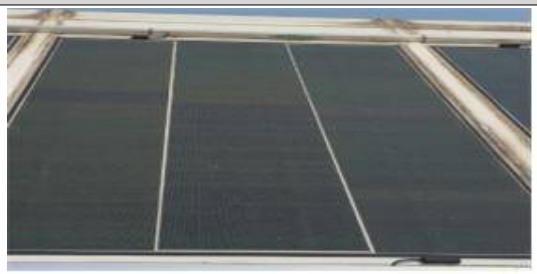
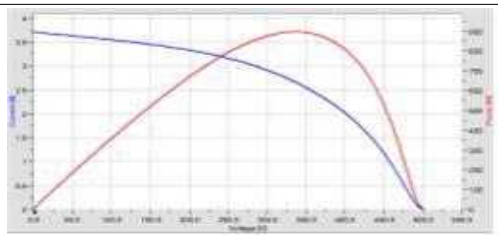
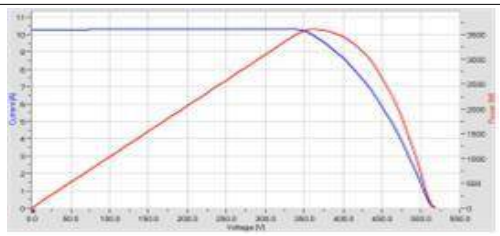
- 태양광 모듈의 결함을 확인하기 위하여 현장에 적용된 태양광 모듈의 EL 이미지를 측정하였음.
- 붉은색으로 표기되는 부분이 모듈 공정 및 태양광 셀 상에 문제가 있어 보이는 부분이나 현재 발전량에 영향을 줄 정도로 큰 defect는 없는 것으로 판단됨.

(2) 경량화 태양광 모듈 발전량 측정

<표 3-2-14> 도봉산 태양광 (c-Si) module 발전량

구분	시간	
	09시 45분	13시 50분
실사진 (그림자)		
일사량	경사일사 : 650 W/m^2	경사일사 : 770 W/m^2
서쪽 상부 두 열		
서쪽 하부 한 열, 동쪽 하부 한 열		
동쪽 상부 두 열		
전체		

<표 3-2-15> 도봉산 태양광 (CIGS) module 발전량

구분	시간	
	10시 10분	13시 40분
실사진 (그림자)		
일사량	경사일사 : 330 W/m^2	경사일사 : 755 W/m^2
전체		

- 결정형 모듈의 경우, 인버터 동작전압을 맞추기 위하여 약 600 V 미만인 520 V가 되도록 설계를 하였으며 동측 및 서측에 설치된 결정형 태양광 모듈에 대하여 3병렬로 설계/시공하였음.
- 동향에 설치된 태양광 모듈은 오전 11시 이전에 가장 높은 발전량과 경사일사량을 나타냄을 확인하였으며 이후에는 서향에서 높은 발전량을 나타냄.
- 설계상 약 520 V의 동작전압을 맞추기 위하여 입사광량이 상이한 동향과 서향으로 설치된 태양광 모듈을 직렬로 연결함으로써 동향 혹은 서향으로 경사일사가 그림자 없이 나타남에도 불구하고 발전량은 매우 낮은 것으로 확인됨.
- 또한, 동향과 서향의 입사각도를 약 30도로 설정하여 설치하였는데 이는 남향으로 설치된 태양광 모듈의 경우 유리할 수 있으나 도시철도 역사 현장에서는 10시 이후에서 2시에 이르는 시간동안 모듈에 그림자가 생겨 발전량이 매우 감소하는 현상을 확인할 수 있었음.
- 따라서 태양광 모듈의 경사없이 벽면에 세워 설치한다면 일일 발전량은 개선될 수 있을 것으로 판단되며 또한, 동향과 서향으로 직렬로 연결된 스트링을 따로 설치하여 같은 방향에서의 태양광 모듈이 같은 일사량을 받을 수 있도록 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단됨.
- CIGS 모듈의 경우 그림자의 영향 없는 지붕면에 설치되어 있어 광의 입사각에 영향 없이 고른 I-V 곡선을 보임을 확인할 수 있었음. 따라서 CIGS 모듈은 설계/시공이 적절한 것으로 판단할 수 있음.
- 다만, 일부 CIGS 모듈에 대하여 입사각도에 따라 케이블 하우징이 그림자를 생성하는 것으로 분석되었으나, CIGS 모듈의 특성상 모듈 내 고른 한 줄의 그림자는 발전량에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단됨.

라. **도봉산 역사 태양광발전 시스템 발전성능**

- ESS (90kWh), 인버터(50kW) 40kWh 2시간 방전 가능
- 64kWh/일 전력 발생 (목표치 : 최대 105kWh/일, 30kWp 설치기준)



< 일반적인 태양광발전에 따른 ESS 충전 및 방전>



< 4월 9일 기준 최대 태양광 발전에 의한 ESS 충전량>

<그림 3-2-54> 도봉산 역사 태양광 발전량 실측

마. **도시철도 역사 신재생에너지 시스템 유지보수 및 점검방법**

(1) 도시철도 역사 신재생에너지 시스템 유지보수 목적

- 도시철도 역사에 적용되는 신재생에너지 시스템의 유지관리는 신재생에너지 시스템이 제 기능을 유지하기 위하여 수시점검, 일상점검, 정기점검 등을 통하여 사전에 유해요인을 제거하고 불량 부분을 보완하여 경과시간에 따라 요구되는 시설물의 신재생에너지 발전을 최적화하고 주변 환경에 대한 안전을 확보하고자 함.

(2) 도시철도 역사 신재생에너지 시스템 유지보수 및 점검방법

(가) 어레이 시스템

- 외관점검 : 태양광 모듈은 현장이동 및 설치 혹은 기후변화 등에 의하여 파손, 변형, 변색 등이 발생할 수 있으므로 반드시 외관점검을 실시해야 함. 또한, 배선의 손상유무를 수시점검을 통하여 육안검사로 점검하여 절연저항 저하, 절연파괴를 미연에 방지해야 함.
- 출력점검 : 신재생에너지 발전 시스템은 출력을 얻기 위하여 다수의 태양전지 모듈을 직·병렬로 접속하여 어레이를 구성하게 되는데 일부 모듈에서 출력저하, 모듈파괴 등이 발생하였을 경우, 전체 시스템의 출력을 저하시킬 수 있기 때문에 정기점검을 통하여 어레이의 출력을 확인하여 결함을 점검하여야 함.
  - 개방전압 측정 : 태양전지 어레이의 각 스트링의 개방전압을 측정하여 개발전압 불균일에 따른 동작불량을 점검하여야 함. 다만, 일사조건이 나쁜 경우 개방전압이 하락할 수 있으므로 태양전지 어레이 표면청소, 안정된 일사강도 상 측정 등을 주의하여 측정하여야 함. 개방전압 측정 순서는 아래와 같이 진행함.

    i. 접속함 주개폐기 개방

    ii. 접속함 각 스트링의 MCCB 또는 퓨즈 개방(off 상태)

    iii. 각 모듈이 그늘져 있지 않은지 확인

    iv. 직류전압계로 각 스트링의 단자간 전압을 측정. 이때 전압계 측정 범위를 전류 측정으로 되지 않도록 주의(단락전류가 흐를 위험이 있음)

  - 단락전류 확인 : 어레이의 단락전류를 측정함으로써 태양전지의 모듈 이상유무를 검출할 수 있음. 모듈의 단락전류는 일사강도에 따라 크게 변화하므로 안정한 일사강도 이상에서 측정함.
- 전기안전성
  - 절연저항 측정 : 신재생에너지 시스템의 각 부 절연상태를 운전하기 전에 확인하여야 함. 측정은 절연저항계로 측정하며 절연저항은 기온이나 습도에 영향을 받으므로 온도, 습도를 측정값과 같이 기록하고 우천시 절연저항 점검은 피해야 함.
  - 절연내력 측정 : 절연저항 측정과 같은 환경에서 어레이의 개방전압을 최대 사용전압으로 간주하고 이의 1.5 배 직류전압 혹은 1배의 교류전압(500 V 미만일 경우는 500 V)을 최대 10분간 인가하여 절연파괴 등의 이상이 발생하는지 확인함.

(나) 접속반

- 외관점검 : 접속반은 운영중 진동 등에 의하여 접속부 볼트단자가 풀리거나 접지에 문제가 생길 수 있고 외함의 부식/파손, 외부배선의 손상, 접속단자의 이완, 접지선 및 접속단자 손상 유무를 외관점검을 통하여 확인하여야 함.
- 운전점검 : 접속반으로 연결되는 배선에 대한 개방전압 불균일에 따른 출력저하점검, 배선결함, 블록킹 다이오드의 정상동작 여부, 퓨즈 등 수명주기 부품에 대한 정기점검을 수행하여야 하며 수명주기 부품은 예비품을 항상 구비하여 발전성능의 저하를 최소화할 수 있도록 조치하여야 함.

(다) 인버터

- 외관점검 : 외함의 부식 및 파손, 외부배선의 손상, 접속단자의 이완 및 접지선 손상을 점검하여야 함. 또한, 인버터 발열의 특성상 통풍구 및 환기필터의 운전 상태를 확인하여 인버터 효율 및 수명저하를 방지하여야 함.
- 성능점검 : Power Analyzer 등을 통하여 AC/DC 전압전류를 측정할 수 있는 계측장비를 통하여 계측된 전력값을 통하여 계산된 인버터 효율과 인버터 인디케이터에 표시되는 효율값 비교를 통하여 성능점검을 수행하여야 함. 또한, 인버터는 60 Hz 기본파의 정수배 주파수를 갖는 고조파 발생을 야기할 수 있으며 고조파 영향은 전력설비 과열 소손, 계측기 오작동 등 기기에 심각한 문제를 야기할 수 있으므로 주기적으로 인버터 2차측에서의 고조파 측정이 정기점검으로 수행되어야 함.

(라) 먼지오염 등에 의한 청소시 주의사항

- 일반적으로 태양광 모듈은 황사, 미세먼지 등 환경에 의한 Soiling 현상에 의하여 발전성능이 저하되는 특성을 가지고 있으며 그 원인은 광조사 차단에 의한 단락전류 감소, 표면에 흡착된 물질의 열흡수 및 모듈 내부 열방출 차단에 의한 온도증가로 개방전압 감소로 대표됨.
- 현재 Soiling 현상 개선을 위하여 Anti-Soiling 코팅 등을 적용하고 있으나 상용화 단계는 아니며 Soiling에 의한 발전감소에 비하여 소재적용 공정비용이 커 활용되지 않고 있음.
- 따라서 정기점검과 더불어 주기적으로 먼지오염에 대한 청소를 통하여 시스템의 출력 유지를 도모할 수 있으나 아래와 같은 주의사항을 따라서 수행하여야 함.
  - 시스템의 모듈 어레이는 충격에 취약하며 충격을 받았을 경우 모듈 자체의 육안상 손상이 보이지 않더라도 셀 내부에 손상이 생길 수 있으므로 작업자의 작업가대 등을 설치하여야 하며 모듈을 밟거나 기대지 않도록 주의하여야 함.
  - 먼지오염에 대한 청소시 태양광 모듈은 지속적으로 발전이 되고 있으므로 많은 물을 뿌리지 않아야 하며 작업자의 안전을 위하여 절연 장갑 등을 착용하여야 함. 또한, 모듈 표면이 손상되지 않도록 부드러운 천을 이용하여 청소를 수행하여야 함.

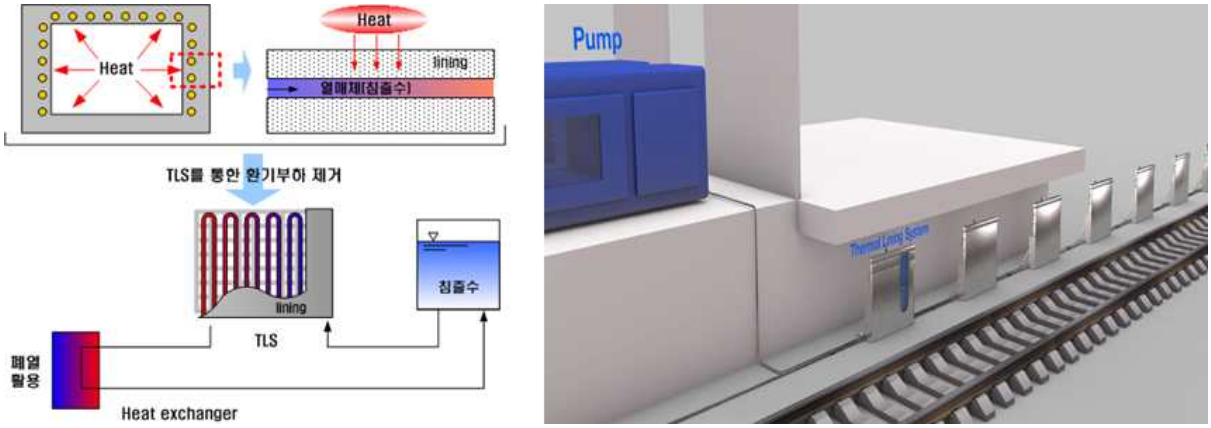
제3절. 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템

1. 시스템 개요

가. 시스템 개요 및 구성

(1) 시스템 개요

- 도시철도 역사의 미이용 에너지(지하 침출수)를 이용하여 터널을 냉각하는 기술로, 역사의 승강장 하부에 선로흡열장치(TLS : Thermal Lining System)를 설치하여 열차 정차시 발생되는 열을 제거함으로써 터널내 열부하를 감소시킬 수 있는 기술임. 이를 통해 도시철도 역사 및 선로의 고온화를 방지하고 온도 조절을 위한 환기용 송풍기의 운영 시간을 줄여 동력비용을 절감하기 위한 시스템임.



<그림 3-3-1> 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템 개요

(2) 시스템 구성(선로 실사 모의시험장치용)

- 선로흡열모듈
  - 1m x 1m, 두께 20mm TLS 패널 15개 설치
  - 65mm × 65mm 두께 8T ㄱ형강 받침대
- 열교환장치(순환펌프 포함)
  - 열교환기 : 50,000kcal/h 용량, STS3004, 사이즈 285×105×54mm
  - 유량계, 온도센서, 압력센서 등
  - 팽창 탱크 : 12Liter, 최대 99℃
  - 펌프 : 횡형 다단펌프(냉수 순환용), 자흡식 펌프(지하 침출수 유입용)
  - 제어기(온도, 유량, 압력 모니터링 및 제어 기능) 등
- 열교환모듈 시험장치
  - 챔버 크기 : 길이 4.6m, 단면적 : 0.5㎡, 내부 폭 : 0.5m, 내부 높이 : 1.0m
  - 덕트 직경/단면적 : 0.25m/0.0491㎡
  - 송풍기 : 시로코형 송풍기(최대 풍량 : 75CMM, 최대 정압 62mmAq)
  - 히터 : 기본 히터 3개, 보조 히터 4개
  - 온도센서, 유속센서 등

나. **시스템 기능 및 성능**

(1) 기능

- 기존 지하 침출수(또는 냉각 용매)를 활용하여 전동차 하부 열을 흡열하는 기능
- 평면형 흡열모듈/곡면형 흡열모듈 단위모듈을 제작하여 승강장 하부에 설치 가능
- TES(선로부 배기시스템) 또는 터널환기시스템 운영 동력 절감

(2) 목표 성능

- 단위 모듈당 열 흡수량 : 185W/㎡
- 일일 환기시스템 에너지 절감 환산량 : 최대 176kWh/일

(3) 고려사항

- TLS 시스템의 경우 전동차로부터 발생된 열을 흡열하므로 열축적이 상대적으로 낮은 동절기에는 효율이 감소
- 기상조건 및 지하공간 내 높은 온도와 습도 환경에서 TLS 표면에 응결수가 발생하는 경우에 효율이 감소

2. **도시철도 냉난방 부하특성**

가. **설계조건 및 기준**

- 지하 도시철도에서 발생하는 냉난방 부하 및 환기 부하는 크게 승강장 및 대합실에서 발생하는 냉난방 부하와 하절기 지하 터널에서 발생하는 냉방 부하에 의한 본선의 환기부하로 구분 할 수 있음.
- 승강장 및 대합실과 지하터널에 있어 이들 부하의 산정에 있어 일반적으로 사용되는 기준들의 상세한 사항은 아래와 같음.

<표 3-3-1> 일반적인 부하 산정 기준과 설계 기준

1) 승강장 및 대합실의 냉난방 부하 산정 기준	가) 외기 온습도 기준
	나) 실내 온습도 기준
	다) 인체 발열량 기준
	라) 실내 부하기준
	마) 전기기기 발열기준
	바) 에스컬레이터 발열부하 기준
	사) 대합실과 승강장 인원산정 기준
	아) 환기량 기준
	자) 대합실과 승강장 공조기 선정 관련 기준
2) 지하터널 본선환기 설계기준	가) 지중온도 기준
	나) 실내 발생열 기준
	다) 차량 제원
	라) 여름 외기 온습도 기준
	마) 터널 열부하 산정 기준

(1) 승강장 및 대합실의 냉난방 부하 산정 기준

<표 3-3-2> 외기온습도 기준 (국토해양부 고시 제2008-5호)

구 분 / 도시명	냉 방		난 방	
	건구온도(℃)	습구온도(℃)	건구온도(℃)	상대습도(%)
서 울	31.2	25.5	-11.3	63
인 천	30.1	25	-10.4	58
수 원	31.2	25.5	-12.4	70
춘 천	31.6	25.2	-14.7	77
강 릉	31.6	25.1	-7.9	42
대 전	32.3	25.5	-10.3	71
청 주	32.5	25.8	-12.1	76
전 주	32.4	25.8	-8.7	72
서 산	31.1	25.8	-9.6	78
광 주	31.8	26	-6.6	70
대 구	33.3	25.8	-7.6	61
부 산	30.7	26.2	-5.3	46
진 주	31.6	26.3	-8.4	76
울 산	32.2	26.8	-7	70
포 항	32.5	26	-6.4	41
목 포	31.1	26.3	-4.7	75
제 주	30.9	26.3	0.1	70

<표 3-3-3> 실내 온습도 기준

구분	하절기		동절기		비고
	건구온도(℃)	상대습도(%)	건구온도(℃)	상대습도(%)	
사무실	26	60 이하	20	-	-
대합실	28	60 이하	-	-	-
승강장	28	60 이하	-	-	-
전기실	40 이하	-	40 이하	-	-

<표 3-3-4> 인체 발열량 기준 (단위 : W/㎡)

구분	전열	현열	잠열	비고
대합실, 승강장	161.2	82.1	79.1	ASHRAE Standard 62.1-2004 기준
역무실	131.9	71.8	60.1	
통신실	131.9	71.8	60.1	
침실	102.6	67.4	35.2	

<표 3-3-5> 실내 부하기준

구분	사람	전등	기기	침입외기	외기량	
	(㎡/인)	(W/㎡)	(W/㎡)	(회/h)	(L/(s·인))	
대합실	인원산정 기준에 따름	20	ES/EV	2	8	다중이용시설 공기질관리법 기준
승강장		15	ES/EV	2		
역무실	7	20	1,650 W	1	2.5L/(s.인)+	ASHRAE Std
용역원실 등	7	15	15	1	0.3L/(s.㎡)	62.1-2004 기준

※ 역무실 기기: 감시설비 350 W, ACU 200 W, HUB(10대) 500W, Console 350 W, 발권기 250 W

(2) 본선환기 설계기준

<표 3-3-6> 지중온도 기준(서울특별시 지하철건설본부 도시철도 기술 자료집)

구분	지표면	지하 1 m	지하 3 m	지하 5 m	설계기준
하계	28.1 ℃	23.8 ℃	17.9 ℃	15.3 ℃	15.0 ℃
동계	-1.8 ℃	5.6 ℃	13.4 ℃	15.1 ℃	15.0 ℃
지중 5m 깊이의 연평균 온도인 15℃를 설계기준으로 함.					

<표 3-3-7> 실내 발생열 기준

구분	발열량
냉방기 응축기	40,000 kcal/(h·량) = 20,000 kcal/(h·량) x 2대/량
차량 보조기기 발열량	30 kW/(h·열차)
압축기 모터의 정격 출력	21 kW/차량

<표 3-3-8> 차량제원

구분	기준
공차 중량	(kg)
최고운전속도	25 m/s (90 km/h)
가속도	0.83 ㎧
감속도	상용제동 1㎧, 비상제동 1.25㎧
표정속도	18 m/s

<표 3-3-9> 여름 외기 온습도 기준(국토해양부 고시 제2008-5호 인천)

구분	건구온도	습구온도	상대습도	절대습도	엔탈피
	(℃)	(℃)	(%)	(kg/kg′)	(kJ/kg)
9:00시	26	23.9	86	0.018	72
15:00시	30.1	25	66.8	0.0179	75.99
19:00시	28.1	24.5	74.9	0.0179	73.96
* 터널 내 온도는 최고외기온도 + 4℃보다 낮아야 함					

<표 3-3-10> 터널 열부하(열차주행발열)

qTRS = αo×[(We+n·W)×V2÷2g+We×Δh]÷427×(1-β)×(1+αa)×(1+αs)×N	
qTRS	열차주행발열
αo	정거장(선로부) 부하비율 = (정거장 입·출시간 + 정거장 정차시간)/(1 Cycle 시간)
1 Cycle 시간	이전 정거장 노치오프 점에서 이후 정거장 노치오프 점까지의 시간
(초)	+ 정거장정차시간
We(㎏)	승객포함 열차 총중량 (승객의 수는 구간 통과 인원)
승객중량	재차인원(인/h) × 62.5 ㎏/인 ÷ N(대/h)
열차 총중량	(공차중량 + 승객중량) × 1.1
W(㎏)	열차의 공차중량
n	관성계수(0.08)
V(m/s)	최종 제동 지점의 속도
β	재 발전율(0.3)
αa	열차 가속에 의한 발열 부가계수(0.25)
αs	열차 보조기기에 의한 발열 부가계수(0.05)
N(대/h)	시간당 통과 열차의 수
Δh	최종 제동지점과 정거장 중심의 표고차(m)
제동거리	열차속도2/[7.2x(상용제동감속도(3.5km/h/s)±선로구배량/31)]

<표 3-3-11> 터널 열부하(열차주행보조기기발열)

qAX= [(860 × K × Ts)÷3,600]×N	
Qax	열차 주행 보조기기의 발열량(㎉/h)
K	가동률을 고려한 보조기기 사용전력(30 ㎾/량)
TS	정거장 체제 시간(s) = 정거장 입출 시간(15) × 1/2 + 정거장 정차시간(30)
N	시간당 통과 열차 수(대/h)

<표 3-3-12> 터널 열부하(열차냉방기발열)

qAC= {[(Ac + m × 860) × n] × Ts÷3,600}×N	
qac	열차 냉방기 발열량(㎉/h)
Ac	차량 냉방용량 [㎉/(h·량) →40,000 ㎉/(h·량)]
m	압축기 모터 정격 (20 ㎾/량)
n	열차 편성 수 (10량/열차)
TS	정거장 체제 시간(sec) → 정거장 입·출 시간(15) × ½ + 정거장 정차시간(30)
N	시간당 통과 열차 수 (대/h)

<표 3-3-13> 지중흡열

QW = K x A x (t1 - t2)			
K	벽체의 열관류율(㎉/㎡h℃)	t1	터널내 온도(℃)
A	터널 표면적(㎡)	t2	지중 온도(℃)

나. **도시철도 선로 환기부하 및 장비선정 사례**

- 서울시 9호선 C역사 및 D역사에 대한 선로 환기부하 산정사례 및 환기팬의 선정사례를 검토하였으며 그 내용은 다음과 같음.

<표 3-3-14> 선로 환기 설계조건

시 간	구 분	적용수치	단 위
오전 09:00	1.열차당 인원	922	인/Tr
	2.열차 편성수	8	량/Tr
	3.열차 공차 중량	207,900	kg
	4.재발전율 β	0.3	—
	5.열차가속 발열부하 계수	0.25	αa
	6.열차보조기기 발열부하 계수	0.05	αs
	7.열의 일당량 J	427	kgf · m/W
	8.중력가속도 g	9.8	m/sec^2

<표 3-3-15> 부하 및 소요 환기량(9호선 B~C 구간)

시 간	구 분	하 행	상 행	비 고
오전 09:00	1.열차 주행 총 발열량(kW)	160.9	160.0	—
	2.선로부 발열량(kW)	33.8	30.4	본선부하비율 적용
	3.열차주행 보조기기발열량(kW)	14.6	14.6	—
	4.열차 냉방기 발열량(kW)	76.8	76.8	—
	5.발생열량 합계(kW) (2+3+4)	247.0		—
	6.벽체 흡열량(kW) (—)	(-) 31.2		—
	7.잔여 열량(kW) (5-6)	215.8		—
	8.소요 환기량 (m^3/h)	88,580		결정풍량 : 120,000

<표 3-3-16> 부하 및 소요 환기량(9호선 C~D 구간)

시 간	구 분	하 행	상 행	비 고
오전 09:00	1.열차 주행 총 발열량(kW)	75.1	70.3	—
	2.선로부 발열량(kW)	14.2	14.0	본선부하비율 적용
	3.열차주행 보조기기발열량(kW)	14.5	14.5	—
	4.열차 냉방기 발열량(kW)	76.8	76.8	—
	5.발생열량 합계(kW) (2+3+4)	210.8		—
	6.벽체 흡열량(kW) (—)	(-) 31.2		—
	7.잔여 열량(kW) (5-6)	179.6		—
	8.소요 환기량 (m^3/h)	60,420		결정풍량 : 120,000

<표 3-3-17> 부하 및 소요 환기량(9호선 C, D 정거장 선로부 환기량 선정)

역명	번 호	용 도	선 정 기 준	급기풍량	배기풍량
				m^3/h	m^3/h
C	ASF-01A	선로부 급기	환기량과 제연량을 비교후 큰값으로 선정	60,000	60,000
	AEF-01A	선로부 배기		60,000	60,000
D	ASF-01B	선로부 급기		60,000	60,000
	AEF-01B	선로부 배기		60,000	60,000

<표 3-3-18> 9호선 C, D 정거장 선로부 환기팬 선정(C 정거장)

번 호	명 칭	수 량	풍 량	정 압	규 격	동 력	형 식	비 고
		EA	m³/h	Pa	NO.	kW		
ASF-01A/B	선로부 하부 급기	2	60,000	800	SS#9	22	AIR FOIL	고효율 모터 적용
AEF-01A/B	선로부 상부 배기	2	60,000	700	SS#9	19	AIR FOIL	

<표 3-3-19> 9호선 C, D 정거장 선로부 환기팬 선정(D 정거장)

번 호	명 칭	수 량	풍 량	정 압	규 격	동 력	형 식	비 고
		EA	m³/h	Pa	NO.	kW		
ASF-01A/B	선로부 하부 급기	2	60,000	800	SS#9	22	AIR FOIL	고효율 모터 적용
AEF-01A/B	선로부 상부 배기	2	60,000	700	SS#9	19	AIR FOIL	

다. **도시철도 역사 냉난방부하 분석결론**

(1) 도시철도 역사 실별 냉난방 부하의 특성

(가) 대합실

<표 3-3-20> 대합실 냉난방 특성

냉방부하	▪ 지하에 위치하여 내부의 열이 구조체의 열전달을 통하여 온도가 낮은 지하로 빠져나가는 효과로 인해 외부로 부터의 전열 열 취득에 의해 발생하는 냉방부하가 작음. ▪ 일반적으로 항상 개방되어 있는 역사 입출구로 부터 외기의 침입에 의한 냉방부하가 발생하며 지하 터널 본선에서 발생한 열차 및 터널의 냉방부하가 대합실에 침입하여 냉방부하를 발생 시킬 수도 있음. ▪ 지하철도의 대합실은 다중이용 시설로서 수많은 이용객으로부터 발생하는 현열 및 잠열부하로 인해 대합실 내 냉방부하가 발생함. ▪ 지하에 위치한 특성으로 항상 많은 수의 조명이 사용되고 역사 내 개집표기와 같은 운영설비 및 에스컬레이터 엘리베이터 등으로 부터의 발열로 인한 냉방부하가 발생함. ▪ 또한 지하역사에는 공공 전시를 위한 공간과 상업을 위한 구역이 조성되어 냉방부하가 발생하며 지하상가 및 주변 상업시설과 연결되는 경우 그 시설 및 이용객으로부터 냉방부하가 발생함.
난방부하	▪ 동절기 외기온도보다 높게 유지되는 지중온도로 인해 지하역사의 구조체를 통한 지열의 흡수로 상당수의 난방부하를 자연적으로 처리 할 수 있음. ▪ 지하 터널 본선에서 발생하는 열부하 및 역사 내 발열 등에 의한 열부하는 동절기에 지하정거장의 난방부하를 절감하는 역할을 하게 됨. ▪ 지열의 흡열 및 지하정거장과 지하터널 본선 등의 발열로 인해 난방부하가 발생하지 않아 대합실의 경우 일반적으로 동절기 난방 운전은 하지 않음.

(나) 승강장

<표 3-3-21> 승강장 냉난방 특성

냉방부하	▪ 터널 내부를 운행하는 전동 열차로부터 발생하는 발열아 지하터널의 흡열능력을 초과할 경우 여러 열차가 운행을 거듭하는 동안 터널 내 온도가 상승하여 터널과 연결되어있는 승강장의 냉방부하를 발생하게 함. ▪ 열차의 정차 시 열차의 주행 장치 및 냉방기 등으로 부터 발생한 열이 승강장에 전달되어 이로 인한 냉방부하가 발생함. ▪ 대기 승객 및 환승객 등으로 부터 발생하는 현열 및 잠열 부하로 인해 승강장내 냉방부하가 발생함,
난방부하	▪ 역사에서 가장 깊이 위치한 승강장은 대합실에 비하여 외기의 침입이 적고 터널 본선에서 발생하는 열원에 가까이 위치하여 난방부하의 발생이 억제됨. ▪ 열차에서 발생하는 발열 및 대기승객과 환승객으로 부터 발생하는 발열에 의하여 동절기 승강장의 난방부하 발생은 억제되어 일반적으로 동절기 난방운전은 하지 않음.

(다) 직원근무실

<표 3-3-22> 직원근무실 냉난방 특성

냉방부하	▪ 근무자에 의한 인체 발열 및 역무실 등에서의 기기발열에 의한 냉방부하가 발생. ▪ 이용객들과는 달리 사무실에서 종일 근무하는 근무자들의 특성 상 냉방부하의 적절한 처리가 필요함.
난방부하	▪ 사무실내 근무하는 인원은 인체발열이 적고 종일 근무하는 것으로 인해 적절한 난방이 필요함. ▪ 직원 근무실의 경우 정거장내 타 실과는 달리 난방부하가 발생하며 동절기 난방운전을 실시함.

(라) 기능실

<표 3-3-23> 기능실 냉난방 특성

냉방부하	▪ 기능실의 경우 기기의 발열에 의한 냉방부하가 발생함. ▪ 장비의 지속적인 작동 및 신뢰성을 위하여 상시 냉방을 통해 실내 온도를 낮게 유지하여야 하며 고온 시 기기의 장애 등이 일어 날 수 있으므로 동절기에도 냉방부하가 발생함.
난방부하	▪ 재실인원이 없는 기능실인 경우 기기의 작동환경만 고려되어 난방부하는 발생하지 않음.

(마) 선로 환기부하

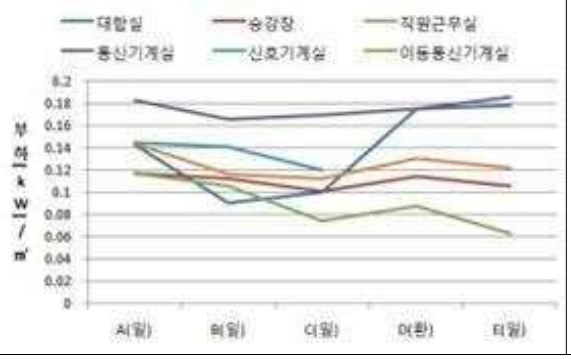
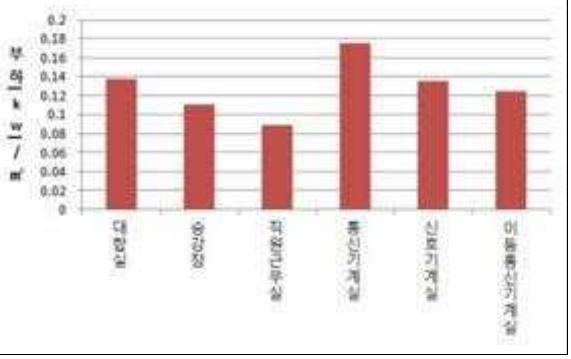
<표 3-3-24> 선로 환기부하 특성

환기부하	▪ 선로 내의 발열은 열원설비 없이 환기팬으로 처리함. ▪ 열차의 운행에 의한 발열로 냉방부하가 발생하게 됨. ▪ 열차로 부터의 발열은 주행 및 제동에 의한 발열과 열차 내 냉방장치에 의한 발열. ▪ 지중흡열에 의하여 선로의 냉방부하가 하므로 터널 벽면의 흡열효과를 반영하여 선로의 환기부하를 산정함.
환기팬 동력	▪ 선로부 환기를 위하여 설치되는 환기팬은 승장장의 환기팬 중 용량이 가장 크게 됨. ▪ 환기팬의 작동은 지하역사의 환기계획에 의하여 실시되게 되며 환기부하는 지속적으로 발생하여 환기팬 작동에 의한 전력비 부담이 큼. ▪ 하절기 피크 부하 시 환기팬의 동력은 주요한 절감 대상이 되나 이용객들의 실내 쾌적도를 저하 시킬 수 있음.

(2) 도시철도 역사의 냉난방 부하분석

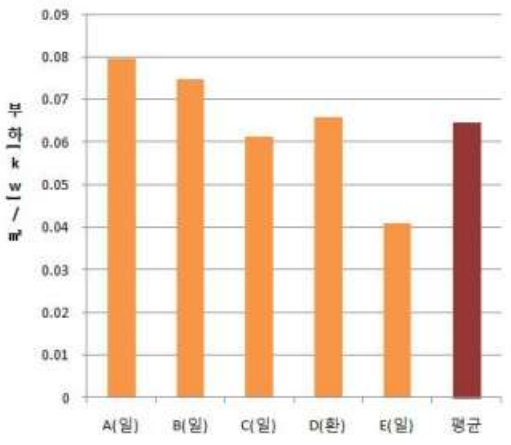
(가) 서울시 9호선

<표 3-3-25> 역사 내 실별 단위면적당 냉방부하

실별 단위면적당 냉방부하	실별 단위면적당 평균냉방부하
	

검토결과	▪ 일반 지하역사 4개소(A, B, C, E)와 환승역사(D)의 실별 단위면적당 냉방부하를 분석하였음 ▪ 분석결과 단위면적당의 평균 냉방부하량이 가장 높게 나타난 실은 통신기계실로 단위면적당 평균 냉방부하량이 0.176kW/㎡로 나타났음 ▪ 승강장의 단위면적당 평균 냉방부하량은 0.11kW/㎡로 분석되었음 ▪ 직원근무실의 단위면적당 평균 냉방부하량은 0.09kW/㎡로 나타났음

<표 3-3-26> 역사 내 실별 단위면적당 난방부하

실별 단위면적당 난방부하 (직원근무실)	검토 결과
	▪ 지하역사 난방부하를 검토한 결과 직원근무실에만 난방시스템을 적용하는 것으로 나타남 ▪ 각 지하역사별 직원근무실의 난방부하는 0.041~0.08W/㎡의 분포를 나타냄 ▪ 단위면적당 평균 난방부하는 0.064kW/㎡의 분포를 나타냄 ▪ 수유실의 경우 단위면적당 난방부하 0.11kW/㎡의 분포를 나타냄 (지하역사 C의 경우)

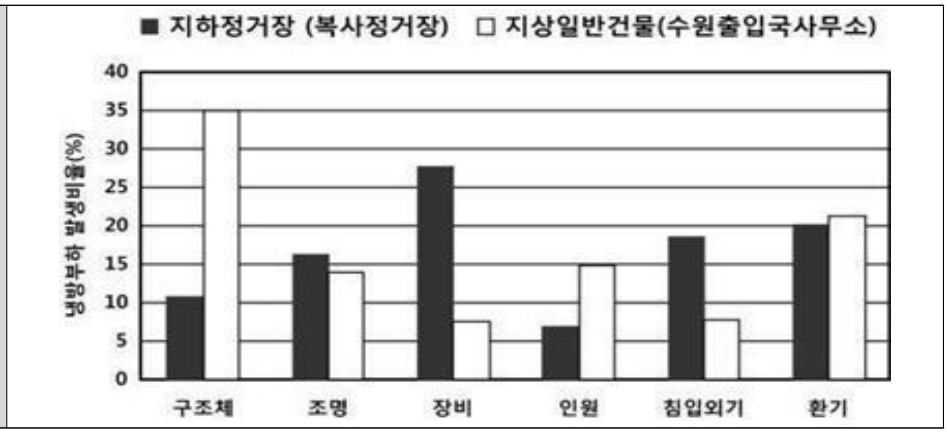
(가) 소사-원시선

<표 3-3-27> 부하집계

정거장		냉방부하 (kW)	난방부하 (kW)	정거장		냉방부하 (kW)	난방부하 (kW)
소사	대합실	409.9	-	시흥 시청	대합실	219.1	-
	승강장	508	-		승강장	402.2	-
	직원근무실	48.5	42.7		직원근무실	31.5	16.8
	기능실	162.8	-		기능실	30.5	-
복사	대합실	253.4	-	화랑	대합실	439.9	-
	승강장	292.8	-		승강장	551.6	-
	직원근무실	31.2	21.7		직원근무실	18.8	6.3
	기능실	32.1	-		기능실	101.3	-
대야	대합실	224.4	-	원곡	대합실	230.6	-
	승강장	289	-		승강장	318.2	-
	직원근무실	32.6	26.5		직원근무실	26	17.6
	기능실	33	-		기능실	45.2	-
신천	대합실	274.9	-	원시	대합실	398	-
	승강장	272.4	-		승강장		
	직원근무실	36.8	25.5		직원근무실	55.5	56.7
	기능실	34.6	-		기능실	71.8	-
신현	대합실	137.7	-				
	승강장	306.8	-				
	직원근무실	24.1	12.5				
	기능실	30.8	-				

검토결과	▪ 승강장과 대합실, 기능실은 난방부하가 없어 냉방운전만 필요한 것으로 나타남 ▪ 직원 근무실의 경우 냉난방 부하가 모두 발생하여 냉난방 운전이 필요하였음

<표 3-3-28> 냉방부하 발생 요인과 특징

소사-원시선 지하정거장과 지상일반건물의 냉방부하 발생원인 비교	

구분	지하정거장 (복사정거장)		지상일반건물 (수원출입국사무소)	
	냉방부하 (kW)	비율(%)	냉방부하 (kW)	비율(%)
구조체	65.4	10.7	149.8	34.9
조명	99.6	16.3	59.6	13.9
장비	168.3	27.6	32.2	7.5
인원	41.8	6.9	63.8	14.8
침입외기	112.8	18.5	33.1	7.7
환기	121.6	20	91.2	21.2
계	609.5	100	429.7	100

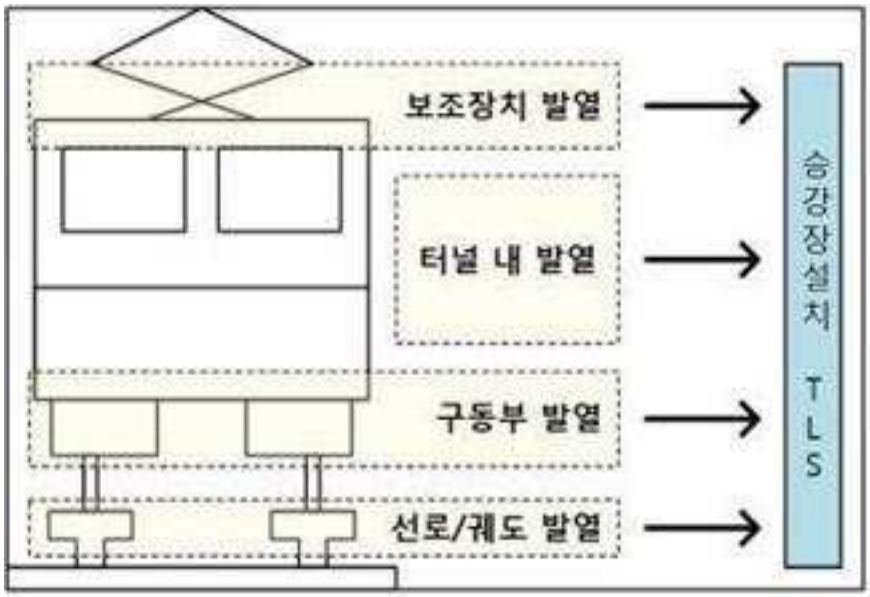
검토결과	▪ 소사-원시 선 지하정거장들에 대한 냉난방 부하 분석 결과 실들이 지하에 설치됨으로 인해 구조체의 열전도에 의한 냉방부하는 역사 전체 냉방부하의 10.7%로 지상일반건물에서의 34.9% 보다 낮게 나타났음. ▪ 지하역사는 에스컬레이터 등 장비발열 부하가 많아 장비 냉방부하 비율은 지하정거장의 경우 27.6%로 지상일반건물의 7.5%보다 높게 나타났음. ▪ 외부출입구가 많고 개방되어 있어 지하정거장의 침입외기 냉방부하 비율은 18.5%로 나타나 지상일반건물의 7.7%보다 높게 나타났음.

3. TLS(Thermal Lining System) 동작원리 및 효과분석

가. TLS(Thermal Lining System) 요구 성능 분석

(1) TLS의 정의 및 원리

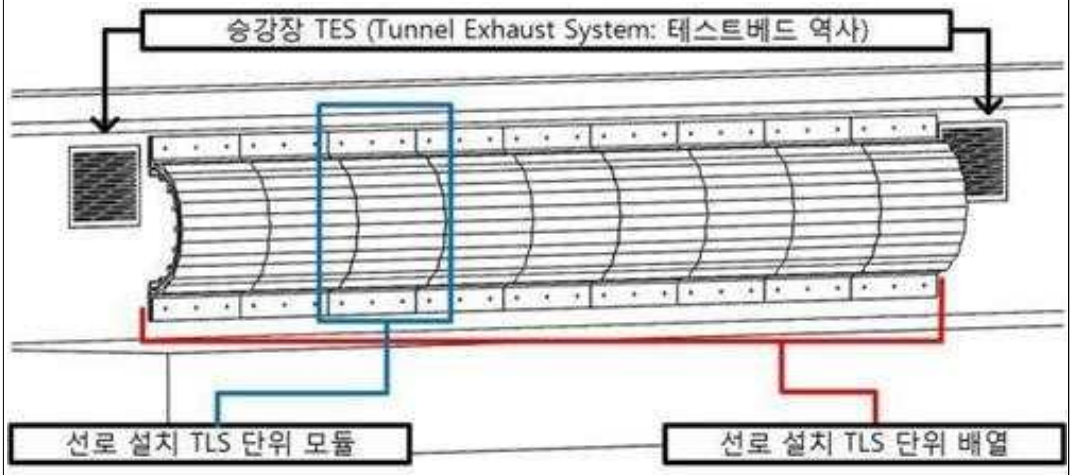
<표 3-3-29> TLS의 정의 및 원리

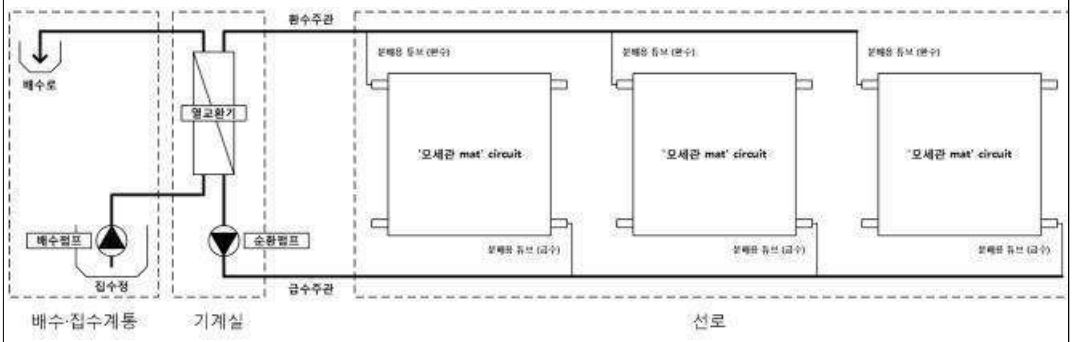
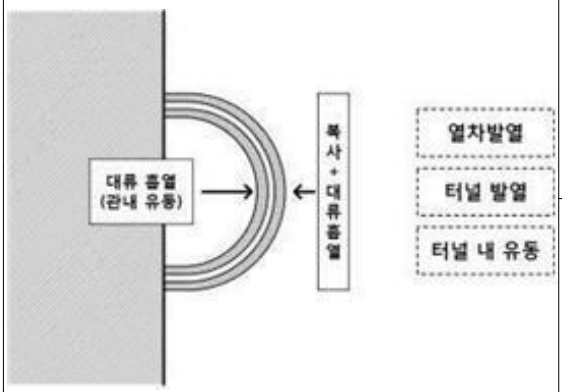
<table>
<tr><th>구분</th><th>내용</th></tr>
<tr><td>정의</td><td>- TLS: Thermal Lining System
- 콘크리트 구조체의 열적 활성화를 통해 에너지를 절감하는 기술로 특히, 터널의 콘크리트 라이닝 혹은 터널 내부의 열을 관리하는 것을 말함.
- TLS를 통해 지하역사 및 도시 터널의 고온화를 방지하고 환기용 Fan의 동력을 절감.</td></tr>
<tr><td>원리 및 특징</td><td>- 승강장 TLS
 

<table>
<tr><th>특징</th></tr>
<tr><td>- 지하역사 진입 이후 승강장에서 발생하는 제동 및 선로마찰 발열 흡수
- 승강장 정차 이후 발생하는 열차 구동부 발열 및 에어컨 실외기 발열 흡수
- 열차의 운동에 의해 터널 내부로 유입되는 외기 등 더운 공기로부터의 흡열
- 터널 내 공기의 열을 흡수하여 첨두시 터널 내부 온도 상승을 억제
- 적정 터널온도 유지로 에너지 절감</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

(2) TLS의 세부 구조 및 작동원리

<표 3-3-30> TLS의 세부 구조 및 작동원리

<table>
<tr><th>구분</th><th>내용</th></tr>
<tr><td>TLS 설계
(안)</td><td> 

- 단위 모듈 직렬 연결을 통해 TLS 모듈 배열 구성
- TES 배기구 사이 설치(테스트베드 역사) 시 TES 간격 9m 이내 TLS 배열 크기 구성
- TES 작동 시 발생 하는 유동에 의한 추가 효과 발생가능</td></tr>
<tr><td>TLS
시스템
개요</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>흡열원리</td><td> 

① 복사 흡열 [TLS 전면부]
- TLS에 근접한 발열 표면으로 부터 직접 열 취득
- 승강장에 열차 진입하여 정차한 경우
- 고온부 접근시 열전달 향상

② 대류 흡열 [TLS 전면 및 후면]
- 터널 내 공기로 부터 열 취득
- 터널 내 자연 풍 혹은 피스톤 효과에 의한 유동 활용
- 터널 내 유속 증가 시 열전달 향상</td></tr>
<tr><td>적용 목적</td><td>- 승강장 터널의 환기 부하 저감 → TES 송풍기 및 본선 환기 송풍기 작동 시간 절감
- TES 효율 증대</td></tr>
</table>

(3) 승강장 설치용 TLS 디자인

(가) TLS 흡열모듈의 개요

<표 3-3-31> TLS 설치 목적

구분	내용
승강장 흡열	- 터널 내 열차 발열 흡수 - 승강장 터널 내 정차열차로부터의 발열 흡수 - 터널 흡열을 통한 터널 환기부하 저감
도시철도 미 이용 에너지 활용	- 침출수를 열싱크로 활용 - TLS 내부 순환 계통은 폐회로로 구성 - TLS 열교환 장치를 역사 내 저수시설에 설치하여 TLS 순환수 냉각

<표 3-3-32> 복사 냉방 기술의 적용 및 응용

구분	내용
복사냉방	- 넓은 표면적에 적용 되는 냉각 방식 - 넓은 설치면적에 대하여 단위면적 당 냉난방 장치의 경제성 추구 - 모세관 매트 기술을 적용하여 순환계통의 에너지 소비 절감 - 지하역사 승강장 선로 터널 내 면적에 대하여 TLS 장치의 적용 시 복사냉방 기술을 통해 최대한 넓은 설치면적 확보
터널 내 열차풍의 활용	- 기존 실내에 적용되던 복사 냉난방의 경우 대류 효과는 자연대류 만 반영되었음 - 지하역사의 경우 선로 내부에 열차의 이동 등으로 인한 풍량 발생 - 지하역사에 대한 TLS 흡열장치의 적용에 있어 터널 내 풍량에 의한 강제 대류 효과를 활용 할 수 있도록 하여 단위면적당 흡열성능 향상을 추구

<표 3-3-33> TLS 흡열모듈의 승강장 선로부 설치 시 고려사항

구분	내용
설치공간	- 승강장 선로 내 터널 벽체에 설치 - 선로 내 설치작업 시의 안전 및 열차운행에 방해가 되지 않을 조건을 만족하는 설치 장소에만 설치가능 - 터널 벽체 설치 시 열차 구동부 등 승강장에 진입한 열차의 고온부로 부터의 흡열을 최대화 할 수 있는 설치 위치를 고려해야 함
설치 시 미관	- 지하철 이용 승객의 불편함을 야기 하지 않아야 함 - 필요한 경우 도장 등 TLS 장치 표면의 미관을 개선시킬 수 있어야 함
구조적, 물리적 견고성	- 설치 후 구조적 안정성을 확보하여 TLS 장치의 운영에 따른 선로의 안전에 영향이 없어야 함 - 부식 등에 대비하여 장기간의 수명의 확보하여야 함

(나) 열전달 향상을 위한 TLS 형태

① 기존 형태 고찰

○ 기존 설치 사례 (건물 냉난방용)

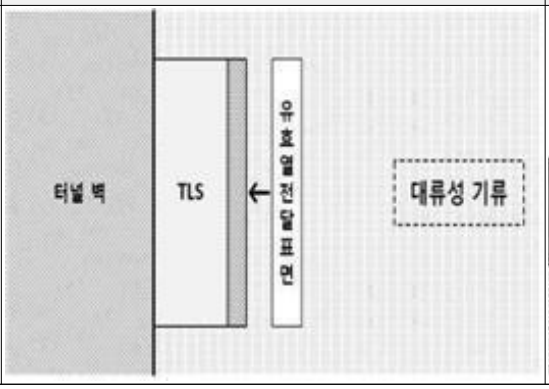
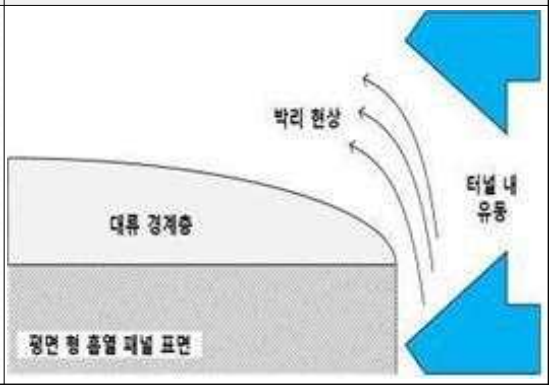
<표 3-3-34> 기존 설치 사례

구분	천장 패널형	천장 노출형
설치공간 (모세관 복사패널)		

- 기존 복사냉난방 기술은 실내 벽체(수직벽 혹은 천장)에 설치되어 평면형의 구성을 위주로 하였음.
- 건물의 경우 대상 벽체의 전 면적에 걸친 모세관 매트의 설치를 통하여 설치면적을 확보, 열전달을 확보함.
- TLS는 이러한 복사 냉난방 기술을 적용하여 매우 넓은 설치면적에 효율적으로 적용가능 하나 열차 운영상의 이유로 터널 내의 모든 위치에 설치 할 수 없으므로 단위면적당의 흡열량을 최대한 확보하여야 함.

○ 기존 복사 패널의 단점

<표 3-3-35> 기존 복사 패널 단점

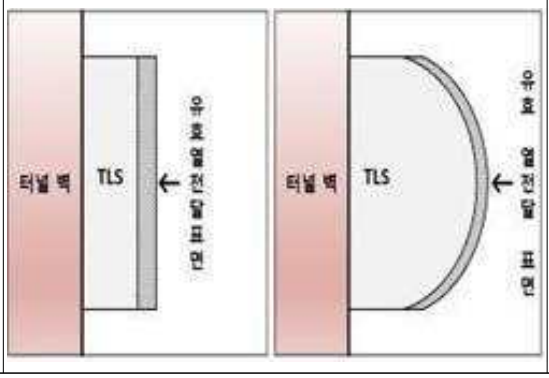
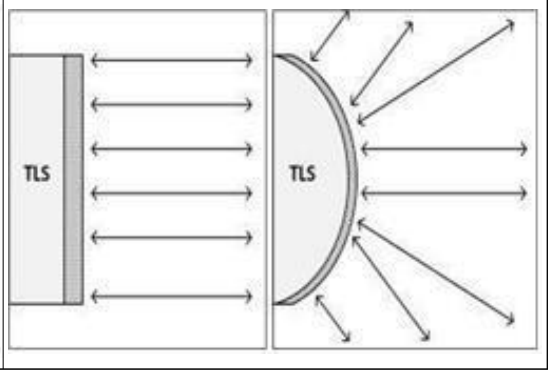
구분	천장 패널형	천장 노출형
TLS 표면		

- 기존 복사냉난방 기술은 실내 벽체(수직벽 혹은 천장)에 설치하는 평면형의 패널로 벽체 부착 시 전면을 통해서만 열전달이 가능함.

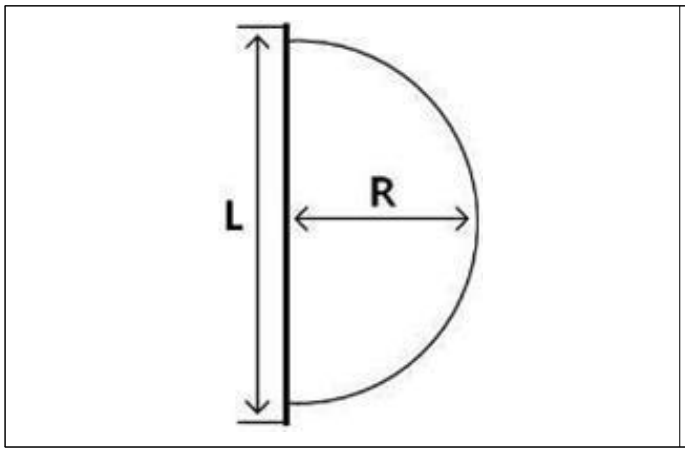
- 터널 내 풍량에 의한 강제대류 효과를 반영 할 수 있는 TLS의 경우 표면적 보다 열적으로 활성화 할 수 있는 방안이 필요함.
- 대류효과를 극대화 하고자 할 경우 열전달 표면에 유동 마찰을 활성화 하여야 하나 평면 형태에서는 열전달에 용이한 적절한 유동형태를 구성하기가 쉽지 않음.

② TLS 열전달 활성화 방안 검토

<표 3-3-36> 표면 곡률 적용 1

구분	열전달 면적 확대	방사 범위 확대
표면 곡률에 따른 특징		

<표 3-3-37> 표면 곡률 적용 2



R/L	표면적 증가
0.1	2.65 %
0.2	10.35 %
0.3	12.50 %
0.4	38.32 %
0.5	57.08 %

- 평판형 대신 곡면을 적용하여 열전달 표면적을 증대하였음.
- 승강장 설치시 곡률에 따른 돌출 정도는 장비한계선 등을 침범하지 않도록 하며 테스트베드 역사의 경우 가능한 돌출 한계는 최대 R=0.36m 이하임.
- 방사 범위 확대로 TLS 모듈과 정면으로 마주하지 않은 발열원에 대한 흡열 성능 확보.

○ 열전달 활성화 표면적용

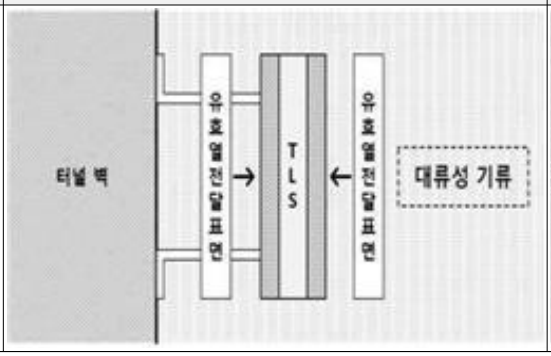
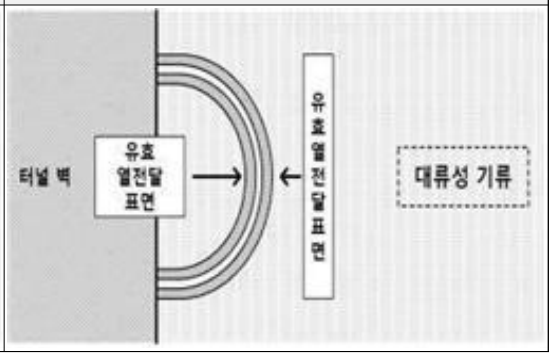
<표 3-3-38> 열전달 활성화 표면

구분	골진 형태	핀 형태
TLS 표면		

- 복사표면의 경우 완만한 골진 형태가 적절
- 대류표면의 경우 적당한 간격의 핀 형태가 적절

○ TLS 후면 공간 확보

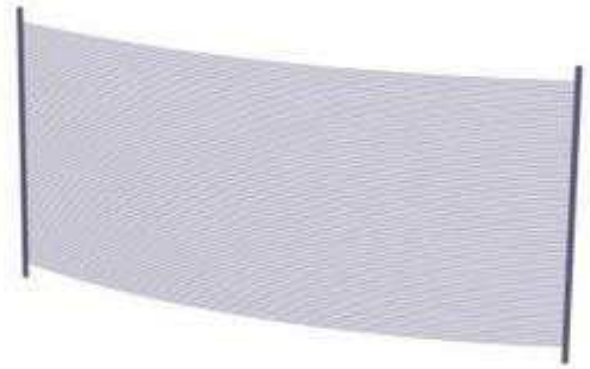
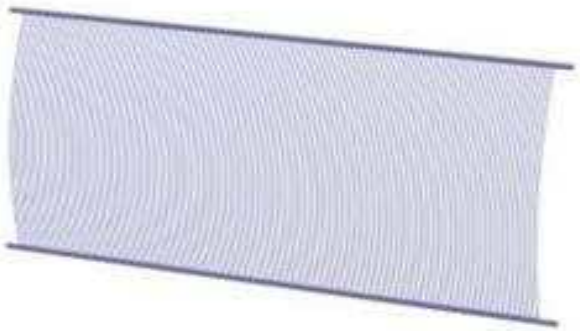
<표 3-3-39> TLS 후면 공간 확보

구분	평면형 TLS	곡면형 TLS
TLS 표면		

구분	내용
평면형 TLS 후면 공간확보	- 설치용 부재를 통해 TLS 후면과 설치 벽면의 이격거리 형성. - TLS와 터널 벽체의 이격을 통해 TLS 후면의 공간을 확보하고 추가적인 열전달 표면을 얻음.
곡면형 TLS 후면 공간확보	- 곡면형태의 TLS 제작 시 후면에 생기는 파이프 형태의 내부 공간을 활용. - 곡면 형태의 TLS에서 TLS 전·후면 모두 평판형보다 전열면적이 증가됨. - 추가적인 설치용 부재 없이 보다 견고한 형태. - 판형에 비하여 내부 유동을 활성화하기 용이한 형태가 됨.

○ 흡열체 형태 선정 (곡면형 TLS의 모세관)

<표 3-3-40> 곡면형 TLS 모세관

구분	모세관 튜브 매트
종 곡률	
횡 곡률	

- Collector Pipe는 굴절이 힘들지만 모세관 튜브의 경우 굴절이 용이함.
- 모세관 매트는 Collector Pipe의 방향에 따라 곡률 방향이 정해짐.
- 따라서 적용 하려는 곡률의 형태에 따라 모세관 매트의 부착 방향이 결정됨.

③ TLS 형태 결정



<그림 3-3-2> TLS 형태

- 곡면 형 표면을 적용하여 후면 공간을 생성, TLS 설치 내부 공간으로 공기가 흐를 수 있게 함.
- TLS 표면의 경우 전면에는 골진 형태를 적용하고 후면에는 핀 형태를 적용함.

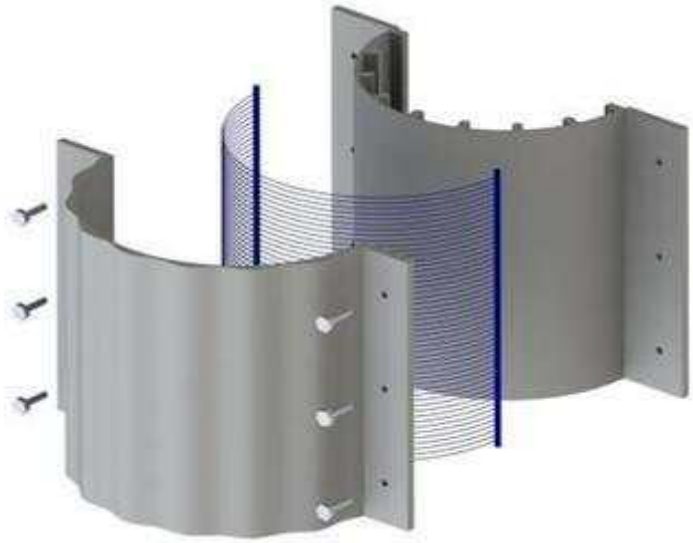
④ TLS 흡열 모듈 조립도 및 설치도

㉮ TLS 주요 부품 개요

<표 3-3-41> TLS 주요 부품 개요

구분	개요1	개요2
전면 패널 (복사&대류 표면)		
후면 패널 (대류표면)		
모세관 매트 (흡열체)		

㉯ TLS 조립 개요

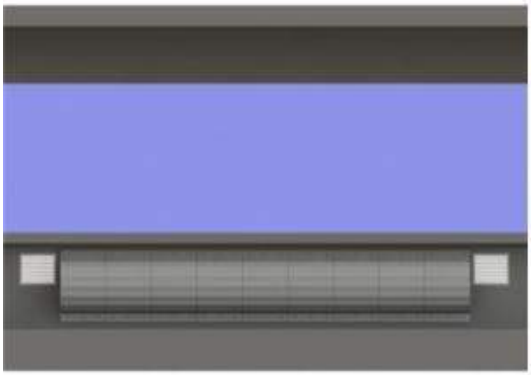


<그림 3-3-3> TLS 조립도

- 금속재질의 전후면 패널 내 모세관 매트를 샌드위치 식으로 조립.
- 전면 패널 과 후면 패널 내부 공간에 열전도성 접착제를 충전하고 외부를 방청도료(무광택)로 도장함.

㉰ TLS 예상 설치 형태

<표 3-3-42> TLS 예상 설치 형태

구분	정면	측면
테스트 베드 설치 예상도		

- 승강장 선로 하부 TES(Tunnel Exhaust System) 흡기구 사이 설치 가능 (최대 폭 약 9m)
- 곡면형 TLS의 측면 설치 시 곡률 제한됨. (선로 하부 여유 폭 약 0.36m 이내)

나. TLS 적용 효과 분석

(1) 분석 대상 요약

<표 3-3-43> TLS 모듈 형태 및 설치 형태

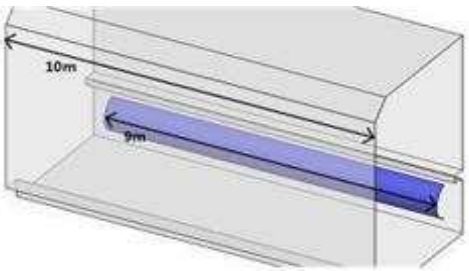
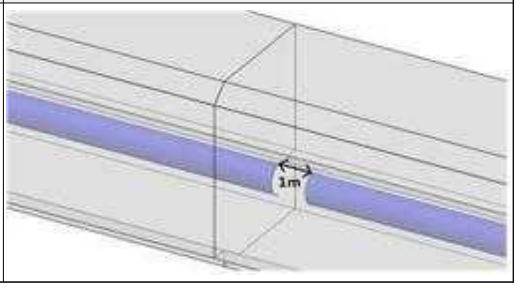
구분	내용	
TLS 모듈 형태		
TLS 설치 형태		

- TLS 설계안의 형상을 단순화 하여 CFD 분석 모델을 작성함.

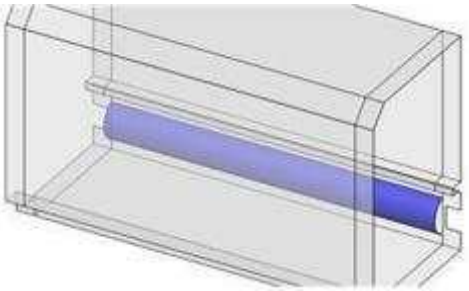
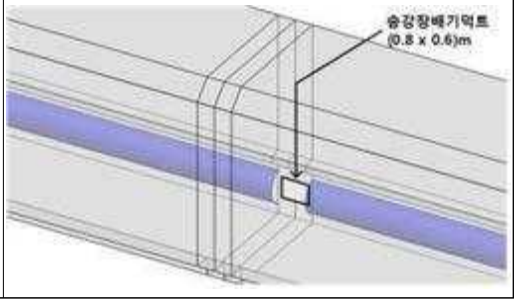
(2) TLS 적용 효과 분석 모델링

(3)

<표 3-3-44> 승강장 배기덕트 미 적용

구분	Normal Domain	Periodic View
승강장 배기덕트 미 적용시		

<표 3-3-45> 승강장 배기덕트 적용

구분	Normal Domain	Periodic View
승강장 배기덕트 적용 시		

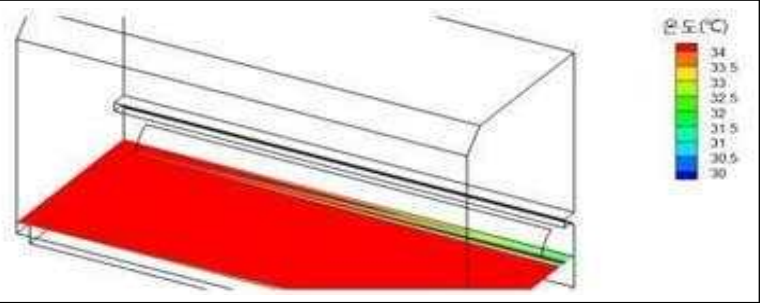
(4) 분석조건

<표 3-3-46> 분석조건

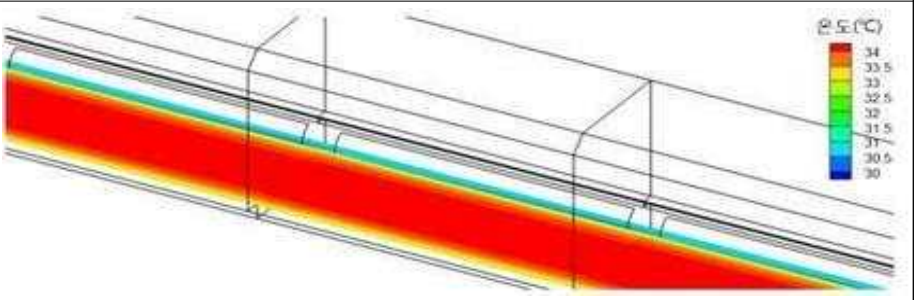
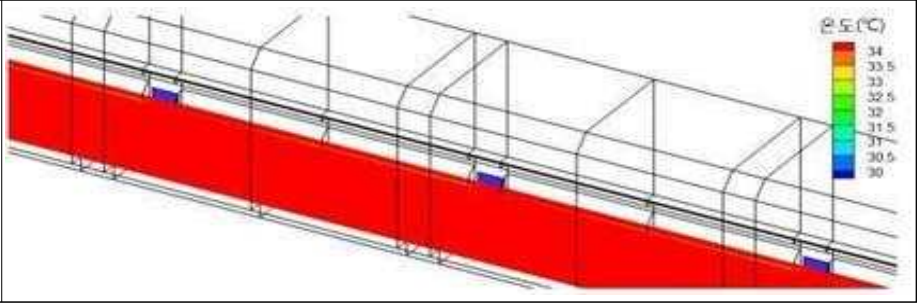
구분	내용
공통	- S2S Radiation Model 적용함, 열차 발열 없이 터널 표면온도 만 적용 - 터널 내 유속 1㎧, 터널 내 공기온도 35℃ - TLS 표면온도 15℃, 터널 벽체온도 20℃ - TLS 설치면적 9㎡, TLS 표면적 약 10.8㎡ (곡면형 TLS 높이 1m, 길이 9m)
배기덕트 미 적용	- 터널 내 유속만 적용 - Translational Priodic 조건을 통해 직렬 배치된 TLS 배열의 흡열 성능을 비교분석
배기덕트 적용	- 승강장 배기팬 유속 2.798㎧ (배기 시스템 제원: 배기덕트 하나 당 1.554 kg/s) - Translational Priodic 조건을 통해 직렬 배치된 TLS 배열의 흡열 성능을 비교분석

(5) 흡열량 분석결과

<표 3-3-47> 흡열량 분석 결과_일반조건

구분		내용
승강장 배기덕트 미적용시	일반조건	

<표 3-3-48> 흡열량 분석 결과_Periodic 조건

구분		내용
승강장 배기덕트 미적용시	Periodic 조건	
승강장 배기덕트 적용시	Periodic 조건	

○ 승강장 배기덕트 미 적용 시

<표 3-3-49> 승강장 배기덕트 미 적용 시 결과

설치면적 9 ㎡		Convection		Radiation		Total		
		W	W/㎡	W	W/㎡	W	W/㎡	
Constant Turbulent Flow	전면	972.65	108.07	472.79	52.53	1445.44	160.60	283.08
	후면	837.75	93.08	264.54	29.39	1102.29	122.48	
Periodic Turbulent Flow	전면	508.95	56.55	333.07	37.01	842.02	9.56	132.84
	후면	100.49	11.17	253.03	28.11	353.52	39.28	

- 일반적인 유동 형태에서의 TSL 흡열성능에 대한 분석결과는 TLS 1개 모듈만 적용되었을 때의 흡열량을 나타내며 이 흡열량은 승강장 전체 길이에 걸쳐 설치된 TLS 중 터널 내 공기와 처음 맞닿는 TLS 의 흡열량이 되며 TLS의 최대 흡열량을 나타내게 됨.
- Periodic 유동에서의 TLS 흡열성능은 TLS 배열이 지속적으로 배치된 경우의 해석결과이며 이 흡열량은 승강장 전체 길이에 걸쳐 설되는 TLS 중 가장 마지막에 위치한 TLS의 흡열량이 되며, TLS의 최소 흡열량을 나타내게 됨.
- 1㎧ 의 유속에서, 복사적용 시 TLS의 최대 흡열량은 대략 283 W/㎡. (TLS 설치면적 기준)
- 1㎧ 의 유속에서, 복사적용 시 TLS의 최소 흡열량은 대략 133 W/㎡. (TLS 설치면적 기준)

○ 승강장 배기덕트 적용 시

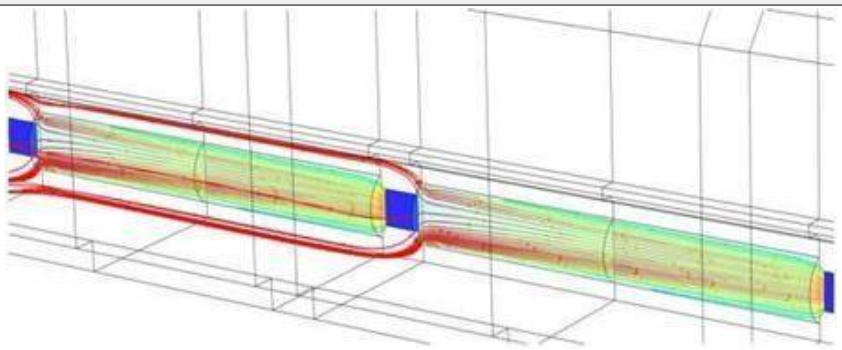
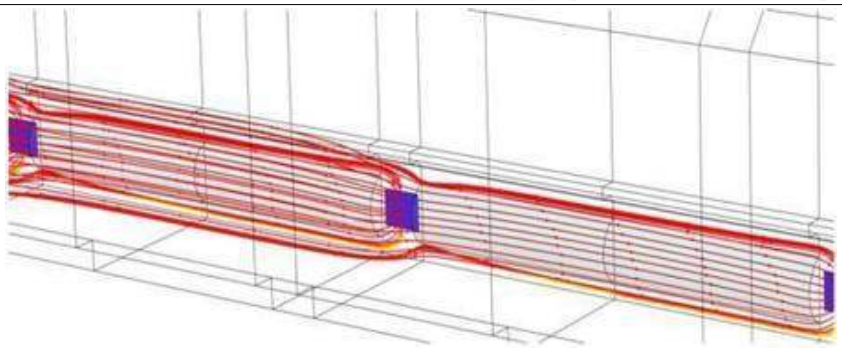
<표 3-3-50> 승강장 배기덕트 적용 시 결과

설치면적 9 ㎡		Convection		Radiation		Total		
		W	W/㎡	W	W/㎡	W	W/㎡	
Periodic Turbulent Flow	전면	1842.27	204.70	333.08	37.01	2175.35	241.71	415.07
	후면	1299.40	144.38	260.84	28.98	1560.24	173.36	

- 승강장 배기덕트 적용 시 분석에서는 Periodic 조건에서의 결과만 채용함.
- 1㎧ 의 유속에서, 복사적용 시 TLS의 흡열량은 대략 415 W/㎡. (TLS 설치면적 기준)
- 승강장 배기팬 작동 시 TLS 흡열능력이 2배가량 상승하였음.

(6) 승강장 배기덕트 주변 유동 (승강장 배기팬 작동 시)

<표 3-3-51> 승강장 배기덕트 주변 유동

구분		내용
승강장 배기덕트 적용시	TLS 주변 유동 (1)	
	TLS 주변 유동 (2)	

- 곡면형의 TLS 형상은 승강장 배기 팬 작동 시 배기덕트로 유입되는 유동에 의해 TLS 주변부의 유동이 크게 활성화 됨.
- 승강장 배기 팬 작동 시 터널 내 열을 갖고 있는 공기가 TLS 주변으로 지속적으로 공급되고 TLS 주변 유속이 빨라짐에 따라 TLS의 흡열량이 크게 상승함.

(7) 결론

- 열차가 승강장에 없는 경우, 일반적인 TLS의 상시 흡열 성능은 130~300 W/㎡로 예상되며 승강장 배기 팬 작동 시 400 W/㎡ 내외로 예상됨.
- 승강장 배기팬 작동 시 TLS 주변부에 유동이 활성화 되어 TLS의 흡열 성능이 크게 향상될 것이 예상되었음.

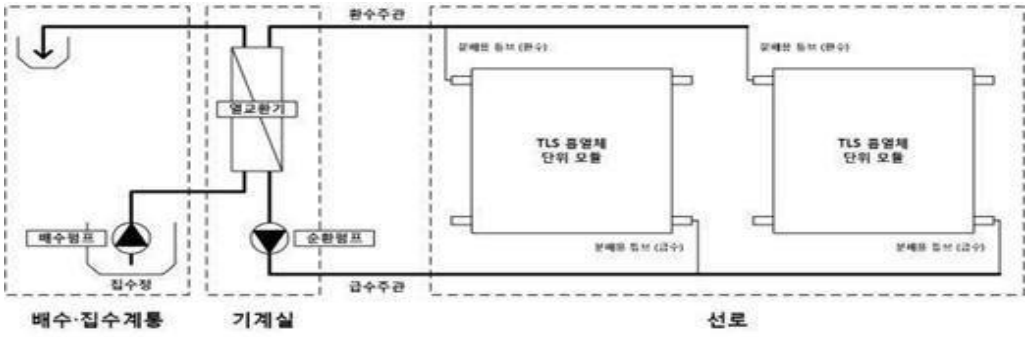
4. 설계 및 제작

가. TLS(Thermal Lining System)용량검토 및 설계

(1) TLS 설치개요

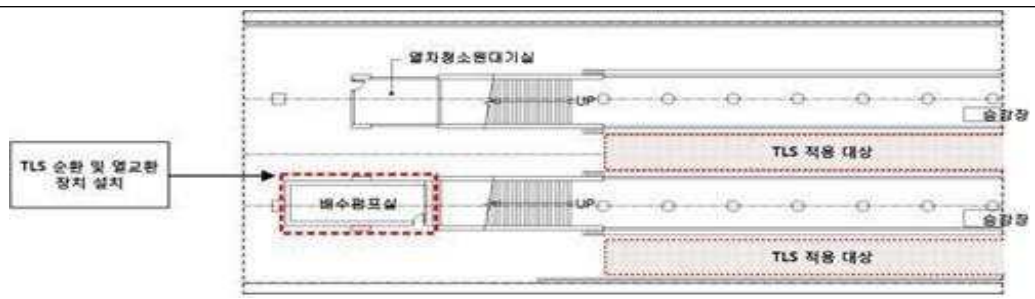
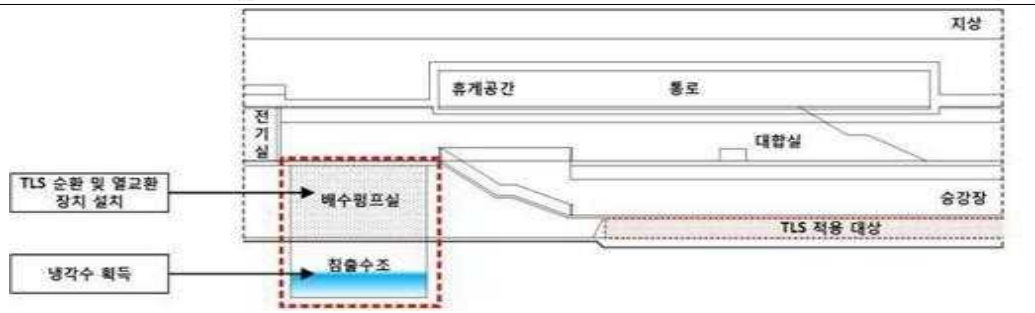
(가) 시스템 개요

<표 3-3-52> TLS 시스템 개요

개요	
설명	- TLS 흡열체는 단위모듈로 제작하여 승강장 터널에 설치함. - TLS 단위모듈은 복사 패널 냉방장치의 원리가 적용되며 내부에 냉각된 순환수를 순환 시켜 일정 온도를 유지함. - 순환수의 냉각은 열교환기를 통해 지하철도의 배수·집수 계통에 저장되어 있는 지하침출수를 사용함. - 열교환기를 통해 가열된 침출수는 집수정 혹은 외부로 배출 되거나 열원이 필요한 곳에 공급됨.

(나) TLS 순환 및 열교환 장비 설치위치

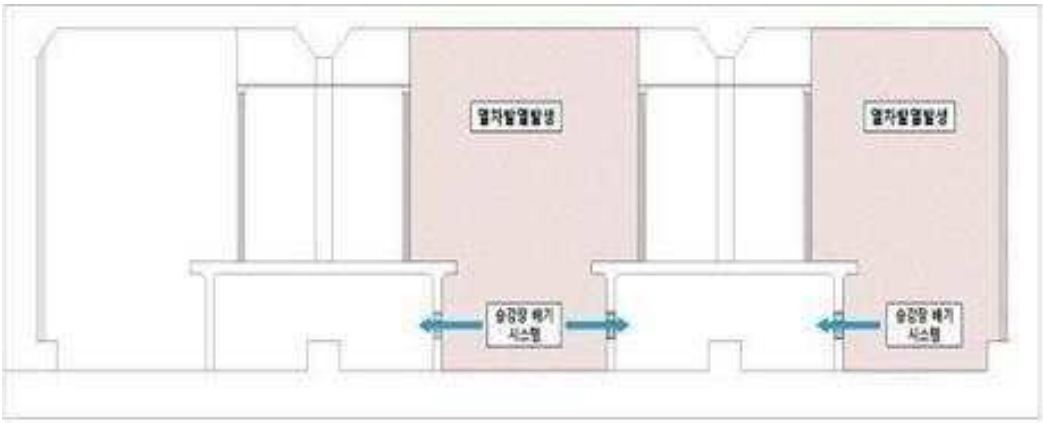
<표 3-3-53> TLS 순환 및 열교환 장비 설치위치

평면도	
단면도	
설명	- TLS 냉각수 공급용 설비의 설치에 있어 역사 기계실 대신 배수펌프실 설치 검토. - 배수펌프실과 침출수조는 선로와 비슷한 높이에 설치되므로 승강장 터널에 설치되는 TLS의 배관과 연결하기에 용이함.

(2) TLS 흡열체 설치 개요

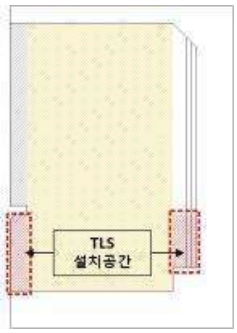
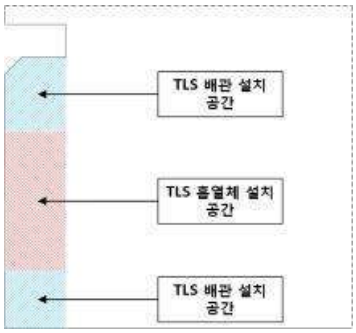
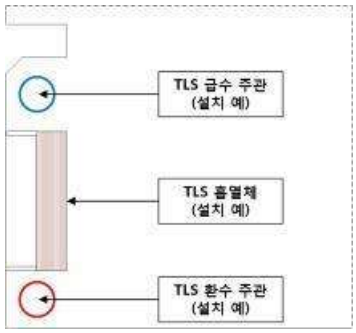
(가) 역사 내 TLS 설치 대상 공간

<표 3-3-54> 역사 내 TLS 설치 대상 공간

단면	
설명	- 열차가 운행중인 터널 내 발열제거를 목적으로 TLS 을 설치함. - TLS를 통한 발열제거를 통해 승강장 배기 시스템의 부하를 저감하여 에너지를 절약함.

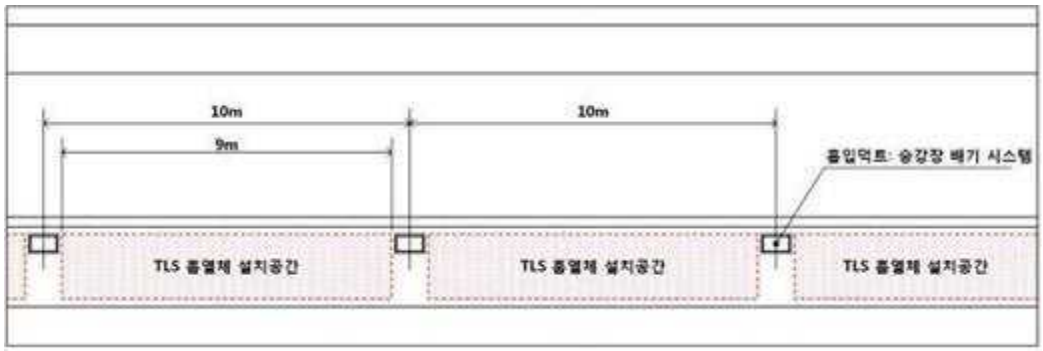
(나) TLS 설치 위치

<표 3-3-55> TLS 설치 위치

단면	 <터널 내 설치공간>  <설치공간 내 장치 배치>  <장비설치 예>
설명	- TLS의 복사 흡열 성능을 활용 할 수 있도록 열차 하부의 구동장치에 근접한 위치에 설치함. - 단선 터널의 경우 플랫폼 하부 측면에 설치 시 승객의 시야에 보이지 않음.

(다) TLS 배치 방식

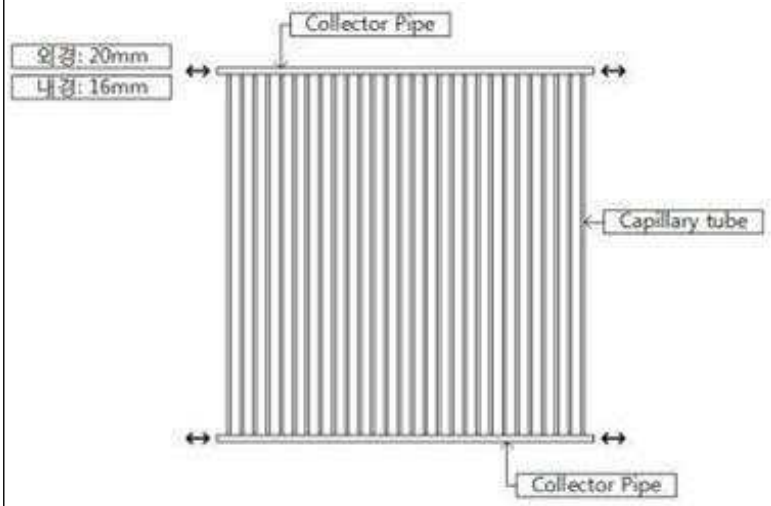
<표 3-3-56> TLS 배치 방식

정면	
설명	- TLS 각 Module 당 최대 설치 크기는 폭: 9m, 높이, 1.6 로 예상. (환풍구에 의해 설치간격 제한 됨) - 170m 길이의 테스트베드 역사 한 선로면 대하여 16~18개 TLS 모듈 설치 가능. - 선로 한 면 당 최대 설치면적 약 259 ㎡. (테스트베드 역사) - 단선터널의 경우 1개 선로에 대하여 TLS 2면 설치 가능. - 복선 터널의 경우 2개 선로에 대하여 TLS 2면 설치 가능.

(라) TLS 흡열체 구성

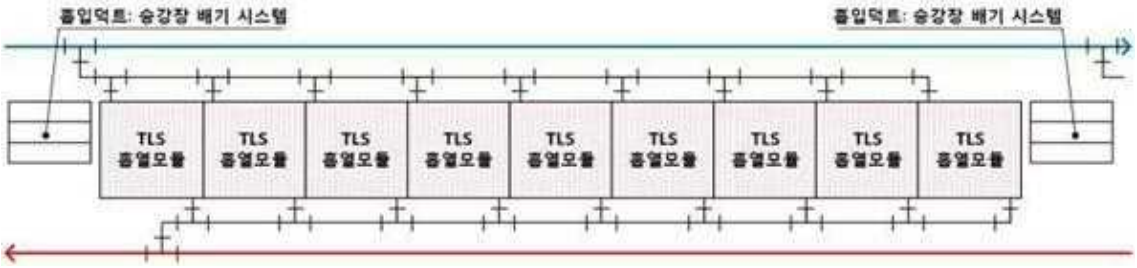
① 흡열체

<표 3-3-57> 흡열체 특징

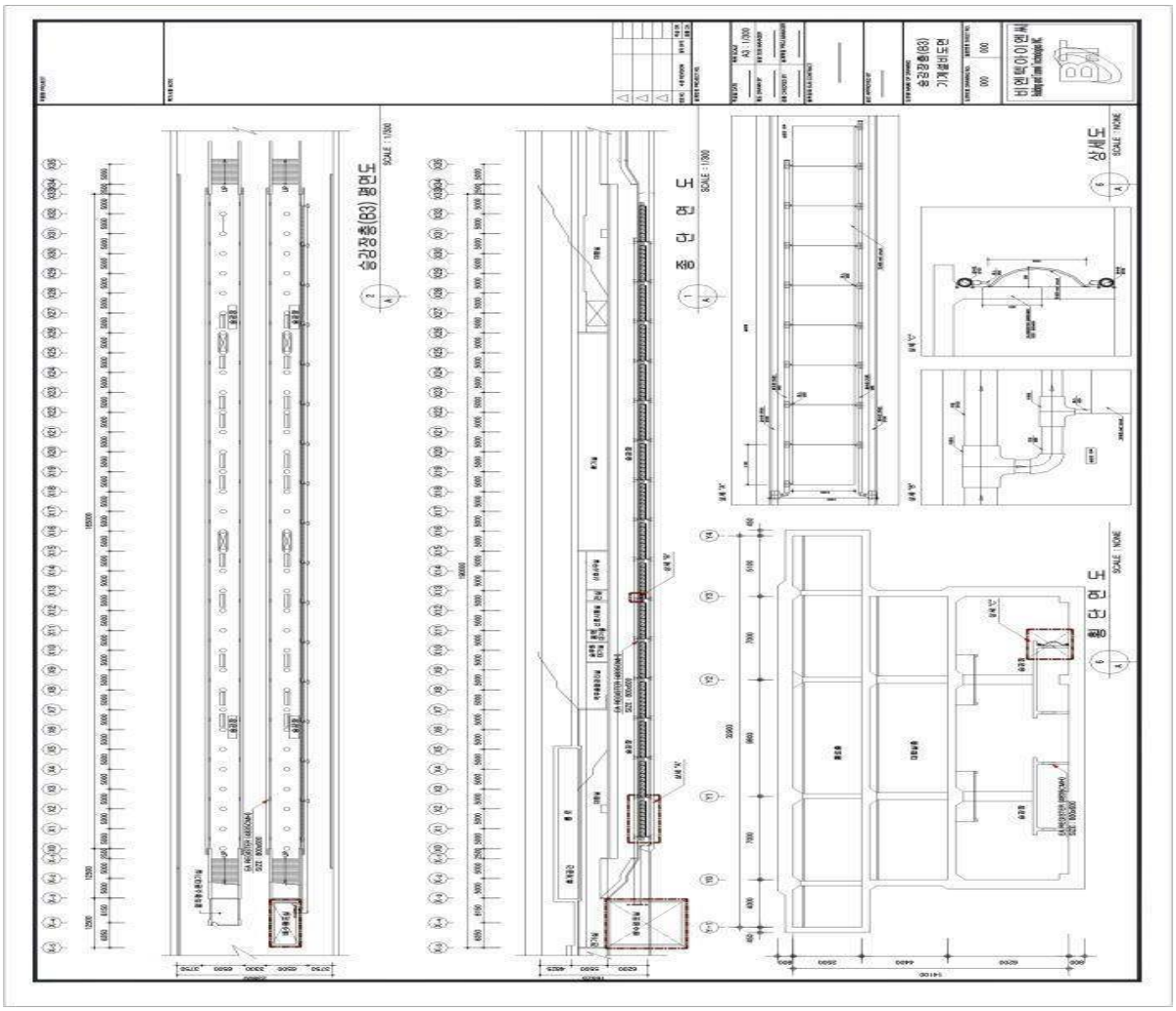
흡열체 - Capillary tube mat	
	- 복사 패널 제작용 내부 흡열체로 사용되는 Capillary tube mat 를 적용함. - PP 재질의 얇은 직관을 다발로 구성하여 관 마찰이 발생하는 관의 길이를 최소화 하면서도 적용면에 대한 냉각관의 배치 밀도를 극대화하였음. - Capillary tube는 모세관 형태로 내경 3mm 이하의 매우 얇은 관이나 관내 유동이 층류를 유지 할 수 있는 유속이하로 공급되게 하여 단위 길이 당 마찰손실을 크지 않게 함. - Capillary tube는 유연한 PP 재질로 굴곡 면에 적용 할 수 있음.

② 흡열 시스템 구성

<표 3-3-58> 흡열체 시스템 구성

TLS 흡열체 구성

- 승강장 배기 시스템의 덕트 사이에 단위 흡열 모듈을 설치. - 덕트 사이 10m 간격을 갖는 테스트 베드 역사의 경우 9m 이내의 공간에 설치 가능. - 단위 모듈은 급수주관 및 환수주관에서 분기된 공급 관으로부터 각각 연결되어 병렬로 구성됨. - 덕트 사이 9m 공간에 대하여 9개의 TLS 흡열 단위모듈이 설치 될 수 있음.

(3) TLS 설계도면



<그림 3-3-4> TLS 설계도면

(4) TLS 단위모듈 제작사양

(가) 모세관 매트 흡열체 구성 방식

<표 3-3-59> 모세관 매트 흡열체 구성 방식

매립식	노출식	패널식
		

- TLS의 설치 방법은 크게 매립식, 노출식, 패널식 3가지로 구분됨.
- 매립식은 내벽(drywall) 겉면에 모세관을 설치한 후 외벽 처리를 통해 마감하여 벽체 내부에 삽입되는 방식임.
- 노출식의 경우 벽면에 추가적으로 모세관을 설치하는 방식으로 시공이 편리함.
- 패널식의 경우 설치할 때 철판 뒤편에 모세관을 두어 모듈 단위로 제작하여 벽면에 시공함.

(나) 모세관 매트 접합 방식

① 매립식

- 매립식의 경우 벽면 위에 모세관을 고정한 후 Plaster를 덮어 마감함.
- 모세관을 고정할 때 Thermally conductive paste 형식의 열전도성 접착제를 이용하여 벽면에 고정함.

<표 3-3-60> Thermally conductive paste 특징

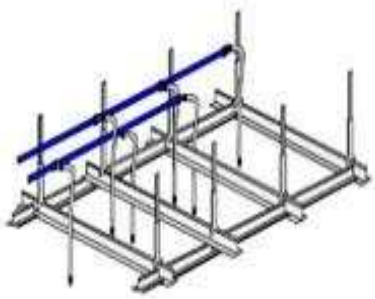
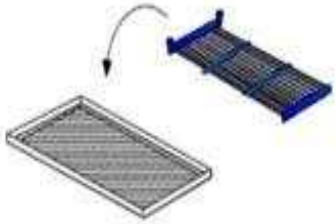
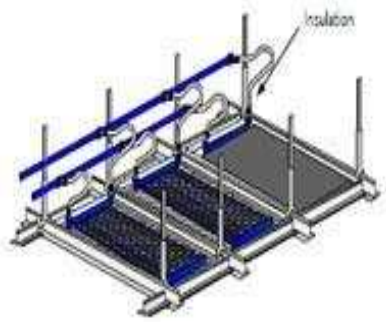
Thermally conductive paste	
	- 내열성이 우수하고 열전도성이 좋은 접착제. - 거의 모든 재질에 대하여 우수한 접착성을 나타냄.

- 접착제를 이용하여 벽면에 고정된 모세관 위로 석고 plaster를 이용하여 외벽을 마감함.
- 경우에 따라 석고 이외에 점토, 타일, 석고 패널 등 상황 및 공간에 맞는 벽면으로 마감함.
- 또는 내벽에 단열재를 두어 그 위로 모세관을 배치한 후, 모세관 위로 석고 패널 등을 부착하여 고정하는 방법으로 설치하기도 함.

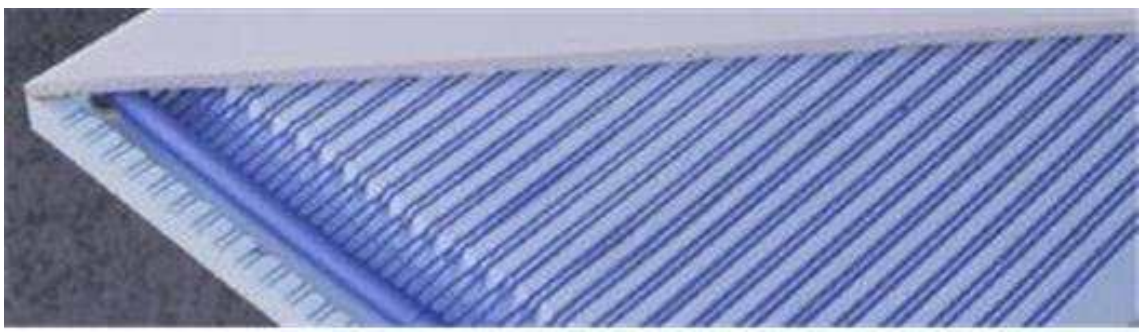
② 패널식

- 패널식 TLS가 설치될 지지 구조물을 벽면에 설치함.
- 패널의 표면이 될 철판에 모세관을 부착함.
- 패널 위에 에폭시계열 접착 필름을 두어 모세관이 고정될 수 있도록 함.
- 수직벽 등 강한 고정이 요구되는 상황에서는 추가적으로 접착제를 이용하여 철판에 고정시킴.
- 벽면과 모듈 사이 공간에서 추가적인 열원이 존재할 경우, 모세관 위로 단열재(mineral wool)를 부착하여 외부로부터 단열시킴.

<표 3-3-61> 패널식

지지 구조물	모세관 부착	단열재 부착
		

- 모듈당모세관이 삽입될 수 있도록 케이스를 설계하여 내부에 삽입된 완제품 형태(Prefabricated unit)로 제작하기도 함.



<그림 3-3-5> Prefabricated unit

(다) TLS 제작 소재 검토

① TLS 소재 및 부속 검토 개요

<표 3-3-62> TLS 소재 및 부속 검토 개요

구분	세부	내용
소재	외장재	- TLS 전·후면 부품을 구성하는 금속 소재 패널제작용 자재 검토
	도장재	- TLS 모듈의 방청 및 금속표면의 방사율 개선을 위한 마감재 검토
	결합재	- TLS 모듈의 터널 벽체 수직 설치에 적합한 결합재 검토
부속	모세관 매트	- 복사 냉난방 패널 흡열체
	슬리브	- TLS 모듈 간 연결부속
	앤드캡	- TLS 모듈 내 모세관 공급관 말단처리
	접착제	- 금속표면에 모세관 매트 접착시 사용하는 접착소재
	열전도 충진재	- TLS 전·후면 및 모세관 매트 결합소재

② 외장재 검토

㉮ 알루미늄

■ 종류 및 특징

○ 순수 알루미늄은 강도가 낮아 합금형태로 사용됨.

○ 합금 원소 성분에 따라 1000 ~ 7000 4자리 숫자로 표기.

○ 강도를 높이기 위해 열처리를 하는 합금도 있음.

○ 비열처리 합금 : 1XXX, 3XXX, 4XXX, 5XXX.

○ 열처리 합금 : 2XXX, 6XXX, 7XXX

■ 비열처리 알루미늄

○ 비열처리 알루미늄의 강도는 합금되는 재료(규소(Si), 철(Fe), 망간(Mn), 마그네슘(Mg) 등)의 원소에 의한 고용 강화 혹은 분산 강화에 의해 결정됨.

○ 비열처리 알루미늄의 합금되는 재료는 열처리에 의해 경화되지 않음.

○ 비열처리 알루미늄은 가공성, 용접성, 내식성이 우수함.

○ 비열처리 알루미늄은 높은 강도를 요구하는 환경보다는 높은 내식성을 요구하는 환경 (선박용 부품, 연료 탱크, 음료수 캔 등 부식이 잘 일어날 수 있는 환경), 용접이 필요한 환경에서 많이 사용됨.

■ 열처리 알루미늄

○ 열처리 알루미늄의 강도는 합금되는 재료(구리(Cu), 망간(Mn), 아연(Zn), 규소(Si) 등)의 원소에 의해 결정됨.

○ 열처리 알루미늄에 사용되는 합금 재료는 합금 온도가 올라갈수록 고용도가 높아짐. 열처리에 의한 합금 원소의 석출, 고용화에 의한 경화를 이룸.

○ 열처리 알루미늄은 비열처리 알루미늄에 비해 강도가 높음. 대신 가공성은 떨어지는 것으로 보임.

○ 열처리 알루미늄은 높은 강도를 요구하는 환경(항공기, 군용 등)에서 주로 사용됨.

㉯ 스테인리스 강

■ 스테인리스 강 특징

○ 스테인리스 강은 내식성이 강한 강으로 부식에 강해 화학용기 등에 많이 사용됨.

○ 다른 금속에 비해 강도가 높고, 표면가공이 다양하게 가능함.

○ 절단, 구부림, Press 등의 가공성이 뛰어남.

○ 내마모성, 내화, 내열성이 높다.

○ Fe 성분에 Cr, Ni, C 등이 중요 원소로 되어 있고, Cb, Ti, Tl, Al 등을 첨가함.

○ 구조에 따라 ferritic, austenitic, martensitic, PH 형의 4가지 종류로 구성됨.

■ 스테인리스 강 종류에 따른 특성

○ 스테인리스 강은 기계적 성질이 우수하기 때문에 각 강에 대응하는 가공을 하면 특별한 문제는 없음.

○ 스테인리스 강 가공방법으로 굴곡가공, Press 가공, 전단 가공의 방법이 있음.

㉰ 탄소강(steel)

■ 탄소강(steel) 특징

○ 철광석에서 나오는 선철에서 카본을 2.0% 이하로 줄인 것.

○ 철과 탄소가 합금된 것으로 카본의 비율에 따라 탄소강 분류. 탄소 이외의 원소(Mn, Cr, Ni, Mo 등)를 함유한 것은 특수강.

○ 0.025~0.85% C 는 아공석강, 0.85% C는 공석강, 0.85~2.0% C는 과공석강으로 분류함.

○ 물리, 화학적 성질로 탄소량 증가시 비중, 열팽창계수, 열전도율, 내식성 감소 및 비열, 전기저항, 항자력 증가.

○ 탄소 함유량 증가시 인장강도, 경도, 항복점이 증가함.

○ 온도에 따라 기계적 성질이 달라짐.

○ 0 ~ 500℃ 구간에서 온도 상승에 따라 탄성계수, 탄성한계, 항복점은 감소함. 인장강도는 200 ~ 300℃까지 상승해 최대값을 나타냄.

(라) 도장재 검토

① 금속 방속 도색 방법

<표 3-3-63> 금속 방속 도색 순서

순서	공정	작업방법	비고
1	- 소지조정과 처리	- 먼지, 수분, 기름 등 오염된 곳을 휘발유로 닦아냄. - 녹이 있는 곳은 광택이 날 때까지 연마.	- 녹이 다량 있을 때 와이어 브러시로 처리
2	- 하도칠	- 철판용 방청도료 도장. - 방청도료 100%, 희석제 20% 내 희석해 사용.	-
3	- 구멍 메우기	- 퍼티로 구멍메꾸기 작업	- 구멍 있을 때만 작업
4	- 연마	- 건조 후 주걱자국이 없게 연마제로 연마함.	-
5	- 중도칠	- 아연판에는 유성도료, 철판에는 에나멜, 조합. - 유성도료를 도료 100에 신나 20% 희석해 도장.	-
6	- 연마	- 건조 후 연마.	-
7	- 상도칠	- 5번과 같은 도료로 다시 도장함.	-

- 금속은 공기 중에 방치해 두면 습기나 물기에 의해 녹이 발생해 금속의 강성을 떨어뜨리고 미관을 저해함.
- 녹 발생을 방지하기 위해 방청 및 도색 작업이 필요함.
- 철판 위에는 방청도료를 도장한 후 퍼티를 메워야 함.
- 광명단방청도료는 방청력이 좋으나 내후성이 좋지 않아 상도칠이 필수적

② 방청 소재의 종류

<표 3-3-64> 방청 소재 종류

도료	특징
징크리치 페인트	- 녹을 방지하는 도료로 방청성능이 매우 뛰어남. - 금속아연 90~95, 비클(방청안료) 5~10으로 구성, 유기계(에폭시)와 무기계가 있음.
하이빌드 도료	- 도료안 수지에 의한 방청성을 높인 제품. 후막에 의해 고성능을 얻는 도료. - 도장막의 내수성, 내염수성, 내약품성, 내기후성, 내열성 등의 성능 좋은 수지를 사용해 부식성분을 도장막이 차단하는 기능을 특화함. - 보수도장이 필요없는 곳에서 주로 사용됨.

- 도색 도료 중금속의 녹 발생을 방지하기 위해 방청기능을 특화한 제품을 사용.

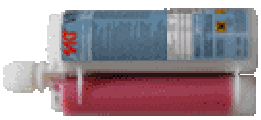
③ 방청 도색 제품

<표 3-3-65> 방청 도색 제품 종류

제품명	마감, 색	고형분 용적비 (%)	추천도막두께 (㎛)	이론도포면적 (㎡/L)	인화점 (℃)
징크리치 페인트	무광 갈색	58	50 ~ 100	11.6	27
하이빌드 도료	무광 갈색	40	30 ~ 40	11.0 ~ 13.0	38

(마) 결합재 검토

<표 3-3-66> 결합재 종류

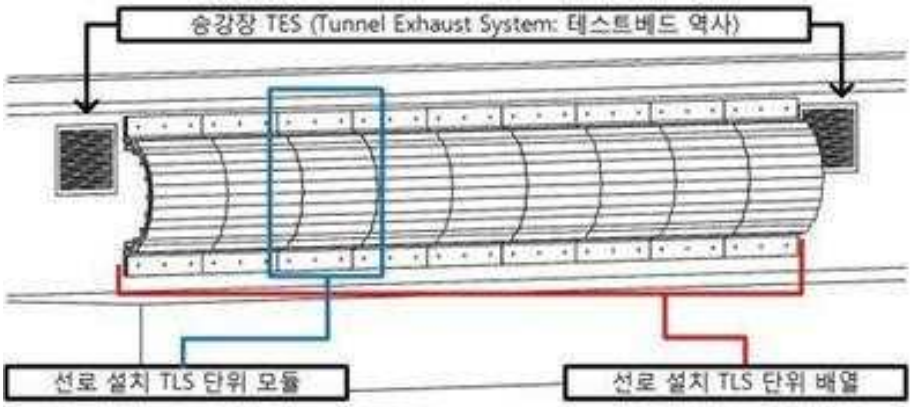
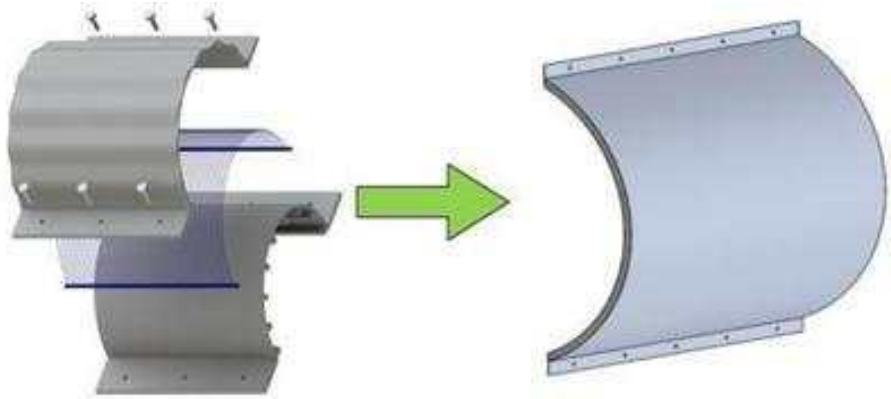
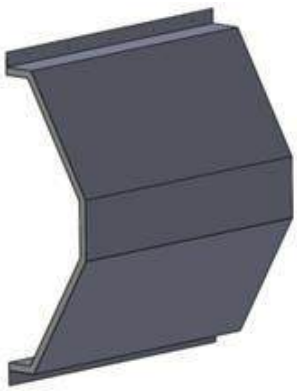
종류	특징	
웨지앵커	- 앙카 외경과 콘크리트 천공직경이 동일 - 부착물 직접관통 부착 - 콘크리트 천공 후 망치로 삽입, 정해진 토크값으로 너트를 조여 확장	
세트앵커	- 앵커 나사산 부분과 콘 부분의 직경이 다름 - 콘부분의 직경이 콘크리트 천공직경과 동일 - 콘크리트 천공 후 너트, 와셔 분해하고 앵커에 삽입, 슬리브를 망치로 타격해 고정	
중량물용앵커	- 나사산과 슬리브의 조합으로 전단력 증가 - 직접관통부착으로 작업속도 증가	
케미컬 앵커	- 화학물질을 이용해 앵커를 벽면과 접착 - 해수나 담수에서 사용가능	

- 금속제 제품의 콘크리트 벽체 수직에 설치할 때 콘크리트에 천공 후 앵커(anchor)를 구멍에 넣어 구조물의 볼트와 결합시킴.
- 웨지앵커 (경량물용앵커), 세트앵커, 중량물용앵커 (고하중용), 케미컬 앵커의 종류로 구성됨.

나. TLS 시작품 제작

(1) TLS 시작품 제작 개요

<표 3-3-67> TLS 시작품 제작 개요

<table>
<tr><th>구분</th><th colspan="2">내용</th></tr>
<tr><td>목적</td><td colspan="2">- TLS 흡열체 제작에 앞서 TLS 시제품 제작을 통해 역사 설치용 흡열모듈의 제작성을 검토
- TLS 흡열성능 실험에 사용될 시험 시편 단품 제작</td></tr>
<tr><td rowspan="2">제작 목표</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">- TLS 단위모듈 1개를 시작품으로 하여 제작함.
- 역사 설치용 디자인을 구현 할 수 있는 형상으로 구현함.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">최초
제작안</td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td colspan="2">- 굴곡면을 적용하되 단순화된 표면 적용.
- 핀이나 골진 표면의 경우 금형 등이 필요하여 단품 제작을 목적으로 하는 시작품의 제작에 있어서는 단순화된 표면을 적용함.
- 상판과 하판으로 제작하고 그 사이에 모세관 튜브 매트를 삽입하고 충진.</td></tr>
<tr><td>수정
제작안</td><td>  </td><td>- 초기 제작성 검토결과 금형 등의 정형화된 설비 없이는 굴곡을 가진 두 금속판을 적정한 정밀도로 제작하는 것이 어려움에 따라 원형 굴곡 대신 절곡으로 대체함.
- 절곡의 경우 쉽게 제작이 가능하였고 적용한 모세관 튜브 매트의 경우 굽힐 수 있는 재질로 되어있어 절곡된 두 금속판 사이에 삽입하여 석고로 충진하고자 하였음.</td></tr>
</table>

(2) TLS 시작품 구조해석

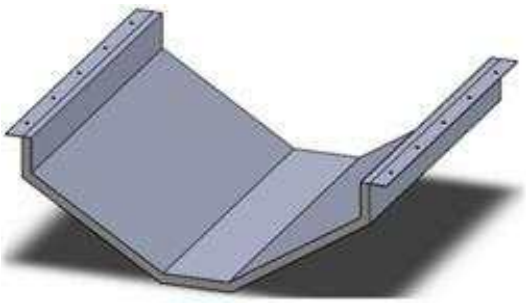
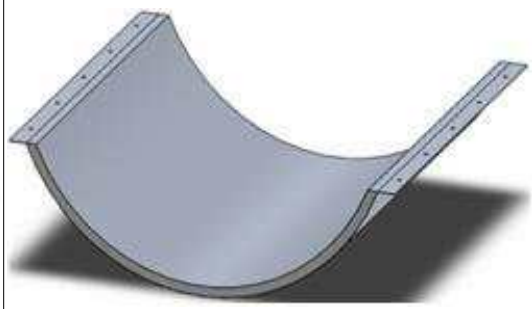
(가) 서론

- 설계된 TLS System이 벽면 고정되는 상황에 대한 검증이 필요함으로 구조해석을 수행.
- 구조해석의 장점으로 실물제작검증에 비해 비용, 시간을 절약하면서, 수정이 쉽게 가능. 또한 제품의 응력분포를 통해, 제품의 취약한 부분을 쉽게 파악할 수 있음.
- 구조해석을 진행하면서 설계 제품에 대해 파손가능성을 검증.

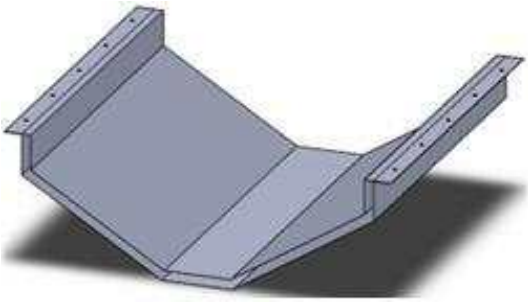
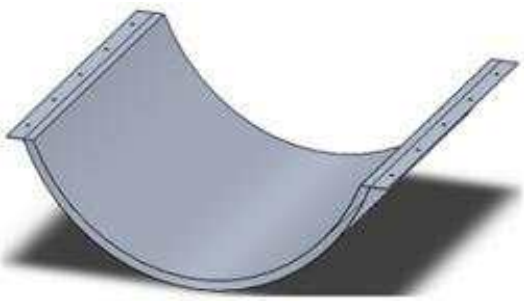
(나) 해석대상 및 제원

- 설계된 TLS System에 대해 구조해석을 진행.
- TLS System은 알루미늄 판 2장, 충진재, 매트로 구성.
- 매트는 매우 작은 관이 여러 개로 구성되어 격자 생성에 어려움이 있으므로 충진재와 하나의 물체로 모사함.
- 충진재는 석고로 구성되어 있지만 혼합비율에 따라 물성치가 크게 달라져 재질을 특정할 수 없음. 알루미늄 판에 대해 확인하기 위한 과정이므로 충진재는 무게를 맞추는 모사방법으로 진행함. 충진재와 매트의 예상되는 무게를 맞추기 위해 충진재는 플라스틱으로 모사.
- 알루미늄 판은 절곡된 형태, 라운드형 2가지 형태에 대해 해석을 진행.

<표 3-3-68> TLS System 형태

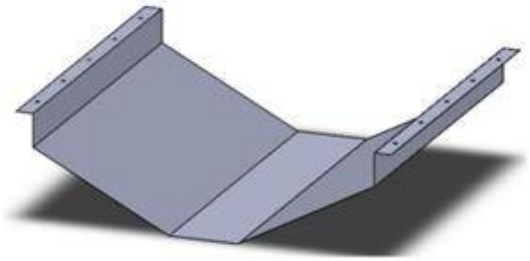
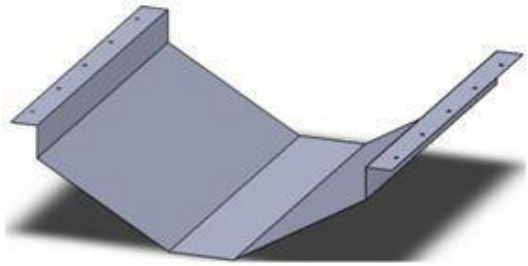
구분	절곡된 형태	라운드형
TLS System		

<표 3-3-69> 판 어셈블리 형태

구분	절곡된 형태	라운드형
판 어셈블리		

① 절곡된 알루미늄 판

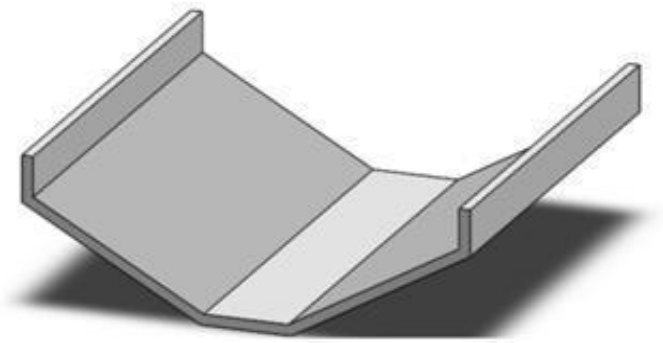
<표 3-3-70> 절곡된 알루미늄 판 형태

알루미늄 판 (절곡된 상판)	알루미늄 판 (절곡된 하판)
	

<표 3-3-71> 알루미늄 판 제원

알루미늄 판 제원 (절곡된 형태)					
재질	두께기준	길이	폭	높이	무게
Al 6061	1 t	1 m	1.1 m	0.34 m	3.87 kg(상), 3.78kg(하)

- 알루미늄 판은 상판, 하판 총 2개로 구성되어 상판과 하판 사이에 2.5cm 공간이 나오도록 구성.

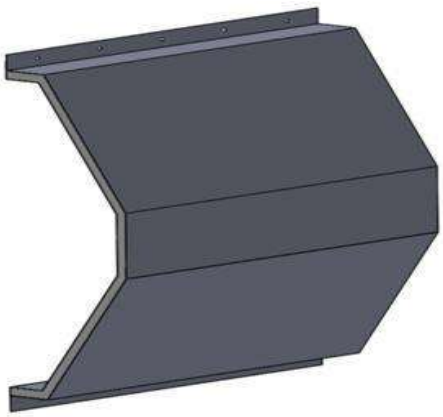


<그림 3-3-6> 모사된 충진재 (절곡된 형태)

<표 3-3-72> 모사된 충진재 제원

모사한 충진재 제원 (절곡된 형태)					
재질	두께	길이	폭	높이	무게
플라스틱 (모사)	2.5 cm	1 m	1.1 m	0.34 m	12.95 kg

- 충진재는 알루미늄 판 사이의 공간을 채우는 형태로 석고와 매트가 한 물체로 모사.



<그림3-3-7> TLS System (절곡된 형태)

<표 3-3-73> TLS System (절곡된 형태) 무게

TLS System (절곡된 형태)		
알루미늄 판 무게	충진재 무게	조립체 무게
7.65 kg	12.95 kg	20.60 kg

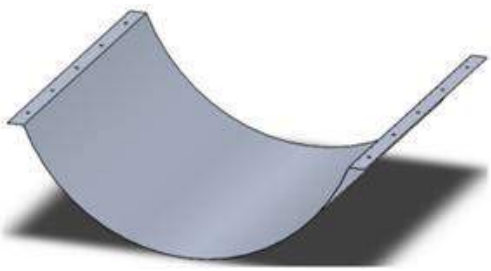
- 본 해석을 위해 TLS System은 실제 알루미늄 판과 모사된 충진재로 구성.

<표 3-3-74> TLS System의 알루미늄 판

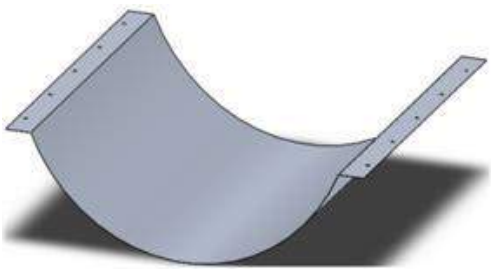
두께	상판	하판	충진재	조립체
0.5t	1.93 kg	1.89 kg	12.95 kg	16.77 kg
1.0t	3.87 kg	3.78 kg	12.95 kg	20.60 kg
1.5t	5.81 kg	5.68 kg	12.95 kg	24.44 kg
2.0t	7.75 kg	7.57 kg	12.95 kg	28.27 kg

- TLS System의 알루미늄 판은 1t를 기준으로 하여 구성.
- 가벼운 TLS System 구성을 위해 0.5t에 대해 해석을 진행한다. 또한 구조적인 강도 향상을 위해 보다 두꺼운 1.5t, 2.0t에 대해서도 해석을 진행.
- TLS System 알루미늄 판의 각 두께에 따른 상판, 하판, 충진재, 조립체의 무게계산은 위 표에 나타냄.

② 라운드형 알루미늄 판



<그림 3-3-8> 알루미늄 판 (절곡된 상판)

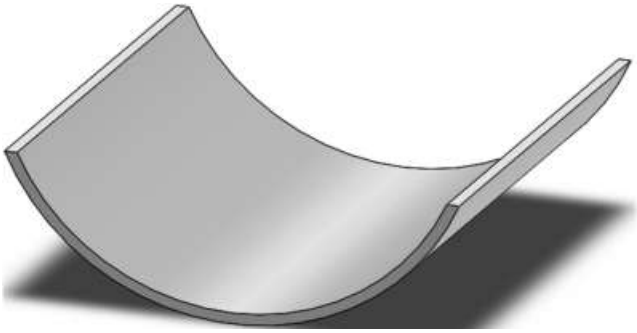


<그림 3-3-9> 알루미늄 판 (절곡된 하판)

<표 3-3-75> 알루미늄 판 제원

알루미늄 판 제원 (라운드형)					
재질	두께기준	길이	폭	높이	무게
Al 6061	1 t	1 m	1.1 m	0.34 m	3.69 kg(상), 3.62kg(하)

- 알루미늄 판은 상판, 하판 총 2개로 구성되어 상판과 하판 사이에 2.5cm 공간이 나오도록 구성.

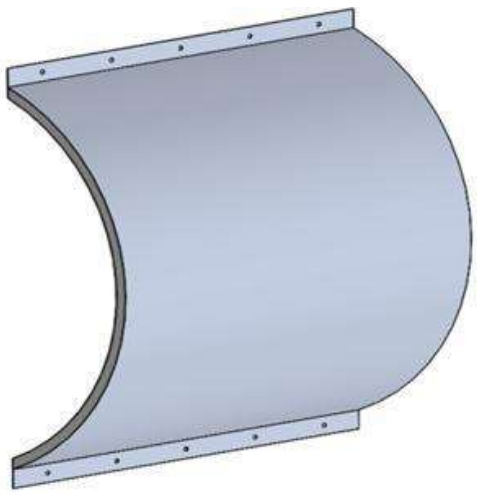


<그림 3-3-10> 모사된 충진재 (라운드형)

<표 3-3-76> 모사한 충진재 제원

모사한 충진재 제원 (라운드형)					
재질	두께	길이	폭	높이	무게
플라스틱 (모사)	2.5 cm	1 m	1.1 m	0.33 m	12.28 kg

- 충진재는 알루미늄 판 사이의 공간을 채우는 형태로 석고와 매트가 한 물체로 모사.



<그림 3-3-11> TLS System (라운드형)

<표 3-3-77> TLS System (라운드형) 무게

TLS System (라운드형)		
알루미늄 판 무게	충진재 무게	조립체 무게
7.31 kg	12.28 kg	19.59 kg

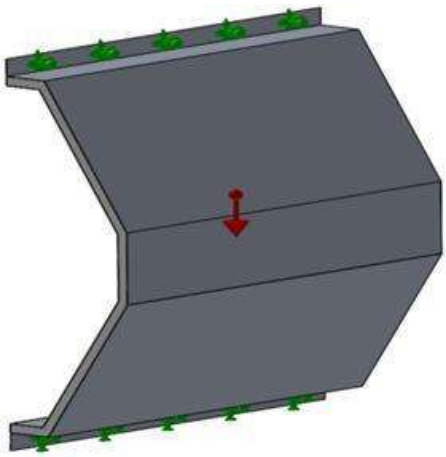
- 본 해석을 위해 TLS System은 실제 알루미늄 판과 모사된 충진재로 구성.

<표 3-3-78> TLS System의 알루미늄 판

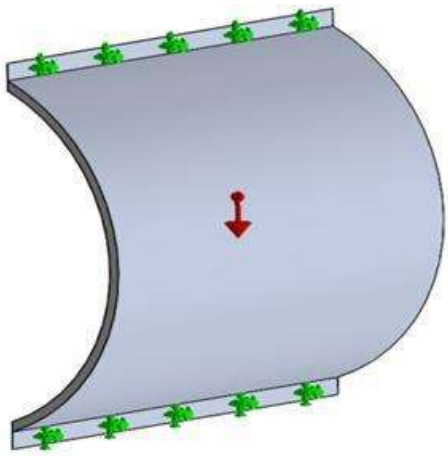
두께	상판	하판	충진재	조립체
0.5t	1.84 kg	1.84 kg	12.28 kg	15.94 kg
1.0t	3.69 kg	3.62 kg	12.28 kg	19.60 kg
1.5t	5.54 kg	5.43 kg	12.28 kg	23.26 kg
2.0t	7.38 kg	7.25 kg	12.28 kg	26.92 kg

- TLS System의 알루미늄 판은 1t를 기준으로 하여 구성.
- 가벼운 TLS System 구성을 위해 0.5t에 대해 해석을 진행한다. 또한 구조적인 강도 향상을 위해 보다 두꺼운 1.5t, 2.0t에 대해서도 해석을 진행.
- TLS System 알루미늄 판의 각 두께에 따른 상판, 하판, 충진재, 조립체의 무게계산은 위 표에 나타냄.

(다) 해석조건



<그림 3-3-12> TLS System 해석조건 (절곡된 형태)



<그림 3-3-13> TLS System 해석조건 (라운드형)

- 본 구조해석에서는 조립체가 고정됐을 때의 안정성을 평가하기 위한 것이므로 조립체에 대한 해석을 수행.

- TLS System은 움직이는 제품이 아니므로 고정된 형태에서 제품 자체 중력만 적용
- 중력 방향은 위 그림에 나타낸 방향으로 적용.
- TLS System을 벽면에 볼트로 고정시키는 상황을 모사하기 위해 알루미늄 판에 있는 모든 볼트 구멍을 고정 조건 적용.

(라) 해석방법
- 구조해석은 3D Modeling 프로그램인 Solidworks를 활용.
- Solidworks는 CAD와 같이 3D Modeling을 기본적인 기능을 토대로 유동해석 및 구조해석 등의 Simulation 기능을 확장 지원.
- Solidworks에서 다양한 재질의 밀도, 열팽창계수, 항복강도, 탄성율과 같은 실제 물성치 값이 저장되어 있어 모델링한 물체에 재질을 적용하면 무게, 응력, 변형량 등의 결과를 얻을 수 있음.

(마) 해석결과

① 결론
- 설계된 TLS System에 대해 구조해석을 수행함.
- 충진재는 물성치를 특정할 수 없어서 실제 설치했을 때 예상되는 무게를 기준으로 잡고 플라스틱 재질로 모사함.
- 구조해석을 통해 최대 응력수치 및 응력분포를 확인함.

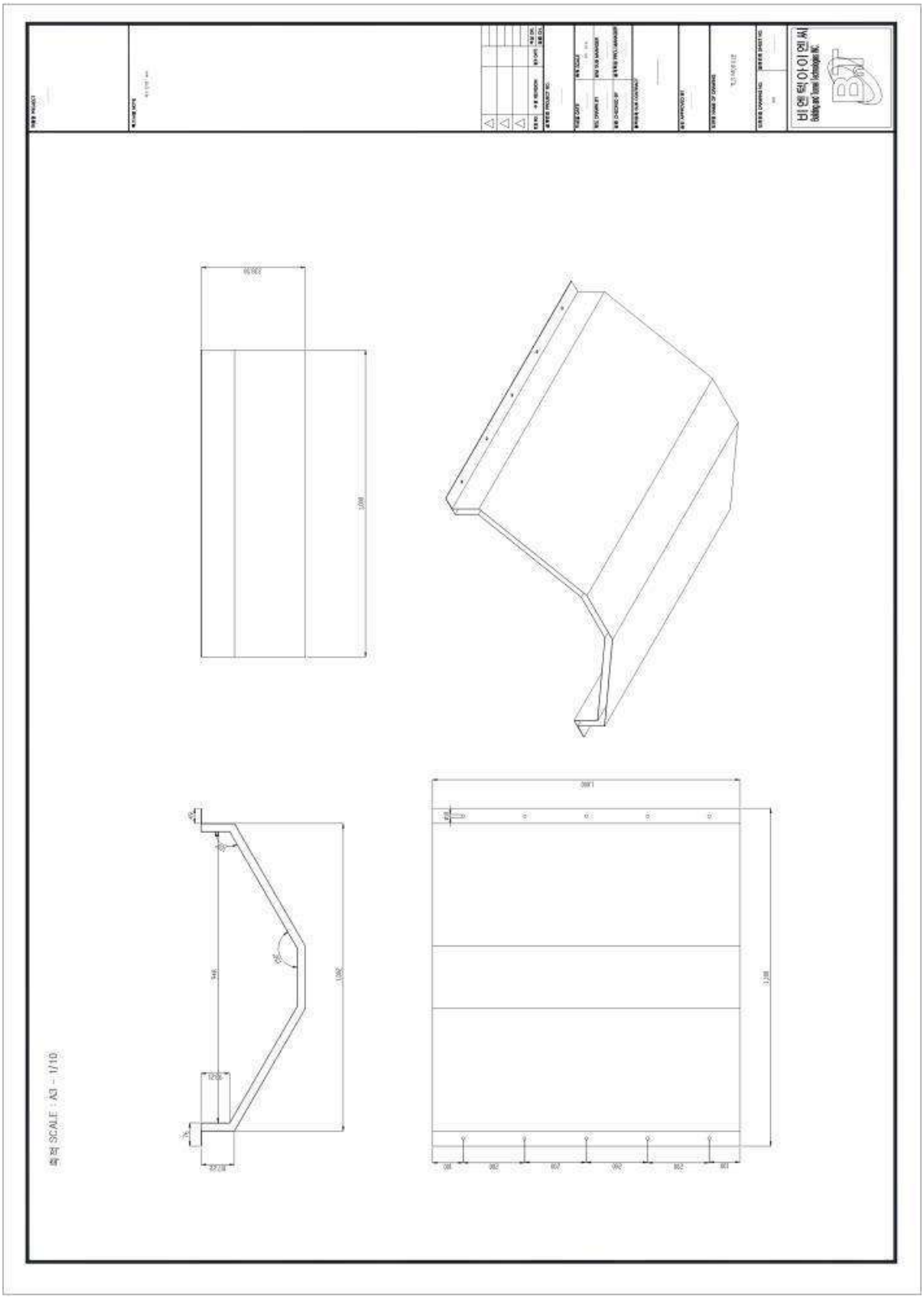
② 최대응력 및 최대변위
- 모든 두께에서 최대 응력수치 값은 항복강도에 비해 매우 낮은 값을 나타냄.
- 변위 값도 0.001mm 수준으로 나타나 전체 System 크기 대비 매우 낮은 값을 나타냄.
- 알루미늄 판이 두꺼워질수록 최대응력 및 최대변위가 작아짐.

③ 변위분포 및 응력분포
- 두께가 두꺼운 1.5t, 2.0t에서는 0.5t, 1.0t에 비해 낮은 변위 및 응력분포를 나타냄. 두께가 두꺼울수록 강성이 높아지기 때문에 낮은 변위, 응력 분포를 나타내는 것으로 보임.
- 두께가 두꺼울수록 낮은 응력, 변위 분포를 나타냄.

④ 총론
- 전체적인 해석결과를 통해 TLS System의 파손가능성이 없었음.
- 알루미늄 판이 두꺼울수록 높은 강성을 갖는데 유리해짐.
- 절곡된 형태가 라운드형보다 응력 및 변형량이 작게 나타나 구조적인 측면에서 더 나은 유리함.
- 경량화 목적으로 제작할 때는 얇은 알루미늄 판(0.5t, 1t)을 적용 가능함.

(3) TLS 시작품 제작

(가) 제작도면



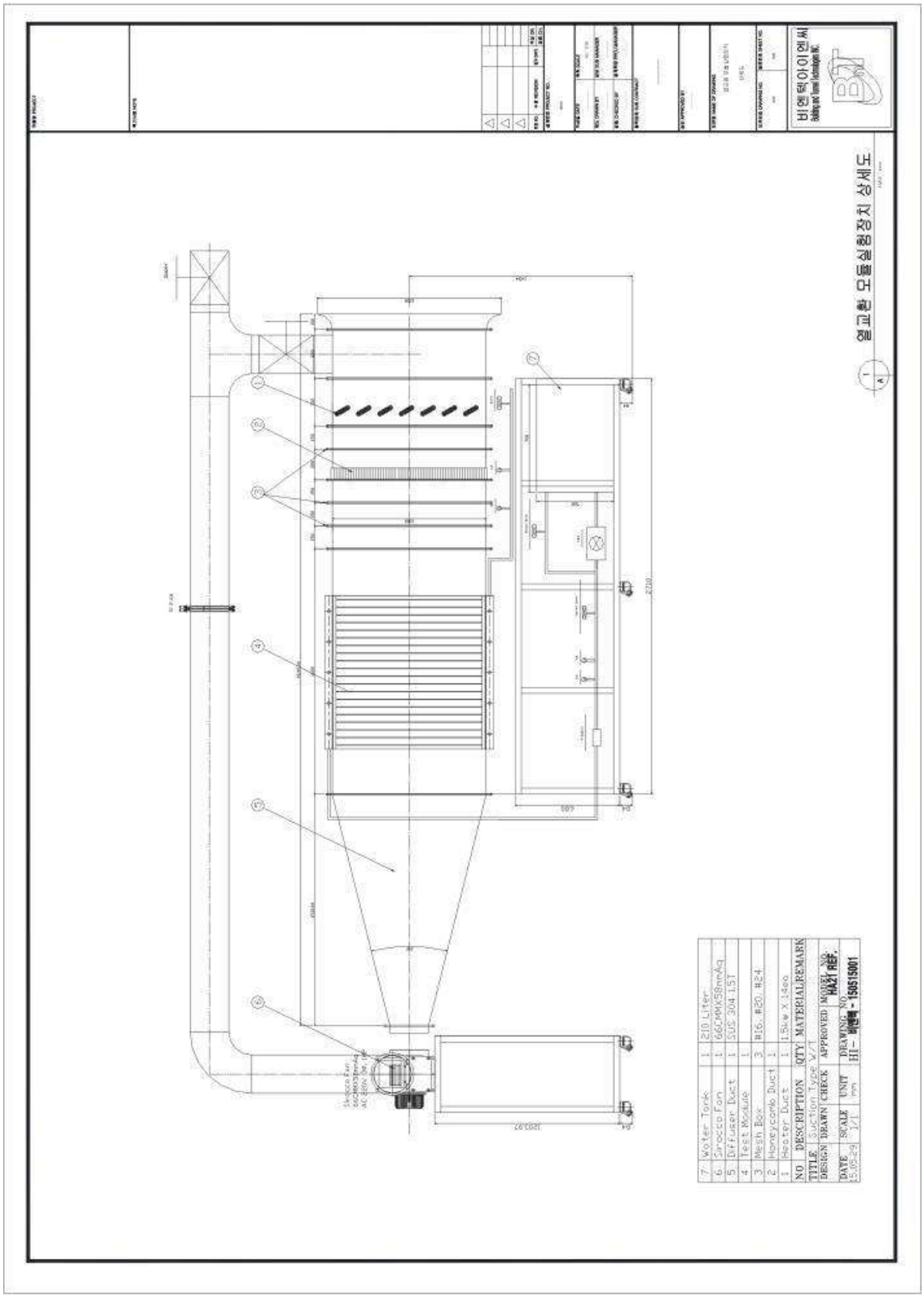
<그림 3-3-14> TLS 제작도면

(나) 제작 결과

<표 3-3-79> 제작 결과

구분	내용
외형 구성	
내부 배관 및 충진재	 
완성품	

(4) TLS 시작품 실험장치 도면



<그림 3-3-15> TLS 시작품 실험장치 도면

다. **성능평가**

(1) TLS 시험

(가) 실험 보고서

(가) 실험 개요

① 실험목적

- 예비실험 실시: 실험장치의 적절성 및 실험 범위 검토, 충진재 주입하지 않은 TLS 흡열 모듈의 성능 테스트.
- 본 실험 실시: 석고주입시 효과 확인.
- 실험 결과 분석: TLS 흡열모듈의 터널 적용시 유사 환경에서의 흡열량 평가 기초 자료 확보.

② 일자별 진행 내용

<표 3-3-80> 주차별 진행 내용

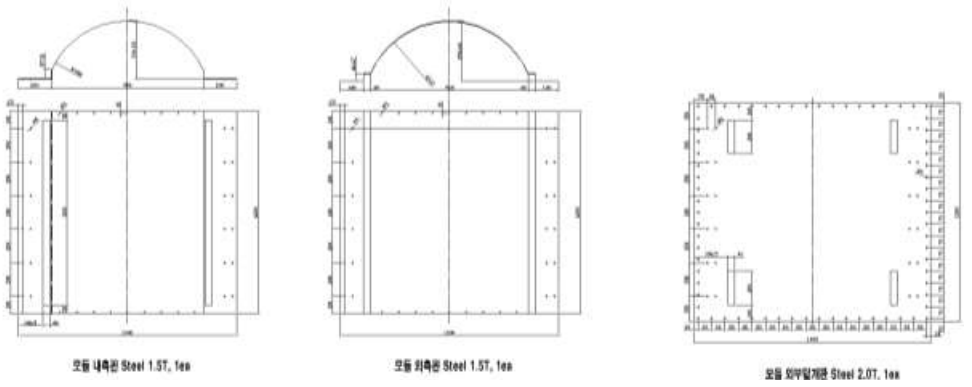
구분	내용
1주차	• 실험실 입주 후 청소, 테이블 등 물품 구매 / • 잠금장치 부착
2주차	• 실험 장치 입고 / • 창문 암막 작업
	• 유량 조절 밸브 동력용 컴프레서 설치 / • 석고 수령
	• 유량 컨트롤러 수리 - 홍익유체 • 실험장치 햇빛 차단 작업, 난방기 구입 • 보안설비 및 차단기 교체, 난방기 설치, 추가테이블 설치
3주차	• 오리피스 표시 값 분석 코드 작성
	• 유속계 설치 • 석고 응고 실험 • 예비실험 실시 (인버터 60Hz, 챔버 온도설정: 20, 25, 30, 35℃
	• 차압계 오리피스에 연결 • DAQ 데이터 기록 환경 구축 • 예비실험 실시 (풍속: 0.25㎧, 챔버 온도설정: 20℃)
	• 예비실험 실시 (풍속: 0.25㎧, 챔버 온도범위: 15, 20, 25, 30℃)
	• 실험 실시 (풍속 범위: 0.25, 0.5, 0.75㎧, 챔버 온도설정: 15, 20, 25, 30℃)
4주차	• 송풍기 교체 - 최대 유량 0.4 CMS • 예비실험 실시 (풍속 범위: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8㎧, 챔버 온도설정: 20, 25, 30℃)
	• 흡열 모듈 분리 • 석고주입 실시
5주차	• 석고 주입 흡열 모듈 체결 / • 정상작동 여부 테스트
	• 본 실험 실시 (풍속 범위: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8㎧, 챔버 온도설정: 15, 20, 25, 30℃)
	• 본 실험 실시 (풍속 범위: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8㎧, 챔버 온도설정: 15, 20, 25, 30℃)

③ 실험 설정

㉮ 실험용 모듈

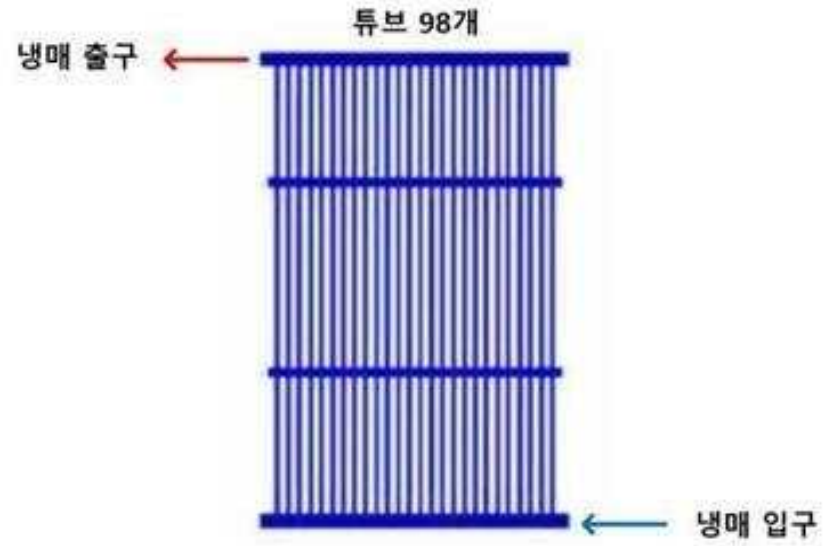
■ 형태 및 구성

<표 3-3-81> 모듈 형태 및 구성

<table>
<tr><th colspan="2">구분</th><th colspan="3">내용</th></tr>
<tr><td rowspan="3">외형</td><td>도면</td><td colspan="3">  </td></tr>
<tr><td rowspan="2">사진</td><td colspan="3">  </td></tr>
<tr><td><TLS 흡열 모듈 본체></td><td><체결 준비 상태></td><td><뒤편 - 체결 준비 상태></td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">▪ TLS 흡열 모듈의 곡면 형상을 유지하기 위하여 지지대 3개를 추가로 용접함.
▪ TLS 흡열 모듈을 실험장치에 탑재 할 수 있도록 모듈에 각봉을 추가하여 프레임을 형성하고 모듈의 뒤편에 덮개판을 결속하였음.
▪ TLS 흡열 모듈에 추가된 각봉 프레임은 석고주입 작업에서 거치대 역할을 하고 TLS 흡열 모듈의 운반 및 설치에 있어 손잡이로 사용 될 수 있게 하였음.
▪ 모듈 외부 덮개판은 석고주입을 할 수 있는 구멍을 내어 석고주입시 TLS 흡열모듈이 바닥에 안정적으로 고정된 상태에서 석고주입을 수행 할 수 있도록 하였음.</td></tr>
<tr><td colspan="2">제작 소재</td><td colspan="3">▪ 흡열 모듈의 제작소재는 1.5㎜ 두께의 압연강판임.
▪ 외부 덮개판의 경우 2.0㎜ 로 제작됨.</td></tr>
<tr><td colspan="2">충진재</td><td colspan="3">▪ TLS 흡열모듈 시작품의 제작 경험을 바탕으로 적합한 충진재로서 응고전 작업 시간을 충분히 확보 할 수 있는 석고 자재를 선정함.
▪ 문교 하이캐스트 GM-10 석고 사용.
- 용도: 도자기 형재용
- 기본 혼수율: 40%
- 혼합 후 작업 시간 20분 (시발 시점 16분, 종결 시점 35분)</td></tr>
</table>

■ 내부 배관 소재 (모세관 튜브 매트)

<표 3-3-82> 내부 배관 소재

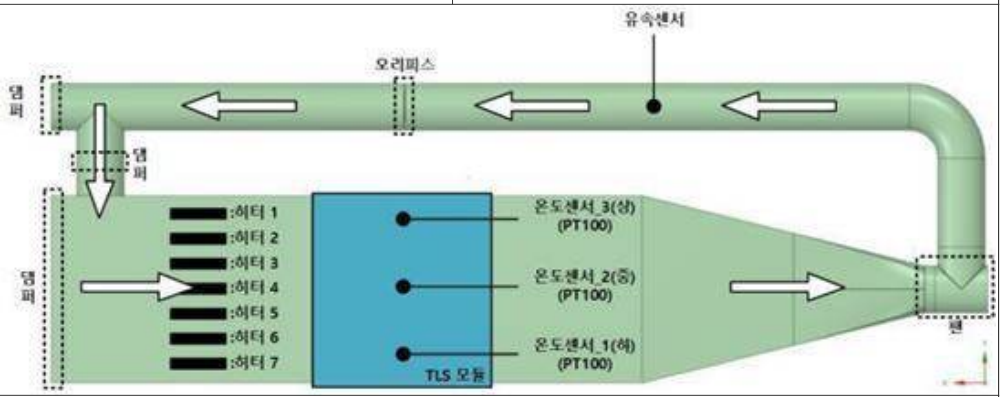
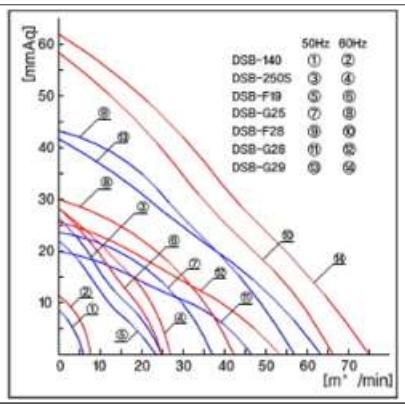
<table>
<tr><th>구분</th><th>내용</th></tr>
<tr><td>개요</td><td> 

▪ 모세관에 공급된 물은 98개의 튜브로 나눠서 흘러감.
▪ 각각의 모세관 및 약 100개의 모세관이 연결되어 있는 콜렉터 튜브는 작은 지름 및 관 하나 당 적은 유량으로 인한 층류유동 효과로 10㎜ 간격의 촘촘한 분기에도 불구하고 균일한 유량 밸런스를 이룰 수 있음.</td></tr>
<tr><td>상세제원</td><td>▪ 모세관 튜브 내경: 2.7㎜, 모세관 튜브 내경 단면적: 5.7255·10-6 m2
▪ 모세관 튜브 개수: 98개
▪ 모세관 튜브 간격: 10㎜
▪ 콜렉터 튜브 내경: 16㎜
▪ 모세관 튜브 매트 길이: 1m, 폭: 1m</td></tr>
<tr><td>모세관 튜브 내 유속 산정 식</td><td>▪ TLS 흡열 모듈 실험장치의 냉각수 펌프는 lpm 단위로 컨트롤 되며 유량산정 방식은 아래와 같음.
▪ $v = \frac{Q}{A} = \frac{1.6667 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{LPM}{n}}{5.7255 \cdot 10^{-6}}$
<table><tr><th>항목</th><th>v</th><th>Q</th><th>LPM</th><th>A</th><th>n</th></tr><tr><td>설명</td><td>튜브 내 유속</td><td>공급 유량</td><td>LPM 환산유량</td><td>튜브 단면적</td><td>튜브 개수</td></tr></table>※ 1 lpm = 1.6667·10-5 CMS
※ A: 5.7255·10-6 m2, n: 98</td></tr>
<tr><td>펌프 유량 별 모세관 튜브 유속</td><td><table><tr><th>항목</th><th colspan="5">펌프 유량별 튜브 유속</th></tr><tr><td>펌프 유량 (LPM)</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr><tr><td>모세관 유속 (㎧)</td><td>0.1455</td><td>0.1747</td><td>0.2038</td><td>0.2329</td><td>0.2620</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>모세관 매트흡열량 산정</td><td>$\dot{Q} = 4.184 \cdot (1.6667 \cdot 10^{-5} \cdot LPM) \cdot 1000 \cdot \triangle T$
$\dot{Q}$: 흡열량(kW), LPM : 유량(lpm), $\triangle T$: 입출구 온도차(℃)
※ 물의 비열: 4.184 kJ/(kg·K), 물의 밀도: 1,000 kg/㎥</td></tr>
<tr><td>펌프 유량별 단위 흡열량</td><td><table><tr><th>항목</th><th colspan="5">펌프 유량별 튜브 유속</th></tr><tr><td>펌프 유량 (l/min)</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr><tr><td>흡열량 (kW)</td><td>3.486</td><td>4.184</td><td>4.881</td><td>5.579</td><td>6.276</td></tr></table>※ 온도차 $\triangle T$ = 10℃ 가정 시</td></tr>
</table>

㉰ 풍동실험 장치

■ 실험용 챔버

<표 3-3-83> 실험용 챔버 제원

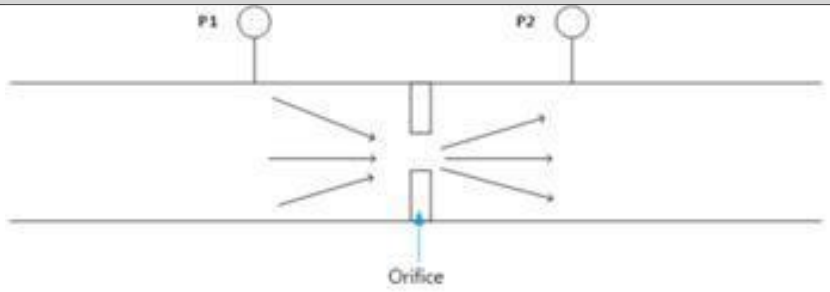
<table>
<tr><th>구분</th><th>내용</th></tr>
<tr><td>사진 및 제원</td><td> 
<table>
<tr><th>구분</th><th>내용</th></tr>
<tr><td>덕트 직경/단면적</td><td>0.25m / 0.0491㎡</td></tr>
<tr><td>챔버 길이</td><td>약 4.6m</td></tr>
<tr><td>챔버 단면적</td><td>0.5㎡</td></tr>
<tr><td>챔버 내부 폭</td><td>0.5m</td></tr>
<tr><td>챔버 내부 높이</td><td>1.0m</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>개요</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>댐퍼</td><td>• 댐퍼의 개폐를 통해 송풍기와 히터의 By-pass 및 순환 모드 동작.
• 빠른 가열 및 일정 온도 유지에 적합한 순환식으로 장치를 설정함.</td></tr>
<tr><td>히터</td><td>• 기본 히터 3개 (히터 1, 4, 7) 및 보조히터 4개 설치됨. (히터 2, 3, 5, 6)
• 히터의 온도 제어는 가운데 2번 온도센서를 통해 이루어짐.</td></tr>
<tr><td>온도센서</td><td>• PT-100 온도 센서
• 표시용 센서 2개(온도센서 1, 3) 및 PID 컨트롤러 입력용 온도센서 1개(온도센서 2)</td></tr>
<tr><td>유속센서</td><td>• 오리피스 통과 전의 유속을 측정.
• 차압으로 환산한 유량 및 유속과의 비교, 확인 목적으로 추가 설치함.</td></tr>
<tr><td>팬</td><td> 

• 시로코형 송풍기
• DSB-F28 제품 적용
-최대 풍량: 66 CMM
-최대 정압: 58 mmAq

※ 풍량 부족으로 DSB-G29 제품으로 교체
-최대 풍량: 75 CMM
-최대 정압: 62 mmAq</td></tr>
</table>

■ 오리피스 차압 측정을 통한 송풍기 유량 측정

<표 3-3-84> 오리피스 차압 측정으로 통한 송풍기 유량 측정

<table>
<tr><th>구분</th><th>내용</th></tr>
<tr><td>개요</td><td> 

• 오리피스 전후의 압력차를 차압계로 측정하여 유량으로 환산</td></tr>
<tr><td>차압 환산식
(차압→유량)</td><td>• $q_v = \frac{q_m}{\rho_1}$
• $q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho_1 \triangle p}$
• $0.5961+0.0261\beta^2-0.000521(\frac{10^6\beta}{Re_D})^{0.7}+(0.0188+0.0063A)\beta^{3.5}(\frac{10^6}{Re_D})^{0.3}+(0.043+0.080e^{-10L_1}$
$-0.123e^{-7L_1})(1-0.11A)\frac{\beta^4}{1-\beta^4}-0.031(M_2'-0.8M_2'^{1.1})\beta^{1.3}$
• $A=(\frac{19000\beta}{Re_D})^{0.8}$
• $M_2' = \frac{2L_2'}{1-\beta}$
※ 실험장치의 오리피스 탭: 코너 탭 ($L_1 = L_2 = 0$), D : 0.25m, d : 0.15m
※ 차압계는 TESTO 장비를 사용함</td></tr>
<tr><td>차압 변환 표</td><td>
<table>
<tr><th>구분</th><th colspan="5">챔버 내 유량</th></tr>
<tr><th>공기온도(℃)</th><th>0.2 CMS</th><th>0.4 CMS</th><th>0.6 CMS</th><th>0.8 CMS</th><th>1.0 CMS</th></tr>
<tr><td>15</td><td>182.5 pa</td><td>735.9 pa</td><td>1662 pa</td><td>2961 pa</td><td>4633 pa</td></tr>
<tr><td>20</td><td>179.3 pa</td><td>723.1 pa</td><td>1633 pa</td><td>2910 pa</td><td>4553 pa</td></tr>
<tr><td>25</td><td>176.2 pa</td><td>710.8 pa</td><td>1605 pa</td><td>2860 pa</td><td>4476 pa</td></tr>
<tr><td>30</td><td>173.2 pa</td><td>698.9 pa</td><td>1578 pa</td><td>2812 pa</td><td>4401 pa</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

■ 컨트롤 패널 (자동제어)

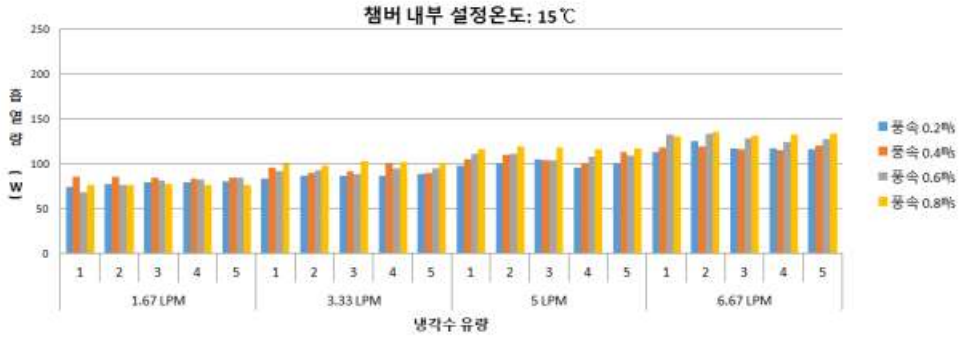
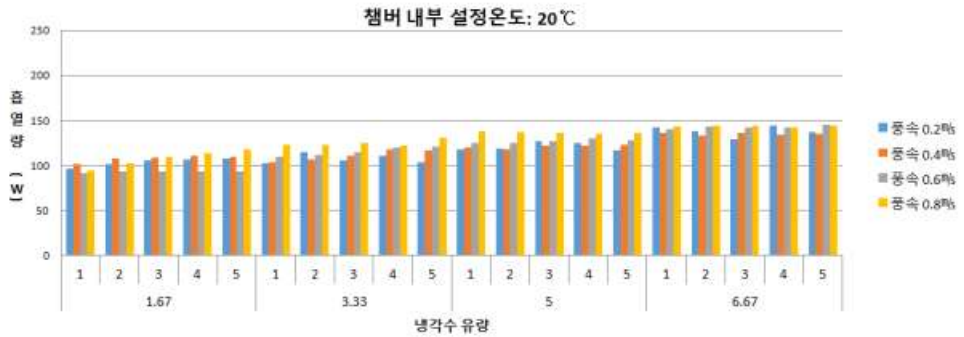
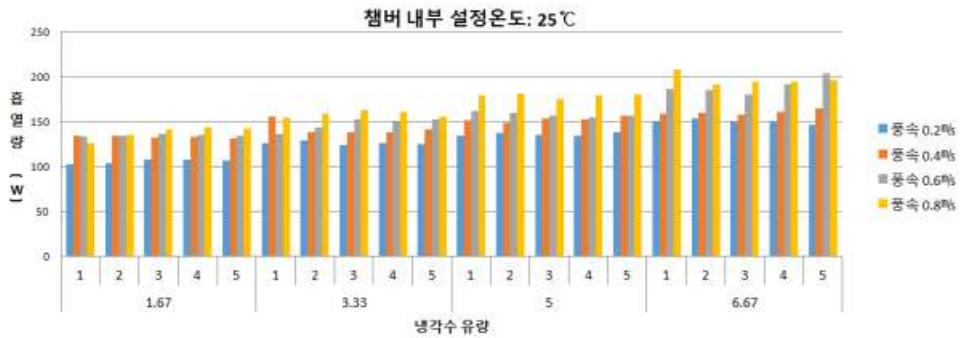
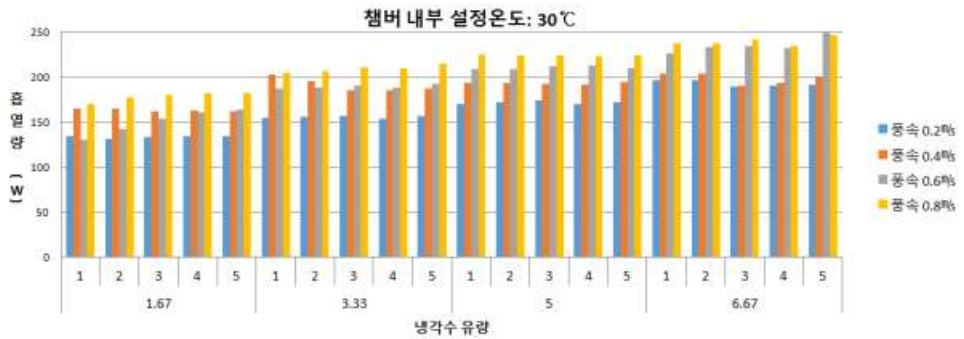
<표 3-3-85> 냉각수 순환 시스템, 컨트롤 패널

구분	내용
냉각수 순환 시스템	• 정격 7 LPM 화학용 펌프 • 전자식 유량센서 • 자동유량조절밸브(자체 컨트롤 오토 레벨러): 컴프레서 동력 사용
컨트롤 패널	• 온도센서 표시기: 장치 내 PT-100 센서 측정값 표시. • 히터 PID 컨트롤러: 2번 히터의 온도측정값이 PID 컨트롤러로 피드백 되어 설정 온도에 따라 히터의 출력을 조정함. • 유량조절: 컨트롤 패널 표시기의 설정 값을 지속적으로 유량밸브로 전송.

㉰ 예비실험

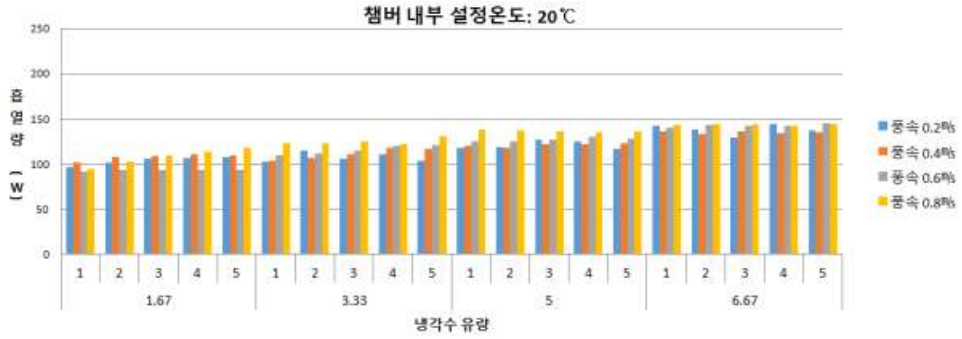
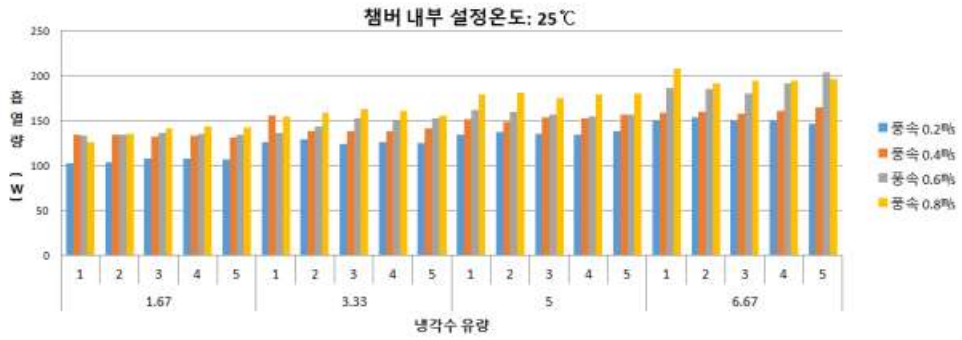
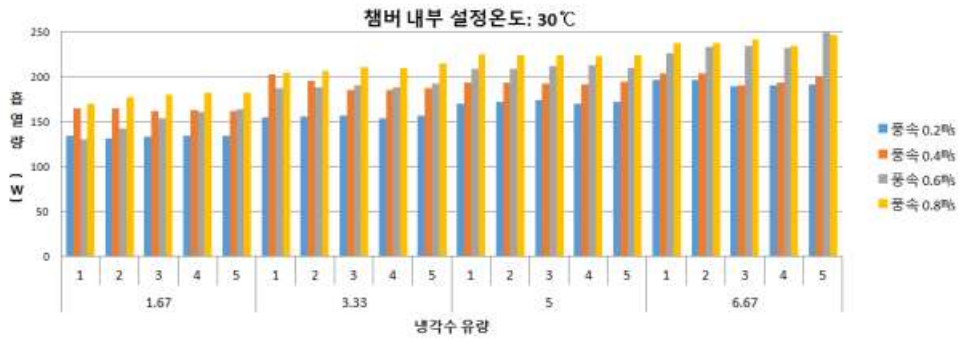
■ 예비실험 결과 (각 설정 별 5회 씩 측정)

<표 3-3-86> 예비시험 결과

챔버 온도	흡열량 산출 결과
15℃	
20℃	
25℃	
30℃	

■ 본 실험을 위한 실험 설정 검토

<표 3-3-87> 실험 설정 검토 1

챔버 온도	흡열량 산출 결과
15℃	
20℃	
25℃	
30℃	

<표 3-3-88> 실험 설정 검토 2

<table>
<tr><th colspan="2">구분</th><th>내용</th></tr>
<tr><td colspan="2">냉각수 펌프 및 유량조절 밸브</td><td>• 7 LPM 이상 공급 가능.
• 8 LPM 이상에서는 유량이 일정하게 유지 되지 못함.
• 1 LPM 이하에서는 밸브의 정밀도 한계로 일정하게 제어되지 못함.
• 실험에 사용될 유량의 범위는 1.67~6.67 LPM 으로 충분히 제어되었음.
• 컴프레서가 일정한 압력을 유지하지 못하면 제어가 실패하였으며 컴프레서의 압력이 1.5kgf 부근일 때 양호한 제어를 보였음.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">풍동 챔버 설정</td><td>장치 최대 풍량</td><td>• 제작업체의 A/S 결과 최대 가능 풍량은 0.4 CMS 로 챔버내 풍속 0.8㎧ 에 해당됨.
• 순환 덕트를 연결 하지 않을 시 1 CMS 이상 가능하나 챔버내 공기를 폐회로로 순환하지 않을 경우 챔버 내부 온도를 높이별로 균일하게 유지하는 것이 불가능하였음.</td></tr>
<tr><td>적정 최소 풍량</td><td>• 챔버 내 풍속이 0.2㎧ 이하인 경우 챔버 내 상하 온도차가 크게 발생함.
• 0.25㎧ 이상의 유속에서 챔버 내 공기온도가 일정하게 유지됨.</td></tr>
<tr><td>적정 온도 범위</td><td>• 챔버 내부 온도가 35℃ 이상인 경우 상하 온도차가 크게 발생함.
• 챔버 내부 온도가 15℃ 이하인 경우 냉각수의 입구온도와 온도차가 작아 흡열량이 낮으며 냉각수 수조의 온도 변화에 민감해져 흡열량 산출값의 오차가 증가하였음.</td></tr>
<tr><td colspan="2">석고 주입전 흡열량</td><td>• 충진재를 주입하지 않은 TLS 흡열모듈의 흡열량 측정결과는 다음과 같음. (튜브 유속: 0.20㎧)
<table>
<tr><th>구분</th><th colspan="4">챔버 내 유량</th></tr>
<tr><th>공기온도(℃)</th><th>0.1 CMS (0.2㎧)</th><th>0.2 CMS (0.4㎧)</th><th>0.3 CMS (0.6㎧)</th><th>0.4 CMS (0.8㎧)</th></tr>
<tr><td>15</td><td>118 W</td><td>118 W</td><td>129 W</td><td>133 W</td></tr>
<tr><td>20</td><td>138 W</td><td>135 W</td><td>143 W</td><td>144 W</td></tr>
<tr><td>25</td><td>150 W</td><td>160 W</td><td>189 W</td><td>197 W</td></tr>
<tr><td>30</td><td>193 W</td><td>198 W</td><td>236 W</td><td>239 W</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td rowspan="2">본 실험 설정 값 도출</td><td>온도 · 풍량</td><td>• 예비실험 결과, 현재 장치에서 유효한 데이터를 얻을 수 있는 풍량의 범위로 판단되는 0.2~0.4 CMS 범위의 풍량을 다음과 같이 구분 하고 온도에 따라 아래와 같은 오리피스 차압을 적용함.
<table>
<tr><th>구분</th><th colspan="3">챔버 내 유량</th></tr>
<tr><th>공기온도(℃)</th><th>0.2 CMS (0.4㎧)</th><th>0.3 CMS (0.6㎧)</th><th>0.4 CMS (0.8㎧)</th></tr>
<tr><td>15</td><td>182.5 pa</td><td>412.7</td><td>735.9</td></tr>
<tr><td>20</td><td>179.3</td><td>405.5</td><td>723.1</td></tr>
<tr><td>25</td><td>176.2</td><td>398.6</td><td>710.8</td></tr>
<tr><td>30</td><td>173.2</td><td>391.8</td><td>698.9</td></tr>
</table>
• 차압계에 해당하는 차압이 표시되도록 송풍기 인버터의 주파수를 조절함</td></tr>
<tr><td>모세관 유속</td><td>• 모세관 튜브 내 유속 0.05~0.2㎧ 내 범위를 다음과 같이 구분하여 실험에 반영함.
<table>
<tr><th>항목</th><th colspan="4">펌프 유량별 튜브 유속</th></tr>
<tr><td>모세관 유속 (㎧)</td><td>0.05</td><td>0.10</td><td>0.15</td><td>0.20</td></tr>
<tr><td>펌프 유량 (LPM)</td><td>1.667</td><td>3.333</td><td>5.000</td><td>6.667</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

④ 본 실험

㉮ 석고 주입 작업



<그림 3-3-16> 석고 주입 작업

- 예비실험 동안 사용된 흡열모듈을 탈거 하여 석고 주입용 모듈로 재사용함.
- 밸브와 온도센서가 조립되어 있는 부분은 분리하지 않고 보존하여 모세관 튜브 매트와 센서 및 밸브간의 결합 상태를 유지 할 수 있도록 하였음.
- 흡열 모듈의 탈거전 미리 제작 해 놓은 석고 주입용 깔때기를 맞춤 제작하여 4명이 동시에 주입작업을 할 수 있도록 하였음.
- 실제 작업의 경우 각자 석고 교반과 석고 주입의 역할을 분담하는 2인 1조로 구성하여 주입은 2개의 구멍 에서만 실시하였으며 이번 석고 주입작업에서는 석고의 농도를 다소 묽게 제작하여 유동성을 높게 하였음.

㉯ 본 실험 Case

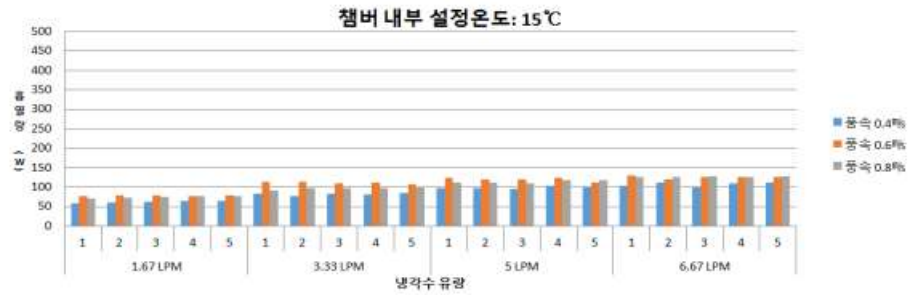
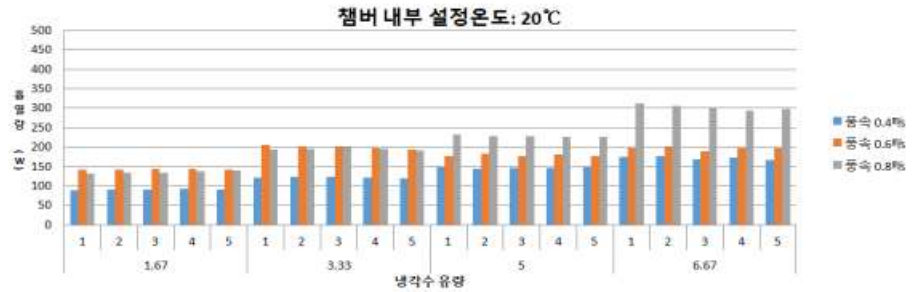
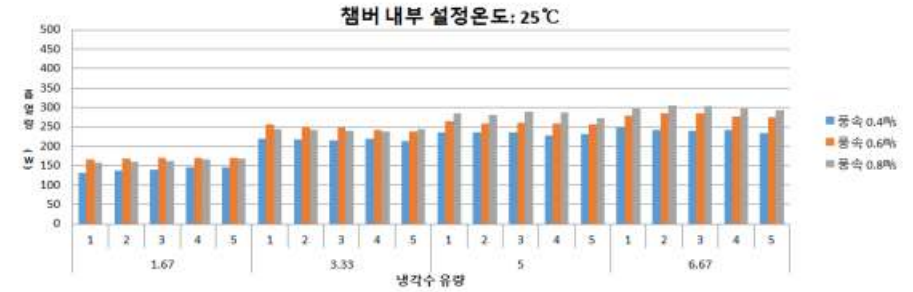
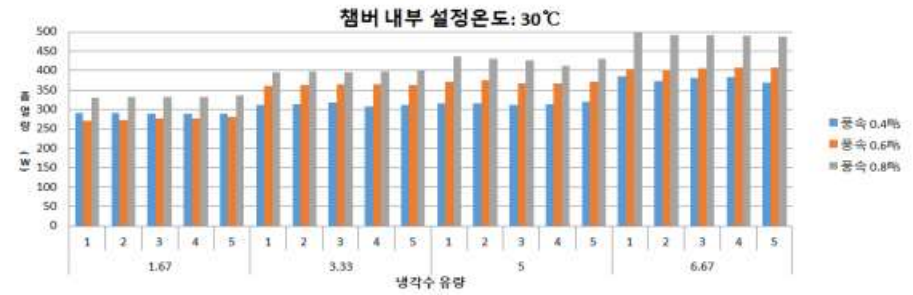
<표 3-3-89> 실험 case

구분	챔버풍속 0.4㎧				챔버풍속 0.6㎧				챔버풍속 0.8㎧			
	모세관 튜브 유량(LPM)				모세관 튜브 유량(LPM)				모세관 튜브 유량(LPM)			
	1.667	3.333	5.000	6.667	1.667	3.333	5.000	6.667	1.667	3.333	5.000	6.667
챔버온도 : 15℃	Case01	Case02	Case03	Case04	Case05	Case06	Case07	Case08	Case09	Case10	Case11	Case12
챔버온도 : 20℃	Case13	Case14	Case15	Case16	Case17	Case18	Case19	Case20	Case21	Case22	Case23	Case24
챔버온도 : 25℃	Case25	Case26	Case27	Case28	Case29	Case30	Case31	Case32	Case33	Case34	Case35	Case36
챔버온도 : 30℃	Case37	Case38	Case39	Case40	Case41	Case42	Case43	Case44	Case45	Case46	Case47	Case48

- 예비 실험을 통해 검토해 본 바와 같이, 현재 설정 가능한 송풍기 유량에서 35℃의 설정온도에서는 온도성층화가 심하게 발생하며, 챔버 내부의 상하부 온도차를 억제할 수 있는 최대한의 온도는 30℃가 됨.
- 35℃ 이상의 온도에서 실험을 하고자 할 경우 매우 큰 풍량이 필요할 것으로 예상됨.

㉰ 본 실험 결과 (충진재 주입 후 흡열량 측정 결과, 각 Case 별 5회 측정)

<표 3-3-90> 실험 결과

챔버 온도	흡열량 산출 결과
15℃	
20℃	
25℃	
30℃	

⑤ CFD를 통한 흡열량 예측

㉮ CFD 분석 모델

■ 기존 분석 모델 개요

<표 3-3-91> 도메인

TLS Module 두께(T)	TLS Module 길이(D)	모세관 직경	모세관 두께	TLS 표면 두께
0.012 m	0.01 m	0.0027 m	0.0008 m	0.0015 m

- 1개의 모세관 tube에 대항하는 모형을 생성하여 Periodic 조건을 적용하여 분석함.
- 터널 모델링 대신 TLS 표면에 Convection 효과를 적용하여 열전달 현상을 모사함.

<표 3-3-92> 물 설치

구분	Polypropylene	Gypsum Plaster	SUS 304
밀도 [Kg/m3]	946	1,680	8,000
비열 [J/kg · K]	1,920	1,085	500
열전도율 [W/m · K]	0.2	0.22	16.2

- 모세관은 Polypropylene 재질로 이루어져 있으며 TLS 충진재는 석고, TLS 표면은 sus304로 이루어짐.

- 표면 열전달 계수

강제대류시 열전달계수 근사: $k = 10.45 - v + 10v^{0.5}$, where v =Tunnel wind speed

- TLS 표면에서의 대류열전달계수는 유속에 따른 강제대류 현상을 고려하여 조건을 선정함.
- 모세관을 통과하는 유체는 물로 설정함.

■ Ansys Workbench Parametric 분석 기법

<표 3-3-93> Parametric 분석용 CFD 분석 Case

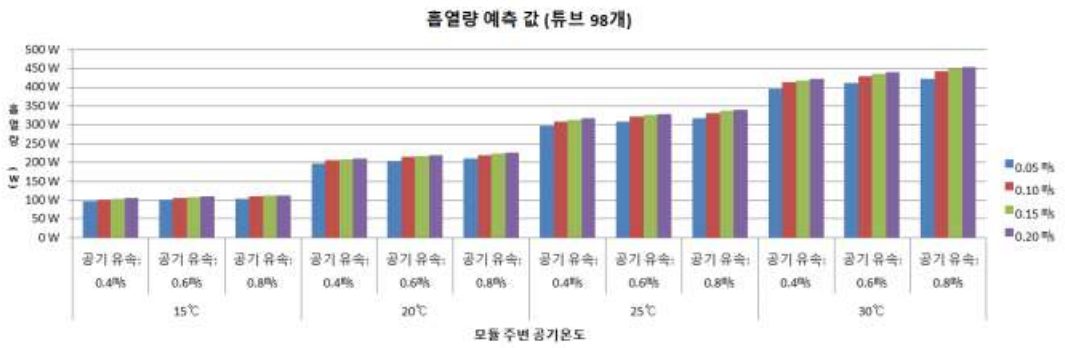
공기 온도	공기 유속	튜브 유속 0.05		튜브 유속 0.1		튜브 유속 0.15		튜브 유속 0.2	
		Case 구분	[W/㎡K]	Case 구분	[W/㎡K]	Case 구분	[W/㎡K]	Case 구분	[W/㎡K]
15℃	0.4㎧	Case_01	16.37	Case_13	16.37	Case_25	16.37	Case_37	16.37
	0.6㎧	Case_02	17.59	Case_14	17.59	Case_26	17.59	Case_38	17.59
	0.8㎧	Case_03	18.59	Case_15	18.59	Case_27	18.59	Case_39	18.59
20℃	0.4㎧	Case_04	16.37	Case_16	16.37	Case_28	16.37	Case_40	16.37
	0.6㎧	Case_05	17.59	Case_17	17.59	Case_29	17.59	Case_41	17.59
	0.8㎧	Case_06	18.59	Case_18	18.59	Case_30	18.59	Case_42	18.59
25℃	0.4㎧	Case_07	16.37	Case_19	16.37	Case_31	16.37	Case_43	16.37
	0.6㎧	Case_08	17.59	Case_20	17.59	Case_32	17.59	Case_44	17.59
	0.8㎧	Case_09	18.59	Case_21	18.59	Case_33	18.59	Case_45	18.59
30℃	0.4㎧	Case_10	16.37	Case_22	16.37	Case_34	16.37	Case_46	16.37
	0.6㎧	Case_11	17.59	Case_23	17.59	Case_35	17.59	Case_47	17.59
	0.8㎧	Case_12	18.59	Case_24	18.59	Case_36	18.59	Case_48	18.59

<표 3-3-94> Workbench Parameter 구성 및 모델링

구분		항목	단위	입력값 (4x3x4=총 48개)
입력	1	• 공기온도	℃	15, 20, 25, 30
	2	• 표면열전달율	W/㎡·℃	16.37, 17,59, 18.59 (3가지 풍속에 따름)
	3	• 냉각수 유량	kg/s	0.000286, 0.000572, 0.000858, 0.001144
출력	1	• 모세관 튜브 흡열량	W	-

- 냉각수 유량 별로 실행 변수를 정렬하여 적은 iteration 횟수에서 안정적인 결과를 얻을 수 있도록 하였음.

㉮ CFD 분석 결과

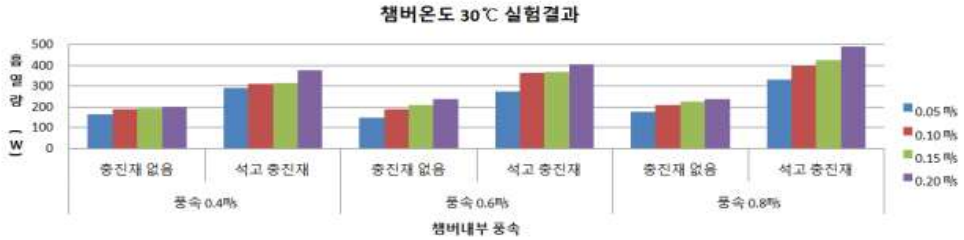
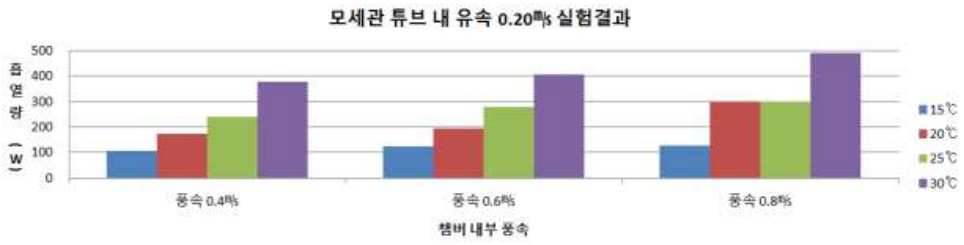


<그림 3-3-17> CFD 분석 결과

(나) 결과 분석 및 결론

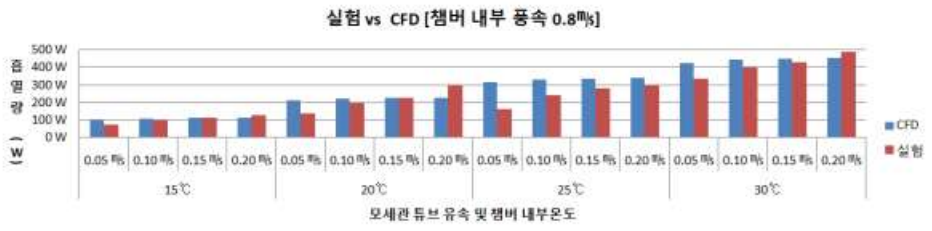
① 실험 설정에 따른 TLS 흡열 모듈 성능의 경향 (측정 평균값 기준)

<표 3-3-95> 험 설정에 따른 TLS 흡열 모듈 성능의 경향

구분	내용
석고 주입 시 효과	
	• 석고 주입 이후 TLS 흡열 모듈의 흡열량이 크게 증가함. • 실험 중 흡열량이 가장 큰 경우에서 석고 충진재는 약 206% 의 성능 향상을 보였음.
TLS 주변 공기 온도의 영향	
	• TLS 흡열 모듈 주변의 공기 온도가 높아질수록 흡열량이 증가하며 풍량에 대해 흡열량이 비례적으로 증가하는 경향을 보였음.
TLS 주변 공기 유속의 영향	
	• TLS 흡열 모듈 주변의 풍속이 높아질수록 흡열량이 증가하나 풍량의 증가에 비해서 그 영향이 크지는 않음.
모세관 튜브 매트 유량 증가 효과	
	• 모세관 튜브 내 유속이 증가할수록 흡열량도 일정하게 증가하나 유량의 증가(2배, 3배, 4배)에 비해서 흡열량의 증가량이 그에 미치지 못함.

② CFD 결과 비교

<표 3-3-96> CFD 결과 비교

구분	내용
TLS 주변 공기 온도의 영향	
	• 풍속 증가에 따른 흡열량의 변화는 실험값과 CFD 결과가 비슷한 형태를 보임. • 25℃ 실험의 0.4㎧ 흡열량 산정 값이 20℃ 실험의 0.8㎧ 값보다 작게 나온 것은 해당 실험의 오차가 비교적 크게 발생한 것으로 볼 수 있음.
TLS 주변 공기 유속의 영향	
	• 챔버 내부 온도 증가에 따른 흡열량의 변화는 실험값과 CFD 결과가 비슷한 형태를 보임. • 풍속 0.8㎧ 실험결과에서 20℃와 25℃ 의 흡열량이 비슷하게 나온 것은 CFD 결과와 비교해 볼 때 실험측정에서의 오차가 발생한 것으로 볼 수 있음.
모세관 튜브 매트 유량 증가 효과	
	• 모세관 튜브 내 유속의 증가에 따른 흡열량의 변화는 실험값과 CFD 결과가 비슷한 형태를 보임. • 그래프의 x축의 왼쪽에서 오른쪽으로 이동 할 때 CFD 결과는 항상 증가하는 양상을 보이나 실험결과의 경우 25℃의 결과가 20℃결과에 비하여 충분히 크지 못한 것으로 볼 때 25℃ 실험에서 대체적으로 오차가 크게 발생하였음.

- 따라서 25℃ 이상의 실험에서는 높아진 흡열량에 의해 실험을 계속할수록 수온과 모듈 표면의 ΔT 가 점점 감소하여 실험측정값의 오차가 증가하는 경향을 보였음.
- 이러한 오차를 보정하기 위하여 25℃에서는 재실험을, 30℃에서는 수온을 유지하면서 실험을 하였으나 25℃의 실험에서는 오차가 비교적 크게 발생하였음.

③ 시험 성적

㉮ TLS 모듈 흡열 성능의 주요변수

- TLS 흡열모듈의 흡열량은 풍량, 유량 등 양적인 변화 보다는 주변 공기온도에 크게 영향을 받음.
- 실제 TLS의 작동 환경에서 풍량과 온도는 외적인 요소이며 모세관 매트에 공급되는 유량은 TLS 시스템 내부에서 에너지를 소모하는 부분임.
- 따라서 TLS의 작동 효율적인 측면에서는 공급 유량을 적절히 하는 것이 중요하며 실험과 CFD 분석 결과 유량의 증가에 따른 흡열량의 변화는 크지 않으므로 유량을 최소화 하면 TLS 순환펌프의 부하를 작게 하여 TLS의 작동 효율을 높일 수 있음.
- 또한 TLS 성능에 가장 크게 영향을 주는 것은 터널 내부 온도였으며 이러한 터널 내 온도는 터널 내 열차의 주행상황 및 환기장치의 작동상황에 영향을 받게 되므로 TLS로 하여금 이러한 외부환경에 대하여 최대한의 성능을 발휘하기 위해서는 TLS 모듈의 설치면적을 증가하는 것이 방법이 됨.
- 풍량 또한 터널 내 열차의 주행에 따른 변수가 되므로 터널 내 풍량의 효과를 활성화 하는 방안이 중요해 지며 이를 위해서는 TLS 설치 면적이 크도록 하여야 하고 TLS의 외부형태가 대류열전달에 유리한 형태가 되어야 함.

㉯ 실제 적용 환경을 고려한 TLS 흡열 모듈의 예상성능

- 하절기 배수펌프실 집수정 내 지하수의 일반적인 수온은 18℃임.
- 하절기 일반적인 터널 온도를 28℃로 가정할 경우 수온과 공기의 온도차는 10℃가 됨.
- 터널 내 온도의 상한선은 외기온도 +4℃ 로 규정하고 있으며 이를 외기온도 30℃에 적용하면 34℃ 가 됨.
- 따라서 하절기 지하수와 TLS 모듈 표면의 온도차는 최대 약 16℃ 가 됨.
- 실험 및 CFD에서 가정한 최대한의 온도차는 20℃ 가량이며 온도차 16℃와 유사한 실험 조건은 챔버 내부 온도 25℃ 가 됨.
- 챔버 내부 온도: 25℃, 유속:0.8㎥/s의 실험조건 및 CFD 결과를 바탕으로 예측해 볼 때, 모세관 튜브 매트의 유량에 따라 모듈 하나당 200~.300W를 흡열하는 것으로 판단됨.
- 승강장의 열차 진입 시 보다 강한 풍속이 발생하고 정지한 열차로 부터 흡열을 하게 될 경우 흡열량은 실험값이나 CFD 예측값 보다 더 큰 값을 가질 것으로 예상됨.

㉰ TLS 모듈의 운영방식

- 유량의 증가에 따른 시스템의 부하를 고려 할 때 모세관 튜브의 유속은 0.1㎥/s 이하가 적절함.

(2) 모델 수립 및 성능분석

(가) 장기분석 모델 (Long Term Simulation)

① 개요

- 장기분석을 위해서는 bedrock(암반 층)의 온도분포를 산출이 필요함.
- 의미 있는 수준의 bedrock 온도분포를 분석하기 위해서는 수년이상의 기간을 대상으로 하는 분석이 필요하나 이는 비정상적인 계산시간을 야기하기 때문에 bedrock의 온도분포에 대하여 time scale을 적용하여 bedrock 온도분포의 향후 추정치를 산출하는 분석기법을 적용 하면 효율적으로 산정할 수 있음.
- 장기분석은 3단계의 절차로 구성되며 기본 값으로 30년 후의 암반온도 분포에 대하여 사용자가 지정하는 동절기 및 하절기의 평일 5일간에 대한 Design day 에 대한 분석결과를 산출함.
- Long Term 분석의 한계점으로, 터널이나 승강장의 위치별로 다른 기후 데이터를 적용 할 수는 없고 전체 분석모델에 단 하나의 기후조건만 적용할 수 있음.

② IDA Tunnel Long-Term 분석 방식

㉮ 개요

<표 3-3-97> IDA Tunnel Long-Term 분석 방식 개요

Simulation 구분			기후 데이터 적용 회수	열차&부하 스케줄	열차 주행 공기압 분석	상당 분석 기간	열차운행 압축률
1차	Main		30개	표준화 (균등분배)	압축 운행	3일	3660:1
2차	Season	Averaged schedule	60개	표준화 (균등분배)	압축 운행	60일	183:1
		Actual schedule	360개	기준일 실제 스케줄	실제 운행	360일	30:1
3차	Design Day		해당 기간 (표준화 없음)	실제 스케줄	실제 운행	해당 기간	1:1

㉯ 기후, 스케쥴 데이터의 표준화

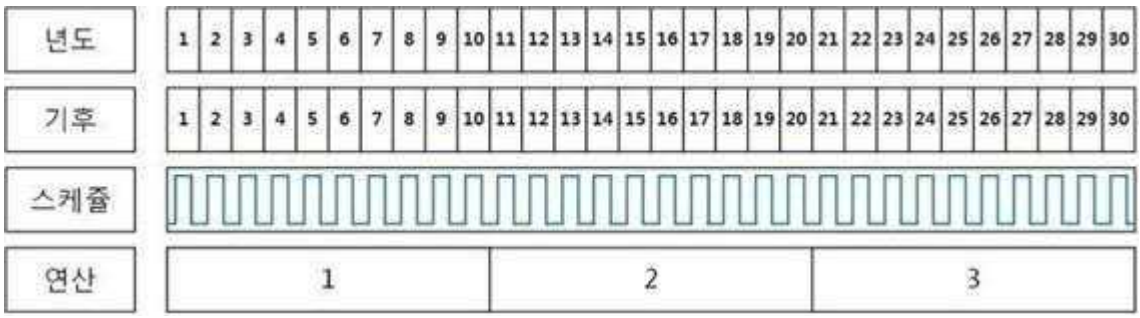
- 장기분석의 단계에 따라 기후데이터는 연도별/계절별/월별의 값으로 표준화 함. (Time rescale 적용 됨)
- 최종 단계인 Design Day 분석의 경우 지정한 기간 내 시간별 날씨 변화가 반영함. (Time rescale 없음)
- 스케쥴 데이터는 열차 출발 시간 및 승객의 승하차, 기타 부하 등이 될 수 있음.
- 스케쥴 데이터가 표준화 될 경우 압축 된 분석 기간 내 균일한 간격으로 배치함. (첨두, 비첨두의 구분 없음)

㉰ 열차 주행 공기압 분석의 압축

- Main long term 및 Averaged schedule 옵션의 경우 수백회 이상의 운행을 하나로 압축함.
- 연간 열차 운행 횟수가 많을수록 압축에 따른 오차가 적어지며 트랙 당 연간 800회 이상의 열차 통과를 갖는 터널을 대상으로 장기 분석 시뮬레이션을 수행하는 것을 권장함. (최소 700 회 이상이 되어야 실행가능)

③ 세부 Simulation 별 실행 방식

㉮ 1단계 - Main long term simulation

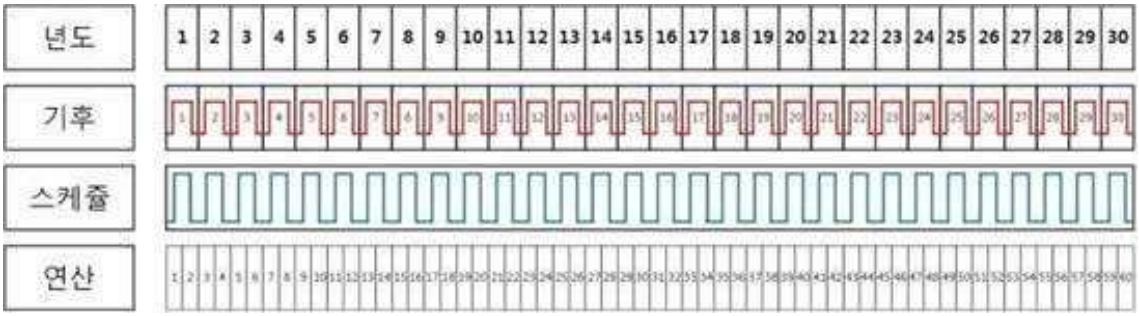


<그림 3-3-18> 1단계 - Main long term simulation

- 1 년간의 기후를 평준화: 각 해마다 단 1개의 날씨 데이터만 적용함.
- 열차 스케쥴: 열차 출발 시간은 표준화 되어 24시간 내내 일정한 간격을 갖도록 함.
- 기타 스케쥴: 탑승객 밀도, 열부하 등이 1년 내내 동일한 간격을 가지는 표준 값으로 적용됨.
- Time rescale factor의 기본 값은 3,660으로 30년간의 열차운행을 72시간(3일) 동안의 열차운행으로 압축함.
- 연간 열차 통과 횟수가 루트 당 700 회 이상인 경우에 적용가능.
- 1차적으로 일반 계산모델의 3일에 상당하는 계산 시간으로 30년 후의 bedrock 온도 분포를 대략적으로 산출.

㉯ 2단계 - Season simulation

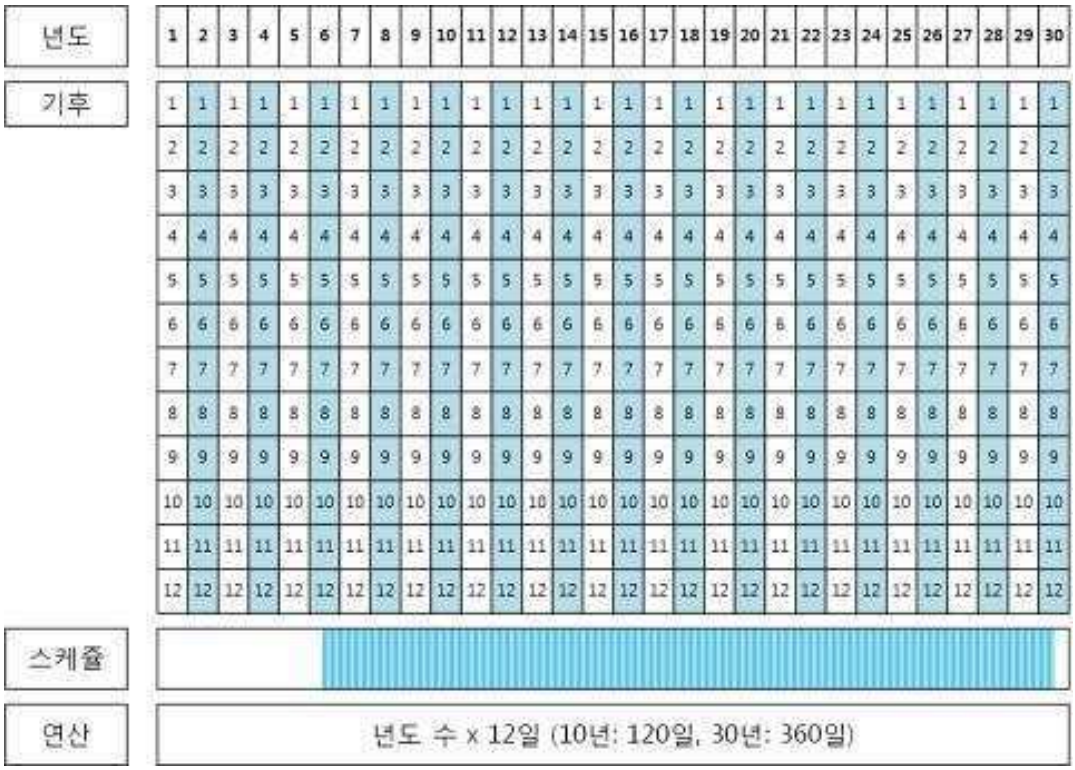
■ 옵션 1: Averaged Schedules (기본값)



<그림 3-3-19> 2단계 - Season simulation (옵션1)

- 열차 운행은 long term 분석과 같은 수준의 평준화를 적용하고 날씨에 대한 time scale을 다소 수정.
- 하절기와 동절기로 구분된(1년에 2절기) 기후조건을 적용하여 장기 분석을 수행
- 따라서 1년간의 분석을 2일 정도의 운행으로 가정하여 계산하며 30년을 60일 간의 분석으로 압축.
- 열차운행 및 기후조건 30년을 3일간의 변화로 압축한 1차 분석에서 60일 정도로 세분화한 bedrock 온도분포를 산출.
- Actual Schedule 보다는 계산 시간이 짧아 Season 분석의 기본값으로 설정함.

■ 옵션 2: Actual Schedules



<그림 3-3-20> 2단계 - Season simulation (옵션2)

- 각 연도의 월별 대표 일(Mean day of Jan, Feb…….)에 대한 분석결과를 도출.
- 해당 연도의 각 월의 Mean day에 대하여 실제 열차 운행 시간표가 적용된 공기압 분석을 수행.
- 열차운행 30년을 360일로 가정한 bedrock 온도분포를 산출.
- 기본값이 Averaged schedule인 경우 사용자가 선택하여야 함.

㉰ 3단계 - Design day simulation (설계 데이터 획득)

- 전 단계에서 수행한 main 및 season 시뮬레이션 데이터를 바탕으로 특정 기간 동안의 Full scale 분석

- 여기서 특정기간은 수십 년이 지난 시점에서의 하절기와 동절기의 Design Day가 되며 기본 설정은 운행 30년 후의 분석 대상의 계절에 대한 5일간(월~금)의 상세 결과 값이 됨

(나) 모델링

① 열차 제원

㉮ 7호선 주요 열차 제원 (SR005 차량)

■ 편성정보 (8량)

<표 3-3-98> SR005 차량 편성정보

SR005	1	2	3	4	5	6	7	8	합계
종류	TC	M1	M2	T1	T2	M1	M2	TC	-
중량(kg)	32,000	35,000	35,000	26,000	26,000	35,000	35,000	32,000	256,000
길이(m)	19.57	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.57	156.14

■ 주요 제원

- 편성정원: 1256명
- 혼잡율: 164%
- 전폭: 3.12m
- 전고: 4.0m (공조장치 포함)
- 전동기 출력: 210kW
- 편성출력: 3,360kW
- 기동가속도: 3.0km/h/s
- 영업최고속도: 80 km/h
- 설계최고속도: 100 km/h
- 상용 감속도: 최대 3.5 km/h/s
- 비상 감속도: 4.5 km/h/s

㉯ 일반 제원

- 신형 열차인 SR005의 경우 인버터 일체화로 편성 당 20t 이상 감량
- 실제 중량 20t 이상 증가를 감안할 필요가 있음
- VVVF 인버터 구동방식의 일반적 효율: 90%, 역율:90% = 0.9 x 0.9 전력효율: 80% 가정
- 차량당 냉방용량: 42,000 kcal/h = 48.846 kW
- 압축기 정격출력: 20 혹은 21 kW 으로 COP 2.3 가정
- 회생제동으로 인한 열차 제동발열 감소율은 0.3

㉰ 열차 입력 제원

<표 3-3-99> 열차 입력 제원

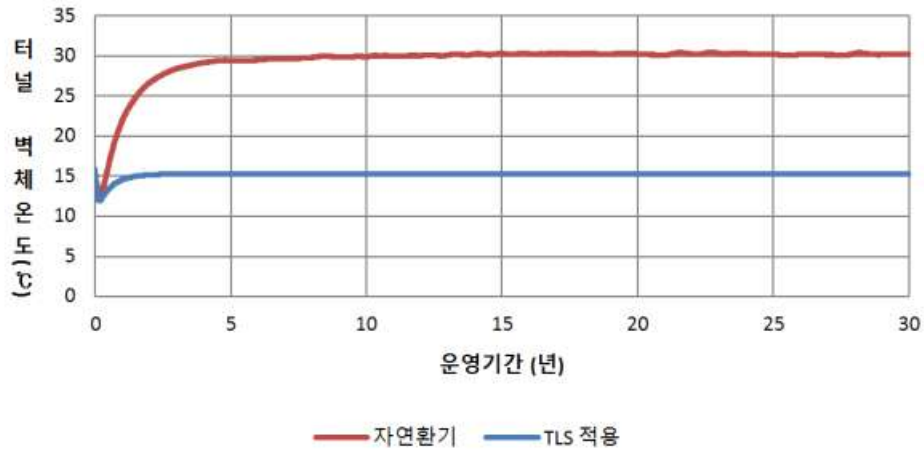
구분	설명	단위	값
motion	Train total mass	kg	280,000
	Max acceleration at zero slope	m/s^2	0.83333
	Max retardation at zero slope	m/s^2	0.97222
	Max useful power	W	1.0E9
	Kinetic energy coeff = Actual KE/Mass×vel^2/2		1.09
drag	Train front Area		12.48
	Front of train drag coefficient		0.5
	Drag coefficient weighted total truck area		0.0
	Skin friction coefficient related to viscous drag only		0.012
	Vehicle perimeter	m	14.24
	Train Length	m	156.14
brake temperature	Convective heat transfer coefficient of brake to air	$W/(m^2 \cdot K)$	20
	Convective heat transfer coefficient of brake to air per train speed	$W \cdot s/(m^3 \cdot K)$	0
	Brake emissivity		0.9
	Heat capacity of brake unit	kJ/K	200
	Heat transfer surface area of brake unit	m^2	16.5
Train Temperature	Heat capacity of train body	kJ/K	200,000
	Heat transfer surface area of train body	m^2	2,223.4
Rolling Resistance	Coefficient A in RollF = (A+B×x_dot)×Mass	m/s^2	0.011
	Coefficient A in RollF = (A+B×x_dot)×Mass	1/s	2.5E-4
Regeneration	Regenerative braking power/Actual ditto		0.3
Losses	Traction system efficiency, power supply to propulsion power		0.8
	Regeneration efficiency, braking power to power supply		0.8
	Time constant regeneration and motor loss equation		0.5
HVAC	Heat emitted by on-board services (heating, lighting, etc)	kW	0
	Compartment heating setpoint	℃	20
	Compartment cooling setpoint	℃	26
	U-value indoor to ambient air	$W/(m^3 \cdot K)$	1
	AC unit coefficient of performance		2.3
	Ventilaton air flow per passenger	L/s	8.0

② TLS 효과 분석

㉮ 계산 결과 데이터 비교

ㄱ. 터널 열 축적 (30년, 하절기 기준: 7월 15일)

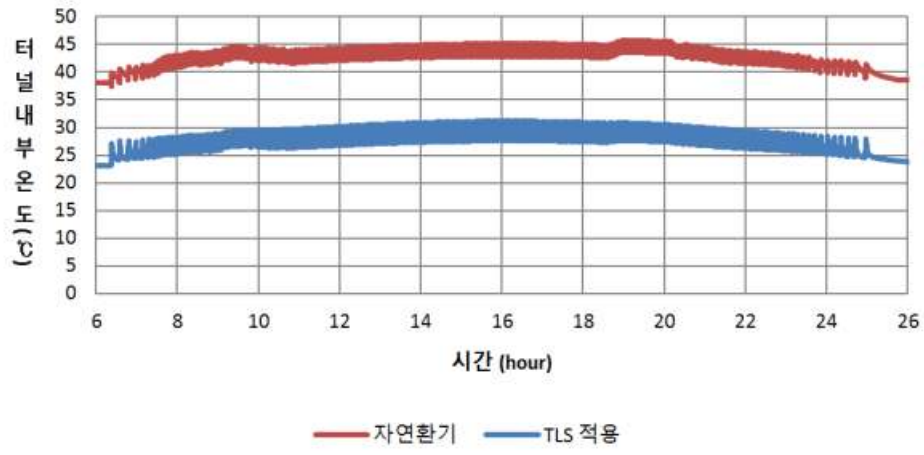
<표 3-3-100> 터널 벽체 온도 비교 (연간 대표 값)



- 동일한 터널 구조를 갖지만 별도의 강제환기 없이 지상 환기구 및 터널 내 열차의 이동으로 인한 자연환기만 실시하는 경우 터널 벽체의 온도는 5년이 지난 시점에서 대표 값이 30도 까지 상승 후 지속적으로 유지됨.
- TLS 가 적용된 경우 터널 벽체의 온도는 15도에서 크게 변화하지 않은 채 30년 동안 지속적으로 유지됨.

ㄴ. 지하 승강장 선로부 온도

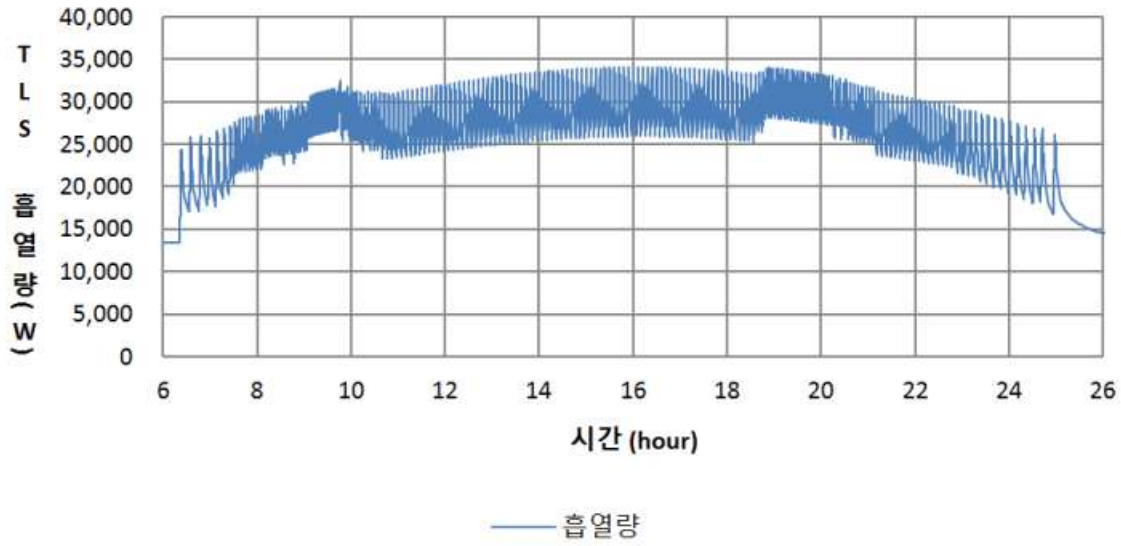
<표 3-3-101> 승강장 선로부 온도비교 (운영 30년 후, 7월 중순)



- 자연환기 실시의 경우 열축적에 따른 30년 후의 하절기 터널 온도는 45도로, 강제 환기 없이는 터널 환경을 유지 할 수 없음이 나타남.
- TLS 적용 시 최대 32도 이하로 터널온도 유지가 가능하여 강제환기 없이도 외기온도 +4℃의 터널 환경기준을 만족.

ㄷ. 승강장 설치 TLS 출력

<표 3-3-102> TLS 흡열량 (하절기 최대 흡열환경)



- TLS의 적용으로 인해 터널 벽체 온도가 15℃로 일정하게 유지되는 상황에서 25~35kW의 흡열량 발생.
- 이미 열축적이 진행된 터널에서는 더 큰 흡열량이 예상됨.
- 25~35kW의 TLS 용량으로 1개 승강장의 선로부하를 충분히 흡수 가능함.

㉯ 결론

- 최대 35kW 의 TLS용량으로 1개 승강장의 선로부하 흡열가능.
- 35kW 흡열량의 TLS 적용 시 자연환기만으로 승강장 열부하 처리 가능.
- TLS 적용시 하절기 터널 온도 유지를 위한 환기운전 필요 없음.
- TLS 적용시 승강장 급배기 실시 필요 없음.
- TLS 적용시 선로 온도가 낮아져 PSD를 통한 전열 및 침입열 부하 저감 예상.
- 테스트베드 현장구축용 TLS의 설계 흡열량 및 32kW 및 장비 흡열량 58kW (50,000 kcal/h)는 본 분석 결과 적절한 것으로 판단됨.

5. 현장구축 계획

가. 현장구축 사이트 조사 및 실증방안

(1) 수락산역 실사

<표 3-3-103> 수락산역 실사

구분	촬영자료	현장구축환경
수락산역 선로 진입		• 열차운행종료 이후 심야 시간 선로 진입 실시. • 수락산역의 경우 배수펌프실의 출입이 선로를 통해야 함으로 선로 진입을 실시하였음. • 배수펌프실을 출입하는데 선로를 반드시 진입하는 것은 향후 현장 구축에 있어 상당한 애로사항이 될 것으로 예상되었음. • 수락산의 경우 복선 터널이 아닌 3개의 단선 터널이 있는 구조로 그 중 한 선로는 거의 열차가 다니지 않았음. • 수락산역의 경우 선로에서의 부하가 분산되어 TLS 흡열량 측면에서는 부적절.
배수펌프실 진입		• 선로 진입을 통해 배수펌프실에 진입함. • 수락산역 배수펌프실의 경우 수위가 매우 낮았고 수질이 좋지 못하였음. • 배수펌프실 내에 장비를 설치할 공간은 충분하였으나 출입구가 장비를 진입하기에 어려움이 있었음.
반대편 선로 확인		• 기존 계획되어 있던 수락산역의 선로는 표면이 고르지 못하여 TLS 모듈설치에 난항이 예상됨. • 해당 선로 반대편의 경우 상태가 양호하였으며 수락산역 현장 설치대상의 선로 위치를 수정하였음. • 수락산역의 경우 배관의 선로 횡단이 필요없이 배관의 설치가 용이하였음.

(2) 노원역, 마들역 실사

<표 3-3-104> 마들역 집수정 현장사진 : 개·보수 미실시(금년 실시예정)

<table>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>집수정 외부 장비 반출구</td><td>장비 반출구 및 지하수 유입구</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>집수정내 장비 반출구</td><td>집수정내 수중펌프</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>집수정 내부</td><td>집수정 내부</td></tr>
</table>

○ 노원역 집수정 현장사진 : 개·보수 완료

<표 3-3-105> 노원역 집수정 현장 사진

<table>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>집수정 외부 장비 반출구</td><td>집수정내 장비 반출구</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>집수정내 배전반</td><td>집수정 내부</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>집수정 내부 수중펌프 배관</td><td>집수정 내부 수중펌프 배관</td></tr>
</table>

<표 3-3-106> 마들 승강장 하부 현장사진 : 흡열모듈 설치위치

	
마들 승강장 하부	마들 승강장 하부(말단부)
	
마들 승강장 하부	마들 승강장 하부

<표 3-3-107> 노원 승강장 하부 현장사진 : 흡열모듈 설치위치

	
노원 승강장 하부	노원 승강장 하부(말단부)
	
노원 승강장 하부	노원 승강장 하부

(가) 노원, 마들역 현장방문 내용

① 공통사항

- 사전 조사 결과, 7호선 역사 중에서 배수펌프 전력 사용량이 많은 곳으로 노원역과 마들역이 확인됨.
- 마들역의 경우 45kW 의 배수펌프 3기가 설치되어 있었으며 배수펌프 전력 사용량이 가장 많은 곳으로 이 역의 배수펌프실의 지하집수정에서 배출되는 지하수량이 가장 풍부한 것으로 나타남.
- 마들 및 노원역의 지하집수정 내 지하수온은 현장 방문 당시인 4월초에 15℃로 측정됨.
- 동행한 서울도시철도 공사의 담당 직원에 따르면 하절기 수온은 18℃로 측정된다고 하였음.

② 마들역

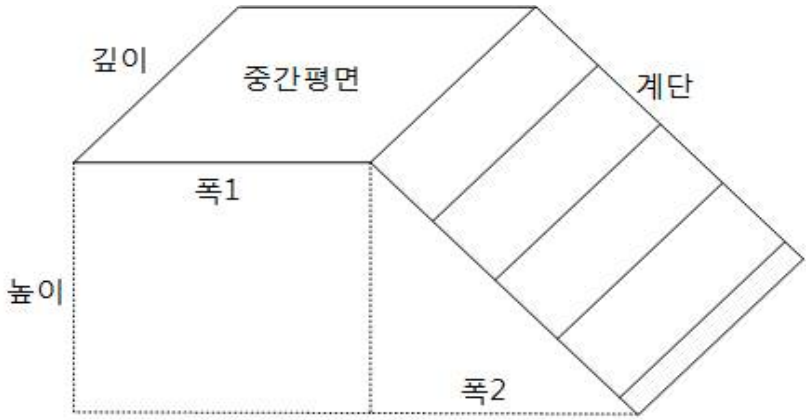
- 마들역의 배수펌프실은 환기실과 계단을 통해 연결되어 있음.
- 환기실의 경우 여유 공간이 매우 넓었으며 배수펌프실로의 계단은 개방형으로 되어 있어 배수펌프실의 장비 반입이 용이한 구조였음.
- 마들역의 경우 개보수 진행 중으로 아직 구형 설비의 교체가 진행 중에 있었음.
- 마들역 지하집수정의 수위는 매우 높게 유지되고 있었으며 배수펌프의 작동빈도 또한 짧은 편이었음.
- 마들역 지하집수정 내 지하수 상황은 TLS의 냉각수로 활용하기에 적합하였음.
- TOS 게이트웨이가 마들역에 있어 TLS 장비 설치 시 TOS 서버 연결이 용이함.

③ 노원역

- 마들역의 배수펌프실은 별도 통로를 통해 연결되어 있으나 선로 진입은 불필요.
- 장비 반입 공간이 마들역에 비해 좁은 편임.
- 개보수 완료된 형태로 추가 장비를 반입하기에 현장 상태가 깨끗하였음.
- 선로와 통하는 장비반입구에서 들어오는 배관이 설치되어 있었음.
- 해당 배관의 경우 출입구의 한쪽 모서리를 절단하여 들어오게 한 것으로 TLS의 배관 연결 사 유사한 방식을 고려해볼 수 있음.
- 노원역의 경우 지하역사 출입구와 관리실 등이 있는 지하2층의 거리가 먼 편으로 TLS 장비 반입시 이에 대한 고려가 필요함.

(나) 노원, 마들역 실측 내용

① 측정개요



<그림 3-3-21> 측정개요

- TLS 순환장치의 설치공간으로 각 역사의 출입계단 아래의 공간이 적절할 것으로 판단됨.
- TLS 순환장치의 설치예상 장소의 공간을 레이저 측정기로 측정하였음.

② 마들역

<표 3-3-108> 마들역 실측 내용

구분	크기		
중간평면	폭1	깊이	높이
	1.232 m	1.289 m	2.050 m
계단	폭2	깊이	높이
	3.841 m	1.232 m	2.050 m
선로 문	폭	높이	
	1.014 m	2 m	

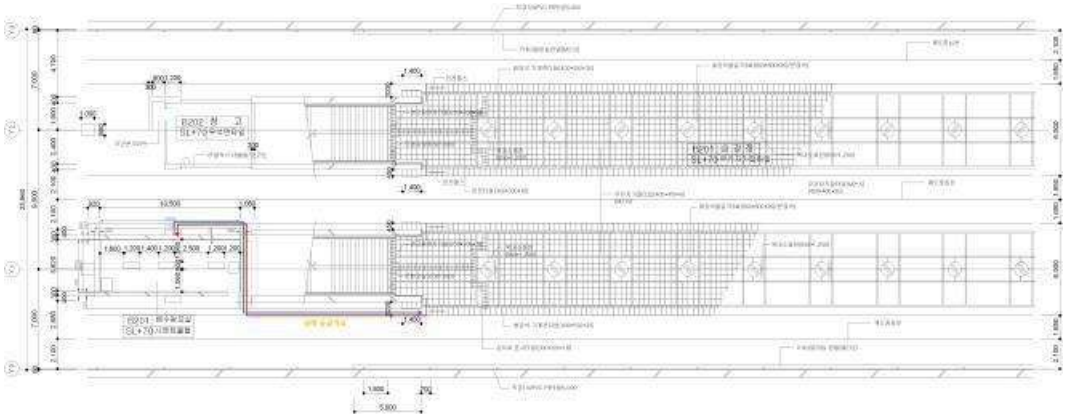
③ 노원역

<표 3-3-109> 노원역 실측 내용

구분	크기		
중간평면	폭1	깊이	높이
	1.364 m	1.364 m	1.936 m
계단	폭2	깊이	높이
	4.05 m	1.364 m	1.936 m
선반 아래 공간	폭	깊이	높이
	1.781 m	1.348 m	2.183 m

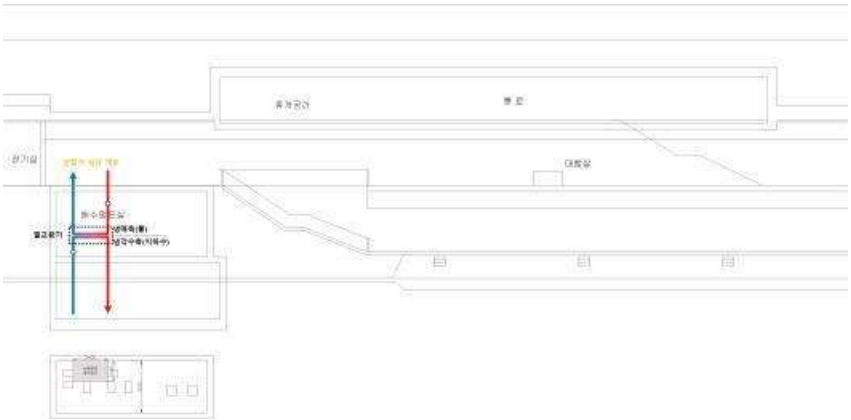
(3) 실사 반영 TLS 구축계획

(가) 선로 배관 배치 계획



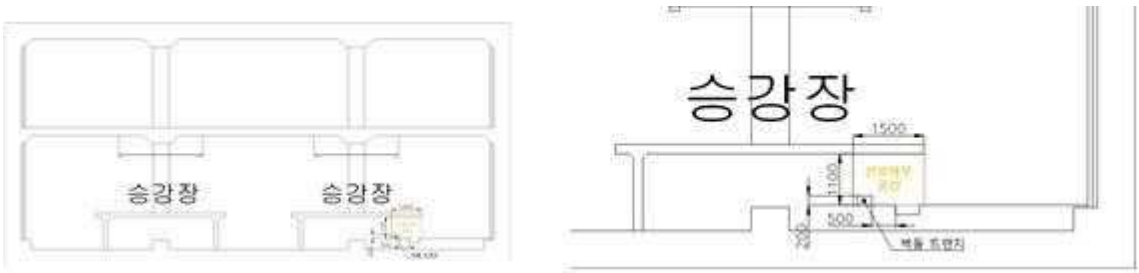
<그림 3-3-22> 선로 배관 배치 계획

(나) 배수펌프실 설치안



<그림 3-3-23> 배수펌프실 설치안

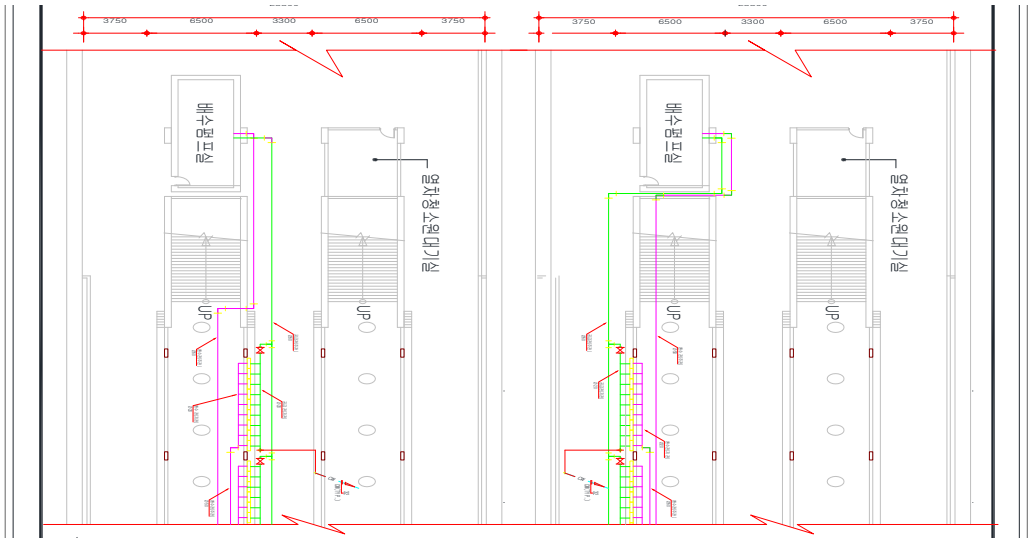
(다) 승강장 선로부 TLS 모듈 설치안



<그림 3-3-24> 승강장 선로부 TLS 모듈 설치안

(4) TLS 시스템 설계

(가) 배관계획 및 도면



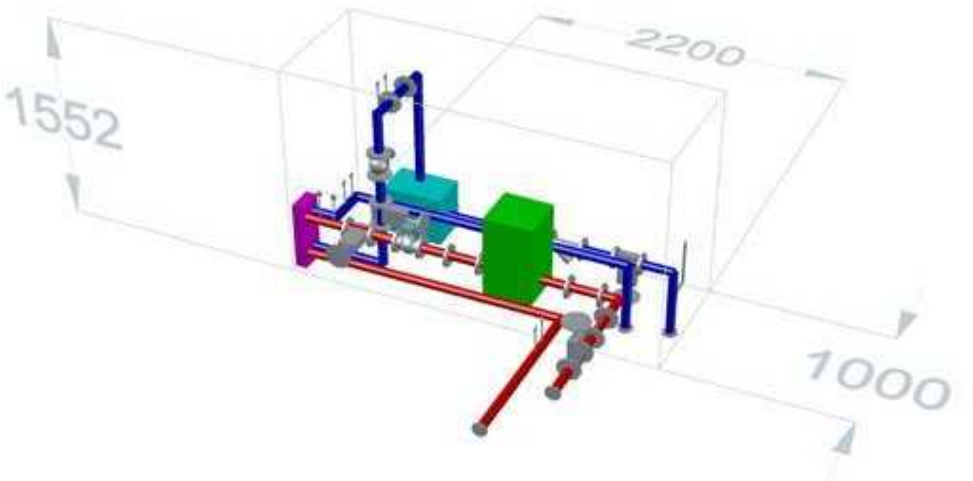
<그림 3-3-25> 배관도면

■ 요소별 배관 길이

<표 3-3-110> 요소별 배관 길이

구분	내경	길이	관 마찰	비고
모세관 튜브	2.35㎜	2.5m	(층류)	U 타입 모세관의 길이
콜렉터 튜브	16㎜	1m	(층류)	모세관 매트 콜렉터 튜브 상하 길이 합계
연결호스	6㎜	2.4m	0.00160㎜	1.2m 연결호스 2개 길이 합계
지관	16㎜	20m	0.00150㎜	지관 통과 거리 20m 반영
주관	50㎜	570m	0.00231㎜	리버스 리턴 방식

(나) 순환장치 개념설계



<그림 3-3-26> 순환장치 개념 설계

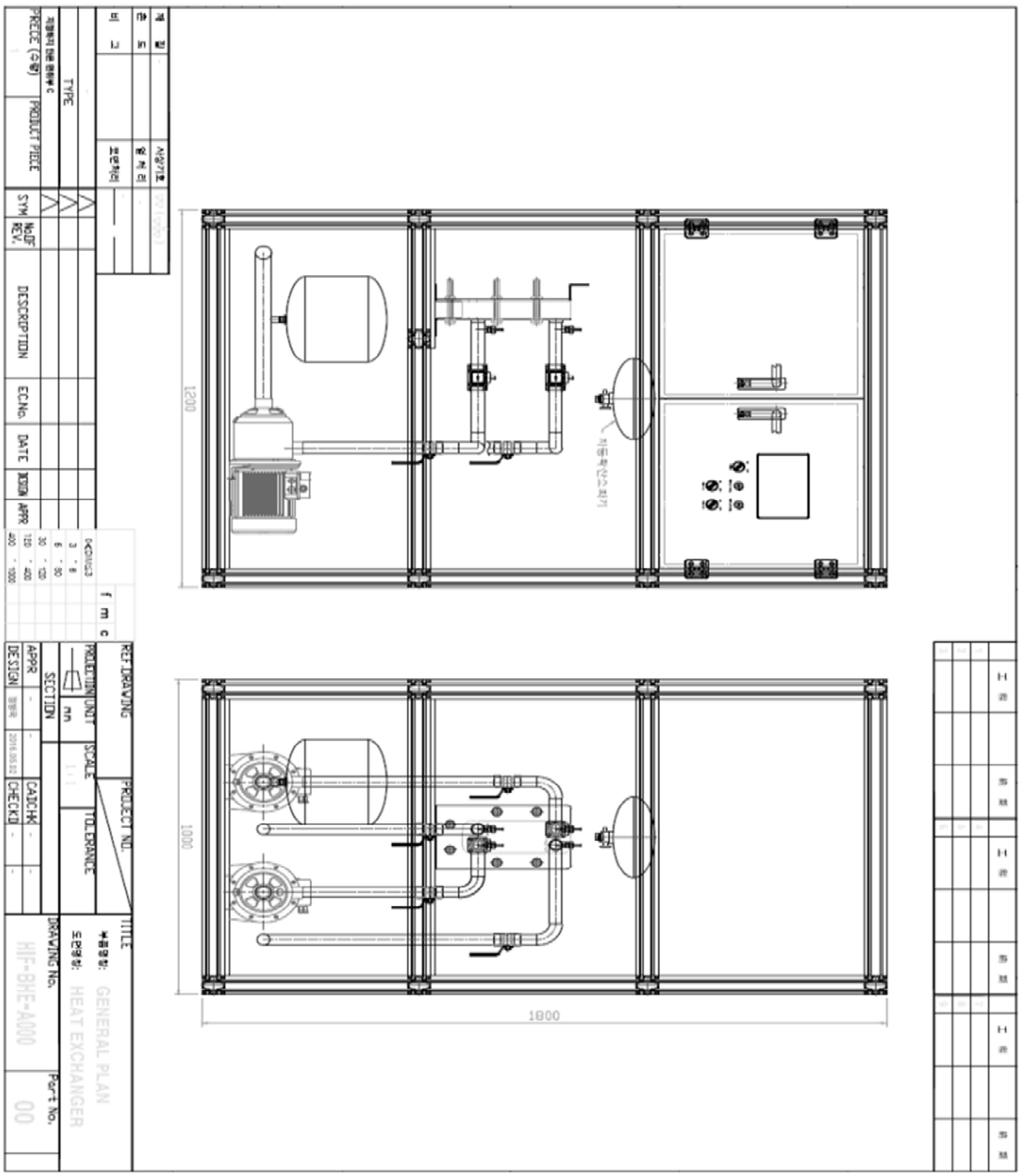
(다) 순환장치 제작

① 순환장치 제작 사양

<표 3-3-111> 순환장치 제작 사양

항목	수량	형식
유량계	2	set
열교환기 • Capacity: 50,000 kcal/h • Material: STS3004 • Type: 판형, Support zig 포함 • Size: 285 x 105 x 54mm	1	set
온도센서 • Type: K-Type	2	set
팽창탱크 • Capacity: 12Liters, Max: 99℃	1	set
압력센서	4	set
펌프 • 횡형 다단펌프 (냉수 순환) • 자흡식 펌프 (지하수 흡입	1 1	set
스텐 볼밸브	1	set
확산형 소화기 • 3kg	1	set
Control Panel • PLC • Semi Auto Control • Pump: Invert Control • 온도, 유량, 압력 원격모니터링용 통신라인 • 스케쥴 제어, 외부 원격 on/off 명령 및 감시	1	set
Support Frame & 배관 및 조립 부속품	1	식

② 순환장지 제작도면



<그림 3-3-27> 순환장치 제작도면

나. **현장구축용 시스템 설계 및 시제품 제작**

■ TLS 패널 및 지지대 설계 개요

<표 3-3-112> TLS 패널 및 지지대 설계 개요

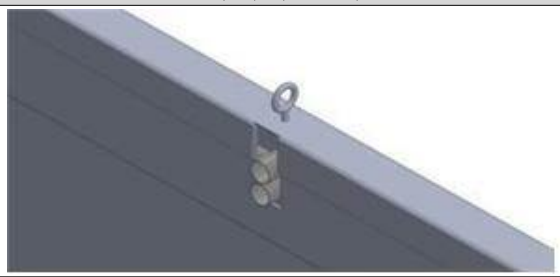
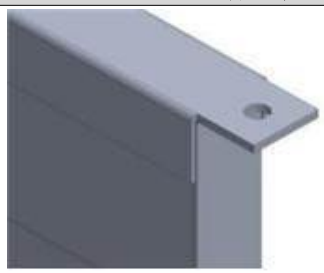
구분	TLS 패널 설계	TLS 받침대 설계	필요 수정 사항
ㄱ형강 및 날개 적용	- 1m X 1m 크기 - 20mm 두께 - 2T 판재 사용 - 와이어 체결용 고리 장착. - 지지대 체결을 위해 날개 제작.	- 65mm X 65mm 8T ㄱ형강 사용 - 앙카볼트로 바닥에 고정 - 날개에 볼트로 체결	- 외부로 노출된 지지대 수정 필요. - 단방향으로 고정되어 안정성 미흡.
고정 브라켓 제작	- 이전과 동일한 제원. - 지지대 방식 변경으로 날개 제거.	- 5T 두께의 삼각형 브라켓 설계 - TLS 패널 옆면에 용접으로 부착	- 브라켓 용접 면적이 좁아 불안정함. - 브라켓이 공기 흐름을 방해함.
ㄱ형강 고정 브라켓	- 이전과 동일한 제원.	- ㄱ형강을 이용하여 삼각형 브라켓 제작 - TLS 패널 전후방에 용접으로 부착	- TLS 패널 전방에서 지지대가 노출되어 외관상 좋지 못함.
가로 보강 지지대 추가	- 와이어 고리 대신 양옆에 손잡이 겸용으로 핸들을 부착함.	- 이전의 ㄱ형강 지지대에 가로 방향으로 지지대 추가 - 날개에 장착하는 방식에서 후면 용접으로 변경	- 가로 방향으로 추가된 지지대의 강한 고정이 어려움. - ㄱ형강 용접은 TLS 패널과 분리가 되지 않아 운반이 어려움.
TLS 패널 내 구멍 가공	- 동일한 제원의 패널에 지지대 고정용 구멍 가공. - 내부에 소켓을 삽입하여 체결용 구멍 확보.	- 동일한 제원의 ㄱ형강 지지대에 볼트 체결용 구멍 가공	- TLS 패널 내 구멍 제작이 어려워져 작업성이 떨어짐.
후면 날개 적용	- 1.5T 두께 판재로 변경. - 상단 캡 체결 방식 매미고리로 변경. - 기존의 날개를 TLS 패널에 수직한 방향으로 용접으로 부착함.	- 65mm X 65mm 8T ㄱ형강에 각봉을 용접함 - 볼트로 날개에 지지대 체결	- TLS 패널 및 지지대 최종 형상으로 결정.

(1) TLS 패널 설계 및 제작

(가) ㄱ형강 및 날개를 이용한 TLS 패널 설치

① TLS 패널 설계

<표 3-3-113> TLS 패널 설계(ㄱ형강 및 날개)

분해도	조립도
	
와이어 고리	캡 체결부
	

- 1m X 1m 크기에 두께 20mm인 TLS 패널을 설계함.
- 2T 두께의 판재를 사용하여 전면 및 후면은 절곡을 통해 제작하고 옆면을 용접하는 방식.
- 석고 주입이 완료된 후 상부에 캡을 씌워 마감하는 방식.
- 캡에는 와이어를 고정할 수 있는 고리를 부착하였으며, 옆면과 캡을 볼트로 체결할 수 있도록 날개제작.
- TLS 패널을 지중에 고정하기 위한 받침대를 체결하기 위하여 뒷면에 날개를 제작함.

② TLS 패널 받침대 설계

<표 3-3-114> TLS 패널 받침대 설계(ㄱ형강 및 날개)

받침대	전체 설계
	

- 65mm X 65mm 크기의 8T 두께를 갖는 ㄱ형강을 이용하여 받침대를 설계함.
- TLS 패널의 날개에 볼트로 체결되며 바닥은 앙카볼트를 사용하여 고정됨.
- 두 개의 ㄱ형강 사이에 대각 방향으로 용접을 이용하여 지지대를 덧댐.

③ 개선사항

- 받침대가 TLS 패널 외부에 장착되어 심미적으로 외관상 좋지 못함.
- 단방향으로 고정되어 안정성이 떨어질 수 있음.

(나) 고정 브라켓을 이용한 TLS 패널 설치

① TLS 패널 설계

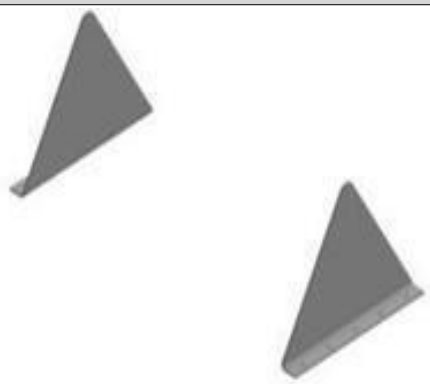
<표 3-3-115> TLS 패널 설계(고정 브라켓)

분해도	조립도
	

- 이전과 동일한 제원의 TLS 패널 사용.
- 양 옆에 브라켓을 장착할 수 있도록 기존에 있던 날개를 제거함.

② TLS 패널 받침대 설계

<표 3-3-116> TLS 패널 받침대 설계(고정 브라켓)

받침대	전체 설계
	

- 5T 두께의 삼각형 형상의 고정 브라켓을 설계함.
- TLS 패널의 옆면에 브라켓을 용접으로 부착함.
- 받침대가 단면이 아닌 양면으로 형성되므로 안정성이 향상될 것으로 기대됨.

③ 개선사항

- 매우 얇은 TLS 패널의 옆면에 장착되므로, 접합 부위가 넓지 않아 불안정함.
- 브라켓의 면이 TLS 패널 표면의 공기 흐름을 방해하여 성능이 저하될 가능성이 있음.

(다) ㄱ형강으로 구성된 고정 브라켓

① TLS 패널 설계

- 이전과 동일한 제원의 TLS 패널 사용.

② TLS 패널 받침대 설계

<표 3-3-117> TLS 패널 받침대 설계(ㄱ형강으로 구성된 고정 브라켓)

받침대	전체 설계
	

- 이전 브라켓과 동일한 크기의 지지대를 ㄱ형강을 사용하여 설계함.
- 중심이 비어있는 형태의 지지대를 사용하여 공기의 흐름을 방해하지 않음.
- TLS 패널의 전후방에 용접을 통하여 장착되어 이전 브라켓에 비해 접합 면적이 넓어 안정적임.

③ 개선사항

- TLS 패널의 전후방에 부착되어 정면에서 바라볼 때 지지대가 보이므로 외관상 좋지 못함.

(라) 보강대가 적용된 TLS 패널 설치

① TLS 패널 설계

<표 3-3-118> TLS 패널 설계(보강대)

조립도	핸들 (와이어 고정)
	

- 기존의 와이어 고리를 제거하고, 손잡이 겸용으로 사용할 수 있도록 양 옆에 핸들을 부착함.
- 기존 1개의 고리에서 양옆의 손잡이로 변경하여 와이어 체결 시 더욱 안정감이 있음.

② TLS 패널 받침대 설계

<표 3-3-119> TLS 패널 받침대 설계(보강대)

받침대	전체 설계
	

- ㄱ형강 받침대와 유사한 형상으로 설계하되, 가로 방향으로 지지대를 추가함.
- 이전에 날개를 통해 장착하는 방식에서 후면에 용접을 통해 장착하는 방식으로 변경함.

③ 개선사항

- 가로 방향으로 추가된 지지대를 TLS 패널에 강하게 고정될 수 있는 방법이 없음.
- 후면에 ㄱ형강을 전체적으로 용접하는 방법은 비효율적이며, TLS 패널과 분리가 되지 않으므로 운반 및 제작 과정에서 비효율적임.

(마) TLS 패널 모델 수정 및 후면 날개 장착

① TLS 패널 설계

<표 3-3-120> TLS 패널 설계

분해도	조립도
	
캡 체결부	후면 날개
	

- 기존의 볼트를 이용한 캡 체결 방식을 매미 고리로 대체함.
- 지지대를 용접하는 대신 볼트 체결하기 위해 날개를 장착하되, 전면에서 보이지 않도록 수직한 방향으로 날개를 용접하여 장착함.

② TLS 패널 받침대 설계

<표 3-3-121> TLS 패널 받침대 설계

받침대	전체 설계
	

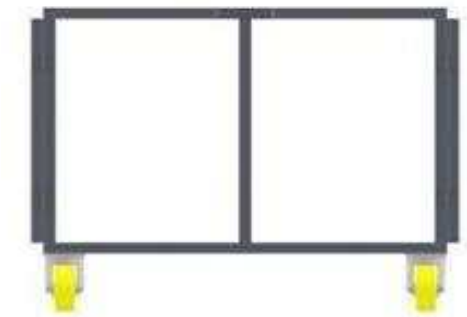
- 65mm X 65mm 8T ㄱ형강에 각봉을 용접하여 받침대 제작.
- 볼트를 이용하여 날개에 장착하여 TLS 패널을 지지함.
- 후면에 장착되어 전면에서 보이지 않음.
- 위의 TLS 패널과 받침대를 최종 형상으로 선정하여 제작함.

(2) TLS 패널 제작 및 보관 랙 설계

(가) 3030 프로파일 랙 제작

① 보관 랙 설계

<표 3-3-122> 보관 랙 설계 (3030 프로파일 랙)

조립도	TLS 보관 상태
	
	
	

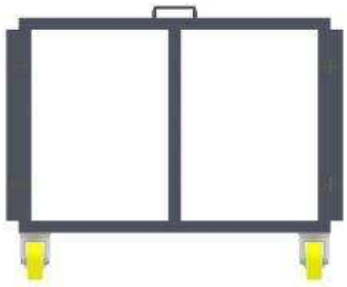
- 3030 프로파일을 사용하여 가로 약 1.3m, 세로 약 1m 크기의 보관 랙 설계.
- 8개의 TLS 패널 운반 가능.
- 조립된 프로파일의 양면에 경첩을 달아 열고 닫을 수 있는 형태로 제작하여 TLS 패널을 옆에서 밀어 넣는 방식으로 사용.

② 개선 사항

- 3030 프로파일은 8개의 TLS 패널 하중을 견디기에 부족함.
- 프로파일은 기존 3030 크기에서 4040으로 더 큰 프로파일 사용.
- 가로 길이 약 1.3m로, 역사 내 운반할 때 사용하는 엘리베이터의 크기를 초과하여 적재 가능한 TLS 패널 개수를 감소시킴.

(나) 4040 프로파일 랙 제작

<표 3-3-123> 보관 랙 설계 (4040 프로파일 랙)

조립도	TLS 보관 상태
	
	
	

- 가로 길이를 약 740mm 까지 감소시켜 지하철 역사 엘리베이터의 입구 최소 크기인 800mm 이하로 제작함.
- 기존의 3030 프로파일을 4040으로 교체하여 내하중성을 증가시킴.
- 총 5개의 TLS 패널 운반 가능.
- TLS 보관 랙 최종 형태로 결정하여 제작함.

다. **현장구축 대체 실증방안 검토**

(1) 현장구축 및 시스템 현장 실증방안 검토

(가) 현장구축 및 시스템 현장 실증 대상지 검토

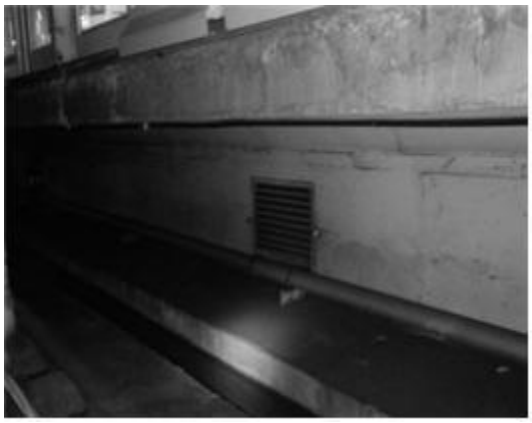
- TLS 흡열장치의 현장구축을 위해 실증대상지에 대한 검토를 수행함. 테스트베드 역사로 선정되고 있는 수락산역사는 공동연구기관에서 실증역사로 선정되어 테스트베드가 진행중인 역사로 우선순위로 검토 하였으며 기타 인접한 마들역사와 노원역사 또한 실증대상지 후보역사로 현장 실사를 진행함.

① 수락산역 실사

- 열차운행종료 이후 심야 시간 선로 진입을 통해서 서울교통공사, 한국철도기술연구원, ㈜비엔텍아이엔씨에서 공동으로 수락산역사의 실사를 진행함. 수락산역의 경우 배수펌프실의 출입이 선로를 통해야 했으며 배수펌프실을 출입하는데 선로를 반드시 진입하는 것은 향후 현장 구축에 있어 상당한 애로사항이 될 것으로 예상됨. 또한 수락산의 경우 복선 터널이 아닌 3개의 단선 터널이 있는 구조이며 그 중 한 선로는 거의 열차 운행이 없는 선로로 선로부의 부하가 분산되어 TLS 흡열량 측면에서는 부적절할 것으로 판단됨.
- 배수펌프실 내에 장비를 설치할 공간은 충분하였으나 출입구가 장비를 반입하기에 어려움이 있었으며 지하수위가 매우 낮았고 수질이 좋지 않으며, 또한 선로부의 표면이 고르지 못하여 TLS 모듈설치에 부적절 할 것으로 예상됨.



<그림 3-3-28> 수락산역 진입선로



<그림 3-3-29> 수락산역 승강장 하부 선로배기시스템 댐퍼

② 마들역 실사

- 사전 조사 결과, 7호선 역사 중에서 배수펌프 전력 사용량이 많은 마들역의 경우 45kW 의 배수펌프 3기가 설치되어 있었다. 배수펌프 전력 사용량이 가장 많은 만큼 배수펌프실의 지하집수정에서 배출되는 지하수량이 가장 풍부한 것으로 나타남.
- 마들역의 지하집수정 내 지하수온은 현장 방문 당시인 4월초에 15℃로 측정되었으며, 동행한 서울도시철도공사의 담당 직원에 따르면 하절기 수온은 18℃로 측정된다고 하였으며 현재 개보수 공사가 진행중인 것으로 확인됨.
- 마들역의 배수펌프실은 환기실과 계단을 통해 연결되어 있었고 환기실의 경우 여유 공간이 매우 넓었으며 배수펌프실로의 계단은 개방형으로 되어 있어 배수펌프실의 장비 반입이 용이한 구조로 이뤄져 있음.
- 마들역 지하집수정의 수위는 매우 높게 유지되고 있었으며 배수펌프의 작동빈도 또한 짧은 편이며, 마들역 지하집수정 내 지하수 상황은 TLS의 냉각수로 활용하기에 적합한 것으로 예상됨. 또한 TOS 게이트웨이가 마들역에 있어 TLS 장비 설치 시 TOS 서버 연결이 용이한 장점이 있음.
- 하지만 승강장 하부의 TLS 패널 설치 위치와 배수펌프실이 선로를 중심에 두고 반대편에 위치해 있어 TLS 설치시 배관이 선로를 횡단하는 문제점이 예상됨.

<표 3-3-124> 마들역 실사결과 (배수펌프실)

집수정 외부 장비 반출구	장비 반출구 및 지하수 유입구	집수정내 장비 반출구
		
집수정내 수중펌프	집수정 내부 - 1	집수정 내부 - 2
		

<표 3-3-125> 마들역 실사결과 (지하역사 선로부)

마들 승강장 하부 - 1	마들 승강장 하부 - 2	마들 승강장 하부(말단부)
		

③ 노원역 실사

- 사전 조사 결과, 7호선 역사 중에서 마들역과 함께 배수펌프 전력 사용량이 많은 역사 이었으며 지하집수정에서 배출되는 지하수량이 가장 풍부한 것으로 나타남. 지하집수정 내 지하수온은 현장 방문 당시인 4월초에 15℃로 측정됨.
- 노원역사는 장비 반입 공간이 마들역에 비해 좁은 편이며 개보수 공사가 완료된 상태로 현장의 작업여건은 좋은 편임. 또한 선로와 통하는 장비반입구에서 들어오는 배관이 설치되어 있었으며 해당 배관의 경우 출입구의 한쪽 모서리를 절단하여 들어오게 한 것으로 TLS의 배관 연결시 유사한 방식을 고려해볼 수 있을 것으로 판단되며 지하역사 출입구와 관리실 등이 있는 지하2층의 거리가 먼 편으로 TLS 장비 반입시 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단됨.

<표 3-3-126> 노원역 실사결과 (배수펌프실)

집수정 외부 장비 반출구	집수정내 장비 반출구	집수정내 배전반
		
집수정 내부	집수정 내부 수중펌프 - 1	집수정 내부 수중펌프 - 2
		

<표 3-3-127> 노원역 실사결과 (지하역사 선로부)

노원 승강장 하부 - 1	노원 승강장 하부 - 2	노원 승강장 하부(말단부)
		

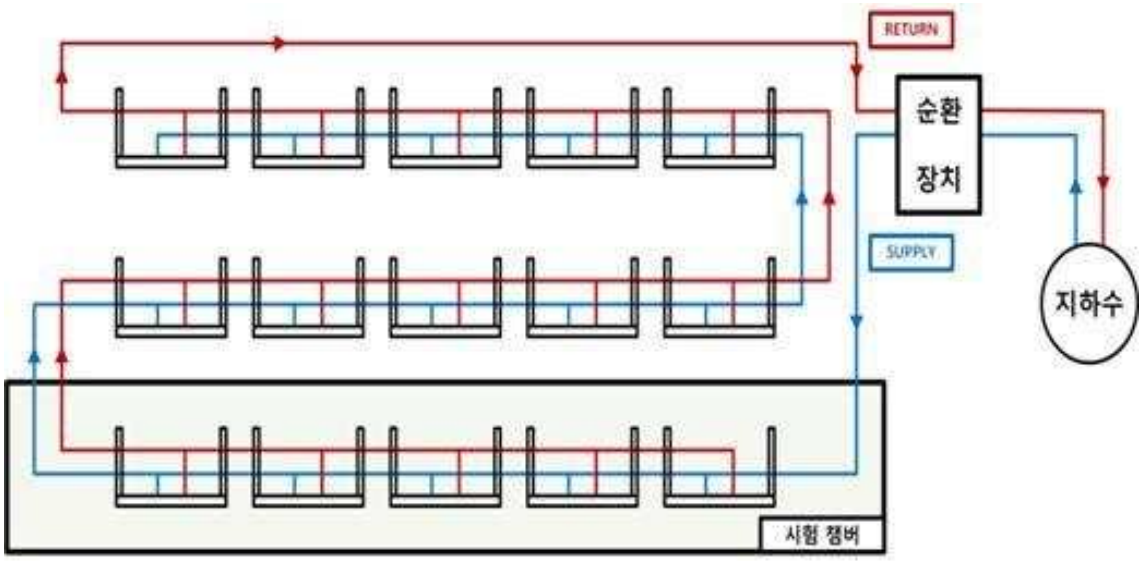
(나) 현장실증방안 검토

- TLS 시스템의 현장 실증을 위해 다양한 역사의 현장 실사 결과 현재 운영 중인 지하역사에 본 연구를 통해 개발되는 TLS 시스템의 적용이 현실적으로 어려운 점이 많이 도출되었으며 가장 중요한 이유는 안전에 대한 문제임. 도시철도는 불특정 다수가 이용하는 대중교통으로 예상치 못한 문제가 발생하는 경우 도시철도를 이용하는 승객들의 불편과 안전상의 문제를 고려하지 않을 수 없음. 또한 그 피해를 보상할 방법이 없으며 특히 선로부에 설치되는 사유로 인해서 열차 운행에 지장을 초래하는 경우 신속한 대처가 어려운 문제점이 발생할 가능성이 있음.
- 또한 제반 여건의 문제로 본 연구는 TLS의 흡열성능에 대한 평가를 위주로 진행되고자 하는 목적을 지니고 있지만 테스트베드 역사의 경우 설치 장소에 따라서 상이한 결과가 도출될 가능성이 있음. 이러한 TLS 시스템의 범용성 등에 대한 한계점을 극복하기 위해서는 TLS패널의 흡열량에 대한 정량적인 시험이 먼저 선행되어야 하며 그 후 다양한 설치공간에 설치 가능한 구조적인 개선이나 다양한 설치 방법, 또는 지하역사마다 다른 특징을 반영한 다양한 설계방법 등에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되며, 따라서 이는 향후 상용화 단계의 연구가 필요함.

- 마지막으로 운영중인 도시철도의 지하역사에 설치되는 만큼 운영 및 관리주체에 대한 문제점이 발생할 수 있음. 연구과제의 지속기간 동안에는 연구의 일환으로 주기적인 관리가 가능할 지도 모르나 연구과제 기간의 종료 후에는 장비의 철수 또는 지속적인 유지관리가 필요하지만 선로부에 설치되는 TLS 시스템의 특성상 지속적인 유지관리의 어려움 등이 예상됨. 이러한 문제에 대한 대응 방안이 구체적이지 않으므로 본 연구에서는 현장 실증을 통한 목표절감량의 달성여부 분석 보다는 실험실조건에서 다양한 환경변화에 따른 성능평가를 통해서 목표절감량 달성여부를 판단하고자 함.

(2) 현장구축용 TLS 패널 제작

- 실험실조건의 TLS 전체 시스템의 성능 시험을 위해서 아래와 같은 시험장치를 구성하고자 함.



<그림 3-3-30> TLS 시험장치 개요

- 총 15개 TLS 패널을 설치하여 TLS 패널을 통한 순환장치의 냉각수 순환성능을 평가하고 터널 모형과 유사한 환경조건을 구현할 수 있도록 제작된 시험챔버 내에 5개의 TLS 패널을 배치하여 터널 환경에 따른 TLS 패널의 흡열성능을 실험실 조건에서 평가하고자 함.
- TLS 패널은 승강장 하부에 여유공간에 설치 가능한 구조로 제작되었으며 지지대를 포함하여 선로에 설치가능한 조건을 고려함. TLS 패널 내부에는 열교환을 위한 유체가 흐를 수 있도록 모세관매트가 삽입되고 충진재로서 석고를 주입함. 석고 충진재를 열용량이 큰 재질을 활용하였으며 석고충진을 위해서 TLS 보관대를 활용하여 형상을 유지하고 석고가 주입됨으로써 발생할 수 있는 TLS 패널의 변형을 최소화 함.



<그림 3-3-31> TLS 제작 사진

6. TLS 성능시험 및 현장 구축용 시스템 제작

가. TLS 성능시험(시스템 시험)

(1) 성능시험개요

(가) 성능시험목적

- TLS 시스템은 아직 상용화제품이 없는 상태이고 선로부에 설치를 필요로 하므로 안전성 측면에서 많은 요구사항을 필요로 하며 실제 운영중인 도시철도 역사에 설치하는 만큼 열차 운영에 지장이 없어야 하며 유지관리 및 향후 관리 방안에 대해서도 검토가 필요함.
- 하지만 본 연구기간동안 TLS의 성능적인 측면에 대한 연구는 상당한 연구성과를 거둘 수 있지만 열차운행시 발생할 수 있는 제반 문제점 및 유지관리 등의 문제 및 향후의 관리주체에 대한 협의 등에 대한 문제가 발생할 수 있으므로 실험실 조건에서 성능 평가를 수행하고자 함.

(나) 성능시험방법

- TLS 전체 시스템의 성능 시험방법으로는 TEST-BED 설치 방법과 실험실조건의 성능시험 방법 중 앞서 언급한 사유에 따라 실험실 조건 성능시험을 수행함.

<표 3-3-128> TLS 성능 시험 방법론 검토

구분	실증역사 TEST BED 설치 및 성능시험	실험실 조건 성능시험 방법
시험방법	• 실제 터널내 선로부에 TLS 흡열모듈을 설치 • 터널 내부의 열차운행에 따른 TLS 흡열장치 성능 시험	• 실험챔버를 통해 터널과 유사한 열환경을 구현 • 다양한 조건에서 TLS 흡열장치 성능시험
시험기간	• 열부하가 높은 하절기	• 상시 시험이 가능함
특징	• 실제터널내 설치하므로 신뢰성 있는 정확한 성능평가 가능. • 운행하고 있는 터널내 설치가 필요하므로 기존 시설물에 대한 간섭 발생 및 설치시 발생할 수 있는 문제점 발생. • 향후 유지관리 및 관리주체 선정 곤란. • 지하수량 확보, 및 열차발열조건 환기기 운전 등 제반조건에 대한 제어가 어려움.	• 다양한 환경조건을 가정하여 성능을 test 할 수 있음. • 주변 환경영향의 변수의 영향을 제어할 수 있으나 실제터널 조건을 완벽히 구현하기는 어려움. • 대규모의 실험챔버 별도 제작 필요. • 지하수량 터널내 온도차등 다양한 변수에 대한 시험가능.

(다) 성능시험 목표

- TLS(선로흡열장치)는 열차의 가감속 및 전동차량에서 발생되는 발열을 흡열패널을 이용한 흡열효과로 선로부의 온도상승을 억제하고 이러한 냉방효과를 통해 선로부 온도상승을 억제하기 위해 기존에 사용중인 선로부 상하부 배기(TES, Trackway Exhaust System) 및 본선환기부하의 감소를 통해 에너지 절감 효과를 기대함. 따라서 다음과 같은 방법론적 접근을 통해서 TLS 패널의 흡열성능 목표를 수립하고자 함.

① 흡열 패널을 이용한 에너지 절감량 달성 방법

㉮ 선로부 TES 가동시 에너지 절감량

- 일반적인 선로부에서는 발생하는 열량 제거와 동시에 선로부 환기를 위해 승강장 하부에 TES (Trackway Exhaust System)을 설치함.



<그림 3-3-32> 승강장 하부 TES

- 선로부에서 열차 주행으로 발생하는 열량을 TLS를 통해 제거할 경우, TES의 가동을 감소시켜 소요 동력을 절감함으로써 에너지 절감이 가능하며 열차 주행량이 많은 피크 시간 오전 7:00 ~ 9:00 와 오후 18:00 ~ 20:00 총 4시간에 대한 일일 절감량을 계산함.

<표 3-3-129> 테스트베드 역사 제원

구분	용도	풍량	동력	수량
SF-01	승강장 유막급기	970 ㎥/min	15 kW	3
EF-01	승강장 배기	1,370 ㎥/min	19 kW	3

- 테스트베드 대상역사의 제원은 위와 같으며 섬식 승강장 구조로, 하행 방향 1개의 TES와 상행 방향 2개의 TES가 설치되어 있음.
- 테스트베드 역사의 TES는 총 4시간의 피크 시간 동안 총 408 kW의 동력을 소모하며,

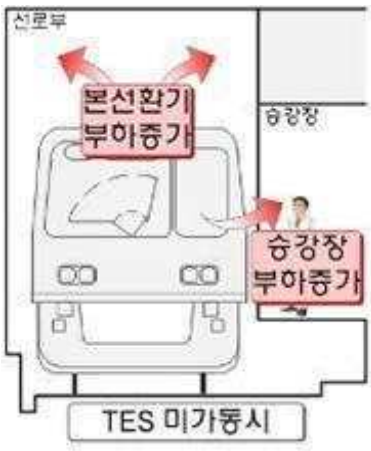
TLS는 TES 설치 위치와 동일한 장소에 설치되므로 80㎡의 시스템이 3곳에 설치되어 총 240㎡의 면적으로 설치하는 것으로 가정하여 역사 내 선로부의 발열량 중, TLS를 통한 선로부 흡열량을 선로부 냉각 비율로 산출하여 냉각비 만큼의 TES 부하 절감량을 산출할 수 있음.

㉯ 본선환기팬 가동 시 에너지 절감량

- 지하철 본선 터널 내 열량 제거 및 비산먼지 제거, 환기 등을 위해 대용량의 본선 환기팬이 작동하며, TES 미가동시에는 선로부에서 발생하는 열량이 배출되지 못해 승강장의 냉방부하 및 본선 환기부하가 가중될 수 있으며 TES 미가동시 선로부에서 발생하는 열량을 승강장 내부에서 해결하기 위해서는 공조시스템의 냉방기 부하가 가중되는 등 여러 가지 에너지 상승 요인이 발생함. 따라서 본선 환기시스템을 통해 선로부의 발열량을 제거하는 방법이 가장 용이함.



<그림 3-3-33> TES 가동시



<그림 3-3-34> TES 미가동시

<표 3-3-130> 테스트베드 역사 본선환기팬 제원

용도	풍량	동력	수량	수량
본선급기	2,600 ㎥/min	55 kW	3	3
본선배기	2,600 ㎥/min	55 kW	3	3

- 테스트베드 역사의 실사 결과 본선 환기팬의 제원은 위와 같으며 선로부 발열을 제거하는데 사용된 TES는 배기풍량 1,370㎥/min으로 총 3대가 설치되어 있었으므로 총 배기풍량은 4,110㎥/min 으로 계획되어 있으며 이에 해당하는 풍량을 본선환기팬으로 공급할 경우, 본선환기팬의 동력 중 약 87kW의 동력이 선로부 열량 제거를 위해 사용되는 것으로 판단할 수 있음. 따라서 피크 시간대 4시간 동안 소요되는 본선환기팬의 동력은 약 696kW로 추정할 수 있으며 위의 동력에서 TLS를 이용한 선로부 냉각비율 만큼의 동력을 절감시킬 수 있다고 보면 TLS를 통한 본선환기팬의 에너지 절감량을 예상할 수 있음.

② 선로부 발열량 계산

- 선로부 발열량 계산방법은 서울메트로의 '길음역 지하수 활용 냉방화 설계 용역 기계분야 설계보고서(2012)'를 참고하여 열차의 발열량을 선정함.

㉮ 열차 주행 발열 계산

$$Q_{TRS} = a_0[(W_e + W \bullet n) \times \frac{V^2}{2g} + W_e \times \triangle h] \times \frac{(1-\beta)(1+a_B)(1+a_S)}{427} \times N$$

a_0 : 정거장 부하비율
W_e : 승객포함 열차 총 중량 (kg)
W : 열차 공차중량 (kg)
n : 관성계수 (0.08)
V : 최종 제종 지점 속도 (m/s)
β : 재발전율 (0.4)
a_B : 열차 가속에 의한 발열 부가계수 (0.25)
a_S : 열차 보조기기에 의한 발열부가계수 (0.05)
N : 시간당 통과 열차 수
$\triangle h$: 최종 제동지점과 정거장 중심의 표고차 (m)

- 표고차는 0m로 가정하고 8량 열차를 기준으로 무게를 환산하였으며 시간당 통과 대수를 고려하여 마들역 열차 주행 발열을 계산하면 다음과 같음.

<표 3-3-131> 테스트베드 역사 열차 주행발열량 계산결과

구분	7:00 ~ 8:00	8:00 ~ 9:00	18:00 ~ 19:00	19:00 ~ 20:00
a_0	0.3	0.3	0.3	0.3
W_e (kg)	324,000	324,000	324,000	324,000
W (kg)	252,000	252,000	252,000	252,000
V (m/s)	16.7	16.7	16.7	16.7
N	20	18	15	12
Q_{RTS} (kcal/h)	54,134	48,720	40,600	32,480

㉯ 열차 냉방기 발열계산

$$Q_{AC} = [(A_C + m \times 860) \times n] \times \frac{T_s}{3600} \times N$$

A_C : 차량 냉방용량, 42,000 kcal/h
m : 압축기 모터 정격, 1.86kW X 3대
n : n열차 편성 수, 8량/열차
T_s : 정거장 체제시간 ; 출입시간(38.4) × 0.5 + 정거장 정차시간(30) = 49.2
N : 시간당 통과 열차 수

○ 8량 열차에 대한 냉방기 발열량을 계산하면 다음과 같음.

<표 3-3-132> 테스트베드 역사 열차 냉방기 발열량 계산결과

구분	7:00 ~ 8:00	8:00 ~ 9:00	18:00 ~ 19:00	19:00 ~ 20:00
A_C (kcal/h)	42,000	42,000	42,000	42,000
m (kW)	5.58	5.58	5.58	5.58
n	8	8	8	8
T_s (s)	49.2	49.2	49.2	49.2
N	20	18	15	12
Q_{AC} (kcal/h)	102,333	92,100	76,750	61,400

㉰ 지중 흡열계산

$$Q_W = K \times A \times (t_1 - t_2)$$

K : 벽체 열관류율 (kcal/㎡·hr·℃)　　A : 터널 표면적 (㎡)
t_1 : 터널 내 온도 (℃)　　t_2 : 지중온도 (℃)

<표 3-3-133> 테스트베드 역사 지중흡열량 계산

구분	7:00 ~ 8:00	8:00 ~ 9:00	18:00 ~ 19:00	19:00 ~ 20:00
K (kcal/㎡·hr·℃)	0.825	0.825	0.825	0.825
A (㎡)	3,498	3,498	3,498	3,498
t_1 (℃)	32	32	35	35
t_2 (℃)	15	15	15	15
Q_W (kcal/h)	49,059	49,059	57,717	57,717

㉱ 선로부 내 총 발열량 계산

<표 3-3-134> 테스트베드 역사 선로부 총 발열량 계산

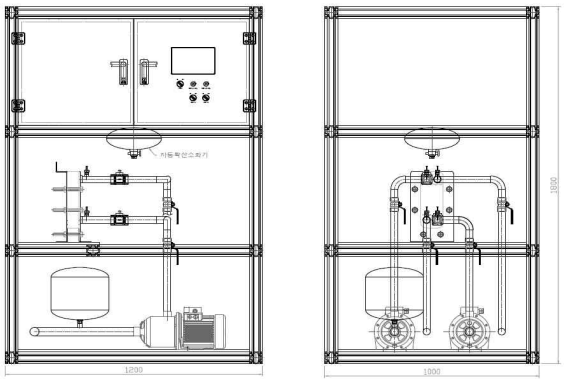
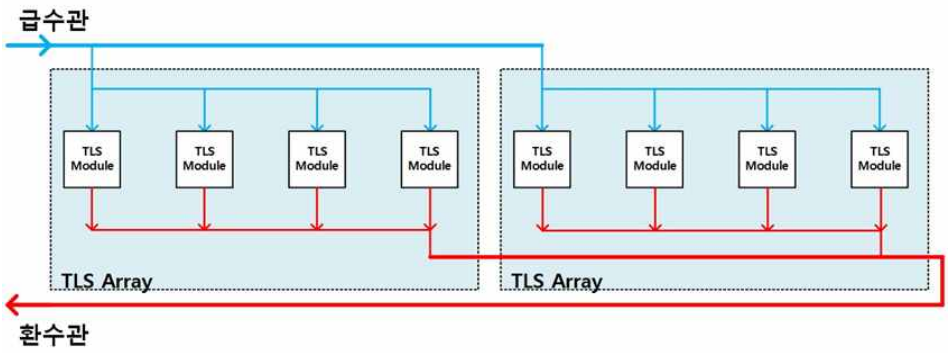
구분	7:00 ~ 8:00	8:00 ~ 9:00	18:00 ~ 19:00	19:00 ~ 20:00
열차 주행 발열량 (kcal/h)	54,134	48,720	40,600	32,480
열차 냉방기 발열량 (kcal/h)	102,333	92,100	76,750	61,400
지중 흡열량 (kcal/h)	49,059	49,059	57,717	57,717
총 발열량 (kcal/h)	107,408	91,761	59,633	36,163
총 발열량 (kW)	125	107	70	42

- 열차 주행으로 인해 선로부에 발생하는 열량은 냉방기 가동으로 인한 발열량이 많은 부분을 차지하며 피크 시간 4시간 동안 발생하는 총 열량은 약 344 kWh로 나타남. 열차의 상행, 하행을 모두 고려할 경우, 발생하는 열량은 약 688 kWh 정도로 예상됨.

③ TLS 설치계획(안)

- 도시철도 구간 중 가장 큰 발열이 발생하는 승강장부에 TLS를 적용하며 집수정에 순환시스템(순환펌프, 흡입펌프)을 설치함.

<표 3-3-135> TLS 설치

구분	내 용
집수정 계획	
배관설치 기본 Layout	

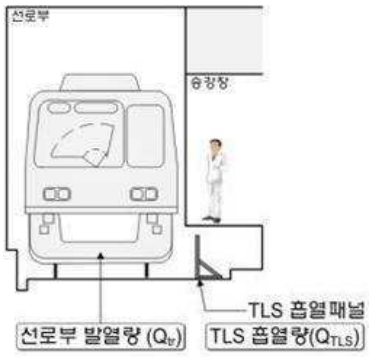
- 흡열 모듈간 유량 밸런스를 위한 Reverse-Return 형태로 구성하고 TLS 흡열 모듈을 10개씩 묶어 하나의 배열을 구성하고 승강장 한 면에 8개의 배열을 배치하여 총 80개의 TLS 모듈을 설치함.
- AHRAE 50mm 이하 관의 적정 유속 기준: 내경 16mm 공급수 배관 하나 당 최대 11개 모듈설치 가능하며 10개 모듈을 1묶음의 TLS 흡열체 배열로 구성.
- 집수정 배수펌프실에 설치되는 순환장치는 펌프 등의 사용으로 약 3kW 의 전기 용량이 필요하며 입력전원은 220V 3상 전원의 공급이 필요함.

<표 3-3-136> 운영시 시스템 에너지 사용

순환펌프 동력	흡입펌프 동력	최대소비전력
1.85kW	1.1kW	3kW

④ 에너지 절감 목표 달성 계획

- TES나 본선환기팬의 동력 절감량을 계산하기 위해 적용할 선로부 냉각 비율은 선로부 발열량 대비 TLS 흡열량으로 계산된다. 에너지 목표 절감량은 176 kWh로, 결과적으로 TLS 패널 당 185 W/㎡의 흡열량을 나타낼 경우 목표 달성이 가능함.



<그림 3-3-35> TES 가동시

$$\text{선로부 냉각비율}(\%) = \frac{TLS \text{ 흡열량}(Q_{TLS})}{\text{선로부 발열량}(Q_{tr})}$$

- 상행, 하행을 모두 고려한 선로부 발열량은 688 kWh로, 185 W/㎡ 성능의 TLS 패널이 240㎡(순환시스템 운영에너지 제외) 설치될 경우 기대할 수 있는 냉각비율은 25.8%로 나타남.
- 이는 가동되고 있는 환기 장치의 부하를 25.8% 가량 절감시킬 수 있음을 나타내며, 이는 동력의 25.8%를 절감할 수 있다고 판단할 수 있음.

<표 3-3-137> 테스트베드 역사 에너지 절감량 도출

구분	시스템	동력	냉각비율	에너지 절감량
Case-01	TES 적용시	408 kWh	25.8 %	105.3 kWh
Case-02	본선환기팬 적용시	696 kWh		179.6 kWh

- TES 가동 시 TLS 흡열로 인해 기대할 수 있는 에너지 절감량은 약 105.3 kWh로 나타났으며, TES 미가동시 본선환기팬의 부하 절감량은 약 179.6 kWh로 환산할 수 있음.
- 테스트베드 역사의 경우, TES가 설치되어 있으나 실제로 사용중이지 않아 선로부의 열량 제거는 본선환기팬 작동을 통해 이루어지므로 185 W/㎡의 성능을 갖는 TLS 패널을 240㎡ 규모로 설치하여 본선환기팬의 부하를 절감할 경우, 약 179.6 kWh의 동력 절감이 가능하므로 목표하는 176 kWh의 에너지 절감량을 달성할 수 있을 것으로 예상되며, 따라서 TLS 패널당 흡열량 185W/㎡을 TLS 패널의 성능 목표로 설정하고자 함.

⑤ 경제성 검토결과

- 운영시 순환시스템(순환펌프, 흡입펌프)의 에너지 사용량을 고려하여 목표 에너지 절감량을 만족하기 위해 총 256㎡규모의 TLS시스템이 계획되어야 함.

<표 3-3-138> TLS 시스템

TLS설치면적	순환시스템 사용에너지
256㎡	12kWh

- TLS 설치시 절감효과에 따른 경제성을 검토한 결과 투자비 131,007,000원을 기준으로 TES 설치시 에너지 절감량 105.3kWh적용시 연간이익은 4,705,646원, 감가상각 10,917,250원으로 분석되었으며 TES 미설치시 에너지 절감량 179.6kWh적용시 연간이익은 8,025,965원, 감가상각 10,917,250원으로 분석되어 회수년(=투자책/(연간이익+감가상각))은 TES 설치시 8.39년, TES 미설치시 6.92년으로 검토됨.

<표 3-3-139> 시스템별 경제성 검토

구분	TLS적용시 기존 시스템 대비 경제성 검토	
	TES 시스템	본선환기 시스템
TLS 설치투자비	131,007,000원	
TLS 에너지 절감량	105.3kWh	179.6kWh
연간이익	4,705,646원	8,025,965원
감가상각	10,917,250원	10,917,250원
회수년	8.39년	6.92년

(2) 성능시험 장치 구성

- 선로부 단면 중 TLS 패널이 설치되는 승강장 하부를 실험 공간으로 설정하고 터널 모형의 시험챔버 내 1.2m 간격으로 5개의 TLS 패널을 설치함.



<그림 3-3-36> TLS 성능시험장치 전경

- 시험챔버 내부는 열선 히터를 통해 열량을 공급하고 냉각수와 챔버 내 온도 차이에 따른 성능 분석을 수행하고자 함. 시험장치는 아래와 같은 세부적인 장치들로 구성되어 있음.



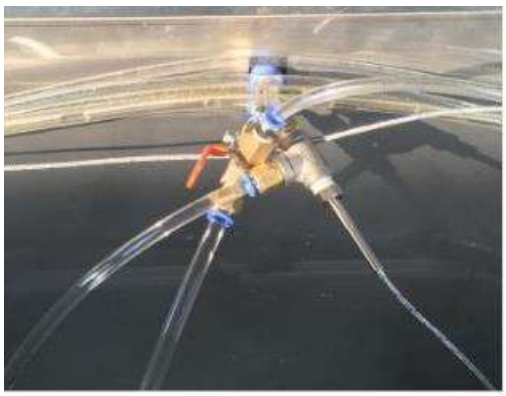
<그림 3-3-37>시험챔버 말단부 온도센서



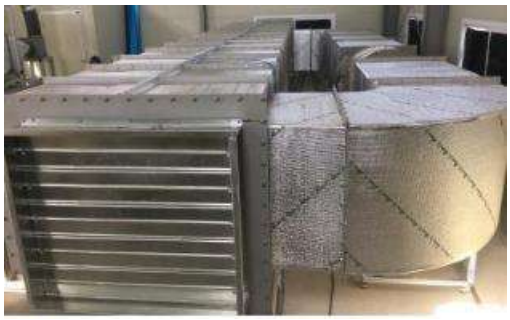
<그림 3-3-38> 시험챔버 내부



<그림 3-3-39> 시험챔버 점검창



<그림 3-3-40> TLS 공기빼기 밸브



<그림 3-3-41> 기류조절 댐퍼



<그림 3-3-42> 온도조절용 히터

- 기류조절 댐퍼 및 히터 등을 통해 시험챔버 내부 환경조절이 가능하도록 제작함.

(3) 1차 성능 시험

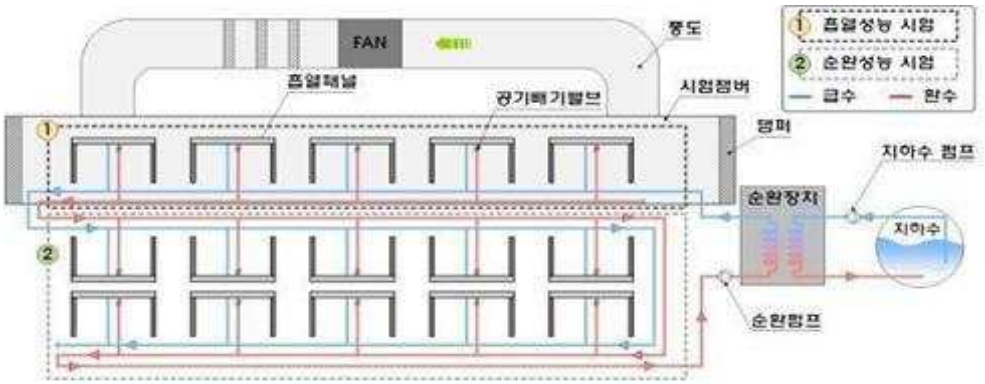
- 총 36Case에 대해서 3회 반복시험을 수행.

<표 3-3-140> 성능시험 Case

구분	온도차 [ΔT]	챔버유속 [m/s]	냉각수량 [lpm]	비고
Case 01	5℃	1	2	-
Case 02	5℃	1	4	-
Case 03	5℃	1	6	-
Case 04	5℃	3	2	-
Case 05	5℃	3	4	-
Case 06	5℃	3	6	-
Case 07	5℃	5	2	-
Case 08	5℃	5	4	-
Case 09	5℃	5	6	-
Case 10	10℃	1	2	-
Case 11	10℃	1	4	-
Case 12	10℃	1	6	-
Case 13	10℃	3	2	-
Case 14	10℃	3	4	-
Case 15	10℃	3	6	-
Case 16	10℃	5	2	-
Case 17	10℃	5	4	-
Case 18	10℃	5	6	-
Case 19	15℃	1	2	-
Case 20	15℃	1	4	-
Case 21	15℃	1	6	-
Case 22	15℃	3	2	-
Case 23	15℃	3	4	-
Case 24	15℃	3	6	-
Case 25	15℃	5	2	-
Case 26	15℃	5	4	-
Case 27	15℃	5	6	-
Case 28	20℃	1	2	-
Case 29	20℃	1	4	-
Case 30	20℃	1	6	-
Case 31	20℃	3	2	-
Case 32	20℃	3	4	-
Case 33	20℃	3	6	-
Case 34	20℃	5	2	-
Case 35	20℃	5	4	-
Case 36	20℃	5	6	-

(4) 1차 성능시험결과

(가) 선로부 흡열장치 지하수 순환성능 평가



<그림 3-3-43> 성능시험장치 개요

- 성능시험장치의 시운전 결과 흡열패널내 모세관매트의 공기 제거를 위한 공기빼기 밸브의 추가 필요성이 확인되었으며, 흡열패널의 환수관측 배관에 공기빼기 밸브를 설치하여 순환성능 평가를 통해 15개 패널 전체에 균일한 유량이 흐르는 것으로 확인됨.

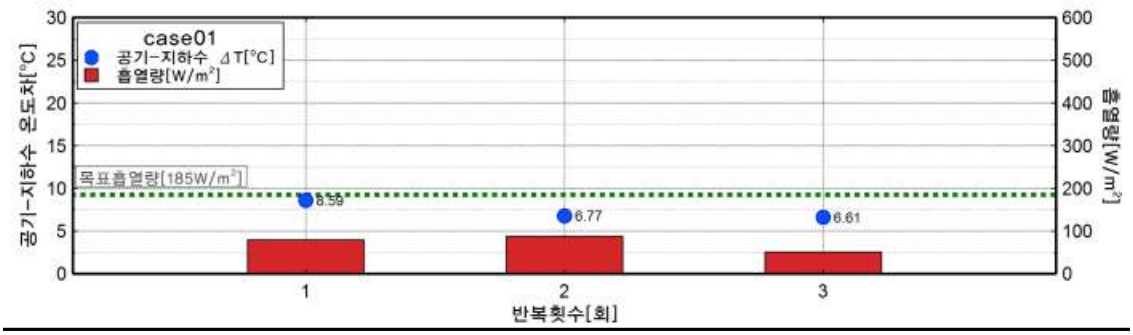
(나) 흡열량 성능시험

① Case 별 흡열량 성능시험

■ Case 01

<표 3-3-141> Case 01 성능시험결과

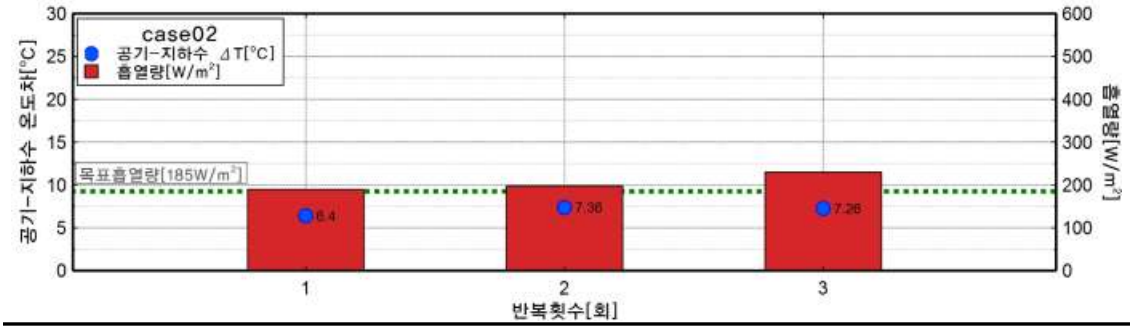
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 01	1time	1.00	2.00	8.59	0.57	79.37
CASE 01	2time	1.00	2.00	6.77	0.63	87.62
CASE 01	3time	1.00	2.00	6.61	0.36	50.84



■ Case 02

<표 3-3-142> Case 02 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 02	1time	1.00	4.00	6.40	0.68	189.62
CASE 02	2time	1.00	4.00	7.36	0.71	197.68
CASE 02	3time	1.00	4.00	7.26	0.82	230.00

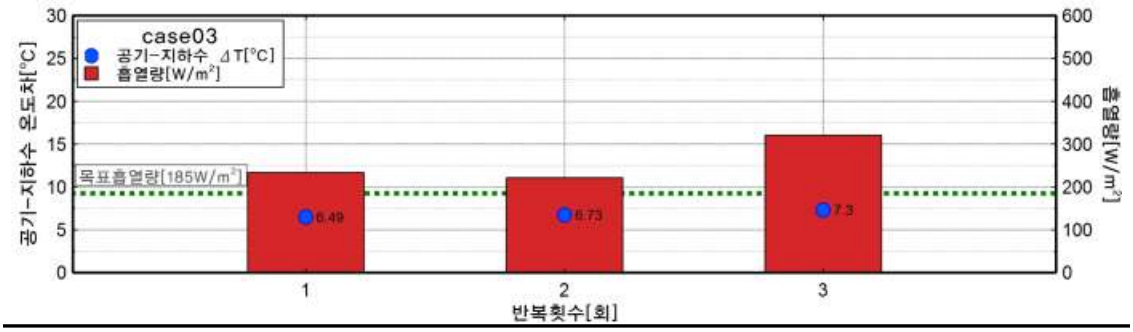


- 지하수와 공기온도차이가 낮지만 Case 01 에 비해 증가된 유량으로 최대 230W/㎡ 흡열량이 나타남.

■ Case 03

<표 3-3-143> Case 03 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 03	1time	1.00	6.00	6.49	0.56	233.41
CASE 03	2time	1.00	6.00	6.73	0.53	221.37
CASE 03	3time	1.00	6.00	7.30	0.77	320.40

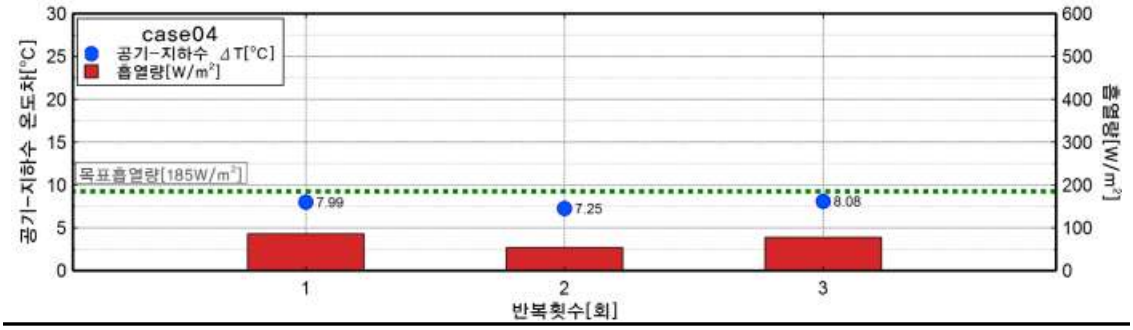


- 약 7℃ 전후의 온도 차에서 최대 320W/㎡의 흡열량이 나타남.

■ Case 04

<표 3-3-144> Case 04 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 04	1time	3.00	2.00	7.99	0.62	85.94
CASE 04	2time	3.00	2.00	7.25	0.39	53.80
CASE 04	3time	3.00	2.00	8.08	0.56	77.59

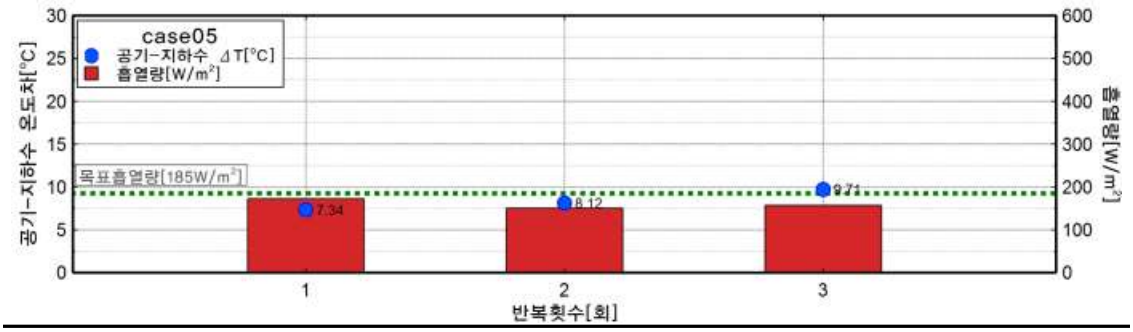


- 8℃전후의 공기-지하수 온도차가 나타날 때 유량이 2LPM으로 작은 경우 흡열량이 상대적으로 낮아 목표흡열량 185W/㎡이하로 나타남.

■ Case 05

<표 3-3-145> Case 05 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 05	1time	3.00	4.00	7.34	0.62	172.44
CASE 05	2time	3.00	4.00	8.12	0.54	150.52
CASE 05	3time	3.00	4.00	9.71	0.56	157.01

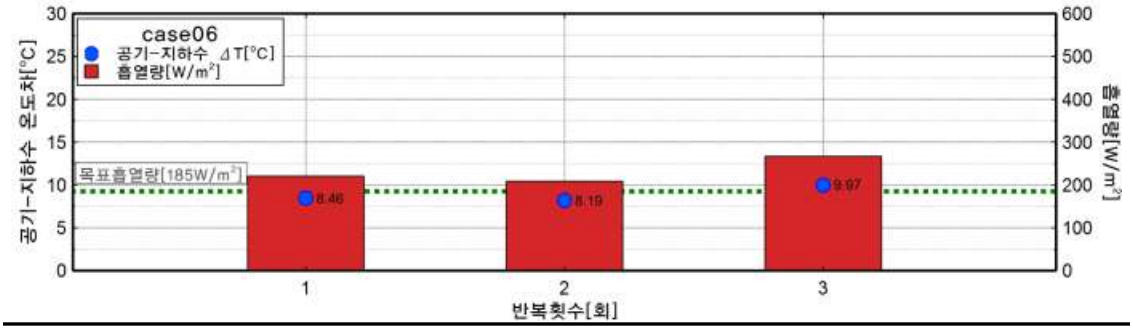


- 최대 흡열량은 172W/㎡로 목표흡열량 185W/㎡이하로 나타남.

■ Case 06

<표 3-3-146> Case 06 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 06	1time	3.00	6.00	8.46	0.53	220.55
CASE 06	2time	3.00	6.00	8.19	0.50	208.56
CASE 06	3time	3.00	6.00	9.97	0.64	266.73

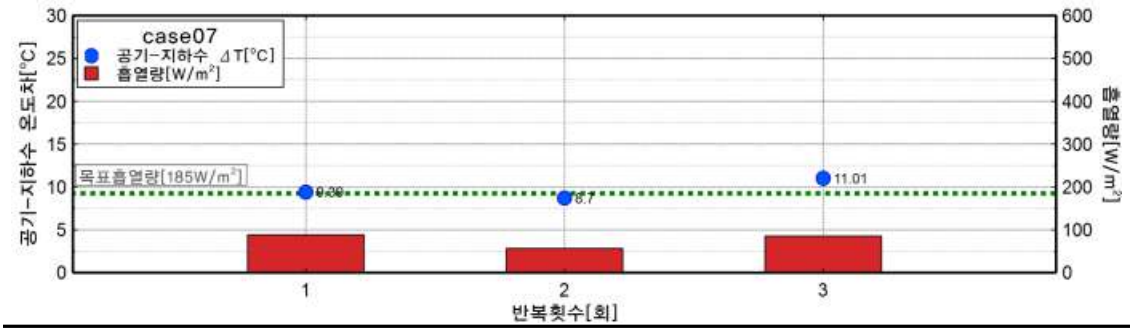


- 패널내 유량 증가로 최대 흡열량은 약 266W/㎡로 목표흡열량 185W/㎡를 초과하는 것으로 나타남.

■ Case 07

<표 3-3-147> Case 07 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 07	1time	5.00	2.00	9.39	0.63	88.28
CASE 07	2time	5.00	2.00	8.70	0.40	56.46
CASE 07	3time	5.00	2.00	11.01	0.61	85.28

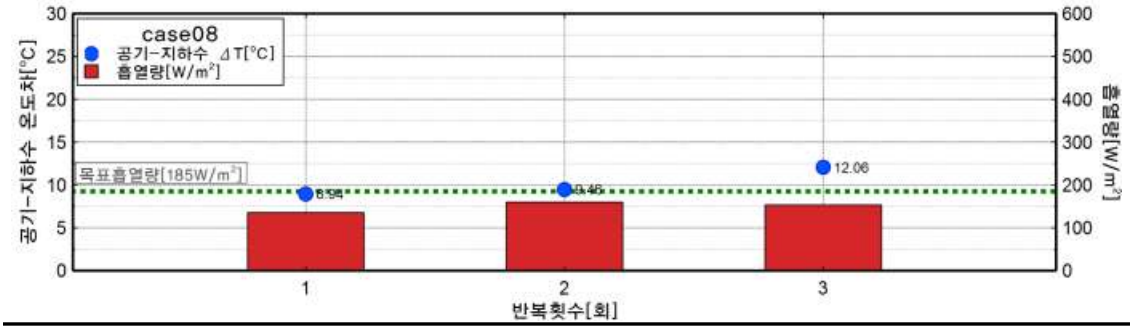


- Case 07의 경우 목표흡열량 185W/㎡이하로 나타남.

■ Case 08

<표 3-3-148> Case 08 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 08	1time	5.00	4.00	8.94	0.49	135.46
CASE 08	2time	5.00	4.00	9.46	0.57	159.76
CASE 08	3time	5.00	4.00	12.06	0.55	153.14

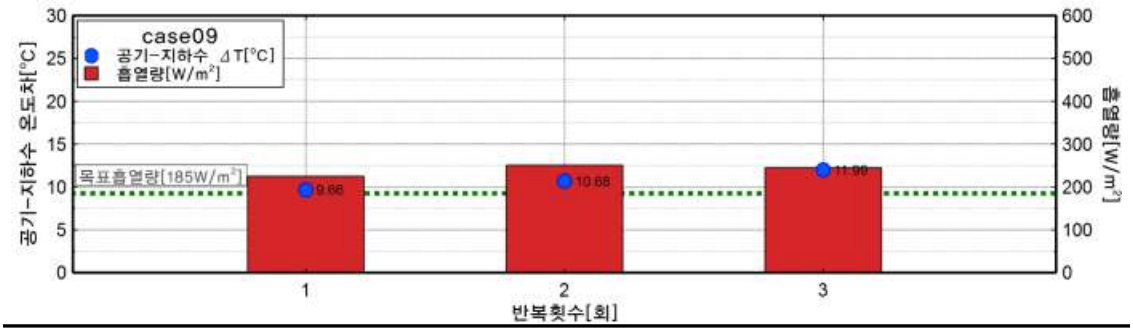


- 시험챔버내 유속 5.0m/s에서 약 9~12℃의 온도차 조건의 경우 4LPM 유량의 영향으로 흡열량이 증가하나 목표흡열량 185W/㎡이하로 나타남.

■ Case 09

<표 3-3-149> Case 09 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 09	1time	5.00	6.00	9.66	0.54	224.71
CASE 09	2time	5.00	6.00	10.68	0.60	250.66
CASE 09	3time	5.00	6.00	11.99	0.58	244.76

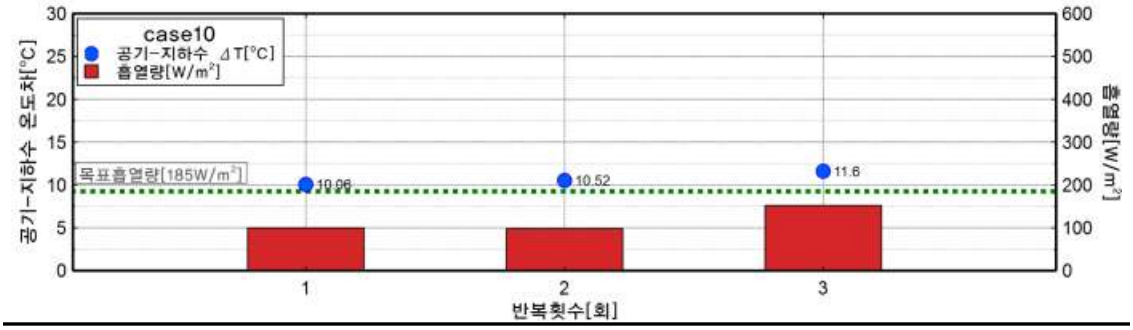


- Case 09의 경우 목표흡열량 185W/㎡를 초과하는 것으로 나타남.

■ Case 10

<표 3-3-150> Case 10 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 10	1time	1.00	2.00	10.06	0.71	99.70
CASE 10	2time	1.00	2.00	10.52	0.70	97.76
CASE 10	3time	1.00	2.00	11.60	1.09	152.12

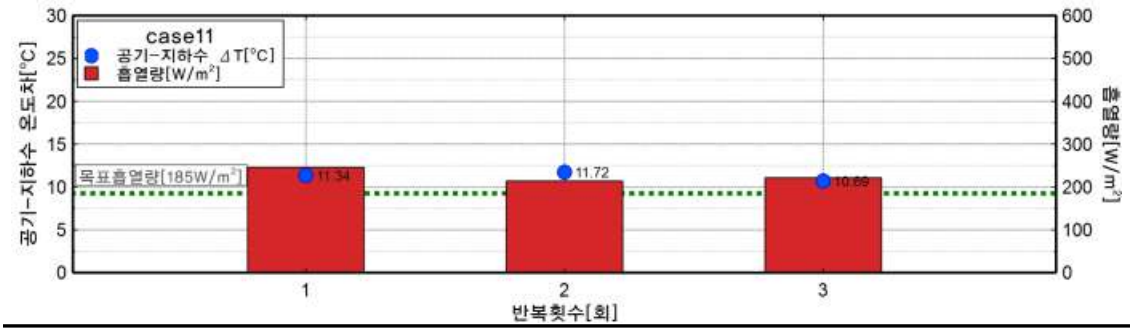


- 시험챔버내 유속 1.0m/s에서 약 10℃의 온도차 조건의 경우 2LPM 유량 적용시 목표흡열량 185W/㎡이하로 나타남.

■ Case 11

<표 3-3-151> Case 11 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 11	1time	1.00	4.00	11.34	0.88	245.68
CASE 11	2time	1.00	4.00	11.72	0.77	213.79
CASE 11	3time	1.00	4.00	10.69	0.79	221.35

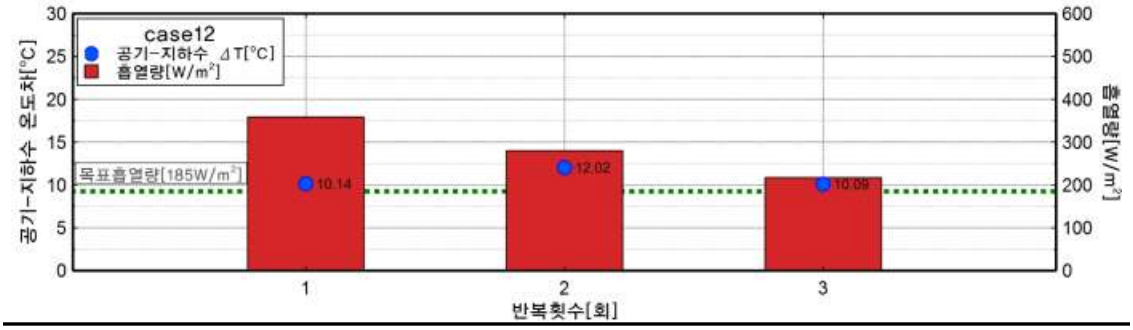


- Case 11의 경우 목표흡열량 185W/㎡를 초과하는 것으로 나타남.

■ Case 12

<표 3-3-152> Case 12 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 12	1time	1.00	6.00	10.14	0.86	358.55
CASE 12	2time	1.00	6.00	12.02	0.67	279.89
CASE 12	3time	1.00	6.00	10.09	0.52	217.04

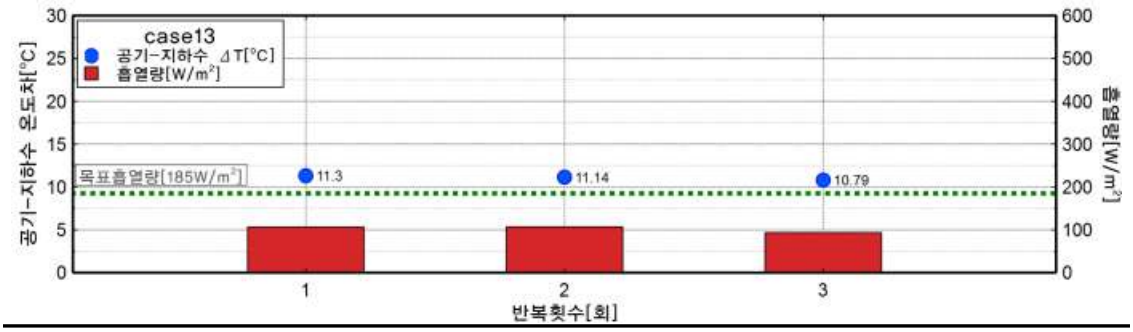


- 시험챔버내 유속 1.0m/s에서 약 11℃의 온도차 조건의 경우 6LPM 유량 적용시 목표흡열량 185W/㎡이하로 나타남.

■ Case 13

<표 3-3-153> Case 13 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 13	1time	3.00	2.00	11.30	0.76	106.52
CASE 13	2time	3.00	2.00	11.14	0.77	106.91
CASE 13	3time	3.00	2.00	10.79	0.67	93.30

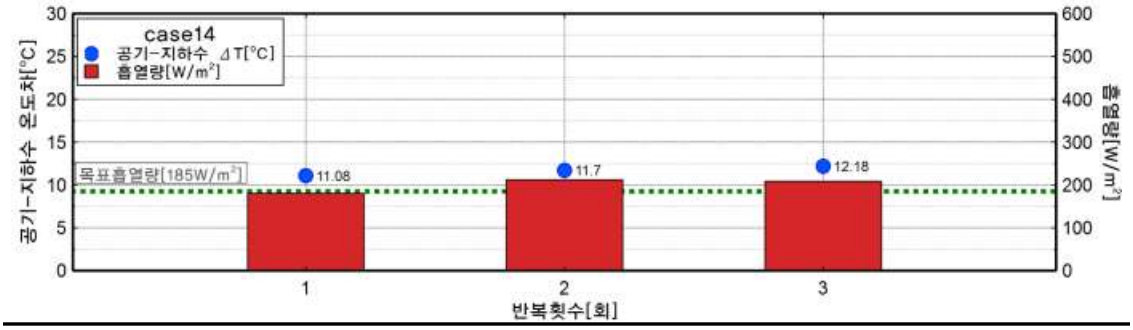


- Case 13의 경우 목표흡열량 185W/㎡ 이하로 나타남.

■ Case 14

<표 3-3-154> Case 14 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 14	1time	3.00	4.00	11.08	0.65	180.39
CASE 14	2time	3.00	4.00	11.70	0.76	212.11
CASE 14	3time	3.00	4.00	12.18	0.75	208.45

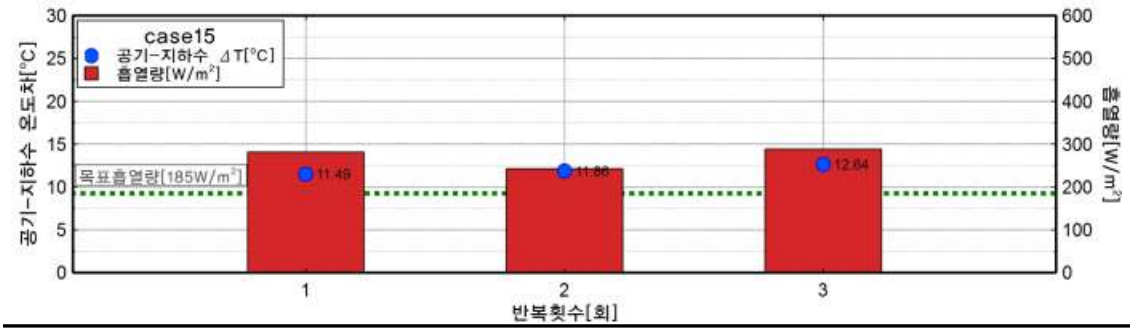


- 시험챔버내 유속 3.0m/s에서 약 11℃의 온도차 조건의 경우 4LPM 유량 적용시 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 15

<표 3-3-155> Case 15 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 15	1time	3.00	6.00	11.49	0.67	281.26
CASE 15	2time	3.00	6.00	11.86	0.58	242.44
CASE 15	3time	3.00	6.00	12.64	0.69	288.10

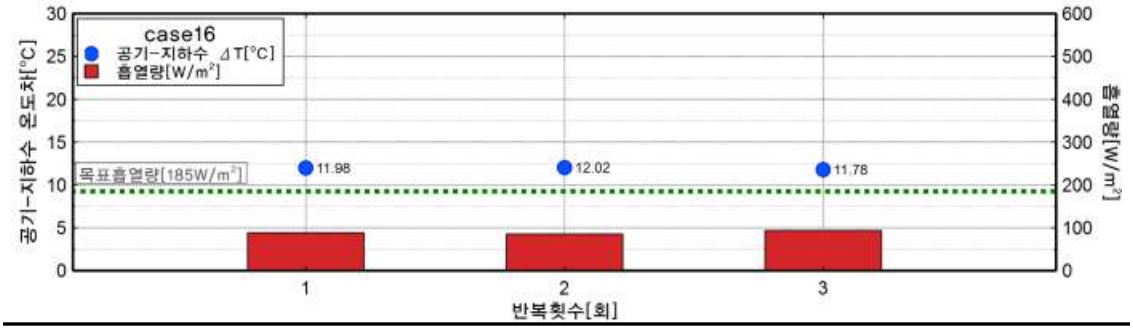


- Case 15의 경우 목표흡열량 185W/㎡를 초과하는 것으로 나타남.

■ Case 16

<표 3-3-156> Case 16 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 16	1time	5.00	2.00	11.98	0.63	88.48
CASE 16	2time	5.00	2.00	12.02	0.61	85.46
CASE 16	3time	5.00	2.00	11.78	0.67	93.50

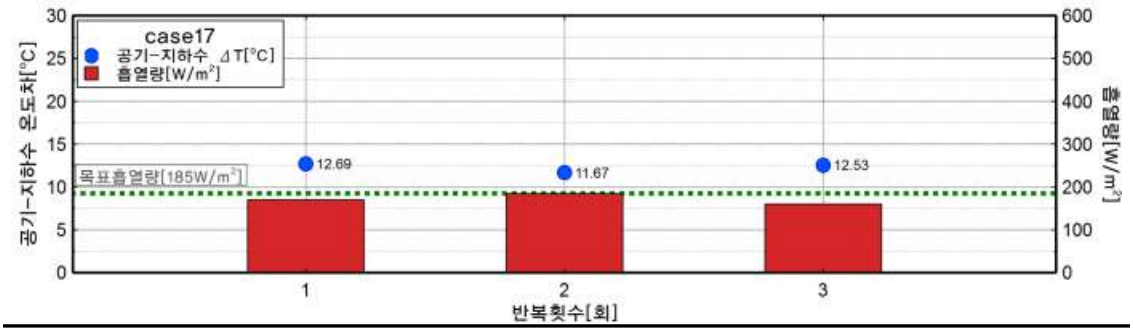


- 시험챔버내 유속 5.0m/s에서 약 12℃의 온도차 조건의 경우 2LPM 유량 적용시 목표흡열량 185W/㎡이하로 나타남.

■ Case 17

<표 3-3-157> Case 17 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 17	1time	5.00	4.00	12.69	0.61	169.91
CASE 17	2time	5.00	4.00	11.67	0.66	183.99
CASE 17	3time	5.00	4.00	12.53	0.57	159.84

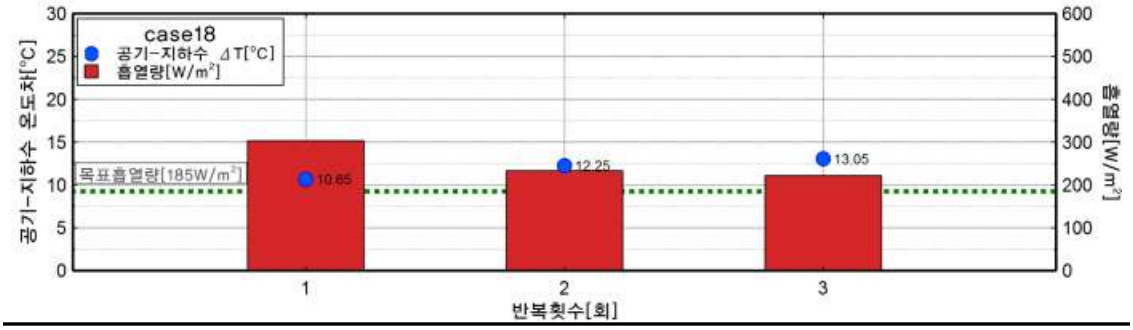


- Case 17의 경우 목표흡열량 185W/㎡ 이하로 나타남.

■ Case 18

<표 3-3-158> Case 18 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 18	1time	5.00	6.00	10.65	0.72	302.97
CASE 18	2time	5.00	6.00	12.25	0.56	232.94
CASE 18	3time	5.00	6.00	13.05	0.53	221.77

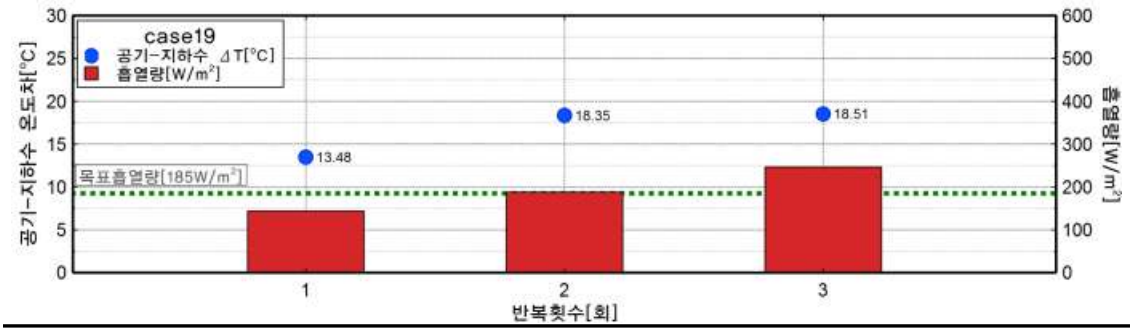


- 시험챔버내 유속 5.0m/s에서 약 12℃의 온도차 조건의 경우 6LPM 유량 적용시 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 19

<표 3-3-159> Case 19 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 19	1time	1.00	2.00	13.48	1.03	143.67
CASE 19	2time	1.00	2.00	18.35	1.35	187.77
CASE 19	3time	1.00	2.00	18.51	1.77	246.38

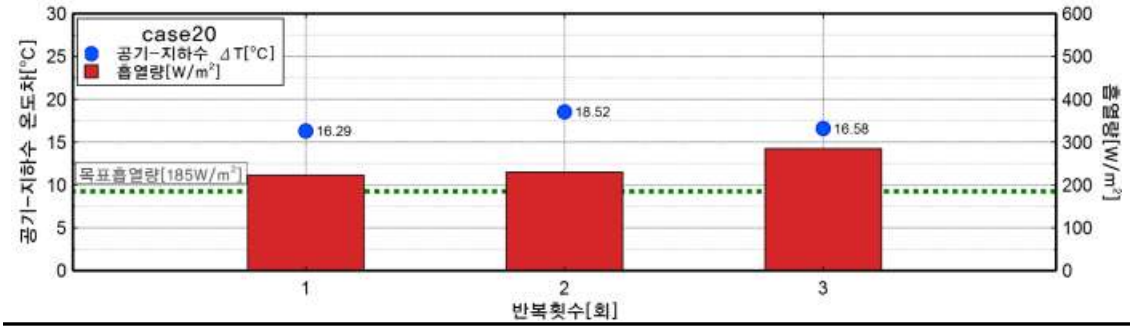


- Case 19의 경우 목표흡열량 185W/㎡ 이하로 나타남.

■ Case 20

<표 3-3-160> Case 20 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 20	1time	1.00	4.00	16.29	0.80	222.77
CASE 20	2time	1.00	4.00	18.52	0.83	230.13
CASE 20	3time	1.00	4.00	16.58	1.02	284.69

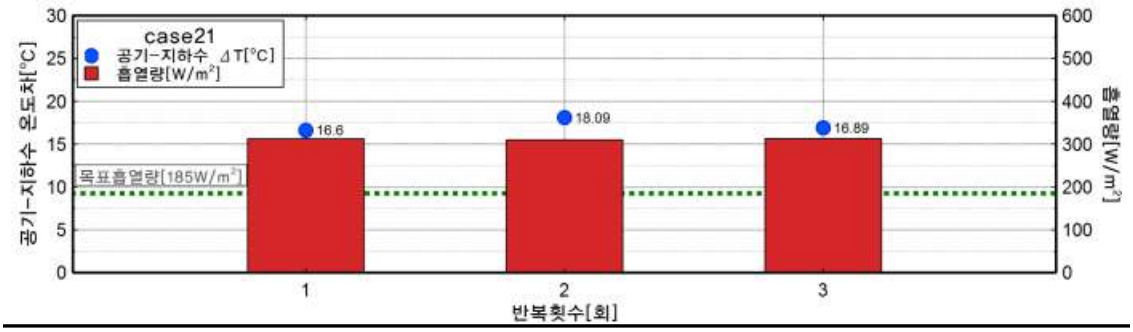


- 시험챔버내 유속 1.0m/s에서 약 18℃의 온도차 조건의 경우 4LPM 유량 적용시 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 21

<표 3-3-161> Case 21 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 21	1time	1.00	6.00	16.60	0.75	312.31
CASE 21	2time	1.00	6.00	18.09	0.74	309.71
CASE 21	3time	1.00	6.00	16.89	0.75	312.85

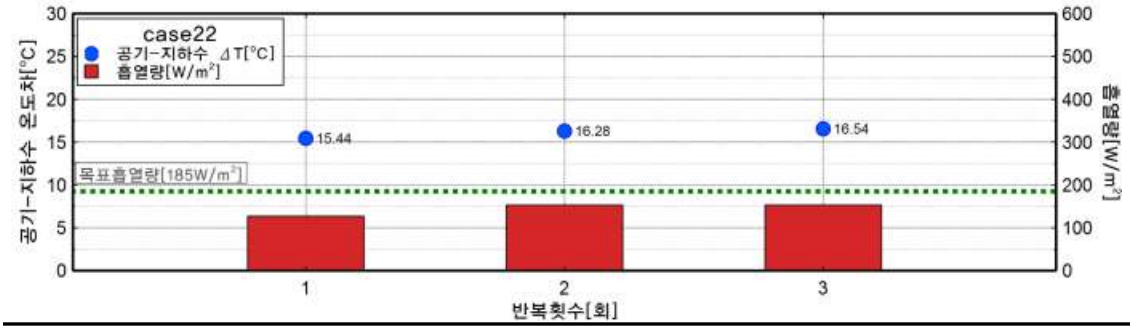


- Case 21의 경우 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 22

<표 3-3-162> Case 22 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 22	1time	3.00	2.00	15.44	0.91	126.98
CASE 22	2time	3.00	2.00	16.28	1.10	152.96
CASE 22	3time	3.00	2.00	16.54	1.10	153.03

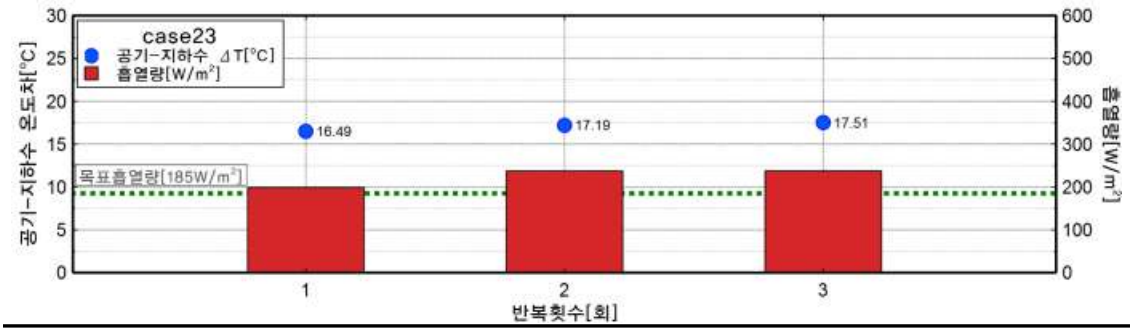


- 시험챔버내 유속 3.0m/s에서 약 16℃의 온도차 조건의 경우 2LPM 유량 적용시 목표흡열량 185W/㎡이하로 나타남.

■ Case 23

<표 3-3-163> Case 23 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 23	1time	3.00	4.00	16.49	0.71	198.63
CASE 23	2time	3.00	4.00	17.19	0.85	237.35
CASE 23	3time	3.00	4.00	17.51	0.85	237.56

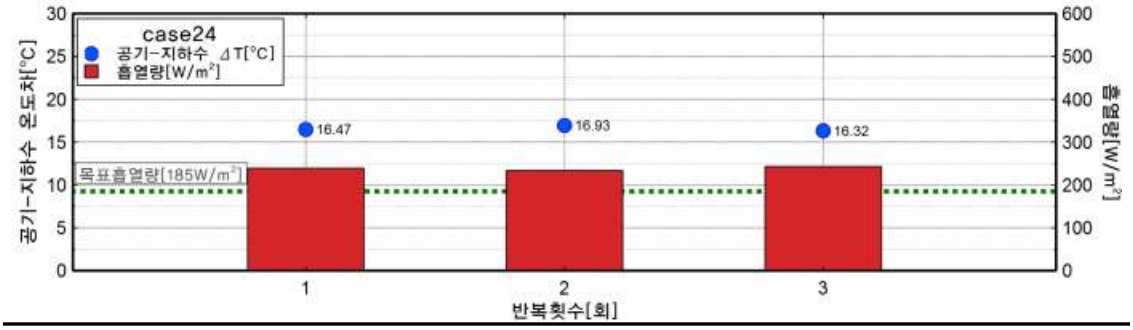


- Case 23의 경우 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 24

<표 3-3-164> Case 24 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 24	1time	3.00	6.00	16.47	0.57	239.11
CASE 24	2time	3.00	6.00	16.93	0.56	233.54
CASE 24	3time	3.00	6.00	16.32	0.58	242.89

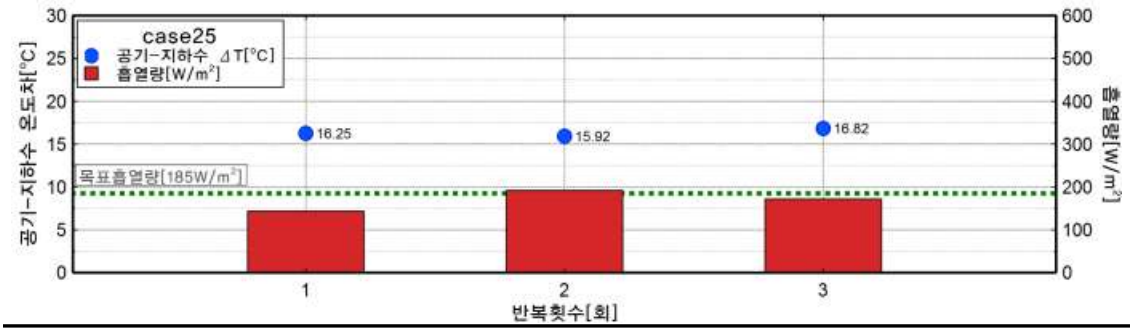


- 시험챔버내 유속 3.0m/s에서 약 17℃의 온도차 조건의 경우 6LPM 유량 적용시 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 25

<표 3-3-165> Case 25 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 25	1time	5.00	2.00	16.25	1.03	143.48
CASE 25	2time	5.00	2.00	15.92	1.38	191.89
CASE 25	3time	5.00	2.00	16.82	1.23	171.83

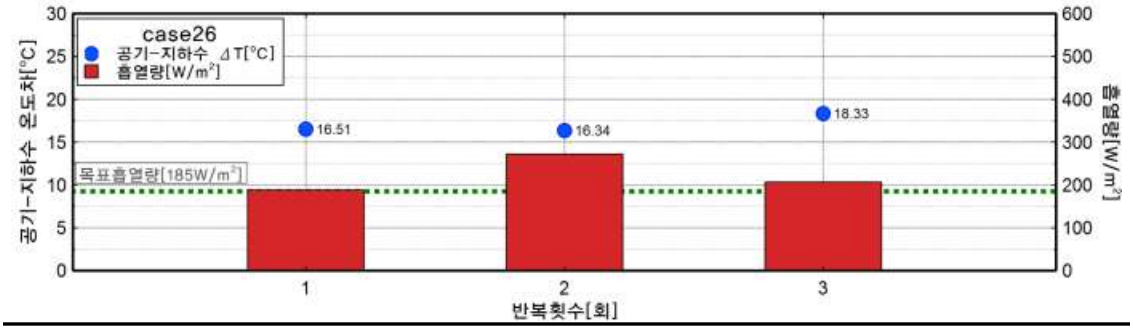


- Case 25의 경우 목표흡열량 185W/㎡ 이하로 나타남.

■ Case 26

<표 3-3-166> Case 26 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 26	1time	5.00	4.00	16.51	0.67	188.08
CASE 26	2time	5.00	4.00	16.34	0.97	271.84
CASE 26	3time	5.00	4.00	18.33	0.74	206.56

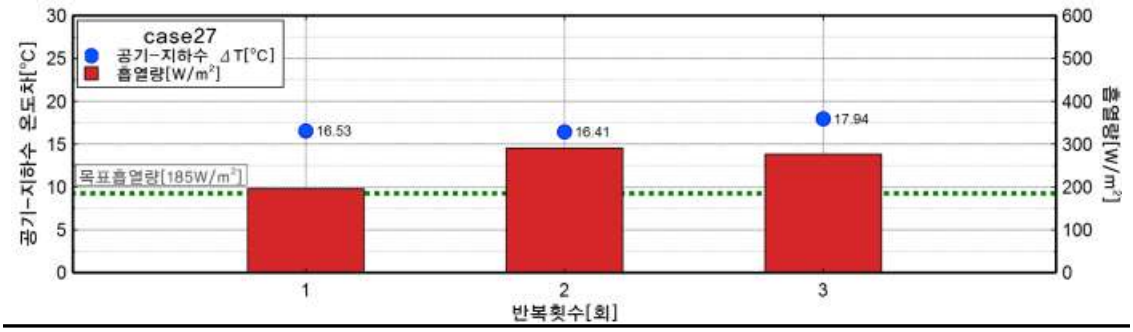


- 시험챔버내 유속 5.0m/s에서 약 17℃의 온도차 조건의 경우 4LPM 유량 적용시 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 27

<표 3-3-167> Case 27 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 27	1time	5.00	6.00	16.53	0.47	195.81
CASE 27	2time	5.00	6.00	16.41	0.69	290.73
CASE 27	3time	5.00	6.00	17.94	0.66	276.52

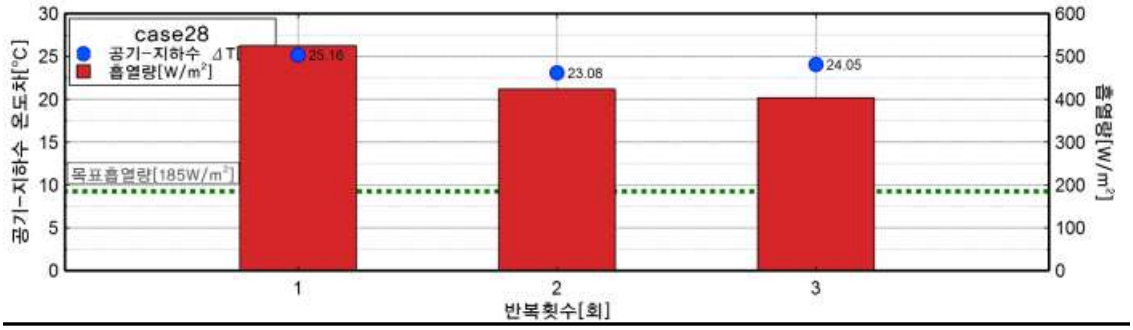


- Case 27의 경우 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 28

<표 3-3-168> Case 28 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 28	1time	1.00	2.00	25.16	3.76	525.06
CASE 28	2time	1.00	2.00	23.08	3.04	423.72
CASE 28	3time	1.00	2.00	24.05	2.89	403.49

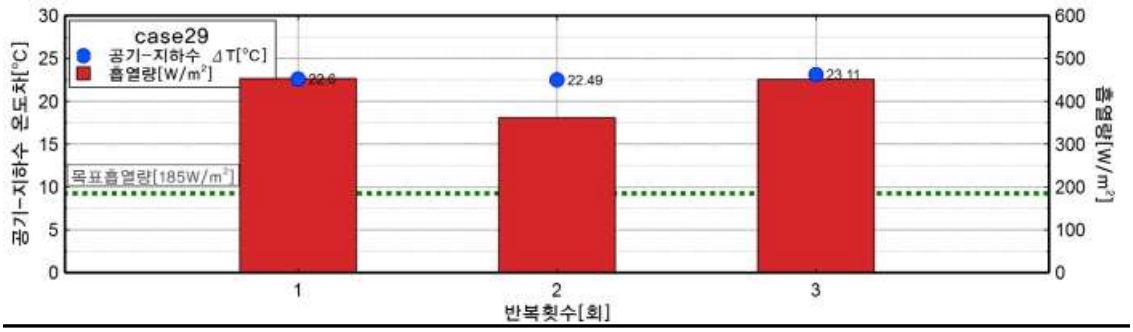


- 시험챔버내 유속 1.0m/s에서 약 23℃의 온도차 조건의 경우 2LPM 유량 적용시 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 29

<표 3-3-169> Case 29 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 29	1time	1.00	4.00	22.60	1.62	453.06
CASE 29	2time	1.00	4.00	22.49	1.30	361.63
CASE 29	3time	1.00	4.00	23.11	1.62	450.96

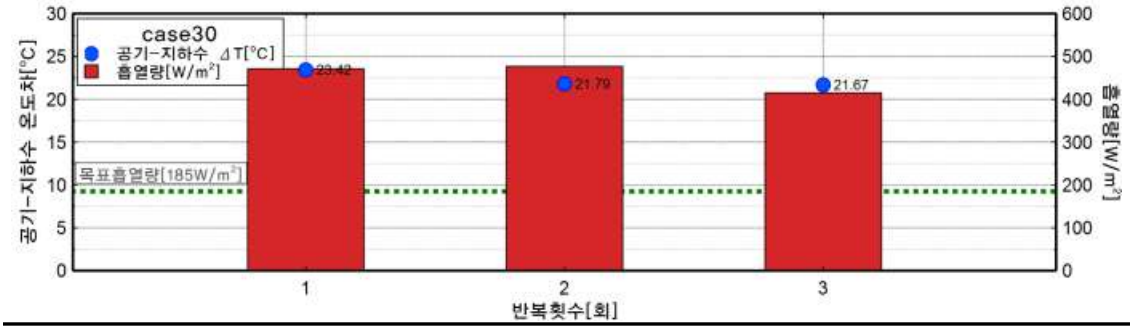


- Case 29의 경우 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 30

<표 3-3-170> Case 30 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 30	1time	1.00	6.00	23.42	1.13	471.14
CASE 30	2time	1.00	6.00	21.79	1.14	476.53
CASE 30	3time	1.00	6.00	21.67	0.99	414.76

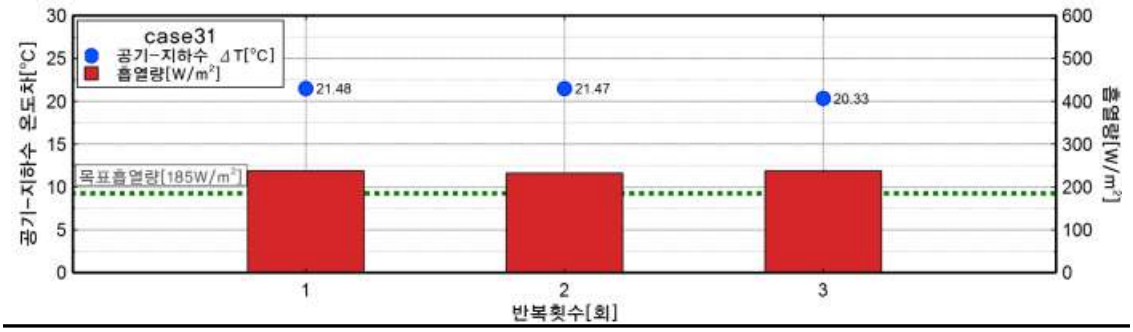


- 시험챔버내 유속 1.0m/s에서 약 22℃의 온도차 조건의 경우 6LPM 유량 적용시 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 31

<표 3-3-171> Case 31 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 31	1time	3.00	2.00	21.48	1.70	237.76
CASE 31	2time	3.00	2.00	21.47	1.67	232.22
CASE 31	3time	3.00	2.00	20.33	1.70	237.50

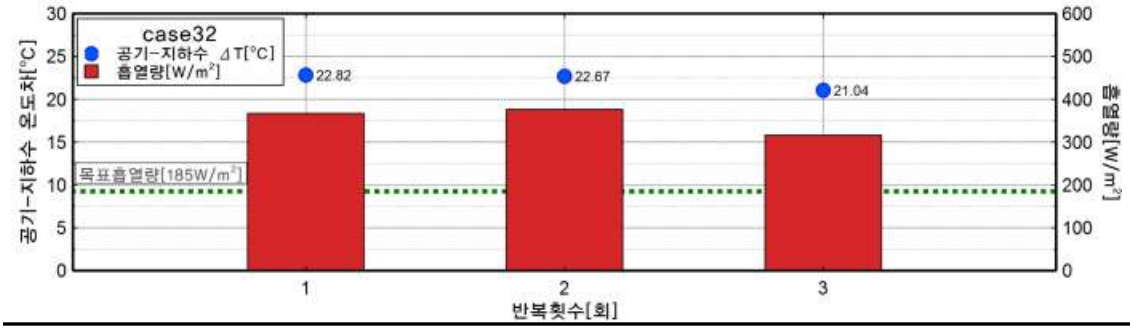


- Case 31의 경우 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 32

<표 3-3-172> Case 32 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 32	1time	3.00	4.00	22.82	1.32	366.86
CASE 32	2time	3.00	4.00	22.67	1.35	376.24
CASE 32	3time	3.00	4.00	21.04	1.13	316.12

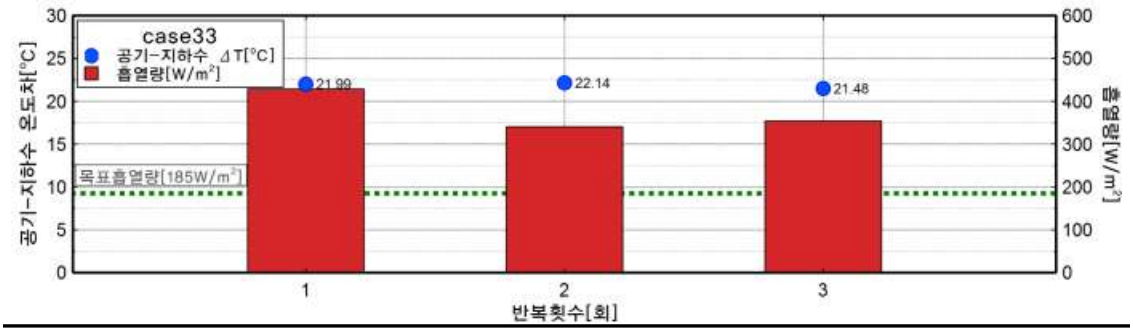


- 시험챔버내 유속 3.0m/s에서 약 22℃의 온도차 조건의 경우 4LPM 유량 적용시 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 33

<표 3-3-173> Case 33 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 33	1time	3.00	6.00	21.99	1.02	428.35
CASE 33	2time	3.00	6.00	22.14	0.81	340.28
CASE 33	3time	3.00	6.00	21.48	0.85	353.74

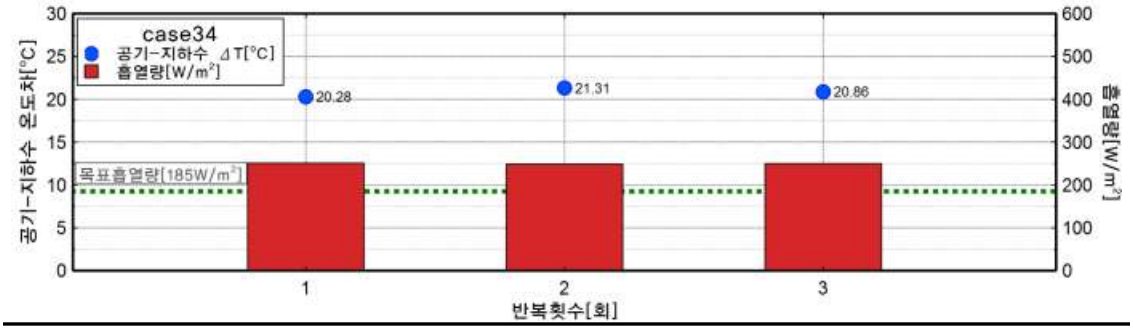


- Case 33의 경우 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 34

<표 3-3-174> Case 34 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 34	1time	5.00	2.00	20.28	1.80	250.84
CASE 34	2time	5.00	2.00	21.31	1.78	248.63
CASE 34	3time	5.00	2.00	20.86	1.79	249.93

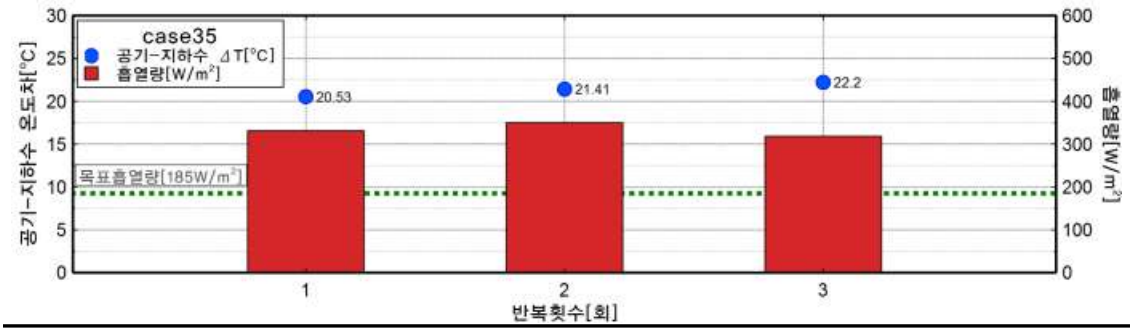


- 시험챔버내 유속 5.0m/s에서 약 21℃의 온도차 조건의 경우 2LPM 유량 적용시 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 35

<표 3-3-175> Case 35 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 35	1time	5.00	4.00	20.53	1.19	331.16
CASE 35	2time	5.00	4.00	21.41	1.25	350.02
CASE 35	3time	5.00	4.00	22.20	1.14	318.12

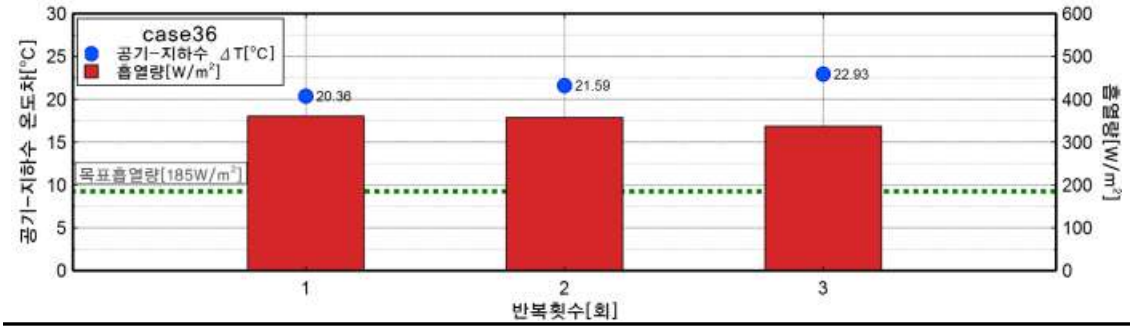


- Case 35의 경우 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

■ Case 36

<표 3-3-176> Case 36 성능시험결과

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
CASE 36	1time	5.00	6.00	20.36	0.86	360.55
CASE 36	2time	5.00	6.00	21.59	0.85	357.15
CASE 36	3time	5.00	6.00	22.93	0.81	336.87

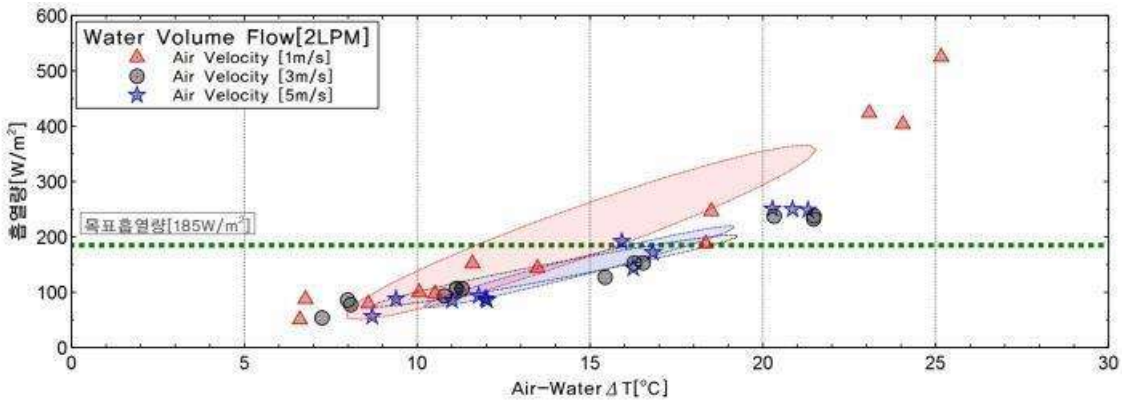


- 시험챔버내 유속 5.0m/s에서 약 21℃의 온도차 조건의 경우 6LPM 유량 적용시 목표흡열량 185W/㎡를 만족하는 것으로 나타남.

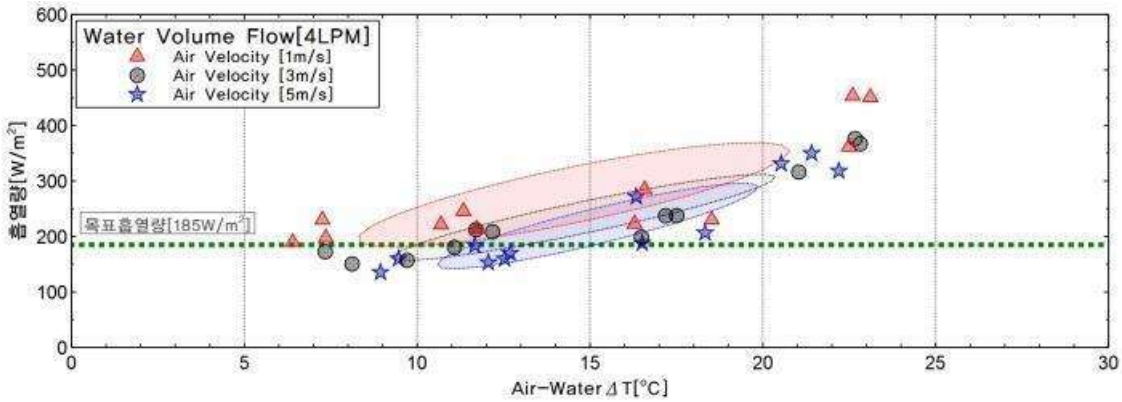
② 변수에 따른 흡열량 특성 분석

㉮ 챔버내 유속에 따른 흡열량 변화

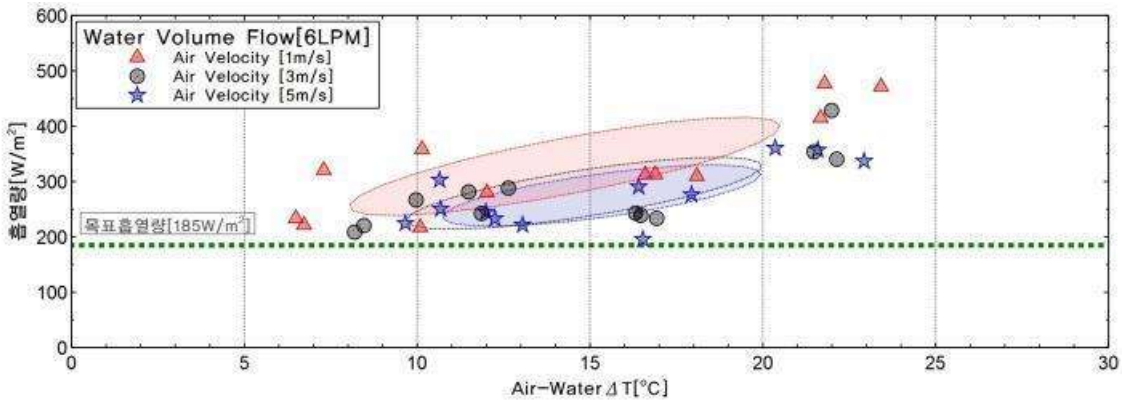
- 챔버내 유속에 따른 흡열량 편차는 비교적 작은 것으로 나타났으며, 지하수 유량이 4LPM 인 경우도 터널내 유속 1m/s 구간에서는 모든 경우 흡열량 기준을 만족하며 ΔT가 15℃ 이상인 경우 모든 유속구간에 대해 흡열량 기준을 만족하는 것으로 나타남.



<그림 3-3-44> 지하수 유량 2LPM 적용시 챔버내 유속에 따른 흡열량 분석



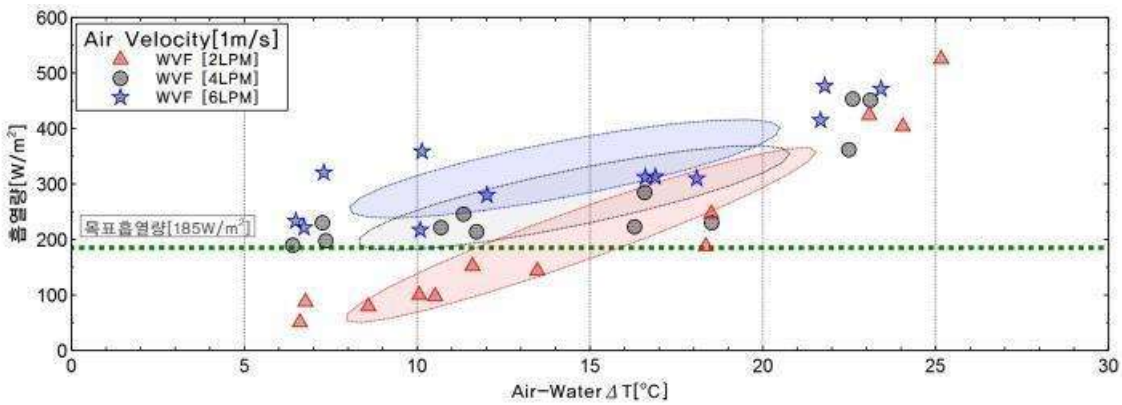
<그림 3-3-45> 지하수 유량 4LPM 적용시 챔버내 유속에 따른 흡열량 분석



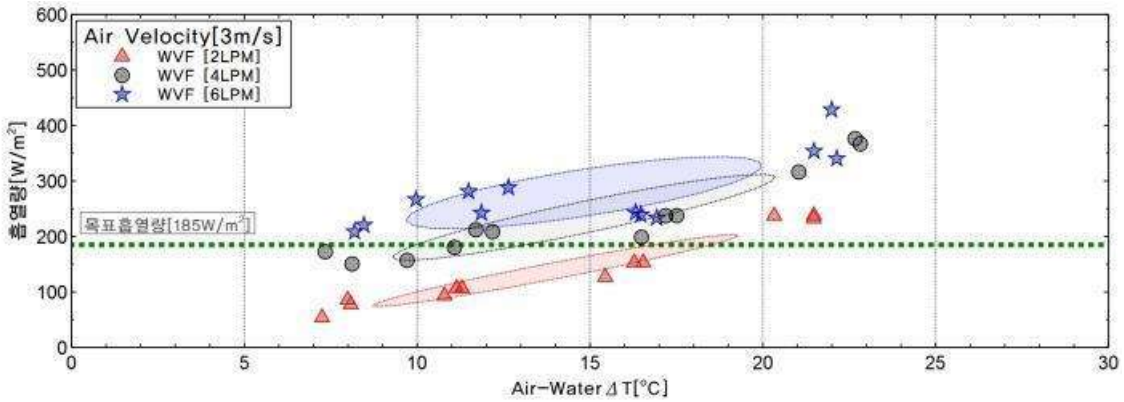
<그림 3-3-46> 지하수 유량 4LPM 적용시 챔버내 유속에 따른 흡열량 분석

- 지하수 유량이 6LPM 이상인 경우 모든 지하수와 공기온도차 구간에서 흡열량 목표치인 185W/㎡을 만족하는 것으로 나타남.

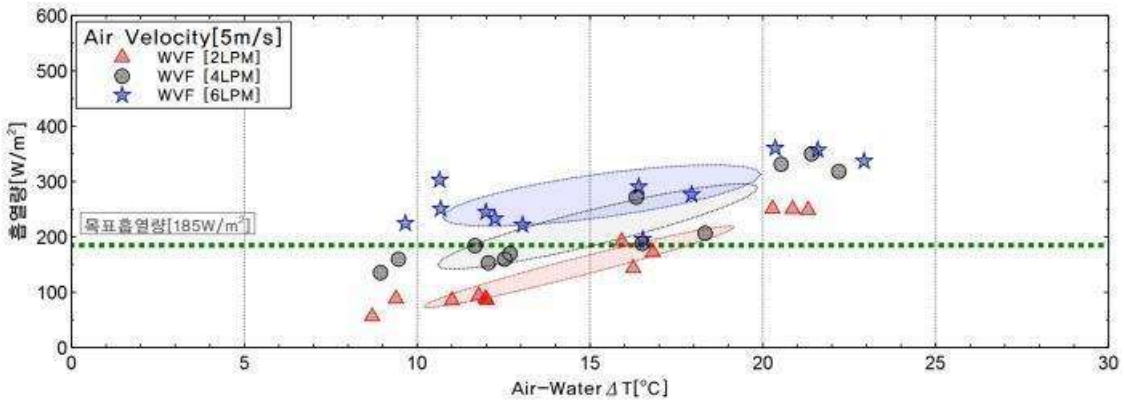
㉯ 지하수량에 따른 흡열량 변화



<그림 3-3-47> 챔버내 유속 1m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석



<그림 3-3-48> 챔버내 유속 3m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석



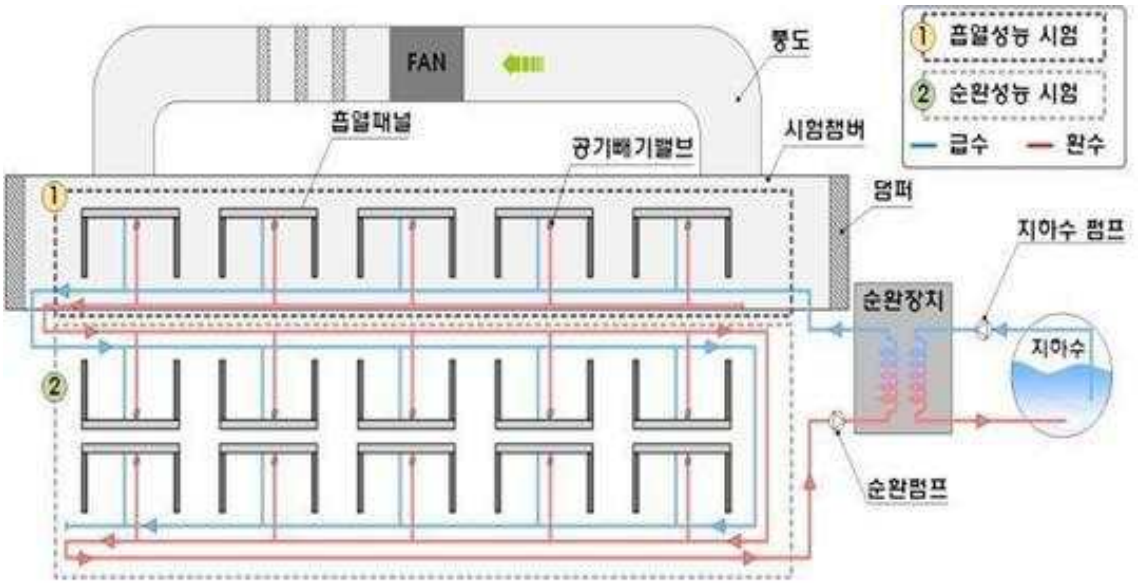
<그림 3-3-49> 챔버내 유속 5m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석

- 앞서 분석한 챔버내 유속(터널내 유속)에 대한 흡열량 변화량 보다 지하수 유량에 따른 흡열량 변화가 더 큰 요인인 것으로 나타남. 챔버내 속도에 관계 없이 6LPM 지하수 유량에서는 모두 목표흡열량을 만족하는 것으로 나타나고 지하수 유량에 따라 비교적 일정한 흡열량 차이가 나는 것으로 판단됨. 따라서 흡열량 증대를 위해서는 지하수 유량의 조절을 통해 흡열량의 증대가 가능할 것으로 예상됨.

(5) 1차 성능시험 결론

(가) 선로부 흡열장치 지하수 순환성능 평가

- 성능시험장치의 공기빼기 밸브 설치를 통해서 모세관 매트내의 잔존 공기를 제거하고 아래와 같이 구성된 시험장치 전체의 흐르는 유량을 확인함. 15개 TLS 패널에 균일한 유량이 흐르는 것을 확인하여 TLS 전체 시스템의 순환성능을 확보할 수 있는 것으로 판단됨.



<그림 3-3-50> 성능시험장치 개요도

(나) 1차 흡열량 성능시험 결과

① 1차 Case 별 흡열성능 시험

<표 3-3-177> Case 별 흡열성능 시험 결과 - 1/4

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)	목표흡열량 만족여부
CASE 01	1time	1.00	2.00	8.59	0.57	79.37	-
CASE 01	2time	1.00	2.00	6.77	0.63	87.62	-
CASE 01	3time	1.00	2.00	6.61	0.36	50.84	-
CASE 02	1time	1.00	4.00	6.40	0.68	189.62	○
CASE 02	2time	1.00	4.00	7.36	0.71	197.68	○
CASE 02	3time	1.00	4.00	7.26	0.82	230.00	○
CASE 03	1time	1.00	6.00	6.49	0.56	233.41	○
CASE 03	2time	1.00	6.00	6.73	0.53	221.37	○
CASE 03	3time	1.00	6.00	7.30	0.77	320.40	○
CASE 04	1time	3.00	2.00	7.99	0.62	85.94	-
CASE 04	2time	3.00	2.00	7.25	0.39	53.80	-
CASE 04	3time	3.00	2.00	8.08	0.56	77.59	-
CASE 05	1time	3.00	4.00	7.34	0.62	172.44	-
CASE 05	2time	3.00	4.00	8.12	0.54	150.52	-
CASE 05	3time	3.00	4.00	9.71	0.56	157.01	-
CASE 06	1time	3.00	6.00	8.46	0.53	220.55	○
CASE 06	2time	3.00	6.00	8.19	0.50	208.56	○
CASE 06	3time	3.00	6.00	9.97	0.64	266.73	○

<표 3-3-178> 1차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 2/4

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)	목표흡열량 만족여부
CASE 07	1time	5.00	2.00	9.39	0.63	88.28	-
CASE 07	2time	5.00	2.00	8.70	0.40	56.46	-
CASE 07	3time	5.00	2.00	11.01	0.61	85.28	-
CASE 08	1time	5.00	4.00	8.94	0.49	135.46	-
CASE 08	2time	5.00	4.00	9.46	0.57	159.76	-
CASE 08	3time	5.00	4.00	12.06	0.55	153.14	-
CASE 09	1time	5.00	6.00	9.66	0.54	224.71	○
CASE 09	2time	5.00	6.00	10.68	0.60	250.66	○
CASE 09	3time	5.00	6.00	11.99	0.58	244.76	○
CASE 10	1time	1.00	2.00	10.06	0.71	99.70	-
CASE 10	2time	1.00	2.00	10.52	0.70	97.76	-
CASE 10	3time	1.00	2.00	11.60	1.09	152.12	-
CASE 11	1time	1.00	4.00	11.34	0.88	245.68	○
CASE 11	2time	1.00	4.00	11.72	0.77	213.79	○
CASE 11	3time	1.00	4.00	10.69	0.79	221.35	○
CASE 12	1time	1.00	6.00	10.14	0.86	358.55	○
CASE 12	2time	1.00	6.00	12.02	0.67	279.89	○
CASE 12	3time	1.00	6.00	10.09	0.52	217.04	○
CASE 13	1time	3.00	2.00	11.30	0.76	106.52	-
CASE 13	2time	3.00	2.00	11.14	0.77	106.91	-
CASE 13	3time	3.00	2.00	10.79	0.67	93.30	-
CASE 14	1time	3.00	4.00	11.08	0.65	180.39	-
CASE 14	2time	3.00	4.00	11.70	0.76	212.11	○
CASE 14	3time	3.00	4.00	12.18	0.75	208.45	○
CASE 15	1time	3.00	6.00	11.49	0.67	281.26	○
CASE 15	2time	3.00	6.00	11.86	0.58	242.44	○
CASE 15	3time	3.00	6.00	12.64	0.69	288.10	○
CASE 16	1time	5.00	2.00	11.98	0.63	88.48	-
CASE 16	2time	5.00	2.00	12.02	0.61	85.46	-
CASE 16	3time	5.00	2.00	11.78	0.67	93.50	-
CASE 17	1time	5.00	4.00	12.69	0.61	169.91	-
CASE 17	2time	5.00	4.00	11.67	0.66	183.99	-
CASE 17	3time	5.00	4.00	12.53	0.57	159.84	-

<표 3-3-179> 1차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 3/4

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)	목표흡열량 만족여부
CASE 18	1time	5.00	6.00	10.65	0.72	302.97	○
CASE 18	2time	5.00	6.00	12.25	0.56	232.94	○
CASE 18	3time	5.00	6.00	13.05	0.53	221.77	○
CASE 19	1time	1.00	2.00	13.48	1.03	143.67	-
CASE 19	2time	1.00	2.00	18.35	1.35	187.77	-
CASE 19	3time	1.00	2.00	18.51	1.77	246.38	○
CASE 20	1time	1.00	4.00	16.29	0.80	222.77	○
CASE 20	2time	1.00	4.00	18.52	0.83	230.13	○
CASE 20	3time	1.00	4.00	16.58	1.02	284.69	○
CASE 21	1time	1.00	6.00	16.60	0.75	312.31	○
CASE 21	2time	1.00	6.00	18.09	0.74	309.71	○
CASE 21	3time	1.00	6.00	16.89	0.75	312.85	○
CASE 22	1time	3.00	2.00	15.44	0.91	126.98	-
CASE 22	2time	3.00	2.00	16.28	1.10	152.96	-
CASE 22	3time	3.00	2.00	16.54	1.10	153.03	-
CASE 23	1time	3.00	4.00	16.49	0.71	198.63	○
CASE 23	2time	3.00	4.00	17.19	0.85	237.35	○
CASE 23	3time	3.00	4.00	17.51	0.85	237.56	○
CASE 24	1time	3.00	6.00	16.47	0.57	239.11	○
CASE 24	2time	3.00	6.00	16.93	0.56	233.54	○
CASE 24	3time	3.00	6.00	16.32	0.58	242.89	○
CASE 25	1time	5.00	2.00	16.25	1.03	143.48	-
CASE 25	2time	5.00	2.00	15.92	1.38	191.89	○
CASE 25	3time	5.00	2.00	16.82	1.23	171.83	-
CASE 26	1time	5.00	4.00	16.51	0.67	188.08	○
CASE 26	2time	5.00	4.00	16.34	0.97	271.84	○
CASE 26	3time	5.00	4.00	18.33	0.74	206.56	○
CASE 27	1time	5.00	6.00	16.53	0.47	195.81	○
CASE 27	2time	5.00	6.00	16.41	0.69	290.73	○
CASE 27	3time	5.00	6.00	17.94	0.66	276.52	○
CASE 28	1time	1.00	2.00	25.16	3.76	525.06	○
CASE 28	2time	1.00	2.00	23.08	3.04	423.72	○
CASE 28	3time	1.00	2.00	24.05	2.89	403.49	○

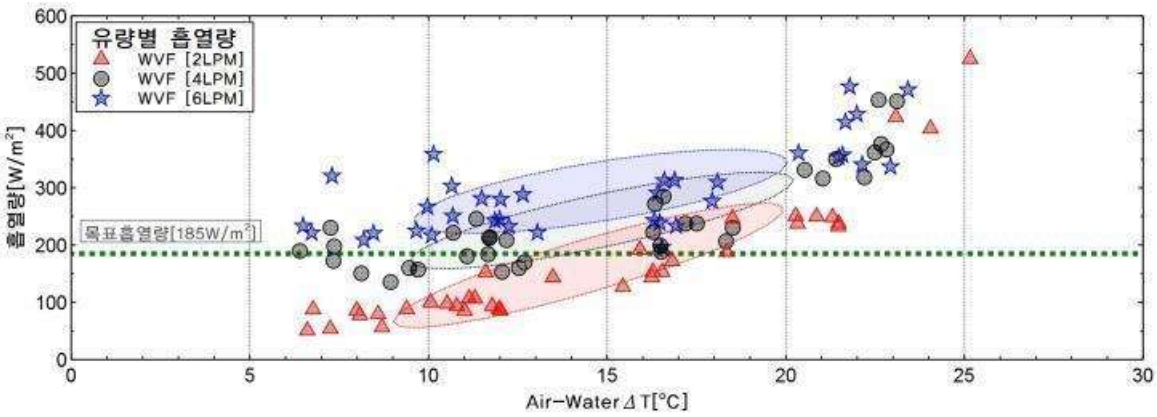
<표 3-3-180> 1차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 4/4

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)	목표흡열량 만족여부
CASE 29	1time	1.00	4.00	22.60	1.62	453.06	○
CASE 29	2time	1.00	4.00	22.49	1.30	361.63	○
CASE 29	3time	1.00	4.00	23.11	1.62	450.96	○
CASE 30	1time	1.00	6.00	23.42	1.13	471.14	○
CASE 30	2time	1.00	6.00	21.79	1.14	476.53	○
CASE 30	3time	1.00	6.00	21.67	0.99	414.76	○
CASE 31	1time	3.00	2.00	21.48	1.70	237.76	○
CASE 31	2time	3.00	2.00	21.47	1.67	232.22	○
CASE 31	3time	3.00	2.00	20.33	1.70	237.50	○
CASE 32	1time	3.00	4.00	22.82	1.32	366.86	○
CASE 32	2time	3.00	4.00	22.67	1.35	376.24	○
CASE 32	3time	3.00	4.00	21.04	1.13	316.12	○
CASE 33	1time	3.00	6.00	21.99	1.02	428.35	○
CASE 33	2time	3.00	6.00	22.14	0.81	340.28	○
CASE 33	3time	3.00	6.00	21.48	0.85	353.74	○
CASE 34	1time	5.00	2.00	20.28	1.80	250.84	○
CASE 34	2time	5.00	2.00	21.31	1.78	248.63	○
CASE 34	3time	5.00	2.00	20.86	1.79	249.93	○
CASE 35	1time	5.00	4.00	20.53	1.19	331.16	○
CASE 35	2time	5.00	4.00	21.41	1.25	350.02	○
CASE 35	3time	5.00	4.00	22.20	1.14	318.12	○
CASE 36	1time	5.00	6.00	20.36	0.86	360.55	○
CASE 36	2time	5.00	6.00	21.59	0.85	357.15	○
CASE 36	3time	5.00	6.00	22.93	0.81	336.87	○

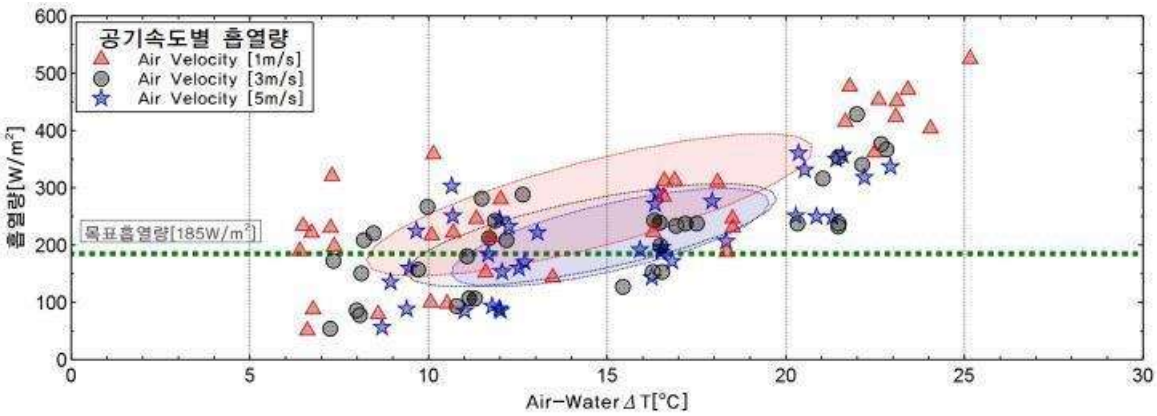
- 총 108회 성능시험결과 위와 73회 목표흡열량 기준을 만족했으며 특히 6LPM에서는 모든 경우에 대해서 목표흡열량 기준을 만족하는 것으로 나타남.

② 변수에 따른 흡열량 변화(1차 성능시험)

- 챔버내 유속에 따른 흡열량 편차는 비교적 작은 것으로 나타나며 흡열량은 지하수의 유량과 관계가 높은 것을 알 수 있었으며, 지하수 유량이 6LPM 이상인 경우 지하수와 공기의 온도차에 관계 없이 모든 경우에 대해 흡열량 목표치인 185W/㎡을 만족하는 것으로 나타남.



<그림 3-3-51> TLS 패널내 지하수 유량에 따른 흡열량 분석



<그림 3-3-52> 챔버내 기류속도에 따른 흡열량 분석

- 지하수 유량이 4LPM 인 경우도 터널내 유속 1m/s 구간에서는 모든 경우 흡열량 기준을 만족하며 ΔT가 15℃ 이상인 경우 모든 유속구간에 대해 흡열량 기준을 만족하는 것으로 나타남.

(다) 결론

- TLS 시스템의 실험실 조건 성능시험결과 순환장치를 통한 TLS 패널의 순환성능 및 목표흡열량 달성이 가능함을 확인함. 또한 챔버내 유속에 따른 흡열량 편차보다는 지하수의 유량에 따라 흡열량의 편차가 크게 나타나므로 터널내 공기온도 - 지하수 온도의 차이와 함께 지하수 유량을 조절하여 목표 흡열량을 조정할 수 있을 것으로 판단됨.

(6) 2차 성능 시험

- 1차 성능시험과는 달리 하절기에 수행된 시험조건으로 인해서 외기온도가 높아 냉각수와 공기온도차가 5℃ 이상 발생하여 Case 01-09 의 시험 수행이 불가해 온도차 5℃ 시험조건을 제외한 총 27 Case에 대해서 5회 반복 시험을 통해 성능 시험 결과를 도출함. 온도차는 초기 지하수 온도와 공기온도의 차이를 나타내며 성능시험이 진행되는 동안의 평균값으로 기록함.

<표 3-3-181> 성능시험 Case

구분	온도차 [ΔT]	챔버유속 [m/s]	냉각수량 [lpm]	비고
Case 10	10℃	1	2	-
Case 11	10℃	1	4	-
Case 12	10℃	1	6	-
Case 13	10℃	3	2	-
Case 14	10℃	3	4	-
Case 15	10℃	3	6	-
Case 16	10℃	5	2	-
Case 17	10℃	5	4	-
Case 18	10℃	5	6	-
Case 19	15℃	1	2	-
Case 20	15℃	1	4	-
Case 21	15℃	1	6	-
Case 22	15℃	3	2	-
Case 23	15℃	3	4	-
Case 24	15℃	3	6	-
Case 25	15℃	5	2	-
Case 26	15℃	5	4	-
Case 27	15℃	5	6	-
Case 28	20℃	1	2	-
Case 29	20℃	1	4	-
Case 30	20℃	1	6	-
Case 31	20℃	3	2	-
Case 32	20℃	3	4	-
Case 33	20℃	3	6	-
Case 34	20℃	5	2	-
Case 35	20℃	5	4	-
Case 36	20℃	5	6	-

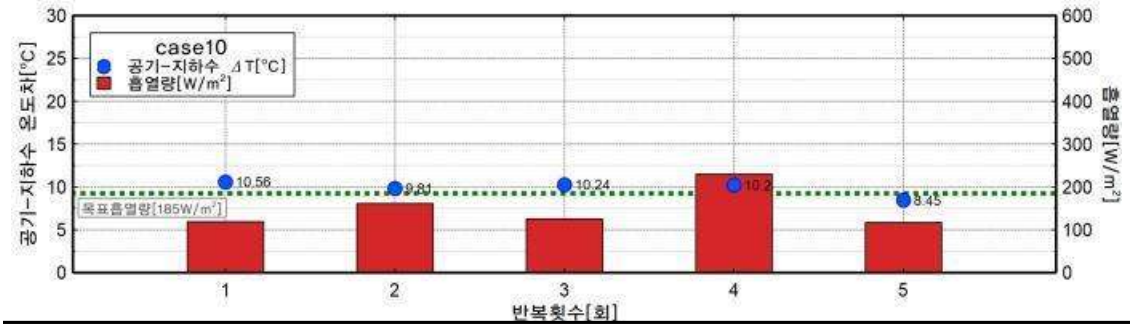
(7) 2차 성능시험결과

(가) Case 별 흡열량 성능시험

■ Case 10

<표 3-3-182> Case 10 성능시험결과

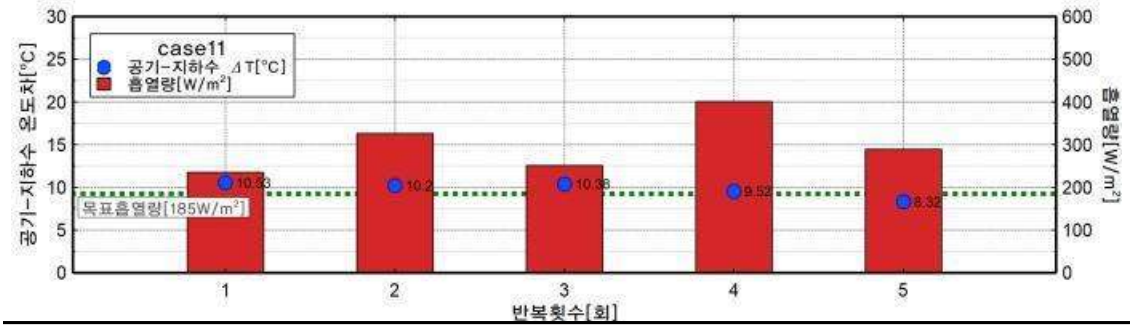
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 10	1time	1.00	2.00	10.56	0.85	118.93
Case 10	2time	1.00	2.00	9.81	1.16	161.24
Case 10	3time	1.00	2.00	10.24	0.90	125.48
Case 10	4time	1.00	2.00	10.20	1.65	229.79
Case 10	5time	1.00	2.00	8.45	0.84	117.01



■ Case 11

<표 3-3-183> Case 11 성능시험결과

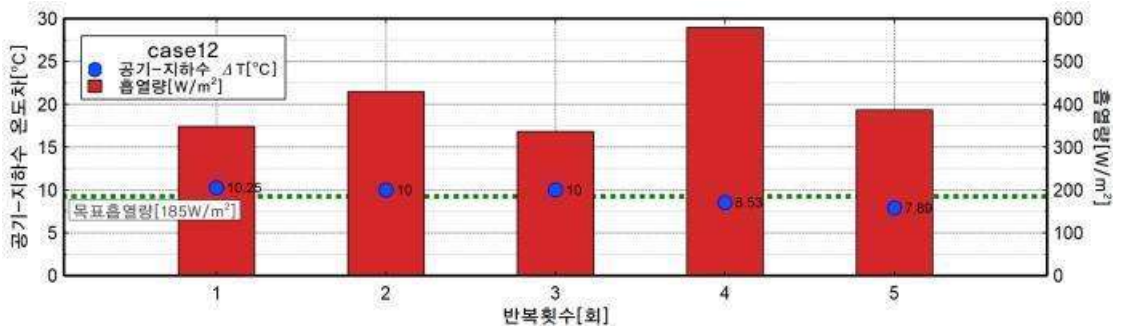
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 11	1time	1.00	4.00	10.53	0.84	235.10
Case 11	2time	1.00	4.00	10.20	1.17	326.05
Case 11	3time	1.00	4.00	10.38	0.90	251.05
Case 11	4time	1.00	4.00	9.52	1.44	400.74
Case 11	5time	1.00	4.00	8.32	1.04	289.00



■ Case 12

<표 3-3-184> Case 12 성능시험결과

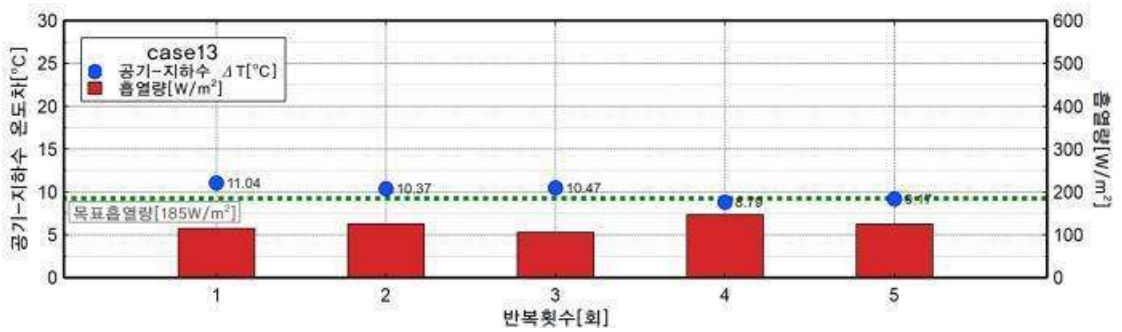
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 12	1time	1.00	6.00	10.25	0.83	347.95
Case 12	2time	1.00	6.00	10.00	1.03	429.34
Case 12	3time	1.00	6.00	10.00	0.80	336.34
Case 12	4time	1.00	6.00	8.53	1.38	578.98
Case 12	5time	1.00	6.00	7.89	0.92	386.51



■ Case 13

<표 3-3-185> Case 13 성능시험결과

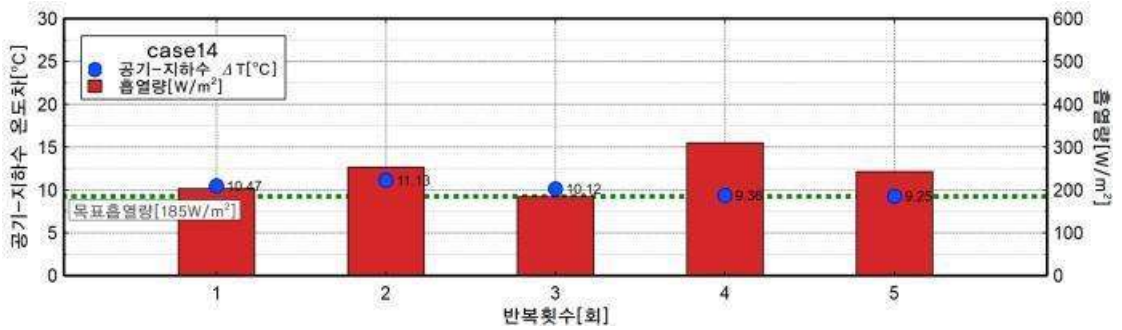
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 13	1time	3.00	2.00	11.04	0.82	114.71
Case 13	2time	3.00	2.00	10.37	0.90	125.52
Case 13	3time	3.00	2.00	10.47	0.76	105.57
Case 13	4time	3.00	2.00	8.79	1.05	146.68
Case 13	5time	3.00	2.00	9.17	0.90	124.87



■ Case 14

<표 3-3-186> Case 14 성능시험결과

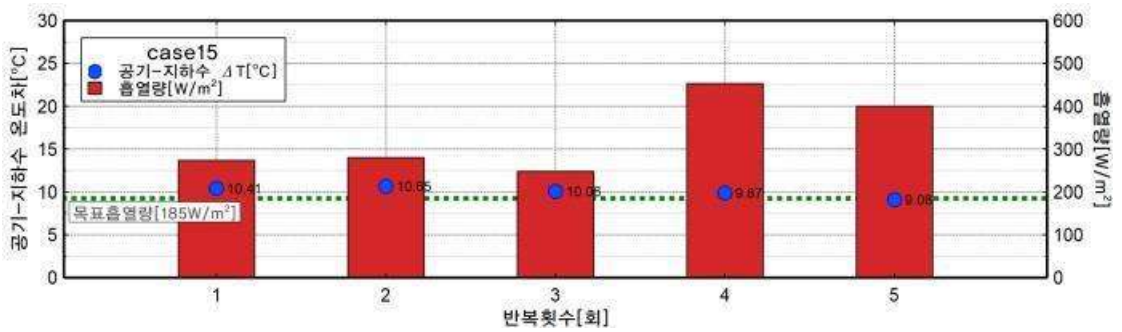
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 14	1time	3.00	4.00	10.47	0.73	202.81
Case 14	2time	3.00	4.00	11.13	0.91	252.92
Case 14	3time	3.00	4.00	10.12	0.66	183.88
Case 14	4time	3.00	4.00	9.36	1.11	309.73
Case 14	5time	3.00	4.00	9.25	0.87	242.79



■ Case 15

<표 3-3-187> Case 15 성능시험결과

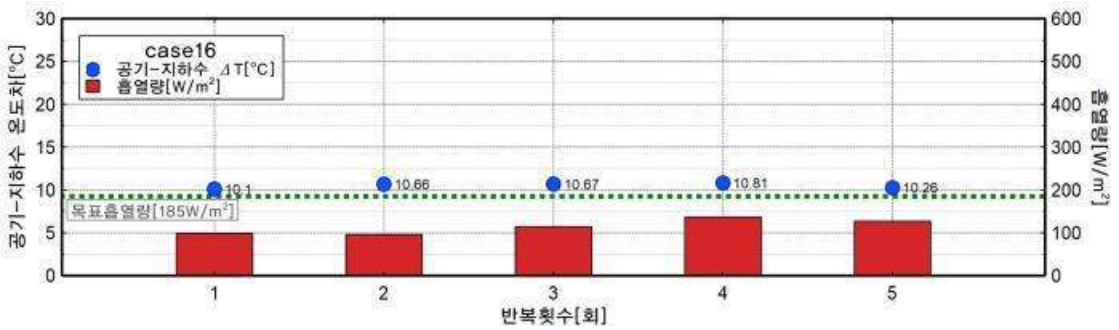
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 15	1time	3.00	6.00	10.41	0.65	273.45
Case 15	2time	3.00	6.00	10.65	0.67	280.12
Case 15	3time	3.00	6.00	10.06	0.59	247.79
Case 15	4time	3.00	6.00	9.87	1.08	452.86
Case 15	5time	3.00	6.00	9.08	0.96	400.08



■ Case 16

<표 3-3-188> Case 16 성능시험결과

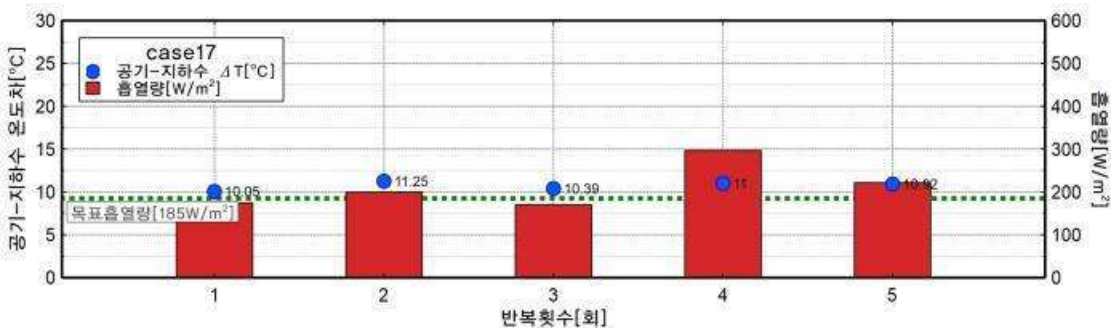
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 16	1time	5.00	2.00	10.10	0.71	98.60
Case 16	2time	5.00	2.00	10.66	0.69	95.96
Case 16	3time	5.00	2.00	10.67	0.82	114.21
Case 16	4time	5.00	2.00	10.81	0.98	136.59
Case 16	5time	5.00	2.00	10.26	0.91	126.86



■ Case 17

<표 3-3-189> Case 17 성능시험결과

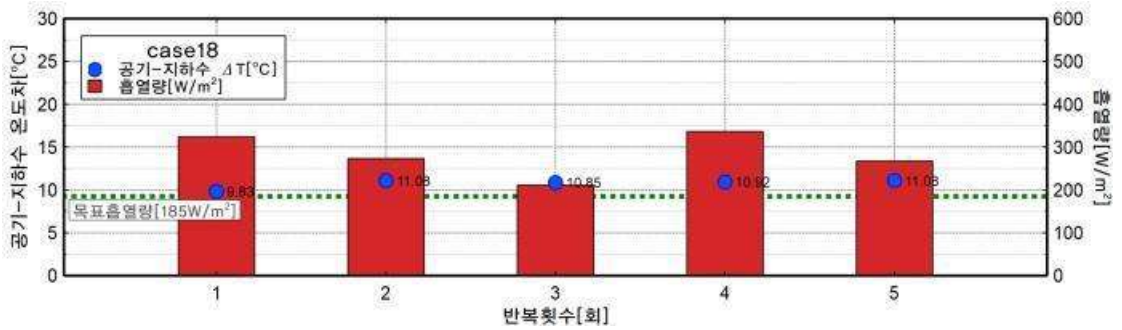
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 17	1time	5.00	4.00	10.05	0.63	174.65
Case 17	2time	5.00	4.00	11.25	0.72	199.68
Case 17	3time	5.00	4.00	10.39	0.61	170.28
Case 17	4time	5.00	4.00	11.00	1.06	296.51
Case 17	5time	5.00	4.00	10.92	0.79	221.57



■ Case 18

<표 3-3-190> Case 18 성능시험결과

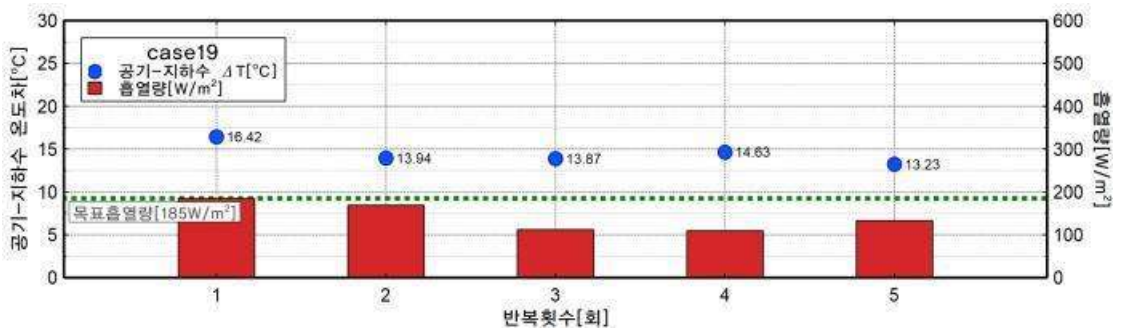
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 18	1time	5.00	6.00	9.83	0.77	323.80
Case 18	2time	5.00	6.00	11.08	0.65	273.18
Case 18	3time	5.00	6.00	10.85	0.50	211.10
Case 18	4time	5.00	6.00	10.92	0.80	336.36
Case 18	5time	5.00	6.00	11.08	0.64	267.25



■ Case 19

<표 3-3-191> Case 19 성능시험결과

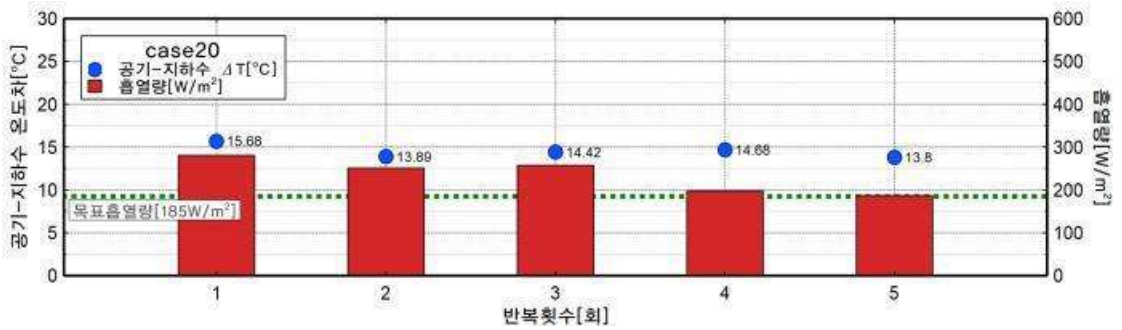
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 19	1time	1.00	2.00	16.42	1.32	184.10
Case 19	2time	1.00	2.00	13.94	1.21	169.10
Case 19	3time	1.00	2.00	13.87	0.80	112.00
Case 19	4time	1.00	2.00	14.63	0.78	109.27
Case 19	5time	1.00	2.00	13.23	0.95	132.87



■ Case 20

<표 3-3-192> Case 20 성능시험결과

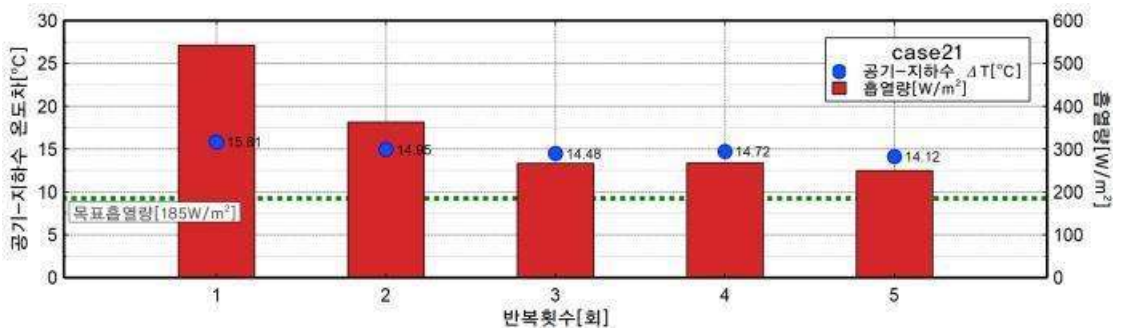
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 20	1time	1.00	4.00	15.68	1.01	280.54
Case 20	2time	1.00	4.00	13.89	0.90	250.75
Case 20	3time	1.00	4.00	14.42	0.92	257.36
Case 20	4time	1.00	4.00	14.68	0.71	197.63
Case 20	5time	1.00	4.00	13.80	0.67	186.79



■ Case 21

<표 3-3-193> Case 21 성능시험결과

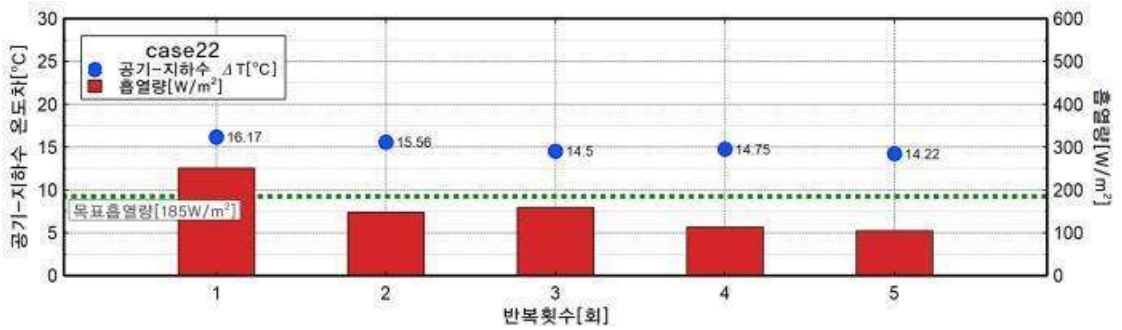
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 21	1time	1.00	6.00	15.81	1.30	542.26
Case 21	2time	1.00	6.00	14.95	0.87	362.96
Case 21	3time	1.00	6.00	14.48	0.64	266.68
Case 21	4time	1.00	6.00	14.72	0.64	267.66
Case 21	5time	1.00	6.00	14.12	0.60	249.72



■ Case 22

<표 3-3-194> Case 22 성능시험결과

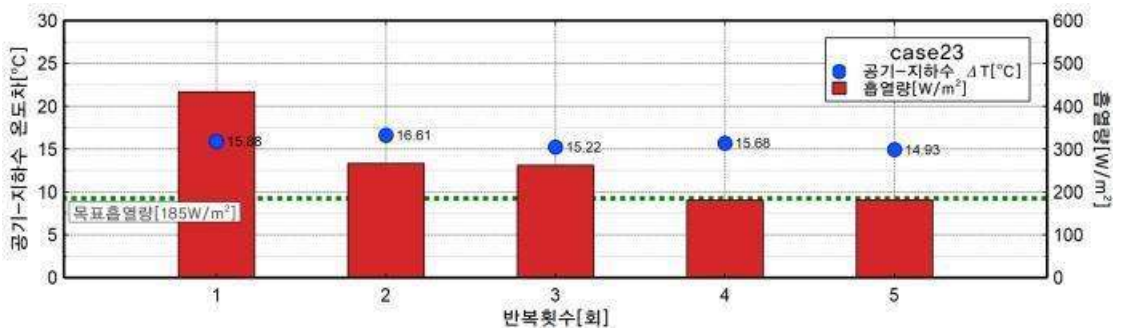
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 22	1time	3.00	2.00	16.17	1.80	250.75
Case 22	2time	3.00	2.00	15.56	1.06	147.67
Case 22	3time	3.00	2.00	14.50	1.14	158.64
Case 22	4time	3.00	2.00	14.75	0.81	113.16
Case 22	5time	3.00	2.00	14.22	0.75	104.44



■ Case 23

<표 3-3-195> Case 23 성능시험결과

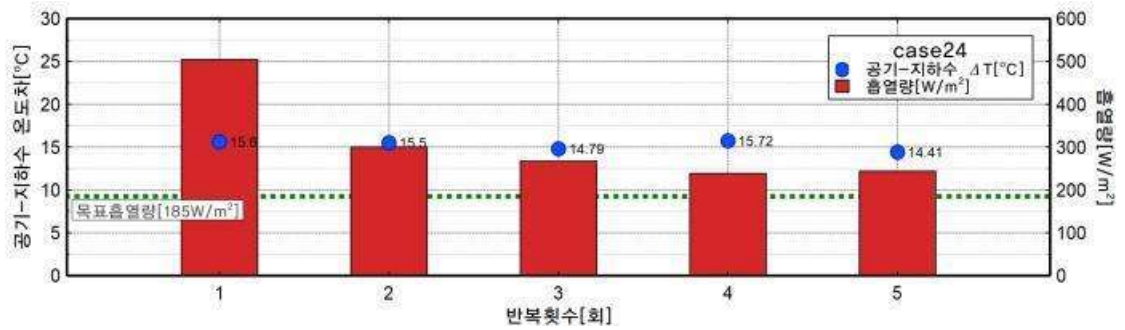
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 23	1time	3.00	4.00	15.88	1.55	433.54
Case 23	2time	3.00	4.00	16.61	0.96	266.55
Case 23	3time	3.00	4.00	15.22	0.94	262.32
Case 23	4time	3.00	4.00	15.68	0.65	180.92
Case 23	5time	3.00	4.00	14.93	0.65	181.89



■ Case 24

<표 3-3-196> Case 24 성능시험결과

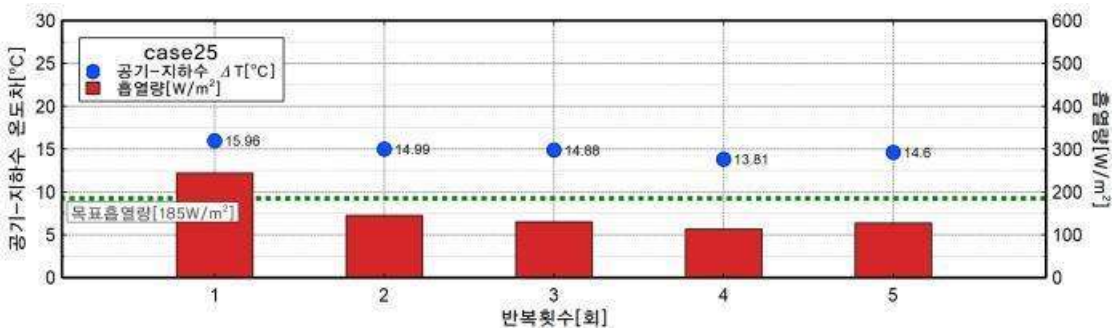
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 24	1time	3.00	6.00	15.60	1.20	504.06
Case 24	2time	3.00	6.00	15.50	0.72	299.95
Case 24	3time	3.00	6.00	14.79	0.64	267.16
Case 24	4time	3.00	6.00	15.72	0.57	238.62
Case 24	5time	3.00	6.00	14.41	0.58	243.72



■ Case 25

<표 3-3-197> Case 25 성능시험결과

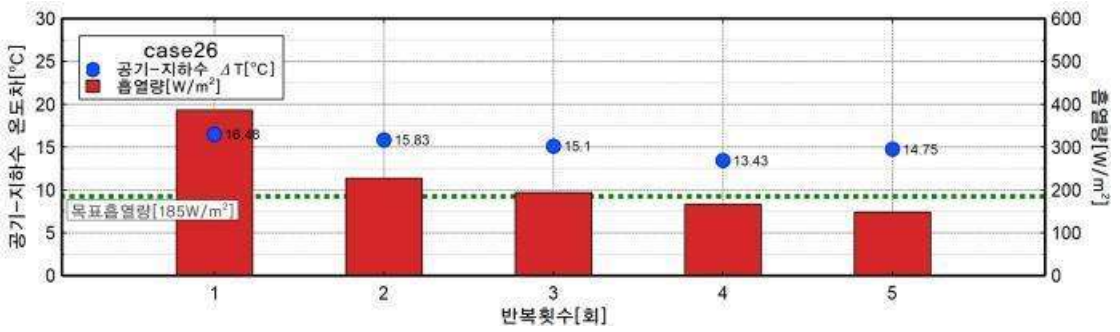
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 25	1time	5.00	2.00	15.96	1.75	243.78
Case 25	2time	5.00	2.00	14.99	1.04	145.12
Case 25	3time	5.00	2.00	14.88	0.93	130.10
Case 25	4time	5.00	2.00	13.81	0.81	113.28
Case 25	5time	5.00	2.00	14.60	0.91	127.38



■ Case 26

<표 3-3-198> Case 26 성능시험결과

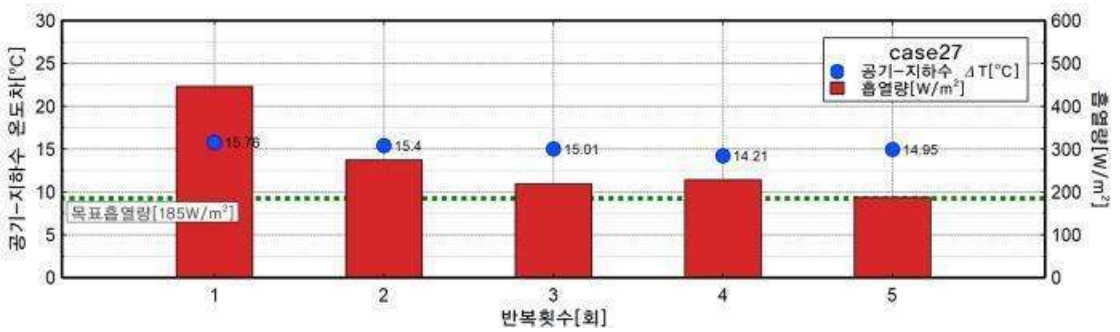
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 26	1time	5.00	4.00	16.48	1.38	386.18
Case 26	2time	5.00	4.00	15.83	0.81	227.16
Case 26	3time	5.00	4.00	15.10	0.70	193.92
Case 26	4time	5.00	4.00	13.43	0.60	166.61
Case 26	5time	5.00	4.00	14.75	0.53	148.12



■ Case 27

<표 3-3-199> Case 27 성능시험결과

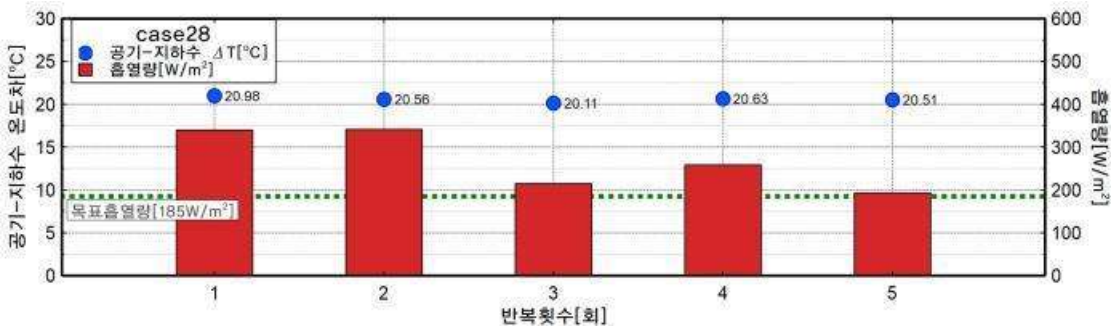
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 27	1time	5.00	6.00	15.76	1.07	446.05
Case 27	2time	5.00	6.00	15.40	0.66	274.46
Case 27	3time	5.00	6.00	15.01	0.52	218.72
Case 27	4time	5.00	6.00	14.21	0.55	228.26
Case 27	5time	5.00	6.00	14.95	0.45	187.46



■ Case 28

<표 3-3-200> Case 28 성능시험결과

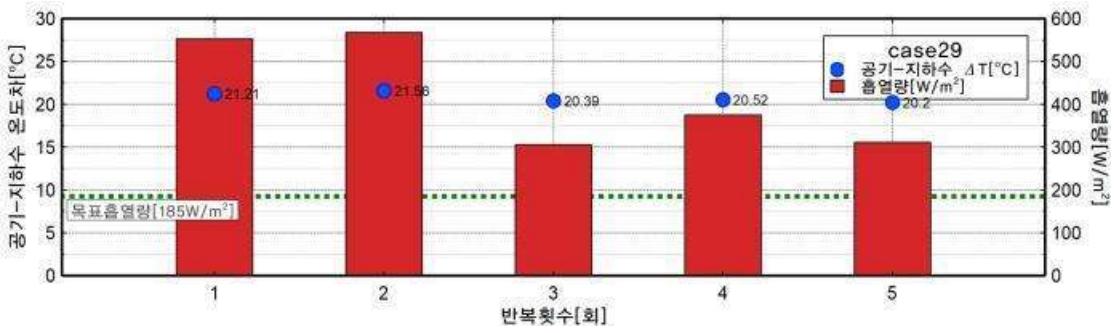
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 28	1time	1.00	2.00	20.98	2.44	339.68
Case 28	2time	1.00	2.00	20.56	2.45	341.14
Case 28	3time	1.00	2.00	20.11	1.54	214.77
Case 28	4time	1.00	2.00	20.63	1.85	258.39
Case 28	5time	1.00	2.00	20.51	1.38	192.92



■ Case 29

<표 3-3-201> Case 29 성능시험결과

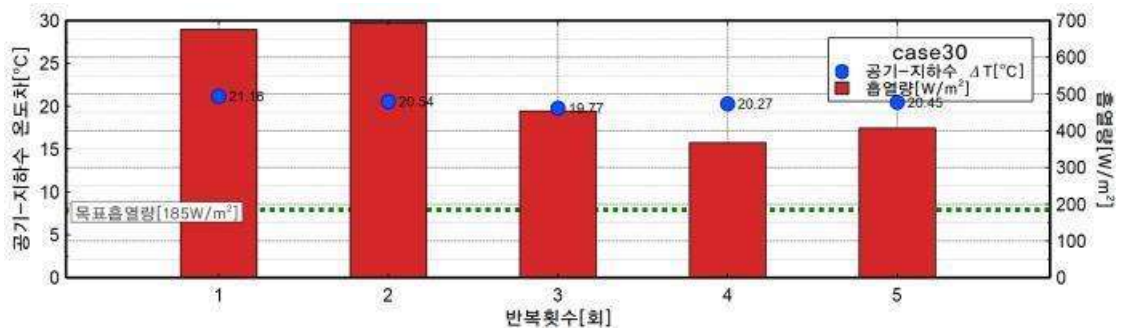
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 29	1time	1.00	4.00	21.21	1.98	552.34
Case 29	2time	1.00	4.00	21.56	2.03	567.26
Case 29	3time	1.00	4.00	20.39	1.10	305.58
Case 29	4time	1.00	4.00	20.52	1.34	374.85
Case 29	5time	1.00	4.00	20.20	1.11	310.94



■ Case 30

<표 3-3-202> Case 30 성능시험결과

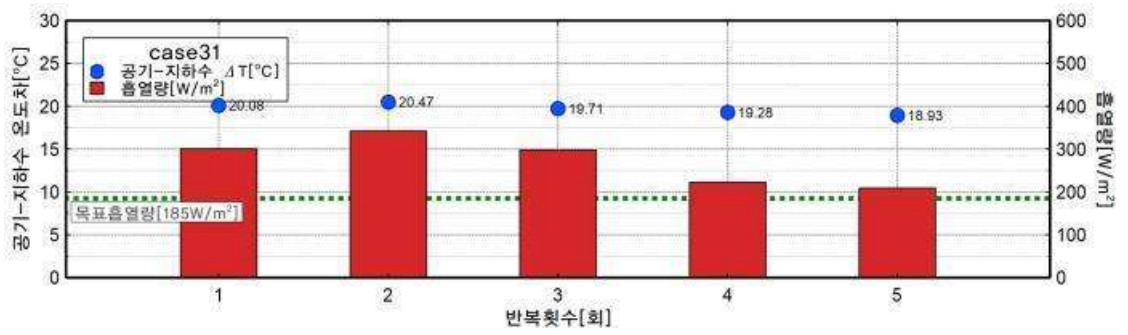
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 30	1time	1.00	6.00	21.16	1.61	675.47
Case 30	2time	1.00	6.00	20.54	1.66	693.76
Case 30	3time	1.00	6.00	19.77	1.08	453.24
Case 30	4time	1.00	6.00	20.27	0.88	367.34
Case 30	5time	1.00	6.00	20.45	0.97	407.03



■ Case 31

<표 3-3-203> Case 31 성능시험결과

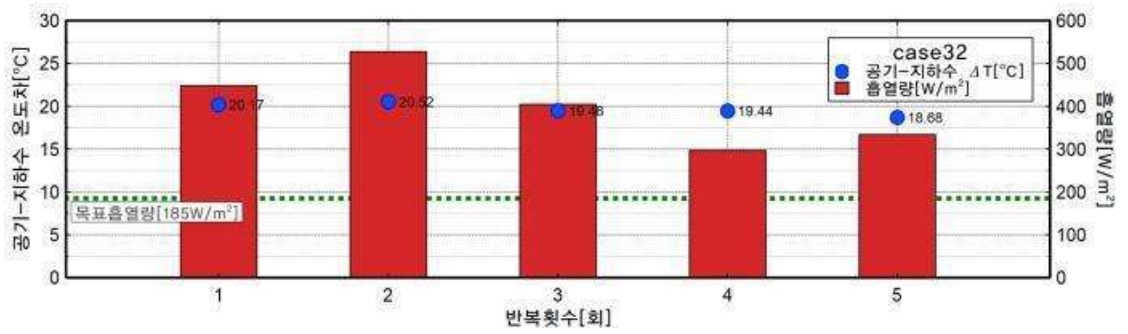
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 31	1time	3.00	2.00	20.08	2.16	300.80
Case 31	2time	3.00	2.00	20.47	2.45	342.17
Case 31	3time	3.00	2.00	19.71	2.13	297.69
Case 31	4time	3.00	2.00	19.28	1.60	222.54
Case 31	5time	3.00	2.00	18.93	1.50	209.04



■ Case 32

<표 3-3-204> Case 32 성능시험결과

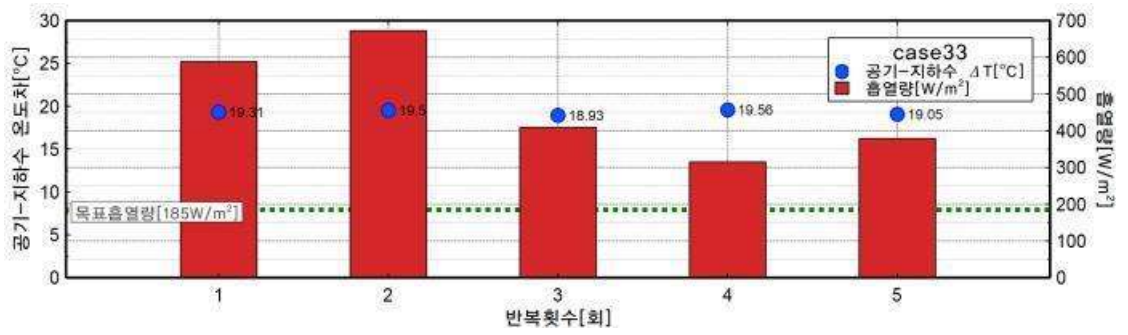
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 32	1time	3.00	4.00	20.17	1.60	447.60
Case 32	2time	3.00	4.00	20.52	1.89	527.28
Case 32	3time	3.00	4.00	19.48	1.45	404.34
Case 32	4time	3.00	4.00	19.44	1.06	296.73
Case 32	5time	3.00	4.00	18.68	1.20	333.96



■ Case 33

<표 3-3-205> Case 33 성능시험결과

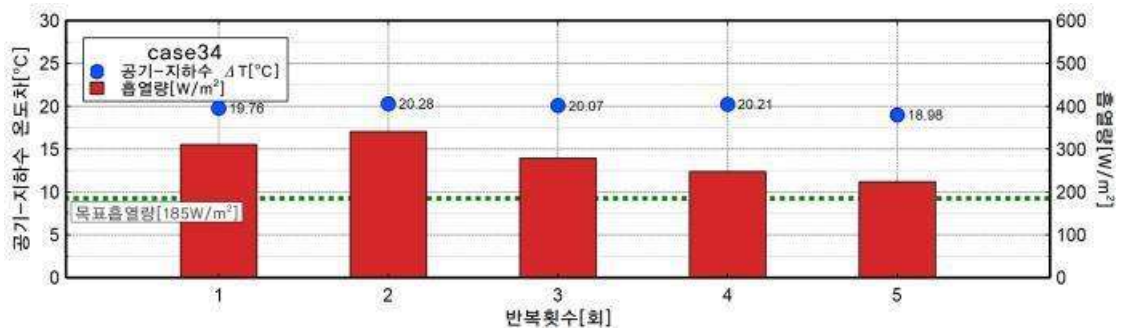
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 33	1time	3.00	6.00	19.31	1.40	587.84
Case 33	2time	3.00	6.00	19.50	1.61	672.22
Case 33	3time	3.00	6.00	18.93	0.98	408.94
Case 33	4time	3.00	6.00	19.56	0.75	314.77
Case 33	5time	3.00	6.00	19.05	0.90	378.56



■ Case 34

<표 3-3-206> Case 34 성능시험결과

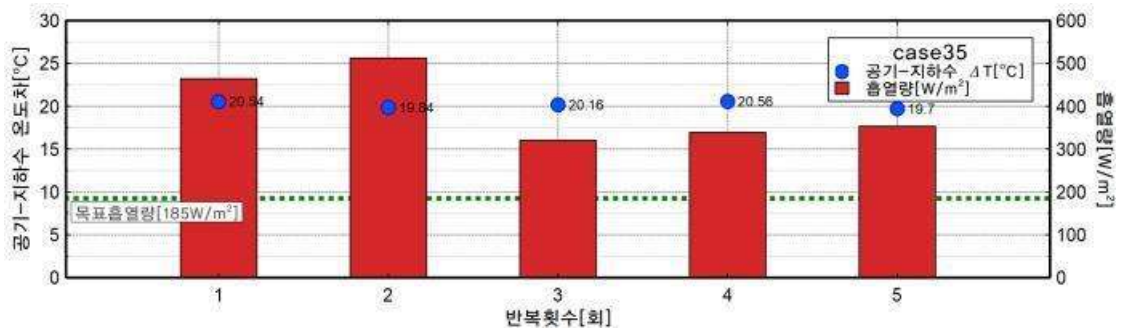
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 34	1time	5.00	2.00	19.76	2.23	310.55
Case 34	2time	5.00	2.00	20.28	2.44	340.68
Case 34	3time	5.00	2.00	20.07	2.00	278.66
Case 34	4time	5.00	2.00	20.21	1.77	247.42
Case 34	5time	5.00	2.00	18.98	1.60	223.78



■ Case 35

<표 3-3-207> Case 35 성능시험결과

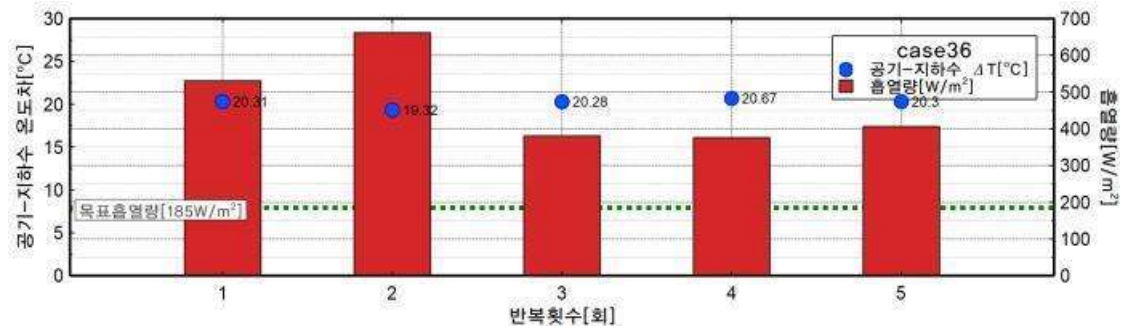
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 35	1time	5.00	4.00	20.54	1.66	464.12
Case 35	2time	5.00	4.00	19.84	1.84	512.36
Case 35	3time	5.00	4.00	20.16	1.15	320.42
Case 35	4time	5.00	4.00	20.56	1.21	338.84
Case 35	5time	5.00	4.00	19.70	1.27	353.31



■ Case 36

<표 3-3-208> Case 36 성능시험결과

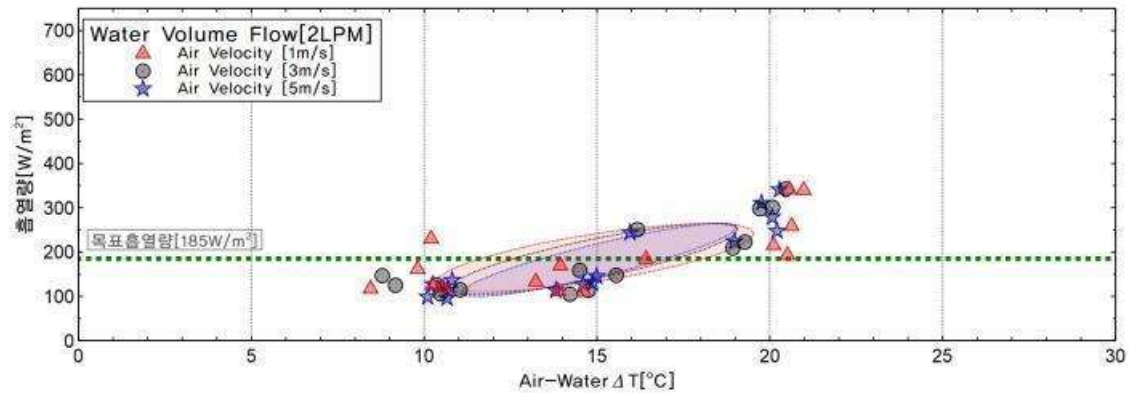
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)
Case 36	1time	5.00	6.00	20.31	1.27	530.11
Case 36	2time	5.00	6.00	19.32	1.58	661.12
Case 36	3time	5.00	6.00	20.28	0.91	380.35
Case 36	4time	5.00	6.00	20.67	0.90	375.60
Case 36	5time	5.00	6.00	20.30	0.97	405.92



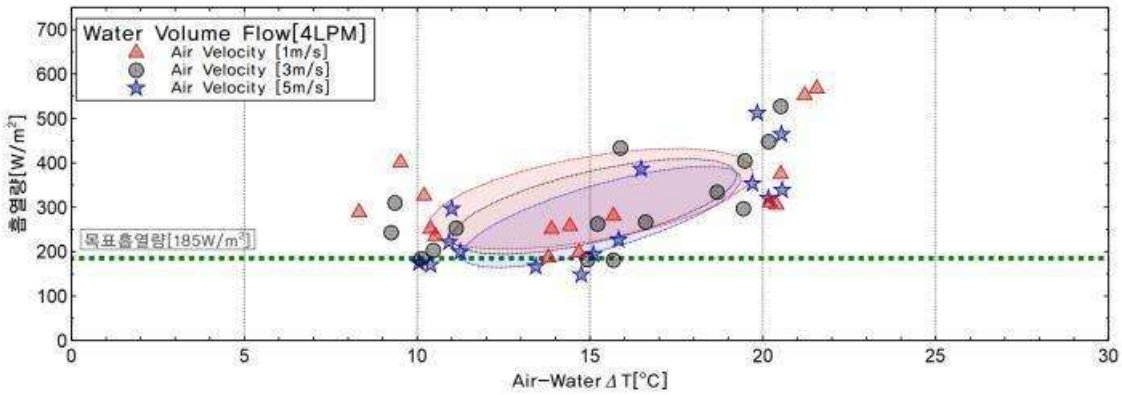
(나) 변수에 따른 흡열량 특성 분석

① 챔버내 유속에 따른 흡열량 변화

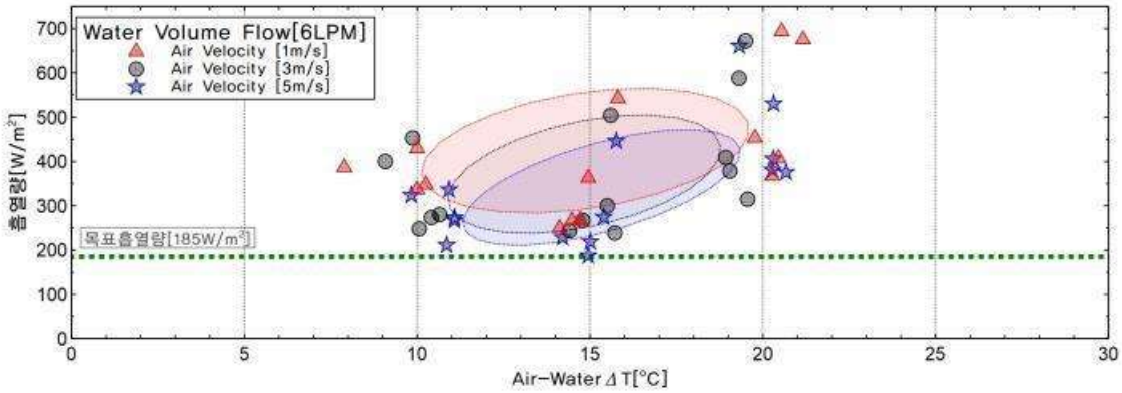
- 2차 성능시험도 1차 시험과 유사하게 챔버내 유속에 따른 흡열량 편차는 비교적 작은 것으로 나타났으며, 지하수 유량이 6LPM 이상인 경우 모든 온도차 구간에서 흡열량 목표치인 185W/㎡을 만족하는 것으로 나타남.



<그림 3-3-53> 지하수 유량 2LPM 적용시 챔버내 유속에 따른 흡열량 분석



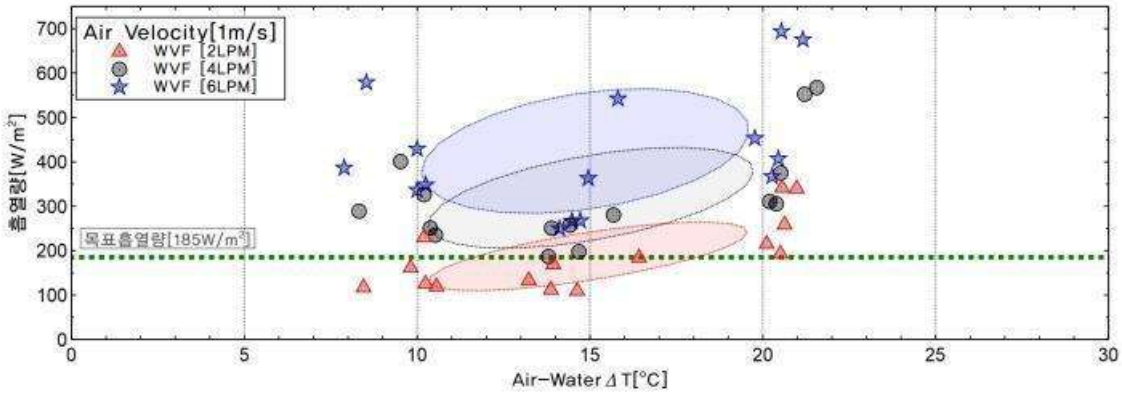
<그림 3-3-54> 지하수 유량 4LPM 적용시 챔버내 유속에 따른 흡열량 분석



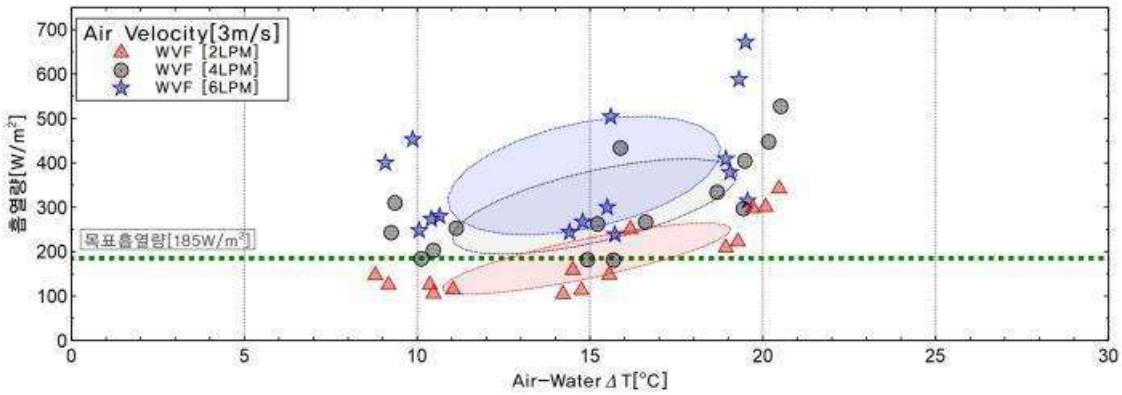
<그림 3-3-55> 지하수 유량 6LPM 적용시 챔버내 유속에 따른 흡열량 분석

- 지하수 유량이 6LPM 이상인 경우 모든 지하수와 공기온도차 구간에서 흡열량 목표치인 185W/㎡을 만족하는 것으로 나타남.

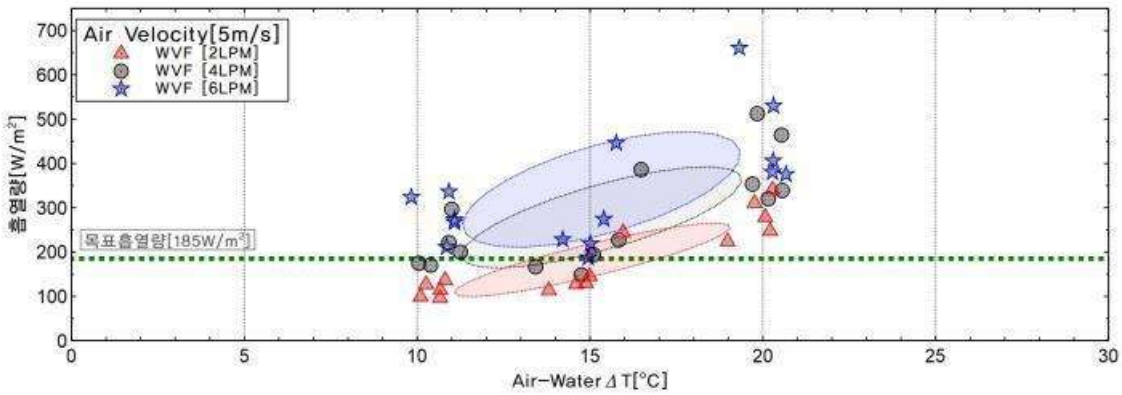
② 지하수량에 따른 흡열량 변화



<그림 3-3-56> 챔버내 유속 1m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석



<그림 3-3-57> 챔버내 유속 3m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석



<그림 3-3-58> 챔버내 유속 5m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석

- 챔버내 유속(터널내 유속)에 대한 흡열량 변화량 보다 지하수 유량에 따른 흡열량 변화가 더 큰 요인인 것으로 나타났다. 따라서 흡열량 증대를 위해서는 지하수 유량의 조절을 통해 흡열량의 증대가 가능할 것으로 예상 할 수 있음.

(8) 2차 성능시험 결론

(가) 2차 성능시험 Case 별 시험 결과

<표 3-3-209> 2차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 1/6

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)	목표흡열량 만족여부
Case 10	1time	1.00	2.00	10.56	0.85	118.93	-
Case 10	2time	1.00	2.00	9.81	1.16	161.24	-
Case 10	3time	1.00	2.00	10.24	0.90	125.48	-
Case 10	4time	1.00	2.00	10.20	1.65	229.79	○
Case 10	5time	1.00	2.00	8.45	0.84	117.01	-

<표 3-3-210> 2차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 2/6

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)	목표흡열량 만족여부
Case 11	1time	1.00	4.00	10.53	0.84	235.10	○
Case 11	2time	1.00	4.00	10.20	1.17	326.05	○
Case 11	3time	1.00	4.00	10.38	0.90	251.05	○
Case 11	4time	1.00	4.00	9.52	1.44	400.74	○
Case 11	5time	1.00	4.00	8.32	1.04	289.00	○
Case 12	1time	1.00	6.00	10.25	0.83	347.95	○
Case 12	2time	1.00	6.00	10.00	1.03	429.34	○
Case 12	3time	1.00	6.00	10.00	0.80	336.34	○
Case 12	4time	1.00	6.00	8.53	1.38	578.98	○
Case 12	5time	1.00	6.00	7.89	0.92	386.51	○
Case 13	1time	3.00	2.00	11.04	0.82	114.71	-
Case 13	2time	3.00	2.00	10.37	0.90	125.52	-
Case 13	3time	3.00	2.00	10.47	0.76	105.57	-
Case 13	4time	3.00	2.00	8.79	1.05	146.68	-
Case 13	5time	3.00	2.00	9.17	0.90	124.87	-
Case 14	1time	3.00	4.00	10.47	0.73	202.81	○
Case 14	2time	3.00	4.00	11.13	0.91	252.92	○
Case 14	3time	3.00	4.00	10.12	0.66	183.88	-
Case 14	4time	3.00	4.00	9.36	1.11	309.73	○
Case 14	5time	3.00	4.00	9.25	0.87	242.79	○
Case 15	1time	3.00	6.00	10.41	0.65	273.45	○
Case 15	2time	3.00	6.00	10.65	0.67	280.12	○
Case 15	3time	3.00	6.00	10.06	0.59	247.79	○
Case 15	4time	3.00	6.00	9.87	1.08	452.86	○
Case 15	5time	3.00	6.00	9.08	0.96	400.08	○
Case 16	1time	5.00	2.00	10.10	0.71	98.60	-
Case 16	2time	5.00	2.00	10.66	0.69	95.96	-
Case 16	3time	5.00	2.00	10.67	0.82	114.21	-
Case 16	4time	5.00	2.00	10.81	0.98	136.59	-
Case 16	5time	5.00	2.00	10.26	0.91	126.86	-

<표 3-3-211> 2차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 3/6

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)	목표흡열량 만족여부
Case 17	1time	5.00	4.00	10.05	0.63	174.65	-
Case 17	2time	5.00	4.00	11.25	0.72	199.68	○
Case 17	3time	5.00	4.00	10.39	0.61	170.28	-
Case 17	4time	5.00	4.00	11.00	1.06	296.51	○
Case 17	5time	5.00	4.00	10.92	0.79	221.57	○
Case 18	1time	5.00	6.00	9.83	0.77	323.80	○
Case 18	2time	5.00	6.00	11.08	0.65	273.18	○
Case 18	3time	5.00	6.00	10.85	0.50	211.10	○
Case 18	4time	5.00	6.00	10.92	0.80	336.36	○
Case 18	5time	5.00	6.00	11.08	0.64	267.25	○
Case 19	1time	1.00	2.00	16.42	1.32	184.10	-
Case 19	2time	1.00	2.00	13.94	1.21	169.10	-
Case 19	3time	1.00	2.00	13.87	0.80	112.00	-
Case 19	4time	1.00	2.00	14.63	0.78	109.27	-
Case 19	5time	1.00	2.00	13.23	0.95	132.87	-
Case 20	1time	1.00	4.00	15.68	1.01	280.54	○
Case 20	2time	1.00	4.00	13.89	0.90	250.75	○
Case 20	3time	1.00	4.00	14.42	0.92	257.36	○
Case 20	4time	1.00	4.00	14.68	0.71	197.63	○
Case 20	5time	1.00	4.00	13.80	0.67	186.79	○
Case 21	1time	1.00	6.00	15.81	1.30	542.26	○
Case 21	2time	1.00	6.00	14.95	0.87	362.96	○
Case 21	3time	1.00	6.00	14.48	0.64	266.68	○
Case 21	4time	1.00	6.00	14.72	0.64	267.66	○
Case 21	5time	1.00	6.00	14.12	0.60	249.72	○
Case 22	1time	3.00	2.00	16.17	1.80	250.75	○
Case 22	2time	3.00	2.00	15.56	1.06	147.67	-
Case 22	3time	3.00	2.00	14.50	1.14	158.64	-
Case 22	4time	3.00	2.00	14.75	0.81	113.16	-
Case 22	5time	3.00	2.00	14.22	0.75	104.44	-

<표 3-3-212> 2차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 4/6

Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)	목표흡열량 만족여부
Case 23	1time	3.00	4.00	15.88	1.55	433.54	○
Case 23	2time	3.00	4.00	16.61	0.96	266.55	○
Case 23	3time	3.00	4.00	15.22	0.94	262.32	○
Case 23	4time	3.00	4.00	15.68	0.65	180.92	-
Case 23	5time	3.00	4.00	14.93	0.65	181.89	-
Case 24	1time	3.00	6.00	15.60	1.20	504.06	○
Case 24	2time	3.00	6.00	15.50	0.72	299.95	○
Case 24	3time	3.00	6.00	14.79	0.64	267.16	○
Case 24	4time	3.00	6.00	15.72	0.57	238.62	○
Case 24	5time	3.00	6.00	14.41	0.58	243.72	○
Case 25	1time	5.00	2.00	15.96	1.75	243.78	○
Case 25	2time	5.00	2.00	14.99	1.04	145.12	-
Case 25	3time	5.00	2.00	14.88	0.93	130.10	-
Case 25	4time	5.00	2.00	13.81	0.81	113.28	-
Case 25	5time	5.00	2.00	14.60	0.91	127.38	-
Case 26	1time	5.00	4.00	16.48	1.38	386.18	○
Case 26	2time	5.00	4.00	15.83	0.81	227.16	○
Case 26	3time	5.00	4.00	15.10	0.70	193.92	○
Case 26	4time	5.00	4.00	13.43	0.60	166.61	-
Case 26	5time	5.00	4.00	14.75	0.53	148.12	-
Case 27	1time	5.00	6.00	15.76	1.07	446.05	○
Case 27	2time	5.00	6.00	15.40	0.66	274.46	○
Case 27	3time	5.00	6.00	15.01	0.52	218.72	○
Case 27	4time	5.00	6.00	14.21	0.55	228.26	○
Case 27	5time	5.00	6.00	14.95	0.45	187.46	○
Case 28	1time	1.00	2.00	20.98	2.44	339.68	○
Case 28	2time	1.00	2.00	20.56	2.45	341.14	○
Case 28	3time	1.00	2.00	20.11	1.54	214.77	○
Case 28	4time	1.00	2.00	20.63	1.85	258.39	○
Case 28	5time	1.00	2.00	20.51	1.38	192.92	○

<표 3-3-213> 2차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 5/6

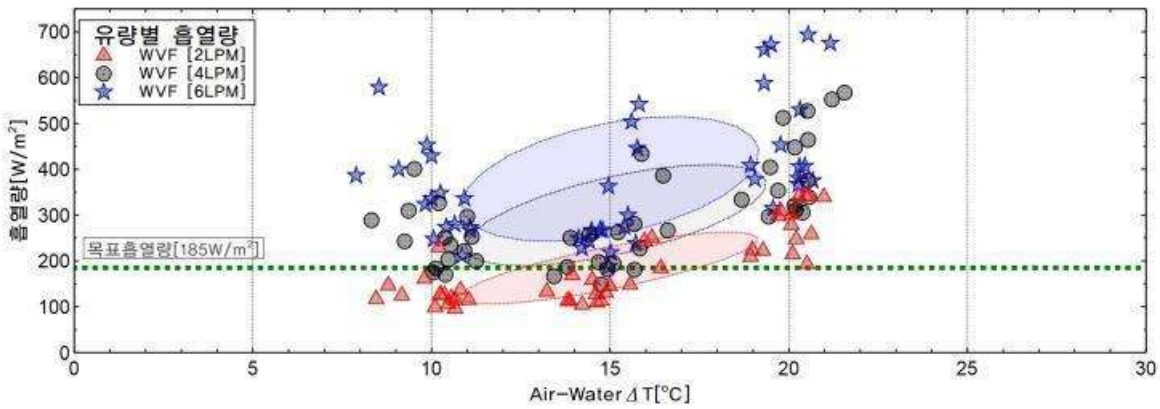
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)	목표흡열량 만족여부
Case 29	1time	1.00	4.00	21.21	1.98	552.34	○
Case 29	2time	1.00	4.00	21.56	2.03	567.26	○
Case 29	3time	1.00	4.00	20.39	1.10	305.58	○
Case 29	4time	1.00	4.00	20.52	1.34	374.85	○
Case 29	5time	1.00	4.00	20.20	1.11	310.94	○
Case 30	1time	1.00	6.00	21.16	1.61	675.47	○
Case 30	2time	1.00	6.00	20.54	1.66	693.76	○
Case 30	3time	1.00	6.00	19.77	1.08	453.24	○
Case 30	4time	1.00	6.00	20.27	0.88	367.34	○
Case 30	5time	1.00	6.00	20.45	0.97	407.03	○
Case 31	1time	3.00	2.00	20.08	2.16	300.80	○
Case 31	2time	3.00	2.00	20.47	2.45	342.17	○
Case 31	3time	3.00	2.00	19.71	2.13	297.69	○
Case 31	4time	3.00	2.00	19.28	1.60	222.54	○
Case 31	5time	3.00	2.00	18.93	1.50	209.04	○
Case 32	1time	3.00	4.00	20.17	1.60	447.60	○
Case 32	2time	3.00	4.00	20.52	1.89	527.28	○
Case 32	3time	3.00	4.00	19.48	1.45	404.34	○
Case 32	4time	3.00	4.00	19.44	1.06	296.73	○
Case 32	5time	3.00	4.00	18.68	1.20	333.96	○
Case 33	1time	3.00	6.00	19.31	1.40	587.84	○
Case 33	2time	3.00	6.00	19.50	1.61	672.22	○
Case 33	3time	3.00	6.00	18.93	0.98	408.94	○
Case 33	4time	3.00	6.00	19.56	0.75	314.77	○
Case 33	5time	3.00	6.00	19.05	0.90	378.56	○
Case 34	1time	5.00	2.00	19.76	2.23	310.55	○
Case 34	2time	5.00	2.00	20.28	2.44	340.68	○
Case 34	3time	5.00	2.00	20.07	2.00	278.66	○
Case 34	4time	5.00	2.00	20.21	1.77	247.42	○
Case 34	5time	5.00	2.00	18.98	1.60	223.78	○

<표 3-3-214> 2차 Case 별 흡열성능 시험 결과 - 6/6

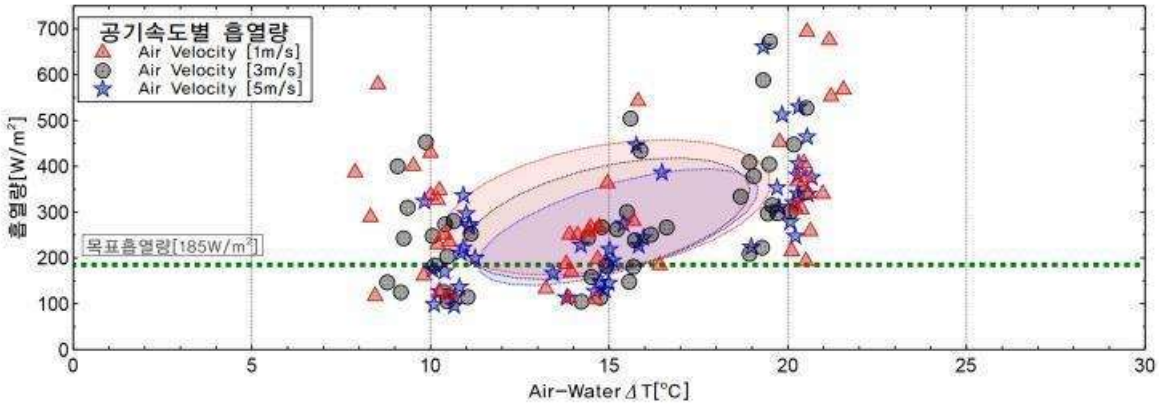
Case No.	반복횟수	챔버유속 (m/s)	냉각수량 (lpm)	공기-지하수 온도차(℃)	흡열패널 입출구 온도차(℃)	흡열량 (W/㎡)	목표흡열량 만족여부
Case 35	1time	5.00	4.00	20.54	1.66	464.12	○
Case 35	2time	5.00	4.00	19.84	1.84	512.36	○
Case 35	3time	5.00	4.00	20.16	1.15	320.42	○
Case 35	4time	5.00	4.00	20.56	1.21	338.84	○
Case 35	5time	5.00	4.00	19.70	1.27	353.31	○
Case 36	1time	5.00	6.00	20.31	1.27	530.11	○
Case 36	2time	5.00	6.00	19.32	1.58	661.12	○
Case 36	3time	5.00	6.00	20.28	0.91	380.35	○
Case 36	4time	5.00	6.00	20.67	0.90	375.60	○
Case 36	5time	5.00	6.00	20.30	0.97	405.92	○

(나) 변수에 따른 흡열량 변화(2차 성능시험)

- 챔버내 유속에 따른 흡열량 편차는 비교적 작은 것으로 나타나며 흡열량은 지하수의 유량과 관계가 높은 것을 알 수 있었으며, 지하수 유량이 6LPM 이상인 경우 지하수와 공기의 온도차에 관계 없이 모든 경우에 대해 흡열량 목표치인 185W/㎡을 만족하는 것으로 나타남.



<그림 3-3-59> TLS 패널내 지하수 유량에 따른 흡열량 분석



<그림 3-3-60> 챔버내 기류속도에 따른 흡열량 분석

- 1차 성능시험과 유사하게 챔버내 유속에 따른 흡열량 편차보다는 냉각수의 유량과 관계가 높은 것을 알 수 있었음.
- 지하수 유량이 6LPM 이상인 경우 거의 모든 온도차 구간에서 흡열량 목표치인 185W/㎡을 만족하는 것으로 나타나고 지하수 유량이 4LPM 인 경우도 터널내 유속 1m/s 구간에서는 대부분이 경우 흡열량 기준을 만족하며 ΔT가 15℃ 이상인 경우 거의 모든 경우 흡열량 기준을 만족하거나 근접하는 수치인 것으로 나타남.

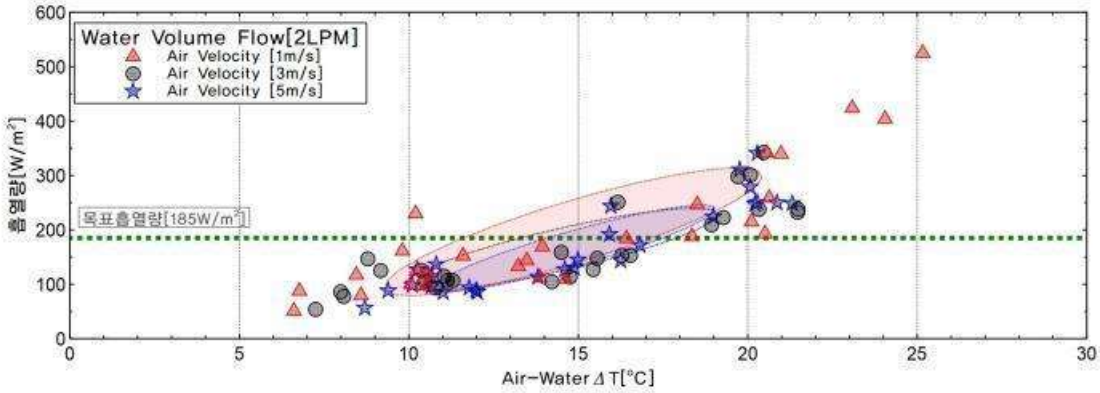
(다) 결론

- TLS 시스템의 실험실 조건 성능시험결과 순환장치를 통한 TLS 패널의 순환성능 및 목표흡열량 달성이 가능함을 확인함. 또한 챔버내 유속에 따른 흡열량 편차보다는 지하수의 유량에 따라 흡열량의 편차가 크게 나타나므로 터널내 공기온도와 지하수 온도와의 차이와 함께 지하수 유량을 조절하여 목표 흡열량을 조정할 수 있을 것으로 판단됨.

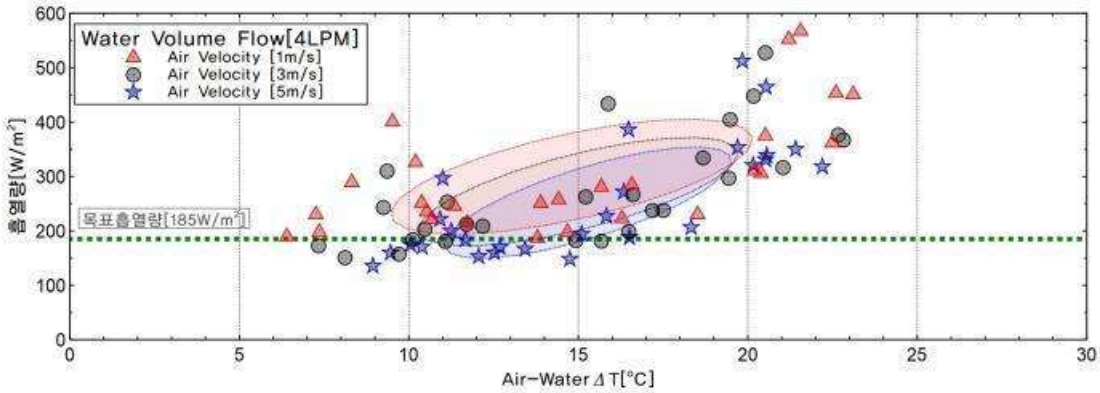
(9) 1, 2차 성능 시험 종합결론

(가) 챔버내 유속에 따른 흡열량 변화

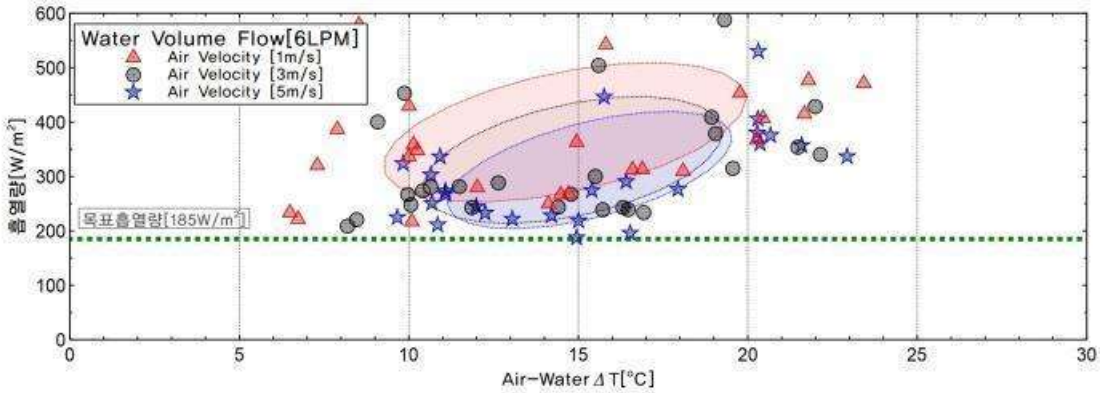
- 1, 2차 시험 결과 유속에 따른 흡열량 편차는 비교적 작은 것으로 나타남.
- 지하수 유량이 6LPM 이상인 경우 온도차 구간에서 흡열량 목표치인 185W/㎡을 만족하는 것으로 나타났으며 지하수 유량이 4LPM 인 경우도 터널내 유속 1m/s 구간에서는 모든 경우 흡열량 기준을 만족하며 ΔT가 15℃ 이상인 경우 모든 유속구간에 대해 흡열량 기준을 만족하는 것으로 나타남.



<그림 3-3-61> 지하수 유량 2LPM 적용시 기류속도에 따른 흡열량 분석(종합결과)



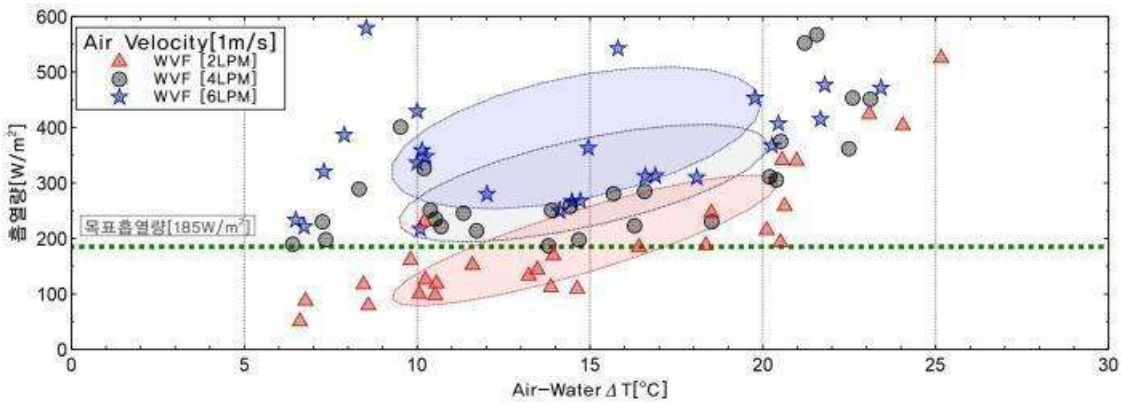
<그림 3-3-62> 지하수 유량 2LPM 적용시 기류속도에 따른 흡열량 분석(종합결과)



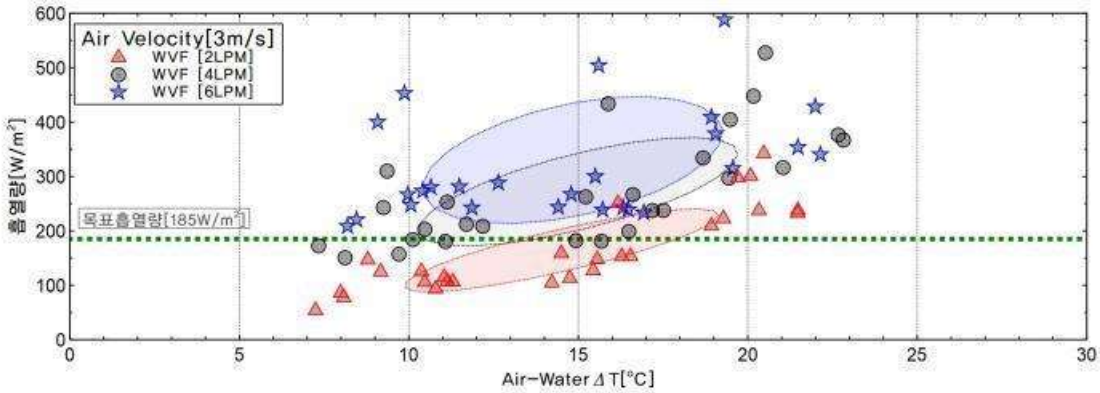
<그림 3-3-63> 지하수 유량 6LPM 적용시 기류속도에 따른 흡열량 분석(종합결과)

(나) 지하수 유량에 따른 흡열량 변화

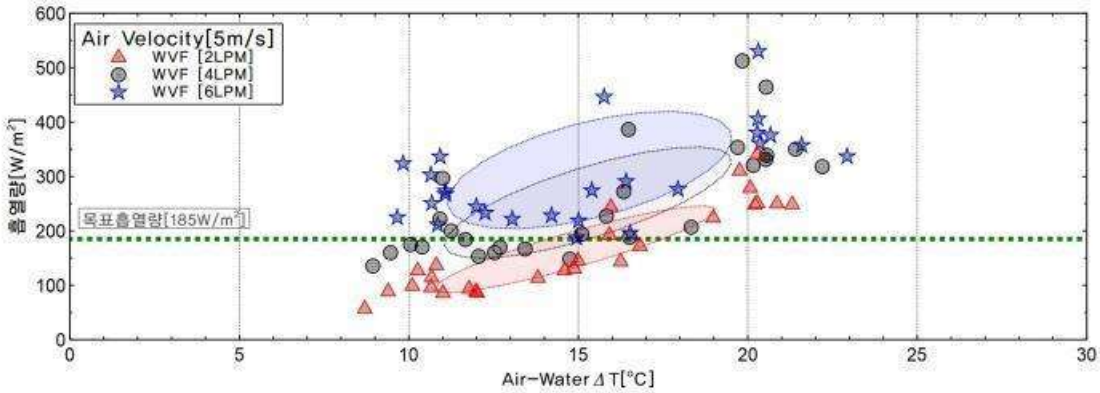
- 1, 2차 시험결과는 모두 챔버내 유속(터널내 유속)에 대한 흡열량 변화량 보다 지하수 유량에 따른 흡열량 변화가 더 큰 요인인 것으로 나타남.
- 챔버내 기류속도에 관계 없이 6LPM 지하수 유량에서는 모두 목표흡열량을 만족하는 것으로 나타나고 지하수 유량에 따라 비교적 일정한 흡열량 차이가 나는 것으로 판단됨. 따라서 흡열량 증대를 위해서는 지하수 유량의 조절을 통해 흡열량의 증대가 가능할 것으로 판단됨.



<그림 3-3-64> 챔버내 유속 1m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석(종합결과)



<그림 3-3-65> 챔버내 유속 3m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석(종합결과)



<그림 3-3-66> 챔버내 유속 5m/s 적용시 지하수 유량에 따른 흡열량 분석(종합결과)

나. **개발시스템 성능예측 모델**

(1) 성능예측 모델 분석 방법론 수립

- 선로부 흡열시스템의 성능 예측을 위해서는 환경조건을 고려하여야 하며, 흡열성능 예측을 위해서 지하도시철도 구간의 지하수량 및 지하수온에 대한 자료를 조사하고 현장 실측을 통한 터널구간의 온도데이터를 분석하여 실제 터널의 지하수온과 터널내 온도차를 분석방법을 활용하고자 함.
- 또한 앞서 수행된 변수에 따른 흡열량 데이터를 기반으로 예상가능한 TLS 패널의 흡열량을 분석하고자 함.

(2) TLS 운영을 위한 조건 검토

(가) 도시철도 터널구간의 지하수 특성 분석

- 아래 표와 같은 지하수를 이용한 도시철도 지하승강장 열환경 개선설계 사례에서는 8월에 측정된 지하수 온도는 20℃로 일정한 것으로 측정된 결과를 제시하고 있음. 또한 유사한 다른 연구에서는 지하수 용출 온도가 - 13~17℃, 집수정 유입 후 - 동절기 14℃ 하절기 19℃로 나타나고 있으며 이러한 경향은 본 연구에서 수락산역, 마들역, 노원역 등의 지하수 온도 측정한 결과와 일치함을 보여줌.

<표 3-3-215> 도시철도 지하수 연구결과 - 1

항목	내용
제목	- 지하수를 이용한 도시철도 지하승강장 열환경 개선설계 사례 (2010.08, 설비공학회)
저자	- 김회률, 금종수, 김동규, 정용현, 김종열 (부경대, 지이엔지니어링)
핵심내용	- 지하수 발생량 및 온도값
주요 내용	- 지하수를 활용한 공조설비 설계 사례 - 부산지하철 역내 지하수 용출수량 (부전-490톤, 시청-130톤, 범내골-70톤, 자갈치-105톤, 서대신-197톤, 하단-393톤) 용출수량 단위가 톤으로 제시됐으나 정확하게 ton/day로 예상됨 - 용출된 지하수 중 14%정도만 청소용수, 생활용수로 활용 - 하절기 (8월) 하루동안 측정된 지하수 온도는 20℃로 일정했음. (외기 27~4℃) - 부전역 사용수량 480ton/day 기준 공조기로 250 LPM 순환수량 공급, 냉각수 온도 20℃-공기 온도 33℃ 열교환 - 냉각수 흡열량 값이 아닌 일반 냉방과 전기소모량 비교 - 지하수 활용시 일반 냉방에 비해 75% 전력량을 절약

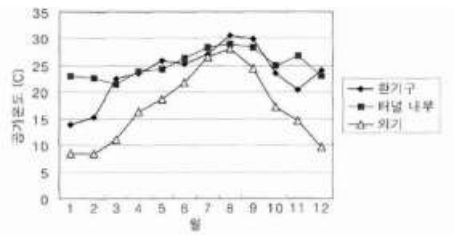
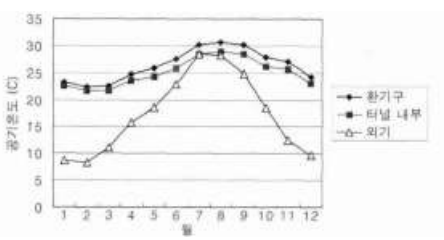
<표 3-3-216> 도시철도 지하수 연구결과 - 2

항목	내용
제목	- 지하수를 활용한 지하철 역사 냉방에 관한 연구(2014.08, 철도학회)
저자	- 이홍로, 서광혁, 우종혁 (서울메트로)
핵심내용	- 지하수 발생량 및 온도값
주요 내용	- 다른 냉매와 물의 냉매가치비교 - 서울메트로 지하수 발생량 1,000.ton/day 이상인 역사 5곳 - 길음역의 지하수 발생량 2,300ton/day - 기존 냉방방식 - 냉동기 2대 사용, 지하수 활용시 냉동기 1대 감소, 에너지 부하 40%절감 - 지하수 용출 온도 - 13~17℃, 집수정 유입 후 - 동절기 14℃ 하절기 19℃ - 냉방에 활용되기 위한 지하수 조건 - 1,000ton/day이상 발생, 스케일 방지할 수 있는 수질, 20℃이하의 온도 등 - 하절기(7,8,9월) 지하수를 활용한 냉방을 가동했을 때 냉방운전조건(28℃)보다 낮은 25~26℃로 유지됨.(외기 30℃)

(나) 도시철도 터널구간의 온도특성 분석

- 도시철도 지하구간의 온도에 관련된 자료에 따르면 대부분이 유사한 온도패턴을 나타내는 것으로 분석되었으며 동계시 20℃내외에서 하계 27~28도 사이의 온도분포를 나타내는 것으로 조사되었음. 하지만 도시철도의 특성상 출퇴근 및 혼잡시의 영향을 고려하게 되면 더 높은 온도를 나타내는 것으로 측정됨.

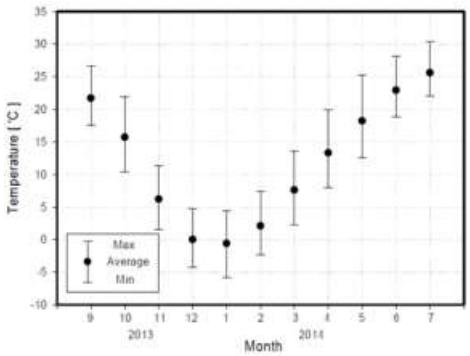
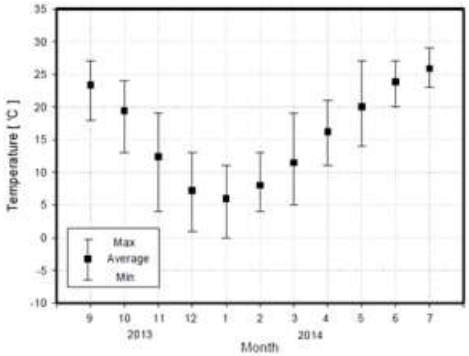
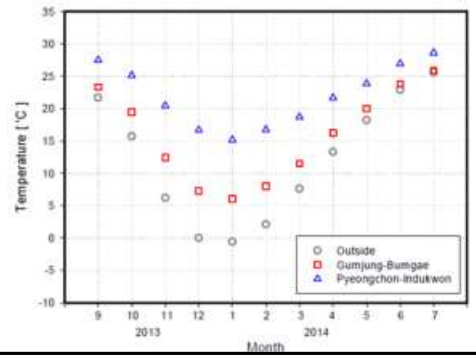
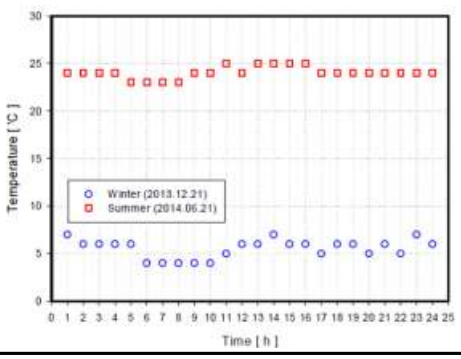
<표 3-3-217> 도시철도 터널 열환경 연구결과 - 1

항목	내용
제목	- 지하철공간 열환경의 실측 연구(2002.03 한국생활환경학회)
저자	- 이철구 (세명대)
핵심내용	- 지하철 폐열에 의한 터널 온도 영향
주요 내용	- 지하철의 배열의 이용가능성을 확인하기 위한 자료 - 일본 도쿄 지하철 오테마치역 대상 온도, 습도 측정(지하철 운행 조건에서 측정) - 승강장 끝 부분 및 터널 환기탑 부분의 온도 측정 (월별 평균온도값 제시) - 본 자료에서는 동절기의 배열을 히트펌프로 활용하는 방향으로 제시 환풍기 off일 때 터널내 온도 환풍기 on일 때 터널내 온도  

<표 3-3-218> 도시철도 터널 열환경 연구결과 - 2

항목	내용
제목	- 도심지 지하철터널 내부의 온도 변화에 따른 거동 계측(2012.10 철도학회)
저자	- 이승원, 유지형, 김대성, 강문구 (경복대, 두산건설)
핵심내용	- 터널 내 온도값 제시
주요 내용	- 터널 내부 온도에 따라 터널 라이닝의 거동 계측, 터널 유지관리를 위한 목적 - 터널 위치는 명확하지 않음 - 크랙크 이동, 응력, 온도 측정 - 기초 시공 완료된 터널에 대해 측정 - 터널내부온도 - 3월 13~16℃, 4월 16~18℃, 5월 19~21℃, 6월 21~22℃

<표 3-3-219> 도시철도 터널 열환경 연구결과 - 3

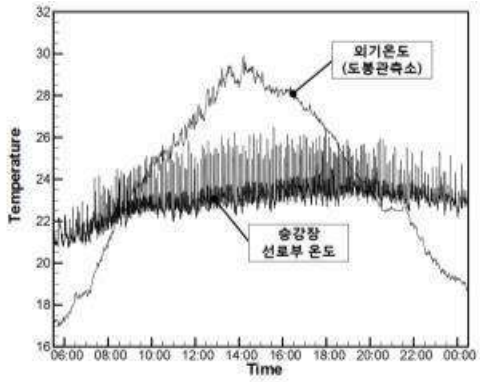
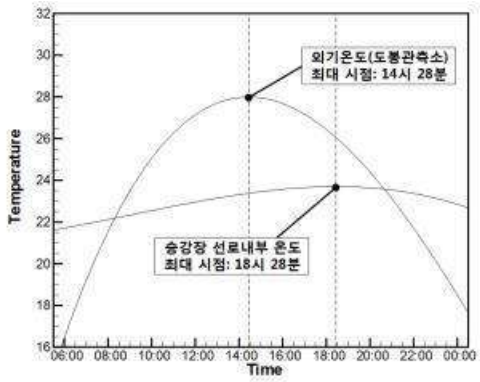
항목	내용
제목	- 터널 환경측정 시스템개발 및 측정 1(2015.10 산학기술학회)
저자	- 박원희 (철도기술연구원)
핵심내용	- 터널 내 온도값 제시
주요 내용	- 굴착된 터널에 대해 시간 및 계절별 환경분석 - 과천선 지하철 2개소에서 온도, 습도 측정 - 외기, 금정-범계, 평촌-인덕원 터널의 연간 온도 측정 (월별 최대, 평균, 최소값 및 일별 온도변화값 제시) - 하절기 터널 내 온도 약 25℃로 유지되는 것으로 나타남. 외기온도 금정-범계터널 내 온도   월별 평균온도 동, 하절기 일별 온도변화  

(다) 도시철도 터널구간의 온도실측

① 수락산 역사 실측

- 수락산 역사의 선로부 온도 실측 결과 열차의 진입 이후 약 2~3℃의 온도상승이 이루어 졌으며 이러한 경향은 열차의 진입 시 마다 매번 반복됨.
- 이에 따라 진입한 열차가 정차한 동안 상당량의 열에너지가 선로내부로 배출되며 당 역사에서는 스크린도어가 설치되어 있어 열차의 발열이 선로 내에 정체될 것으로 예상되므로 선로부 TLS를 통한 흡열시 이러한 일시적 발열량을 효과적으로 흡수할 수 있는 방안이 필요할 것으로 판단됨.
- 이 결과는 5월 중 측정치에서 선로 및 외기온도가 26℃ 이상을 상회하게 되어 승강장에서의 불쾌적도가 상승할 것으로 판단되나 정확한 분석을 위해서는 이후 실측에서 승강장 내부의 온도를 측정해야 할 것으로 판단됨.

<표 3-3-220> 수락산 역사 실측 결과 비교

열차 운행시간 동안의 온도변화	열차 운행시간 동안 온도변화(다항근사)
	
- 측정 기간 선로내부 공기온도 범위: 20.7~26.5 ℃ - 운행 시간 선로내부 공기온도 범위: 21.3~26.5 ℃ - 운행 시간 외기온도 범위: 17~29.9 ℃	- 외기온도 최대시점: 14:28 - 선로 내부 공기 온도 최대시점 : 18:28 (+4시간)

② 마들역사 선로부 실측

㉮ 마들역사 선로부 온도실측 개요

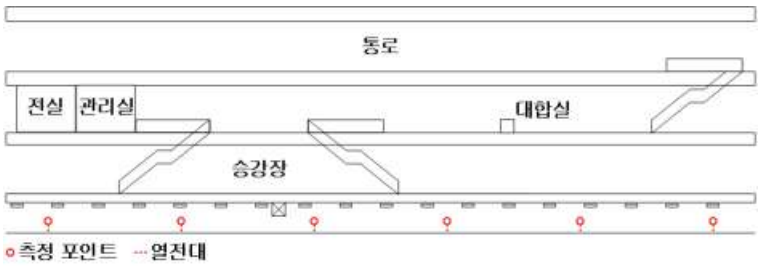
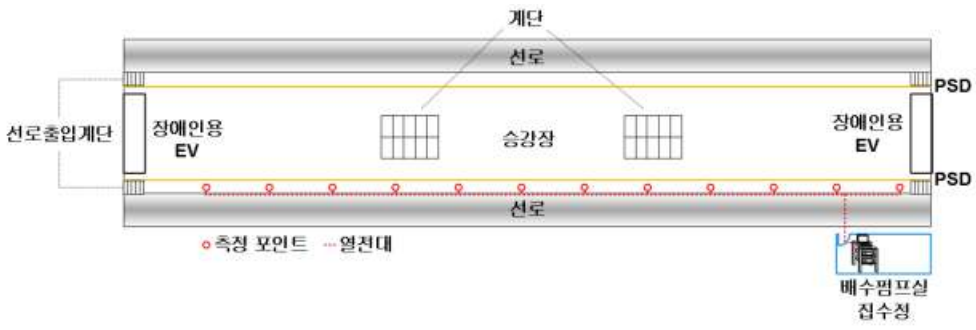
- 수락산 역사의 온도 측정은 승강장에서 스크린도어 점검문을 통해 온도센서를 선로부에 설치하여 온도를 측정한 것으로 선로부 끝단의 온도측정결과 이므로 실제 선로부의 온도를 대신하기는 부족하며 따라서 마들역사에서는 선로부에 직접 다수의 온도센서를 설치하여 선로부 열차운행시간동안 온도를 측정함.



<그림 3-3-67> 마들역사 개요

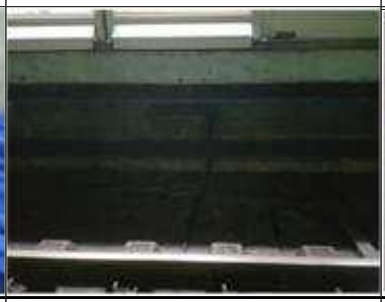
- 마들역사는 지하 3층 규모의 역사로 승강장길이는 총 165m의 섬식 승강장으로 건설되어 있음.

<표 3-3-221> 마들역사 온도 실측 개요

구분	온도측정 개요
마들역사 내부	
선로부 평면	

- 10m 간격으로 총 16point의 온도센서를 설치하고 데이터 획득 장치는 배수펌프실에 설치함.

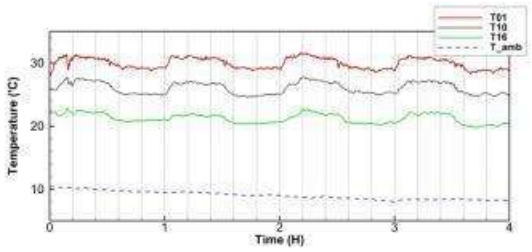
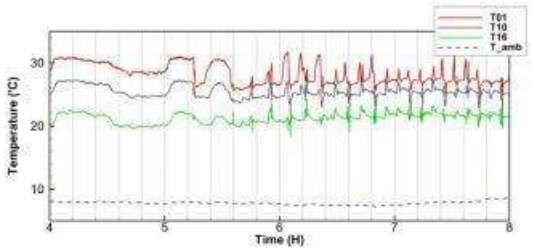
<표 3-3-222> 수락산 역사 실측 장비 설치

온도센서	승강장 하부 설치공간	온도센서 설치작업
		
선로부-배수펌프실 출입문	배수펌프실 내부	데이터 획득장치
		

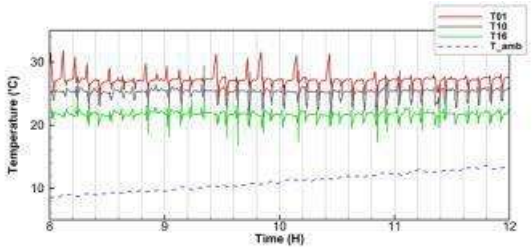
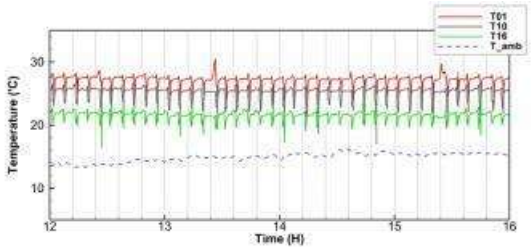
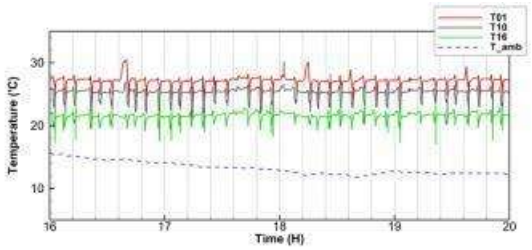
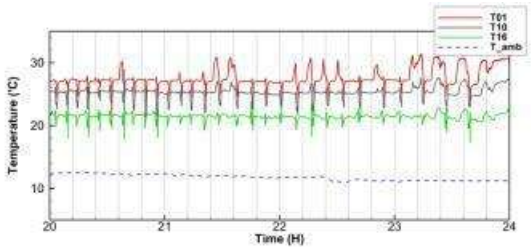
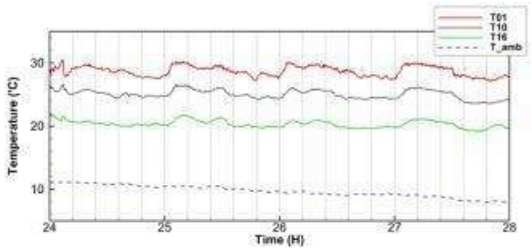
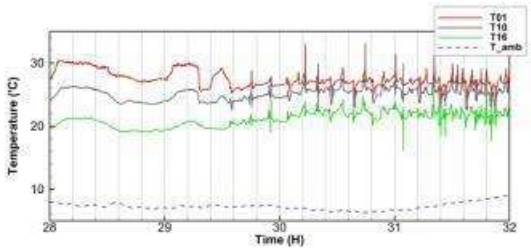
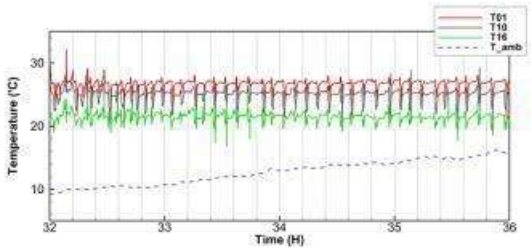
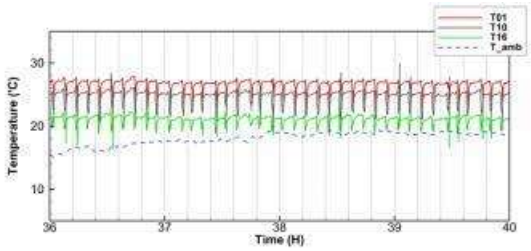
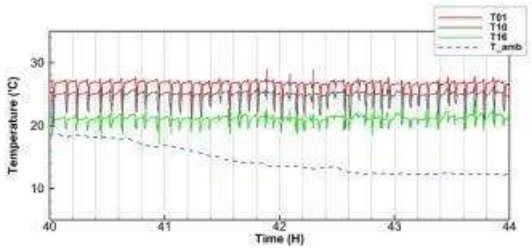
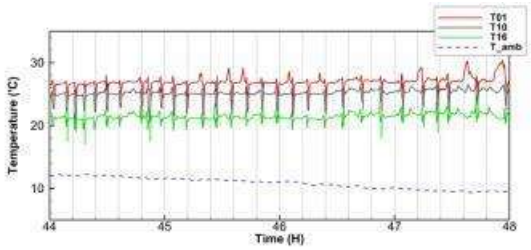
- 온도센서는 승강장 하부 기존 구조물 배관에 부착하여 설치하였으며 배수펌프실로 연결하기 위해 선로를 횡단해야 하는 부분은 케이블가드를 사용하여 선로하부를 통과함.

㉮ 마들역사 선로부 온도실측 결과

<표 3-3-223> 시간대별 수락산 역사 실측 결과 - 1/2

2016.10.09 (일) 00:00~04:00	2016.10.09 (일) 04:00~08:00
	

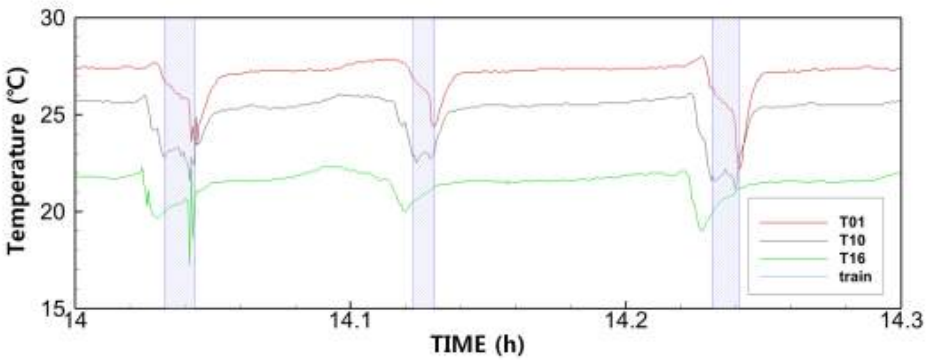
<표 3-3-224> 시간대별 수락산 역사 실측 결과 - 2/2

2016.10.09 (일) 08:00~12:00	2016.10.09 (일) 12:00~16:00
	
2016.10.09 (일) 16:00~20:00	2016.10.09 (일) 20:00~24:00
	
2016.10.10 (월) 00:00~04:00	2016.10.10 (월) 04:00~08:00
	
2016.10.10 (월) 08:00~12:00	2016.10.10 (월) 12:00~16:00
	
2016.10.10 (월) 16:00~20:00	2016.10.10 (월) 20:00~24:00
	

- 열차 운행 스케줄이 다른 주말(일요일)과 평일(월요일)의 시간별 온도 변화결과는 위와 같으며 열차의 선두, 후미 근처인 측정지점 T01, T16과 터널 중간 부분인 T10 지점의 온도 변화를 외기온과 함께 비교함.

- 결과 측정기간 중 외기 온도는 최대 약 20℃ 정도로 나타났으며 터널 내부의 온도는 외기온의 변화와 관계없이 대체적으로 일정하게 유지하였음. 그리고 터널 내부 온도는 외기온도보다 항상 높은 온도를 유지하였으며, 승강장 시작 부분에서는 약 27℃, 중간 부분은 약 25.5℃, 승강장 끝부분에서 약 22℃의 온도를 유지하였음.
- 터널 내부 온도는 열차 선두 부근에서 가장 높은 온도를 타나내었으며, 후미로 갈수록 온도가 점점 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 단선 터널로 구성된 마들역사에서 기류의 방향이 한쪽 방향으로만 생성되기 때문에 터널 전체에 걸쳐 선형적인 온도 구배가 형성된 것으로 판단됨.

㉰ 열차 진출입에 따른 온도변화

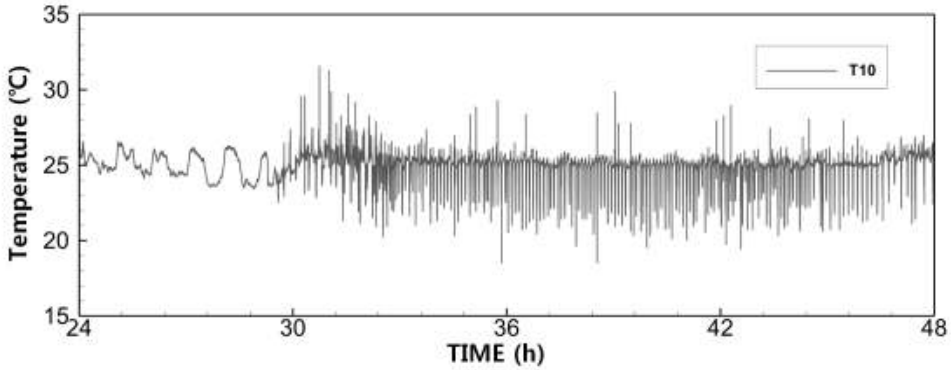


<그림 3-3-68> 2016/10/09 14:00 ~ 14:18 온도변화

- 위 그래프에서 파란색 구간은 열차 정차 시간을 나타내며, 열차가 진입할 때 유입되는 기류로 인해 터널 내부 온도가 다소 감소하는 경향을 나타내었으며, 정오 시간대의 경우 약 4~5℃ 온도 감소가 나타남. 열차의 영향을 가장 먼저 받는 승강장 끝 부분(T16)의 온도가 가장 먼저 변하고, 순차적으로 중앙 부분인 T10과 맨 앞인 T01의 온도 변화가 나타남. 정차하는 도중, 열차풍의 영향을 가장 먼저 받은 끝 구간(T16)의 온도는 다시 회복되며, 온도 회복 역시 중앙 부분과 맨 앞 순서로 발생하였음.

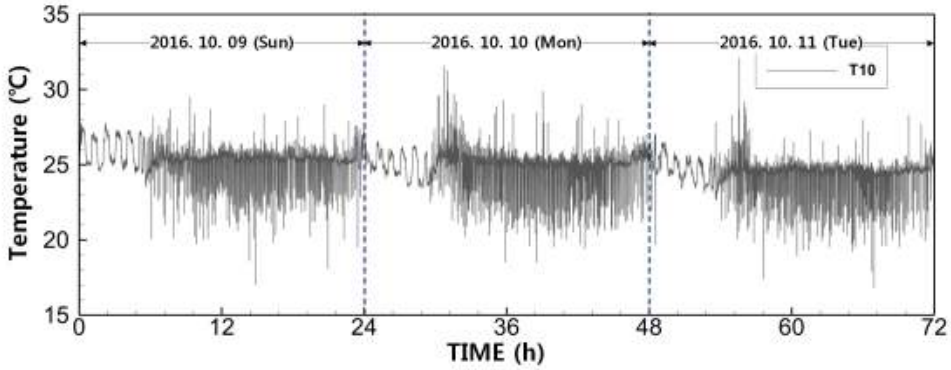
㉱ 선로부 시간별 온도 분포

- 승강장의 양쪽 끝단인 T01과 T16 위치는 터널 외부의 영향을 크게 받으므로 승강장의 중앙 부분인 T10의 온도 측정 결과를 토대로 경향성을 확인함. 열차 운행이 종료된 새벽 시간 동안 터널 내 기류가 정체되고, 열차 운행이 시작함과 동시에 온도의 변화가 급격하게 발생하였으며 열차 운행이 가장 많은 오전 피크 시(오전 7:00~오전 8:00 경) 선로부의 온도변화는 가장 크게 나타났으며, 최대 약 32℃까지 순간적으로 상승하였음.
- 전반적으로 열차가 진입할 때 소폭 온도의 상승이 나타나나, 급격하게 온도가 감소하는 현상이 발생하였으며, 평균적으로 약 3~4℃ 가량의 순간적인 온도 감소가 나타남. 열차의 진입으로 인해 터널 후방의 환기구로부터 터널 내부보다 낮은 온도의 외기가 유입되어 온도가 감소함.



<그림 3-3-69> 2016/10/10 선로 중앙부 온도변화

㉮ 선로부 일별 온도분포



<그림 3-3-70> 선로부 일별 온도분포

- 열차 피크 시간대가 없는 일요일의 경우, 새벽동안 정체된 기류로 인해 열차 운행 시작 시 온도 상승이 발생하였다가 이후로 일정한 패턴을 나타남. 일요일의 경우, 열차의 운행 피크 시간이 없어 고른 온도 변화 양상을 나타냈으며 선로부의 최대 온도는 오전 중 약 29℃ 로 나타남.
- 평일의 경우, 출근 시간대에 열차 운행량이 많아 발열량이 많으므로 선로부의 온도 상승이 일요일에 비해 더욱 높게 발생하였으며, 오전 중 선로부의 최대 온도는 약 32℃ 가량으로 나타남. 전체적인 터널 내 평균 온도는 주말과 평일 사이에 큰 차이를 나타내지 않고 일정하게 유지됨.

(라) 도시철도 터널구간의 특성 검토결과

- 지하터널 구간의 특성을 검토한 결과 차량의 주행발열에 의한 온도변화에 대한 자료가 미흡하였으나 본 연구를 통한 마들역사의 실측자료를 근거로 판단할 때 열차주행에 의해 4~5℃ 정도의 온도상승 효과가 나타나는 것으로 측정됨.

<표 3-3-225> 도시철도 터널구간 온도 특성

<table>
<tr><td>항목</td><td colspan="12">내용</td></tr>
<tr><td rowspan="5">예측환경</td><td rowspan="2">구분</td><td colspan="11">월</td></tr>
<tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td></tr>
<tr><td>터널내부온도 (℃)</td><td>20</td><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>25</td><td>27</td><td>27</td><td>26</td><td>25</td><td>23</td></tr>
<tr><td>지하수온도 (℃)</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td><td>20</td><td>19</td><td>18</td><td>16</td></tr>
<tr><td>온도차 (dT)</td><td>6</td><td>5</td><td>5</td><td>5</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td></tr>
<tr><td colspan="12">- 터널내부온도 및 지하수온도를 위 표와 같이 예측함.
- 터널내부온도는 본사실측자료를 토대로 조사자료(터널 환경측정 시스템 개발 및 측정 2)의 경향성을 참고해 월별 평균온도를 예측함. 5, 10월 온도를 실측자료 값으로 가정하고 참고자료의 월에 따른 경향성을 이용해 나머지 월의 터널온도를 예측함.
- 지하수온도는 조사자료(지하수를 이용한 도시철도 지하승강장 열환경 개선설계 사례, 지하수를 활용한 지하철 역사 냉방에 관한 연구)와 본사 측정치(2016.02 노원역에서 레이저온도계로 임의측정, 15℃)를 참고해 예측함.
- 터널내부와 지하수의 온도는 외기 영향이 적을 것으로 예상됨.
- 터널내부와 지하수 온도차는 5~7℃로 예상됨. 계절영향에 따라 온도 변화폭이 매우 적을 것으로 판단됨.
- 열차 발열을 고려하면 열차 진입 후 터널내부온도는 2~3℃ 증가할 것으로 보이며, 지하수와 온도차는 7~10℃까지 될 것으로 판단됨.</td></tr>
</table>

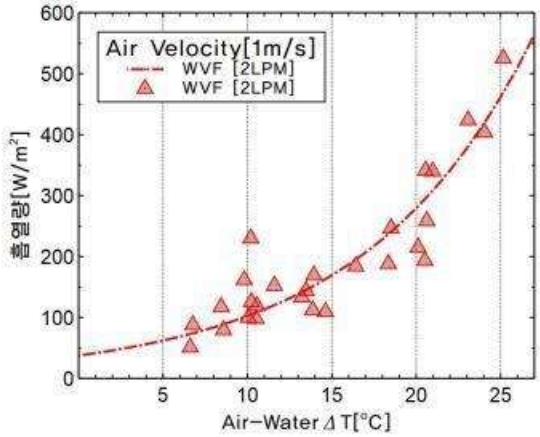
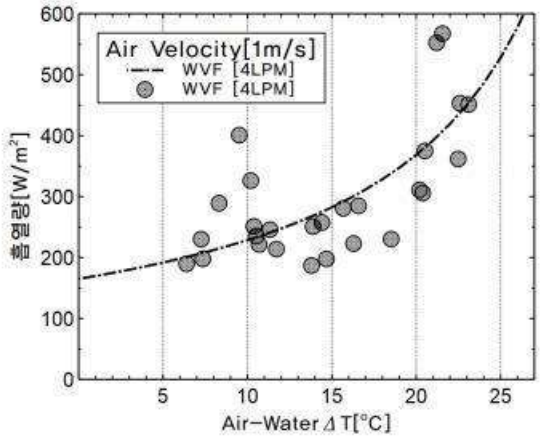
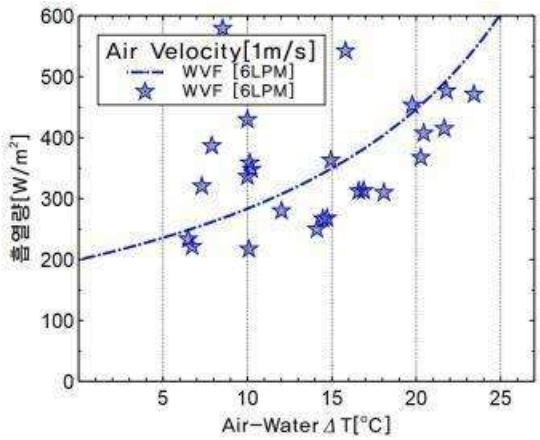
- TLS 흡열패널의 실험실 조건 성능시험을 통해서 지하수량 및 공기와 지하수와의 온도차 등 변수에 따른 TLS 패널의 흡열성능을 시험하였음.
- 대부분의 조건에서 목표 흡열량 185W/㎡을 만족하는 것으로 측정되었으나 실제 TLS 패널을 적용하기 위해서는 설계조건에 대한 검토가 필요하며, 이러한 설계인자를 예측하기 위해 TLS의 성능예측 모델에 대한 수립이 필요함.
- TLS 흡열패널의 성능을 예측하기 위해 성능시험을 통해 측정된 데이터를 기반으로 다음과 같은 TLS 패널의 변수에 따른 흡열 예측선도를 작성하였음. 예측선도는 유량별, 유속별로 공기와 지하수 온도차에 따른 흡열성능을 예측 가능하게 작성하였으며 이러한 자료를 바탕으로 향후 TLS 패널의 적용대상에 대해서 적정 설치 용량 등을 산정할 수 있을 것으로 예상됨.

(3) 성능예측선도 작성

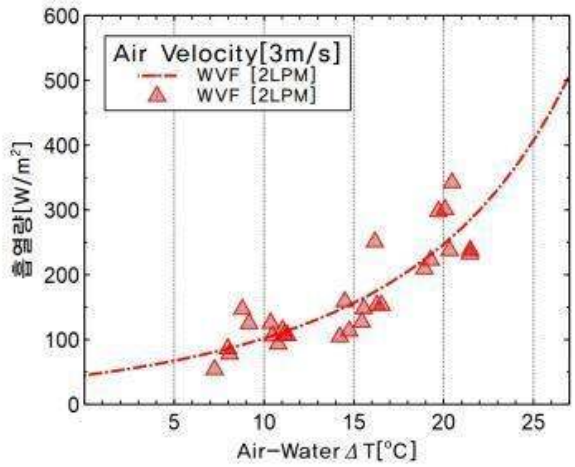
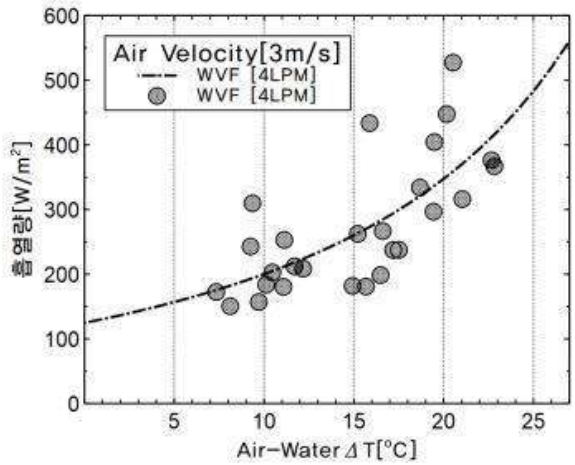
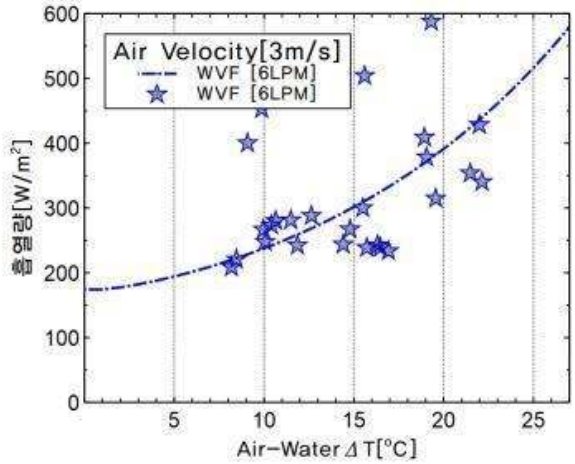
(가) 유량별 성능예측선도 작성

- 앞에서 언급한 시험결과에서 시험챔버내 유속에 따른 흡열량 변화보다는 유량에 따른 흡열량 변화가 크므로 TLS 패널의 유량에 따른 성능예측선도를 도출함.

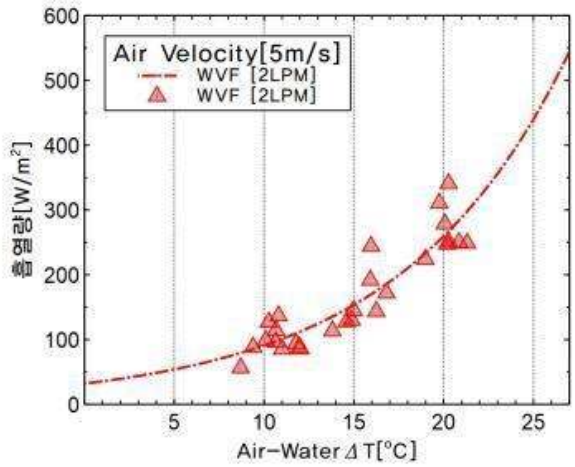
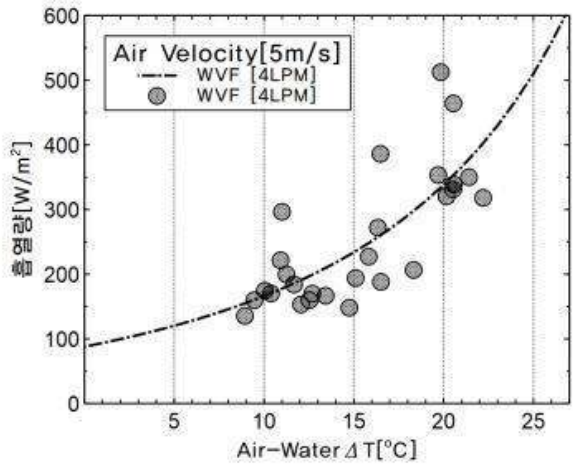
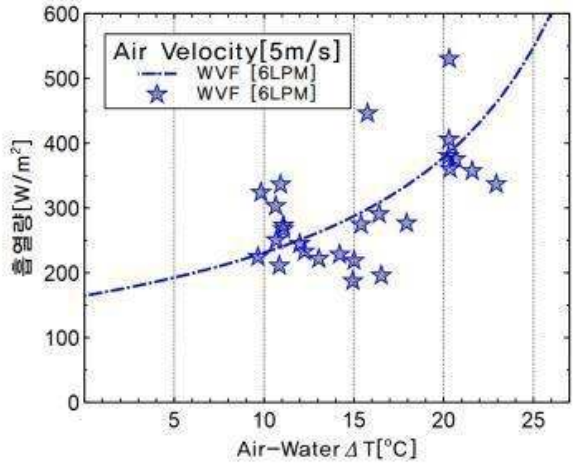
<표 3-3-226> 터널내 기류속도 1m/s 시 TLS 패널 유량별 흡열성능 예측선도

구분	성능예측선도	예측선도 관련식
터널내 유속 1m/s TLS 유량 2LPM		• Modified Power $y = a \times b^{x}$ • Coefficient Data: a = 37.46335 b = 1.105631
터널내 유속 1m/s TLS 유량 4LPM		• Logistic Model $y = \frac{a}{1 + b e^{-cx}}$ • Coefficient Data: a = -10.8992 b = -1.06612 c = 0.001743
터널내 유속 1m/s TLS 유량 6LPM		• Logistic Model $y = \frac{a}{1 + b e^{-cx}}$ • Coefficient Data: a = -157.759 b = -1.79085 c = 0.014003

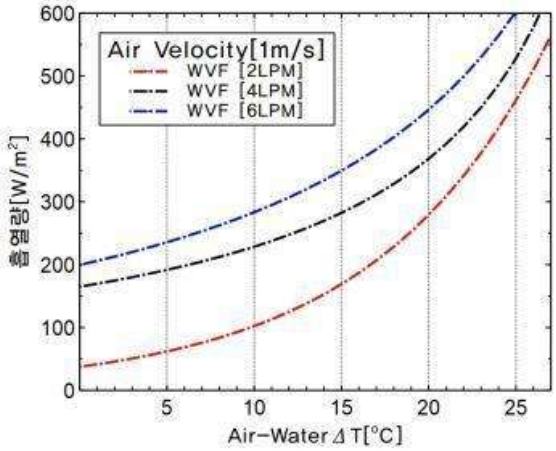
<표 3-3-227> 터널내 기류속도 3m/s 시 TLS 패널 유량별 흡열성능 예측선도

구분	성능예측선도	예측선도 관련식
터널내 유속 3m/s TLS 유량 2LPM		• Logistic Model $y = \frac{a}{1 + b e^{-cx}}$ • Coefficient Data: a = -1067.46 b = -24.7807 c = 0.076921
터널내 유속 3m/s TLS 유량 4LPM		• Logistic Model $y = \frac{a}{1 + b e^{-cx}}$ • Coefficient Data: a = -477.011 b = -4.82561 c = 0.035484
터널내 유속 3m/s TLS 유량 6LPM		• Geometric Fit $y = a \times b^{x}$ • Coefficient Data: a = 174.1934 b = 0.013498

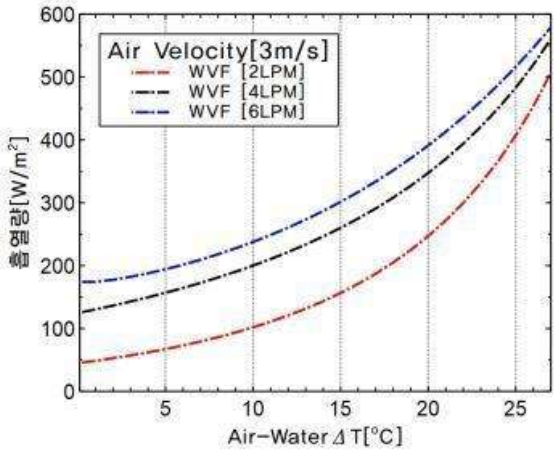
<표 3-3-228> 터널내 기류속도 5m/s 시 TLS 패널 유량별 흡열성능 예측선도

구분	성능예측선도	예측선도 관련식
터널내 유속 5m/s TLS 유량 2LPM		• Logistic Model $y = \frac{a}{1 + b e^{-cx}}$ • Coefficient Data: a = -24050.8 b = -752.771 c = 0.104154
터널내 유속 5m/s TLS 유량 4LPM		• Logistic Model $y = \frac{a}{1 + b e^{-cx}}$ • Coefficient Data: a = -875.124 b = -10.9465 c = 0.055769
터널내 유속 5m/s TLS 유량 6LPM		• Logistic Model $y = \frac{a}{1 + b e^{-cx}}$ • Coefficient Data: a = -22.7778 b = -1.13838 c = 0.003554

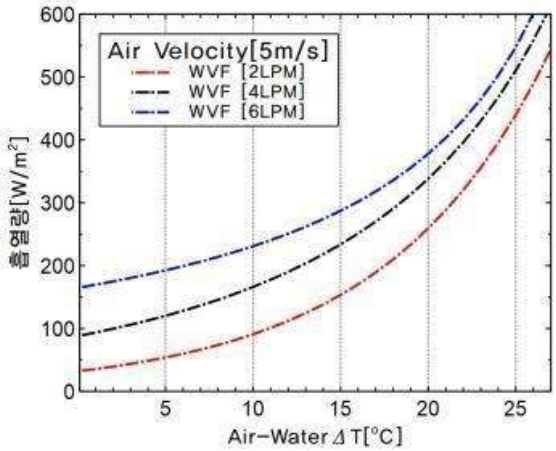
(나) TLS 예측 성능곡선



<그림 3-3-71> 성능예측선도(기류속도 1m/s)



<그림 3-3-72> 성능예측선도(기류속도 3m/s)



<그림 3-3-73> 성능예측선도(기류속도 5m/s)

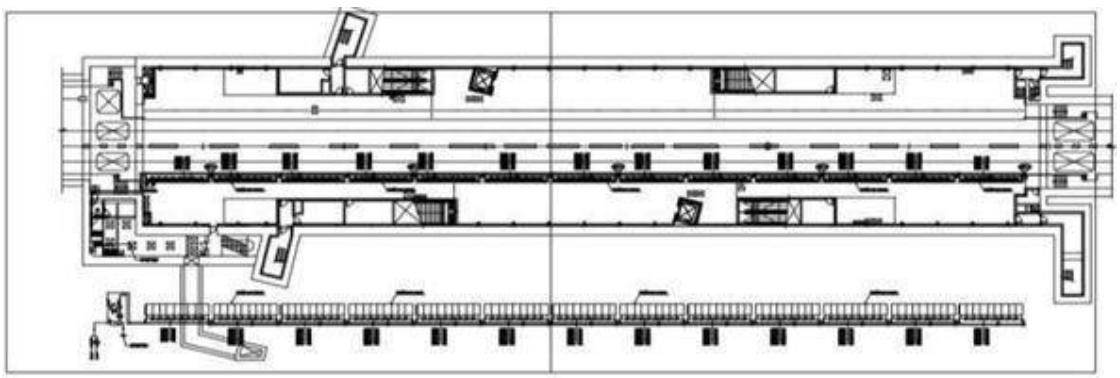
(다) TLS 성능예측 소프트웨어 개발



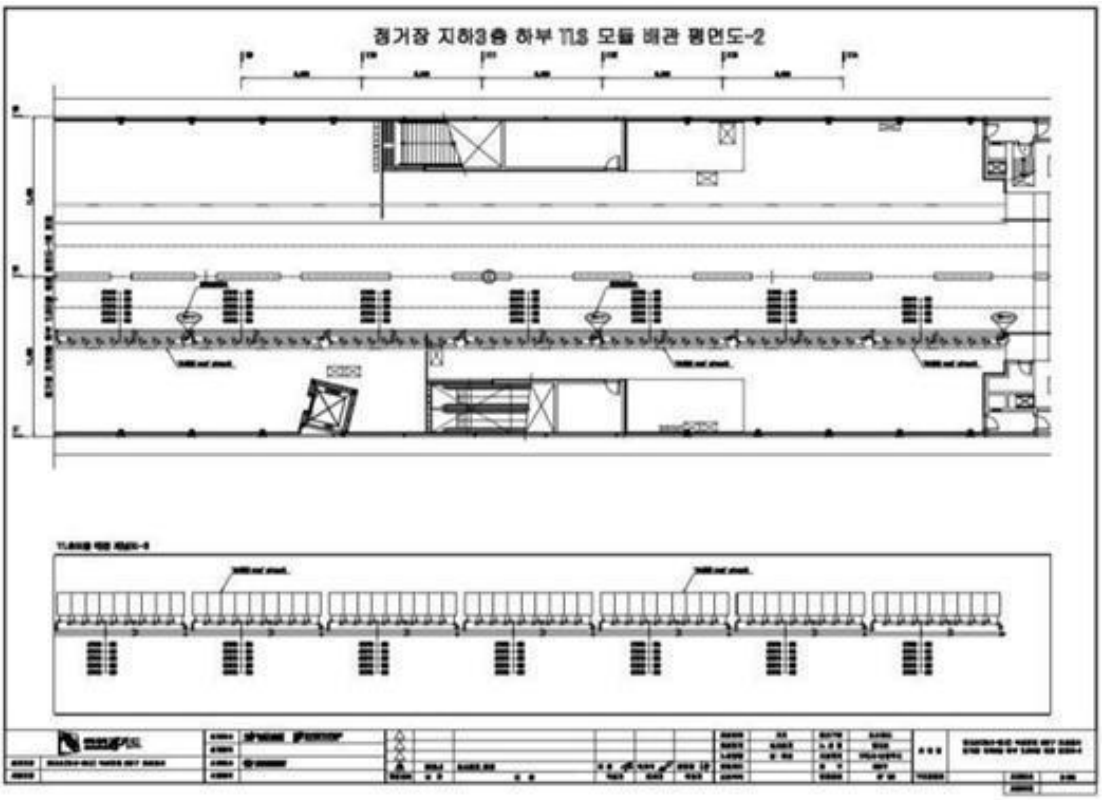
<그림 3-3-74> TLS 성능예측 소프트웨어 개발

다. TLS 실제역사 설계적용

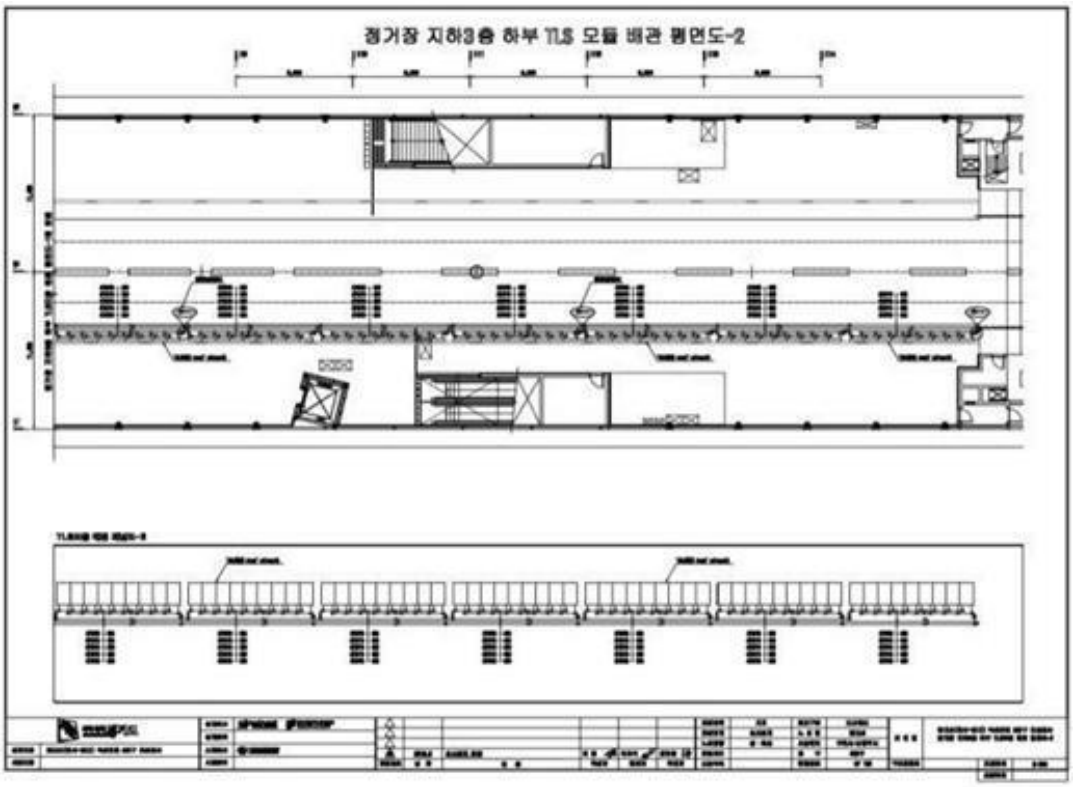
(1) 도면



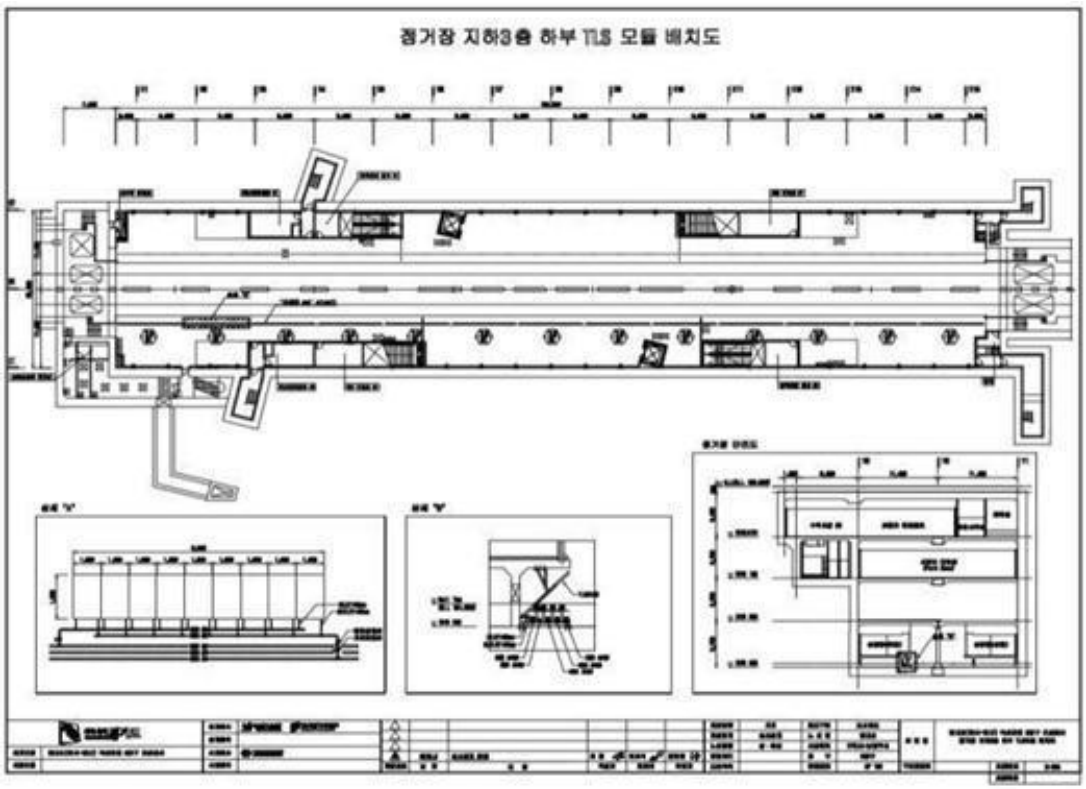
<그림 3-3-75> 평면도 하부



<그림 3-3-76> 평면도-1



<그림 3-3-77> 평면도-2



<그림 3-3-78> 모듈 배치도

(2) 공사비

공 사 원 가 계 산 서

공사명 : 별내선(암사-별내) 복선전철 6공구 건설공사(TLS모듈) [기계설비공사]

			금 액	요율(%)	구 성 비	비 고
순공사원가	재료비	직접재료비	85,253,688			
		작업설, 부산물등				
		[소 계]	85,253,688			
	노무비	직접노무비	67,096,041			
		간접노무비	6,508,315	9.7%	직접노무비	
		[소 계]	73,604,356			
	경비	기계경비	1,675			
		산재보험료	2,870,569	3.9%	노무비	
		고용보험료	640,357	0.87%	노무비	
		건강보험료	1,140,632	1.70%	직접노무비	
		노인장기요양 보험료	74,711	6.55%	건강보험료	
		연금보험료	1,670,691	2.49%	직접노무비	
		퇴직공제부금비		2.3%	직접노무비	3억원이상공사예적용
		산업안전보건관리비	4,463,847	2.93%	재료비+직접노무비	
		기타경비	7,625,186	4.8%	재료비+노무비	
		환경보전비	761,757	0.5%	재료비+직접노무비+경비	
		[illegible]	123,404	0.081%	재료비+직접노무비+경비	
		[illegible]	106,645	0.07%	재료비+직접노무비+경비	
		[소 계]	19,479,474			
계			178,337,518			
일반관리비			10,700,251	6.0%	순공사원가계	
이윤			15,567,612	15.0%	노무비+경비+일반관리비	
공급가액			204,605,381			
T A B 공사						
부가가치세			20,460,538	10.0%	공급가액+T,A,B	
도급금액			225,065,919			
관급공사					부가가치세,조달수수료포함	
분담금공사						
결정금액			225,065,000			천원단위절사

<그림 3-3-79> 공사 원가 계산서

집 계 표

[공사명] 별내선(암사-별내) 복선전철 6공구 건설공사(TLS모듈)

품 명	규 격	단위	수량	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비고	
				단가	금액	단가	금액	단가	금액	단가	금액		
01 기계설비공사			1	85,253,688	85,253,688	67,096,041	67,096,041	1,675	1,675	152,851,404	152,851,404		01
0101 장비설치공사			1	23,505,806	23,505,806	526,870	526,870	0	0	24,032,676	24,032,676		0101
0102 기계설비관공사			1	10,911,760	10,911,760	11,233,020	11,233,020	826	826	22,145,106	22,145,106		0102
0103 TLS모듈배관공사			1	50,836,122	50,836,122	55,336,151	55,336,151	1,849	1,849	106,173,622	106,173,622		0103
[합 계]					85,253,688		67,096,041		1,675		152,851,404		

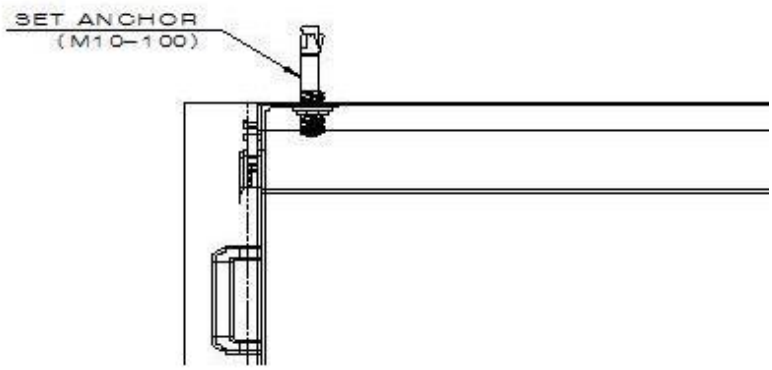
<그림 3-3-80> 내역서

라. **부착형식별 구조물 추가설계**

(1) TLS패널의 제원

(가) TLS패널

- 판의 두께 : H1,000×B1,000, T=20mm, 2T판재 사용
- 프레임의 제원 : L-50×5, L-45×4, L-30×3



<그림 3-3-81> TLS패널 정면도, 측면도, 제원

(나) 판넬

① 재료성질

<표 3-3-229> 스테인리스 특성 1

구 분	탄성계수	프와송비	단위중량	비 고
스테인리스강판	200 GPa	0.3	79.3 kN/m3	STS304

② 강재의 허용응력

<표 3-3-230> 스테인리스 특성 2

구 분	항복응력	허용 휨인장/압축응력	허용전단응력	비 고
스테인리스강판	230 MPa	140 MPa	80 MPa	STS304

(다) 프레임

① 재료성질

<표 3-3-231> 형강 특성 1

구 분	탄성계수	프와송비	단위중량	비 고
형 강(SS400)	200GPa	0.3	78.5kN/m3	아연도금처리

② 형강의 허용응력

<표 3-3-232> 형강 특성 2

구 분	항복응력	허용 휨인장/압축응력	허용전단응력
형 강(SS400)	230 MPa	140 MPa	80 MPa

(라) 앵커 및 볼트

○ 앵커볼트의 종류 : 후설치 케미컬 앵커

○ 앵커 볼트의 크기 : M10 (앵커길이 100mm)

○ 앵커설치 깊이 : 80mm

<표 3-3-233> 기계적 특성

인장응력	항복응력	비 고
500 MPa	400 MPa	-

<표 3-3-234> 앵커의 설계저항강도

인장강도	전단 강도	비 고
11.8 kN	9.0 kN	-

○ 판재 전면 - 형강은 용접으로 고정

(2) 하중조건

(가) 고정하중 (단위중량)

○ 강재 : 7,850 kg/m3

(나) 풍하중

$$p = 5 \times 10^{-7} \rho V_d^2 C_d G$$

$$p = 5 \times 10^{-7} \times 1.225 \times 10^2 \times 1.3 \times 1.9$$

$$= 0.00015\, Mpa\, (= 0.15 kN/m^2)$$

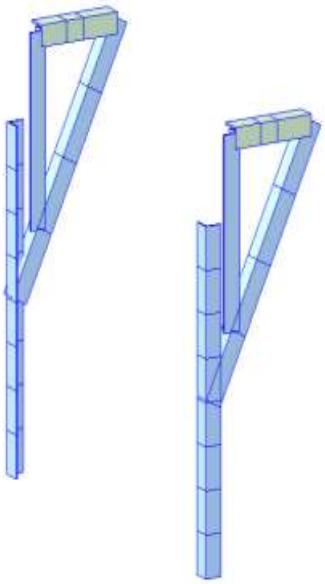
(다) 하중조합

<표 3-3-235> 하중 조합

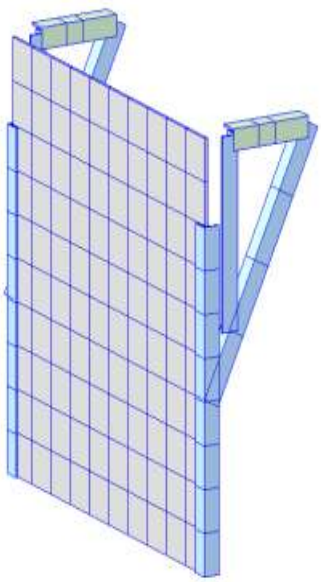
CASE	고정하중	풍하중	비고
COM-1	1.0		ASD (허용응력설계)
COM-2	1.0	1.0	
COM-3	1.40		USD (앵커볼트설계)
COM-4	1.20	1.30	

(3) TLS패널 모델링 및 경계조건

(가) 해석모델

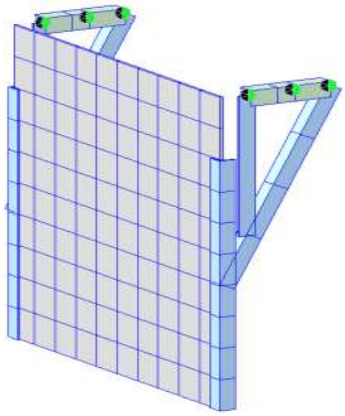


<그림 3-3-82> 프레임 해석모델



<그림 3-3-83> 패널+프레임 해석모델

(나) 경계조건



<그림 3-3-84> 지점조건

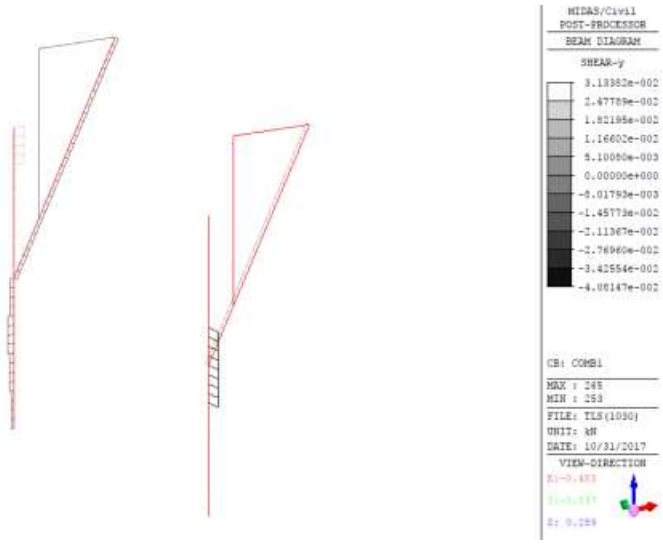
<표 3-3-236> 지점조건

방향	Restraint
Dx	◎
Dy	◎
Dz	◎
Rx	×
Ry	×
Rz	×
Free: ×, Fixed: ◎	

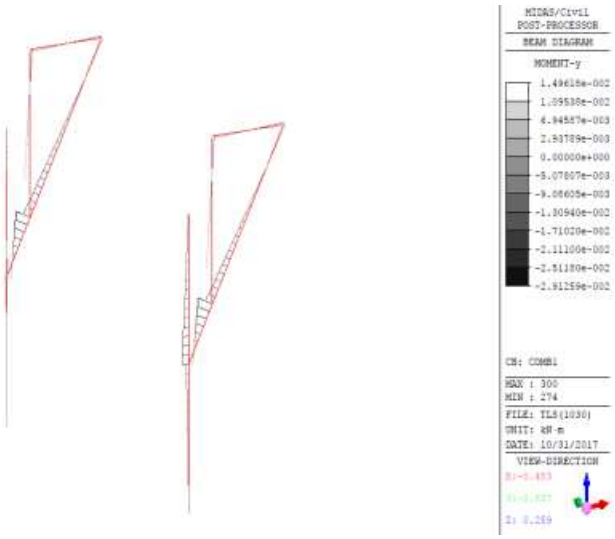
(4) 해석 결과

(가) 프레임의 부재력

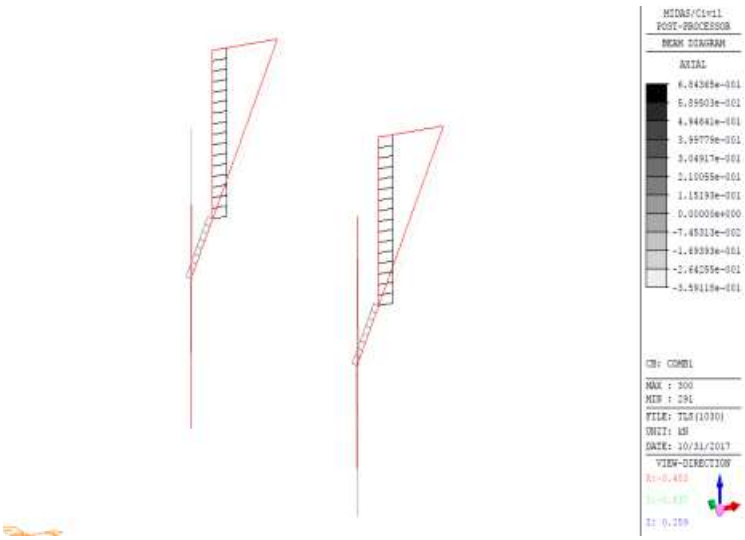
① 프레임의 부재력도



<그림 3-3-85> TLS패널 Frame S.F.D



<그림 3-3-86> TLS패널의 Frame B.M.D



<그림 3-3-87> TLS패널의 Frame Axial Force

② 부재력 정리

<표 3-3-237> 부재력

형식		TLS패널
L형강	M_{max} (kN.m)	0.029
	V_{max} (kN)	0.041

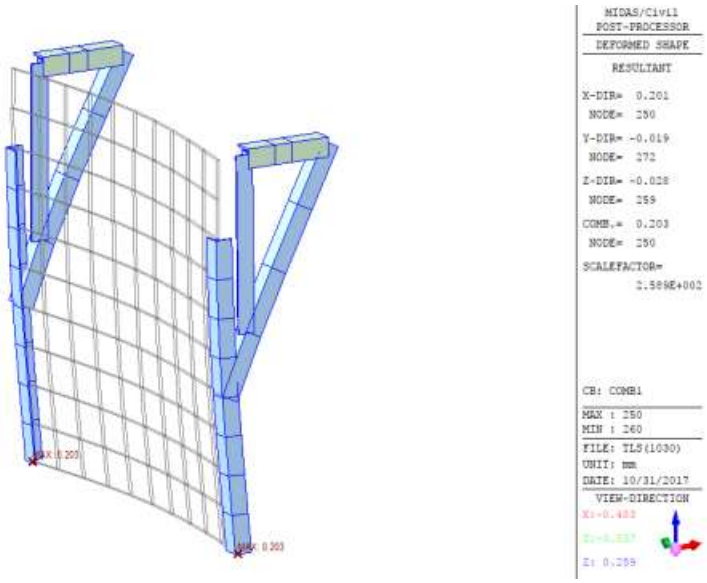
(나) 지점의 반력 (앵커설계력)

<표 3-3-238> 지점의 반력

형식		TLS패널
반력	R_{max} (kN)	0.805
	V_{max} (kN)	0.050

* 강도설계에 의한 반력임.

(다) 변형도



<그림 3-3-88> 변형도

<표 3-3-239> 변형도

형식	TLS패널 프레임
변형	0.203 mm

(5) 부재 검토 결과

(가) TLS패널 프레임 응력검토

<표 3-3-240> TLS패널 프레임

구 분		TLS패널 프레임
응력 (N/mm^2)	f_{max}	15.138
	f_{allow}	140 / 80
	판정	OK!

(나) 앵커 설계

○ 앵커에 작용하는 최대 작용력(극한하중)에 대해서 M10 케미컬 앵커의 설계 저항강도와 비교 검토

<표 3-3-241> 앵커 설계

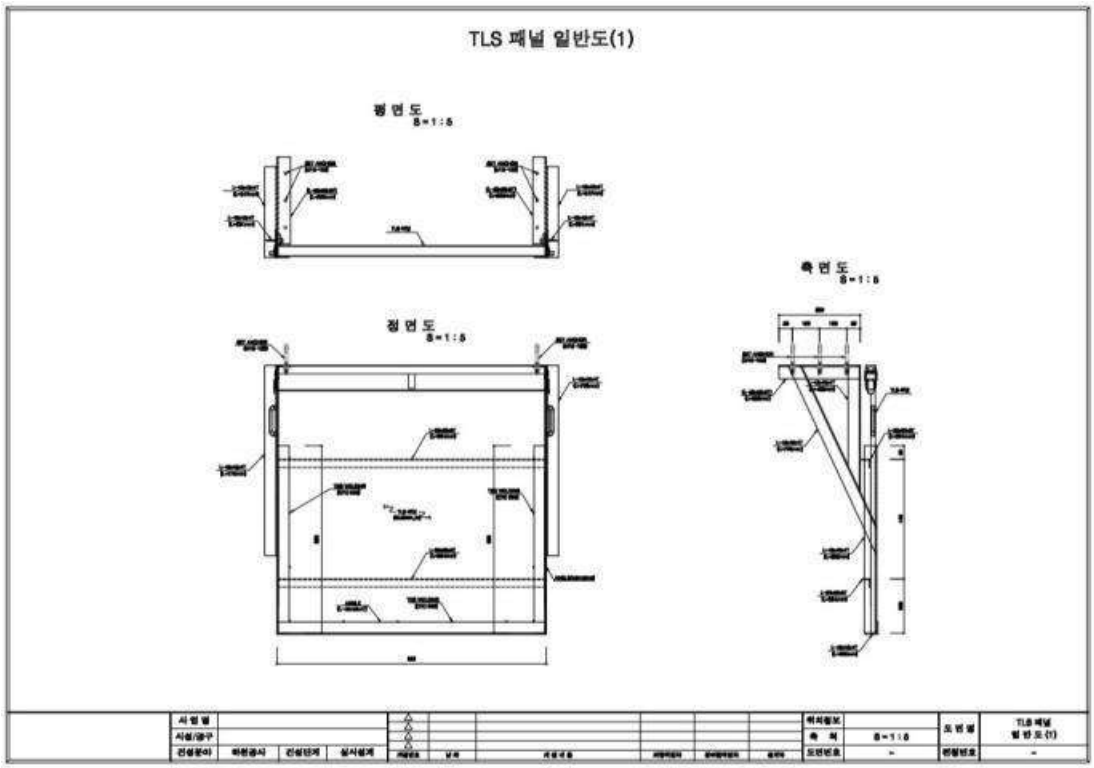
앵커에 작용하는 작용력	앵커의 설계저항강도	판 정
0.805 kN (수직력)	< 11.8 kN	O.K !
0.050 kN (수평력)	< 9.0 kN	O.K !

(6) 아치형 부재의 안전성

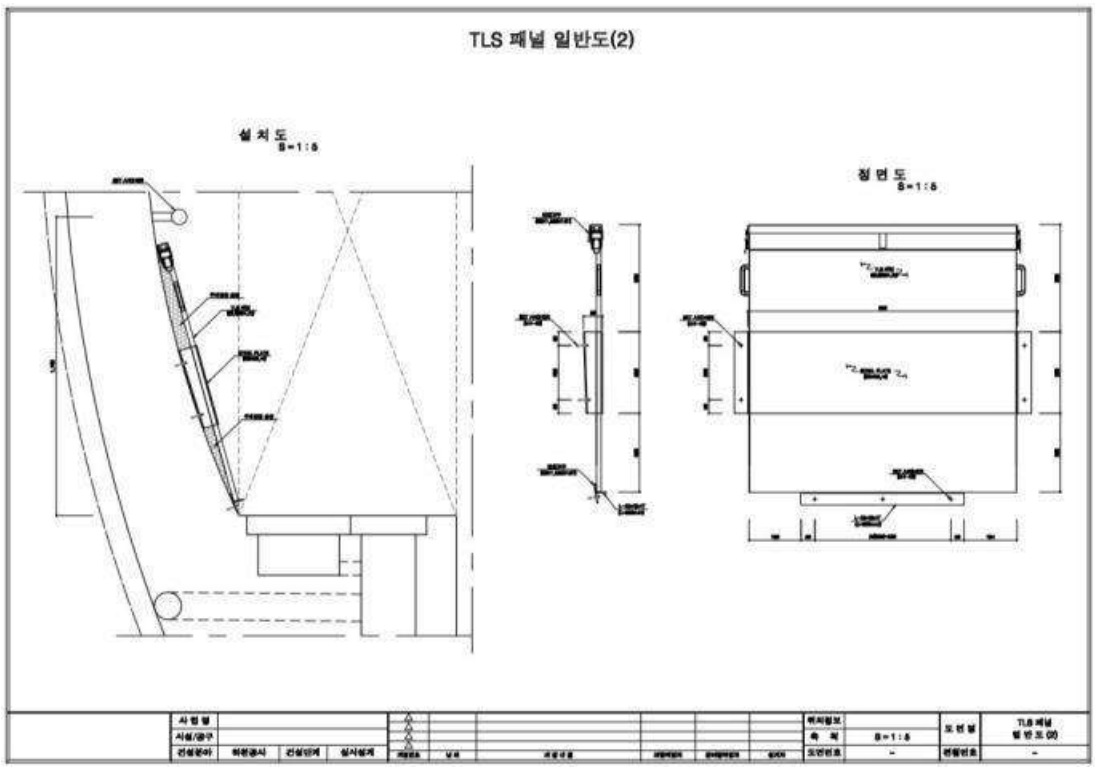
○ 아치형 TLS 패널 프레임은 패널 하부의 L-형강으로 지지되므로 형강의 플랜지 응력을 검토하여 안전성을 확인 한다.

- 작용하중 : 60 kgf
- 최대모멘트 : 45mm x 10N = 450 N.mm
- 단면계수 : $Z = \frac{1}{6}BH^2 = 26.66\,mm^3$
- 응력검토 : $f = \frac{M_{\max}}{Z} = \frac{450}{26.66} = 16.879\,Mpa < 140.0\,Mpa$ -----> OK

(7) TLS 패널 도면



<그림 3-3-89> TLS 패널 도면1



<그림 3-3-90> TLS 패널 도면2

마. **구조체 실부착물 제작**

(1) 매달기식 (플랫폼 하부)



<그림 3-3-91> 메달기식

(2) 벽부착식 (터널 벽체 부착)



<그림 3-3-92> 벽부착식

제4절. 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템

1. 시스템 개요

가. 시스템 개요 및 구성

(1) 시스템 개요

- 도시철도 지하역사의 실내 공기질을 기준에 만족하기 위한 환기시스템의 최적 운영을 위한 운영 알고리즘과 환기설비용 고효율 전동기 및 가변운전 인버터를 통한 환기설비의 에너지를 효율을 최적화시키기 위한 시스템임.



<그림 3-4-1> 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템 개념도

(2) 시스템 구성

- 승강장 환경센서
  - 에어퀴릴티센서(온도, 습도, Co2 농도), 미세먼지센서(PM10) 측정용 센서(승강장 내 3개소 설치)
- 고효율 전동기 및 가변제어 인버터
  - IE4급 synRM 전동기(30kW, 효율 95% 이상)
  - 가변제어 인버터(3상 전압원 인버터, 불연속 변조 제어)
- 환기설비 운영 상위제어기 및 최적 운영 알고리즘
  - 상위제어기 : 관제실 통신, 인버터 제어 및 감시, 실내환경 측정, 최적 운전패턴
  - 최적 운영 알고리즘 : 실내 공기질 기준 내에 전동기 가변제어 알고리즘

나. **시스템 기능 및 성능**

(1) 기능

- 실내 공기질 기준을 만족하는 수준에서 환기설비 자동 제어 가능
- 기존 On/Off 방식 대비 동일 운전조건에서의 에너지 절감 가능(전동기 효율 향상 및 가변제어를 통한 에너지 최적화)
- 환기 설비용 고효율 전동기 및 제어기 도입에 따른 경제성 분석 및 전력 소비량 예측 기능

(2) 목표 성능

- 일일 환기설비 절감량 : 158kWh/일 (15시간 운전 기준)

2. **지하철역사에 고효율 전동기 도입의 타당성 검토**

가. **확률적 비용-편익 방법을 이용한 도시철도역사 환기시스템에 고효율 전동기 도입 타당성 분석 방법 개발**

(1) 이론적 접근 방법

- 고효율 환기시스템에 가변운전방식의 고효율전동기 도입의 cost benefit 분석을 진행하기 위해서는 사용기간 동안 발생되는 cost와 benefit을 각각 산정하여 분석하여야 함.
- 일반적으로 설비의 사용기간 동안 발생되는 비용에는 구매비용, 설치비용, 에너지 비용 등이 포함되며 이를 계산하기 위한 방법으로는 LCC 방법이 있음. LCC는 전체 수명 동안 프로젝트의 초기 투자 및 미래 비용을 평가하는데 효과적인 도구임. LCC 분석을 사용하면 투자자가보다 합리적인 구매 결정을 내릴 수 있으며 대부분의 엔지니어링 프로젝트는 하나 이상의 실행 가능한 설계 대안으로 수행 될 수 있음. 실제로, 투자자들은 최소한의 자본 투자가 요구되는 수용 가능한 대안을 고려하며, 추가 투자는 생산 능력 증대, 품질 향상, 매출 증대 또는 운영 비용 감소에만 고려될 수 있음. 따라서 추가 자금이 투자되기 전에 투자에서 추가 혜택을 얻을 수 있음을 보여 주어야 함.
- LCC 분석은 세 가지 주요 구성 요소로 구성됨. 첫 번째 요소는 초기 비용과 미래 비용이라는 두 가지 비용으로 나눌 수 있는 비용이며 LCC 분석의 두 번째 구성 요소는 프로젝트의 예상 수명에 해당하는 시간임. 세 번째 구성 요소는 시간 가치를 반영하는 할인율임. 할인율은 미래 비용의 현재 가치를 제공하며, LCC 분석은 프로젝트의 비용, 수익 또는 운영 비용 구조를 개발하는 데 있어 중요한 도움이 됨.
- 고효율 시스템 도입으로 발생되는 편익으로는 에너지절감 및 에너지절감에 따른 발전연료 절감이 있으며 또한 발전연료절감으로 인해 대기질 오염물질 감소 등이 있음. 본 연구에서는 고효율 전동기 도입으로 인해 발생되는 편익을 에너지절감, 발전연료절감, 대기질 오염물질 절감 3항목으로 선정하였으며, 탄소배출절감은 탄소배출거래권 제도 시행에 따라 별도의 편익항목으로 구분하여 계산하고자 함. 발생되는 편익은 LCC방법으로 접근하여 사용주기 동안 발생된 편익을 비용으로 계산하여 구함.

- 본 연구에서는 비용 편익 분석 방법 중 하나 인 순현재가치(NPV) 방법을 사용하며, 이 방법을 사용하면 각 옵션의 비용과 편익이 현재 가치로 변환되고 가장 높은 NPV가 대안 중에서 선호되는 옵션으로 선택됨.
- 비용 항목 중 에너지 소비량은 공기질 상태에 따라 변화되며 본 연구에서는 확률적으로 발생되는 공기질 상태를 고려하여 에너지 소비량을 계산하고자 몬테카를로 기법을 사용함.
- SynRM은 동기 릴럭턴스 전동기로써 구동을 위한 가변전압 가변주파수(VVVF)의 벡터 인버터가 필수 적이나 가변 범위가 넓고 응용분야가 넓기 때문에 부하의 빈번한 속도 변동이나 크기변동 대응측면 등 여러 가지 측면에서 산업용으로 적합함. 또한 SynRM은 구조적으로 회전자에 추가적인 다이케스팅 작업이 불필요하고 금형으로 프레스 가공하여 적층을 하기 때문에 장기적으로 양산단가를 낮출 수 있는 장점이 있음. 따라서 본 과제는 기존의 유도기보다 높은 효율을 가질 수 있도록 30kW SynRM을 설계함.
- 본 과제에서 사용하는 어플리케이션은 저속 고 토크를 요구하는 부하이기 때문에 사이즈가 큼. 전동기의 사이즈가 커지면 영구자석의 사용량이 증가되는데 영구자석은 고가이기 때문에 재료비당 생산가격이 합리적이지 않음.
- 아래 표에 급기팬의 정격 운전속도 1800[rpm]에서 SynRM과 SPM(표면 영구자석 부착형 동기전동기)을 비교하여 나타냄. 동일 토크 재료비 비율을 비교해보면 해석 결과 SPM사이즈는 SynRM 전동기에 비해 약 54% 정도 그 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있음. 적층하더라도 Nd 자석을 쓰지 않게 되어 재료비가 싼 것을 확인할 수 있음. Nd자석의 단가는 230,000[원/kg], S60의 단가는 1,650[원/kg], 동의 단가는 8,873[원/kg], 영구자석이 이 들어가므로 그 가격이 약 6배 이상 차이가 나는 것을 확인할 수 있음.

구분	SPM	SynRM
고정자 외경 (mm)	298	
회전자 외경 (mm)	191	
적층 (mm)	135	250
공극길이 (mm)	0.65	
토크 (Nm)	164	161
재료비(하우징제외)(만원)	155	23
동일토크 재료비 비율(%)	100	14.8

○ 투자회수년 분석

- 도시철도역사 실내공기질(미세먼지농도) 권고기준을 충족하기 위한 운전시간 기준 경제성 분석을 실시.
- 투자회수년은 IE3급 전동기가 6.3년으로 가장 적고, SynRM은 7.5년, 영구자석형 전동기의 경우 17.2년으로 2.5배 이상으로 차이남.
- 10년간 전력요금 절감액은 IE3급 전동기가 3,540천원으로 가장 적고, SynRM 7,782천원, 영구자석형은 8,588천원 순으로 분석됨.
- 투자회수년 및 년간전력요금 절감액을 종합적으로 고려하였을 경우 SynRM이 가장 경제적임.

구분	투자금액 (천원)	년간 전력요금 절감액 (천원)	10년 전력요금 절감 총액 (천원)	투자회수년
IE3급 전동기	4,300	364	3,540	6.3년
SynRM (양산시 현재 대비 50% 할인가격)	8,300	800	7,782	7.5년
영구자석형 전동기 (양산시 현재 대비 50% 할인가격)	24,900	883	8,588	17.2년

(2) 계산방법

- 과거의 환기설비 관련 경제성 분석 연구들을 통하여 본 연구에서는 비용 항목을 초기비용, 유지관리비용, 해체폐기비용으로 구분하였음.
- 초기 비용의 항목으로는 재료비 설치비로 선정하였으며 유지관리비용으로는 에너지 비용, 일반관리비, 교체수리비로 선정하였음. 해체폐기비용으로는 철거비용으로 선정하였음.
- 분석 기간은 전문가의 인터뷰를 반영하여 산정하였으며 일반적으로 전동기의 수명을 30년으로 보고 있음. 본 연구에서는 분석기간을 20년, 25년, 30년으로 나뉘어 분석을 하였으며 대안 선택에 있어서 다양한 선택권을 주고자 함.

(가) Initial costs

- 초기비용 (C_I)은자재비(C_m), 설치비 (C_i)로 구분하며 다음과 같이 계산됨.

$$C_I = C_m + C_i$$

- 자재비(C_m)는 전동기 구입 비용으로 간주하며 가변운전방식의 경우 전동기 및 인버터1세트 가격임.
- 설치비 (C_i)는 전동기 및 인버터 설치 가격으로 간주

(나) Maintenance costs

- Maintenance costs (C_M)는 Labor costs(C_l), 교체비((C_r)로 구분하며 다음과 같이 계산.

$$C_M = C_i + C_r$$

- Labor costs는 지하철역사 기계설비부서 인원의 인건비로 간주.
- 교체비는 설비운영기간 파손, 또는 고장이 발생되었을 때 수리비용으로 간주

(다) Energy cost

- Energy costs (C_E)는 환기설비가 운영기간 동안 소모하는 전력소비량이며 연간 발생 비용은 일반적으로 입력 (P_i), 일가동시간(T_d), 연간가동일수(D_y), 전력요금단가 (C_{pr})를 곱한 값임.
- 정격운전일 경우 계산방법은 다음과 같음.

$$C_E = P_i \times T_d \times D_y \times C_{pr}$$

- 입력(P_i)는 출력(P_o)을 효율(η)로 나눈 값임.

$$P_i = P_o/\eta$$

- 여기서 산업용 전기는 계절별, 시간대별 전력요금이 상이하다. 따라서 이를 반영하여 에너지비용을 산정하여야 함.
- 가변운전의 각 시간대별 계산방법은 정격운전대비 절감된 에너지비율을 곱하여야 함.

$$C_E = P_i \times \eta_v \times T_d \times D_y \times C_{pr}$$

- 에너지 소비량에 영향 주는 요인은 실외미세먼지 좋고 나쁨 발생 확률을 반영하여 산정함.
- 한국의 경우 미세먼지발생 상태를 좋음 보통 나쁨 매우나쁨 4가지로 구분함.
- 연구에서는 가변운전방식의 에너지절감률을 다음과 같이 가정함. 미세먼지 농도가 좋음 일 경우 20%에너지를 절감, 보통 일 경우 15%절감, 나쁨 일 경우 10%절감, 매우 나쁨 일 경우0% 절감으로 가정함. 최근 10년간의 기상청데이터를 바탕으로 시간대별 발생 확률을 통계를 구하고 몬테카를로를 이용하여 시간대별 발생되는 미세먼지상태에 따른 에너지소비량을 계산함. 본 연구에서 몬테카를로 시행횟수는 일반적인 시행횟수인 만회로 선정함.

(라) Demolition costs

- 해체폐기비용 (C_d)는 전동기의 사용주기가 끝난 후 해체폐기시 발생되는 인건비로 산정함.

(마) Fossil fuel savings

- 전체 발전량에서 신재생에너지 및 원자력에너지를 제외하고 석탄, 가스, 석유 등 화석에너지만 고려하여 산정함. 원자력 및 신재생에너지를 제외시킨 것은 기존 연구가 부족할 뿐만 아니라 자료에 대한 접근이 쉽지 않으며, 핵사고와 방사성 폐기물 등에 대한 이견 때문에 사회적 비용을 추정하기 어려운 점이 있음.
- 화석에너지만 고려하였을 경우 연간 화석연료 절감비용은 다음과 같이 산정함.

$$B_F = E_S \times R \times r \times C_Q$$

- E_S는 연간에너지절감량
- R은 발전량 중 종류별화석에너지차지비중
- r은 단위발전량당연료소요량
- C_Q는 에너지단가

(바) Air quality improvements

- 에너지절감에 따라 발생되는 대기오염물질 절감 편익은 다음과 같이 산정함.

$$B_A = Q_F \times \{(q_s \times C_{\alpha S}) + (q_N \times C_{\alpha N}) + (q_T \times C_{\alpha T})\}$$

- Q_F연간 에너지별 절감량
- q_S에너지 한 단위당 황산화물 배출량
- q_N에너지 한 단위당 질소산화물 배출량
- q_T에너지 한 단위당 먼지 배출량

- $C_{\alpha S}$황산화물 한 단위당 피해금액
- $C_{\alpha N}$질산화물 한 단위당 피해금액
- $C_{\alpha T}$먼지 한 단위당 피해금액

(사) Carbon reduction

- 연간 탄소 배출 절감 가격은 다음과 같이 계산함.

$$B_C = E_S \times EF \times C_{CO_2}$$

- EF는 전력의 탄수 배출 계수
- C_{CO_2}는 탄소배출거래권가격

(아) Air quality improvements

편익의 현재가치-비용의 현재가치=순현재가치

- 본 연구에서 비교대상인 기존전동기도입 방안과 고효율 제품 도입이며, 기존 대안은 지하철역사에서 무조건적으로 도입되어야 하는 방안이고 고효율 시스템 도입은 제안되는 대안이기 때문에 발생되는 여기서 비용은 기존 대안 대비 추가로 발생되는 비용임.

나. **도입 타당성 분석수행 결과**

(1) 대상

- 사례대상은 서울지하철 7호선 수락산역사의 승강장 및 승강장 환기설비 2대로 선정함. 수락산역사는 지하역사이고 30kW급 대용량 환기설비가 승강장 환기를 담당하고 있음.

(2) Initial cost and Maintenance costs

- 비용항목 중 재료비와 설치비는 국내 전동기 업체의 실제 판매가격으로 산정함.

<표 3-4-1> 재료비 산정

재료비	4,130,000	33,234,000
설치비	4,000,000	5,000,000

(가) Power consumption price analysis

- 지하철 역사의 소비전력은 고압A 선택II 요금제이며, 이 요금제는 다음 표와 같이 구분됨. 계절별로는 여름철, 봄/가을철, 겨울철 3가지로 구분되며, 여름철은 6월~8월, 봄/가을철은 3월~5월/9월~10월, 겨울철은 11월~2월로 나뉨.
- 시간대별로는 경부하, 중간부하, 최대부하로 나뉘며 세부적으로는 다음과 같음. 경부하시간은 여름철, 봄/가을철 23:00~09:00, 겨울철 23:00~09:00
- 중간부하는 여름철, 봄/가을철09:00~10:00, 12:00~13:00, 17:00~23:00, 겨울철 09:00~10:00, 12:00~17:00, 20:00~22:00, 최대부하는 여름철, 봄/가을철 10:00~12:00, 13:00~17:00, 겨울철 10:00~12:00, 17:00~20:00, 22:00~23:00로 구분됨.

<표 3-4-2> 계절별, 시간대별 부하구분

구분	여름철, 봄/가을철	겨울철
	(6월～8월)(3월～5월,9월～10월)	(11월～2월)
경부하	23:00～09:00	23:00～09:00
중간부하	09:00～10:00	09:00～10:00
	12:00～13:00	12:00～17:00
	17:00～23:00	20:00～22:00
최대부하	10:00～12:00	10:00～12:00
		17:00～20:00
	13:00～17:00	22:00～23:00

- 전력요금 단가는 계절별, 부하시간대별 다음과 같이 구분됨.

<표 3-4-3> 부하별 전력요금단가(원)

	여름철	봄/가을철	겨울철
경부하	56.1	56.1	63.1
중간부하	109	78.6	109.2
최대부하	191.1	109.3	166.7

(나) 기존대안의 에너지소비량 계산

- 기존 대안의 전동기 효율 및 운행시간을 반영하여 연간 에너지소비량을 계산하면 다음과 같음.

<표 3-4-4> 기존전동기 에너지소비량(kWh) 및 비용(원)

에너지소비	에너지비용
353225.80	30105990.64

(다) 확률적 방법을 이용한 새로운 대안의 에너지소비량 계산

- 새로운 대안은 실외 미세먼지의 발생 상황에 따라 에너지소비량이 변화됨으로 우선 먼저 실외미세먼지 발생확률을 구하여야 함.
- 실외 미세먼지농도는 1시간 단위로 측정을 진행하고 좋음 0～30, 보통 31～80, 나쁨 81～150, 매우나쁨 151이상으로 분류함.
- 2006년부터 2015년까지 분석대상이 위치한 구역의 미세먼지농도 측정데이터를 이용하여 전력부하 시간대별 실외 미세먼지농도가 좋음, 보통, 나쁨, 매우나쁨 데이터를 통계 내어 확률을 분석하였음.

<표 3-4-5> 경부하 시간대별 공기질 상태 확률

구분	경부하			
	좋음(0～30)	보통(31～80)	나쁨(81～150)	매우나쁨(151～)
1월	0.20721	0.63331	0.15205	0.00743
2월	0.19736	0.60064	0.17741	0.02458
3월	0.21560	0.61636	0.13507	0.03297
4월	0.22101	0.60694	0.15165	0.02040
5월	0.22386	0.58219	0.17159	0.02235
6월	0.32322	0.55993	0.11086	0.00599
7월	0.48017	0.41179	0.09967	0.00837
8월	0.60102	0.36737	0.03161	-
9월	0.61147	0.36916	0.01557	0.00380
10월	0.44132	0.50201	0.04241	0.01426
11월	0.36613	0.52083	0.09568	0.01736
12월	0.26282	0.57455	0.14354	0.01909

<표 3-4-6> 중간부하 시간대별 공기질 상태 확률

구분	중간부하			
	좋음(0～30)	보통(31～80)	나쁨(81～150)	매우나쁨(151～)
1월	0.18647	0.64571	0.15351	0.01431
2월	0.17912	0.59811	0.19307	0.02970
3월	0.20642	0.58310	0.16172	0.04876
4월	0.20963	0.61057	0.15807	0.02173
5월	0.19104	0.60570	0.17474	0.02852
6월	0.29919	0.59266	0.10434	0.00381
7월	0.46525	0.44630	0.08348	0.00496
8월	0.56908	0.40988	0.02059	0.00046
9월	0.60647	0.37090	0.02217	0.00046
10월	0.41359	0.51892	0.05700	0.01049
11월	0.37635	0.51478	0.09385	0.01502
12월	0.25190	0.57223	0.15459	0.02129

<표 3-4-7> 최대부하 시간대별 공기질 상태확률

구분	최대부하			
	좋음(0～30)	보통(31～80)	나쁨(81～150)	매우나쁨(151～)
1월	0.21413	0.59511	0.17130	0.01947
2월	0.18019	0.59487	0.19033	0.03461
3월	0.19472	0.59186	0.16777	0.04565
4월	0.20841	0.61313	0.15371	0.02476
5월	0.18712	0.59877	0.18466	0.02945
6월	0.31054	0.59643	0.08688	0.00616
7월	0.49583	0.43333	0.06786	0.00298
8월	0.61366	0.37019	0.01615	-
9월	0.64446	0.32850	0.02704	-
10월	0.42954	0.49691	0.06366	0.00989
11월	0.34719	0.52343	0.11155	0.01782
12월	0.25634	0.54673	0.17557	0.02136

- 외부미세먼지 농도가 좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨 일 때 에너지소비량이 각각 20%, 10%, 5%, 0% 절감 되는 것으로 가정하였을 경우 가변운전방식의 전력부하 시간대별 요금은 다음과 같음.

<표 3-4-8> 경부하 시간대별 에너지소비량 및 비용

경부하				
구분	에너지소비량(kWh)		비용(원)	
	평균	편차	평균	편차
1월	5429.85	65.28	342522.80	4132.41
2월	5382.52	69.63	339644.26	4358.20
3월	5619.23	63.83	315323.01	3602.34
4월	5561.85	66.14	312018.48	3673.87
5월	5508.18	70.08	308986.51	3908.35
6월	5593.38	57.20	313765.45	3272.40
7월	5517.00	53.54	309550.10	3024.78
8월	5616.04	35.42	315059.09	1996.06
9월	5655.20	29.75	317216.64	1696.94
10월	5704.80	41.08	320046.72	2312.26
11월	5480.53	53.97	345819.69	3420.34
12월	5422.77	63.85	342227.86	3993.51

<표 3-4-9> 중간부하 시간대별 에너지소비량 및 비용

중간부하				
구분	에너지소비량(kWh)		비용(원)	
	평균	편차	평균	편차
1월	5177.72	64.77	565385.99	7066.40
2월	5092.25	70.36	556122.80	7708.69
3월	4238.69	59.97	333158.77	4750.06
4월	4231.32	58.90	332634.87	4647.23
5월	4209.44	62.07	330819.72	4858.86
6월	4286.43	50.05	467172.20	5395.82
7월	4244.33	44.73	462664.34	4862.70
8월	4318.81	28.15	470635.88	3062.40
9월	4294.94	28.34	337534.77	2233.00
10월	4327.58	39.83	340158.42	3105.39
11월	5208.09	52.41	568727.21	5723.89
12월	5137.23	64.41	560976.49	7021.06

<표 3-4-10> 최대부하 시간대별 에너지소비량 및 비용

최대부하				
구분	에너지소비량(kWh)		비용(원)	
	평균	편차	평균	편차
1월	1574.54	36.81	262424.51	6244.45
2월	1569.40	39.02	261628.26	6474.06
3월	2379.56	46.34	259972.05	5030.15
4월	2385.16	44.09	260737.95	4822.89
5월	2357.20	47.48	257737.98	5106.47
6월	2428.60	34.61	463915.06	6634.50
7월	2395.70	30.98	457824.20	5879.33
8월	2420.33	19.63	462540.27	3783.93
9월	2398.93	21.88	262208.35	2388.14
10월	2421.30	30.53	264648.55	3397.73
11월	1595.17	31.30	265896.59	5177.52
12월	1563.20	36.93	260734.54	6162.15

- 가변운전방식의 연간 에너지 소비량은 다음과 같음.

<표 3-4-11> 가변운전방식 에너지소비량 및 비용

kWh		비용(원)	
평균	편차	평균	편차
146746.55	299.53	12948299.1	28417.10
293491.92	598.66	25896742.2	56431.25

(라) Fossil fuel savings

- 화석연료절감비용을 산정하기 위해 국내 발전부분의 비중과 단위 전력당 에너지 소모량 및 에너지단가를 조사하였음.
- 발전부문 차지하는 비중은 다음과 같음.(EPSIS, 2016)

<표 3-4-12> 발전부분 에너지별 비중

석탄	유류	LNG	원자력	양수	신재생	합계
31001	4141	32602	21716	4700	8908	103068
30.08%	4.02%	31.63%	21.07%	4.56%	8.64%	100%

- 단위 발전량당 에너지소비량은 다음과 같음(EPSIS, 2016).

<표 3-4-13> 에너지 소비량

석탄(kg/kWh)	유류(l/kWh)	LNG(kg/kWh)
0.371	0.24	0.143

- 에너지별 단가는 다음과 같음.(EPSIS, 2016)

<표 3-4-14> 에너지별 단가

구분	유연탄	B-C유	LNG
금액	94926.19원/톤	495351.39원/KL	565523.86원/톤

• 연간 화석연료 절감량은 다음과 같음.

<표 3-4-15> 연간 화석연료 절감량

구분	절감량	편차	절감금액	편차
석탄	6666.30979	66.7955	632,807.39	6,340.93
유류	576.3144	5.7864	285,478.14	2,866.30
LNG	2701.86488	27.01413	1,527,969.06	15,277

(마) Air quality improvements

<표 3-4-16> 에너지종류별 환산계수

에너지종류	황산화물 (US$/톤)	질소산화물 (US$/톤)	먼지(TSP) (US$/톤)
유연탄(g/kg)	9.50	7.50	50.00
B-C유(g/L)	20.02	6.64	1.93
LNG(g/Nm3)	0.01	6.04	0.03

※ Joon Han, 2004

• 소비자물가지수2015년을 기준 100으로 하였을 때 2004년 76.341, 2016년 100.97

(바) 대기오염물질 절감량

<표 3-4-17> 대기오염물질 절감량

구분	합계	편차
황산화물(g/kg)	74895.1	643.91
질소산화물(g/l)	70143.35	526.8
먼지(g/Nm3)	334503.48	3343.18

• 대기오염물질 절감 비용

<표 3-4-18> 대기오염물질 절감량

환경오염절감량	석탄	편차	유류	편차	LNG	편차
에너지절감량	6666.30979	66.79855	576.3144	5.7864	2701.86488	27.01413
황산화물(g/kg)	63329.94301	634.586225	11537.81429	115.843728	27.0186488	0.2701413
질소산화물(g/l)	49,997.32	500.99	3,826.73	38.42	16,319.26	163
먼지(g/Nm3)	333315.4895	3339.9275	1112.286792	11.167752	81.06	0.81

<표 3-4-19> 대기오염물질 절감비용

환경오염절감금액	합계	편차	절감금액	
황산화물(g/kg)	74895.1	643.91	721,176.90	6,200.31
질소산화물(g/l)	70143.35	526.8	647,199.18	4,860.68
먼지(g/Nm3)	334503.48	3343.18	8,391,102.68	83,864.50

(사) 비용 편익 분석

- 전동기의 사용기간 동안 발생되는 비용을 분석하였을 때 다음 표와 같으며, IE2급 전동기 대비 IE4급 도입 비용은 재료비 25,079.8$, 설치비 861.7$가 교체비1,838$ 더 추가되어 총27,778.5$가 추가 비용으로 발생되는 것으로 분석됨.
- 고효율 제품의 도입 및 가변운전방식 도입으로 인하여 연간 에너지절감 금액(편차)은 3,627$(48.6$)이며 20년 동안 사용하였을 경우 75,272.7$(1,013.6$)절감, 25년 동안 사용하였을 경우 94,923.5$(1,267.9$)절감, 30년 동안 사용하였을 경우 114,946.9$(1,5457$) 절감 되는 것으로 분석됨.

<표 3-4-20> 기존방안 생애주기비용

구분	초기비용		20	25	30
초기비용	재료비	4,130,000	4,130,000	4,130,000	4,130,000
	설치비	4,000,000	4,000,000	4,000,000	4,000,000
유지관리비	관리비	5,000,000	65,291,510	74,482,238	81,873,089
	인건비	32,000,000	417,865,662	476,686,321	523,987,771
	교체비				
	에너지비용	30,105,990	624,793,010	787,947,365	953,982,858
해체폐기비	해체비	400,000	167277.787	134518.7568	108175.1275
합계		75,635,990	1,116,247,460	1,347,380,442	1,568,1,894

<표 3-4-21> 신규방안 생애주기비용

	초기비용	1년	편차	20년	편차	25년	편차	30년	편차
초기비용	재료비	33,234,000		33,234,000		33,234,000		33,234,000	
	설치비	5,000,000		5,000,000		5,000,000		5,000,000	
유지관리비	관리비	5,000,000		65,291,510		74,482,238		81,873,089	
	인건비	32,000,000		417,865,662		476,686,321		523,987,771	
	교체비	4,101,600		2,132,981		2,132,981		2,132,981	
	에너지비용	25,896,742	56,431	537,439,073	1,176,305	677,788,619	1,471,344	820,586,982	1,793,780
해체폐기비	해체비	400,000		167277.787		134518.7568		108175.1275	
합계		105,632,342	56431	1,061,130,504	1,176,305	1,269,458,678	1,471,344	1,466,922,999	1,793,780

- 전동기의 사용주기 동안 발생되는 편익을 분석하였을 때 다음과 같음.

<표 3-4-22> 편익 총비용 1

	초기비용		20.00년		25.00년		30.00년	
	절감금액	편차	절감금액	편차	절감금액	편차	절감금액	편차
석탄	632,807.39	6,340.93	8,263,426.01	82,704.21	9,426,498.26	94,601.15	10,361,644.40	103,760.22
유류	285,478.14	2,866.30	3,727,896.10	37,446.25	4,252,535.68	42,915.25	4,674,555.81	46,820.61
LNG	1,527,969.06	15,277	19,953,461.80	199,392.33	22,760,565.90	227,439.20	25,019,037.00	250,908.92

- 화석연료 절감 금액(편차)은 연간 2017.9$(14.6$)이며 20년 동안 사용하였을 경우 27,526$(189.1$)절감, 25년 동안 사용하였을 경우 31,400.3$(216.5$), 30년 동안 사용하였을 경우 34516.4$(237.4$)절감 되는 것으로 분석됨.

<표 3-4-23> 편익 총비용 2

	초기비용		20.00년		25.00년		30.00년	
	절감금액	편차	절감금액	편차	절감금액	편차	절감금액	편차
황산화물	721,176.90	6,200.31	9,417,631.00	80,976.22	10,743,486.70	91,945.78	11,809,007.80	101,271.05
질소산화물	647,199.18	4,860.68	8,451,140.70	63,517.03	9,640,462.87	72,642.74	10,597,417.60	79,471.13
먼지	8,391,102.68	83,864.50	109,565,649.00	1,093,658.32	124,995,940.00	1,250,978.25	137,409,410.00	1,369,809.76

- 대기오염물질피해 감소 금액(편차)은 연간 8409.5$(72.6$)이며, 20년 동안 사용하였을 경우 109815.2$(940.7$)를 절감, 25년 동안 사용하였을 경우 125276.8$(1085.9$) 절감, 30년을 사용하였을 경우 137709.4$(1190$)를 절감하는 것으로 분석됨.
- Co2 절감 금액은 매년 257.06$(13.7$)이며 20년 동안 사용하였을 경우 3356.5$(179.9$)절감, 25년 사용하였을 경우 3829.8$(205$) 절감, 30년 사용하였을 경우 4209.4$(224.8$)절감 되는 것으로 분석되며, NPV를 분석하여 보면 다음과 같음.

<표 3-4-24> CBA분석결과

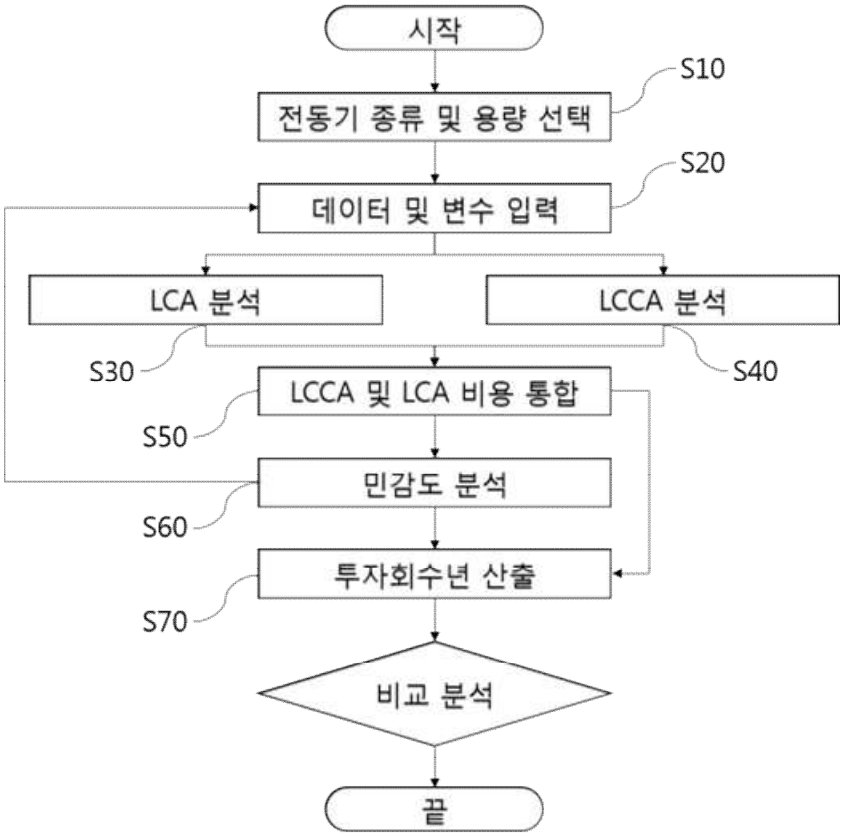
구분	20년		25년		30년	
	금액	편차	금액	편차	금액	편차
추가 투자비	27778.5		27778.5		27778.5	
에너지절감비용	75272.7	1013.6	94923.5	1267.9	114946.9	1545.7
화석연료절감	27526.8	189.1	31400.3	216.5	34516.4	237.4
대기오염물질 절감	109815.2	940.7	125276.8	1085.9	137709.4	1190
CO2절감	3356.5	179.9	3829.8	205	4209.4	224

- 투자비 및 유지관리 측면에서만 고려하였을 경우 발생되는 편익은 단순히 에너지 절감 비용이며, 이 경우 NPV는 20년일 때 47,494.2$(1013.6$), 25년일 때 67,145$(1264.9$), 30년일 때 87,168.7$(1545.7$)임.
- 사회적인 편익까지 고려하였을 경우 NPV는 20년일 경우 188,190.6$(1408.5$), 25년일 경우 227,638.2$(1696.1$), 30년일 경우 263,602.9$(1971.8$)인 것으로 분석됨.
- 초기 추가되는 비용에 대한 투자회수년은 에너지절감 측면만 고려하였을 경우 약 7.6년, 사회적 편익까지 전부 고려하였을 경우 약 1.9년으로 분석되었음.

다. **고효율 전동기 도입의 타당성 분석 시스템 개발**

(1) 시스템 구성도

- 본 시스템은 분석하고자 하는 전동기의 일반 데이터를 입력하는 단계, LCCA 및 LCA 분석을 위한 각 비용 항목에 대한 데이터를 입력하는 단계; LCCA 및 LCA 분석 단계; LCCA 및 LCA 비용 통합 단계; 결과값에 대한 신뢰도 확보를 위한 민감도 분석 단계; 투자회수년 산출 단계; 결과 값을 이용한 비교분석단계로 구분됨.

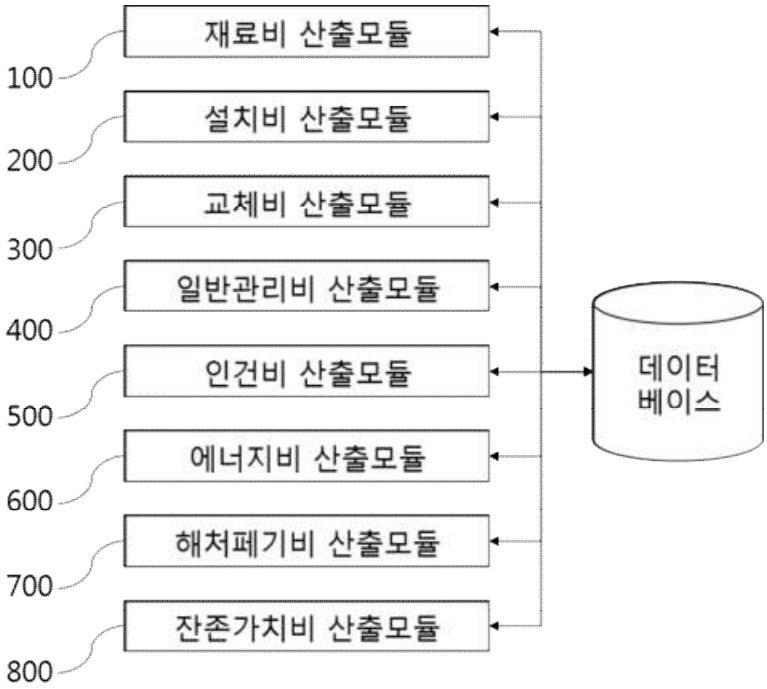


<그림 3-4-2> 시스템 구성도 및 동작흐름도

(2) 시스템 구성 세부 내용

(가) 본 발명의 분석 시스템 중 LCCA 분석 시스템 구성

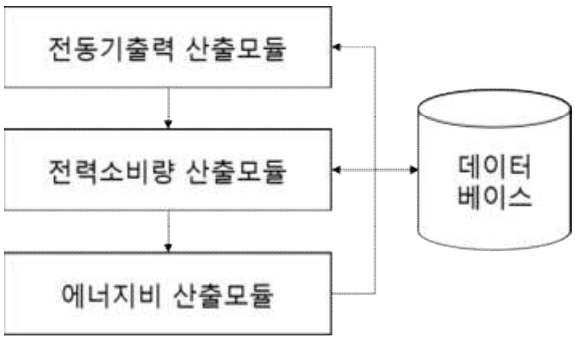
- 초기투자비중 전동기 도입을 위한 재료비를 산출하는 재료비 산출 모듈
- 초기투자비중 전동기 설치를 위한 설치비를 산출하는 설치비 산출 모듈
- 유지관리비중 전동기 부품파손에 의해 발생되는 교체비용을 산출하는 교체비 산출 모듈
- 유지관리비중 기계설비관리직원의 인건비를 산출하는 일반관리비 산출모듈
- 유지관리비중 수리, 보수 등에 발생하는 인건비를 산출하는 인건비 산출모듈
- 유지관리비중 전동기의 에너지비용을 산출하는 에너지비 산출모듈
- 철거비용 중 해체시 발생하는 비용을 산출하는 해체폐기비 산출모듈
- 철기비용 중 해체품(고철) 판매로 발생한 비용을 산출하는 잔존가치비 산출모듈



<그림 3-4-3> LCCA 분석 시스템

(나) 경제성 분석 중 핵심인 에너지비 세부 구성

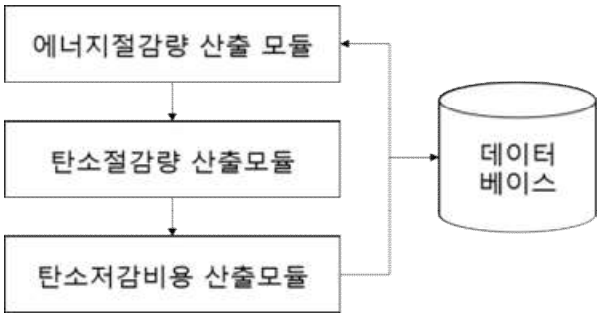
- 전동기 효율에 따른 출력을 산출하는 전동기출력 산출 모듈
- 출력에 따른 전력소비량 산출모듈
- 전력소비량에 따른 에너지비 산출모듈



<그림 3-4-4> 에너지비용 산출 모듈

(다) LCA 분석 시스템

- 도입될 전동기가 기존전동기 대비 절감된 전력소비량을 산출하는 에너지절감량 산출 모듈
- 에너지 절감량에 따른 탄소절감량 산출모듈
- 탄소절감량에 따른 탄소절감비용 산출 모듈



<그림 3-4-5> LCA 분석 시스템

(라) 기타 시스템

- 상기 각 모듈별로 산출된 결과 값을 통합하는 LCCA 및 LCA비용 통합 모듈
- 분석결과에 대한 신뢰도를 확보하기 위해 민감도 분석을 실시하는 민감도 분석 모듈
- 투자회수년 산출을 위한 투자회수년 산출모듈
- 각 산출 모듈은 데이터베이스에서 산출에 필요한 데이터를 받고, 산출 값을 다시 데이터베이스에 다시 전송

(3) 시스템의 분석 방법

- 본 분석시스템의 각 산출모듈의 산출방법은 다음과 같음.
- 우선 경제성 분석을 진행하려면 현재비용과 미래비용을 공통의 시점으로 환산하여야 하며, 이와 같이 비용 발생시점이 상이한 경우 현재가치화법을 사용하며 산출방법은 다음과 같음.

$$P = F \times PWF \tag{4.1}$$
$$PWF = \frac{1}{(1+i)^n}$$

P = 현재가치
F = 미래발생비용
PWF = 현가계수
i = 할인율
n = 비용발생시기

- 여기서 할인율 산출방법은 다음과 같음.

$$i = \frac{(1+r)}{(1+R)} - 1$$

r = 이자율
R = 물가상승율

- 할인율은 산출을 위해 한국은행 경제통계시스템(ecos.bok.or.kr)의 공개된 자료를 활용하였으며 이때, 이자율은 일반예금금리인 수신금리를 대상으로 적용하였음. 본 시스템에서 할인율은 3.01% 적용하였으며, 이하 기술될 각 산출 방법에 동일하게 적용됨.

(가) LCCA 분석 시스템

- 초기 투자비인 재료비와 설치비는 관련업체의 견적을 받아 입력.
- 교체비는 전문가와의 인터뷰를 통하여 15년을 주기로 초기투자비용의 10%가 발생하는 것으로 산정하였으며 이때 현재가치법을 사용하여 미래발생 될 비용을 현재비용으로 산출.
- 일반관리비는 도시철도역사관리자와의 인터뷰를 통하여 산출하였으며, 분석기간 동안 발생하는 전체비용은 현재가치법을 사용하여 현재비용으로 산출.
- 인건비는 해당업체의 인터뷰를 통하여 산출하며, 분석기간 동안 발생하는 전체비용은 현재가치법을 사용하여 현재비용으로 산출.
- 에너지비용은 전력소비량에 산업용전력요금의 평균단가를 곱하여 산출. 분석기간 동안 발생하는 전체비용은 현재가치법을 사용하여 현재비용으로 산출.
- 폐기처분비는 철거전문업체의 견적을 받아 산출. 이때 현재가치화법을 사용하여 미래발생 될 비용을 현재비용으로 산출.
- 잔존가치비는 재활용전문업체의 견적을 받아 산출. 이때 현재가치화법을 사용하여 미래발생 될 비용을 현재비용으로 산출.

(나) 전력소비량산출 방법

- 전동기 정격동력은 출력에 효율을 나누어 산출.

$$P_w = \frac{P_o}{E} \tag{4.2}$$

P_w = 정격동력(Kw)
P_o = 출력(Kw)
E = 효율(%)

- 전동기의 전력소비량은 정격동력에 운전시간을 곱하여 산출.

$$W = P_w \times T_d \times D_y \tag{4.3}$$

W= 전력사용량(Kwh)
Pw = 정격동력(Kw)
T_d = 일간운전시간(h/d)
D_y = 운전일수(d/y)

- 가변운전방식인 경우 기존보다 에너지를 4% 절감하는 것으로 산출.

$$W = P_w \times T_d \times D_y \times (1-4\%) \tag{4.4}$$

(다) LCA 분석 시스템

- 에너지절감량은 비교대상 전동기의 에너지사용량과의 차이로 산출하며 비교대상 전동기는 도시철도역사에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 IE2급(High Efficiency) 전동기임.

- 탄소절감량은 에너지절감량에 전력의 탄소배출계수를 곱하여 산출하며 전력의 탄소배출계수는 MOE Environmental Assessment Policy Division 의 '「온실가스 항목」 환경평가지침'에서 명시한 전력-CO2배출계수(0.454kgCO2/kWh)를 ton단위로 환산하여 사용함.

$$W_c = W_n \times EF \tag{4.5}$$

W_c = 에너지절감비용(Won/y)
W_n = 연간에너지소비절감량(Kwh)
EF = 전력의탄소배출계수(ton/Kwh)

- 탄소절감비용은 탄소절감량에 국내 탄소배출거래가격을 곱하여 산출한다. 국내 탄소배출거래가격은 1ton 당12000원으로 형성되어 있음. 분석기간동안 발생하는 전체비용은 현재가치법을 사용하여 현재비용으로 산출.

$$C_c = W_c \times EF \times C_{CO_2} \tag{4.6}$$

C_c = 탄소절감비용(Won)
W_c = 연간에너지소비절감량(ton)
C_{CO_2} = 탄소배출권거래가격(Won/ton)

(라) 기타 시스템의 산출방법

- 산출된 LCCA 비용과 LCA 통합은 각각이 비용을 합산하는 과정이며, 동일한 분석시점 및 분석기간으로 산출.
- 결과값에 대한 신뢰도 확보를 위해 진행하는 민감도 분석은 할인율을 변경하여 상대절감율을 산출하여 분석.
- 할인율 변경은 3.01%에서 1%씩 가감하여, 1.01%. 2.01%, 4.01%, 5.01%로 선정.

(마) 투자회수기간 산정방법

- 기준안대비 증가된 초기투자비용에서 투자회수년까지의 연간에너지절감비용을 감한 값이 0으로 될 때까지 계산. 연간에너지절감비용은 LCCA비용 중 선정된 각 대안별 비교대상으로 되는 기준대안 대비 절감된 연간에너지비용(절감된 전력요금)에 LCA 비용인 CO2배출절감비용을 더하여 산정한 값이며 이때 물가상승율도 함께 반영함(4.7). 수식 (4.6)에서 투자회수년(R)을 구하면 수식 (4.8)과 같음.

.
$$I_r = \sum_{\epsilon=0}^{R} C_s (1+i)^{\epsilon} \tag{4.7}$$

$$R = \log_{1+i}\left\{\left(\frac{I_r \times i}{C_s}\right)+1\right\} \tag{4.8}$$

R = 회수기간
I_r = 증가투자비
i = 물가상승율
C_s = 연간에너지절감비용(기준년도)

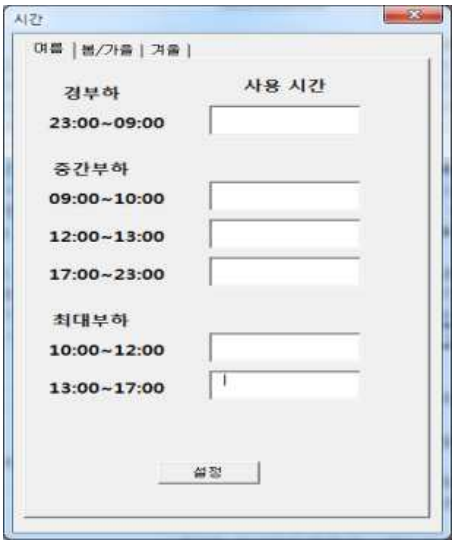
(4) 분석 시스템 수행 결과

(가) 시스템 인터페이스

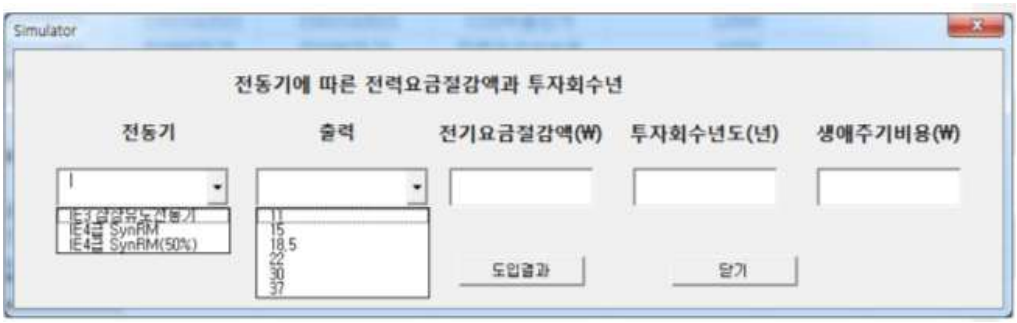
<표 3-4-25> 전동기 유형별 가격

전동기 유형	용량	가격(천원)
IE2급 삼상유도전동기	30	2,065
IE3급 삼상유도전동기	30	2,800
IE4급 SynRM (50% 가격)	30	4,890
IE4급 SynRM	30	9,781

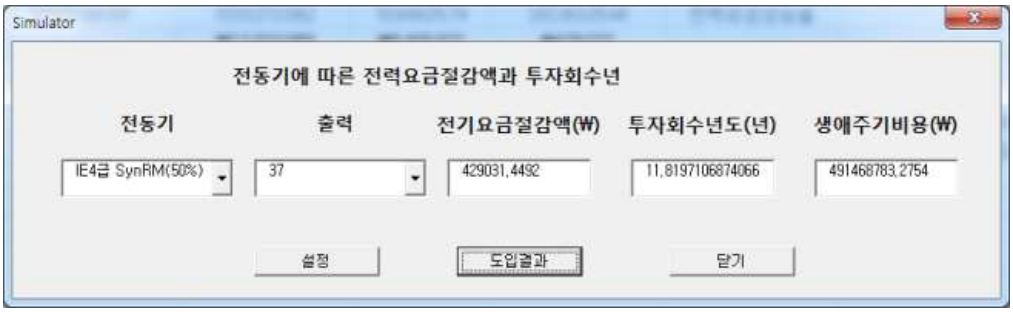
- 시스템 결과값 산정에 이용되는 전동기별 도입 가격은 위 표에 나타난 가격을 따름.
- 전력 요금 절약 계산의 기준이 되는 전동기는 IE2급 삼상유도전동기 30kW임. 시뮬레이터 사용자는 시간과 전동기를 선택 가능하며, 설정 후 도입결과 버튼 클릭시 전기요금 절감액, 투자 회수년도, 생애주기 비용을 출력함.



<그림 3-4-6> 전동기 가동 시간 설정



<그림 3-4-7> 전동기 종류 설정



<그림 3-4-8> 시스템 시범 구동 결과

(나) 시스템 실행

- 앞서 설정, 설계한 시스템을 최종 구동 할 시 어떻게 되는지에 대하여 작성함. 전동기 종류는 IE4급 SynRM(50%), 출력은 37kW로 설정한 뒤 시뮬레이터를 구동 시킴.
- 시범 구동 결과 기존의 LCA 및 LCCA 분석법을 사용할 때의 어려운 지식과 무관하게, 전동기 가동시간과 종류만 설정해 해주면 손쉽게 원하는 결과들을 얻어낼 수 있음.

라. **고효율 전동기 종류에 따른 소비전력 비교분석 시뮬레이터 개발**

(1) 에너지 소비전력 계산 시뮬레이션

(가) 에너지 소비전력 계산 알고리즘

- 전동기의 출력전력(Po)은 식(4.9)에 따라 전동기의 토크(T)와 전동기의 기계적 각속도(ωm), 기계 주파수(fm)를 이용하여 계산할 수 있음. 이 때 ωm은 전동기의 분당 회전수(rpm) 정보로 식(4.10), (4.11)을 통해 구할 수 있음.

$$P_o = T\omega_m \tag{4.9}$$

$$w_m = 2\pi f_m \tag{4.10}$$

$$f_m = \frac{rpm}{60} \tag{4.11}$$

- 전동기 입력전력(Pi)은 식 (4.12)에 따라 전동기 출력(Po)과 전동기 효율(ηm), 인버터의 효율(ηinv) 및 인버터와 전동기 사이의 역률(pfm)을 이용하여 계산할 수 있음. 총 소비전력량(W)은 식 (4.13)에 따라 Pi에 시간(t)을 이용하여 구할 수 있음. 효율은 앞서 제시된 계산된 SynRM의 효율 값(ηm)을 제공받아 사용함. 총 소비전력량을 구하기 위한 시간(t)은 블로워의 가변운전 토크 패턴을 사용함.

$$P_i = \frac{P_o}{\eta_m \eta_{inv} pf_m} \tag{4.12}$$

$$W = P_i t \tag{4.13}$$

- 인버터의 효율(ηinv)은 전동기 입력전력(Pi)을 이용하여 계산하였으며, 필요시 보정 상수를 통해 조정할 수 있음 (본 보고서에서는 제공받은 자료를 바탕으로 효율을 0.96으로 설정함).

(나) 수락산역 환기설비의 시간대별 소비전력량

- 본 연구에서는 Matlab 기반 블로워 전동기의 소비전력 계산 알고리즘 및 프로그램을 설계함. 방법 1은 기존유도기를 ON/OFF운전시 시간대별 소비전력량을 의미함. 방법 2는 기존유도기에 v/f인버터 구동을 추가한 방법이며, 방법 3은 SynRM에 v/f인버터 구동을 추가한 방법임.

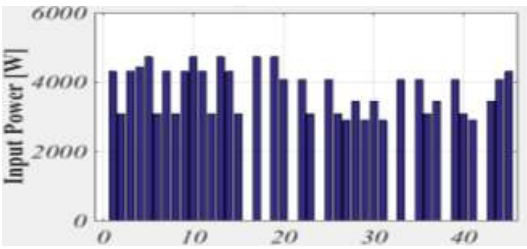
(다) 방법 1: 기존 유도전동기 (ON/OFF운전)

<표 3-4-26> 기존유도기 ON/OFF운전시 소비전력량(kWh)

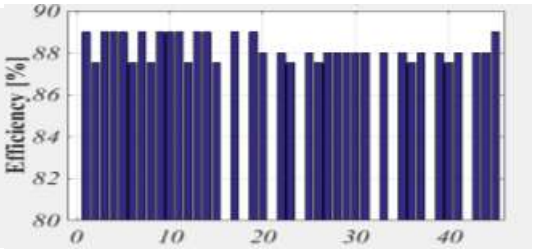
구분	가동시간대	가동시간(분)	소비전력량kWh)
19:00~20:00	19:02~19:30	28	7.84
	19:32~20:00	28	7.84
		합계	15.68
20:00~21:00	20:12~20:30	18	5.04
	20:42~21:00	18	5.04
		합계	10.08
21:00~22:00	21:12~21:30	18	5.04
	21:42~22:00	18	5.04
		합계	10.08
22:00~23:00	22:31~23:00	19	5.32
		합계	5.32
23:00~	23:02~23:10	8	2.24
	23:17~23:18	1	0.28
		합계	2.52

<표 3-4-27> 방법 2: 기존 유도전동기 (가변운전) 기존유도기 가변운전시 소비전력량(kWh)

구분	가동시간대	가동시간(분)	전동기회전속도(rpm)	소비전력량(kWh)
19:00～20:00	19:00～19:05	1525	5	0.26
	19:05～19:20	1728	15	1.08
	19:20～19:25	1525	5	0.26
	19:25～19:30	1728	5	0.36
	19:30～19:40	1786	10	0.79
	19:40～19:45	1728	5	0.36
	19:45～19:50	1525	5	0.26
	19:50～19:55	1786	5	0.39
	19:55～20:00	1728	5	0.36
			합계	4.12
20:00～21:00	20:00～20:05	5	1525	0.26
	20:05～20:13	8	0	0
	20:13～20:30	17	1786	1.34
	20:30～20:42	12	0	0
	20:42～21:00	18	1786	1.42
			합계	3.02
21:00～22:00	21:00～21:10	10	1694	0.68
	21:10～21:15	5	0	0
	21:15～21:18	3	1694	0.20
	21:18～21:23	5	1525	0.26
	21:23～21:25	2	0	0
	21:25～21:28	3	1694	0.20
	21:28～21:33	5	1525	0.26
	21:33～21:35	2	1508	0.10
	21:35～22:40	5	1610	0.29
	21:40～21:45	5	1508	0.24
	21:45～21:48	3	1610	0.29
	21:48～21:50	2	1508	0.10
	21:50～21:55	5	0	0
	21:55～22:00	5	1694	0.34
			합계	2.96
22:00～23:00	22:00～22:20	20	0	0
	22:20～22:25	5	1694	0.34
	22:25～22:35	10	1525	0.52
	22:35～22:38	3	1610	0.17
	22:38～22:43	5	0	0
	22:43～22:46	3	1694	0.20
	22:46～22:51	5	1525	0.26
	22:51～23:00	9	1508	0.44
			합계	1.93
23:00～	23:00～23:13	13	0	0
	23:13～23:16	3	1610	0.17
	23:16～23:18	2	1694	0.14
	23:18～23:21	3	1728	0.22



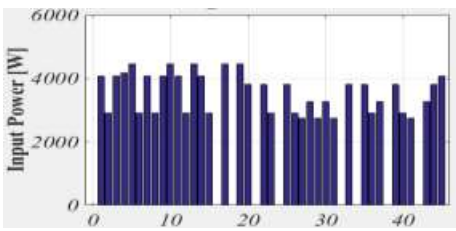
<그림 3-4-9> 기존유도기 가변운전시 시간대별 입력전력



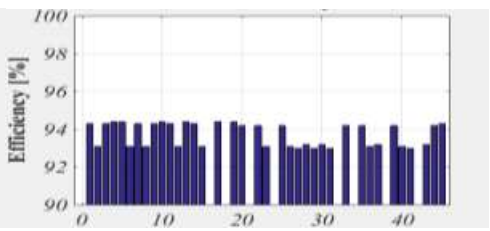
<그림 3-4-10> 기존유도기 가변운전시 시간대별 효율

<표 3-4-28> 방법 3: SynRM 가변운전시 소비전력량(kWh)

구분	가동시간대	가동시간(분)	전동기회전속도(rpm)	소비전력량(kWh)
19:00～20:00	19:00～19:05	5	1525	0.24
	19:05～19:20	15	1728	1.02
	19:20～19:25	5	1525	0.24
	19:25～19:30	5	1728	0.34
	19:30～19:40	10	1786	0.74
	19:40～19:45	5	1728	0.34
	19:45～19:50	5	1525	0.24
	19:50～19:55	5	1786	0.37
	19:55～20:00	5	1728	0.34
			합계	3.87
20:00～21:00	20:00～20:05	5	1525	0.24
	20:05～20:13	8	0	0
	20:13～20:30	17	1786	1.26
	20:30～20:42	12	0	0
	20:42～21:00	18	1786	1.34
			합계	2.84
21:00～22:00	21:00～21:10	10	1694	0.64
	21:10～21:15	5	0	0
	21:15～21:18	3	1694	0.19
	21:18～21:23	5	1525	0.24
	21:23～21:25	2	0	0
	21:25～21:28	3	1694	0.19
	21:28～21:33	5	1525	0.24
	21:33～21:35	2	1508	0.09
	21:35～22:40	5	1610	0.27
	21:40～21:45	5	1508	0.23
	21:45～21:48	3	1610	0.27
	21:48～21:50	2	1508	0.09
	21:50～21:55	5	0	0
	21:55～22:00	5	1694	0.32
			합계	2.77
22:00～23:00	22:00～22:20	20	0	0
	22:20～22:25	5	1694	0.32
	22:25～22:35	10	1525	0.48
	22:35～22:38	3	1610	0.16
	22:38～22:43	5	0	0
	22:43～22:46	3	1694	0.19
	22:46～22:51	5	1525	0.24
	22:51～23:00	9	1508	0.41
			합계	1.80
23:00～	23:00～23:13	13	0	0
	23:13～23:16	3	1610	0.16
	23:16～23:18	2	1694	0.13
	23:18～23:21	3	1728	0.20
			합계	0.49



<그림 3-4-11> SynRM 가변운전 시 시간대별 입력전력



<그림 3-4-12> SynRM 가변운전 시 시간대별 입력전력

(2) 시뮬레이터 수행 결과

(가) 운전유형에 따른 기존유도기의 소비전력 시뮬레이션 결과 비교

- 본 소비전력 시뮬레이션 알고리즘을 사용해 속도-토크 패턴 소비 전력 값을 구할 수 있음. 현재까지 제공받은 자료로 가변운전에 대한 소비전력 시뮬레이션 결과 비교값은 다음과 같음.
- 기존의 ON/OFF방식의 제어 방법에서 가변운전패턴과 v/f 일정제어를 추가하였을 때 19:00~24:00까지 소비전력량은 약 31kWh가 차이 나고 약 71%의 이득을 가짐. 따라서 확보되지 않은 시간대의 이득도 생각한다면 실제로 일일 소비전력은 더 많이 절약할 수 있을 거라 사료됨.

<표 3-4-29> 운전유형에 따른 기존유도기의 소비전력 시뮬레이션 결과 비교

구분	기존유도기 ON/OFF운전시 소비전력 (kWh)	기존유도기 가변운전시 소비전력 (kWh)	기존유도기 ON/OFF운전시 소비전력 (kWh) - 기존유도기 가변운전시 소비전력 (kWh)
19:00~20:00	15.68	4.12	11.56
20:00~21:00	10.08	3.02	7.06
21:00~22:00	10.08	2.96	7.12
22:00~23:00	5.32	1.93	3.39
23:00~24:00	2.52	0.53	1.99
합계	43.68	12.56	31.12

(나) ON/OFF운전시 기존유도기와 가변운전시 SynRM의 소비전력 시뮬레이션 결과 비교

- 기존 유도전동기에서 SynRM으로 교체했을 때 소비전력 시뮬레이션 결과 비교값은 다음과 같음. 기존의 유도전동기 대신에 SynRM으로 교체하였을 때 19:00~24:00까지 소비전력량은 약 32kWh가 차이 나고 약 73%의 이득을 가짐. 따라서 확보되지 않은 시간대의 이득도 생각한다면 실제로 일일 소비전력은 더 많이 절약할 수 있을 거라 사료됨.

<표 3-4-30> ON/OFF운전시 기존유도기와 가변운전시 SynRM의 시뮬레이션 결과 비교

구분	기존유도기 ON/OFF운전시 소비전력 (kWh)	SynRM 가변운전시 소비전력(kWh)	기존유도기 ON/OFF운전시 소비전력 (kWh) - SynRM 가변운전시 소비전력(kWh)
19:00~20:00	15.68	3.87	11.81
20:00~21:00	10.08	2.84	7.24
21:00~22:00	10.08	2.77	7.31
22:00~23:00	5.32	1.8	3.52
23:00~24:00	2.52	0.49	2.03
합계	43.68	11.77	31.91

(다) 가변운전시 기존유도기와 SynRM의 시뮬레이션 결과 비교

- 가변운전시 기존유도기를 SynRM으로 교체했을 때의 소비전력 차이 시뮬레이션 결과 비교값은 다음과 같음.
- 실측된 자료에서 같은 시간일 때 rpm과 토크는 같지만 오직 효율만 달랐으므로, 방법 1과 비교할 때와는 다르게 기존 유도전동기(가변운전)와 SynRM을 비교할 때는 절약할 수 있는 정도는 크지 않음. 기존 유도전동기(가변운전) 방법을 사용할 때와 SynRM을 사용할 때 19:00~24:00까지 약 0.79kWh가 차이 나고 약 6.3%의 이득을 가짐.
- 기존 유도전동기(가변운전)로 동작할 때와 SynRM으로 교체했을 때의 소비전력 차이 시뮬레이션 결과 비교값은 다음과 같음.
- 실측된 자료에서 같은 시간일 때 rpm과 토크는 같지만 오직 효율만 달랐으므로, 방법 1과 비교할 때와는 다르게 기존 유도전동기(가변운전)와 SynRM을 비교할 때는 절약할 수 있는 정도는 크지 않음.

<표 3-4-31> 가변운전시 기존유도기와 SynRM의 시뮬레이션 결과 비교

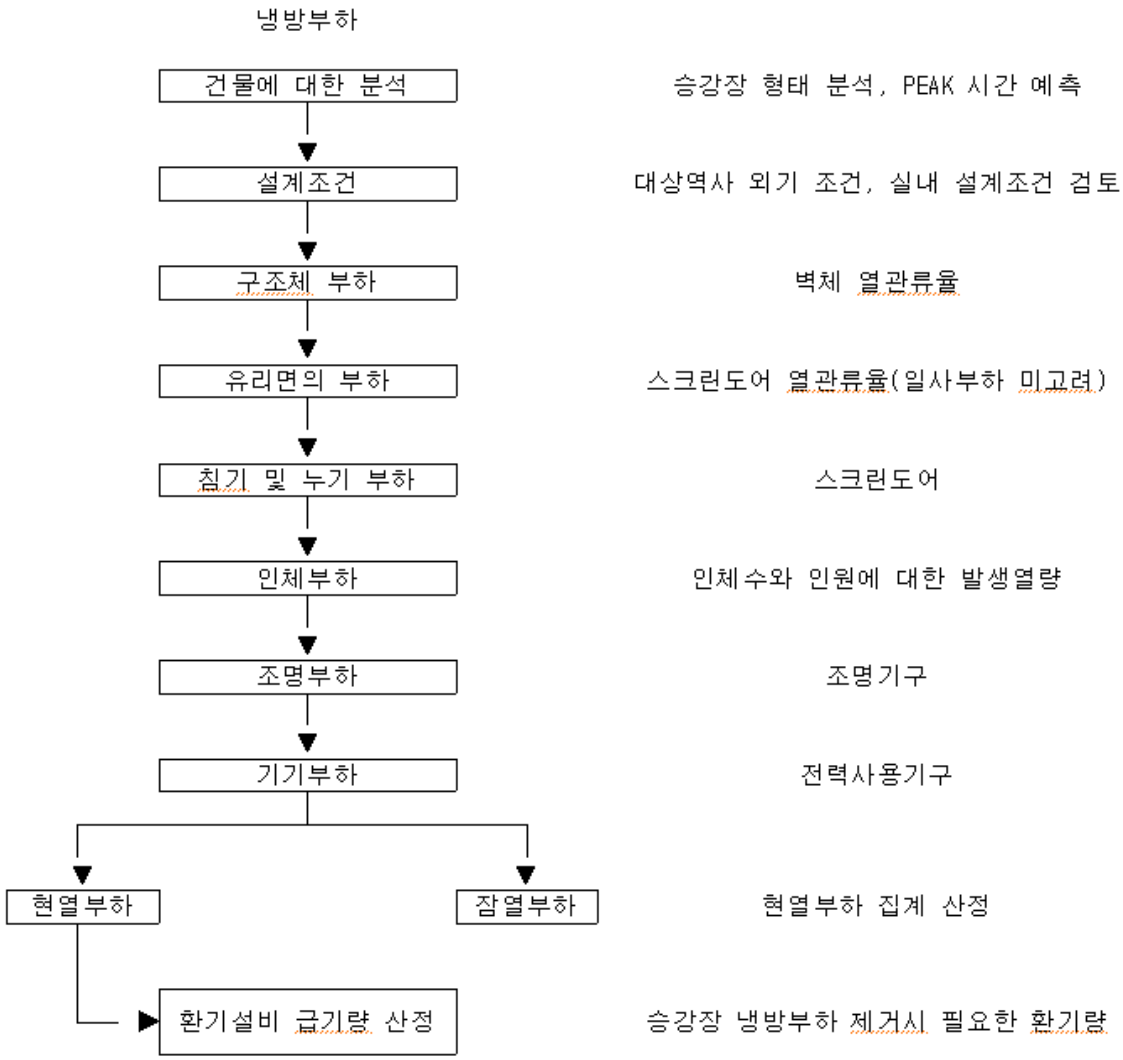
구분	기존유도기 가변운전시 소비전력량(kWh)	SynRM 가변운전시 소비전력량(kWh)	기존유도기 가변운전시 소비전력량(kWh) - SynRM 가변운전시 소비전력량(kWh)
19:00~20:00	4.12	3.87	0.25
20:00~21:00	3.02	2.84	0.18
21:00~22:00	2.96	2.77	0.19
22:00~23:00	1.93	1.8	0.13
23:00~24:00	0.53	0.49	0.04
합계	12.56	12.77	0.79

3. 경제성 및 실시간 실내환경 반영 환기시스템 구현을 위한 기존 설비 개선방안 검토

가. 수락산역 승강장 필요 환기량 계산

(1) 연구 수행 내용

- 지하역사 승강장 환기량 산정 프로세스를 <그림 3-4-13> 와 같이 나타냄. 지하역사의 환기량 산정 프로세스는 일반 건축물의 환기량 계산과 동일한 과정으로 이루어지지만, 지하라는 특성상 일사의 영향을 고려하지 않고 부하계산이 진행됨.
- 환기량 계산시 대상공간에 대한 냉방부하 발생요인에 따라 순차적으로 부하계산을 수행하고, 이후 실내에서 발생된 총 현열부하(냉방)를 제거하기 위해 필요한 환기량을 산정함.



<그림 3-4-13> 지하역사 승강장 환기량 산정 프로세스

(2) 필요 환기량 계산 결과

(가) 블로워 환기량 산정 결과

- 본 연구에서는 보다 정확한 부하계산을 수행하기 위해 건축기계설비 분야에서 상용적으로 통용되는 RTS-SAERK Ver. 4.5 프로그램을 통해 부하계산을 진행함. 단, RTS 프로그램을 통한 부하계산을 수행하는 경우 지하철역사 설계시 이용되는 인체부하 산정식과는 다소 차이가 있지만, 이는 실내의 재실 인원을 기준으로 부하를 산정한다는 점에서 동일한 이론적 개념으로 판단할 수 있음.
- RTS 프로그램이란 건물에너지의 절약 및 효율적인 이용을 위하여 최적 설계에 필수적인 부하계산의 표준화 개발 및 보급을 목적으로 대한설비공학회에서 개발한 프로그램임. RTS 프로그램은 전도형태의 열전달계산에서 조금 더 나아가 ASHRAE에서 제시하는 복사시계열(RTS: Radiant Time Series)법을 적용하여 시간에 따른 복사, 대류형태의 열전달방법까지 고려하여 부하를 계산함.

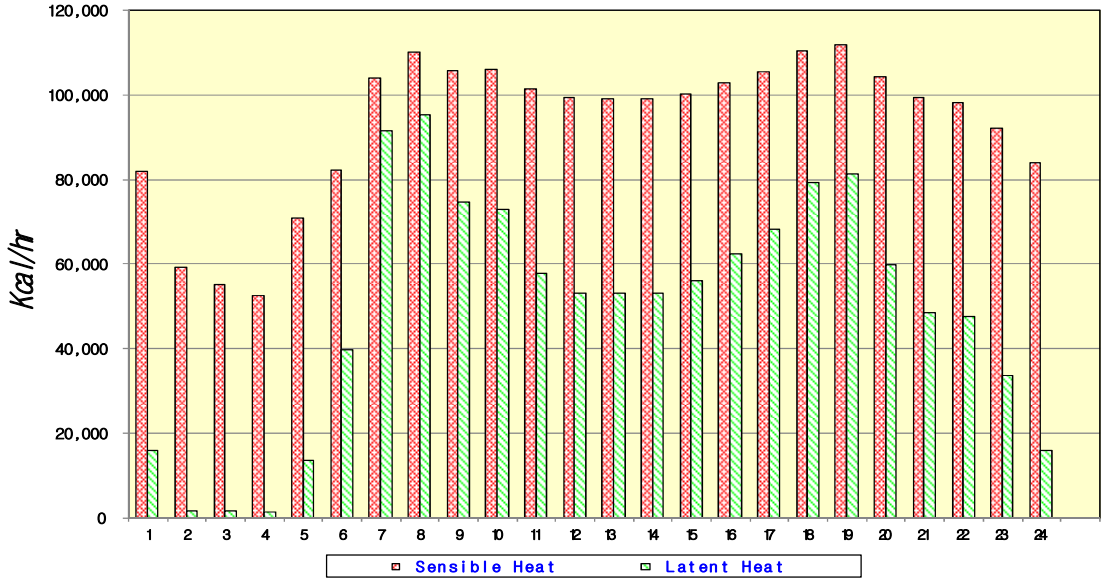
(나) 승강장 냉방부하 산정 결과

- RTS-SAERK Ver. 4.5 프로그램을 사용하여 승강장에서의 냉방부하를 산정한 결과는 <표 3-4-32>와 같음. 승강장내의 외부 열취득 부하는 태양에 의한 일사량에 영향을 받지 않을 뿐만 아니라 승강장과 인접한 공간이 설계 온도로 유지되므로 시간에 따른 외부 열취득 부하는 일정한 수준으로 유지되는 것을 알 수 있음.
- 또한 스크린도어의 열림이나 틈새에 의한 부하량은 아주 미미한 수준으로 실내 부하에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타남. 실내발열부하는 재실인원이 최대인 8시~9시 사이에 가장 높은 수치를 보이며, 이것은 인체에 의한 잠열부하 영향이 크기 때문임. 하지만 환기설비 환기량 계산시 현열부하가 최대인 경우를 기준으로 환기량을 산정하므로 실제 피크부하는 19시~20시에 발생하는 것을 알 수 있음. 한편, 본 연구의 주요 목적은 환기설비 블로워 환기량 계산임으로 환기량 계산 과정에서 필요하지 않은 외기도입 부하는 고려하지 않음.

<표 3-4-32> 시간대별 승강장 냉방부하 산정 결과

Description		Capacity	Cooling Load (W), 7 Mon. 21st											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SH	People	1,412 p	19,451	11,371	8,923	7,216	11,377	22,969	47,709	54,173	48,416	48,421	42,326	39,577
	Lighting	26.8 kW	14,747	6,004	4,524	3,567	11,615	12,572	13,181	13,529	13,790	13,877	14,051	14,138
	Equipment	10.7 kW	11,798	2,442	1,840	1,451	10,523	10,913	11,160	11,302	11,408	11,444	11,514	11,550
	Glass	0.0 ㎡	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Roof	0.0 ㎡	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Wall	0.0 ㎡	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Partition	3,135.0 ㎡	50,051	50,051	50,051	50,051	50,051	50,051	50,051	50,051	50,051	50,051	50,051	50,051
	Infiltration	644 ㎥/h	-738	-818	-885	-932	-949	-915	-835	-686	-475	-227	50	315
	Sub-Total		**95,309**	**69,050**	**64,453**	**61,353**	**82,617**	**95,590**	**121,266**	**128,369**	**123,190**	**123,566**	**117,992**	**115,631**
LH	People	1,412 p	16,309	0	0	0	14,134	44,577	104,375	108,724	84,805	82,630	65,234	59,798
	Infiltration	644 ㎥/h	2,202	2,094	1,933	1,826	1,772	1,826	2,094	2,202	2,202	2,202	2,202	2,202
	Sub-Total		18,511	2,094	1,933	1,826	15,906	46,403	106,469	110,926	87,007	84,832	67,436	62,000
RA Lighting Load		0.0 kW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grand Total			113,820	71,144	66,386	63,179	98,523	141,993	227,735	239,295	210,197	208,398	185,428	177,631

Description		Capacity	Cooling Load (W), 7 Mon. 21st											
			13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
SH	People	1,412 p	38,977	38,665	39,780	42,865	45,924	51,806	*53,949*	45,353	39,654	38,124	31,150	21,738
	Lighting	26.8 kW	14,225	14,312	14,399	14,486	14,486	14,486	*14,486*	14,486	14,573	14,660	14,747	14,747
	Equipment	10.7 kW	11,585	11,621	11,656	11,691	11,691	11,691	*11,691*	11,691	11,727	11,762	11,798	11,798
	Glass	0.0 ㎡	0	0	0	0	0	0	*0*	0	0	0	0	0
	Roof	0.0 ㎡	0	0	0	0	0	0	*0*	0	0	0	0	0
	Wall	0.0 ㎡	0	0	0	0	0	0	*0*	0	0	0	0	0
	Partition	3,135.0 ㎡	50,051	50,051	50,051	50,051	50,051	50,051	*50,051*	50,051	50,051	50,051	50,051	50,051
	Infiltration	644 ㎥/h	509	643	690	643	526	347	*132*	-80	-261	-423	-557	-654
	Sub-Total		**115,347**	**115,292**	**116,576**	**119,736**	**122,678**	**128,381**	***130,309***	**121,501**	**115,744**	**114,174**	**107,189**	**97,680**
LH	People	1,412 p	59,798	59,798	63,060	70,671	77,194	90,241	*92,415*	67,409	54,362	53,275	36,966	16,309
	Infiltration	644 ㎥/h	2,202	2,202	2,202	2,202	2,202	2,202	*2,202*	2,202	2,202	2,202	2,202	2,202
	Sub-Total		62,000	62,000	65,262	72,873	79,396	92,443	*94,617*	69,611	56,564	55,477	39,168	18,511
RA Lighting Load		0.0 kW	0	0	0	0	0	0	*0*	0	0	0	0	0
Grand Total			177,347	177,292	181,838	192,609	202,074	220,824	*224,926*	191,112	172,308	169,651	146,357	116,191



<그림 3-4-14> 시간대별 승강장 냉방부하 변화

(다) 승강장 환기량 산정 결과

- 산정된 승강장 환기설비 블로워의 환기량은 최대 47,500㎥/h이며, 법적 최소 환기량 계산치는 35,500㎥/h로 산정됨. 이에 따라 고효율 전동기를 포함한 블로워의 가변운전 범위를 35,500㎥/h ~ 48,000㎥/h로 선정함.

<표 3-4-33> 승강장 환기량 계산 결과

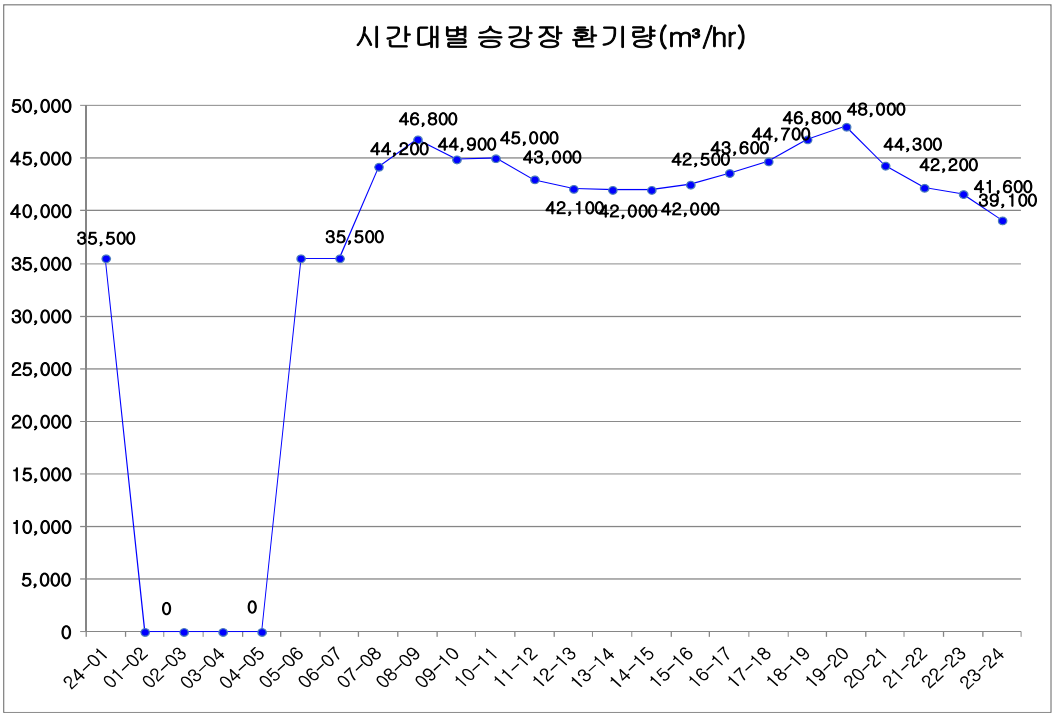
구 분	환기량 (㎥/h)	계산 과정
Supply Air Volume	47,500	(130309 + 0) ÷ (0/335 x 8.2 ℃) = 45437
Outdoor Air Volume	47,500	Same as SA Volume
Minimum Outdoor Air Volume	35,300	(25m3/h·p x 1412 p) = 35300
· 최대 환기량: 47,500≒48,000m3/h · 최소 환기량: 35,300≒35,500m3/h		

(라) 시간대별 승강장 환기량 산정 결과

- 시간대별 승강장 냉방부하 계산 결과를 통해 <표 3-4-34> 와 같이 시간대별 승강장 환기량을 계산할 수 있으며, 그 결과를 <그림 3-4-15> 으로 정리함. 수락산역사 지하철 운행시간인 오전 05시 ~ 오전 01시까지 승강장내의 현열 냉방부하에 비례하여 환기량이 증감하는 것을 알 수 있음. 이는 주로 지하철을 이용한 출퇴근 시간대인 오전 07시 ~ 오전 09시, 오후 18시 ~ 오후 20시 사이를 기준으로 환기량의 변화가 뚜렷이 나타나는 것을 알 수 있음. 지하철 비운행시간인 오전 01시 ~ 오전 05시 사이에는 일반적으로 환기설비를 운전하지 않는 것으로 함.

<표 3-4-34> 시간대별 승강장 환기량 산정 결과

시간대	시간별 승강장 환기량 산정 (%)	시간대별 승강장 환기량 (㎥/h)	시간대	시간별 승강장 환기량 산정 (%)	시간대별 승강장 환기량 (㎥/h)
00-01	74.7	35,500	12-13	88.6	42,100
00-02	0.0	0	13-14	88.4	42,000
02-03	0.0	0	14-15	88.4	42,000
03-04	0.0	0	15-16	89.5	42,500
04-05	0.0	0	16-17	91.8	43,600
05-06	74.7	35,500	17-18	94.1	44,700
06-07	74.7	35,500	18-19	98.5	46,800
07-08	93.1	44,200	19-20	100.0	48,000
08-09	98.5	46,800	20-21	93.3	44,300
09-10	94.5	44,900	21-22	88.8	42,200
10-11	94.7	45,000	22-23	87.6	41,600
11-12	90.5	43,000	23-24	82.3	39,100



<그림 3-4-15> 시간대별 승강장 환기량 변화

(마) 승강장 환기설비 정압 산정 결과

- 일반적으로 블로워 선정시 정압에 대한 계산도 요구되는데 이는 블로워에서 토출된 공기가 덕트 최말단부까지 도달하기 위해서는 일정한 압력이 요구되기 때문임. 도면을 통해 환기설비에 설치된 기존 부속류 및 덕트 최말단부까지의 거리를 파악하고, 그 외에 환기설비에 필요한 부속을 추가 적용하여 정압계산을 수행함. 승강장 환기설비 정압 계산 결과는 아래 표와 같이 기내정압 737.0Pa, 기외정압 426.0Pa로 나타났으며, 이에 따른 블로워의 정압은 1,200Pa로 산정함.

<표 3-4-35> 승강장 환기설비 정압 산정 결과

■ FAN SELECTION					
□ Internal S.P (Pa)		□ External S.P (Pa)			□ Supply Fan
냉방 코일	150.0	Duct	(SA)	(RA)	Type : AirFoil
재열 코일		S:1.5 Pa/m ×			Model : DS#
예열 코일		S:1.0 Pa/m × 100	100.0		Air Vol.: 47500 ㎥/h x 1
가열 코일		R:1.0 Pa/m ×			Static P: 1199 Pa
배열회수기		R:0.8 Pa/m ×			Motor : 30 kW x 1
Pre Filter	100.0	Fittings (30 % of Duct)	30.0		Location: Draw(I)
Meduim Filter	200.0	Terminal Unit			□ Return Fan
Final Filter	100.0	Pre(Re) Heating Coil			Type :
Plenum/Casing		OA/EA Louver	50.0		Model :
Chamber	50.0	Diffuser/Grille	30.0		Air Vol.:
Volume Damper		Flexible Duct			Static P:
Eliminator	40.0	Volume Damper	50.0		Motor :
Damper	30.0	Fire Damper	10.0		Location:
		Sound Attenuator	100.0		□ Power Calculation
		RA Plenum			Ps = 47500㎥/h×1199Pa
		Velocity Pressure			÷(3600×1000×0.65)
		Air resistance	50.0		×1.15 = 27.99
S. Factor (10%)	67.0	Satety Fcator (10%)	42.0	0.0	□ Static Pressure
					SPs = 737+462
Sub-Total	737.0	Sub-Total	462.0	0.0	

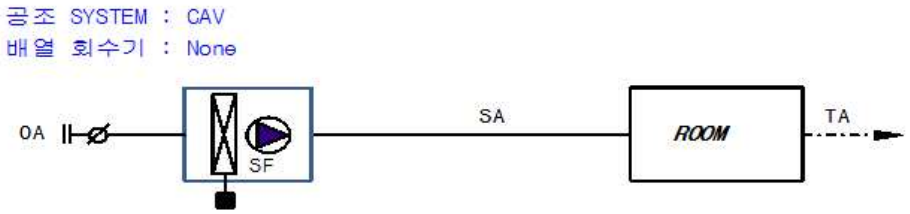
· 설계 정압: 1,199≒1,200Pa

· 블로워 예상 소비전력: 30kW

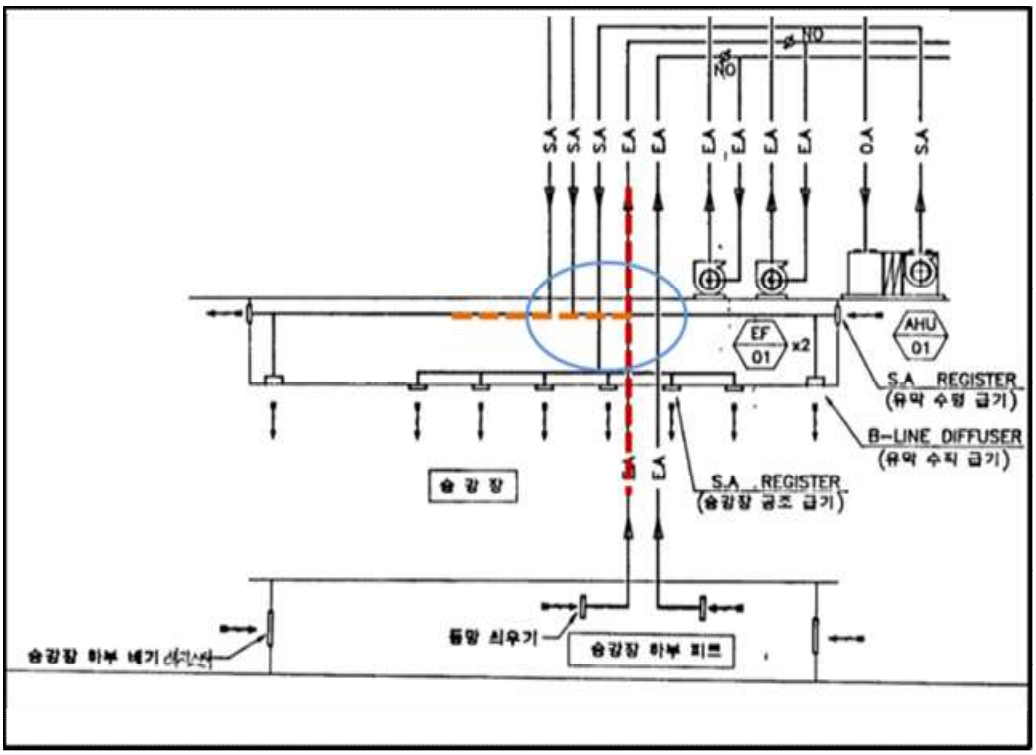
(3) 블로워 교체시 문제점 도출

- 현재까지 수락산역 승강장 환기설비 블로워 교체를 고려하여 신규도입 예정인 블로워의 환기량 및 정압 계산을 수행함. 일련의 계산 과정을 통해 선정된 환기설비 블로워 사양이 현 상태의 수락산역 승강장에 적용함에 있어서 문제점이 없는지를 판단하고 문제점 발생시 그에 대한 대안을 제시하고자 함.
- 현재 수락산역사 승강장에 공급되는 환기량은 48,600m3/h의 일정한 환기량이 지속적으로 공급되는 정풍량방식(Constant Air Volume)의 환기설비이며, 현 수락산역 승강장의 환기설비 구성도를 아래 그림과 같이 나타냄. 1차적으로 환기설비의 블로워를 통해 토출된 공기는 2층 공조 덕트를 지나서 3층의 메인 덕트로 이동함. 2차적으로 메인 덕트 내의 각 취출구로 일부의 공기가 취출 되고 남은 공기는 분기 덕트를 거쳐 취출구로 나오게 됨. 승강장 환기설비는 냉방의 역할과 환기의 기능을 동시에 담당하는 전공기방식이며, 별도의 배기시스템이 설치되지 않음.
- 수락산역사 승강장 환기설비에 신규 도입 예정인 블로워는 인버터 제어에 의한 변풍량방식의 적용 가능성을 고려하여 연구가 진행됨. 하지만 기존 수락산역 승강장에 변풍량방식 적용시 예상되는 문제점이 있는데, 수락산역의 덕트 설계는 일반적인 지하철 설계와 마찬가지로 저속 덕트 적용에 따른 등마찰 손실법(Equal

friction method), 일명 정압법으로 설계가 이루어짐. 등마찰법 손실법이란 모든 덕트에 대해 1m당의 마찰손실을 동일 값으로 하여, 덕트치수를 결정하는 방법임. 이것은 덕트내 각 취출구의 토출풍량, 덕트 구간내 압력 밸런싱이 일정한 풍량과 압력으로 설계된 상태를 의미하며, 비록 새로운 타입의 블로워 교체에 의한 총 급기량의 조절은 가능하지만 총 급기량의 감소시 덕트내부의 압력 밸런싱 파괴에 의한 덕트 손상 및 취출구측에서 풍량 확보여부가 불확실하다는 문제점이 예상됨.



<그림 3-4-16> 현 수락산역 승강장 환기설비 구성도

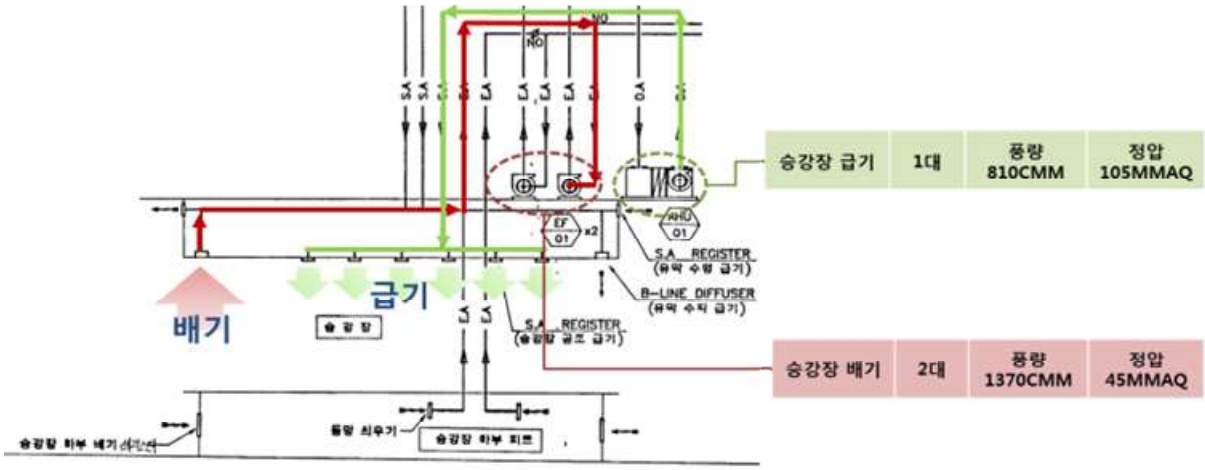


<그림 3-4-17> 수락산역 공조 및 환기계통도 1

나. 승강장 배기팬의 적정 운영방안 검토

(1) 수락산역 승강장 배기시스템 검토

- 수락산역 승강장 PSD공사 후 기존의 하부배기덕트에 유막급기덕트를 연결하여 현재 승강장 배기덕트로 사용하고 있음.
- 매개 승강장마다 급기시스템 1대 배기시스템 2대가 담당하고 있는 구조



<그림 3-4-18> 수락산역 공조 및 환기계통도 2

- 수락산역 배기팬 사양

<표 3-4-36> 배기팬 사양

	송풍기			모터		
수량 (대)	형식	풍량 cmm	정압 pa	동력 kW	전류 A	회전수 rpm
4	AIR FOIL	1370	442	18.5	38.5	1770

(2) 배기팬 적정 운영결과

- 배기는 흡입압과 직접적으로 연관되어 있으며 가변속운전을 할 경우 흡입압이 급격히 줄어듦.
- 수락산역 배기팬 검토 결과 배기팬 정압은 442pa, 승강장 필요 배기압은 437.8pa 임.

<표 3-4-37> 수락산역 승강장 필요 배기압 검토결과

EXTERNAL S.P (pa)	
Duct	(RA)
R: 0.8 pa/m × 90	72
Fiitings (50% of Duct)	36
OA/EA Louver	50
Diffuser/Grille	30
Volume Damper	50
Fire Damper	10
Sound Attenuator	100
Air resistance	50
Satety Fcator(10%)	39.8
Total	437.8

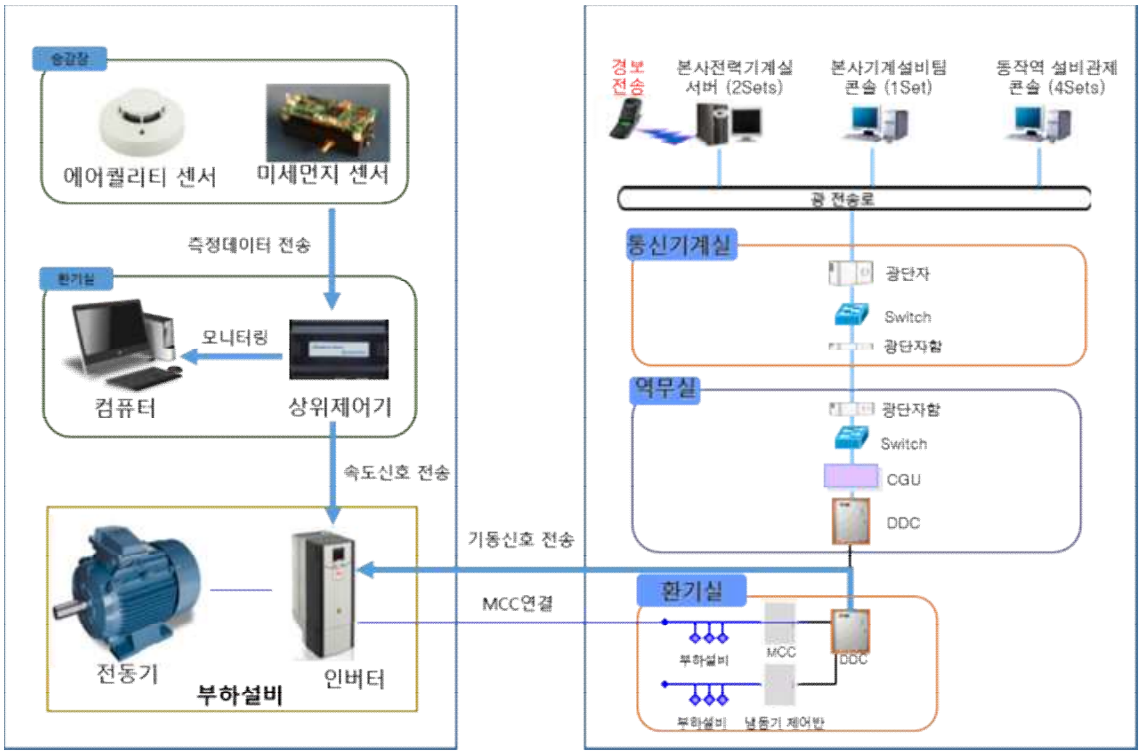
- 배기팬을 가변속운전을 할 경우 약 0.5%속도를 줄여도 필요압력에 도달하지 못하는 것으로 분석됨. 따라서 승강장 배기팬은 가변운전이 적합하지 않은 것으로 분석됨.

<표 3-4-38> 가변운전시 배기팬 성능변화

모터회전속도(rpm)	정압(pa)
1770	442
1765	439.5
1762	437.9
1760	437
1755	434.4
1750	432
1745	430

다. 환기시스템 구성 및 운영 방안

(1) 연구 수행 내용



<그림 3-4-19> 환기시스템 구성도

(가) 고효율 전동기 및 인버터 교체

- 기존의 유도기는 효율이 낮고 가변운전방식을 지원하지 못함. 따라서 경제성을 고려하여 가변운전 방식을 지원하는 고효율 전동기 및 전용 드라이버를 설치.

(나) 유지관리를 위한 인버터유닛 보호판넬 제작 및 설치

- synRM 전용 인버터유닛 설치 장소인 수락산역 기계실은 내부오염물질이 많은 공간임. 따라서 벽걸이타입 인버터유닛을 보호판넬 없이 설치할 경우 고장이 발생할 우려가 있으며, 엄중할 경우 오염물질에 의해 합선이나 누전 등으로 이내 인버터 유닛이 화재 또는 폭발의 위험이 있음.

- 따라서 안전한 실험을 위하여 보호판넬을 별도로 제작하여야 하며, 최근 지하철 역사의 인명사고로 인하여 도시철도공사 측에서도 안전에 대한 문제를 중시하고 있으면, 보호판넬제작을 요구하고 있음. 또한 판넬형은 추후 감시, 제어 및 유지관리측면에서도 유리.

(다) 최적의 운전패턴 도출을 위한 저비용 실내환경데이터 구축

- 최적의 운전패턴은 실시간 실내환경(온도, 습도, CO2농도 미세먼지농도 등)과 에너지사용량을 고려하여 분석해 실내공기질과 에너지절감을 동시에 만족시킬 수 있어야 함.
- 신뢰도가 높은 실내 환경데이터를 구축하려면 고가의 측정 장비가 필요함. 하지만 고가의 장비를 설치하면 경제성이 뒤떨어짐. 즉 최적의 운전패턴으로 환기설비를 가동하여 에너지를 절감하더라도 초기투자비가 높은 원인으로 투자회수년이 길어짐. 또한 고가의 장비는 유지보수비용도 높음.
- 빅데이터분석 및 기계학습기반으로 저비용 센서로 측정되는 데이터의 신뢰도를 보정하는 방안을 마련하여 초기투자비용은 줄이고 에너지절감은 확대시키는 방안을 마련.

(라) 운제패턴 도출 및 속도신호 전송을 위한 상위제어기 및 데이터 서버 구축

- 공기질 데이터를 실시간으로 수신하고 분석하여 적정 운전패턴을 도출하고 인버터를 제어하는 상위제어기 구축. 또한 데이터를 저장하고 상위제어기를 모니터링 할 수 있는 데이터서버 구축.

(2) 현장 구축

(가) synRM 및 전용 인버터 설치



<그림 3-4-20> 기존 모터 설치 모습



<그림 3-4-21> 기존 모터 해체



<그림 3-4-22> 고효율 전동기 교체 (1호 공조기)



<그림 3-4-23> 고효율 전동기 교체 (2호 공조기)

(나) synRM 전동기 전용 인버터 설치



<그림 3-4-24> MCC 판넬 공사전



<그림 3-4-25> MCC 판넬 부분 철거



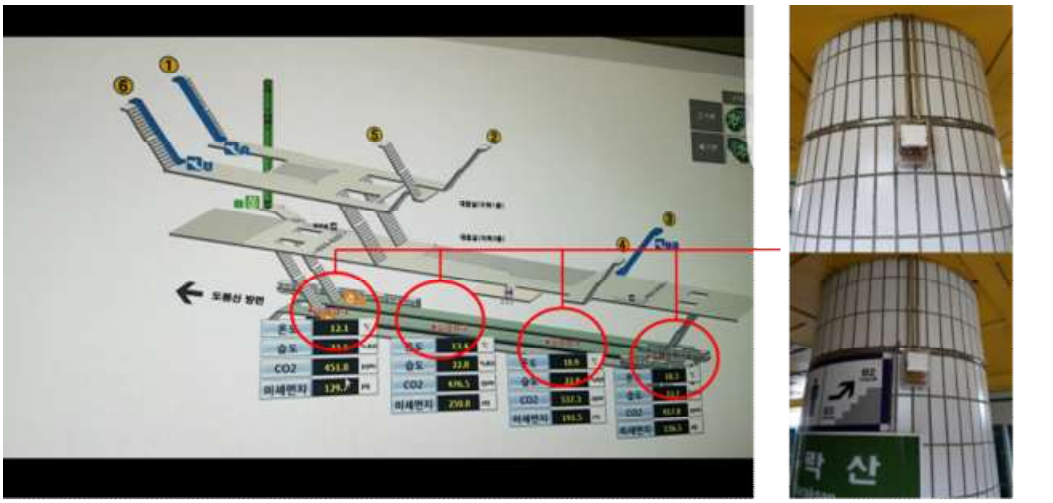
<그림 3-4-26> 인버터 및 판넬 제작



<그림 3-4-27> 인버터 판넬 설치

(다) 저비용 실내공기질 측정 센서 설치 및 모니터링

- 승강장 1/4지점마다 에어퀄리티 및 미세먼지센서 설치
- 에어퀄리티센서(온도, 습도, CO2)
- 미세먼지센서(PM10)



<그림 3-4-28> 미세먼지센서 설치 사진

(라) 가변운전방식을 위한 상위제어기 연결



<그림 3-4-29> 상위제어기 설치 모습



<그림 3-4-30> 상위제어기 및 서버컴퓨터 모습

(마) 상위제어기 구동 방안



<그림 3-4-31> 상위제어기 연결 개념도

- 관제실과 인버터 연결방식은 유지(ON/OFF수신방식 유지)
- 상위제어기와 인버터 추가로 연결(속도신호만 전송)
- 상위제어기 속도신호를 받아 전동기가 작동하더라도 관제팀의 OFF신호를 받으면 작동 중지, 비상상황시 관제팀 통보

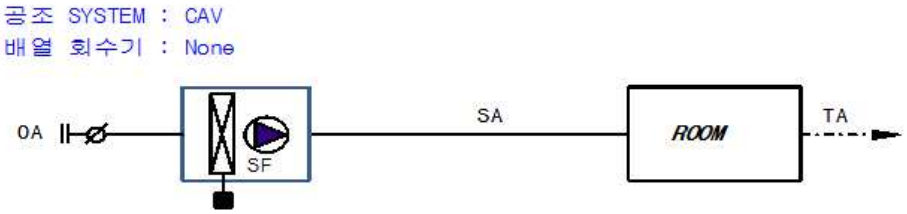


<그림 3-4-32> 환기시스템 구성도

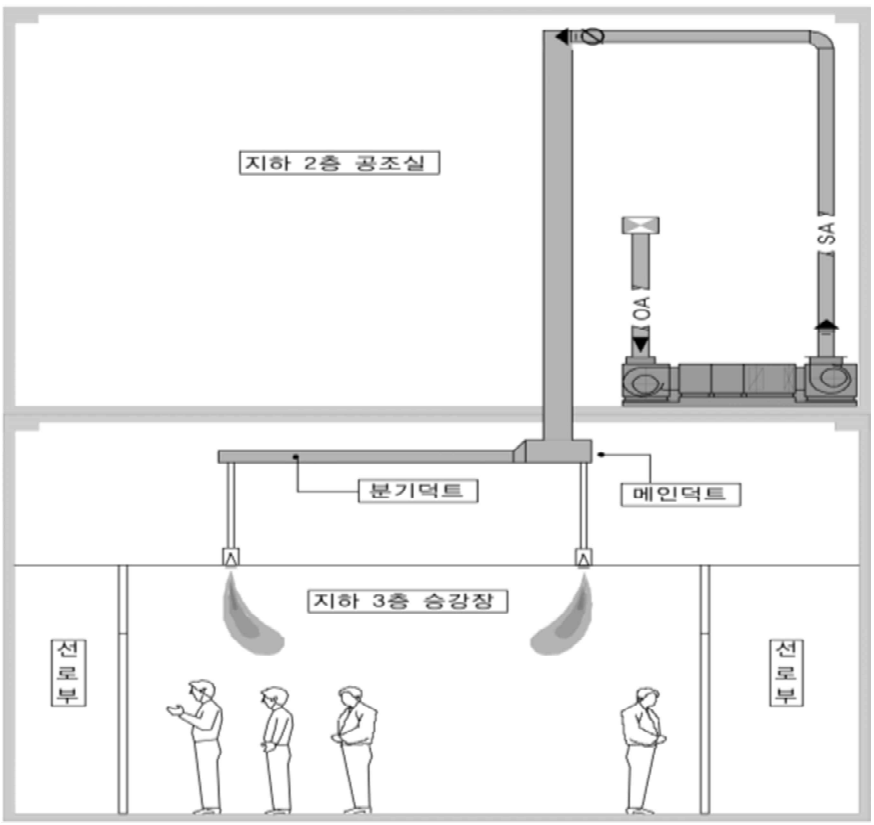
4. 경제성 및 실내환경 분석 기반 환기시스템 최적운전패턴 도출 알고리즘

가. 필요성

- 지하철역사는 지하공간에 위치하여 있으므로 실내공기오염물질이 자연환기에 의해 쉽게 배출되기 어려움. 이런 경우 실내 공기오염물질이 대량 축적되어 장기간 지하철 근무자 또는 승객에 노출되어 건강에 위험을 초래할 수 있음. 따라서 지하철 역사에서는 환기시스템을 도입하여 기계적 환기에 의해 실내공기질을 개선이 필요



<그림 3-4-33> 일반 승강장공조시스템 구성도



<그림 3-4-34> 일반 승강장공조시스템 개념도

- 지하철역사에 도입된 환기시스템의 에너지소비량은 전체 에너지소비량의 14~35% 정도를 차지하여 실내 환기뿐만 아니라 에너지 절감문제도 주요 과제로 제기되고 있음. 대부분 지하철 역사의 환기시스템은 최대부하 상태에서 작동하도록 설계.

- 그러나 운영기간 중 최대부하를 필요로 하는 시간은 아주 짧음. 이는 환기시스템이 장시간 동안 적정 수요를 벗어나 최대 부하에서 작동하는 비효율적인 운영을 초래.
- 이런 비효율적인 운영을 개선하는 방안으로는 인버터를 이용한 가변운전방식 있음. 그러나 지하철역사의 실내외 공기질을 반영하여 가변운전방식을 도입하는 연구는 수행된 바가 있지만, 실시간 공기질을 반영하여 속도제어를 진행하는 것이 아니라, 과거 공기질 데이터를 분석하여 요일별, 상황별 적정 스케줄을 도출하여 제어하는 방식으로 수행되어 있음. 실시간으로 데이터를 수집하여 스케줄을 도출하는 연구가 있었지만 고가의 측정기를 사용하였으며 이는 경제성 확보가 어려움으로 실제 운영기관의 도입에 어려운 점이 있음.

나. **수락산역 승강장 가변운전방식 도입의 타당성 검토**

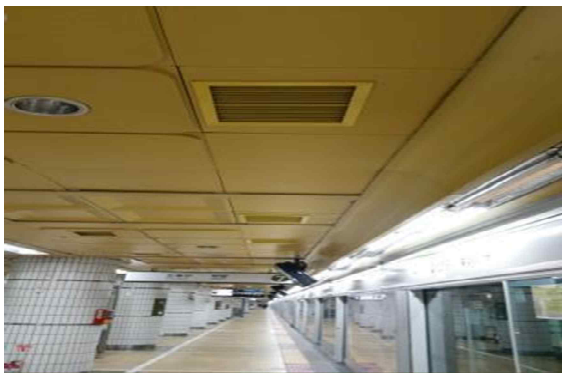
(1) 수락산역 승강장 환기설비 ON/OFF운전시 실내환경 분석을 위한 실측

(가) 수락산역 승강장 환기설비 ON/OFF운전시 풍량 측정

- 현재 수락산역 승강장 환기설비가 ON/OFF으로 운전될 때 취출구별 토출되는 풍량을 측정함. 이 실험을 통해 현재 수락산역 승강장에 확보되는 풍량을 예측할 수 있음. 따라서 실내환경과 토출 풍량간의 관계를 분석하여 가변운전방식 도출에 활용 할 수 있음. 실험결과는 다음 표와 같음.
- 실험위치 : 승강장의 취출구는 메인덕트에 총 64개, 분기덕트에 총 68개가 설치되어 있음. 수락산역은 상행선(도봉산방면)과 하행선(마들방면)의 승강장이 대칭구조를 가지며, 승강장은 중심축을 기준으로 양쪽 구역(1,2구역)의 취출구 개수 및 위치가 유사함. 이에 승강장 환기설비1에 의해 제어되는 상행선 1구역의 취출구별 풍량을 측정함.
- 실험시간 : 실험시간은 재실자의 안전을 위해 열차운행이 끝난 1시~2시로 선정함.

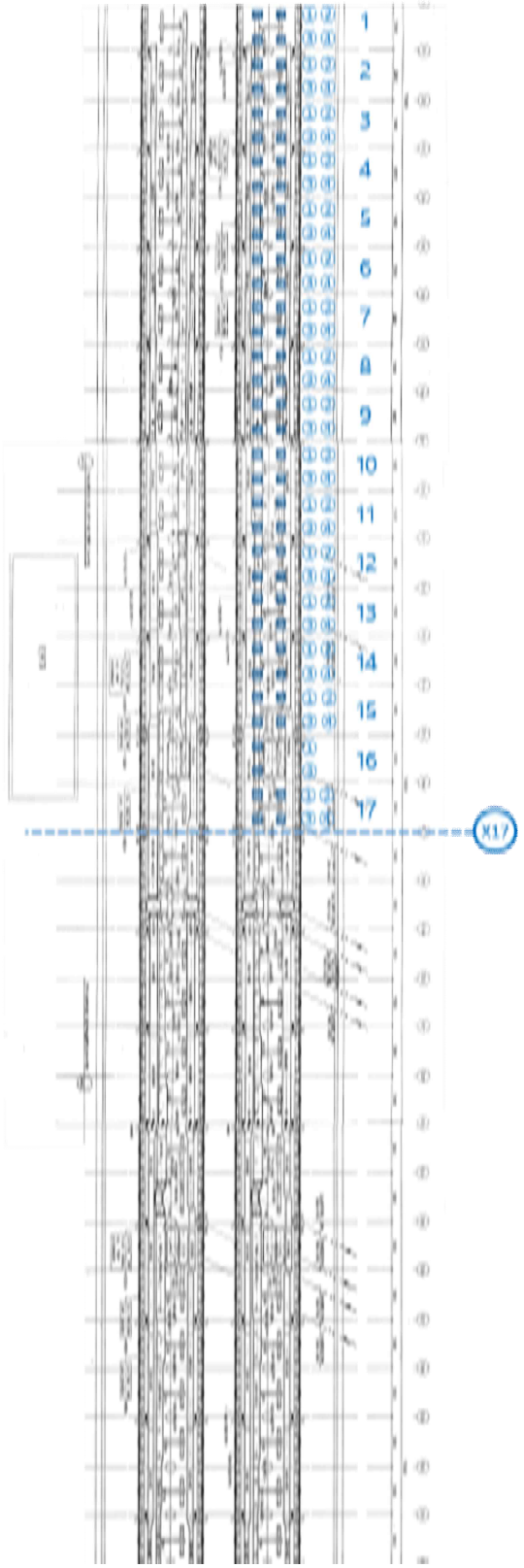


<그림 3-4-35> 승강장 취출구 풍량 측정 모습



<그림 3-4-36> 수락산역 승강장 취출구

- 실험장비 : 사용된 실험장비는 직독식 풍량대 1대로 풍속을 측정함. 이에 측정된 값에 취출구 면적을 곱함에 따라 풍량을 계산 할 수 있음.



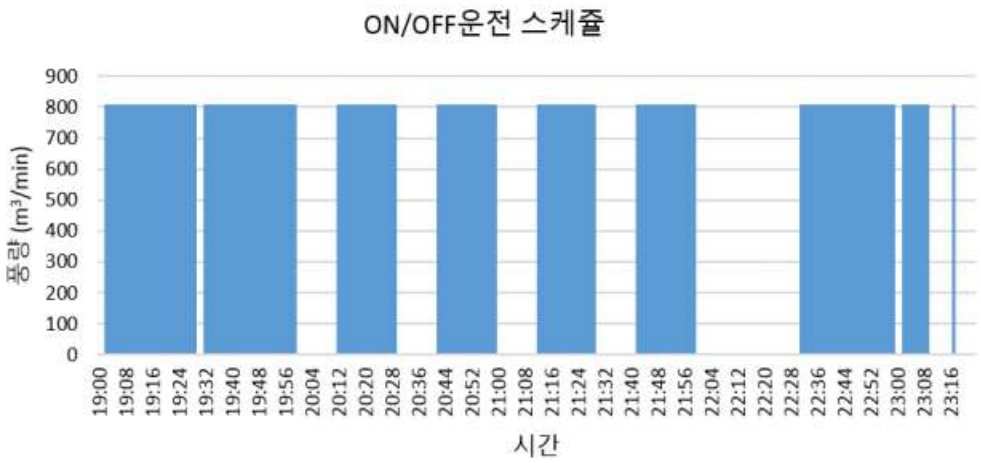
<그림 3-4-37> 상행선 승강장 1구역 취출구 위치

<표 3-4-39> ON/OFF운전 시 상행선 승강장 1구역 취출구별 풍속 및 풍량

구역	구분	①	②	③	④
1	풍속(m/s)	1.55	1.15	1.45	1.25
	풍량(m^3/s)	0.108	0.080	0.101	0.087
2	풍속(m/s)	1.71	1.21	1.86	1.23
	풍량(m^3/s)	0.119	0.084	0.129	0.086
3	풍속(m/s)	1.22	1.08	1.30	1.43
	풍량(m^3/s)	0.085	0.075	0.090	0.100
4	풍속(m/s)	1.26	1.45	1.19	1.08
	풍량(m^3/s)	0.088	0.101	0.083	0.075
5	풍속(m/s)	1.44	1.15	1.23	1.17
	풍량(m^3/s)	0.100	0.080	0.086	0.081
6	풍속(m/s)	1.44	1.21	1.41	1.26
	풍량(m^3/s)	0.100	0.084	0.098	0.088
7	풍속(m/s)	1.14	1.03	1.24	1.20
	풍량(m^3/s)	0.079	0.072	0.086	0.084
8	풍속(m/s)	1.31	1.37	1.21	1.32
	풍량(m^3/s)	0.091	0.095	0.084	0.092
9	풍속(m/s)	0.30	0.45	0.65	1.15
	풍량(m^3/s)	0.021	0.031	0.045	0.080
10	풍속(m/s)	1.44	1.47	1.17	1.32
	풍량(m^3/s)	0.100	0.102	0.081	0.092
11	풍속(m/s)	0.26	0.48	2.25	0.23
	풍량(m^3/s)	0.018	0.033	0.157	0.016
12	풍속(m/s)	1.40	1.57	1.55	1.37
	풍량(m^3/s)	0.097	0.109	0.108	0.095
13	풍속(m/s)	1.31	1.24	1.12	1.53
	풍량(m^3/s)	0.091	0.086	0.078	0.106
14	풍속(m/s)	1.10	1.18	1.11	1.31
	풍량(m^3/s)	0.077	0.082	0.077	0.091
15	풍속(m/s)	1.77	1.06	1.59	1.38
	풍량(m^3/s)	0.123	0.074	0.111	0.096
16	풍속(m/s)	0.50	-	0.60	-
	풍량(m^3/s)	0.035	-	0.042	-
17	풍속(m/s)	0.20	0.20	0.20	0.10
	풍량(m^3/s)	0.014	0.014	0.014	0.007

(나) 수락산역 승강장 환기설비 ON/OFF운전(ON/OFF운전)시 실내환경 측정

- 수락산역 승강장의 환기설비에 가변운전방식을 도입하였을 때의 실내환경(온도, 습도, 이산화탄소 및 미세먼지농도(PM10))과 기존의 운전방식에서의 실내환경의 차이점을 비교하기 위하여 기존의 운전방식과 가변운전방식에서 승강장 실내환경을 측정함. 또한 가변운전 도입시 실시간 실내환경의 변화에 따른 적정 풍량 공급에 대한 분석을 위하여 측정을 진행하였음. 실험당일 운전스케줄은 <그림 3-4-38>과 같음. 승강장 환기설비 ON/OFF 운전시 블로워의 최대회전수는 1054rpm 이며, 이 때 블로워에서 토출되는 풍량은 810CMM임.



<그림 3-4-38> ON/OFF운전 스케줄

- 실험위치 : 수락산역은 상행선(도봉산방면)과 하행선(마들방면)의 승강장이 대칭구조를 가지며, 승강장은 중심축을 기준으로 양쪽 구역(1,2구역)의 취출구 개수 및 위치가 매우 유사함. 이에 상행선 1구역 및 2구역, 하행선 1구역 및 2구역이 모두 대칭이라고 가정하며, 하행선 2구역 X19, X28축(수락산역 승강장 평면도 기준)에서 측정을 진행함.
- 실험시간 : 실험시간은 승객인원의 비혼잡시간대와 혼잡시간대를 포함하는 평일 19시~23시로 선정하였으며, 시간대별 승하차인원비율이 85%로 가장 높은 19시~20시를 포함하고 있음.



<그림 3-4-39> 실내환경측정기



<그림 3-4-40> 미세먼지측정기

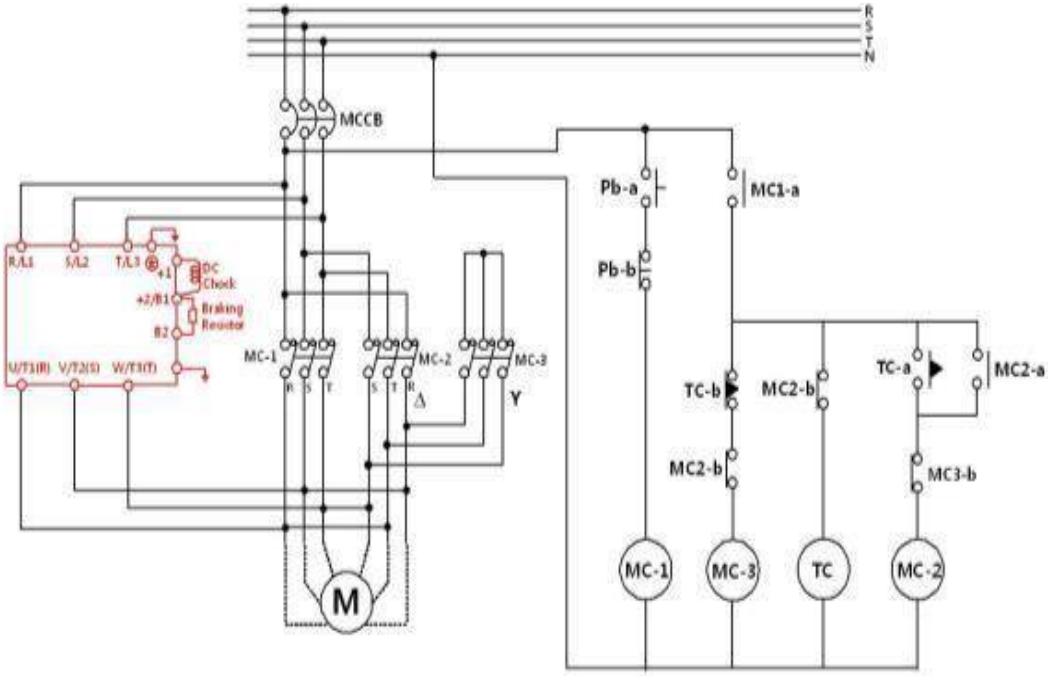
- 실험장비 : 사용된 실험장비는 실내환경측정기 2대와 미세먼지측정기 2대이며, 실내환경측정기는 CO2, 온도, 습도 등을 측정하며, 미세먼지 측정기는 PM10 먼지량을 측정함.
- 특이사항 : 수락산역 승강장 환기설비 ON/OFF운전시 실내환경 측정이 실시된 5월 17일 대기미세먼지농도(PM10)는 19시~23시 평균 28.2㎍/㎥이었음.

<표 3-4-40> 5월 7일 서울특별시 노원구 대기미세먼지농도(PM10)

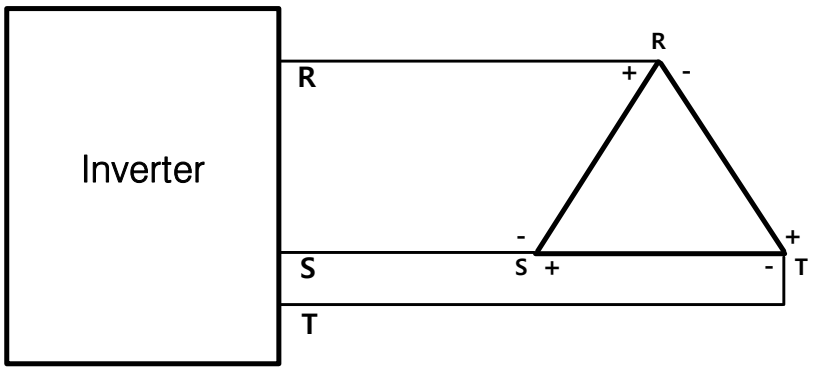
시간(시)	19	20	21	22	23
대기미세먼지농도(㎍/㎥)	21	22	29	33	36

(2) 수락산역 승강장 환기설비 가변운전시 공기환경 분석을 위한 풍량 실측

- 현재 수락산역 승강장 환기설비가 가변으로 운전될시 각 취출구별 토출되는 풍량을 측정함. 인버터를 설치하여 블로워의 회전수를 제어하고, 각 회전수에서 말단 취출구를 비롯한 적정 풍량확보가 어려울 것으로 우려되는 각 취출구의 풍량을 측정하여 가변운전패턴 적용가능여부를 검토함.
- 실험위치: 수락산역은 상행선(도봉산방면)과 하행선(마들방면)의 승강장이 대칭구조를 가지며, 승강장은 중심축을 기준으로 양쪽 구역(1,2구역)의 취출구 개수 및 위치가 유사함. 이에 상행선 1구역 취출구별 풍량데이터를 이용하여 승강장 환기설비 2에 의해 제어되는 상행선 2구역에서 적정 풍량 확보가 어려울 것으로 우려되는 취출구를 선정하여 풍량을 측정함.
- 실험시간: 실험시간은 재실자의 안전을 위해 열차운행이 끝난 오전 1시~5시로 선정함. 1시~2시에는 인버터 설치 및 케이블 결선작업을 진행하였으며, 2시~4시에 풍량측정실험을 진행함. 풍량 측정 후, 인버터 철거 및 기존케이블 결선작업과 기계관제 가동시험을 거쳐 승강장환기설비 정상작동여부를 확인한 후 실험을 종료함.
- 실험장비: 직독식 풍량계 1대로 취출구의 풍속을 측정하였으며, 45kW용량의 Delta 인버터 1대로 승강장 환기설비 2를 제어하고 전력분석기를 이용하여 소비전력량을 계산함.



<그림 3-4-41> Y-△기동 시퀀스 도면



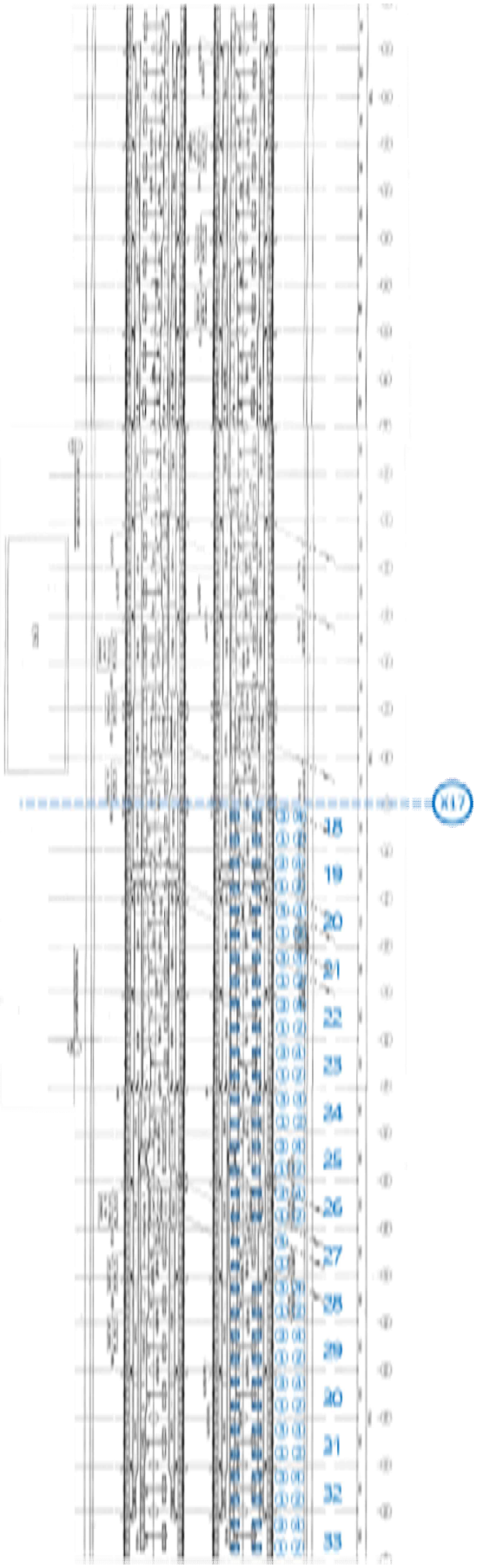
<그림 3-4-42> 인버터2차측과 MC2차측 결선도



<그림 3-4-43> 전력분석기와 인버터



<그림 3-4-44> 인버터를 이용한 블로워의 회전수 제어

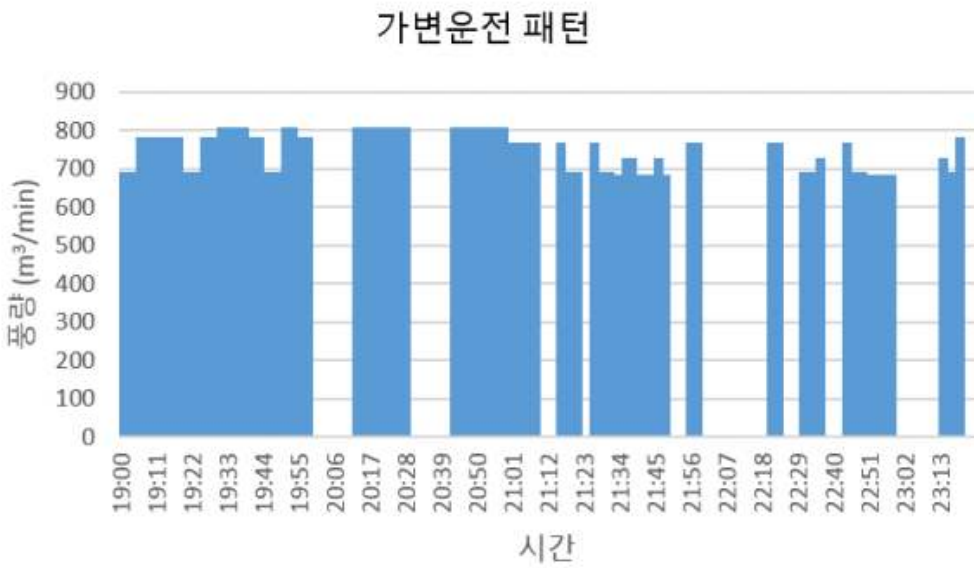


<그림 3-4-45> 상행선 승강장 1구역 취출구 위치

<표 3-4-41> 가변운전시 상행선 승강장 2구역
취출구별 풍속 및 풍량

구역	구분	1054	965	950	930	890
33-②	풍속(m/s)		1.35	1.35		
	풍량(m3/s)		0.094	0.094		
31-②	풍속(m/s)		1.34			
	풍량(m3/s)		0.093			
29-②	풍속(m/s)	1.34	1.32			
	풍량(m3/s)	0.093	0.092			
28-②	풍속(m/s)		1.28	1.23	1.14	1.07
	풍량(m3/s)		0.089	0.086	0.079	0.074
27-②	풍속(m/s)	1.20	1.16	1.14	1.10	
	풍량(m3/s)	0.084	0.081	0.079	0.077	
18-④	풍속(m/s)					1.00
	풍량(m3/s)					0.070

- 적정 풍량확보가 어려울 것으로 우려되는 취출구의 풍량을 측정한 결과 적정 풍량이 확보되는 블로워의 회전수 영역은 890rpm~1054rpm으로 분석되며, 각 회전수에 따른 블로워의 급기 풍량은 684~810m3/min으로 계산됨. 이를 바탕으로 도출된 가변운전패턴으로 환기설비를 운전했을 때 실내환경을 측정함.
- 본 측정을 통하여 가변운전시 실내환경을 ON/OFF운전 때와 비교하여 가변운전 패턴 도입가능여부를 검토하고 분석 결과를 최적의 운전패턴을 도출하는 연구에 활용하고자 하며, 본 실험에 적용된 가변운전 패턴은 다음 그림과 같음.



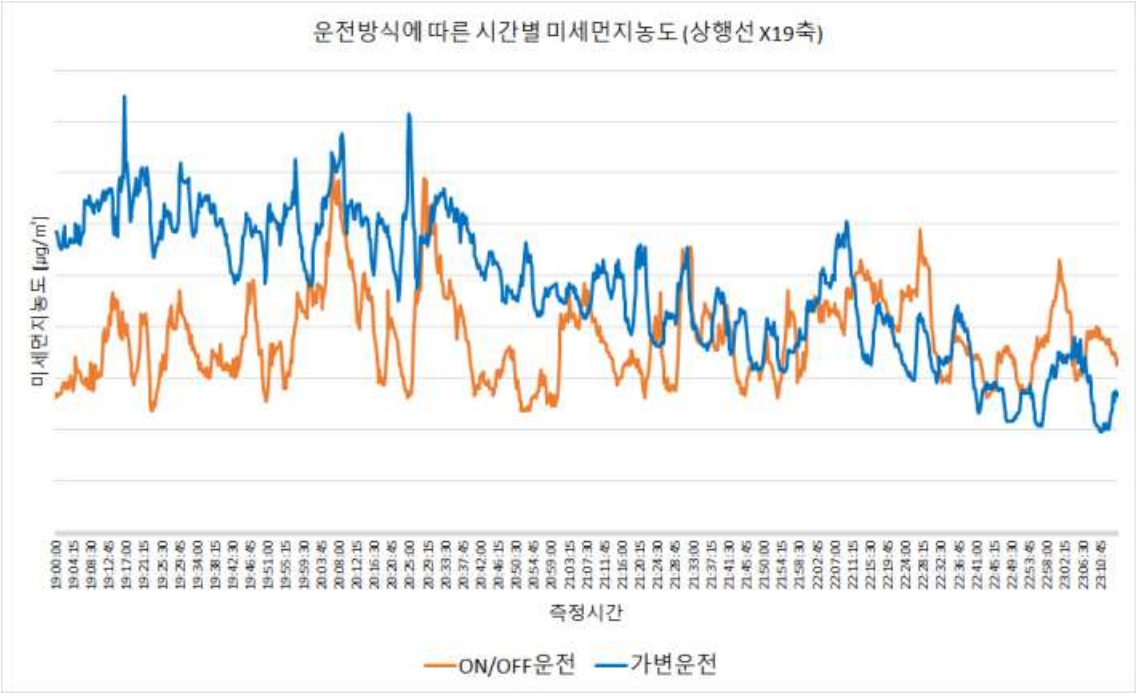
<그림 3-4-46> 가변운전실험시 가변운전 스케줄

- 실험위치: 각 운전유형에 따른 실내환경 비교의 정확성을 높이기 위하여, ON/OFF운전시 실내환경을 측정한 위치에서 실시됨. 즉, 하행선 2구역 X18, X29축(수락산역 승강장 평면도 기준)에서 진행됨.
- 실험시간: 실험위치와 같이 정확한 비교를 위해 ON/OFF운전시 실내환경을 측정한 평일 19시~23시로 선정함.
- 실험장비: ON/OFF운전시 실내환경 측정에 사용된 실험장비와 같음.
- 특이사항: 수락산역 승강장 환기설비 ON/OFF운전시 실내환경 측정이 실시된 5월 17일 대기미세먼지농도(PM10)는 19시~23시 평균 40.4㎍/㎥이었음. 배기팬 4대 중 1대가 작동하지 않아 ON/OFF운전시 실내환경측정 실험일보다 배기가 원활히 이루어지지 않음.

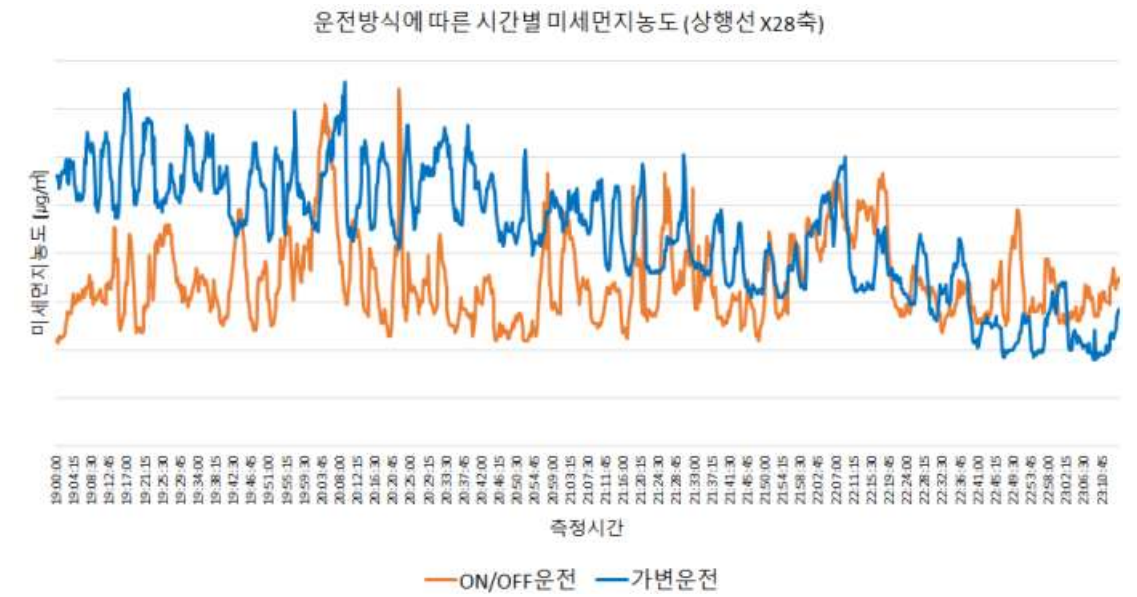
(3) 최적운전패턴 도출 알고리즘 수행 결과

(가) 각 운전유형에 따른 실내환경 비교

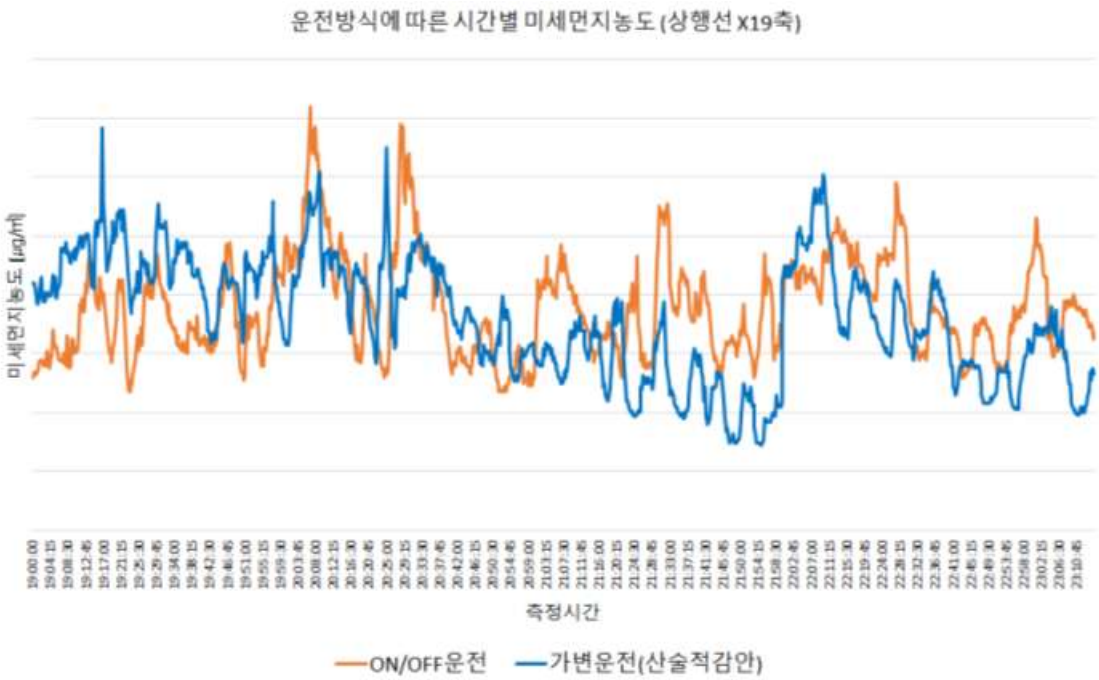
- 각 운전유형에 따른 시간대별 미세먼지농도(PM10)는 다음 그림과 같음. 승강장 환기설비를 ON/OFF운전시, 수락산역 승강장의 미세먼지농도(PM10)는 승객인원의 비 혼잡시간대와 혼잡시간대 모두 다중이용시설 실내환경 유지기준을 초과하지 않는 것으로 밝혀짐.
- 가변운전시 풍량확보에 취약한 취출구에서 적정 풍량이 확보되는 블로워의 회전수 영역은 890rpm~1054rpm으로 분석됨. 이를 바탕으로 현장에서 가변운전을 도입하여 실험한 결과, 19시~20시의 미세먼지농도(PM10)가 ON/OFF운전시보다 높게 측정됨. 이는 실외미세먼지농도와 가동된 배기팬의 개수가 달랐기 때문으로 분석됨.
- 이에 20~21시에 기존 운전패턴으로 환기설비를 운전하여 획득된 미세먼지농도(PM10)데이터를 이용하여 가변운전시 미세먼지 농도 값에 대한 보정을 산술적으로 하였음. 향후 실험 조건이 상이한 것을 보정하기 위한 모델수립은 추후 진행될 예정임.
- 21시부터 도출된 가변운전패턴으로 승강장환기설비를 운전하였으며, 실시간으로 실내환경의 변화에 따라 블로워 회전수를 조절함. 22시부터는 비가 내림에 따라 미세먼지농도(PM10)가 낮아짐에 따라 미세먼지 농도 값에 대한 보정을 하지 않음.
- 실험조건이 상이함에 따라 가변운전시 측정된 미세먼지농도를 산술적으로 감안할 경우, 운전방식에 따른 시간별 미세먼지농도 다음 그림과 같이 유사한 값을 가짐.
- 22시 이후에 측정된 데이터는 산술적 감안이 되지 않았음에도 불구하고, 가변운전시 미세먼지농도가 더 낮음. 이는 가변운전시 외기 미세먼지농도가 ON/OFF운전 실험 때 보다 낮기 때문으로 분석됨.



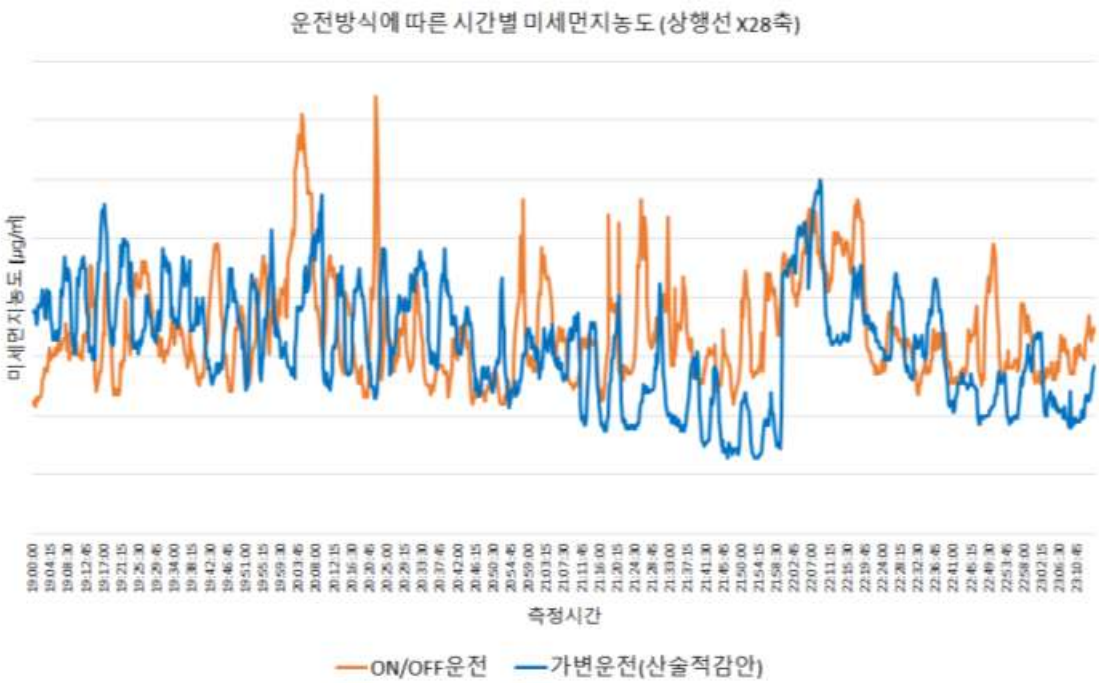
<그림 3-4-47> 운전방식에 따른 시간별 미세먼지농도 상행선 X19축
(미세먼지농도(PM10)의 경우, 운전유형에 따른 상대비교를 위한 것으로 절대적 수치는 의미가 없음)



<그림 3-4-48> 운전방식에 따른 시간별 미세먼지농도 상행선 X28축
(미세먼지농도(PM10)의 경우, 운전유형에 따른 상대비교를 위한 것으로 절대적 수치는 의미가 없음)



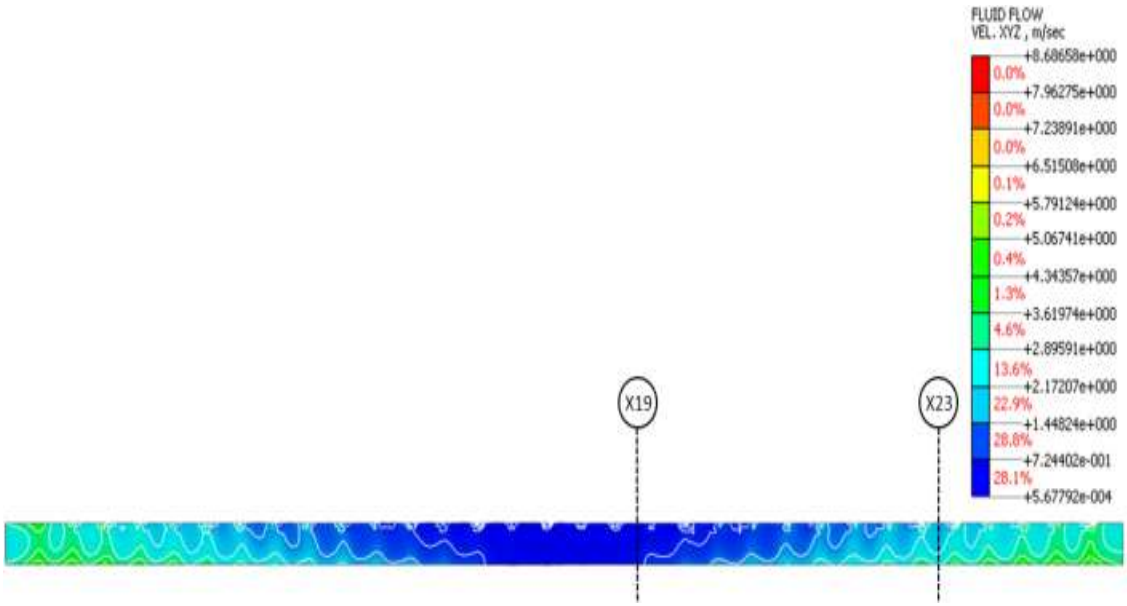
<그림 3-4-49> 운전방식에 따른 시간별 미세먼지농도(산술적으로 감안) 상행선 X19축
(미세먼지농도(PM10)의 경우, 운전유형에 따른 상대비교를 위한 것으로 절대적 수치는 의미가 없음)



<그림 3-4-50> 운전방식에 따른 시간별 미세먼지농도(산술적으로 감안) 상행선 X28축
(미세먼지농도(PM10)의 경우, 운전유형에 따른 상대비교를 위한 것으로 절대적 수치는 의미가 없음)

(나) 실험위치에 따른 실내환경 비교

- X19축과 X28축에서의 미세먼지농도를 비교했을 때, X19축이 더 높은 값을 가짐. 이는 다음 그림과 같이 전산유체역학(CFD: Computational fluid dynamics) 시뮬레이션을 통해 X19축에서 공기정체가 된 것으로 분석됨.



<그림 3-4-51> 전산유체역학 시뮬레이션을 이용한 환기설비 가동시 승강장 공기유동분석

(다) 운전유형에 따른 전력소비량 비교

- ON/OFF운전 대비 가변운전시 확보되는 풍량은 약 5% 증가하였으며, 전력소비량은 약 2% 감소하였음. 실시간 실내환경 및 전력소비량을 고려하여 가동시간 및 가동속도를 조절할 경우, 풍량 증가 및 에너지소비량 감소 효과를 동시에 가질 수 있음.

<표 3-4-42> 가변운전시 기존유도기와 SynRM의 시뮬레이션 결과 비교

	ON/OFF운전		가변운전	
가동시간대	풍량 (m^3)	전력소비량 (kWh)	풍량 (m^3)	전력소비량 (kWh)
19:00~20:00	45360	15.68	42590	14.28
20:00~21:00	29160	10.08	29160	10.51
21:00~22:00	29160	10.08	35065	10.52
22:00~23:00	15390	5.32	21418	6.18
23:00~	7290	2.52	5926	1.82
합계	126360	43.68	134159	43.31

다. **저비용센서를 활용한 최적운전패턴 도출 알고리즘 개발**

(1) 고정밀 측정기를 이용한 미세먼지센서 측정값 스케일 보정작업

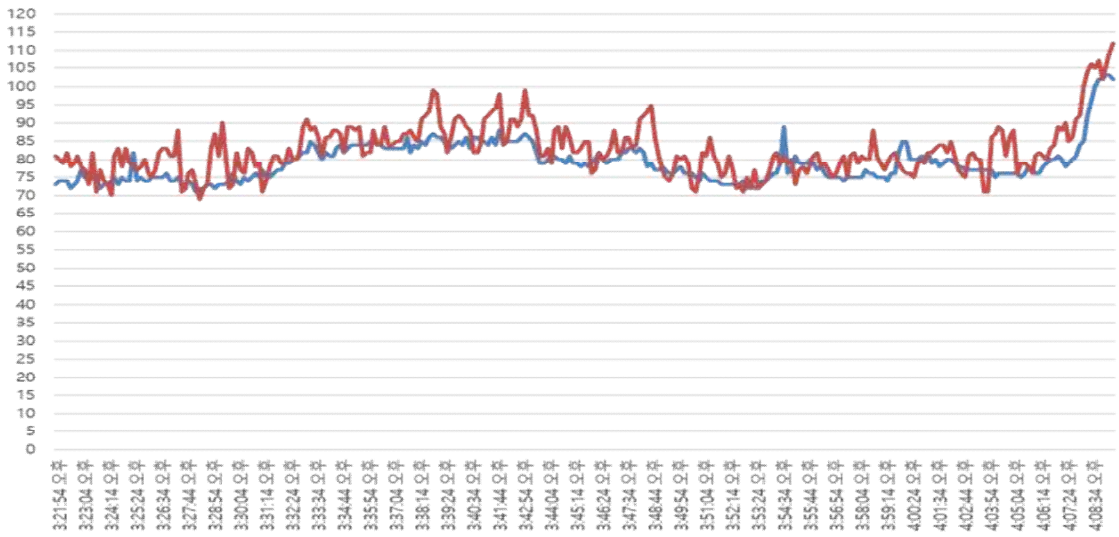


<그림 3-4-52> 미세먼지 측정기
제조사: TSI(미국)
모델명: DRX 8532



<그림 3-4-53> 미세먼지센서
제조사: 랩코(한국)
모델명: DP-100

- 저비용 센서는 승강장에 설치되어 있으며 아날로그신호(전압)방식으로 측정된 데이터를 전송하고 있음. 아날로그방식은 설치길이가 길어질수록 노이즈가 발생(저항이 길어짐으로 전압이 감소). 따라서 측정된 값에 대한 보정작업이 필요함.
- 동일한 위치에서 고정밀 측정기를 이용한 측정값과 미세먼지 센서의 측정값을 비교하여 보정값을 산출하는 방식을 채택함.

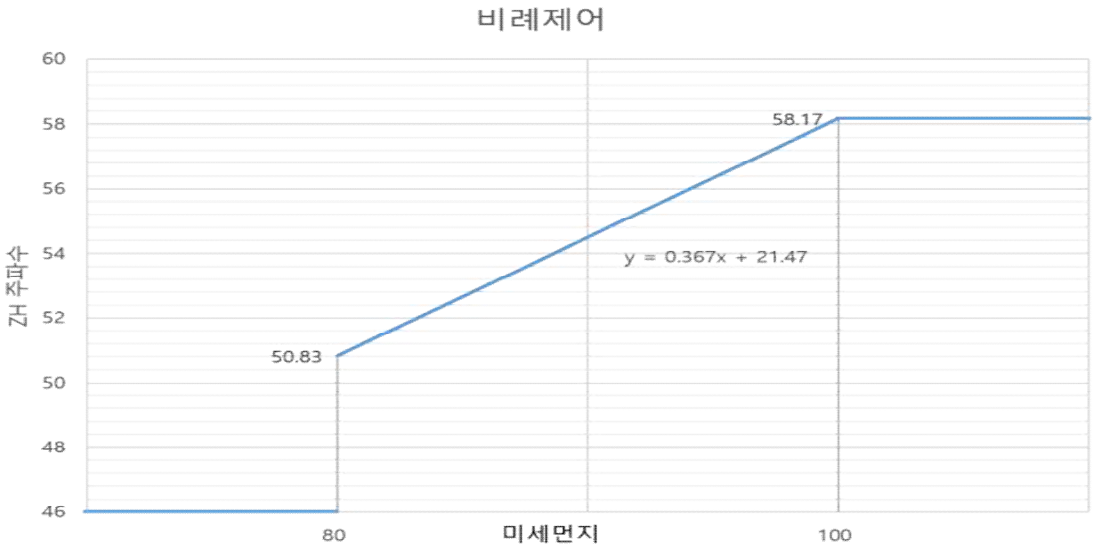


<그림 3-4-54> 미세먼지 측정 값

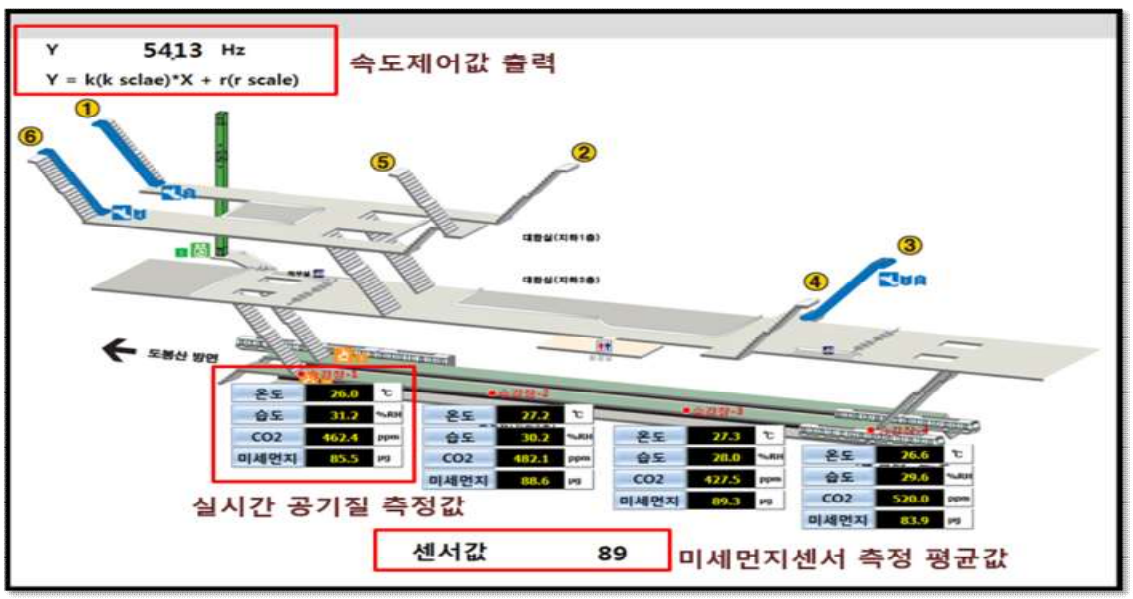
- 고정밀 측정기를 이용한 미세먼지센서 보정작업 후 측정기와 센서간의 측정값을 비교한 결과 오차범위 5%이내에서 측정되고 있음.

(2) 가변운전방식 도입

- 가변운전가능여부 실험을 통하여 얻은 결과를 회귀분석을 통하여 가변운전산출식을 도출
- 운전가능 범위는 인버터 주파수를 기준으로 50.83hz~58.17hz
- 운전 작동 시작은 실내미세먼지 농도가 80㎍/㎥일 경우 최소운전으로 시작됨.
- 실내미세먼지 농도 80~100㎍/㎥구간에서는 비례제어방식으로 운전가동
- 실내미세먼지 농도가 권고기준이상인 100㎍/㎥이상일 경우 최대운전으로 작동
- 회귀분석을 통한 분석은 다음의 표와 같음. 여기서 x는 승강장 센서기 2, 3호기 평균값. 실험을 통한 승강장내 공기질 분석결과 승강장 중앙부근에서 공기정체가 이루어지며 실내미세먼지농도가 양측보다 높은 것으로 분석됨.



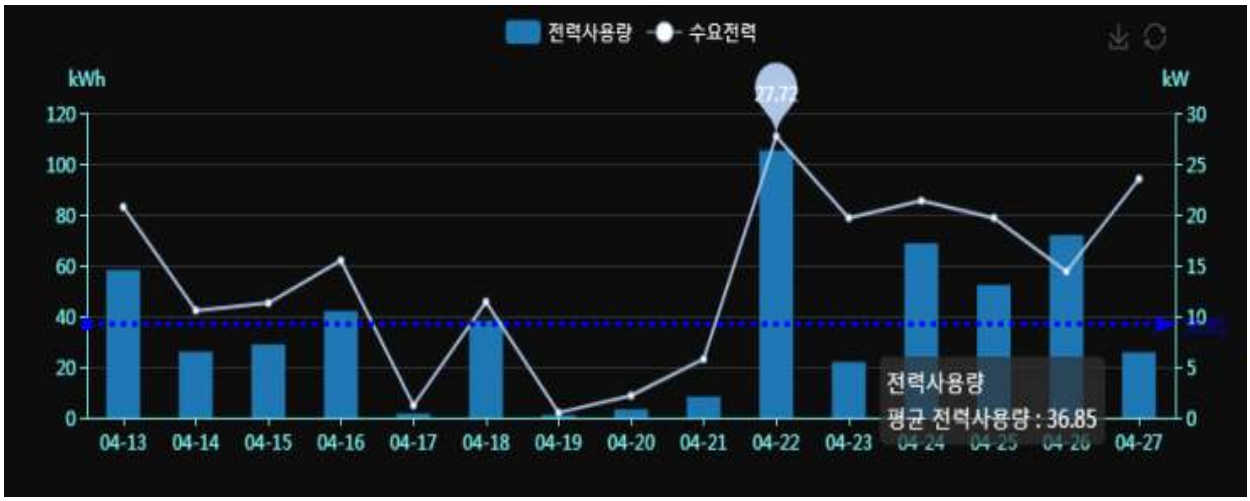
<그림 3-4-55> 비례제어



<그림 3-4-56> 실제 승강장 가변운전시 시스템 모니터링 화면

<표 3-4-43> 가변운전방식 도입결과

항목	기존스케줄 에너지소비량	가변운전 에너지소비량
운전방식	급배기일 운전시간 15시간 기준	배기팬24시간 운전 급기팬 실내공기질 상황에 따라 속도 제어
배기팬(약 8.8kWh)	8.8(kWh)×4(대)×15(시간) = 528 kWh	8.8(kWh)×4(대)×24(시간) = 844.8 kWh
급기팬(약 18.25kWh)	18.28(kWh)×2(대)×15(시간) = 578.4 kWh	일 소모량 약 20kWh~55kWh (전력량계실측값)
급배기에너지 소비량 합계	약 1,106.4 kWh	약 864.8kWh ~ 899.8kWh
에너지절감량		206.6kWh ~ 241.6kWh
에너지절감율		18.6% ~ 21.8%



<그림 3-4-57> 가변운전실험 4월13일~4월27일까지 15일 측정

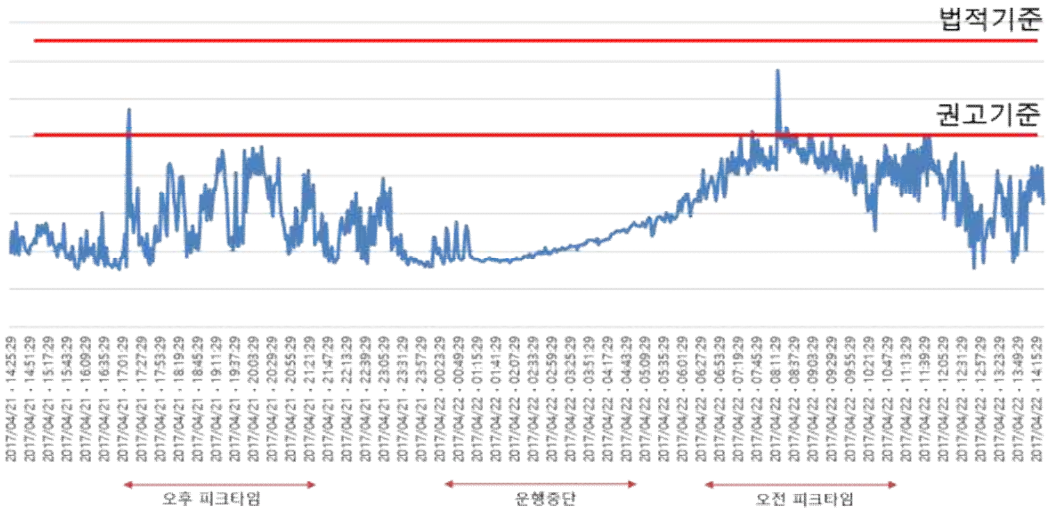
※ 17일 단전작업으로 인한 시스템 중단

※ 19일, 20일, 21일 시스템 에러 발생 및 보수기간

- 가변운전시 지하철 운행중단 후 배기팬 사용을 중지할 경우 일 배기팬 운전시간은 20시간
- 이 경우 배기팬 에너지소비량은 704kWh
- 에너지절감량은 347.4kWh~382.4kWh
- 에너지절감율은 31.3%~34.5%
- 가변운전시 실내공기질 측정 결과는 다음의 그림과 같음.
- 일반적으로 권고기준을 이하로 유지하는 것으로 나타났으며 승강장내 부분이벤트 발생시 권고기준이상으로 올라가는 현상이 있으나 법적기준 이하로는 유지하였으며 이는 일시적인 것으로 나타났음.
- 다만 외부 공기질이 좋지 않은 경우, 나쁜 공기의 유입이 증가될 수 있으며, 이로 인한 급기팬의 가동속도 및 가동시간이 증가할 수 있음.



<그림 3-4-58> 4월16일~4월17일 승강장 미세먼지 측정결과



<그림 3-4-59> 4월21일~4월22일 승강장 미세먼지 측정결과

5. 최적의 운전패턴 구현을 위한 환기시스템 제안 및 시범 제작

가. 환기시스템 용 30kW급 synRM 설계 및 제작

(1) 필요성

- 환기설비에너지를 절감하는 방안으로는 고효율 전동기를 사용하는 방법이 있음. 전동기는 환기시스템의 동력원이며, 환기시스템 에너지소비의 90%이상을 차지함. 일반적으로 도입되어 있는 전동기는 IE2(High Efficiency)등급 전동기이며, 이를 IE3 (Premium Efficiency)등급, IE4(Super Premium Efficiency)등급 고효율 제품으로 교체시 약 2~4%가량 에너지를 절감 할 수 있음.
- 전동기의 최저 효율제가 시행되면서 현재 고효율 유도전동기가 생산 및 판매되고 있으며 2016년 10월부터는 프리미엄급 유도전동기를 대기업의 경우 의무적으로 생산하고 판매해야 함.

<표 3-4-44> 고효율 전동기 효율 비교

고효율급 효율/ 프리미엄급 효율/ 슈퍼 프리미엄급 효율			
Power[kW]	2 pole	4 pole	8 pole
0.75	75.5/77.0/-	82.5/85.5/85.9	80.0/82.5/85.4
1.1	82.5/84.0/96.1	84.0/86.5/87.6	85.5/87.5/87.5
1.5	84.0/85.5×87	84.0/86.5/88.4	86.5/88.5/88.5
2.2	85.5/86.5/88.5	87.5/89.5/89.8	87.5/89.5/89.5
3.7	87.5/88.5/89.9	87.5/89.5/91.1	87.5/89.5/90.8
5.5	88.5/89.5×91.1	89.5/91.7/92.2	89.5/91.0/92.0
7.5	89.5×90.2/91.6	89.5/91.7/92.7	89.5/91.0/92.5
11	90.2/91.0/92.6	91.0/92.4/93.6	90.2/91.7/93.4
15	90.2/91.7/93.4	91.0/93.0/94.1	90.2/91.7/93.8
18.5	91.0/91.7/93.8	92.4/93.6/94.4	91.7/93.0/94.2
22	91.0/91.7/93.8	92.4/93.6/94.8	91.7/93.0/94.5
30	91.7/92.4/94.1	93.0/94.1/95.1	93.0/94.1/94.8

- 현대중공업(주), 효성중공업(주) 등의 일부 대규모 중공업계들은 최저 효율제를 시행함에 따라 고효율(IE2) 뿐만 아니라 프리미엄 효율(IE3)까지 유도전동기로 양산 진행 중이나 유도전동기는 회전자부분의 2차회로에 전류가 흐르기 때문에 추가 동손이 발생하며 이로 인해 효율 개선에 한계가 있음.

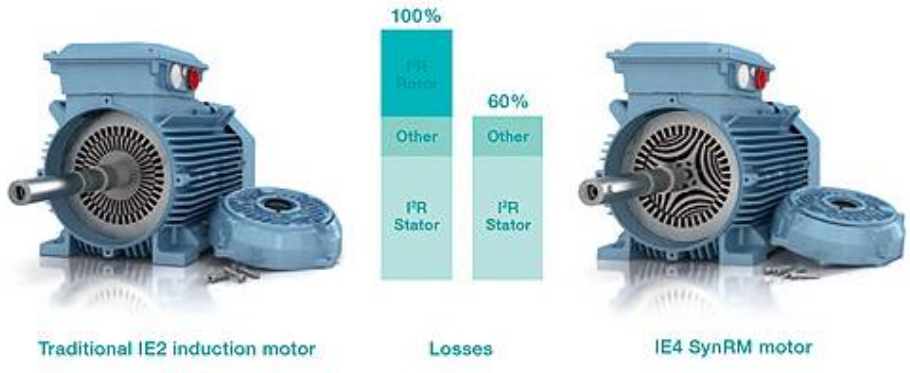


<그림 3-4-60> 고효율 전동기 발전사

- 세계 각국이 에너지 절감을 위한 정책을 시행중이고 그 기준을 강화하는 추세임. 스위스 A사를 필두로 유도전동기의 효율개선을 위한 방안으로 동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)가 개발 및 양산이 진행되고 있음. 동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)는 기존의 유도전동기와 동일한 고정자 구조를 갖고 회전자만 변형하여

인버터를 통한 동기운전을 하는 기기로서 회전자 동손이 없고 구조가 간단함, 또한 SynRM는 구동을 위한 가변전압가변주파수(VVVF)의 벡터 인버터가 필수적이나 가변속 범위가 넓고 응용분야가 넓기 때문에 부하의 빈번한 속도 변동이나 크기 변동 대응측변 등 여러 가지 측면에서 산업용으로 적합함. 또한 SynRM은 구조적으로 회전자에 추가적인 다이케스팅 작업이 불필요하고 금형으로 프레스 가공하여 적층을 하기 때문에 장기적으로 양산단가를 낮출 수 있는 장점도 있음.

- 기존의 유도전동기와 동일한 고정자 구조를 갖고 회전자만 변형하여 인버터를 통한 동기운전을 하는 기기로서 회전자 동손이 없고 구조가 간단해 “인버터-유도전동기” 시스템을 대체할 차세대 산업용 전동기로 적극 연구/검토가 되고 있음.



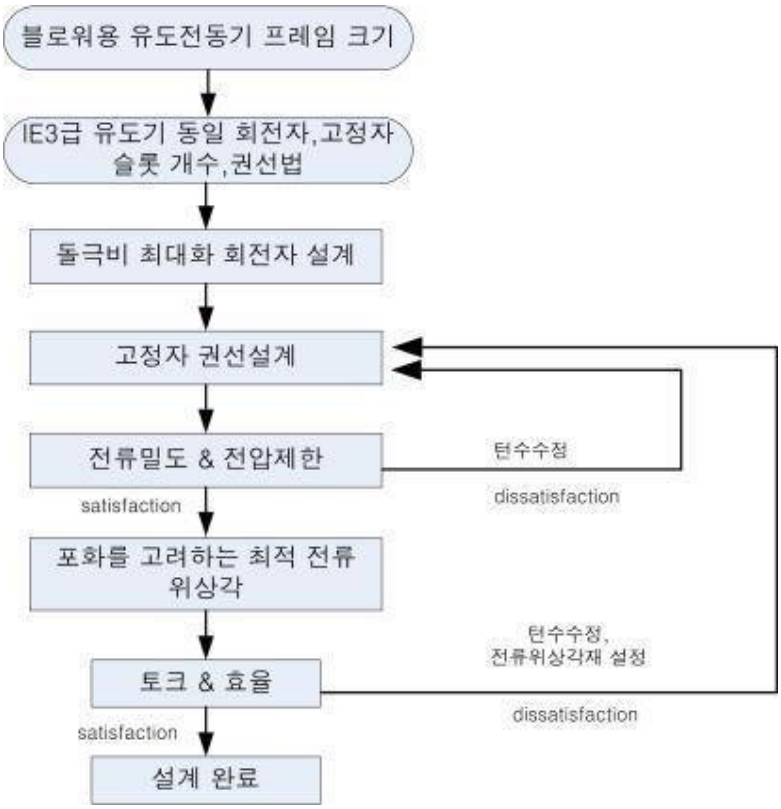
<그림 3-4-61> 고효율 전동기 특성 비교

- 그러나 현재 SynRM 양산 기술은 스위스 A사에서 양산기술을 가지고 있으며 국내에서는 설계 및 제작을 진행한 바가 없음. 중국시장은 낮은 가격으로 시장공략을 하고 ABB, 지멘스 등과 같은 글로벌 업체는 품질과 기술력을 앞세워 시장 선점하고 있음. 국내 중소기업이 살아남기 위해서는 프리미엄 효율 기술 집약적 고부가가치 제품 개발이 필요하고 본 과제를 통해 진행하는 SynRM은 이러한 조건을 만족하는 최적의 개발대상 기술임.

(2) SynRM 회전자 최적설계

(가) 회전자설계 알고리즘

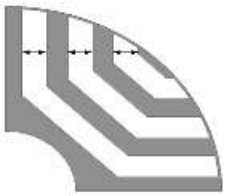
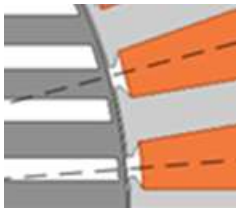
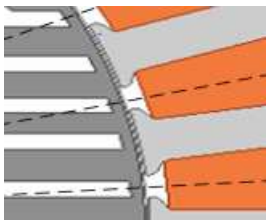
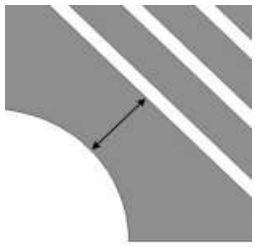
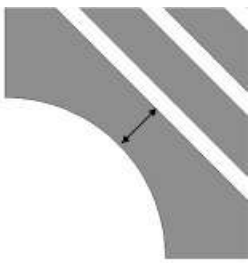
- 회전자 자속장벽 형상에 따라 d축과 q축 인덕턴스의 비율이 변화하고 이에 따른 자기저항의 크기변화가 생김. 회전자 형상 설계 시 각각의 변수를 설정하여 해석함. 주요설계변수는 자속장벽(Barrier) 개수, Kw비(자속장벽과 세그먼트의 비), 각 자속장벽의 밑변길이, 자속방벽의 각, 립(Rib)두께 브릿지(Bridge)두께 등이 있음.
- 고정자 A상 권선에 직류 전류를 인가하고, 기자력 방향을 회전자 d축, q축에 각각 정렬하여 이때 발생하는 d축, q축 쇄교자속양의 비를 이용하여 돌극비를 계산함. 턴수에 따라 역기전력의 크기를 계산하고 이를 이용하여 정격 전압 레벨에 해당하는 권선사양을 결정함. 마지막으로 전류밀도 제한을 만족할 수 있는 권선의 선경 설계가 필요함.



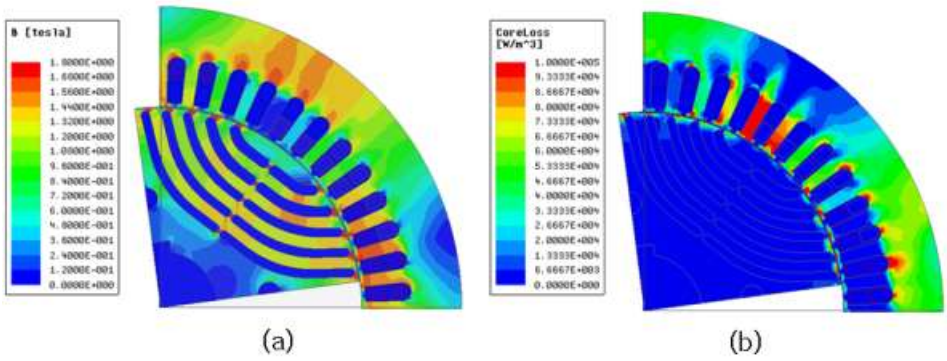
<그림 3-4-62> 동기형 릴럭턴스 전동기의 설계 순서도

- 다음 동기형 릴럭턴스 전동기 모델의 형상을 나타내며, 다음 표는 모델에 대한 설계 제원을 나타냄. 고정자는 유도 전동기 슬롯 형태의 고정자로 모델링 하면서 치수가 동일하고, 48슬롯 2층권 4분포, 단절계수 $K_P = 96.6\%$, 분포계수 $K_d = 95.8\%$로 설계함.
- 회전자의 최적 설계를 위해 설계 파라미터는 <표 3-4-45>와 같이 5개를 이용함. 자속장벽 수가 적으면 q축 자속이 많이 흐르게 됨. 자속장벽 수가 많아지면 세그먼트가 얇아져 포화의 우려가 있음.
- 또한, 회전자의 기계적인 구조(강성) 때문에 제한을 받게 됨. 자속장병의 두께가 두꺼워지면 q축 자속이 감소하여 q축 인덕턴스가 감소하게 됨. 하지만 자속장벽수와 마찬가지로 자속장벽이 너무 두꺼워지면 회전자의 기계적인 구조(강성) 때문에 고속운전 시 비산이 발생 될 수 있음.
- 고정자 치에 세그먼트를 맞추기 위해 회전자 밖으로 갈수록 세그먼트의 두께를 점점 줄이면 더 많은 자속을 받을 수 있고 토크 리플을 줄일 수 있으나 설계가 복잡하고 제작이 어려움. 가장 안쪽 자속장벽의 위치에 따라 세그먼트의 길이가 변화하게 됨. 이는 회전자 크기와 자속장벽 두께, 개수에 따라 제한 될 수 있음. 자속장벽과 세그먼트의 두께 비는 자속장벽이 두꺼우면 q축 자속은 감소하지만 세그먼트가 얇아져서 포화되기 쉬움. 반면 자속장벽이 얇은 경우 q축 자속은 증가하지만 세그먼트가 두꺼워져 d축 자속도 증가함.

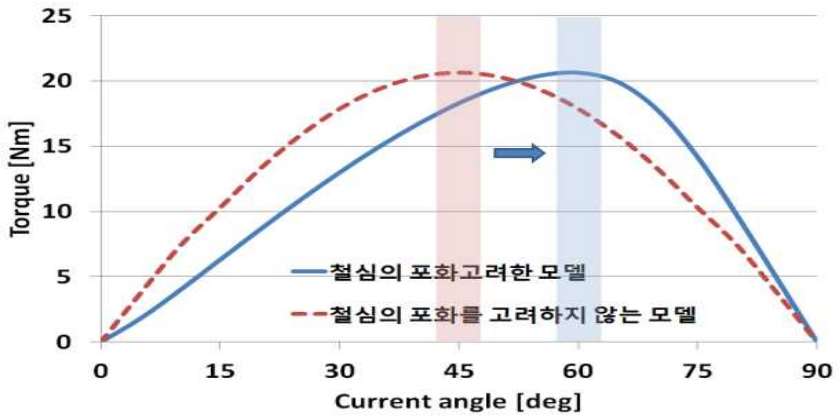
<표 3-4-45> 회전자 설계 파라미터

자속장벽의 수		자속장벽의 두께	
			
세그먼트의 두께		안쪽 자속장벽의 위치	
			
자속장벽과 세그먼트의 두꺼비			
			

- SynRM의 단위 전류당 최대 토크는 토크 곡선과 전류 제한 원의 접점에서 나타나며 이 접점은 토크식에 따라 전류 위상각 45°에서 나타남. 하지만 설계된 SynRM 모델은 위상각 45°에서 회전자 d축 자로가 포화되면서 전류위상각은 q축으로 이동되어 자속분 전류가 감소하지만, d축 자로의 포화가 줄어들어, 결과적으로 <그림 3-4-64>와 같이 약계자 제어가 아닌 공극의 쇄교자속량이 증가하는 단위 전류당 최대토크(MTPA) 제어법이 이루어지게 됨.
- 설계된 SynRM의 철손은 동일 속도에서 철심의 자속밀도에 비례함. SynRM에서는 구조상 회전자 최대 돌극비를 만들기 위해, 회전자 자속장벽 구조가 최적설계 되어야 하며, 자속장벽의 사이즈 크기가 유도전동기 회전자 슬롯의 면적보다 크기 때문에 SynRM 철심의 자속밀도가 유도전동기 보다 큼. <그림 3-4-63(b)>에 SynRM 철심의 철손 분포도를 제시함. 따라서 유도전동기의 철손보다, SynRM 철손이 크게 나타남. 그렇지만 SynRM은 회전자에 권선이 없고, 농형 알루미늄 도체바가 없으므로 2차측 동손이 발생하지 않음.



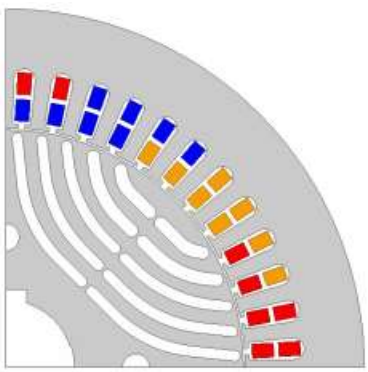
<그림 3-4-63> 정격 포인트 운전 시 SynRM 철심 (a) 자속밀도 (b)철손분포



<그림 3-4-64> 철심의 포화 영향에 따른 단위 전류당 최대 토크(MTPA) 전류 위상각 이동

(나) SynRM 최종설계 결과

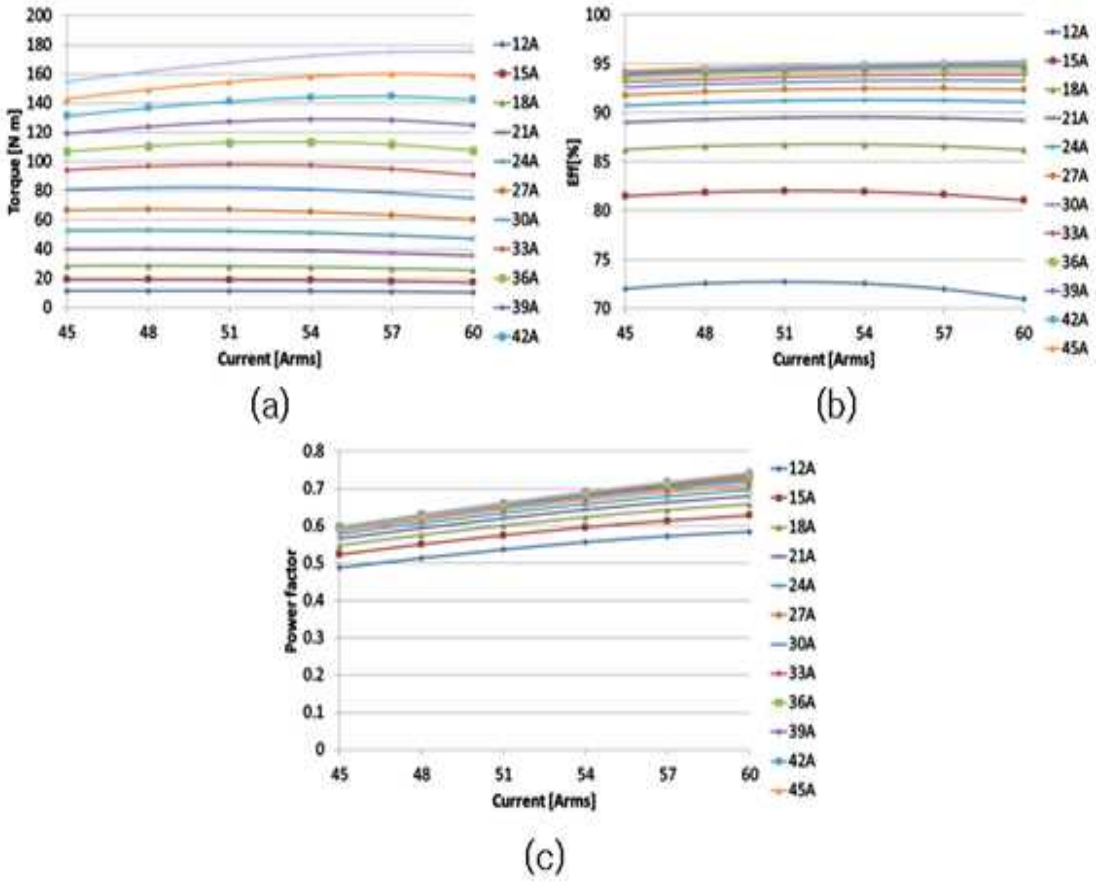
- 유한요소해석을 통해 앞서 제시한 다섯가지 최적 설계 파라미터를 분석하여 최대 토크와 효율을 내는 파라미터 값을 선정하였음. 최적설계모델에 대한 유한요소 해석 결과는 다음 표와 같음.
- 전류/전류위상에 따른 토크, 효율, 역률은 다음 그림과 같음.



<그림 3-4-65> 최적설계모델

<표 3-4-46> 최적설계모델 유한요소해석 결과

항목	사양
상전류	45 [Arms]
전류밀도	3.09 [Arms/mm^2]
점적률	66 [%]
전류 위상각	57 [deg]
유기전압	323.1 [Vrms] 475.2 [Vmax]
토크(목표토크)	168.5(160.0) [Nm]
동손	492.08 [W]
철손	502.9 [W]
기계손	500 [W]
효율	95.1 [%]



<그림 3-4-66> 전류/전류위상별 토크 (b) 전류/전류위상별 효율 (c) 전류/전류위상별 역률

(3) SynRM 제작 및 시험평가

(가) SynRM 제작 사양

- 유한요소해석을 통해 도출한 최적설계모델에 대한 실 제작을 실시함. <그림 3-4-67>은 실 제작한 30kW급 SynRM의 회전자, 회전자 코어, 고정자(하우징)를 나타냄.



(a)



(b)



(c)

<그림 3-4-67> 30kW급 SynRM (a)회전자 (b)회전자 코어
(c)고정자(하우징)

(나) SynRM 실험결과

- 시험은 모터 시험인증 기관인 한국기계전기전자시험연구원(KTC)에서 진행하였고, 효율 측정 시 사용하였던 실험 다이나모 세트 및 인버터 장비는 다음 사진에서 보여주고 있음.
- 실 제작한 전동기와 동일한 스펙을 갖는 ABB사 전동기를 비교하는 시험을 실시하였음. 두 전동기 모두 ABB사의 인버터 ACS880으로 제어함.
- 기존 제작 인버터와 제작한 전동기를 결합하여 시험을 실시하였고, 결과는 정격 포인트(1800rpm, 160Nm)에서 전동기 효율은 95% 만족함.



(a)



(b)



(c)

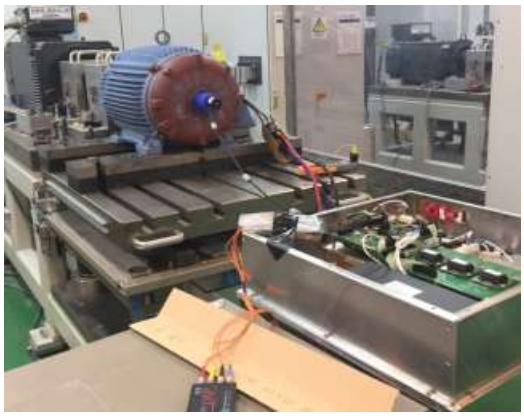
<그림 3-4-68> (a)설계 전동기 (b)ABB 전동기 (c)ABB 인버터 ACS880



<그림 3-4-69> 계측 장치



<그림 3-4-70> 계측값 모니터링



<그림 3-4-71> 설계 전동기 및 설계 인버터 시험 세트

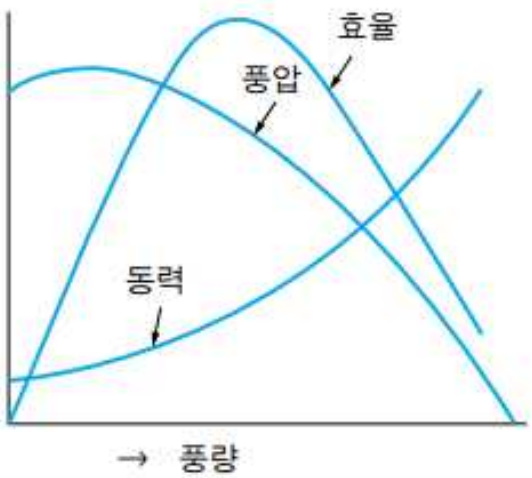
- 전동기 효율은 정격속도 1800rpm 및 정격출력 30kW 조건에서 진행하였으며, 자세한 데이터는 다음 표에 도시하였음. 또한, 경부하 운전 포인트 속도별 (450, 900, 1350, 1800, 1980RPM) 토크별 (40, 80, 120, 160Nm)의 효율특성은 전동기 성적서에 도시하였음. 시험결과 정량적 과제 목표인 모터 효율 94.5% 및 시스템 효율 92%를 만족하였음. 또한 정격포인트 포함한 경부하 전동기 포인트들은 시험을 통해 진행하였으며 시험 성적서에서 제시함.

<표 3-4-47> 30kW SynRM 전력 및 효율 시험 결과

	ABB 전동기+ ABB 인버터	설계 전동기+ ABB 인버터	설계 전동기+ 설계 인버터
토크[Nm]	160	160	160
선간전압[V]	364.97	196.22	203.76
선간전류[A]	66.92	118.2	119.8
속도 [r/min]	1800	1800	1800
입력전력 [kW]	31.86	31.80	31.80
출력 [kW]	30.17	30.17	30.15
전동기 효율 [%]	94.90	94.67	95.0
인버터 효율 [%]	97.88	97.25	97.0

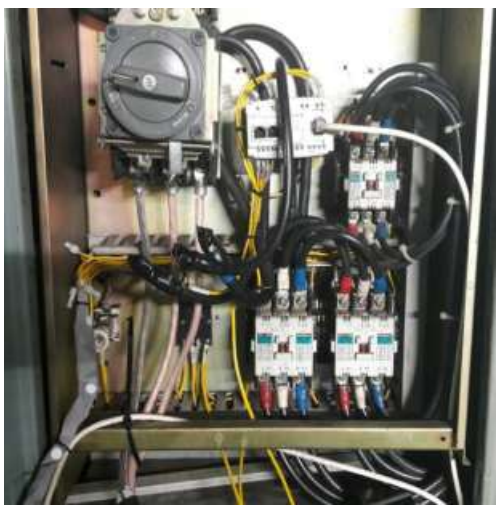
(다) SynRM 설치 및 환기설비 에너지평가

- 기존에 사용되던 도시철도 환기 시스템은 풍량이나 풍압을 가감할 필요가 없기 때문에 송풍기로 IE2급 농형 유도 전동기가 사용되었고, 송풍기의 효율 곡선은 <그림 3-4-72>에 나타나고 있음. 제안하는 환기 시스템은 동기형 릴럭턴스 전동기 및 인버터제어를 사용하여 송풍기의 특성곡선에 따라서 적당한 속도제어방식에 의해 회전속도를 제어함. 풍량, 풍압을 동시에 가감하는 것이 운전효율이 좋음.



<그림 3-4-72> 송풍기의 특성

- 전동기의 형식은 설치장소에 따라 개방형, 전폐형 또는 전폐 외선형이 사용됨. 도시철도 역사 환기용 전동기 전폐형 사용하고 있음. 다음 그림은 도시철도 역사 환기실에 설치한 동기형 릴럭턴스 전동기와 제어기를 보여주고 있음.



<그림 3-4-73> MCC연결

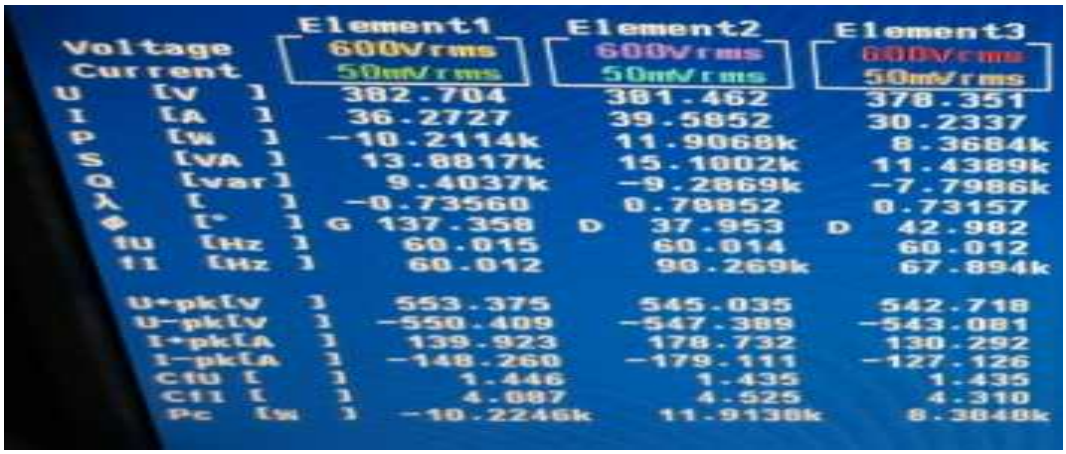


<그림 3-4-74> 인버터 연결



<그림 3-4-75> 동기형릴럭턴스 전동기 세트 설치 (a) 전원 (b) 인버터 (c) 전동기, 풀리

- 인버터와 전동기 도시철도 역사 설치 후 시험을 실시하였으며 결과를 비교하여 기존 유도기 대비 전기사용량이 감소하는 것으로 나타남.



<그림 3-4-76> 동기형 릴럭턴스 전동기 세트 설치 후 시험 결과

<표 3-4-48> 30kW SynRM 설치 후 시험결과

Item	Unit	SynRM	유도기
선간전압	[V]	380	380
상전류	[A]	35.36	
입력	[W]	23273.22	
전동기효율	[%]	0.945(시험치)	0.88(시험치)
인버터효율	[%]	0.979(시험치)	-
역율		0.7844	
전동기 출력	[W]	16889.18	
소비전력량	[W]	18255.51	19192.25
전기사용량	[kW×h]	18.25	19.19

- SynRM은 동기 릴럭턴스 전동기로써 구동을 위한 가변전압 가변주파수(VVVF)의 벡터 인버터가 필수 적이나 가변 범위가 넓고 응용분야가 넓기 때문에 부하의 빈번한 속도 변동이나 크기변동 대응측면 등 여러 가지 측면에서 산업용으로 적합.
- SynRM은 구조적으로 회전자에 추가적인 다이케스팅 작업이 불필요하고 금형으로 프레스 가공하여 적층을 하기 때문에 장기적으로 양산단가를 낮출 수 있는 장점이 있음.
- 따라서 본 과제는 기존의 유도기보다 높은 효율을 가질 수 있도록 30kW SynRM을 설계함. 본 과제 사용하는 어플리케이션은 저속 고 토크를 요구하는 부하이기 때문에 사이즈가 큼. 전동기의 사이즈가 커지면 영구자석의 사용량이 증가되는데 영구자석은 고가이기 때문에 재료비당 생산가격이 합리적이지 않음.
- 아래 표에 급기팬의 정격 운전속도 1800[rpm]에서 SynRM과 SPM(표면 영구자석 부착형 동기전동기)을 비교하여 나타냄.
- 동일 토크 재료비 비율을 비교해보면 해석결과 SPM사이즈는 SynRM 전동기에 비해 약 54% 정도 그 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있음. 적층하더라도 Nd 자석을 쓰지 않게 되어 재료비가 싼 것을 확인 할 수 있음.
- Nd자석의 단가는 230,000[원/kg], S60의 단가는 1,650[원/kg], 동의 단가는 8,873[원/kg], 영구자석이 이 들어가므로 그 가격이 약 6배 이상 차이가 나는 것을 확인할 수 있음.

<표 3-4-49> 고효율 전동기 외형 비교

구분	SPM	SynRM
고정자 외경 (mm)	298	
회전자 외경 (mm)	191	
적층 (mm)	135	250
공극길이 (mm)	0.65	
토크 (Nm)	164	161
재료비(하우징제외) (만원)	155	23
동일토크 재료비 비율 (%)	100	14.8

나. **인버터 손실 절감을 위한 스위칭 동작 알고리즘 설계**

(1) 연구 수행 내용

- 3상 전압원 인버터의 스위칭 손실을 줄이기 위한 알고리즘을 다음 표와 같이 설계 및 시뮬레이터를 구현하고 기존의 인버터 제어 기법과 손실 절감 알고리즘 적용 제어 기법을 시뮬레이션하여 이를 통해 스위칭 손실과 효율을 비교함.

<표 3-4-50> 도시철도역사 환기설비 가변운전시 인버터 스위칭 손실절감방안 프로세스

단계		단계별 목표	세부 내용
1	설계 및 구현 단계	스위칭 손실을 절감시킬 수 있는 3 상 전압원 인버터의 스위칭 동작 알고리즘 설계 및 시뮬레이터 구현	기존의 펄스폭 변조 (PWM)기법의 높은 스위칭 손실을 절감하기 위해 인버터의 출력 전류가 최대가 되는 부분에서 스위칭 동작을 억제함으로서 스위칭 손실을 절감시킬 수 있는 불연속 변조 (DPWM)기법의 스위칭 동작 알고리즘 설계 및 시뮬레이터 구현
2	시뮬레이션을 통한 효율 분석 단계	3 상 전압원 인버터 시스템의 시뮬레이션을 통한 스위칭 손실 절감을 위한 인버터 스위칭 동작 알고리즘 효과 분석	개발된 손실 절감 알고리즘의 성능 평가를 위하여 3 상 전압원 인버터 시스템 구조의 loss 모델을 개발하고 이 모델을 바탕으로 손실 절감 기법 효과를 검증
			기존의 펄스폭 변조 (PWM)기법과 불연속 변조 (DPWM)기법의 인버터 스위칭 손실 비교

(2) SynRM 드라이브를 위한 인버터 설계

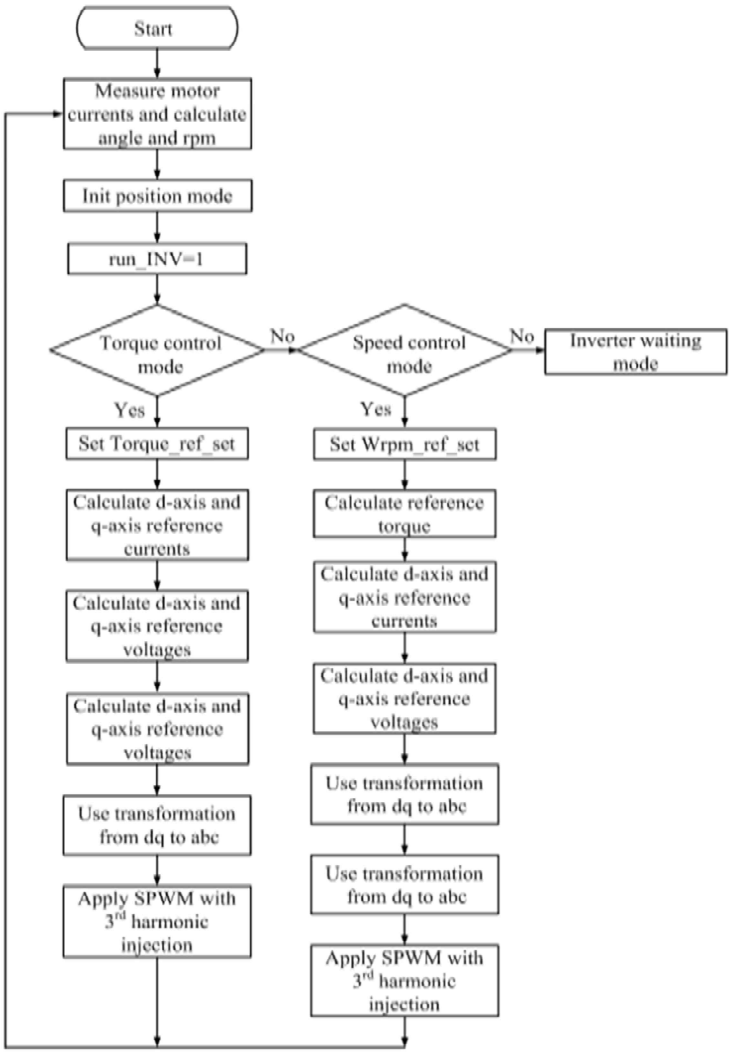
- 30kW급 SynRM 드라이브를 위한 인버터 제어 보드의 하드웨어 구성은 다음과 같음.



<그림 3-4-77> 인버터 제어 보드의 하드웨어 구성도

(3) SynRM 제어를 위한 제어 알고리즘 구성

- SynRM 제어를 위한 제어 알고리즘은 크게 3가지 모드로 나눌 수 있고 각각의 모드는 1) 초기 구동 모드, 2) 토크 제어 모드, 3) 스피드 제어 모드임.
- 아래 그림은 모터 제어를 위한 제어 알고리즘의 순서도를 나타냄. 초기 구동 모드는 모터를 구동시키기 전에 필요한 동작 모드로, 초기 구동 모드가 끝난 후 토크 제어, 스피드 제어를 선택하여 모터를 제어 할 수 있음.
- 처음 인버터 제어 보드에 전원이 들어오면 DSP는 제어를 위한 전류, 엔코더 신호 등의 데이터를 매 샘플링 주기마다 받게 되며, 인버터 동작을 위한 초기 구동 모드가 끝나면 토크 제어를 할 것인지, 스피드 제어를 할 것인지를 선택 할 수 있음.
- 토크 제어 모드와 스피드 제어 모드의 차이점은 스피드 제어 모드로 동작 시킬 경우 설정 해준 기준 rpm 값에 해당하는 기준 토크 값을 계산하는 절차가 더 필요하다는 점이고 기준 토크 값이 설정된 이후부터 두 모드는 동일한 절차로 제어를 진행함.



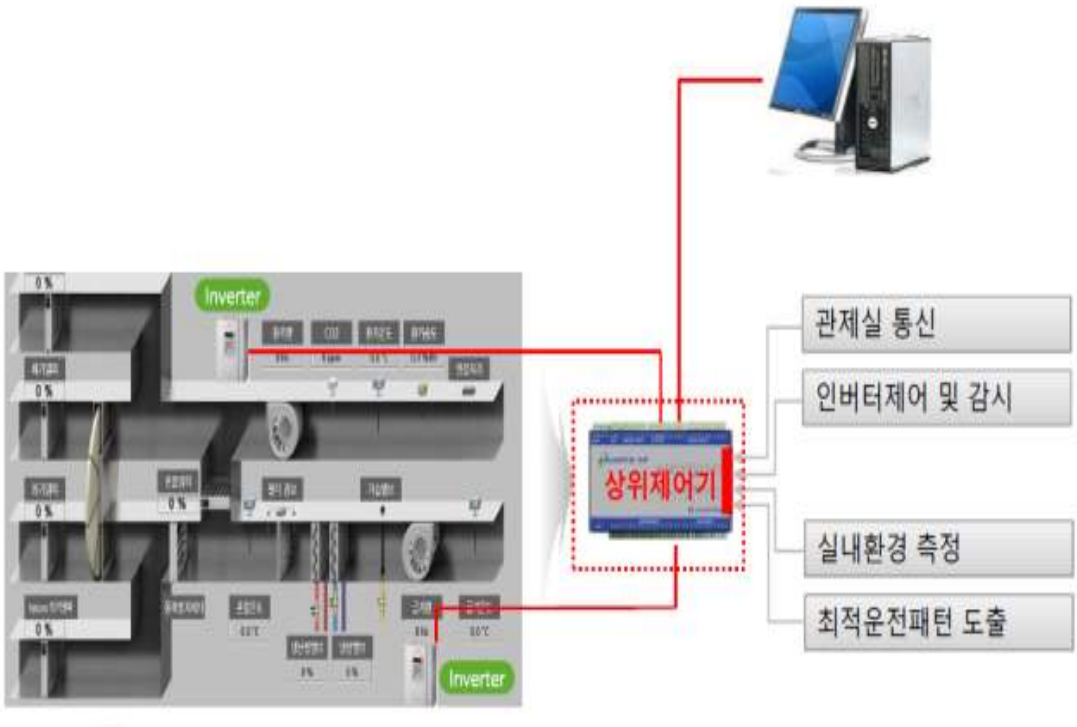
<그림 3-4-78> SynRM 드라이브를 위한 인버터의 제어 알고리즘 순서도

다. **최적운전패턴 구현을 위한 상위제어기 제작**

(1) 상위제어기 시스템 설계

(가) 기능

- 건물 내의 환경 및 현장 설비들과 연결하여 감시 및 제어하는 상위제어기는 중앙 감시반 또는 스마트폰 등에 각종 운전 정보를 제공함. 산업용 마이크로프로세서가 내장된 지능형제어장치로서 CPU, 메모리, 통신장치, 입출력 부 일체형으로 되어 있으며 관리 서버에 데이터를 제공함.
- 도출된 최적의 운전패턴에 따라 개량형 SynRM을 가동하기 위해서는 운전패턴 도출 알고리즘을 디지털화하여 분석된 값을 디지털신호로 변환 처리하는 과정이 필요함.
- 변환된 디지털신호를 인버터에 전송하고, 인버터의 작동상태를 관리서버에 전송할 수 있는 상위제어기가 필요함.



<그림 3-4-79> 상위제어기 구성도

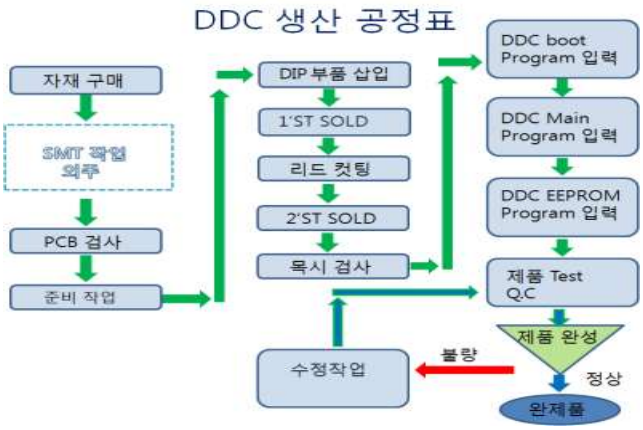
(나) 제어프로그램

a) 제어기능

1) PASSWORD
2) ON/OFF제어
3) PWM 제어
4) PID LOOP 제어
5) 펄스적산
6) 이벤트/연동 제어
7) 스케줄제어
8) 최적 기동/정지 제어
9) 엔탈피제어
10) 웹브라우저
11) 서버/클라이언트 제어
12) Modbus, BACnet 프로토콜지원
13) Modbus MASTER/SLAVE 브리지

b) 스탠드어론(STAND_ALONE) 운전: 중앙감시반 및 다른 장비의 지원 없이 독립적으로 에너지 절감 및 스케줄제어 프로그램 수행 하고 노트북으로 현장에서 직접 프로그램 설정을 변경 및 운전 조작 표시함.

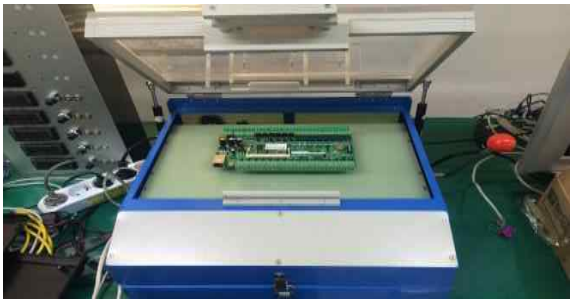
(2) 상위제어기 제작



<그림 3-4-80> DDC 생산 공정표



<그림 3-4-81> 상위제어기 조립사진



<그림 3-4-82> 상위제어기 TEST 사진



<그림 3-4-83> 상위제어기 판넬 제작사진-2

(3) 상위제어기 성능

a) 전원사양검사

1) 입력전원 DC 24V/AC 24V

2) 소비전력은 DC, AC 전원 입력시 17VA 이내

b) 관제점

1) 유니버설 아날로그 입력 : 8 포인트(아날로그적산:8) Pt 1000Ω, 0~20mA, 4~20mA, 0~5V, 0~10V, 0~30KΩ

2) 유니버설 아날로그 출력 : 4 포인트 0~20mA, 4~20mA, 0~5V, 0~10V

3) 디지털 입력 : 8 포인트 (펄스적산입력:4, DI 1~DI 4)
4) 디지털 출력 : 8 포인트 출력 확인
5) PWM 출력 : 2 포인트 출력 확인

c) 통신 PORT제공
1) Ethernet 10 Base T : 1 Port 동작확인
2) RS-485 : 1 Port 동작확인

d) 프로토콜
1) Modbus/IP 프로토콜로 DDC와 정상 통신 및 데이터 교환
2) BACnet/IP 프로토콜로 DDC와 정상 통신 및 데이터 교환

e) STAND ALONE 기능
1) 중앙감시 시스템과 통신두절에도 독립적으로 동작 할 것
2) DDC에 터치패드를 연결, 현장에서 감시제어 가능 할 것
3) 제어 설정값을 변경 할 수 있을 것
4) PC 프로그램으로 제어 설정값 10회 변경 후 확인 가능한가?

f) 데이터 보존 기능
1) 현재 운영 중인 제어 프로그램이나 제어함수 등의 파라미터를 상위제어기의 MEMORY에 저장하여 정전 발생 시에도 보존 할 것. 10회 전원 ON/OFF 10초 간격으로 하여 상위제어기의 MEMORY 확인

g) 비밀번호기능
1) 비밀번호를 입력하여 현장의 보안을 유지 할 것. 10회 전원 ON/OFF 10초 간격으로 하여 상위제어기의 비밀번호 확인

h) 아날로그 입력
1) 0 ~20mA AI 입력기능
2) 4~20mA AI 입력기능
3) 0~5V DC AI 입력기능
4) 0~10V DC AI 입력기능

i) 저항입력
1) 0~30K ohm AI 입력기능
2) Pt 1000 ohm AI 입력기능

j) 펄스적산 기능
1) AI 입력 단자에 전압 5V DC 을 30분 입력하여 적산값이 DDC 내부에 저장되는지 확인

k) 아날로그 적산 기능
1) DI 입력 단자에 펄스값 60Hz 을 30분 입력 하여 적산값이 DDC 내부에 저장되는지 확인 - 1800 펄스입력 시 표시(±1%) 1782~1818 펄스 이내일 것

l) 서브클라이언트(PC가 없는 상태)
1) 중앙제어기1, 중앙제어기2만 연결된 상태에서 중앙제어기1에 입력된 DI값이 중앙제어기2에 전달하여 중앙제어기가 제어되는지 확인
2) 중앙제어기2에서 입력 전압 0-10V 값이 상위제어기1에 전류 4~20mA로 출력으로 되는지 확인 ±5% 이내일 것

(4) 상위제어기 성능시험

(가) 상위제어기 기능시험

<표 3-4-51> 상위제어기 기능 시험_1

시험항목		시험기준	시험방법
통신 PORT제공		1. Ethernet 10 Base T : 1 Port 동작확인	시험 기준에 만족 여부 확인
		2. RS-485 : 1 Port 동작확인	
프로토콜	Modbus/IP	- Modbus/IP 프로토콜로 DDC와 정상 통신 및 데이터 교환	
	BACnet/IP	- BACnet/IP 프로토콜로 DDC와 정상 통신 및 데이터 교환	
STANDALONE 기능		1. 중앙감시 시스템과 통신두절에도 독립적으로 동작 할 것	
		2. DDC에 터치패드를 연결, 현장에서 감시제어 가능 할 것	
		3. 제어 설정값을 변경 할 수 있을 것. PC 프로그램으로 제어 설정값 10회 변경 후 확인 가능한가?	
데이터 보존 기능		- 현재 운영 중인 제어 프로그램이나 제어함수 등의 파라미터를 DDC의 MEMORY에 저장하여 정전 발생시에도 보존 할 것. - 10회 전원 ON/OFF 10초 간격으로 하여 DDC의MEMORY 확인.	
비밀번호기능		- 비밀번호를 입력하여 현장의 보안을 유지 할 것. - 10회 전원 ON/OFF 10초 간격으로 하여 DDC의 비밀번호 확인.	
Pt1000ohm AI 입력기능		- 842ohm 입력시 표시 0℃(err ±2%) -2℃~2℃ 이내 - 1385ohm입력시 표시 100℃(err ±2%)98℃~102℃ 이내	
0~20 mA AI 입력기능		- 0mA 입력시 표시 0% (err ±2%) -2%~+2% 이내 - 20mA 입력시 표시 100%(err ±2%)98%~102%이내	
4~20 mA AI 입력기능		- 4mA 입력시 표시 0% (err ±2%) -2%~+2%이내 - 20mA 입력시 표시 100%(err ±2%)98%~102%이내	
0~5 V DC AI 입력기능		- 0V 입력시 표시 0% (err ±2%) -2%~+2%이내 - 5V 입력시 표시 100%(err ±2%)98%~102%이내	
0~10 V DC AI 입력기능		- 0V 입력시 표시 0% (err ±2%) -2%~+2%이내 - 10V 입력시 표시 100%(err ±2%)98%~102%이내	
0~30K ohm AI 입력기능		- 0 Ohm 입력시 표시 0% (err ±2%) -2%~+2%이내 - 30k Ohm 입력시 표시 100%(err ±2%)98%~102%이내	
펄스적산 기능		- DI 입력 단자에 펄스값 15Hz 을 1분 입력 하여 적산값이 DDC 내부에 저장되는지 확인 900펄스입력시 표시(±1%) 891~909 펄스 이내 일 것.	
타임스케줄제어(PC가 없는 상태)		- DDC DO 출력을 스케줄을 3분간 ON / 7분 OFF 설정 후 스케줄에 따라 DDC가 자동으로 ON /OFF 되는지 확인 시간이 오차 10초 이내 일 것.	
P2P 제어		1. DDC1,DDC2만 연결된 상태에서 DDC1에 입력된 DI 값이 DDC2에 전달하여 DDC2가 제어되는지 확인. 2. DDC2에서 입력 전압 0-10V 값이 DDC1에 전류 4~20mA 로 출력으로 되는지 확인 ±5% 이내 일 것.	

<표 3-4-52> 상위제어기 기능 시험_2

시험항목		시험기준		시험방법
전원 시험		1. 입력전원 DC 24V / AC 24 V		시험 기준에 만족 여부 확인
		2. 소비전력은 DC, AC 전원 입력시 17 VA 이내		
무선단말기 시험	감시	WiFi 접속 시험	- 무선WiFi를 이용하여 장비에 접속하여 Web 브라우저가 동작되는지 확인 한다.	
		인터넷 접속시험	- 와이브로 에그를 이용하여 장비에 접속하여 Web 브라우저가 동작되는지 확인 한다.	
	제어	WiFi 접속 시험	- 장비의 기동/정지 상태 값을 확인.	
		인터넷 접속시험	- 장비의 기동/정지 상태 값을 확인.	
	안전	WiFi 접속 시험	- 사용자 제한이 있는지 확인 한다.	
		인터넷 접속시험	- 사용자 제한이 있는지 확인 한다.	
관 제 점		1. 유니버설 아날로그 입력 : 8 포인트(아날로그적산:8) Pt1000 옴, 0~20mA, 4~20mA, 0~5V, 0~10V, 0~30K옴		
		2. 유니버설 아날로그 출력 : 6 포인트 0~20mA, 4~20mA, 0~5V, 0~10V		
		3. 디지털 입력 : 8 포인트 (펄스적산입력:4, DI 1~DI 4)		
		4. 디지털 출력 : 8 포인트 출력 확인		

(나) 상위제어기 프로토콜(Modbus/IP) 시험

<표 3-4-53> 상위제어기 프로토콜(Modbus/IP) 시험

시 험 방 법	적합판정
1) Modbus/IP Test 오픈 소스 프로그램인 QMODMASTER 을 이용하여 직접 디지털제어 장치를 접속 하고 통신 접속 여부를 확인 한다. (WEB PAGE : http://sourceforge.net/projects/qmodmaster/ ?source=directory) 2) 송신 및 수신 DATA 가 정상으로 처리 되는 지를 확인 한다. 3) 국내에서 제작 공급하는 Modbus/IP 프로토콜을 가지고 있는 제 3업체 HMI 와 연결하여 이상 없이 동작 되는 가를 확인한다.	좌측 시험의 정상동작 확인 및 평가

(다) 상위제어기 프로토콜(BACnet/IP) 시험

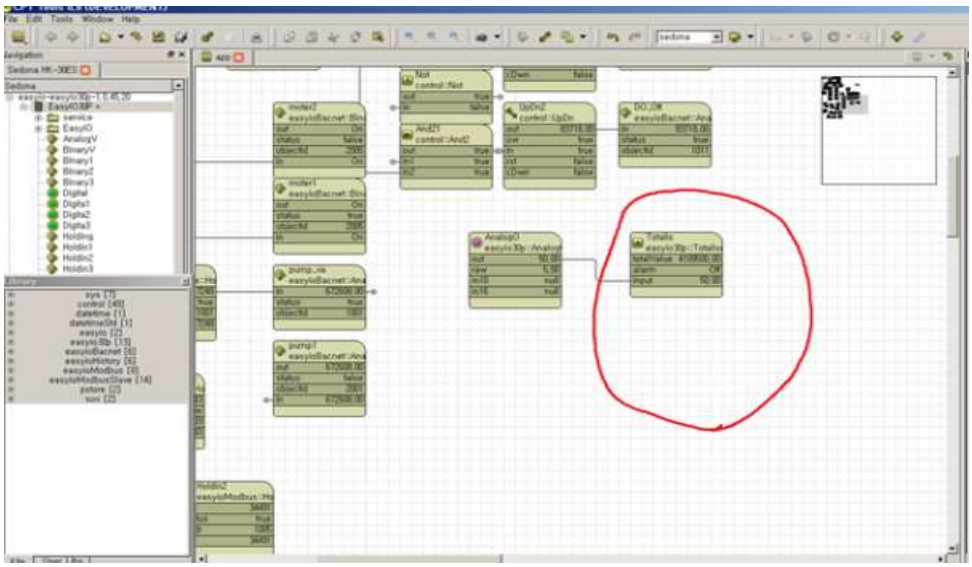
<표 3-4-54> 상위제어기 프로토콜(BACnet/IP) 시험

시 험 방 법	적합판정
1) KSF ISO-16484-5 BACnet IP 프로토콜에 대해 국내 시험에 대하여 미국 BACnet 협회에서 제시한 BTL의 BACnet 시험 프로그램 VTS(Visual Test Shell) 프로그램으로 직접디지털제어기 와 접속 동작여부 확인. (WEB PAGE; http://www.bacnetinternational.org/ associations/8066/btl/?page=38) 2) MAC 어드레스 접속 설정이 이상 없이 이루어지는 가를 확인 . 3) 국내에서 제작 공급하는 BACnet/IP 프로토콜을 가지고 있는 제 3 업체 HMI 와 연결하여 이상 없이 동작 여부 확인. (2개 업체 이상)	좌측 시험의 정상동작 확인 및 평가

(5) 상위제어기 프로그래밍

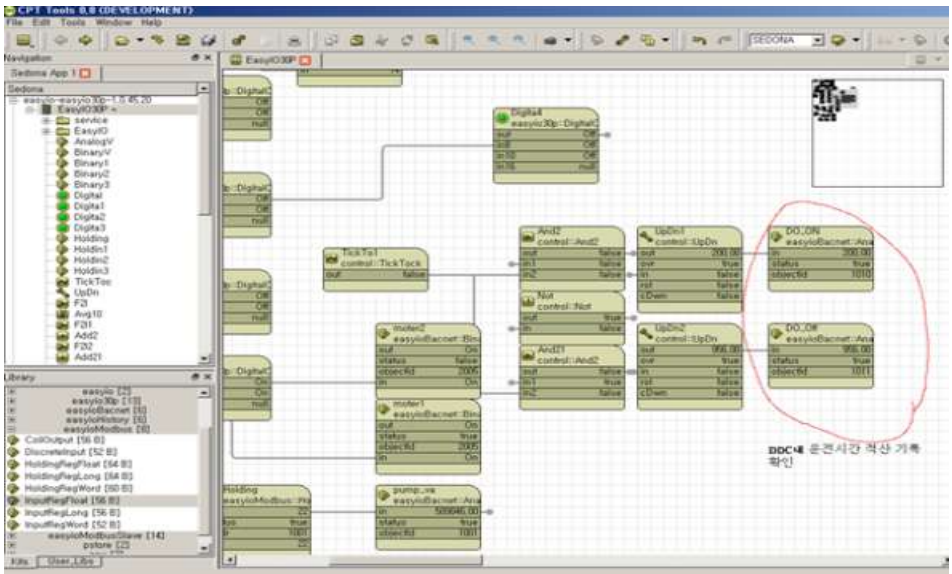
- 최적의 운전패턴에 따라 개량형 SynRM을 가동하기 위해서는 운전패턴도출 알고리즘을 디지털화하여 분석된 값을 디지털신호로 변환 처리하는 프로그램을 입력하고 또한 변환된 디지털신호를 인버터에 전송하고, 인버터의 작동상태를 관리서버에 전송할 수 있도록 프로그램 및 그래픽을 구성함.
- 상위제어기에서 에어퀄리티센서 데이터를 확인 및 분석 가능하도록 디지털신호로 변환처리 할 수 있도록 프로그램 함.

(가) 아날로그(에어퀄리티 입력값) 분석



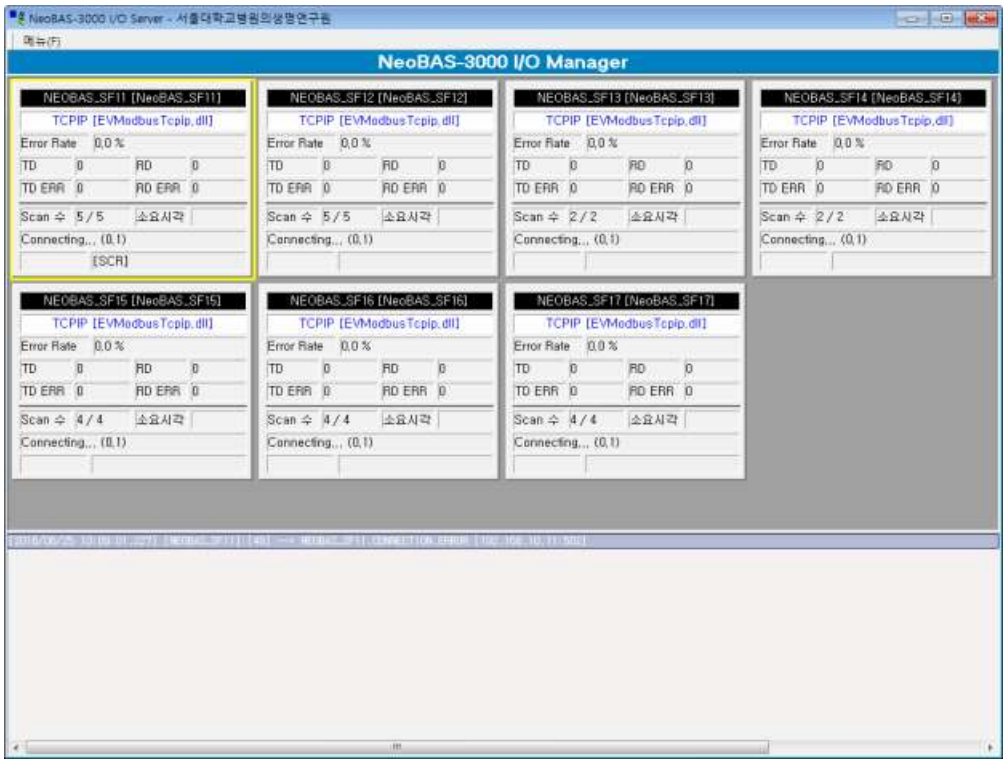
<그림 3-4-84> 상위제어기 프로그램 작성사진-1

(나) 디지털(SynRM인버터) 분석



<그림 3-4-85> 상위제어기 관리서버 인터페이스 화면

(다) 상위제어기와 관리서버 인터페이스



<그림 3-4-86> 상위제어기 프로그램 작성사진-2

(라) 상위제어기와 관리서버 인터페이스 테스트 항목

<표 3-4-55> 상위제어기와 관리서버 인터페이스 테스트 항목

시험구분	시험기준	시험방법
1. 운전시간 적산 기록	운전시간 적산값 표시내용을 확인한다. (분)	시험기준 에 만족하는 지 확인 한다.
	적산 데이터 의 모니터 화면 표시 확인한다. (분)	
2. 전력량 적산 기록	전력량 적산값 표시내용을 확인한다. (kWh)	
	적산 데이터 의 모니터 화면 표시 확인한다.(kWh)	
3. 설비 인버터와 통신 전력 트렌드 기록	설비 순시전력을 적산량 표시한다. (kW, kWh)	
	인버터 주파수 측정 전력 절감율 표시한다. (Hz, %)	
	전력, 전력량, 주파수, 절감율을 모니터 화면 표시한다. (kW, kWh, Hz, %)	
4. 미터링 값 트렌드 업로드	메타 적산DATA(가스메타 량)값을 모니터 화면에 트렌드 그래프로 표시한다.	
5. 관리서버 화면당 실시간 트렌드 그래프 수	모니터 화면당 트렌드 그래프수가 8개 이상인지 확인 (그래프)	
6. 관리서버 에너지 표시 단위 변환 수	전력량: kWh/탄소 tCO2/원 GAS: LPM/ 탄소 tCO2/원 시수: LPM/ 원	
7. IP기반 웹서버 기능	구글크롬, MS 익스플로 9 이상에서 웹브라우저 동작되는지 확인한다.	

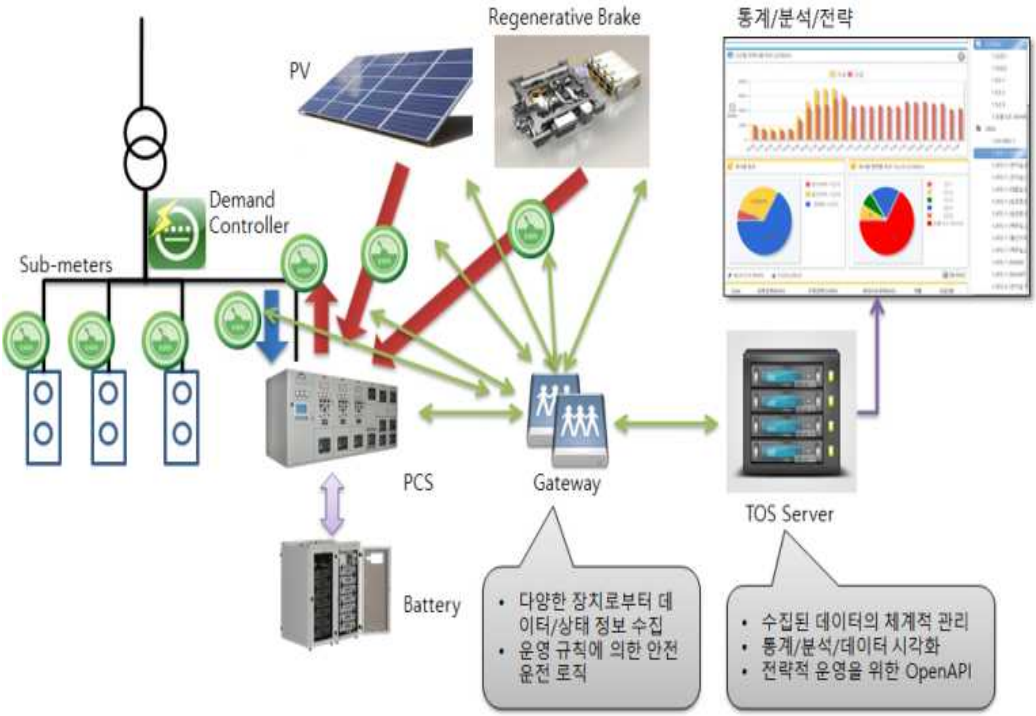
제5절. 도시철도 통합에너지 운영시스템

1. 시스템 개요

가. 시스템 개요 및 구성

(1) 시스템 개요

- 도시철도 에너지 생산(회생에너지, 신재생에너지 등) 및 활용을 효율적으로 운영하기 위해 회생컨버터, 태양광발전컨버터, PCS 및 기존 전력설비의 전력생산량 및 소비량을 모니터링하고 최적의 상황에서 전력저장장치의 충·방전을 자동으로 스케쥴링하여 에너지 소비를 최적화하고 관리하기 위한 시스템임.



<그림 3-5-1> 통합에너지 운영시스템 개념

(2) 시스템 구성

- EIG(Energy Interface Gateway)
  - 디바이스 - IoT Unit - IoT Base - EMS - 어플리케이션 5계층 구조
  - IoT Unit(디바이스 직접 통신 기능) : Raspberry PI2 : 저전력 구조(소비전력이 3~5W, 기존 EIG 1/10 수준)
  - IoT Base(IoT Unit 데이터 취합 기능)
- 통합 에너지 운영 소프트웨어
  - 통상적인 서버 하드웨어를 이중화 구성, 데이터베이스는 Postgresql 사용
  - Obix기반 에너지 설비 모델링, 국제 표준 Sunspec 인증, OpenADR 획득(수요반응 국제 표준 프로토콜)
  - 원격 통합 모니터링 및 제어 기능

- 전력저장장치 최적 스케줄링 모듈
  - 기본요금 산정 특성 및 수명비용을 고려한 복합에너지 시스템의 에너지저장장치 최적 스케줄링 알고리즘 기능
  - 연/월간 데이터 기반 15분 단위별 전력저장장치 충방전 스케줄링 기능
  - 통합 에너지 운영시스템 연동(모듈화)

나. 시스템 기능 및 성능

(1) 기능

- 개별 전력설비별 전력사용량 모니터링 및 제어 가능(국제 표준 EMS)
- 전력저장장치 최적 충방전 스케줄링 기능
- 전력저장장치 역송전을 제한하는 PCC 기능

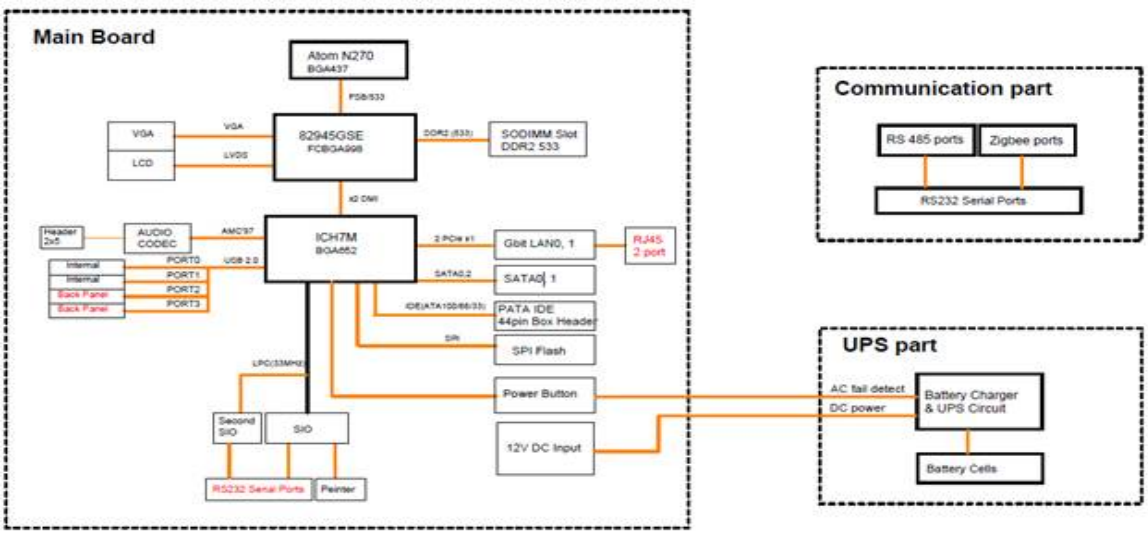
(2) 목표 성능

- 일일 피크전력 저감 : 150kWh/일 (기존 대비 5% 절감)

2. 도시철도 통합 에너지 운영시스템

가. EIG (Energy Interface Gateway) 개요

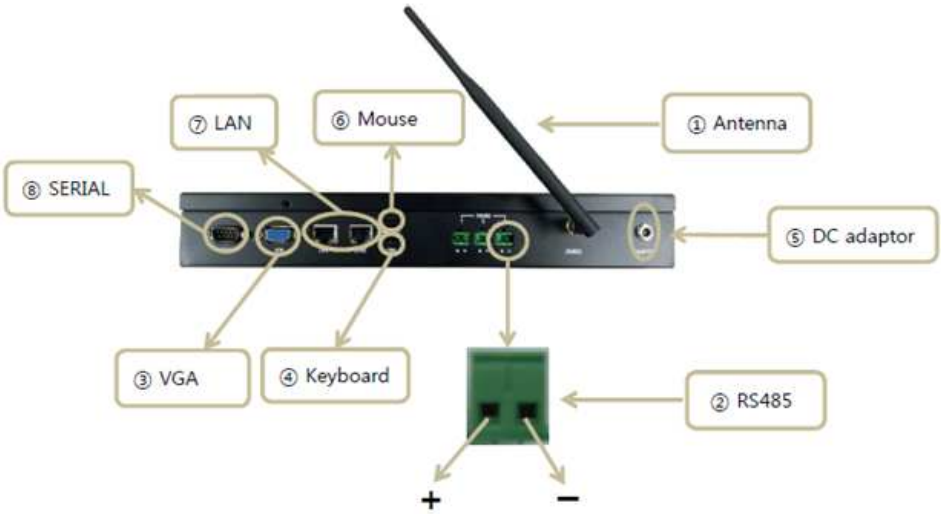
- Energy Interface Gateway(이하 EIG)는 대수용가 및 집단 수용가의 전력, 공조, 조명, 냉난방, 관제, 보안 등의 구성 시스템들과 직접 통신을 하여, 정보를 취합하고 지능적인 제어를 수행하기 위한 역할을 함.
- EIG는 기존 게이트웨이를 한계를 극복하고 안정성을 높이기 위해 전체 설계를 새로 한 것임. 부품 수급 문제를 해결하고, 산업용 수준의 안정적인 부품으로 시스템을 구성하며, 예기치 않은 정전시 데이터 소실을 막기 위해 작은 규모의 배터리를 운영하며, RS-485를 직결함으로서 통신 안정성을 높였음.
- 주요 사양은 Intel Atom N270 CPU, Intel 945GSE 칩셋, 2GB RAM, Gigabit Ethernet, SATA2 등임.
-



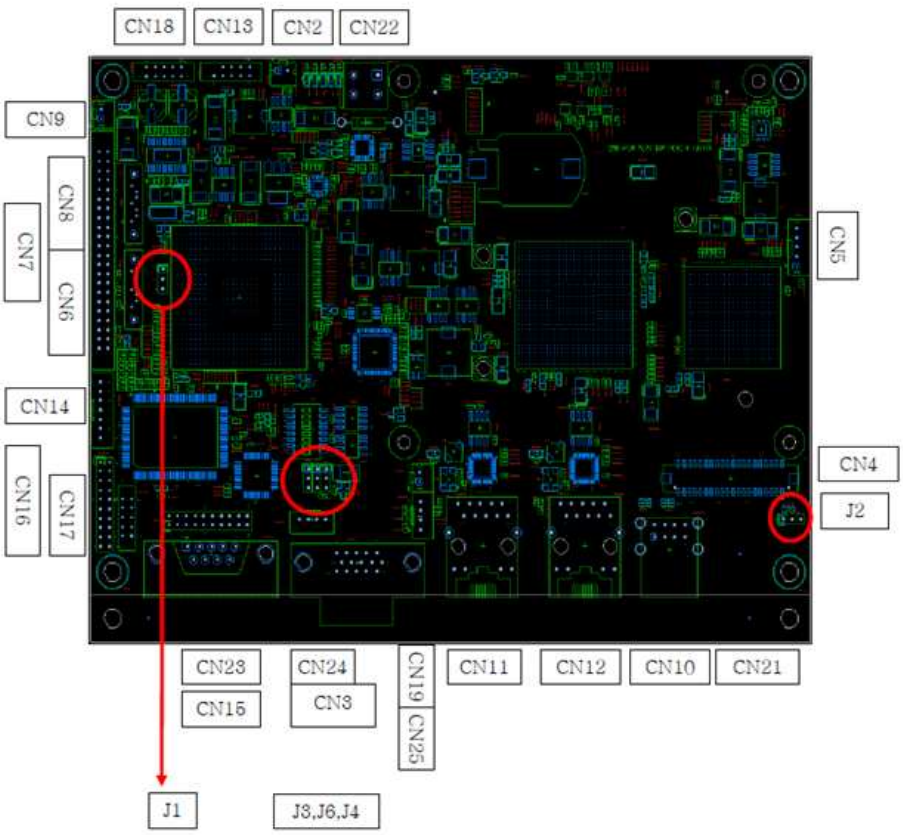
<그림 3-5-2> EIG 하드웨어 플랫폼의 구조

Energy Interface Gateway 설계

- EIG는 Ethernet, RS-232, RS-485, Zigbee 등의 입출력을 위한 단자와 안테나를 제공함.
- EIG 회로는 통상적인 Intel Atom 플랫폼에 전원 문제가 발생할 때, 하드디스크의 안정적인 셧다운 동안 전원을 자동으로 공급하는 배터리 모듈과 TTL레벨로 연결한 RS-485 3포트를 제공하는 모듈이 추가된 형태임.



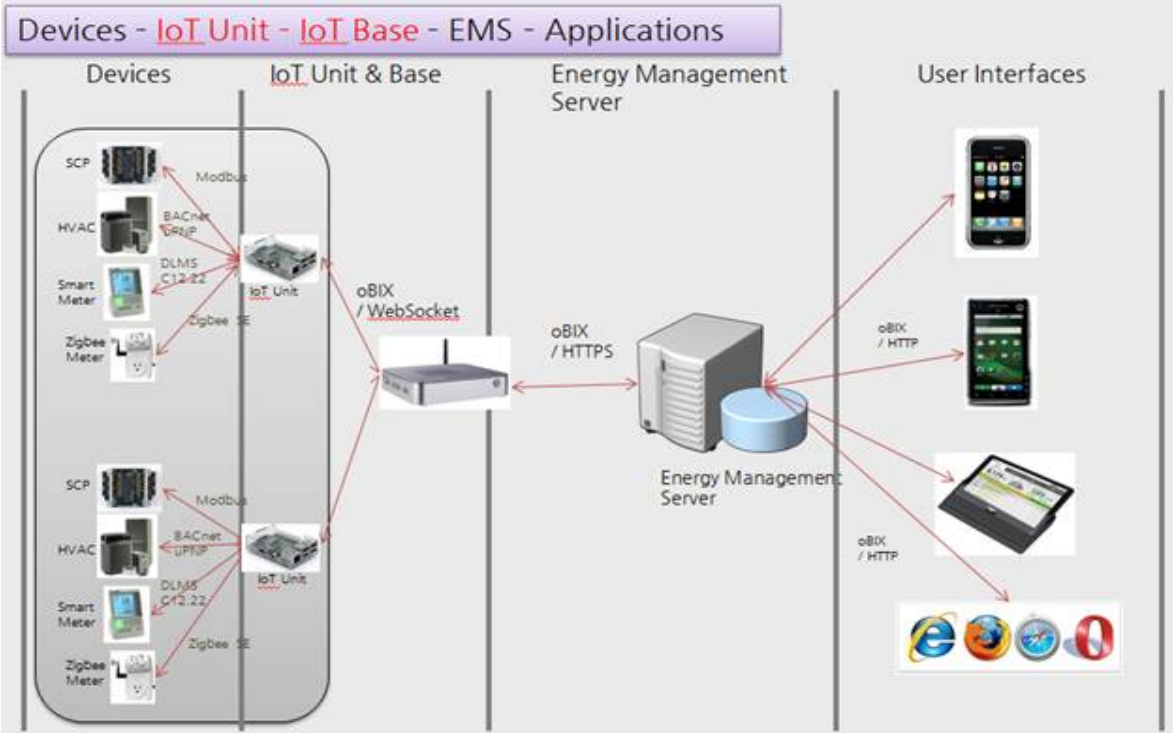
<그림 3-5-3> EIG 외형과 구성요소



<그림 3-5-4> EIG 회로도

나. **데이터 분산처리 구성**

- 기존 EMS의 정보처리 체계는 디바이스 - EIG - EMS - 어플리케이션으로 4계층 구조를 가지고 있음. 이중 EIG는 Atom기반의 저전력 PC인데, 가격이 비싸고 전력 소비도 에너지 절감을 위한 목적에 비해 적지 않은 편이고, 큰 사이트의 경우 EIG의 설치 개수가 많아야 하므로 비용과 에너지 소비의 문제가 있었음.
- EIG 기능은 크게 디바이스와의 통신, 데이터 처리, oBIX 통신 등으로 나눌 수 있는데 이 중에서 디바이스와의 통신 부분을 분리하여 분산처리 하고자 함. 분리된 모듈은 오픈소스 하드웨어인 Raspberry PI를 사용하며 이를 통해 에너지 소비가 최소화 되고, 비용을 절감할 수 있으며, EIG의 부하가 줄어들어 안정성과 데이터 처리능력 향상을 꾀할 수 있음.
- 기존 4계층 구조에서, 디바이스 - IoT Unit - IoT Base - EMS - 어플리케이션 5계층 구조로 바꿈.



<그림 3-5-5> TOS의 5계층 구조

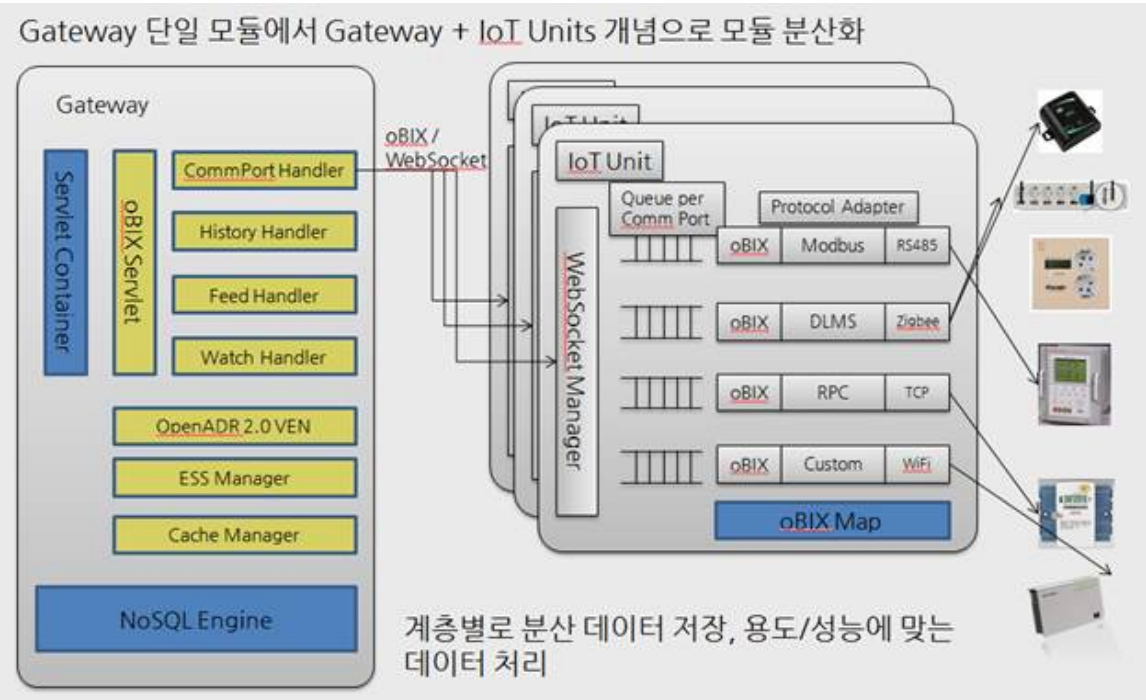
다. **데이터 분산처리 전략**

- 디바이스와 직접 통신하는 IoT Unit의 하드웨어는 Raspberry PI2를 사용함. CPU는 BCM2836 ARM Cortex A7 900MHz Quad-core이며, 1GB 메모리와 VideoCore GPU를 내장하고 있음. 소비전력이 3~5W로 EIG의 1/10 수준임.
- Raspberry PI는 RS-485를 직접 지원하지 않지만, 다양한 GPIO핀을 뽑아 놓아서 다양한 기능의 확장 보드를 붙일 수 있음. 아래와 같이 RS-485를 위한 확장보드를 끼울 수 있음.



<그림 3-5-6> Raspberry Pi

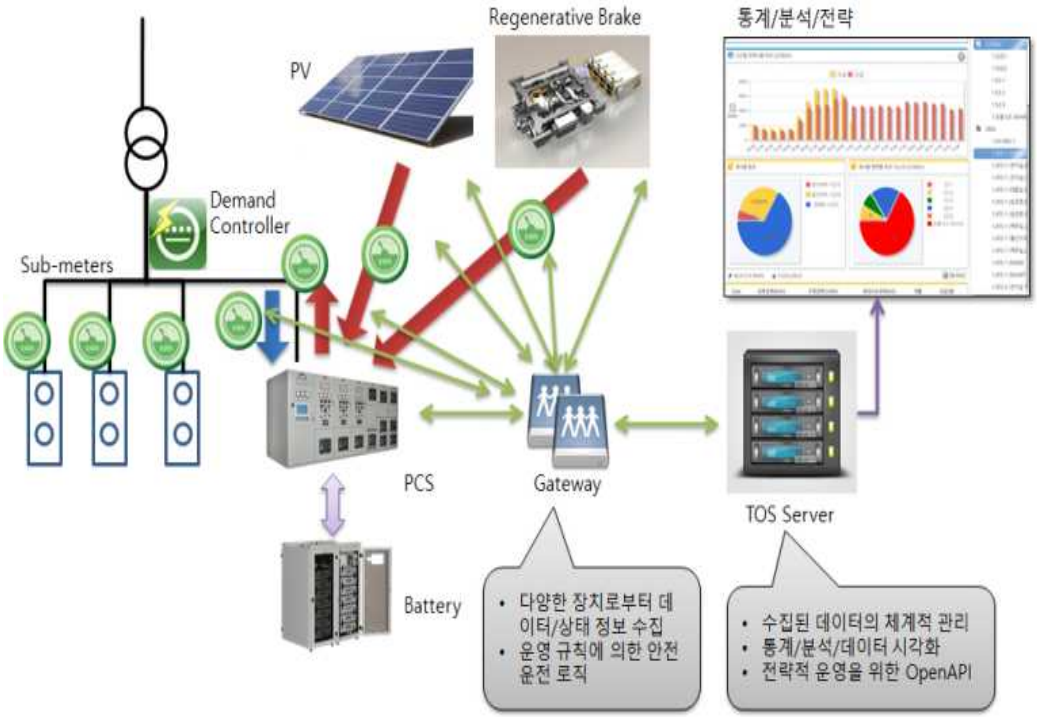
- 기존 EIG에서 동작하는 소프트웨어 모듈 중에서 프로토콜 어댑터를 IoT Unit으로 옮겨 배치함. 그러면서 자체 캐쉬와 자체 작은 데이터베이스를 구현하여 데이터를 IoT Unit과 IoT Base에 나누어 저장함. 이렇게 함으로써 효율과 데이터 안정성이 보장됨.



<그림 3-5-7> 분산처리 프레임워크

라. 확장성있고 표준화된 EIG와 통합에너지 운영시스템

- 철도 역사 내에 있는 다양한 에너지 설비(PCS, 배터리, 회생제동, 미터, 최적화 엔진, 태양광 발전 등)를 유기적으로 통합하고 그 설비들을 효율적이고 안전하게 운영하는 시스템임.



<그림 3-5-8> EIG와 통합에너지 운영시스템

- 각 설비들은 속성과 특성이 다르기 때문에 이들을 통합하기 위해서는 유연하고 표준화된 프레임워크가 필요하며, XML기반의 oBIX로 설비들을 일관성 있게 모델링하고, 현장에 배치된 EIG와 통합에너지 운영시스템의 역할을 구분함.

마. 기존 기술과 차별성

(1) 기존 기술의 문제점

- 기존에 현장에 배치되던 게이트웨이는 전용의 임베디드 시스템이거나 PLC 같은 고가이면서 유연성이 떨어지는 장비를 활용함. 전용 임베디드 시스템은 시스템 장기 운영시 부품 수급에 문제가 발생할 수 있고, 소프트웨어와 하드웨어를 분리하여 소프트웨어 부분의 독자적인 발전을 어렵게 하는 요소임. PLC 같은 고가 시스템은 다양한 설비에 대처하지 못하고, 유연한 알고리즘 탑재 능력이 부족하며, 시스템 통합 비용을 높이는 문제가 있음.
- 기존의 통합운영시스템은 설비 모델링이 데이터 구조에 반영되기 때문에, 설계 당시의 설비만을 처리할 수 있으며, 기존의 관계형 데이터베이스 시스템은 엄청난 규모로 쌓이는 데이터를 처리하는데 한계가 있음.

(2) 기술적 차별성

- 현장에 배치되는 EIG는 Rasberry Pi와 같은 오픈소스 하드웨어나 범용 amd64 계열의 미니 PC 하드웨어를 사용하며, EIG의 소프트웨어는 어떤 하드웨어에서도 동작할 수 있도록 가상머신 기반의 Java를 이용하여 개발됨. 그래서 소프트웨어와 하드웨어가 분리되어 소프트웨어만의 자유로운 개선이 가능하며, 장기 운영 시 발생하는 하드웨어의 유지보수도 문제없음.

- 역사용 통합에너지 운영시스템은 확장성이 뛰어난 XML 기반의 oBIX 프레임워크를 사용함. oBIX로 설비를 모델링함으로써 유연성과 통일성을 확보할 수 있어, 데이터 처리에 일관성을 지킬 수 있어 로직 구현에 집중할 수 있으며, oBIX 데이터 모델은 스크립트 엔진과 연계되어 설비들의 유기적인 제어를 보다 정확하고 쉽게 수행할 수 있는 기반이 됨. 통합 운영시스템의 데이터베이스는 oBIX의 JSON 변환을 사용하여 JSONP 구조를 사용하였으며, 이렇게 함으로써 비정형 데이터의 대량 처리를 원활하게 할 수 있음.

<표 3-5-1> EIG과 PLC기반 컨트롤러 비교 표

항목	Energy Interface Gateway	PLC기반 컨트롤러
안정성	좋음 (소프트웨어 구현에 달렸음)	매우 좋음
확장성	매우 좋음, 분산처리 가능	나쁨, 장비 교체
유연성	매우 좋음, 다양한 언어/환경/확장 보드	보통, 제한된 언어/환경
유지보수	매우 좋음, 범용 하드웨어/소프트웨어 기술 사용	좋음, 벤더 지원
가격	보통	비쌈
성능	매우 좋음, 최신 하드웨어	보통

바. **통합에너지 운영시스템 프레임워크와 데이터베이스 기술사향**

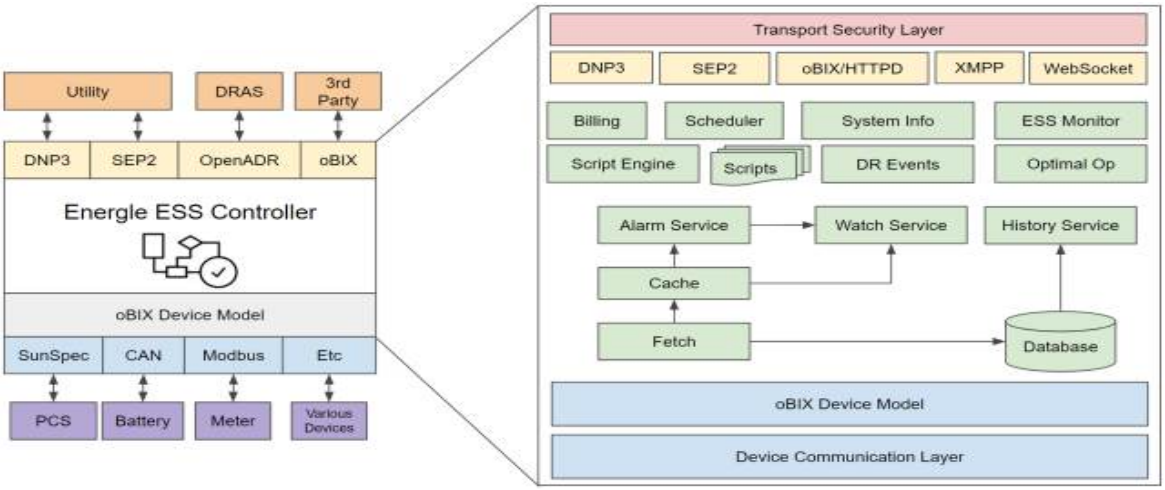
- IoT 유닛 : Raspberry Pi에 IoT 유닛에 Protoss 모듈을 탑재한 장치임. Modbus, DLMS, CAN, RS-485, SunSpec, REST, USBHID 등의 프로토콜을 구현하여 다양한 설비와 연계 가능.
- EIG : Atom 기반 산업용 PC에 SGObix 모듈을 탑재한 장치임. HTTP 표준 웹서버를 탑재하고, oBIX 데이터 처리 모듈을 갖추고 있으며, PCS, 배터리, 회생제동, 태양광, 미터 등의 설비를 안전하고 조화롭게 제어하는 로직을 탑재하고 있음. OpenADR과 SEP2 등의 국제 표준에 맞는 출력 인터페이스도 갖추고 있음.
- 통합에너지 운영시스템 : 통상적인 서버 하드웨어를 이중화 구성하며, 데이터베이스는 Postgresql을 사용하며, 주요 데이터 저장구조는 비정형 데이터를 효율적으로 저장하고 관리하는 JSONP를 사용함. 복수개의 EIG와 연동하여 정보를 수집하여 저장하고, 전체적인 제어로직에 따라 ESS 운영정책을 실행함.

3. 설계 및 제작

가. 단위 구성품 단위 설계, 제작, 성능평가

- IoT 유닛과 EIG는 아래와 같이 설계되었으며, IoT 유닛은 SunSpec, CAN, Modbus 등의 프로토콜 스택을 구현하고, 이를 oBIX 모델링된 형태로 EIG에 전달함.

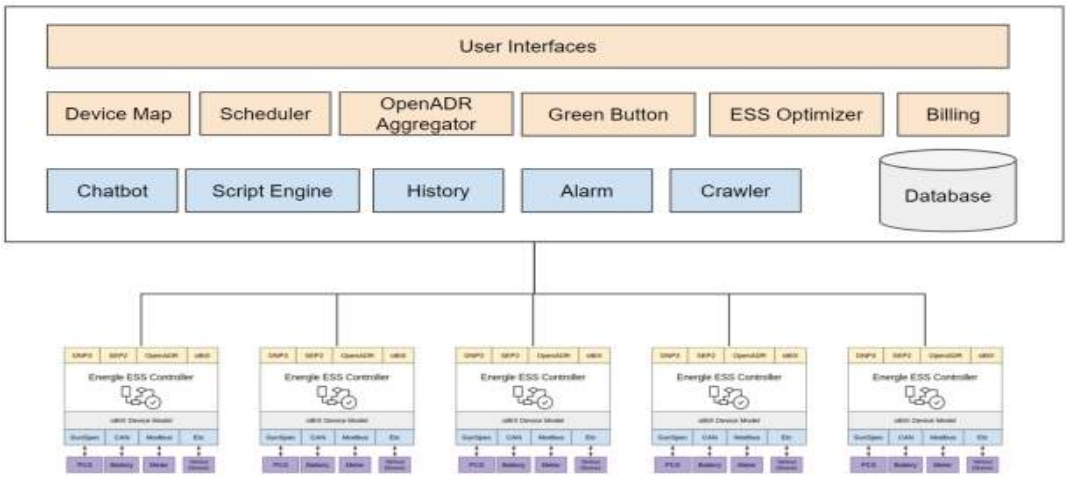
- EIG의 데이터베이스는 제한된 EIG 하드웨어에 맞추어 H2 데이터베이스를 사용하였으며, 저장 항목의 수를 조절하여 성능저하에 대비하였으며, 영구 저장용 데이터는 통합운영시스템에 전달하여 저장함.
- EIG는 단독으로도 운전할 수 있도록 스케줄러, 히스토리, 알람, 스크립팅 엔진, ESS 모니터링 엔진 등을 탑재하고 있으며, 통합운영 시스템이 없거나 일시적으로 통신이 단절되더라도 자체적으로 안전하게 설비들을 운전할 수 있음.



<그림 3-5-9> IoT유닛, EIG 설계

나. **시스템 단위 설계, 제작, 성능평가**

- 통합에너지 운영시스템은 복수개의 EIG를 관리하면서 정보를 수집하고, 수집된 정보를 관리하며, 전체 EIG를 조화롭게 운영하는 역할을 함.
- 통합에너지 운영시스템은 사이트를 대표하는 개체로서 OpenADR의 집합 대표자의 역할을 하기 위해 OpenADR VTN/VEN을 구성하고, 유틸리티로부터 계량 데이터를 수집하는 그린버튼, 기타 지원을 위한 챗봇 엔진, 스케줄러, 스크립팅 엔진 등으로 구축되며, 또한 전체적인 유저 인터페이스를 Web 기반으로 제공함.



<그림 3-5-10> 시스템 단위 설계

다. SunSpec 등 국제 표준 인증 취득

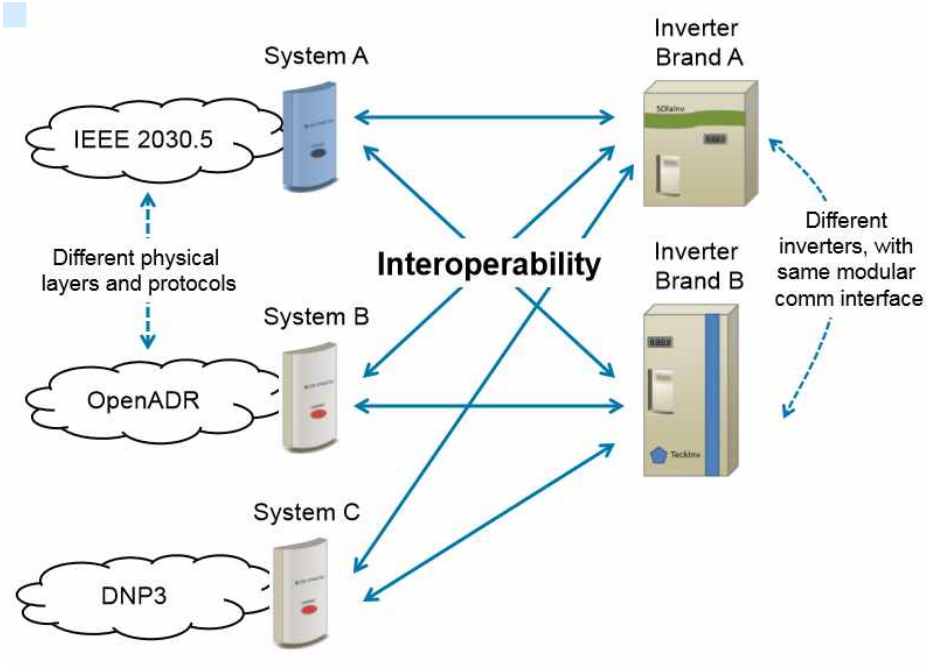
- EIG를 해외시장에도 활용하기 위해 필요한 국제표준을 구현하고 인증을 받음. SunSpec은 PCS와 배터리의 표준 인터페이스로 기존 설비 고유의 프로토콜을 EIG에서 표준으로 변환하여 범용 EMS와 연동할 수 있게 했음. OpenADR은 수요반응에 대한 국제표준 프로토콜로 EIG는 OpenADR 2.0b를 취득함으로써 해외시장에서 수용반응 시장에 바로 참여할 수 있는 기능을 갖춤.



<그림 3-5-11> EIG가 취득한 국제표준 인증

- SunSpec은 태양광 패널과 인버터를 위한 표준이고, MESA(Modular Energy Storage Architecture)는 ESS를 위한 표준임. 그런데 MESA는 데이터모델만 정의하고, 실제 인코딩은 SunSpec의 것을 사용하고 있음. 그리고 인증도 SunSpec에서 통합해서 하고 있음. MESA에서 제안한 Energy Storage의 데이터모델은 SunSpec의 체계에 통합 되어가고 있기 때문에, SunSpec을 구현하는 것이 적절함.
- SunSpec은 분산전원에서 필수적인 인버터와 부속 설비(계량기, 태양광 패널, 디스플레이, 배터리)들에 대해 표준 인터페이스를 정의함. 다양한 벤더들이 다양한 제품들을 쏟아내고 있어 통합 관리에 큰 비용이 소모되고 있기에 상호운용성이 큰 이슈임.
- SunSpec은 CA Rule21과 같이 Smart Inverter에 대한 규약을 검증하고 표준화하고 있으며, Sandia 국립연구소와 함께 통신에 관한 인증 뿐 아니라 Inverter 동작에 대한 인증까지 자동화함. 따라서 향후 미국 등 해외 진출을 위해서는 SunSpec 인증이 필수적인 요건이 될 것임.

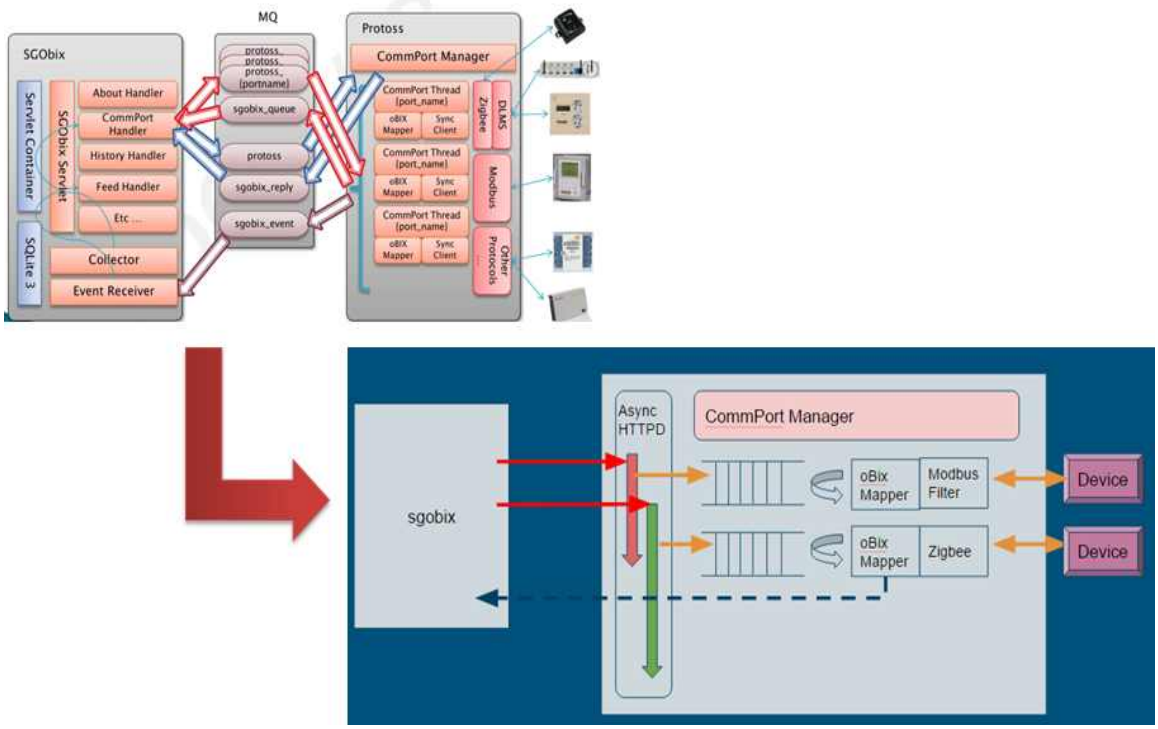
- SunSpec 구현체는 PCS/배터리를 연동하는 게이트웨이 SW 앞단에 서서 SunSpec 모델을 구현한 것임. 그래서 SunSpec Enabler라고 이름 붙임. SunSpec을 지원하지 않는 기존의 PCS/배터리를 SunSpec 지원 디바이스로 바꿔주는 역할을 함.
- MESA에서 정의한 Energy Storage로서 필수로 지정된 SunSpec 모델들을 모두 구현하였음. 기능 테스트는 모두 완료하였고, SunSpec 인증을 획득.



<그림 3-5-12> SunSpec 상호운용성 표현

라. EIG 통신 프레임워크 개선

- 게이트웨이의 SW모듈은 크게 두 개로 나뉘는데 protoss는 실제 디바이스 프로토콜을 구현한 코드로 디바이스와 통신을 담당함. sgobix는 데이터 저장과 관리, 상위 시스템으로의 OpenAPI를 제공함. 기존에는 이 두 모듈이 반드시 한 장비 안에 있어야 했으나, 본 연구를 통해 이를 분리하였음.
- protoss는 Raspberry Pi와 같은 저전력 저성능 저렴한 디바이스에 탑재하여 디바이스의 근처에 붙이도록 함. sgobix는 보다 성능이 좋고 안정적인 장비에 운영하여 데이터 저장의 보관 주기와 보다 높은 인터페이스 트래픽을 감당할 수 있도록 함.
- sgobix 한 모듈에 여러 개의 Protoss가 할당될 수 있도록 하였음. 전체적으로 장치의 개수는 늘어나지만 구축 비용은 줄어들고, 전체적인 전력 소모도 줄어들며, 반면 전체적인 성능은 개선되었음.
- 이러한 구상을 구현하기 위해 기존에 Message Queue를 별도로 두던 방식에서, Message Queue를 protoss로 내장하는 방식으로 변경하였음. 이렇게 함으로써 통신 성능이 향상되고, 통신 오류가 줄어드는 효과가 있었음. 또한 HTTP 기반의 단순한 프로토콜을 채용함으로써 protoss 독립적으로 활용될 여지를 만들었음. HTTP 서버 모듈은 비동기통신 방식을 사용함으로서 성능을 극대화하고 동시성을 높였음.

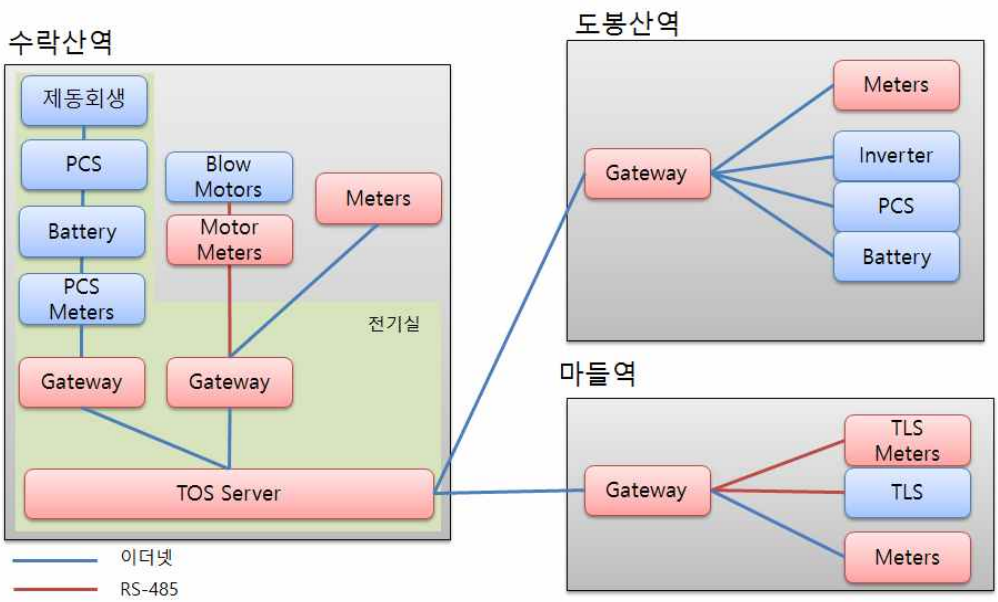


<그림 3-5-13> 통신 프레임워크 개선

4. 현장구축

가. 테스트베드 구축

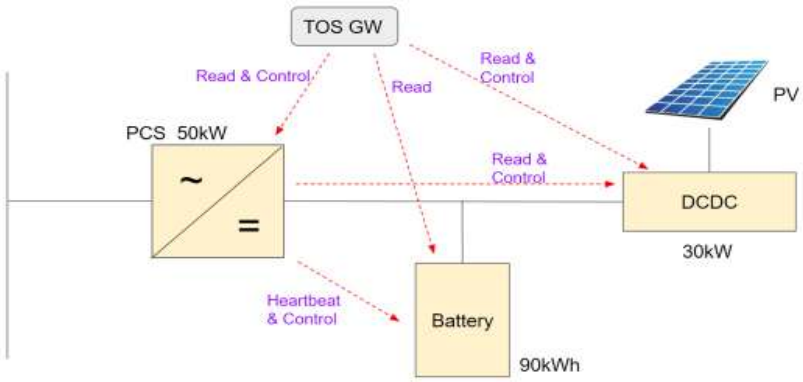
- 모든 설비들의 현장 설치를 마무리 지었고, TOS와의 연동테스트를 다시 점검하고 필요한 내용을 보강하고 튜닝하였음. 전체적인 장비들은 연동 구성도는 다음과 같음.



<그림 3-5-14> 테스트베드 구축 계획

나. **도봉산 역사 시스템 구축**

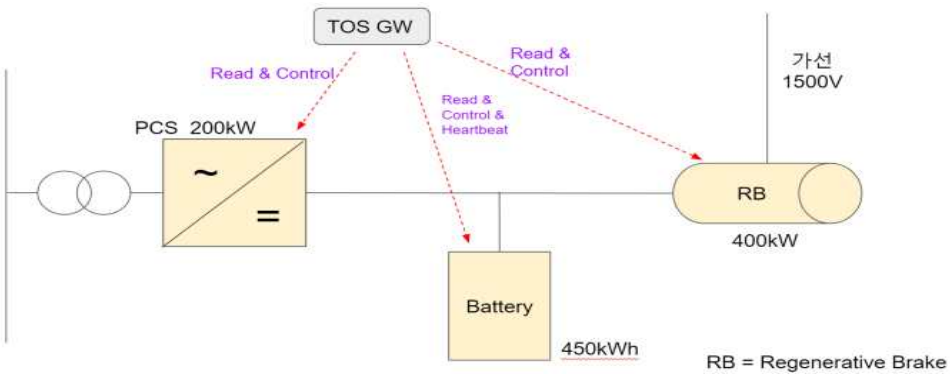
- 도봉산 역사는 PCS, 배터리, 태양광패널, DC/DC 컨버터, EIG 등을 설치하여 운영 중이며, 태양광은 DC/DC 컨버터를 통해 적정 DC 전압으로 변환된 다음 DC 버스에 연결(DC 커플링)되어 있음. EIG는 이 전체 설비들의 상태를 조회하고 통합적으로 제어하는 역할을 수행함.



<그림 3-5-15> 지상역사 테스트베드 구축

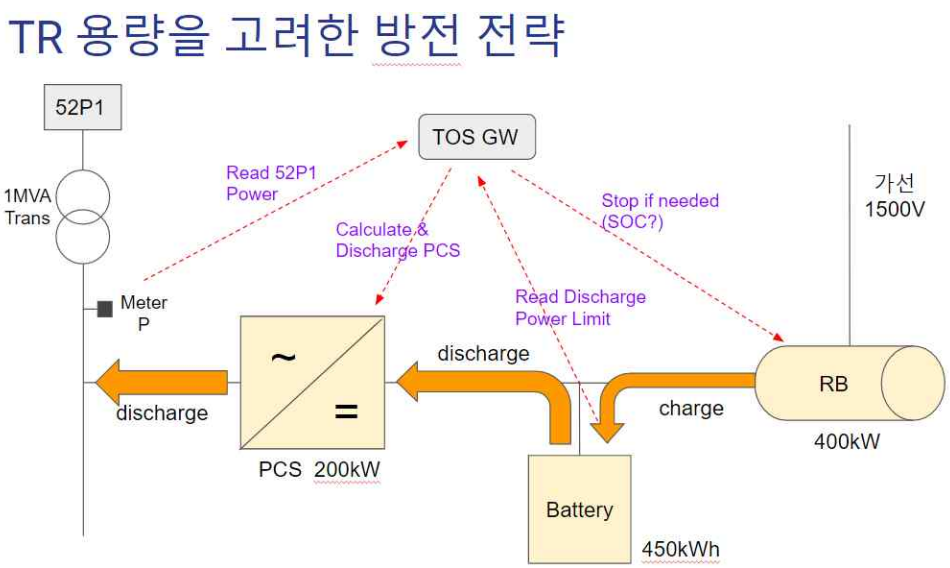
다. **수락산 역사 시스템 구축**

- 수락산 역사는 PCS, 배터리, 회생제동 시스템, EIG 등을 설치하여 운영 중이며, 회생제동 시스템은 1,500V 정도의 가선을 입력으로 받아 배터리 충전에 필요한 전압으로 변환하는 DC to DC 장비임. 또한 도봉산과 마찬가지로 DC 버스에 연결되었으므로 DC 커플링 시스템임.
- DC 커플링 시스템의 장점은 회생제동에서 발생한 에너지가 바로 PCS 출력으로 나감과 동시에 남는 전력은 배터리의 충전에 쓰일 수 있지만 DC 버스의 전압 출렁임으로 인해 PCS의 제어 부담이 단점이 있음.
- 태양광이든 회생제동이든 DC 커플링 시스템인 경우 배터리의 SOC에 따라 운전 여부를 결정해야 함. EIG는 배터리의 SOC와 DC버스의 전압을 고려하여 배터리의 잔량이 적정 수준을 넘어선 경우 태양광과 회생제동 시스템을 정지시키는 안전한 운영 조치를 수행함.

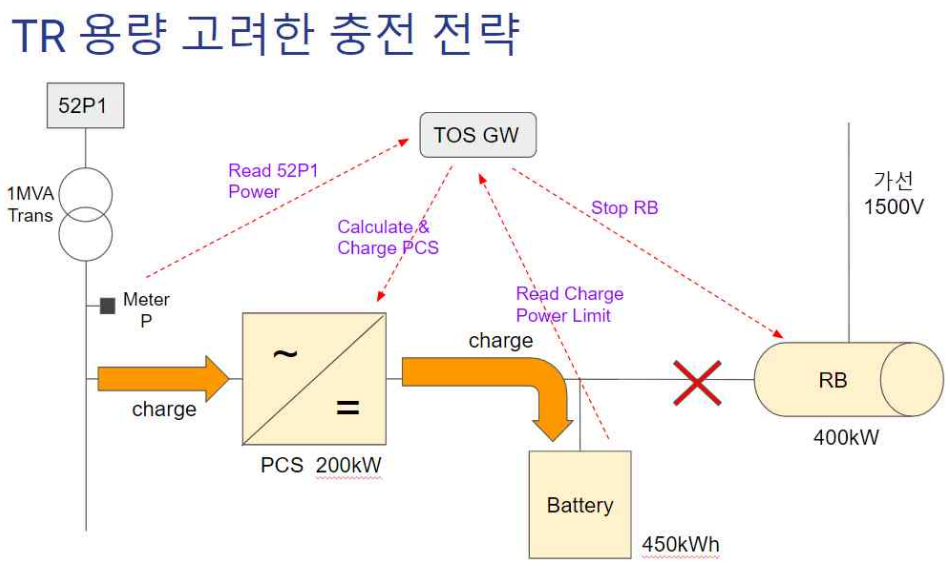


<그림 3-5-16> 지하역사 테스트베드 구축

- 전기적으로 복잡한 구성을 가진 도시철도 역사 및 선로는 각 포인트별로 용량이 한정되어 있음. 수락산역사의 경우 TR1 포인트에 ESS가 전기적 연결을 하게 되는데, 이 TR의 용량이 1,000kVA임. 따라서 이 포인트에서 부하와 ESS의 충전 사용량이 1,000kVA를 넘으면 안되며, ESS의 방전으로 인해 상위계통으로 역송되어서도 안됨. (역전력 계전기 차단 우려)
- 이를 고려하여 TR1에 설치된 미터를 실시간으로 읽어, ESS의 충/방전을 초단위로 제어하는 로직을 개발하고 적용하였음.
- 또한 공통 DC버스에 실린 회생제동과 태양광 입력에 대해서도 ESS가 충전을 할 때는 무조건 차단하도록 하여, 과전류가 배터리에 흐르지 않도록 보호함.



<그림 3-5-17> TR용량을 고려한 방전 전략



<그림 3-5-18> TR용량을 고려한 충전 전략

5. 운영시험 및 종합 성능평가

가. 개별시험 및 연동시험

- PCS, 배터리, 태양광, 회생제동, 미터 등의 개별 시스템은 oBIX로 데이터 모델링하고 드라이버를 개발하여 개별 연동시험에 성공하였으며, 다음은 개별 연동시험 보고서의 일부임.

2. PCS 통신 테스트 결과

- 프로토콜 : Modbus/IP
- /pcs 정보 : 정상

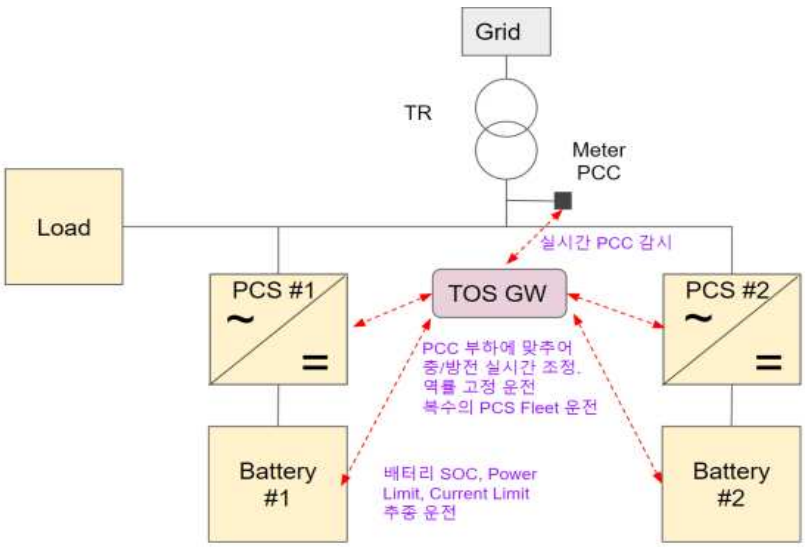
```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<obj xmlns="http://obix.org/ns/schema/1.0">
  <real name="acVoltage" val="0.0" unit="obix:units/volt" />
  <real name="acCurrent" val="-1.3" unit="obix:units/ampere" />
  <real name="frequency" val="60.2" unit="obix:units/hertz" />
  <real name="dcVoltage" val="7.2" unit="obix:units/volt" />
  <real name="dcCurrent" val="4.5" unit="obix:units/ampere" />
  <real name="power" val="0.0" unit="obix:units/kilowatt" />
  <real name="dcPower" val="0.03" unit="obix:units/kilowatt" />
  <real name="powerRefS" val="0.0" unit="obix:units/kilowatt" />
  <int name="faultCode" display="OK" val="0" />
  <ref name="control" href="control" />
  <ref name="alarms" href="alarms" />
  <ref name="meter" href="meter" />
  <ref name="generator" href="generator" />
</obj>
```

- /pcs/alarms 정보 : 정상

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<obj xmlns="http://obix.org/ns/schema/1.0">
  <bool name="isRunning" val="false" />
  <bool name="fault" val="false" />
  <bool name="mcGridOpen" val="false" />
  <bool name="mcBatOpen" val="false" />
  <bool name="acOverCurrent" val="false" />
```

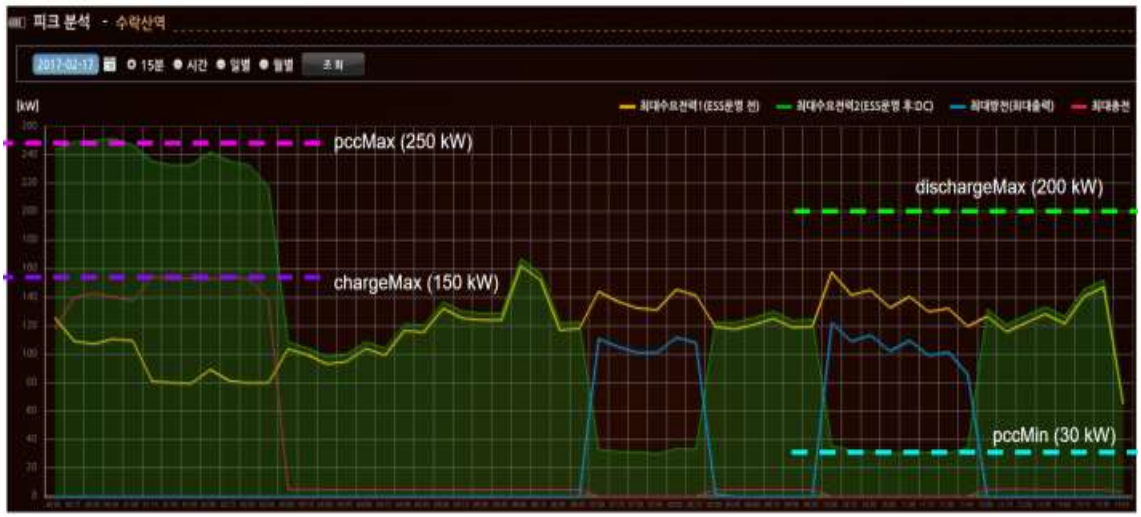
<그림 3-5-19> PCS 통신 테스트 결과

- 도시철도 역사 설비의 투자지연을 위해 기존 설비의 용량에 맞게 PCS 출력을 조절하는 PCC 운전모드를 개발하였음. 이 모드는 기준이 되는 PCC(Point of Common Coupling)의 실시간 계량치를 기준으로 PCS의 운전량을 결정하는 모드이며, 이 모드를 이용하면 용량 기준이 되는 설비의 용량을 초과하지 않고, 역기전력도 방지하면서 최대한의 운전을 할 수 있음. 수락산 역사의 경우 TR1 변압기의 용량이 문제가 되어서 이런 운전모드를 사용함.



<그림 3-5-20> 개별시험 및 연동시험

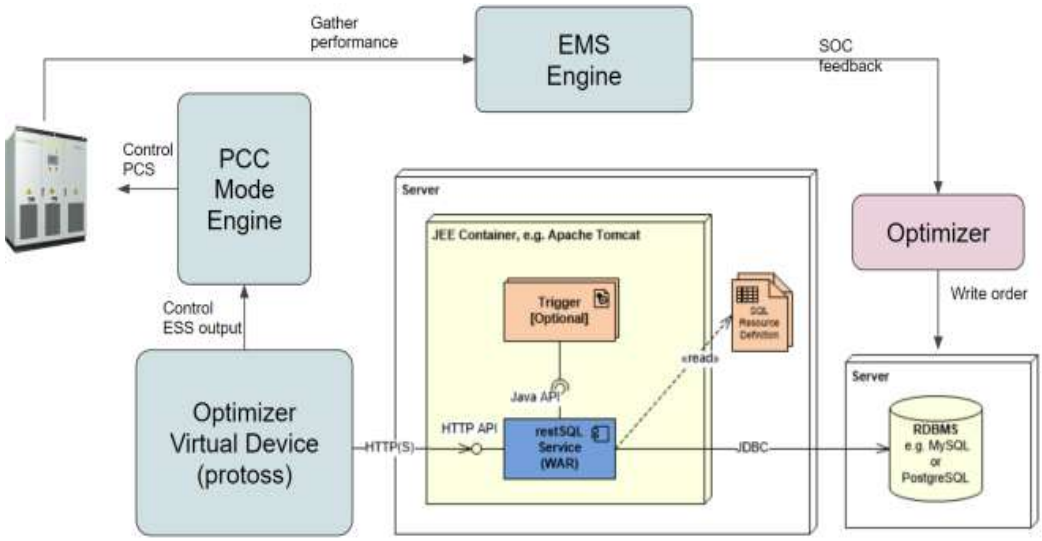
- pccMax는 충전할 때 PCC의 최대 허용 전력을 지정하며, 이렇게 함으로써 PCS 충전에 의해 변압기에 허용하는 전력을 초과하지 않도록 조절함. pccMin은 PCC의 최소 전력을 지정하며, 이렇게 지정할 경우 과다 방전으로 인해 다른 시스템에 역기전력이 발생하지 않도록 할 수 있는 운전 결과를 보여 줌.



<그림 3-5-21> 개별시험 및 연동시험

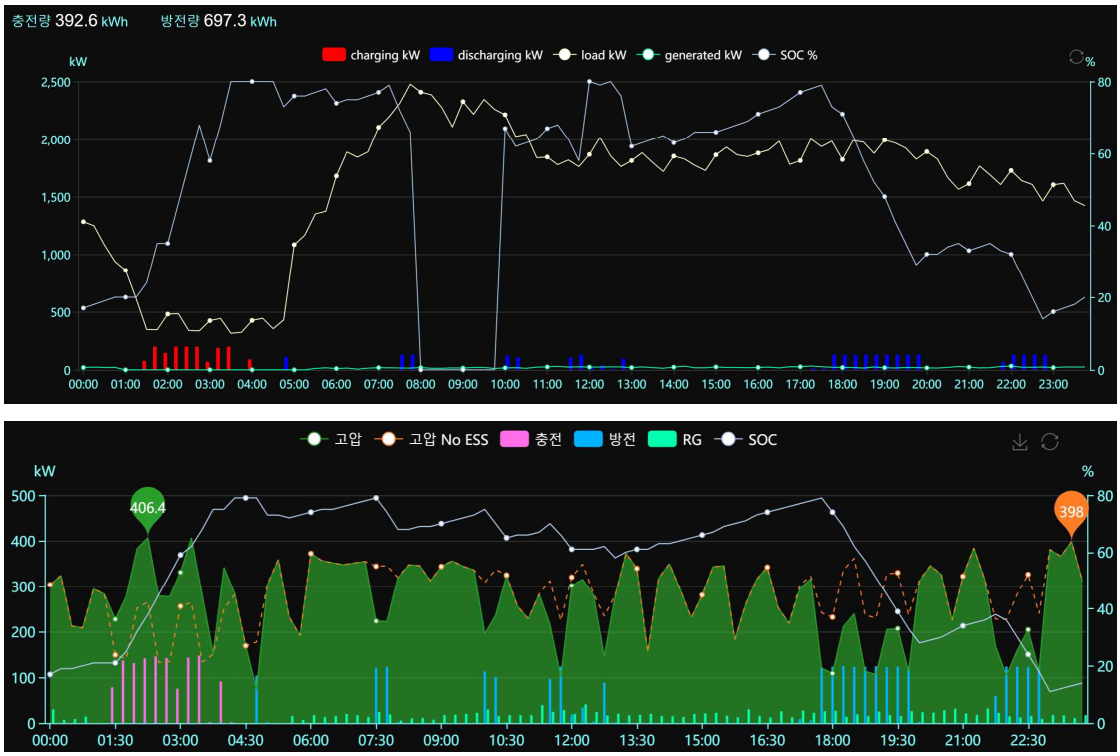
나. **시험 운영 및 에너지 절감량 산출**

- 수락산과 도봉산 역사의 에너지 설비들의 실제 운전은 개발된 최적화 엔진의 지령대로 수행하며, 최적화 엔진은 매일의 에너지 생산/소비 실적과 현재의 배터리 잔량 등을 참고하여 15분 단위로 운전 지령을 데이터베이스에 기록함. 통합에너지 운영시스템은 이 지령을 참고하여 전체적인 시스템 운전을 수행함.



<그림 3-5-22> 시험 운영

- 다음 그림은 특정일에 최적화 엔진이 만든 예측과 지령, 그리고 실제 그 날 운전했던 패턴을 나타내며, 이렇게 최적화 엔진의 연동과 지령 수행이 잘 동작함을 확인할 수 있음.



<그림 3-5-23> 에너지 절감량 산출

다. 역사 에너지 통합운영시스템 UI

- EIG를 통해 수집된 운전데이터는 TOS에 축적되고, TOS UI에 의해 운영자에게 제공됨. 에너지 사용량, 충/방전량, 회생제동/태양광 발전량, 에너지 요금, 장비별 계측데이터 관리, 미터 트리 구성, 영역별 에너지 사용량 분석, 스케쥴 조정 등의 기능을 제공함.



<그림 3-5-24> 역사에너지 통합 운영시스템 UI

6. 도시철도 복합에너지 시스템 에너지저장장치 최적 스케줄링 알고리즘

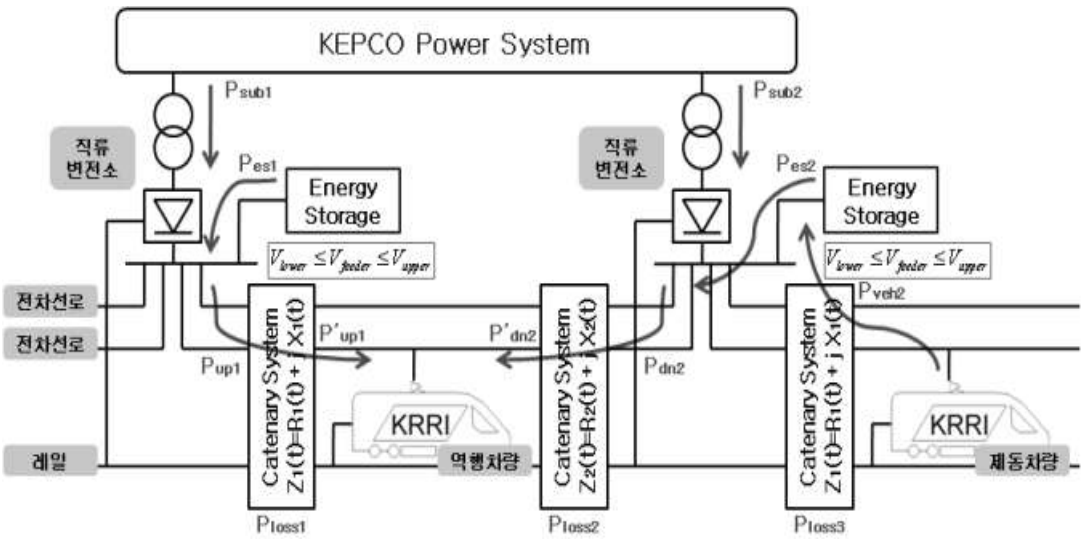
연구 목표	도시철도의 운행 패턴을 고려한 효율적 전력 수급 알고리즘 개발	도시철도의 운행 패턴 및 복합에너지 발전 특성을 고려한 효율적 전력 수급 알고리즘 개발	복합 에너지 통합 해석 환경구축 및 스케줄링 알고리즘 적용
연구의 필요성	▪ 도시철도 시스템의 직류급전을 해석하기 위한 기법 필요 ▪ 철도부하는 시간에 따라 위치가 바뀌므로 새로운 해석 방법 필요	▪ 전기요금 절감을 위해 전략적인 에너지저장장치 운용 필요 ▪ 피크절감을 위한 에너지저장장치 적정 용량 산정 필요	▪ 개발된 알고리즘이 실제로 구동되기 위한 환경 필요 ▪ 테스트베드에 적용하여 실제 효과 검증 필요
기존 기술의 문제점	▪ 도시철도에서의 에너지저장장치 활용을 위한 해석기법 미비	▪ 도시철도 부하 및 기본요금제 특성을 반영한 에너지저장장치 스케줄링 알고리즘 부재	▪ 실제 작동 및 결과 검증을 위하여 알고리즘의 구현 필요
기술적 차별성	▪ 도시철도 복합에너지 시스템 내의 분산전원(회생전력)을 해석하기 위한 기법 도입	▪ 부하율이 낮은 도시철도 부하의 특성 및 기본요금, ToU요금제의 특징을 반영한 24시간 단위 스케줄링 알고리즘 개발	▪ 테스트베드 에서의 실제 동작을 위한 알고리즘 구현 및 예측오차를 최소화하기 위한 기법 적용
요구 사항	▪ 직류 도시철도 시스템 모델링 ▪ 직교류 통합 해석 알고리즘	▪ 도시철도 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 알고리즘 ▪ 복합에너지 시스템의 적정 에너지저장장치 용량 산출 알고리즘	▪ 개발된 알고리즘의 현장 적용 ▪ 요금절감 효과 검증
기술 내용 및 특징	▪ 도시철도 차량의 시간적 이동과 부하변동을 반영한 모델링을 수행하고, 차량의 시공간적인 변화를 반영한 도시철도 시스템 해석 알고리즘 개발	▪ 전력량 요금과 피크부하를 고려하여 에너지저장장치의 최적 일간 충/방전 스케줄을 도출하는 혼합정수계획법(MIP, Mixed Integer Programming)기반 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 알고리즘 개발 ▪ 복합에너지 시스템 통합 스케줄링에 기반 하여 목표 피크저감량을 달성할 수 있는 최적 에너지저장장치 용량 산정 알고리즘 개발	▪ 에너지저장장치의 충/방전 스케줄링과 그에 따른 연/월간 효과를 분석할 수 있는 최적화 솔버 기반 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 모의해석 환경 구축 ▪ 벽산파워 서버와 연계하여 원하는 날짜의 15분 단위 수요실적을 조회하고, 이에 기반을 둔 에너지저장장치 최적 충/방전 스케줄 도출이 가능한 일 단위 통합 해석환경 구축

7. 최적 스케줄링 알고리즘 설계 및 제작

가. 도시철도의 운행 패턴을 고려한 효율적 전력 수급 알고리즘 개발

(1) 직류도시철도시스템 모델링 및 해석

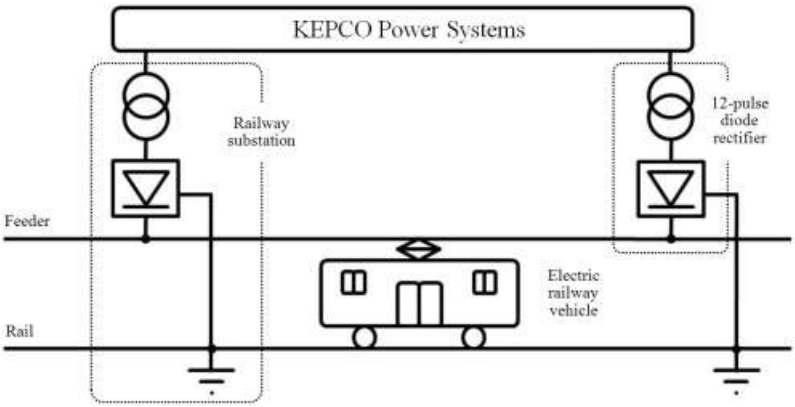
- 전기에너지를 소비하는 부하에서의 필요량을 바탕으로, 에너지의 공급과 전력계통을 통한 전력의 흐름을 해석하는 일련의 과정을 전력조류해석(Powerflow analysis 또는 Loadflow analysis)이라 정의함. 전력조류해석은 전력계통의 설계 단계에서부터 설비의 추가, 계통계획, 진단 등의 여러 목적에 기반 하여 수행하며, 특히 설비 추가 목적에서의 전력조류해석은 기존 계통에 대한 추가 설비의 효과를 검증하고 이에 따른 계통의 영향을 해석하는 계통 관리의 측면과, 설비의 용량 및 신뢰성 등을 고려하여 추가 설비의 사양을 검토하는 설비 사양 결정의 측면에서 매우 중요함.
- 도시철도 시스템의 경우, 일반적인 전력계통과 달리 직류급전을 사용하고 있다는 점과 부하의 위치와 전력요구량이 변화한다는 점에서 매우 큰 차이를 보임.
- 직류시스템에 대한 전력조류해석은 방법론의 측면에서 교류시스템보다 간단하지만, 교류해석에 주로 이용되는 뉴튼-랩슨법이나 가우스-자이델법을 이용하지 못하기 때문에 새로운 방안이 개발되어야 함. 부하의 위치와 소비전력의 변화는 기존 교류전력계통에서처럼 특정한 시간 스냅샷에서의 상태만을 계산하는 것이 아니라, 운전조건이 반복되는 특정 시간 동안 매 초, 또는 일정한 시간 단위로 연속적인 해석이 수행되어야 함.



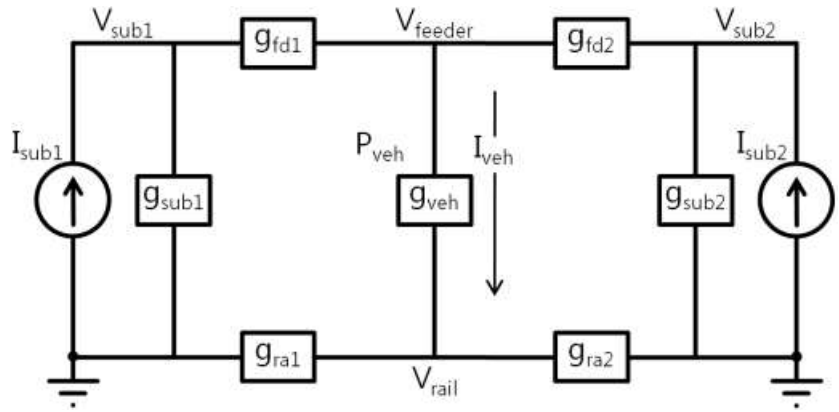
<그림 3-5-25> 직류전기철도시스템 운전 개략도

- 전력조류계산을 위한 회로망 해석은 루프방정식 또는 노드방정식의 해를 구함으로써 가능하며, 두 개의 철도변전소와 한 대의 차량을 포함한 간단한 직류도시철도 시스템에 대하여 등가회로를 구성할 수 있음. 변전소는 Norton equivalent technique를 이용하여 전류원으로 간략화 하였으며, 차량은 임피던스로 등가화 하였음. 노드방정식은 식 (5.1)과 같고, 차량 양단에 걸리는 전압과 등가임피던스는 식 (5.2)의 관계를 가짐.

- I_{sub1}과 I_{sub2}는 각 변전소의 노턴 등가 전류로서, 무부하전압이 고정되어 있다는 가정에서 식 (5.1)의 노드방정식이 구성되었으므로 기지량이며, 따라서 반복계산법을 이용하여 각 노드의 전압에 대한 해를 구할 수 있음.
- 그러나 반복계산 과정에서 g_{veh}을 갱신하기 위하여 사용되는 식 (5.2)은 차량전압의 제곱에 관계된 식이기 때문에, 수렴속도가 늦고 반복계산이 많아지게 하는 단점이 있음. 이를 개선하기 위하여 철도차량을 전류원으로 등가화하여 컨덕턴스 행렬과 전압 및 전류 행렬의 형태를 수정할 필요가 있음.



<그림 3-5-26> 직류도시철도 시스템 개략도



<그림 3-5-27> 직류 도시철도 시스템 등가회로

$$\begin{bmatrix} g_{sub1}+g_{fd1} & 0 & -g_{fd1} & 0 \\ 0 & g_{sub2}+g_{fd2} & -g_{fd2} & 0 \\ -g_{fd1} & -g_{fd2} & g_{fd1}+g_{fd2}+g_{veh} & -g_{veh} \\ 0 & 0 & -g_{veh} & g_{veh}+g_{ra1}+g_{ra2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sub1} \\ V_{sub2} \\ V_{feeder} \\ V_{rail} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{sub1} \\ I_{sub2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.1}$$

$$g_{veh} = \frac{P_{veh}}{(V_{feeder} - V_{rail})^2} \tag{5.2}$$

- 식 (5.3)의 관계식을 이용하여 식 (5.1)의 노드방정식은 식 (5.4)로 재구성되며, 차량전압과 차량소비전력의 관계는 식 (5.5)과 같이 정의됨. 노드방정식의 이러한 개선은, 반복계산 과정에서 I_{veh}을 갱신할 때 소비전력과 전압의 관계가 1차적인 관계이므로, 계산 초기과정에서 전압의 오차에 대하여 덜 민감하도록 하며, 이것은 반복계산의 수렴속도 증가와 반복계산 횟수 저감으로 인하여 계산량이 감소하는 효과로 나타남. 또한 가선에 위치한 노드와 레일에 위치한 노드에 대한 행렬 구분이 가능하기 때문에 매 계산 시 전압행렬의 값을 구하는 계산 부담도 저감됨.

$$I_{veh} = g_{veh} \cdot \left(V_{feeder} - V_{rail} \right) \tag{5.3}$$

$$\begin{bmatrix} g_{sub1} + g_{fd1} & 0 & -g_{fd2} & 0 \\ 0 & g_{sub2} + g_{fd2} & -g_{fd2} & 0 \\ -g_{fd1} & -g_{fd2} & g_{fd1} + g_{fd2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{ra1} + g_{ra2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sub1} \\ V_{sub2} \\ V_{feeder} \\ V_{rail} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{sub1} \\ I_{sub2} \\ -I_{veh} \\ I_{veh} \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

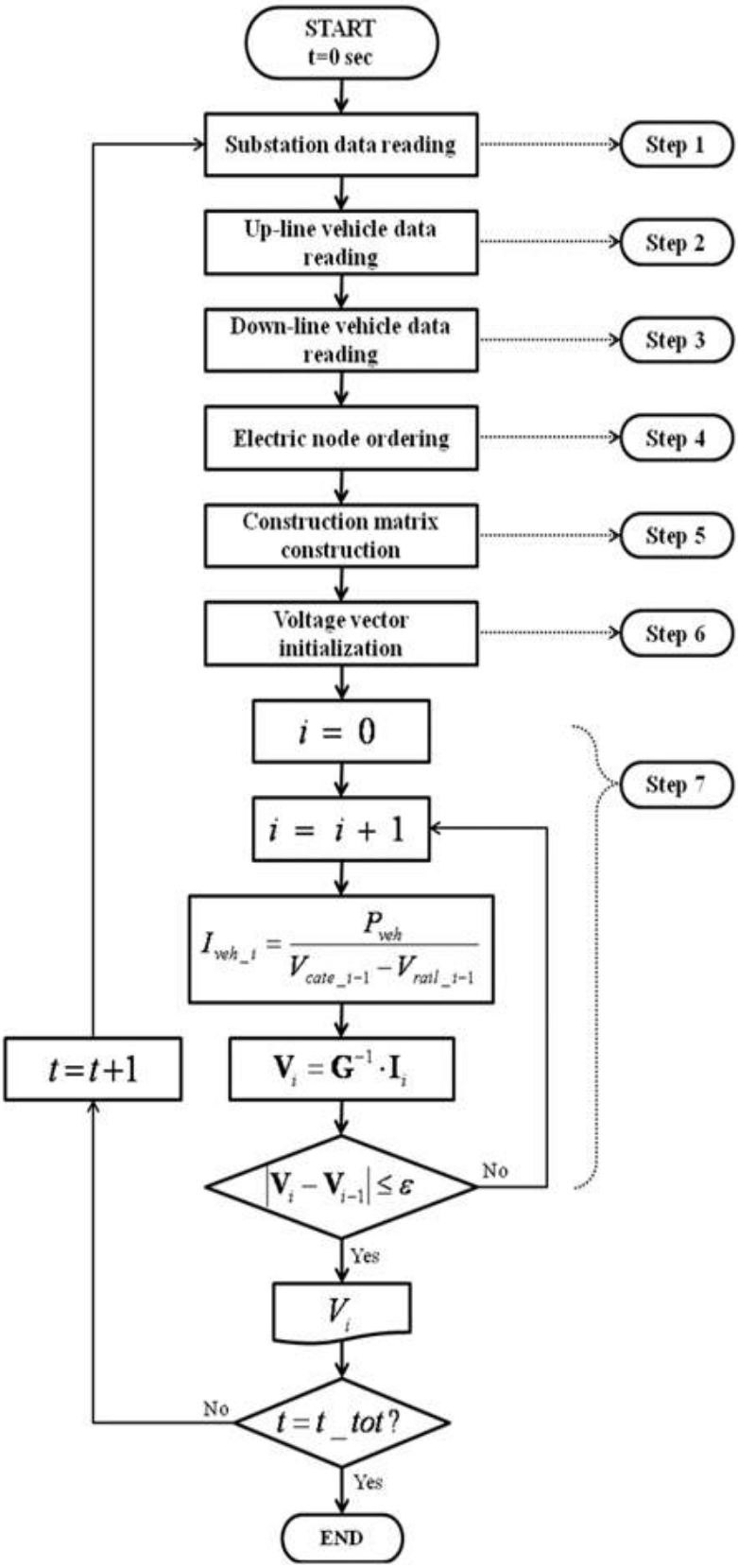
$$I_{veh} = \frac{P_{veh}}{(V_{feeder} - V_{rail})} \tag{5.5}$$

- 식 (5.4)과 (5.5)를 바탕으로 실제 철도 계통에 대한 전력조류해석 시, 전체 노선에 대하여 상행차량과 하행차량을 모두 고려하는 경우, 컨덕턴스 행렬의 크기는 (변전소 수 + 4 × 차량 수)×2와 같음. 실제 국내에서 운전하고 있는 여러 노선에 대한 해석을 수행함에 있어서 가장 많은 변전소가 설치된 7호선의 경우 112×112 이므로, 컴퓨터 해석을 함에 있어 계산량 부담이 크지 않을 것으로 판단됨.
- 조류계산을 수행하기 위하여, 시스템의 운영 데이터, 변전소 데이터, 차량 데이터, 그리고 가선 데이터가 필요하며 각 데이터 군에 해당하는 상세 데이터에 대한 설명을 다음 표에 제시함.

<표 3-5-2> 직류전기철도 시스템 전력조류해석을 위한 필요 데이터

데이터 군	상세 데이터	설 명
시스템 운영 데이터	정격전압	
	정차시간	
	시격	같은 방향으로 진행하는 두 차량 사이의 시간간격
변전소 데이터	무부하전압	
	변전소 등가저항	변압기와 정류기에 대해 측정된 저항값
	변전소 위치	기준점으로부터의 변전소 위치
차량 데이터	차량 위치	TPS로부터 구해진 차량의 위치
	소비 전력	TPS로부터 구해진 차량의 순간 소비전력
가선 데이터	급전선 임피던스	급전선의 단위 길이당 임피던스
	레일 임피던스	레일의 단위 길이당 임피던스

- 필요 데이터를 이용하여 다음과 같이 직류도시철도 시스템 조류계산을 수행하였음.



<그림 3-5-28> 조류계산 알고리즘의 flowchart

- Step 1에서는 변전소 데이터를 이용하여 각 변전소에 대한 노턴 등가 전류원의 파라미터를 정의하고 해당 변전소의 위치 데이터를 저장하였음. Step 2와 3에서는 TPS로부터 얻어진 차량의 데이터를 이용하여 상행선과 하행선에 차량을 해당 위치에 배치하며, 변전소와 차량의 위치를 이용하여 node-ordering이 수행되고, 이를 바탕으로 시스템 컨덴턱스 행렬의 성분 중 non-zero 성분이 정해짐. 또한, 전기적으로 직접 연결된 차량-차량 또는 차량-변전소에 대하여 두 개의 거리와 단위 길이 당 임피던스를 곱하여 시스템의 컨덕턴스 행렬을 구성하였음.
- Step 6과 Step 7은 반복계산을 통한 제반의 조류해석 과정이며 반복계산을 함에 있어서 적절한 초기값을 선정하는 것은 반복계산의 수렴 또는 발산 여부를 결정하거나, 수렴하는 경우에는 계산량 및 계산시간을 현저히 줄일 수 있다는 점에서 매우 중요한 과정임.
- 국내의 직류도시철도 시스템에서 가선전압은 1,500[V]의 정격전압으로 운전되도록 설계되었으며 변전소와 차량의 가선전압은 설계치인 정격전압 부근에서 운전되기 때문에, 1,500[V]로 초기값을 설정함.
- 레일의 경우, 부하전류의 귀로로 사용되며 철도변전소의 접지와 연결되기 때문에 0[V] 주위에서 운전전위가 결정되므로 초기값으로 0[V]를 사용하며 전압벡터의 초기값은 식 (5.6)과 같이 표현됨.
- Step 7에서는 식 (5.6)의 초기값과 식 (5.5)을 이용하여 전류벡터의 초기값을 계산하며, 계산된 초기 전류벡터를 이용하여 식 (5.4)을 계산함으로써 전압벡터를 업데이트하며 전체 반복계산은 이전 단계의 전압벡터와의 벡터거리가 특정한 작은 값인 ϵ이하가 되는 경우, 해가 수렴하였다고 판단하고 계산을 종료함.

$$V_0 = \begin{bmatrix} V_{s\_1} \\ \mathrm{M} \\ V_{s\_nsub} \\ V_{veh-f\_1} \\ \mathrm{M} \\ V_{veh-f\_2nveh} \\ V_{veh-r\_1} \\ \mathrm{M} \\ V_{veh-r\_2nveh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,500 \\ \mathrm{M} \\ 1,500 \\ 1,500 \\ \mathrm{M} \\ 1,500 \\ 0 \\ \mathrm{M} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.6}$$

- 교류시스템에 대한 조류계산은 첨두부하 또는 비첨두부하와 같은 특정한 시점에서의 모선전압, 위상각, 유효전력, 무효전력을 구하기 위해 계산하는 것이 일반적이지만, 전기철도시스템의 경우 승객 또는 화물의 수송이라는 목적 하에 차량의 움직임이 필수적이기 때문에 특정한 부하 상태를 표현하는 특정 시점을 정의하는 것이 불가능함.
- 따라서 철도시스템에 대한 전력조류계산은 특정시점이 아닌 시간구간을 설정하여 수행하며 매 초마다 변화하는 각 차량의 위치와 소비전력을 이용하여 알고리즘을 제안하며, 이를 통해 시스템의 컨덕턴스 행렬을 업데이트하고 매 초에 해당하는 해를 구함.

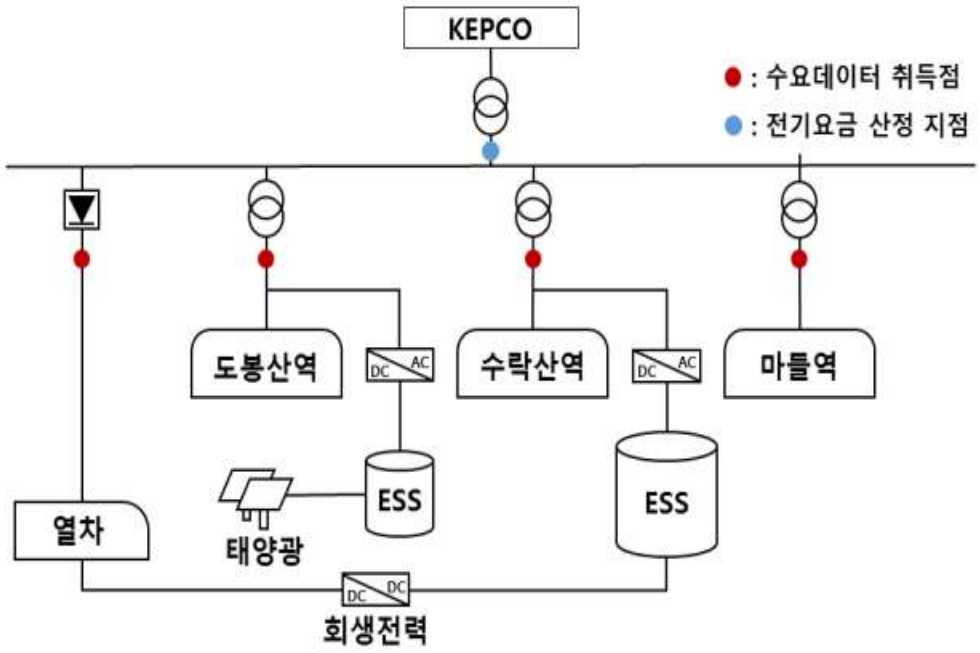
나. **도시철도 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 알고리즘 개발**

(1) 스케줄링 알고리즘의 주요 특징

- 에너지저장장치 및 신재생 에너지원들을 포함하는 도시철도 복합에너지 시스템의 효율적인 사용을 위하여 에너지저장장치의 최적 스케줄링을 수행하는 알고리즘의 개발이 필요함. 스케줄링 알고리즘의 목적은 도시철도 시스템의 피크전력 저감 및 전기요금에 있으며 따라서 스케줄링 알고리즘은 도시철도 복합에너지 시스템의 피크전력을 저감하는 동시에 전기요금의 계시별 요금제에 따라 전력량 요금을 감축하여야 함. 이러한 기능을 수행하는 최적 에너지저장장치 스케줄링 기법 개발을 위해서는 도시철도 복합 에너지 시스템에 대한 특성이 수학적으로 모델링 되어야 하며 이를 반영하여 도시철도 시스템의 구성요소를 모델링 하였으며 알고리즘에 반영함. 개발된 에너지저장장치 스케줄링 알고리즘의 특징은 다음과 같음.

1. 24시간에 대하여 15분 단위 에너지저장장치의 최적 스케줄 도출
2. 변전소 단위의 피크전력 저감을 위하여 차량과 역사의 부하를 구분 하지 않고 하나의 Net Load로 평가
3. 기본요금 산정 특성을 반영하여 피크전력 저감을 요금적인 측면에서 수행함.

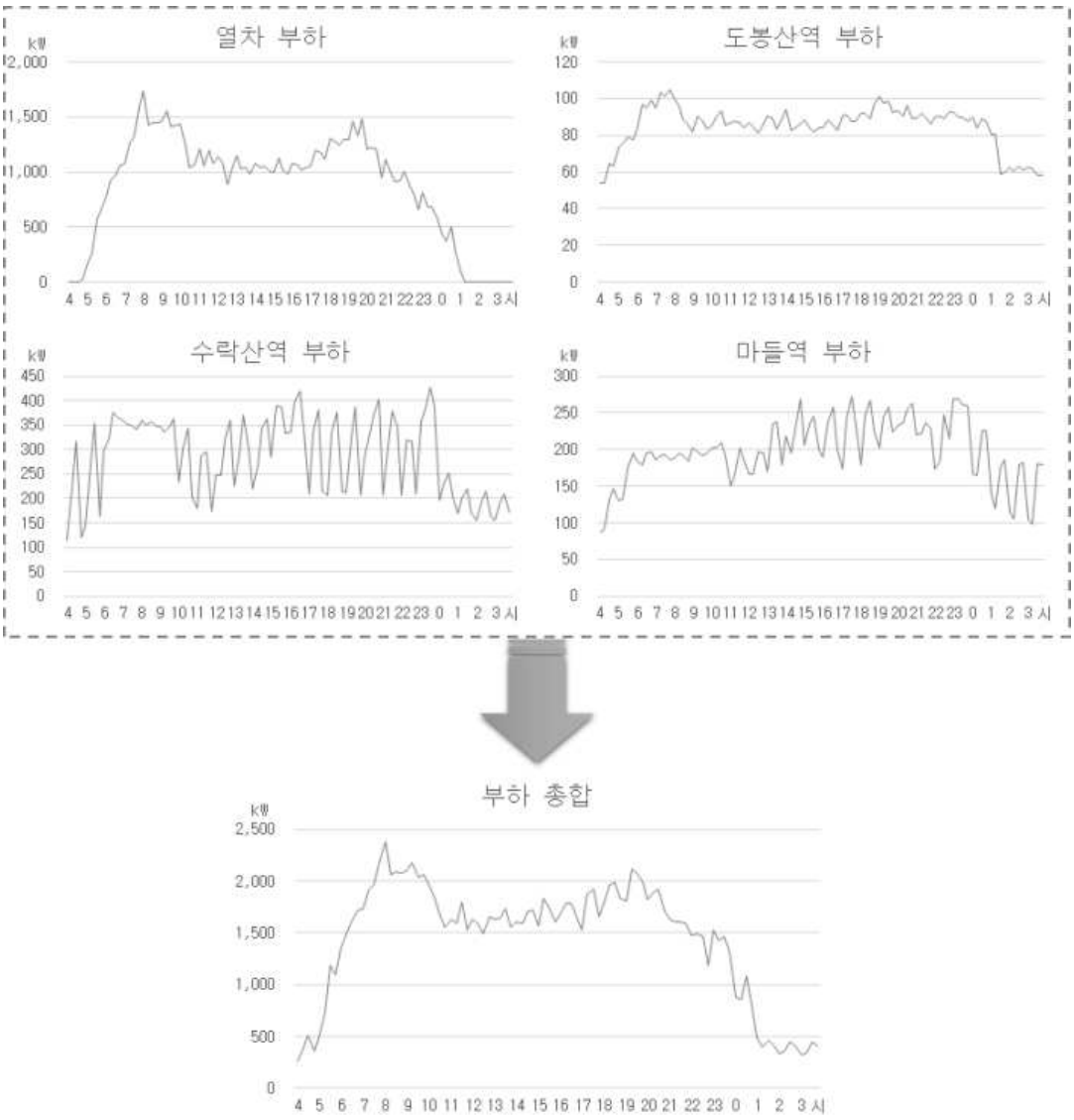
(2) 복합에너지 시스템의 수학적 정식화



<그림 3-5-29> 도시철도 복합에너지 시스템 구성도

- 스케줄링 알고리즘에서 고려하는 복합에너지 시스템은 열차 및 역사부하를 가지며, 역사의 경우 수락산역, 도봉산역 및 마들역을 포함하며 붉은색으로 표시된 지점에서 에너지 사용량을 측정함. 실제 계통은 도봉산 변전소에서 갈라져 나와 도봉산 기지 및 수락산 변전소로 연결되지만, 스케줄링 알고리즘에서는 3개 역과 열차 부하만을 고려함.

- 도봉산역, 마들역 및 수락산역은 하나의 변압기를 통해 판매사업자(한국전력)의 계통과 연결되며 열차의 경우 각 역에서 전력을 사용하나, 수락산역에서만 부하를 측정하므로 열차를 단일 부하로 취급함. 또한, 복합에너지 시스템은 수락산역에 열차 회생에너지를 저장할 수 있는 PCS 및 배터리 설비를 포함하며, 도봉산역에는 태양광 발전기 및 이 태양광 에너지를 저장할 수 있는 에너지저장장치를 포함함. 복합에너지 시스템의 부하, 회생전력 및 태양광 발전기와 같은 발전자원의 발전량을 고려하여 일간 에너지저장장치의 최적 스케줄을 구성함.



<그림 3-5-30> 도시철도 복합에너지 시스템의 부하

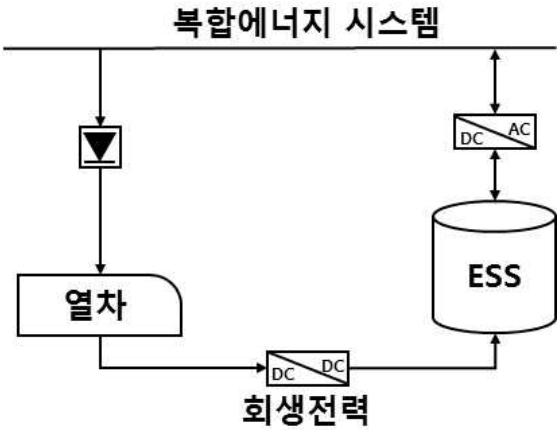
- 도시철도 복합에너지 시스템의 부하는 열차 부하, 수락산역, 도봉산역 및 마들역의 부하로 구성됨. 열차부하의 경우, 오전 및 오후 7~8시 부근에서 피크전력이 발생하며 열차 운행 시간이 새벽 5시경부터 시작되므로 4시부터 데이터를 취득함. 만약 일반적인 전력시스템처럼 00시부터 패턴을 기록할 경우 평일에서 주말로 넘어가는 금요일과 주말에서 주중으로 넘어가는 일요일의 부하 패턴이 일반적인 주중,

주말 패턴과 상이하게 달라지는 문제가 발생함. 수락산역 및 마들역의 경우 거의 부하 패턴이 크게 변하지 않으며, 주기적으로 증가 감소하는 경향을 보이며, 도봉산역은 도시철도 복합에너지 시스템의 유일한 지상역사로, 타 역사와 비교하였을 때 1/3정도의 전력을 사용하는 것을 확인 할 수 있음.

- 복합에너지 시스템의 전기요금은 판매사업자와 연결된 변압기에서 계산되며, 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 알고리즘의 목적은 전기요금 절감이므로 역사 및 열차부하를 하나의 부하로 취급하며, 이 경우 열차부하가 가장 지배적이며 총합 부하의 패턴은 열차부하의 패턴을 따르게 됨.
- 산업용 전기 요금 중 기본요금은 15분 단위 전력 사용량 중 최대값에 의하여 결정되므로, 복합에너지 시스템의 부하 역시 15분 단위로 측정되며, 스케줄링 알고리즘 역시 15분 단위 부하를 사용함.
- 도시철도 복합에너지 시스템의 부하는 다음 표와 같이 나타내며 15분 단위 24시간 부하를 사용하므로 총 96개의 부하데이터를 사용함

<표 3-5-3> 도시철도 복합에너지 시스템 부하 표현 변수

표현식	단위	설명
P_t^{Load}	[kW]	15분 단위 24시간 부하



<그림 3-5-31> 복합에너지 시스템 회생전력 모델링

- 복합에너지 시스템의 회생전력은 <그림 3-5-31>와 같이 모델링되며 열차가 제동하여 회생에너지가 발생할 경우 500kW 급 회생전력 컨버터가 발생한 회생에너지를 에너지저장장치에 충전함. 실제 회생전력은 열차가 정차하는 짧은 순간에 발생하지만 스케줄링은 15분 단위로 수행하므로, 회생전력 역시 15분 평균 발생량을 사용함.
- 에너지저장장치 역시 <그림 3-5-31>와 같이 모델링 되며 에너지 저장장치는 역사 부하 시스템에 연결되어 충전 및 방전을 수행하여 전체 시스템의 전력 구매량을 조절함. 이 때 에너지저장장치는 PCS에 의해 최대 충 방전량이 제한됨. 본 과제에서

에너지저장장치는 200kW/400kWh의 용량을 가지며 회생전력 충전을 수행하는 동시에 계통으로의 방전 수행이 가능함. 충·방전 시 에너지저장장치의 효율에 따라 에너지 손실이 발생하게 되며 충전과 방전의 효율을 구분하지 않고 round-trip 효율을 사용함.

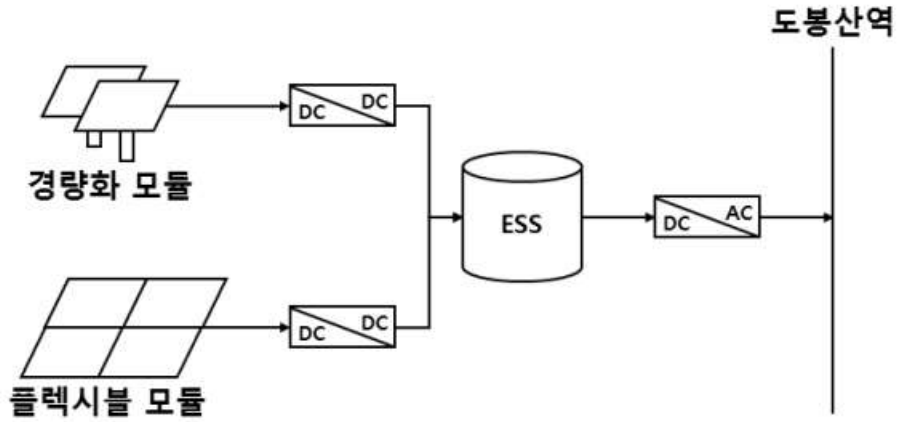
- 일반적으로 에너지저장장치에 남은 잔량은 State of Charge(*SoC*)로 나타내며 이는 현재 남은 에너지[kWh]를 최대 용량으로 나눠 [%]단위로 나타낸 값임. 일반적으로 에너지저장장치는 안정적인 운영을 위하여 *SoC*의 범위를 제한하여 사용하므로 최소 및 최대 허용 *SoC*범위를 가짐.
- 또한 에너지저장장치는 높은 Depth of Discharge(*DoD*)로 방전 시 에너지저장장치의 최대 용량이 감소하며, 최대 용량이 어느 수준 이하가 되면 에너지저장장치의 배터리를 교체해야 함. 에너지저장장치 방전 시 *DoD*가 일정하다면 에너지저장장치의 수명은 Cycle에 의해 결정되며 Cycle은 에너지저장장치가 충전상태에서 방전상태로 바뀐 후 다시 충전상태가 되는 과정을 의미함. 스케줄링 시 이 Cycle에 의한 수명감소를 고려하기 위해 방전비용 개념을 도입해야 하며 방전비용은 다음과 같이 표현됨.

방전비용=에너지저장장치가격/Cycle수명

- 에너지저장장치의 Cycle을 측정하기 위해서는 에너지저장장치의 충전 및 방전상태를 나타내는 2진 변수가 필요하며, 이러한 이진변수를 포함한 회생전력 및 에너지저장장치를 표현하는 변수는 다음 표에 나타냄.

<표 3-5-4> 도시철도 복합에너지 시스템 회생전력 및 에너지저장장치 표현 변수

표현식	단위	설명
P_t^{Regen}	[kW]	15분 단위 24시간 회생전력 발생량
P_t^{ESS}	[kW]	15분 단위 24시간 에너지저장장치 충·방전량
$P_{\max,chrg}^{ESS}$	[kW]	에너지저장장치 최대 충전량
$P_{\max,dchg}^{ESS}$	[kW]	에너지저장장치 최대 방전량
y_t		충전상태를 나타내는 변수
z_t		방전상태를 나타내는 변수
u_t		충·방전 상태변화를 나타내는 변수
Cap_{ESS}^{Main}	[kWh]	에너지저장장치 최대충전량
SoC_t^{ESS}	[%]	15분 단위 24시간 에너지저장장치 *SoC*
$SoC_{\min}^{ESS}$	[%]	에너지저장장치 최소 *SoC*
$SoC_{\max}^{ESS}$	[%]	에너지저장장치 최대 *SoC*
c_{dsch}	[원/Cycle]	에너지저장장치 방전비용
η_{ESS}	[%]	에너지저장장치 충·방전효율



<그림 3-5-32> 도시철도 복합에너지 시스템의 태양광 발전기 모델링

- 도시철도 복합에너지 시스템에는 <그림 3-5-32>과 같이 도봉산역에 경량화 모듈로 이루어진 태양광 발전기가 총 20kW, 플렉시블 모듈로 이루어진 태양광 발전기가 총 10kW가 설치되므로 총 30kW의 태양광 발전기가 설치된 것으로 선정함. 각 모듈은 다른 위치에 설치되나 하나의 에너지저장장치에 발전량을 저장하므로 스케줄링 시에는 두 모듈을 구분하지 않고 30kW의 단일 태양광 발전기로 모델링 될 수 있음.
- 태양광 발전기에 연결된 에너지저장장치는 30kW/90kWh의 용량을 가지며 태양광 발전기의 발전량은 반드시 에너지저장장치를 거쳐 역사 부하 시스템에 방전하도록 모델링 됨. 태양광 발전기에 연결된 에너지저장장치는 구분을 위해 태양광 에너지저장장치로 명명함. 태양광 에너지저장장치의 경우 높은 DoD로 방전하지 않고 얕은 충·방전을 반복하므로 방전비용을 고려하지 않아도 무방함. 도시철도 복합에너지 시스템의 태양광 발전기와 관련된 변수들은 다음 표와 같음.

<표 3-5-5> 도시철도 복합에너지 시스템 태양광 발전기 표현 변수

표현식	단위	설명
P_t^{Solar}	[kW]	15분 단위 24시간 태양광 발전량
P_t^{SESS}	[kW]	15분 단위 24시간 태양광 에너지저장장치 충·방전량
$P_{\max,dchg}^{SESS}$	[kW]	태양광 에너지저장장치 최대 충전량
Cap_{ESS}^{SESS}	[kWh]	태양광 에너지저장장치 최대충전량
SoC_t^{SESS}	[%]	15분 단위 24시간 태양광 에너지저장장치 SoC
$SoC_{\min}^{SESS}$	[%]	태양광 에너지저장장치 최소 SoC
$SoC_{\max}^{SESS}$	[%]	태양광 에너지저장장치 최대 SoC
η_{ESS}	[%]	태양광 에너지저장장치 충·방전효율

- 스케줄링 알고리즘은 전기요금, 직전 12개월의 월간 피크전력 및 목표 피크유지 수준을 고려하여 에너지저장장치 및 태양광 에너지의 충·방전 스케줄을 구성함. 피크전력 저감의 경우 직전 12개월 중 동·하계 최대 피크전력과 예측된 피크전력에 목표 피크전력 저감률을 곱한 값을 비교하여 더 큰 값으로 제한하므로 직전 12개월 중 동·하계 피크전력 및 목표 피크전력 저감률이 필요함.
- 스케줄링 시 고려되는 시스템의 변수를 다음 표에 나타냄.

<표 3-5-6> 도시철도 복합에너지 시스템 변수

표현식	단위	설명
c_t	[원/kWh]	도시철도 복합에너지 시스템 전기요금
$P_{Peak}^{Monthly}$	[kW]	직전 12개월 중 동·하계 최대 피크전력
psr	[kW]	목표 피크전력 저감률
P_t^{Buy}	[kW]	15분 단위 24시간 도시철도 복합에너지 시스템의 전력 구매량

- 이 때 psr은 Peak Shaving Ratio를 의미하며, 도시철도 복합에너지 시스템 최적 스케줄링 알고리즘의 변수를 정리하면 다음 표와 같음.

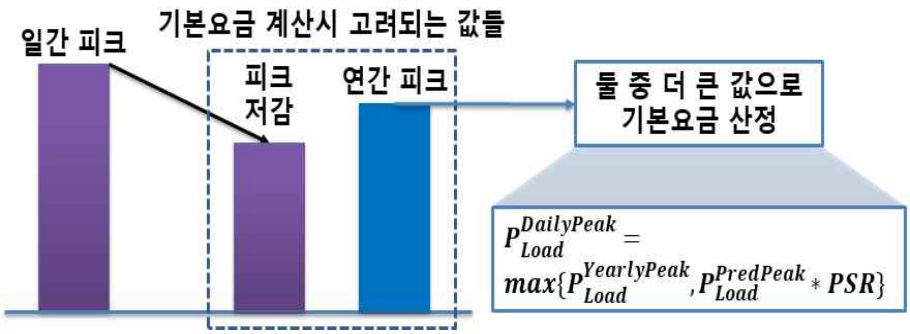
<표 3-5-7> 도시철도 복합에너지 시스템 변수

데이터 분류	항목	
입력변수	부하	P_t^{Load}
	회생전력	P_t^{Regen}
	에너지저장장치	$P_{\max,chrg}^{ESS}$, $P_{\max,dchg}^{ESS}$, Cap_{ESS}^{Main}, $SoC_{\min}^{Main}$, $SoC_{\max}^{Main}$, c_{dsch}, η_{Main}
	태양광 에너지저장장치	P_t^{Solar}, $P_{\max,dchg}^{SESS}$, Cap_{ESS}^{Solar}, SoC_t^{Solar}, $SoC_{\min}^{Solar}$
	시스템 변수	c_t, $P_{Peak}^{Monthly}$, psr
결정변수	에너지저장장치	P_t^{ESS}, SoC_t^{Main}
	태양광 에너지저장장치	P_t^{SESS}, SoC_t^{Solar}
	시스템 변수	P_t^{Buy}

(3) 도시철도 복합에너지 시스템 스케줄링 알고리즘

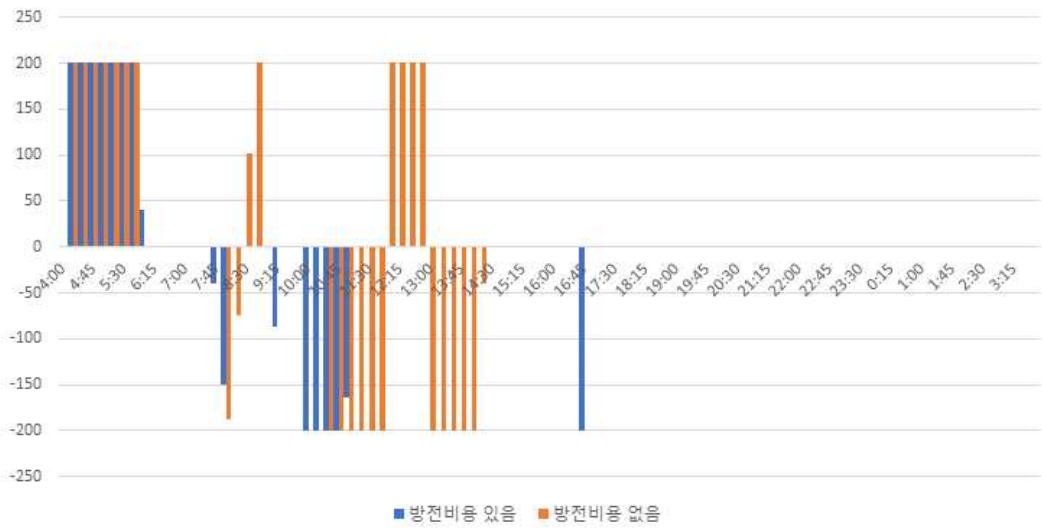
- 앞서 수행한 복합에너지원 모델링을 바탕으로 도시철도 복합에너지 시스템 스케줄링 알고리즘을 개발하였으며 개발된 알고리즘은 기존의 기술과 비교하여 다음과 같은 장점을 가짐.

1. 기본요금 산정 특성을 반영한 피크저감량 산정을 통하여 과도한 피크 저감 방지
2. 에너지저장장치의 Cycle life cost를 반영하여 충·방전 상태변화억제
3. 제약완화를 통해 운영의 연속성 확보



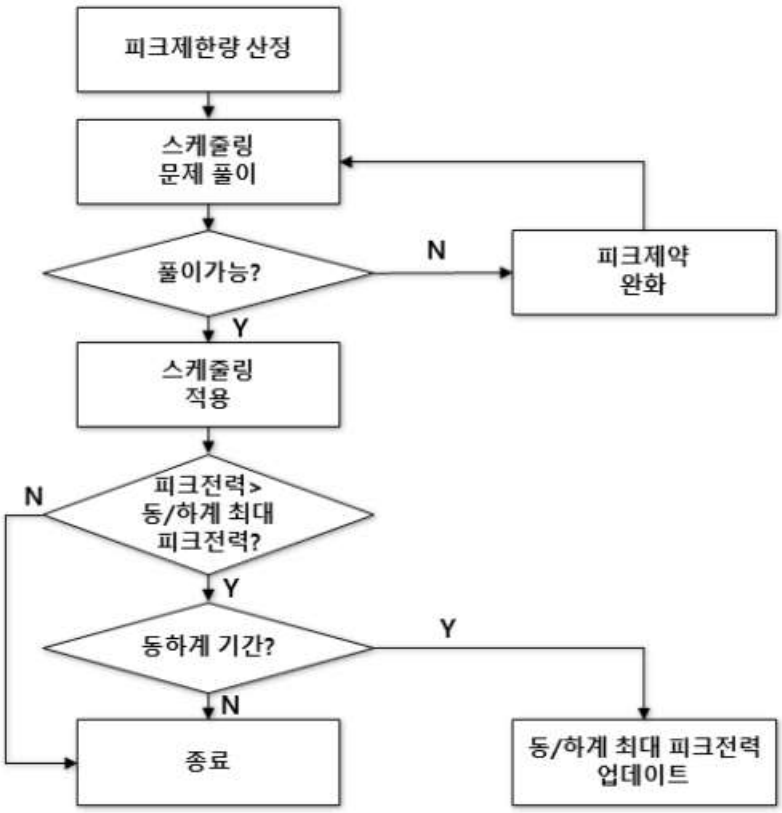
<그림 3-5-33> 기본요금의 특성을 반영한 피크저감량 산정

- 위 그림과 같이 기본요금은 직전 12개월과 당월의 피크전력 중 더 큰 값을 기준으로 산정되기 때문에 직전 12개월의 피크전력(연간 피크) 및 일간 피크 중 더 큰 값 이상으로 피크전력을 저감하지 않아도 됨.
- 도시철도 시스템의 피크전력은 출근시간에 발생하며 이는 경부하요금 적용시간이기 때문에 과도한 피크저감은 기본요금 절감효과를 나타내지 않으면서 전력량요금 절감효과를 저해하기 때문에 해당 시간의 방전을 억제할 필요가 있음.



<그림 3-5-34> 방전비용 적용 유무에 따른 충·방전량 변화

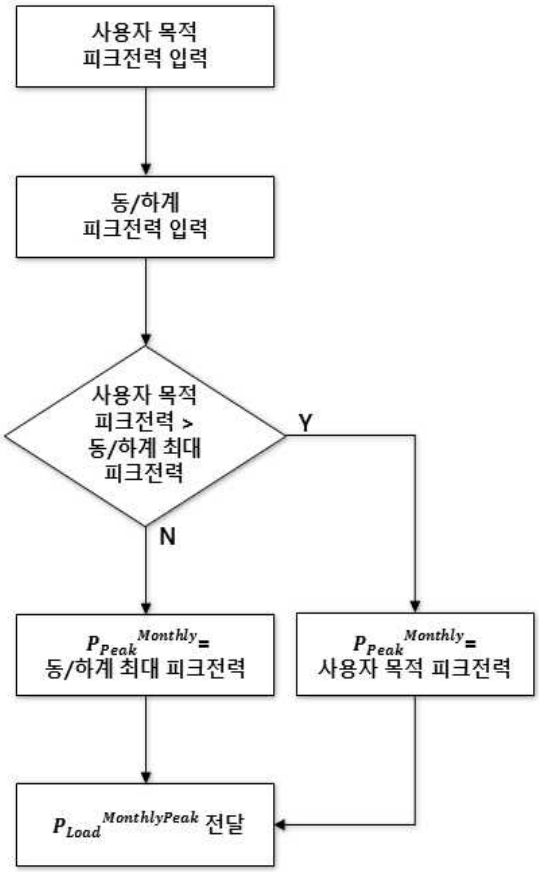
- <그림 3-5-34>은 방전비용 적용 유무에 따른 충·방전량 변화를 나타내며, 방전비용을 적용하지 않은 경우 전력량요금 차이를 이용한 수익증가를 위하여 충전 및 방전을 반복하는 것을 관찰할 수 있음.
- 잦은 충·방전 상태 변화는 에너지저장장치의 수명에 악영향을 끼치므로, 산정된 방전비용보다 낮은 수익이 예상되는 소매요금 차익거래는 방지하여야 함.
- 마지막으로 문제가 풀리지 않아 에너지저장장치의 작동이 정지되는 것을 방지하기 위하여 문제가 풀리지 않을 경우 피크제약을 완화시켜 연속적인 운영이 가능하게 함.
- 이는 복합에너지 통합 스케줄링 문제에서 피크전력제약을 제외한 다른 제약들은 기기의 동작에 관련된 제약이기 때문에 충·방전을 수행하지 않는다는 자명한 답에 대하여 feasibility를 만족하므로, infeasibility를 유발하는 유일한 제약을 완화하면 문제 풀이가 가능하기 때문임.



<그림 3-5-35> 도시철도 복합에너지 시스템 스케줄링 알고리즘

- <그림 3-5-35>은 도시철도 복합에너지 시스템 스케줄링 알고리즘의 flow chart를 나타냄. 기본요금은 월간 피크전력에 의하여 산정되므로 스케줄링 시 목적함수에 반영하는 데에 한계가 있어 도시철도 복합에너지 시스템 스케줄링 문제의 제약조건에 의해 절감됨. 기본요금 절감은 일간 전력구매량의 최대량을 특정 값 이하로 제한하는 형태로 수행 되며 이 값은 기본요금의 산정방법의 특징을 반영함.
- 기본요금은 직전 12개월 중 동계(12, 1, 2월), 하계(7, 8, 9월) 및 당월 피크전력 중 가장 큰 값을 적용함. 따라서 사용자가 원하는 스케줄링 대상일의 피크전력 값이 직전 12개월 중 동·하계의 피크전력보다 낮다면, 이 값 이하로 피크전력을

저감하여도 기본요금 절감효과는 나타나지 않음. 따라서 자동으로 반복되는 복합에너지 스케줄링 과정에서 피크전력 제한량을 산정할 수 있는 다음과 같은 알고리즘이 필요함.



<그림 3-5-36> 피크전력 제한량 산정 알고리즘

- 피크전력 제한량이 정해지고 나면 도시철도 복합에너지 최적스케줄링을 수행하기 위한 최적화 기반 문제를 생성함. 제약조건을 만족하는 실행가능영역 내에서 목적함수를 최소화 혹은 최대화 시키는 답을 찾는 일련의 과정을 최적화라 칭하며 최적화에 사용되는 변수의 특징에 따라 선형계획법, 정수계획법, 비선형계획법 등으로 구분됨. 복합에너지 통합 스케줄링 알고리즘은 구성 요소들의 물리적 한계 및 구동 중 제약조건을 만족해야 하며, 일간 전력 구매량을 최소화해야 하므로 최적화에 기반을 두어 구성될 수 있으며, 본 과제에서는 Mixed Integer Linear Programming 기반의 최적화 문제를 구성함.

(4) 도시철도 복합에너지 시스템 스케줄링 문제 구성

(가) 목적함수 구성

목적함수 = 일간 전력량 요금 + 에너지저장장치 방전비용

- 목적함수는 일간 전력량 요금과 에너지 저장장치의 방전비용으로 구성되며 이를 최소화하며, 이 때 모든 비용은 [원]을 단위를 사용함.

- 전력량 요금은 특정 시간의 전력 구매량($P_{buy,t}$)과 그 시간의 전력량 요금 단가(c_t)의 곱의 총합으로 계산되며 식 (5.7)의 첫 번째 항과 같이 표현됨.

$$z = \sum_{t=1}^{T} w_t c_t P_t^{Buy} + \sum_{t=1}^{T} c_{dchr} u_t \tag{5.7}$$

- 이 때 w_t는 가중치이며 23시~9시까지 같은 전력량요금 단가가 적용되기 때문에 피크저감을 위한 충전 시 해당 시간 내에 임의의 시간에 충전하는 것을 방지하기 위해 도입함. 방전을 위해 7~8시 경에 충전을 수행할 경우 오히려 피크전력을 증가시킬 우려가 있으므로 이를 막기 위해 같은 전기요금 단가를 적용받는 시간 내에서도 요금에 가중치를 두어 충전시간을 유도할 필요가 있음. 새벽 4시~6시 사이에 1보다 작은 가중치를 부여하여 해당 시간에 충전을 수행하도록 유도함. 추후 일간 전력량 요금 계산 시에는 가중치가 고려된 목적함수의 최적값을 사용하지 않고, 전력 구매량에 직접 해당 시간의 전력량 요금 단가를 곱하여 정확한 전력량 요금 사용량 계산해야 함.
- 방전비용을 도입함으로써 에너지 저장장치의 불필요한 충·방전을 방지하여 수명 감소를 방지하였으며 이는 식 (5.7)의 두 번째 항과 같이 표현됨.

(나) 제약조건 구성

- 도시철도 복합에너지 시스템의 제약조건은 복합 발전원들의 성능 제약, 계통 내 수급조건 및 피크전력 제한 등을 나타내며 다음과 같이 분류 될 수 있음.

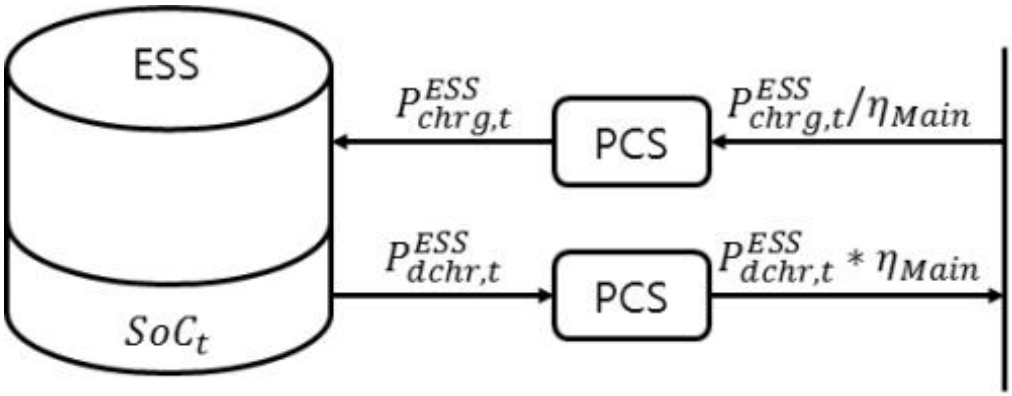
1. 에너지저장장치 제약조건
2. 태양광 에너지저장장치 제약조건
3. 수급조건
4. 피크전력 제약조건

① 에너지저장장치 제약조건

- 에너지저장장치의 방전비용이 고려되었으므로, 에너지저장장치 제약조건은 에너지저장장치의 충·방전 상태변화를 감지할 수 있어야 하며 이를 위해 에너지저장장치의 충전량 및 방전량을 별도의 변수로 분리함.

$$P_t^{ESS} = P_{chrg,t}^{ESS} - P_{dchr,t}^{ESS} \qquad \forall t \in t \tag{5.8}$$

- $P_{chrg,t}^{ESS}$는 에너지저장장치의 시간 t에서 충전량을 나타내는 결정변수로 0보다 큰 실수 값을 가지며 $P_{dchr,t}^{ESS}$는 에너지저장장치의 시간 t에서 방전량을 나타내는 결정변수로 0보다 큰 실수 값을 가짐.



<그림 3-5-37> 에너지저장장치 충·방전 모델링

- <그림 3-5-37>은 에너지저장장치의 충·방전에 관련된 변수들의 상관관계를 보여줌. 에너지저장장치는 전력변환장치(PCS)를 통해 충·방전을 수행하며, PCS의 성능에 따라 충전 및 방전량의 한계가 정해지며, 식 (5.9)과 (5.10)는 이러한 제약을 나타냄.

$$P^{ESS}_{chrg,t} \leqq P^{ESS}_{\max,chrg} \qquad \forall t \in T \tag{5.9}$$

$$P^{ESS}_{dchr,t} \leqq P^{ESS}_{\max,dchr} \qquad \forall t \in T \tag{5.10}$$

- 충·방전 시 PCS의 효율에 의해 전력 손실이 발생하며 에너지저장장치에 실제로 출력하는 전력과 계통에 출입하는 전력에는 차이가 발생하며, 이를 효율을 통해 나타냄. 효율이 1보다 작을 경우 충전 시에는 복합에너지 시스템에서 흡수한 전력에 비해 적은 량이 실제로 충전되며 방전 시에는 이와 반대로 에너지저장장치에서 방전한 량보다 더 적은 전력이 복합에너지 시스템으로 전달되며, 이는 이후에 다룰 수급조건에서 수학적으로 반영함.
- 에너지저장장치의 충·방전에 따라 SoC가 변화하며, 일반적으로 SoC와 충·방전량은 선형적인 관계를 가지는 것으로 모델링됨. 최적화 문제 구성 시 SoC는 충·방전량에 의해 변화하므로, 제약조건의 형태로 변화를 명시해 줄 필요가 있음. 에너지저장장치의 SoC는 이전시간의 SoC와 현재 시간의 충·방전량에 의해 결정되며 식 (5.11)은 이러한 관계를 나타내며, Δt는 단위시간을 나타냄.

$$SoC^{ESS}_{t} = SoC^{ESS}_{t-1} + \frac{P^{ESS}_{t}}{Cap^{Main}_{ESS}} \Delta t \qquad \forall t \in T \tag{5.11}$$

- 에너지저장장치의 SoC는 앞서 언급한 것과 같이 특정 범위 내에서 유지되어야하며, 이는 식(5.12) 및 (5.13)과 같이 표현됨.

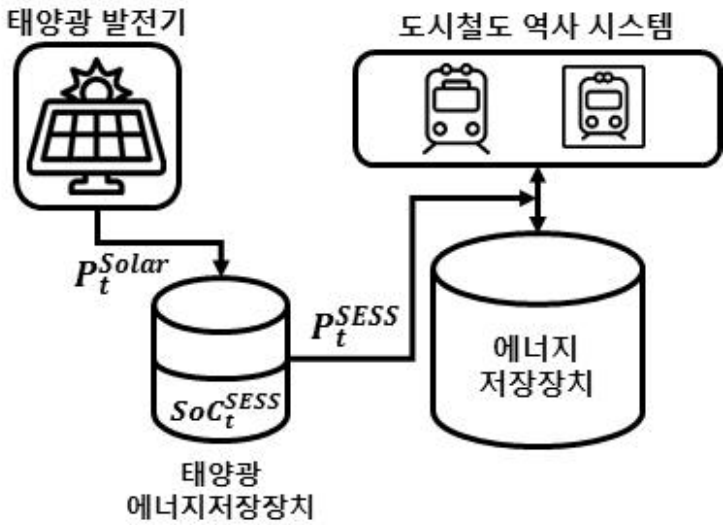
$$SoC^{ESS}_{\min} \leqq SoC_t \qquad \forall t \in T \tag{5.12}$$

$$SoC^{ESS}_{t} \leqq SoC^{ESS}_{\max} \qquad \forall t \in T \tag{5.13}$$

- 시작시간과 종료시간의 경우 스케줄의 연속성을 보장하기 위해 같은 값으로 유지해야 하며 스케줄링 시작시간과 마감시간은 오전 12시 경이므로 최저 SoC를 유지하여 새벽에 충전하여 첨두부하 발생시간에 대비할 수 있도록 하며 이는 식 (5.14)과 같이 표현됨.

$$SoC_0 = SoC_T = SoC_{\min} \tag{5.14}$$

② 태양광 에너지저장장치 제약조건



<그림 3-5-38> 태양광 발전기 및 태양광 에너지저장장치 모델링

- 태양광 시스템은 태양광 패널, 태양광용 에너지 저장장치 및 이 두 장치를 연결하는 전력변환 장치와 태양광용 에너지 저장장치를 도시철도 시스템에 연결하는 전력변환장치로 구성됨. 태양광 발전기의 발전량은 별도로 예측되어야 하며 시간 t에서의 태양광 발전량을 P_t^{Solar}로 표현함.
- 태양광용 에너지 저장장치는 태양광 발전기를 통해서만 충전 되며, 변전소 수전단에 방전하도록 모델링 하며, 이 때 시간 t에서의 방전량을 P_t^{SESS}로 표현함. 태양광용 에너지 저장장치의 전력변환장치에 의한 충전량 및 방전량 제약은 다음과 같이 표현되며, 이 때, 태양광 에너지저장장치의 경우 충전량은 발전기의 출력에 의해 결정되므로 충전량에 대한 제약조건은 무시함.

$$P_t^{SESS} \leqq P_{\max}^{SESS} \qquad \forall t \in T \tag{5.15}$$

- 태양광용 에너지 저장장치의 SoC는 직전시간의 SoC와 현재시간의 태양광 발전량 및 방전량에 의하여 정의되며 이를 수식으로 나타내면 식 (5.16)과 같으며, 이 때, Δt는 단위시간을 나타냄.

$$SoC_t^{SESS} = SoC_{t-1}^{SESS} + \frac{P_t^{Solar} - P_t^{SESS}}{Cap_{ESS}^{Solar}} \Delta t \qquad \forall t \in T \tag{5.16}$$

- 태양광용 에너지 저장장치 역시 SoC범위에 제약을 두며 이는 식 (5.17) 및 (5.18)과 같이 표현됨.

$$SoC_{\min}^{SESS} \leqq SoC_t^{SESS} \qquad \forall t \in T \tag{5.17}$$

$$SoC_t^{SESS} \leqq SoC_{\max}^{SESS} \qquad \forall t \in T \tag{5.18}$$

- 에너지저장장치와 마찬가지로 스케줄링 수행 시작시간과 마감시간의 SoC를 같은 수준으로 유지함. 스케줄링 마감시간과 시작시간의 경계인 오전 12시경에는 태양광 발전량이 극히 적으며, 전력량 요금 단가도 제일 낮은 시간대이기 때문에 이전 최대부하 시간대와 중간부하 시간대에 태양광용 에너지 저장장치의 에너지 잔량을 모두 방전한 상태이어야 하며, 이러한 관계를 식으로 나타내면 다음과 같음.

$$SoC_0^{SESS} = SoC_T^{SESS} = SoC_{\min}^{SESS} \tag{5.19}$$

③ 수급조건

- 모든 시간 t에서 계통의 전력수급조건이 만족되어야 하며 이는 전력 생산량의 합과 수요의 합은 항상 같게 유지되어야 함을 나타내며, 에너지 저장장치가 연결되는 변전소 수전단을 기준으로 수요와 공급의 평형을 고려함. 변전소 수전단에서 고려되어야 할 전력은 역사 및 차량의 부하, 에너지저장장치의 충·방전량, 태양광용 에너지 저장장치의 방전량 및 전기공급사업자로 부터의 전력구매량임. 상기한 것처럼 전력 생산량의 합과 수요의 합은 같아야 하며 전력변환장치의 효율을 고려한 전력수급 제약조건은 다음과 같은 수식으로 표현됨.

$$P_t^{Load} + \frac{P_{chrg,t}^{ESS}}{\eta_{ESS}} = \eta_{ESS} P_{dchrg,t}^{ESS} + \eta_{SESS} P_{dchr,t}^{SESS} + P_t^{Buy} \qquad \forall t \in T \tag{5.20}$$

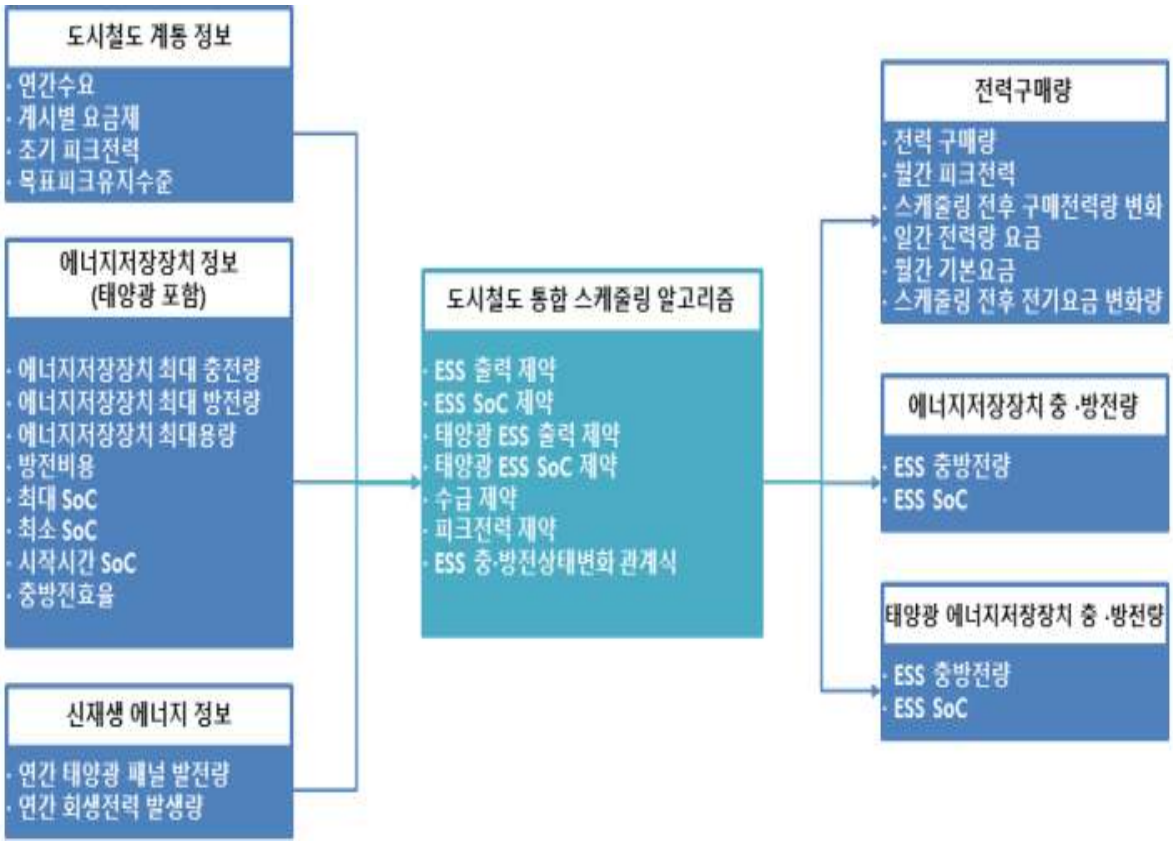
④ 피크전력 제약조건

- 입력 변수 중 psr은 첨두부하 목표 저감량을 나타내며 당일 예측된 부하에 대하여 스케줄링 시행 후 피크부하를 몇%수준으로 유지할지를 나타냄. $psr = 0.8$이라면 스케줄링이 시행되는 매일에 대해 예측된 피크부하를 예측된 부하의 80% 수준으로 유지함을 의미하며, 본 알고리즘에서는 <예측된 피크부하 × psr>을 사용자 목적 피크부하로 설정하여 이 값을 동·하계 최대 첨두부하와 비교하여 첨두부하 제한량 $P_{Peak}^{Monthly}$을 산정함.

- 첨두부하는 산업용 전기요금을 이루는 전력량 요금과 기본요금 중 기본요금 산정에 사용되며, 기본요금은 전력공급설비(발전소, 송·배전선로) 관련 감가상각비, 수선유지비, 판매관리비 등의 고정비를 회수하기 위하여 부과됨. 기본요금은 검침 당월을 포함한 직전 12개월 중 7~9월분(하계기간), 12~2월분(동계기간) 및 당월분 중 가장 큰 최대수요전력(15분 평균 수요 전력)을 기준으로 산정하므로, 사용자 목적 첨두부하가 동·하계 기간 최대 첨두부하보다 작을 경우 스케줄링을 통하여 목적한 첨두부하 수준을 달성하더라도 기본요금 저감에는 영향을 줄 수 없음. 도시철도 복합에너지 시스템 스케줄링 문제에서는 모든 시간의 전력 구매량을 목표 피크 수준 아래로 유지하는 제약조건을 통해 피크전력을 제한하며, 이 특정 값은 앞서 설명한 피크전력 제한량 산출 알고리즘을 통하여 산출함.

$$P_t^{Buy} \leqq P_{Peak}^{Monthly} \qquad \forall t \in T \tag{5.21}$$

- 도시철도 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 알고리즘의 입출력 데이터 및 제약사항은 다음과 같음.



<그림 3-5-39> 도시철도 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 알고리즘의 입출력 데이터

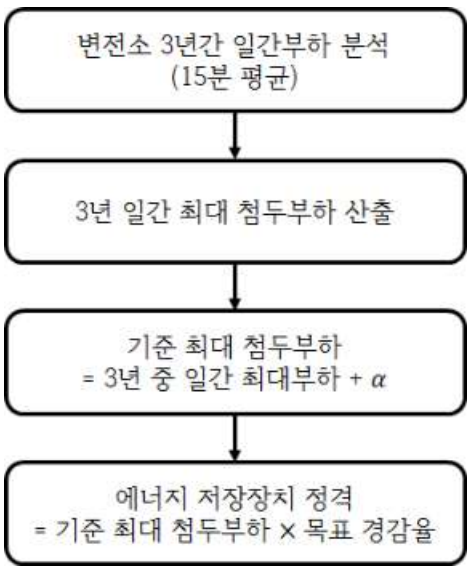
- 도시철도 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 문제는 다음과 같음.

<표 3-5-8> 목적함수, 제약조건

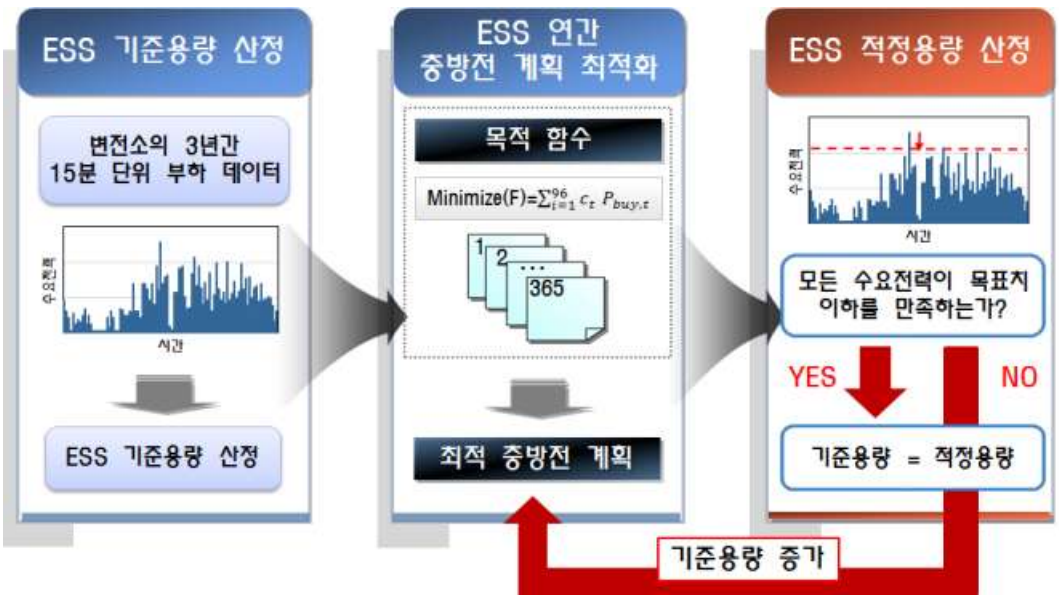
목적함수	$z = \sum_{t=1}^{T} w_t c_t P_t^{Buy} + \sum_{t=1}^{T} c_{dchr} u_t$
제약조건	**에너지저장장치** $P_t^{ESS} = P_{chrg,t}^{ESS} - P_{dchr,t}^{ESS} \quad \forall t \in T$ $P_{chrg,t}^{ESS} \leqq P_{\max,chrg}^{ESS} \quad \forall t \in T$ $P_{dchr,t}^{ESS} \leqq P_{\max,dchr}^{ESS} \quad \forall t \in T$ $SoC_t^{ESS} = SoC_{t-1}^{ESS} + \frac{P_t^{ESS}}{Cap_{ESS}^{Main}} \Delta t \quad \forall t \in T$ $SoC_{\min}^{ESS} \leqq SoC_t \quad \forall t \in T$ $SoC_t^{ESS} \leqq SoC_{\max}^{ESS} \quad \forall t \in T$ $SoC_0 = SoC_T = SoC_{\min}$ **태양광 에너지저장장치** $P_t^{SESS} \leqq P_{\max}^{SESS} \quad \forall t \in T$ $SoC_t^{SESS} = SoC_{t-1}^{SESS} + \frac{P_t^{Solar} - P_t^{SESS}}{Cap_{ESS}^{Solar}} \Delta t \quad \forall t \in \{1 \ldots T\}$ $SoC_{\min}^{SESS} \leqq SoC_t^{SESS} \quad \forall t \in T$ $SoC_0^{SESS} = SoC_T^{SESS} = SoC_{\min}^{SESS}$ $SoC_t^{SESS} \leqq SoC_{\max}^{SESS} \quad \forall t \in T$ **수급조건** $P_t^{Load} + \frac{P_{chrg,t}^{ESS}}{\eta_{ESS}} = \eta_{ESS} P_{dchrg,t}^{ESS} + \eta_{SESS} P_{dchr,t}^{SESS} + P_t^{Buy} \quad \forall t \in T$ **피크전력 제약조건** $P_t^{Buy} \leqq P_{Peak}^{Monthly} \quad \forall t \in T$

다. 역사 부하를 고려한 분산전원 적정용량 산정 방안

- 목표 피크부하 저감량을 달성하기 위하여 에너지저장장치의 PCS는 저감시키고자 하는 첨두부하 값보다 큰 용량을 가져야 하며, 충분한 기간의 과거데이터를 분석하여 최대 피크부하 값에 여유값 α을 더하여 기준 최대 첨두부하 값을 도출하고 이 기준 최대 첨두부하 값에 대한 목표 경감률을 설정함. 경감률 설정 시 전지용량 이용률 및 전력변환장치의 충/방전 효율을 고려하여야 하며, 에너지 저장장치의 정격은 기준 최대 첨두부하에 목표 경감률을 곱하여 산정됨. 이상의 에너지 저장장치 정격 산정 절차는 다음과 같음.



<그림 3-5-40> 에너지 저장장치 정격 산정 절차



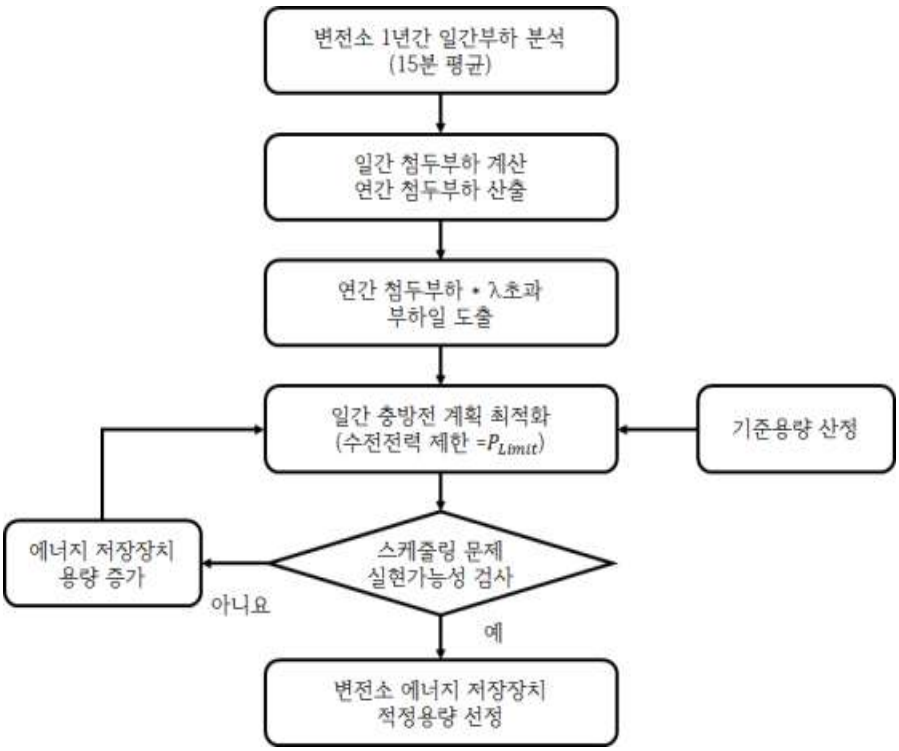
<그림 3-5-41> 복합에너지원 적정용량 산정 절차

- 도시철도 복합에너지 시스템에서 첨두부하의 목표 경감률을 만족시키기 위해서는 첨두부하 지속시간동안 전력을 공급할 수 있도록 충분한 에너지를 저장해 둘 수 있어야 하며, 목표하는 피크부하 저감량을 달성하기 위해 필요한 에너지 저장장치 배터리의 용량을 배터리 정격용량으로 정의하고 정격용량 산정절차를 수행함.
- 에너지 저장장치의 정격용량을 산정하기 위해서는 과거 데이터들을 대상으로 최적 스케줄링을 도출하여 주어진 에너지 저장장치의 용량이 모든 과거 데이터들에 대해 목표 피크부하 저감률 달성여부를 판단해야 하므로 선형계획법에 기반을 둔 스케줄링 문제를 정확히 정의할 필요가 있으며, 도시철도 복합에너지 시스템의 목적함수와 수전전력 제한을 각각 식(5.22)과 식(5.23)과 같이 정의함

$$Min \;\; Cost = \Sigma_{t=1}^{T} c_t P_{buy,t} \tag{5.22}$$

$$P_{buy,t} \leqq P_{Limit} \tag{5.23}$$

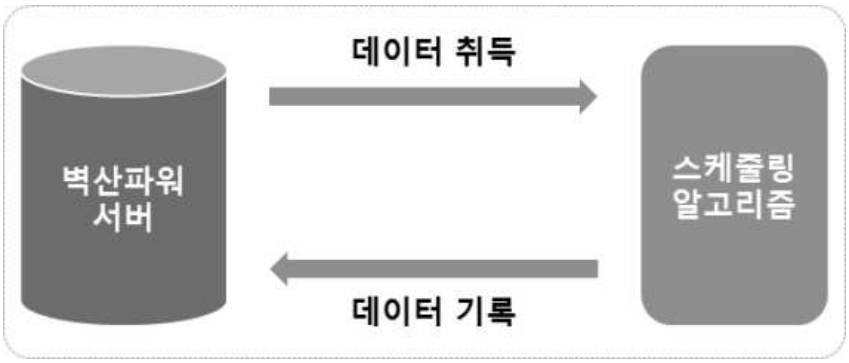
- 과거의 모든 데이터에 대하여 스케줄링을 시도하고 스케줄링 실현가능 여부를 판단하려면 간단한 선형계획법 기반 스케줄링 문제라도 계산량이 증가하여 계산시간이 늘어날 수 있으므로 일간 첨두부하가 일정 크기보다 작은 날은 정격용량 산정에 영향을 주지 못하므로 제외시키는 작업이 필요하며, 이를 위해 기준이 되는 크기는 연간 첨두부하의 일정비율 λ을 곱하여 계산되며 일간 첨두부하가 이 값을 넘기는 날에 대해서만 스케줄링을 시도함. 이상의 에너지 저장장치 정격용량 산정 절차는 다음과 같음.



<그림 3-5-42> 에너지 저장장치 적정용량 산정 절차

8. 현장적용 및 종합 성능평가

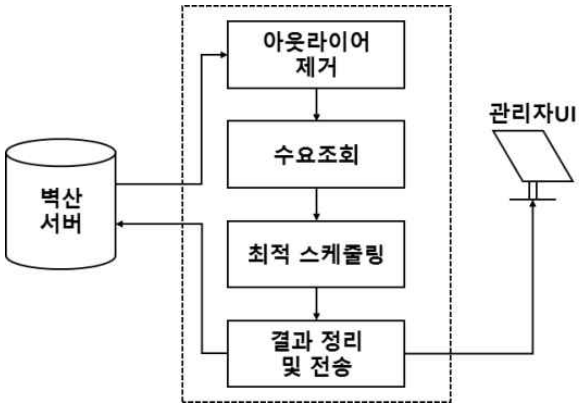
가. 도시철도 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 알고리즘 현장구축



<그림 3-5-43> 일 단위 해석 수행 절차

- 위와 같이 실제 운영에 있어 연속적인 일 단위 해석이 수행되기 위해서는 스케줄링 알고리즘에 매일의 수요를 전달하여 주고, 스케줄링 결과를 저장할 수 있는 통합 해석환경이 필요함. 본 과제에서는 벽산파워의 서버가 에너지관리시스템으로서 작동하기 때문에 통합운영시스템 서버와 연결하여 과거 수요 실적을 조회하고, 스케줄링 알고리즘을 작동시키며 그 결과를 사용자에게 표시하여 주고, 서버에 기록할 수 있는 절차가 필요함. 통합운영시스템 서버와의 모든 작업은 온라인상에서 이루어지며, 이에 따라
  1) 서버와 클라이언트 사이의 상호작용에서 사용할 데이터 통신 규약(프로토콜)이 필요함.
  2) 서버와 클라이언트는 데이터를 주고받을 때 해당 프로토콜에 따라 데이터를 주고받아야 함.
  3) 서버와 통신하여 얻은 결과를 다시 스케줄링 알고리즘이 사용할 수 있도록 분석하고, 가공하여 전달하는 과정(파싱)이 필요함.
  4) 또한 최적 스케줄 계산 시 다음날의 수요 데이터는 존재하지 않으므로, 수요를 예측할 수 있는 과정이 필요함.
  5) 이 과정에서 유효하지 않거나, 평상일과 수요 패턴이 상이하여 예측에 악영향을 줄 수 있을 것으로 판단되는 데이터를 제거하는 아웃라이어를 제거하는 작업이 필요함.
  6) 스케줄링에 필요한 데이터를 모두 취득하였을 경우, 이를 사용함.
  7) 마지막으로 스케줄링 알고리즘의 결과물을 서버에 전송하기에 알맞은 형태로 가공하고, 실제 서버에 저장하는 작업이 필요함.

- 이러한 환경을 구성하기 위하여, 도시철도 복합에너지 시스템의 스케줄을 계산하는 모듈 외에 <그림 3-5-44>과 같이 서버와의 통신을 수행하는 모듈 및 수요예측, 아웃라이어 제거 기능을 수행하는 모듈이 추가적으로 필요함.



<그림 3-5-44> 현장구축을 위한 추가 모듈 설계

- 또한 도시철도 복합에너지 시스템 운영자를 위한 User Interface(UI)가 필요하며, 개발된 UI는 다음 그림과 같으며, 별도의 웹서버 기반으로 동작함.



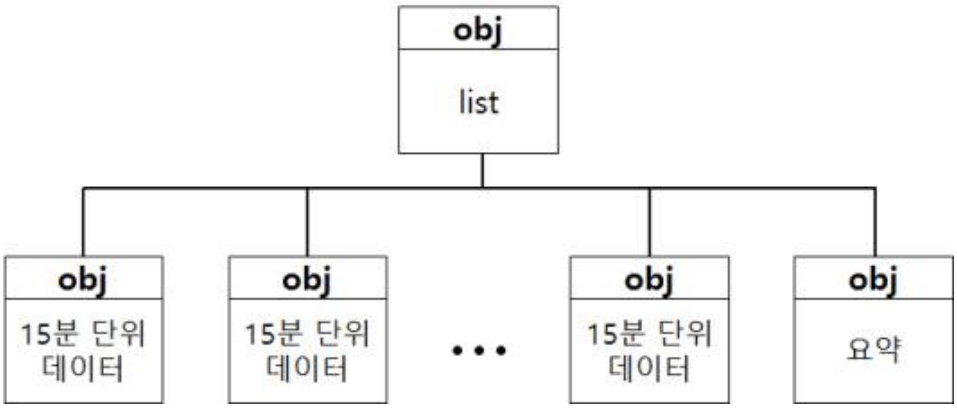
<그림 3-5-45> 도시철도 복합에너지 시스템 관리자용 UI

(1) 데이터 통신 규약

- 통합운영시스템 서버와 주고받는 데이터는 oBix 규약을 따르며 인터넷을 통해 클라이언트 프로그램과 연결됨. oBix는 Open Building Information Exchange의 약자로 빌딩 내의 기계 및 전자 설비의 통신을 위해 개발된 표준 웹 서비스 프로토콜이며 oBIX는 여러 장치를 간단한 모델을 통해 표현하는 프로토콜로써 XML문법을 따름. oBix는 웹서비스 프로토콜이기 때문에 REST 아키텍처를 사용하는 웹 환경에서 사용할 수 있어야 하는 특징을 가지므로 클라이언트 역시 REST 아키텍처를 사용하여 간편하게 통신할 수 있음. oBIX 프로토콜에 맞춰 전달된 결과는 XML 1.1에 따라 파싱하며, 이 과정에서 oBIX 규약에 맞춰 전달 된 결과는 항상 well-formed XML임을 가정함.

(2) 수요데이터 및 신재생 발전량 데이터 조회

- 개발의 편의성을 위해 다양한 HTTP 라이브러리와 파싱라이브러리를 제공하는 Python언어를 통해 통합 해석 환경을 구축하였으며 python 코드 내에서 DLL 형식으로 구현 된 복합에너지 통합 스케줄링 알고리즘을 실행시키는 방식을 취함.
- 통합 운영시스템 서버에서 수요 및 신재생 데이터를 조회하기 위해서는 우선 서버와 통신을 수행하여야 하며 서버와 클라이언트는 HTTP 프로토콜을 사용함. 클라이언트는 POST request를 통해 서버에서 원하는 데이터를 불러오며, 요청 시 전송하는 URL을 통해 계측을 원하는 지점과 계측방식을 지정하여 주며, 복합에너지 스케줄링 알고리즘은 각 지점의 과거 15분 데이터만을 필요로 하므로 rollup 기능을 사용함.
- 통신이 완료되면 서버는 요청에 따라 데이터를 반환하며, 이 때 서버는 oBIX 프로토콜에 맞추어 수요 및 신재생 데이터를 반환하며, 이를 복합에너지 통합 스케줄링 알고리즘에서 사용하기 위해서는 파싱작업이 필요함. 다음 코드는 rollup 요청 시 결과의 일부분을 나타내며, 요청에 대한 응답은 다음 그림과 같은 구조를 가진 oBIX 데이터로 전송됨.



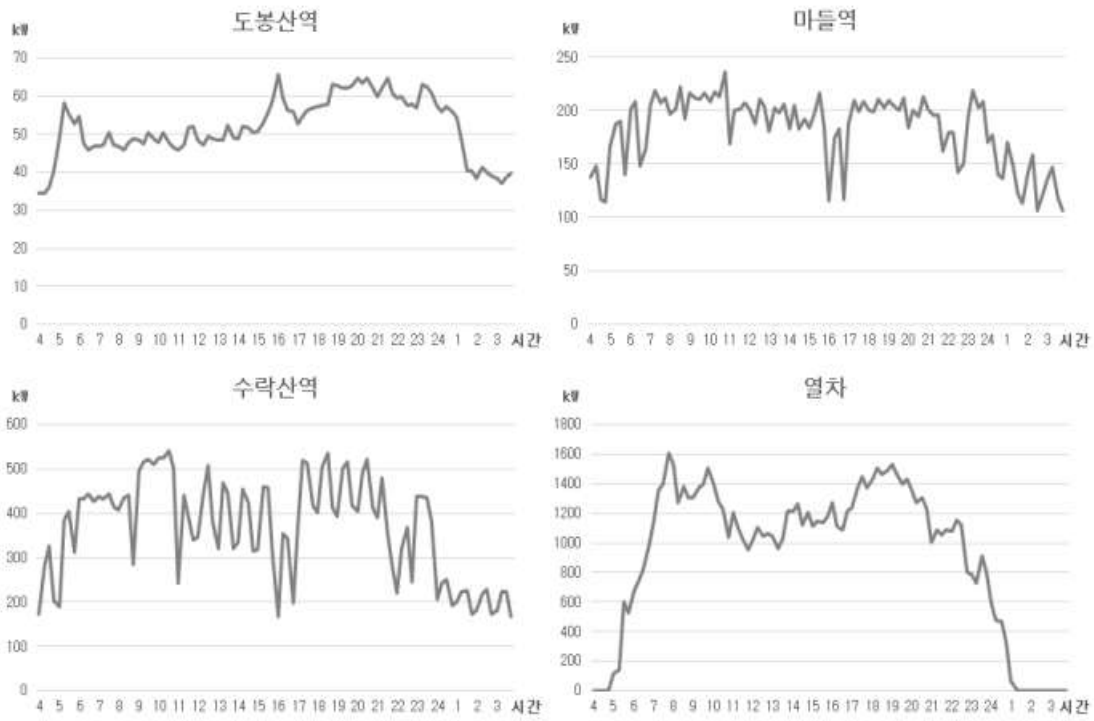
<그림 3-5-46> rollup 요청에 대한 응답의 데이터 구조

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<obj
href="http://railwayems2014.iptime.org/dpobix/obix/geo/station/dobongsan/rollup/"
is="obix:HistoryRollupOut obix:HistoryQueryOut"
xmlns="http://obix.org/ns/schema/1.0"
xmlns:psxml="http://bspower.co.kr/2009/psxml">
  <int name="count" val="96" />
  <int name="total" val="96" />
  <abstime name="start" val="2014-07-23T00:00:00.000+09:00" />
  <abstime name="end" val="2014-07-23T23:45:00.000+09:00" />
  <list name="data" of="#StatRecord">
    <obj>
      <abstime name="start" val="2014-07-23T00:00:00.000+09:00" /
      <abstime name="end" val="2014-07-23T00:15:00.000+09:00" /
      <real name="energy" val="12800.0" /
      <real name="reactiveEnergy" val="6200.0" />
      <real name="powerFactor" val="0.899981" />
      <real name="maxPower" val="51200.0" />
      <real name="charge" val="1352.95996" />
    </obj>

... 반복

</list>
  <obj name="wrapup" href="#StatRecord">
    <abstime name="start" />
    <abstime name="end" />
    <real name="energy" val="1231200.0" unit="obix:units/watt_hour" />
    <real name="reactiveEnergy" val="620500.0"
unit="obix:units/volt_ampere_reactive_hour" />
    <real name="powerFactor" val="0.893001" unit="obix:units/power_factor" />
    <real name="maxPower" val="63600.0" unit="obix:units/watt" />
    <real name="charge" val="130137.839874" unit="psxml:units/won" />
    <real name="energyAcc" val="0.0" unit="obix:units/watt_hour" />
  </obj>
</obj>
```

- 분석은 서버 연결 때와 마찬가지로 python 환경에서 수행하며, 각각의 하위 obj들에 대해 “energy”값을 수집하였으며, 15분 단위 전력량이므로 15분 단위 전력 값으로 바꾸기 위하여 4를 곱하여 수집하였으며, Wh대신 kWh단위를 사용하여 복합에너지 통합 스케줄링을 진행함.



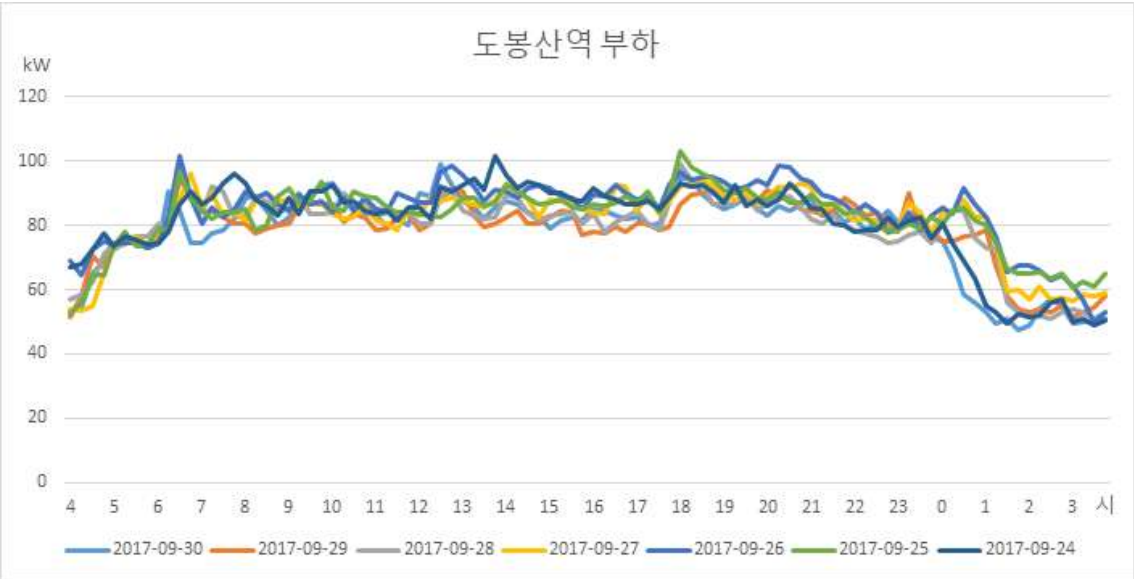
<그림 3-5-47> 2014년 8월 1일 취득 지점별 수요실적

- <그림 3-5-47>은 취득 포인트별 2014년 8월 1일의 15분 단위 수요 실적을 나타내며, 역사 데이터의 경우 도봉산역 마들역 수락산역 데이터가 존재하며, 크게 지상역사(도봉산역) 및 지하역사(수락산역 및 마들역)로 나뉨. 역사 부하는 열차부하에 비해 일정하며, 낮은 전력수요 패턴을 보임.
- 지상역사는 공조 시스템 및 조명 부하가 적기 때문에 지하역사에 비해 상대적으로 적은 전력소모를 보이며, 실측 데이터를 관찰할 경우 도봉산역은 타 역사가 수백kW의 전력소모를 보이는데 반해 100kW이하의 적은 전력을 소모하는 것을 확인할 수 있음.
- 자하역사는 조명 및 공조 시스템에 의한 부하가 크기 때문에 지상역사에 비해 상대적으로 높은 전력소비를 보이며, 또한 공조시스템의 운영 스케줄에 큰 영향을 받으며, 실측 데이터에서도 마들역과 수락산역의 부하를 관찰할 경우 주기적으로 부하가 등락을 반복하는 것을 확인할 수 있음.
- 열차부하의 경우 열차 운행이 없는 시간동안은 전력을 소모하지 않으며, 수요가 시간에 따라 크게 변함을 알 수 있음. 특히 열차 부하의 경우 출근시간인 오전 7~9시경과 퇴근 시간인 오후 6~8시경에 주로 피크전력이 발생하며, 피크전력 발생 빈도는 퇴근시간보다 출근시간이 더 높음.
- 추후 수요예측을 진행하기 위해서는 각 취득 포인트별 전력 수요의 패턴을 알아야 할 필요가 있으며, 전력계통에서의 수요예측과 마찬가지로 요일별 수요 패턴 변화를 주로 관측함. 주중/주말 등 패턴변화가 상이한 그룹으로 묶어 수요예측을 진행하며 열차 운행 스케줄 등에 따라 그룹은 달라질 수 있으며, 다음 그림은 각 취득 포인트별 일주일의 수요 패턴을 나타내며 2017년 9월 24일(일)~2017년 9월 30일(토)의 데이터를 표시함.

- 에너지저장장치 적용 이후 수요값은 에너지저장장치의 충·방전 값이 반영된 값이며, 따라서 수요데이터 수집 시 <그림 3-5-48>와 같이 수요데이터 외에 에너지저장장치의 충·방전량을 함께 고려해야 함. <그림 3-5-48>는 기록된 도봉산역의 수요(점선)와 태양광 에너지저장장치의 충·방전량(막대 그래프) 및 도봉산역의 실제 수요값(실선)을 나타냄. 기록된 도봉산역의 수요값에 태양광 에너지저장장치 충·방전량을 빼주어야 실제 도봉산역에서 사용한 수요값을 얻을 수 있으며, 이는 메인 에너지저장장치가 설치된 수락산역의 부하에도 적용되어야 함.
- 분석은 서버 연결 때와 마찬가지로 python 환경에서 수행하였으며, 각각의 하위 obj들에 대해 “energy”값을 수집하였으며, 15분 단위 전력량이므로 15분 단위 전력값으로 바꾸기 위하여 4를 곱하여 수집하였으며, Wh대신 kWh단위를 사용하여 복합에너지 통합 스케줄링을 진행함.

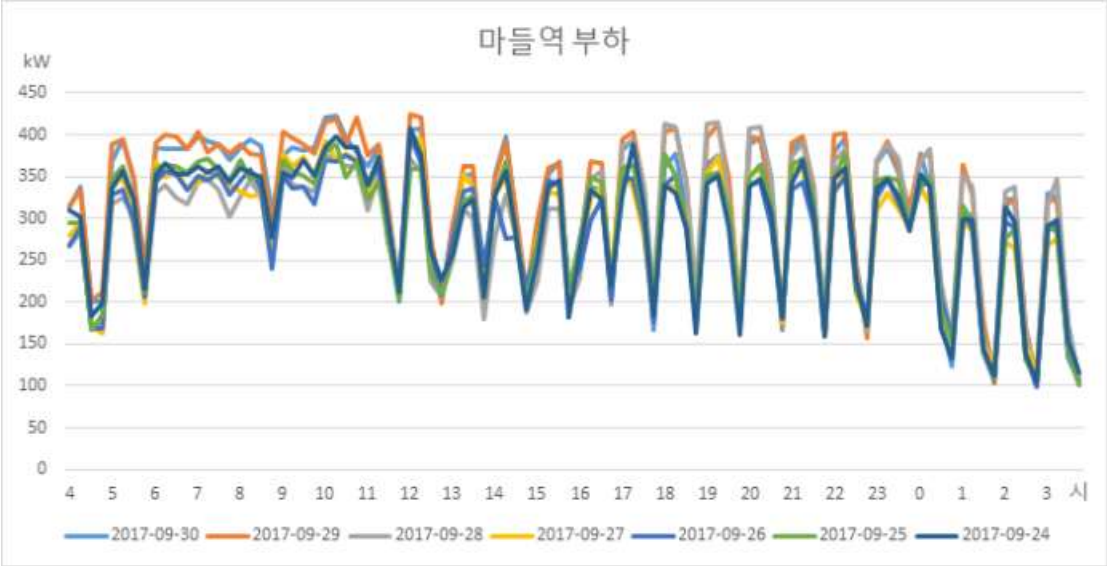


<그림 3-5-48> 에너지저장장치 충·방전량 효과 제거 전후의 도봉산역 수요



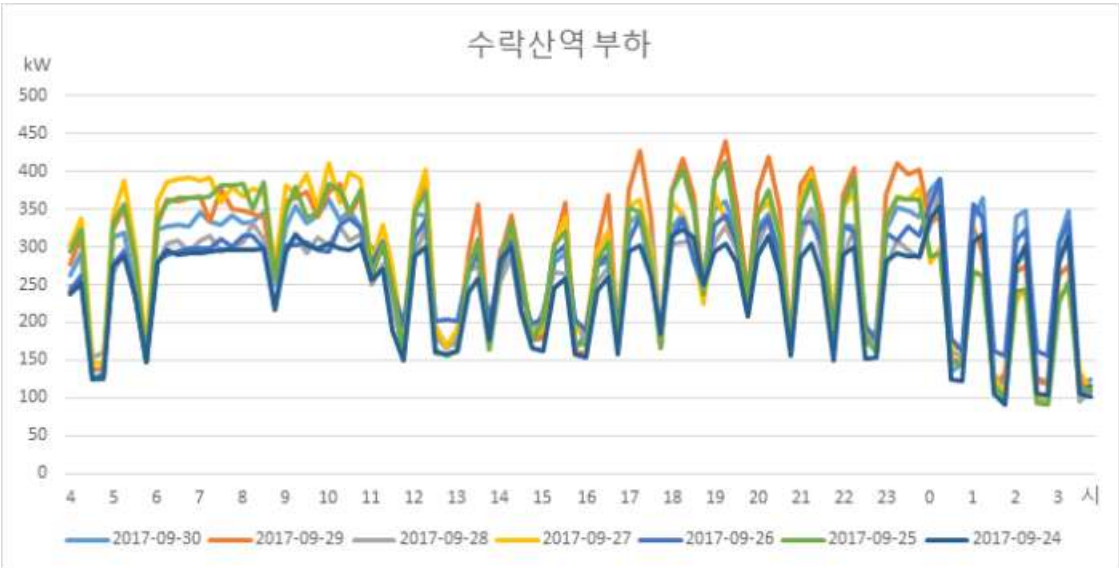
<그림 3-5-49> 도봉산역 요일별 수요 패턴

- <그림 3-5-49>는 도봉산역의 일주일 수요패턴을 나타내며 100kW미만의 낮은 전력을 사용함을 알 수 있으며 이는 도봉산역이 지상 역사임으로 공조 및 냉/난방을 하지 않기 때문일 것으로 추정됨. 주말의 경우 익일 오전 0시~1시 사이의 부하가 주중에 비해 적은 것을 확인됨.



<그림 3-5-50> 마들역 요일별 수요 패턴

- <그림 3-5-50>은 마들역의 일주일 수요패턴을 나타내며 200 ~ 450kW 사이의 전력을 소비함을 알 수 있으며, 지하역사이기 때문에 지상역사인 도봉산역에 비해 높은 수요를 보이며, 도봉산역과 마찬가지로 요일에 따른 뚜렷한 패턴변화가 감지되지 않음. 또한 2014년과 비교하여 전반적인 수요가 상승함.



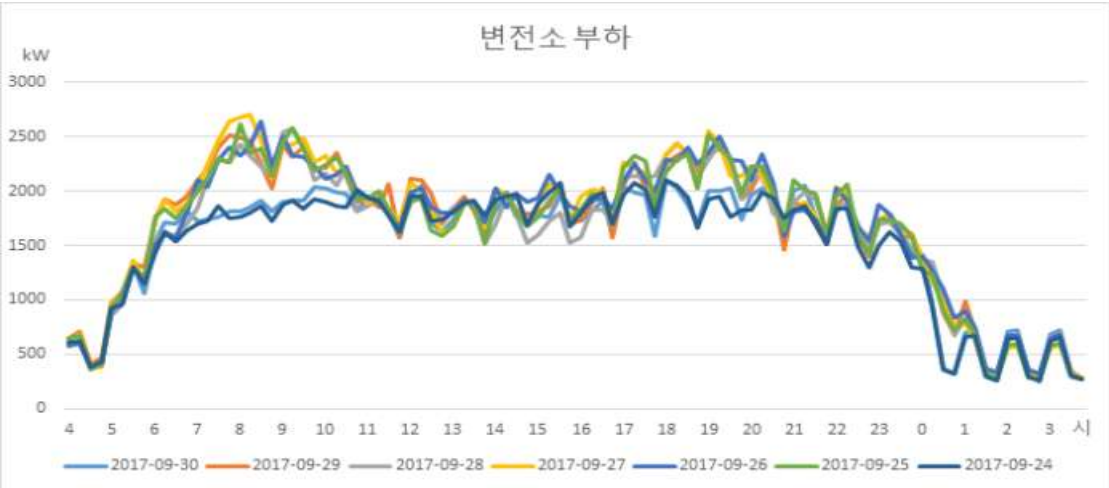
<그림 3-5-51> 수락산역의 수요패턴

- <그림 3-5-51>은 수락산역의 일주일 수요 패턴을 나타내며, 수락산역의 경우 타 역사에 비해 높은 전력 소비를 보임. 매일의 수요 패턴이 불규칙하게 변화하나, 요일별로 상이한 패턴의 변화는 없는 것으로 판단됨. 도봉산역, 마들역 및 수락산역의 부하를 조사한 결과 도시철도 역사 시스템은 열차에 비해 낮은 전력 소비를 보이며, 요일에 따른 수요 패턴 변화가 뚜렷하게 관찰되지 않는 특징을 가지며, 수락산역의 경우 마들역과 비슷한 수요를 보임.



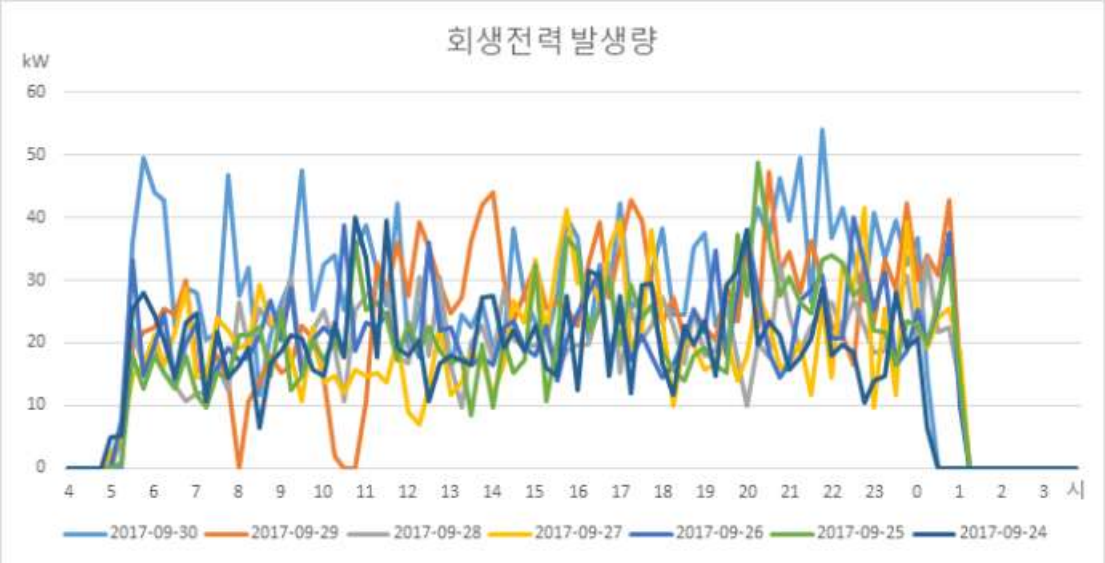
<그림 3-5-52> 열차의 수요패턴

- <그림 3-5-52>은 도시철도 열차의 일주일 수요패턴을 나타내며 열차의 경우 0kW부터 2000kW수준까지 큰 변화폭을 가지며 요일에 따른 패턴 변화가 뚜렷하게 관찰되며, 주중의 경우 출퇴근 시간에 피크전력이 발생하며 이에 따라 주말에 비해 높은 전력 소비가 관찰됨. 변전소부하는 <그림 3-5-53>와 같으며 앞서 소개한 부하의 총합으로 표현되며, 열차부하 패턴과 비슷한 양상을 보이므로 크게 주중과 주말의 패턴으로 분류가 가능함.



<그림 3-5-53> 변전소 부하

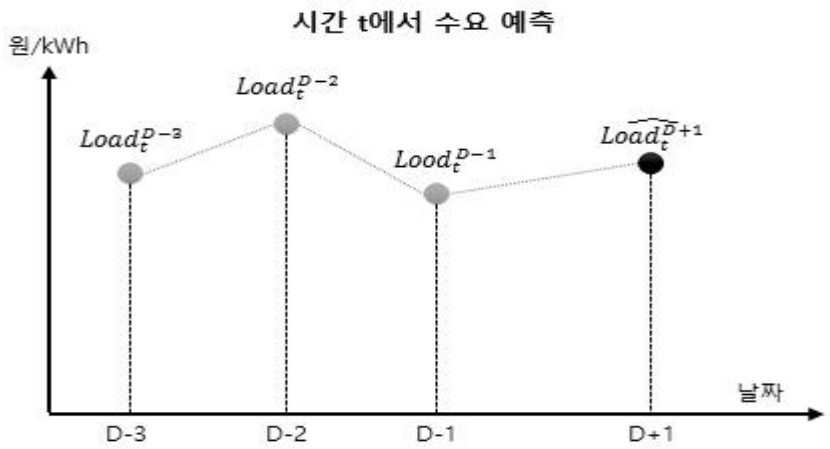
- 마찬가지 방법으로 회생전력의 데이터를 수집하였으며, 그 결과는 <그림 3-5-54>과 같으며 수요 데이터와 마찬가지로 익일 오전 0시에서 1시 사이에 요일별 패턴이 관찰됨.



<그림 3-5-54> 회생전력 발생량

(3) 수요 및 신재생 발전량 예측

- 수요예측은 시계열분석 방법을 이용하여 수행되며, 시계열분석은 계절이나 주간, 일간과 같은 시계열에 따라서 전력수요가 특정 주기성을 가진다는 점에서 착안한 방법으로 시계열분석은 이미 경제학 분야와 통계학 분야에서 오래전부터 연구되어 온 학문이기 때문에 자귀회귀모형(AR), 이동평균모형(MA), 자귀회귀와 이동평균의 혼합모형(ARMA), 지수평활법 등 이미 다양한 예측 모델이 존재하며, 실증 사례들 또한 풍부하다는 장점을 가짐. 본 과제에서는 수요 및 신재생 발생량 예측에 가중이동평균법을 사용함.



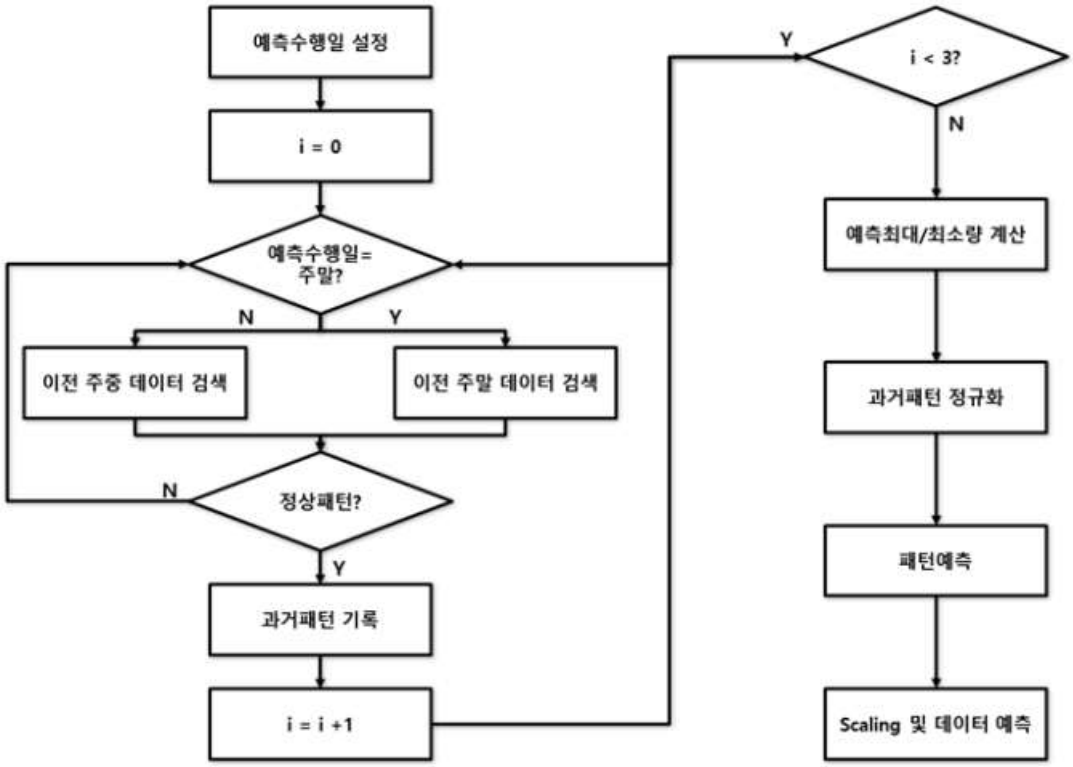
<그림 3-5-55> 가중이동평균법을 이용한 수요예측

- 가중이동평균법은 예측 시 과거실적의 평균을 통하여 예측을 수행하는 방법이며, 가중이동평균법은 <그림 3-5-55>과 같이 평균을 구할 때 각 데이터에 가중치를 두어 평균을 구하는 방법으로, 최근데이터나 날씨가 비슷한 날에 더 높은 가중치를 두어 예측의 정확도를 향상시킬 수 있음. 일반적으로 요일별 효과를 생각하여 같은 요일의 3주 내 데이터를 이용하는 경우가 있지만, 도시철도 복합에너지 시스템의 수요는 지하철 배차간격에 영향을 크게 받아 요일별 효과가 크게 나타나지 않기 때문에 가까운 <그림 3-5-56>와 같이 3일의 데이터를 사용하나, 주중과 주말로 분류하여 같은 그룹에 있는 데이터만을 사용함. 하지만 예외적으로, 태양광 패널의 발전량의 경우 요일별 효과가 발생하지 않기 때문에 가까운 3일의 데이터를 사용함.



<그림 3-5-56> 과거 실적 선정 예시

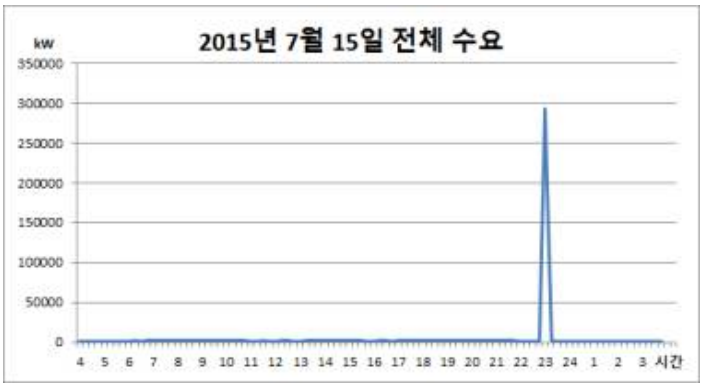
- 전체적인 수요 및 신재생 발전량 예측 과정은 다음과 같음.



<그림 3-5-57> 수요 및 신재생 발전량 예측 알고리즘

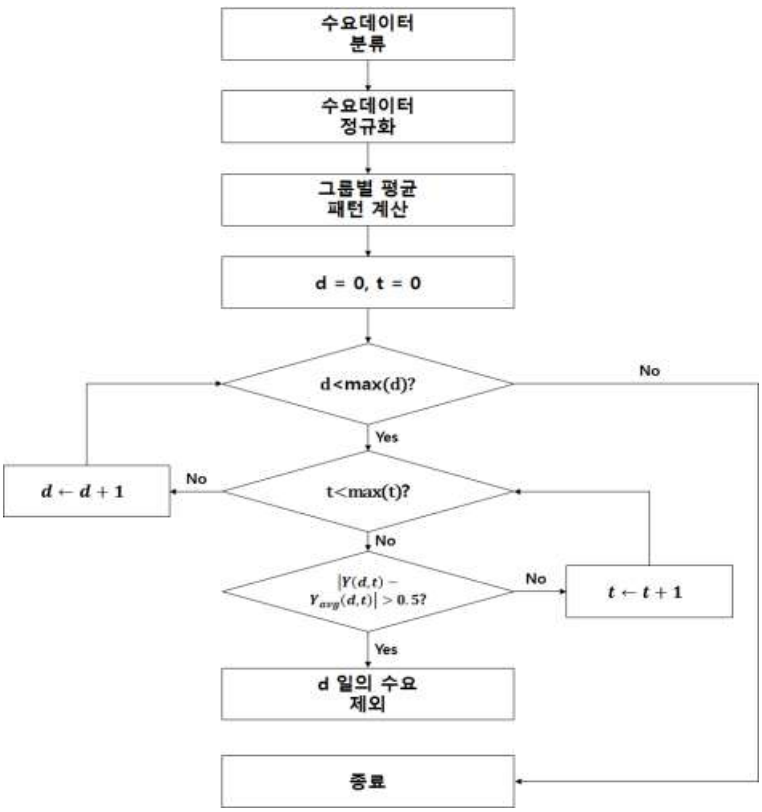
(4) 아웃라이어 제거

- 수요 및 신재생 발생량 데이터 취득 과정 중 다음 그림과 같이 사용할 수 없는 데이터가 존재함. 서버 이상 등의 문제로 발생할 수 있으며, 서버 이상이 아니더라도 특수일 등의 존재로 평상일 수요 패턴에서 크게 벗어날 경우 통합 스케줄링에 사용할 수 없음.



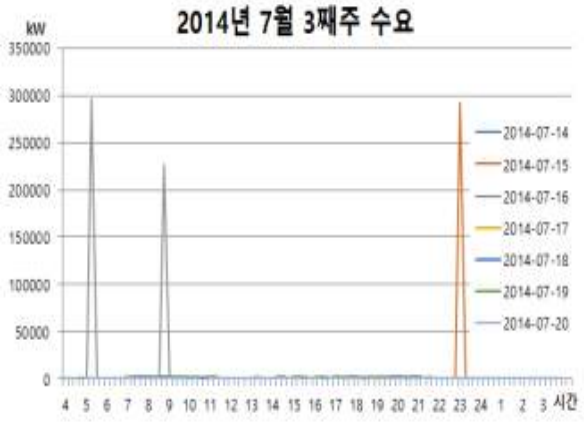
<그림 3-5-58> 이상 데이터를 포함하는 수요 실적

- 그룹 내의 패턴에서 벗어나는 데이터를 아웃라이어라 칭하며 다음 그림과 같은 알고리즘을 통하여 아웃라이어를 제거하여 스케줄링 분석에 사용함.

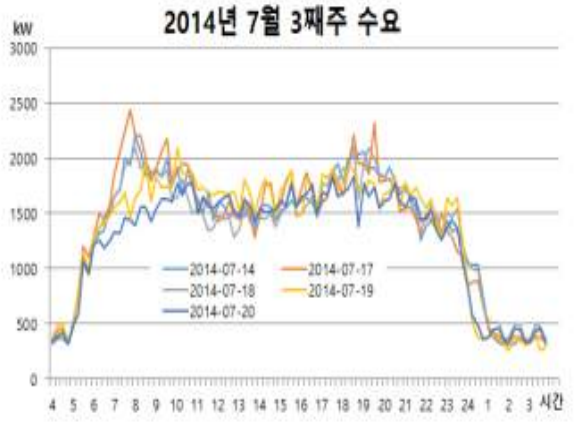


<그림 3-5-59> 아웃라이어 제거 알고리즘

- 알고리즘 적용 결과 다음 그림과 같이 이상 데이터가 제거되었음을 확인함.



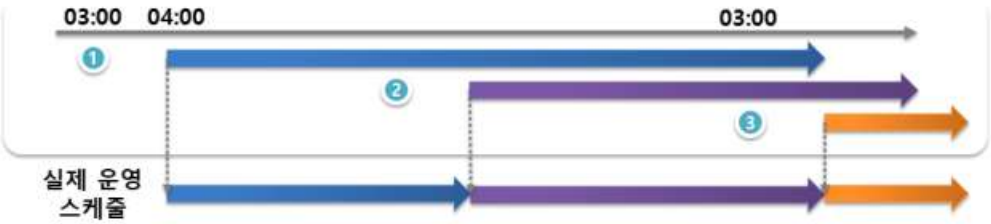
<그림 3-5-60> 아웃라이어 제거 알고리즘 적용 전



<그림 3-5-61> 아웃라이어 제거 알고리즘 적용 후

(5) 스케줄링 알고리즘 구현

- 스케줄링 알고리즘은 TOS 서버에서 구동 되므로, Linux 환경에서 사용할 수 있도록 개발하였으며 스케줄링 모듈은 C++언어에 기반하고 있으며, Ubuntu 환경에서 개발됨. 하지만 통합 해석 환경은 Python으로 개발 되었으므로 스케줄링 모듈은 .so 확장자로 구성 된 동적라이브러리로 구현 되어 Python에서 제공하는 C++ rapper를 통해 통합 해석 환경에서 사용됨.
- 스케줄링 모듈은 개발된 최적화 문제를 풀어야 하므로, 최적화 솔버를 반드시 포함해야 함. 최적화 솔버란 Linear Programming, Mixed Integer Programming, Non-Linear Programming 등 일반적인 수학적 최적화 문제를 해결 할 수 있는 프로그램 혹은 라이브러리를 의미하며, 잘 알려진 솔버로는 IBM사의 CPLEX가 있으며, Xpress, Gurobi 등 다양한 상업 솔버가 존재함. 하지만 본 과제에서는 실제 구현을 통한 역사 운영이 가능해야 하므로 상업 프로그램을 사용하는데 제약이 발생하며, 따라서 프리웨어 솔버를 사용해야하는 문제가 발생함. 프리웨어 솔버로 가장 유명한 솔버는 GNU Linear Programming Kit이 있으나, 해당 솔버는 GPL 라이센스를 적용받으므로 본 과제에 사용할 수 없어 본 과제에서는 LGPL 라이센스를 적용받는 lpsolve 라이브러리를 통하여 스케줄링 모듈을 구현함. 알고리즘이 구현됨에 있어 현실적인 제약이 있기 때문에 여러 사항이 수정함.



<그림 3-5-62> 예측오차 해소를 위한 재 스케줄링 과정

- 우선 스케줄링 이전의 부하 및 신재생 발전량 예측 오차에 의한 효과를 최소화하기 위하여 <그림 3-5-62>과 같이 1시간마다 예측 및 스케줄링을 다시 수행하며, 매 시간 50분에 다음 시간을 위한 스케줄을 수립하며, 이 때 수요 및 신재생 발전량 예측을 수행한 뒤 에너지저장장치의 현재 SoC를 기준으로 15분 단위 24시간 스케줄링을 수행함. 에너지저장장치는 해당 스케줄에 따라 한 시간 동안 동작하며, 다시 다음 시간대의 50분이 되면 재 스케줄링을 실행함.
- 이에 따라 에너지저장장치의 충·방전 스케줄은 한 시간 단위로 덮어 씌워지며, 스케줄링 시점에서의 에너지저장장치 상태에 따라 달라짐. 추가로 안전상의 문제로 에너지저장장치 충전 시 충전량에 제약을 두었으며, 마찬가지 이유로 충전 가능시간을 부하가 낮고 회생전력이 발생하지 않는 시간으로 제한하였으며 또한 예측오차에 의한 피크저감 효과저하를 방지하기 위하여 피크시간에 방전을 강제하였음.

(6) 스케줄링 프로그램 운영자 UI 구현

- 개발된 운영자 UI는 <그림 3-5-63> ~ <그림 3-5-68>과 같음.



<그림 3-5-63> 도시철도 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 알고리즘 운영자 UI

- <그림 3-5-63>는 개발된 운영자 UI의 메인화면이며 좌측 상단에는 스케줄링 날짜를 표기하고 우측 상단에는 모드 선택 창을 표시함. 모드는 자동 스케줄링 모드, 수동 스케줄링 모드, 매뉴얼 모드가 존재하며 '자동 스케줄링'일 경우 특정 시간에 자동으로 다음날 24시간 스케줄을 수립하여 운영하게 됨. 자동 운영 중 운영자가 스케줄을 수정하고 싶을 경우 '수동 스케줄링' 모드를 선택하여 원하는 시간에 향후 24시간에 대해 재 스케줄링 가능하며, '매뉴얼 모드' 선택 시 <그림 3-5-65>과 같은 매뉴얼 모드 입력창이 나타나며, 시간별 충전 및 방전량을 사용자가 임의로 입력 가능함.

- 메인 화면의 하단에는 예측 수요 및 스케줄 예상 SoC 변화량 등을 그래프 및 표의 형태로 표시하며, 예상되는 피크 저감량 등의 정보를 표현하였으며 메인화면의 각 부분이 표시하는 정보는 <그림 3-5-66>에 간략하게 나타냄.
- 매뉴얼 모드 버튼을 클릭할 경우 <그림 3-5-66>과 같은 매뉴얼 모드 창이 표시되며, 매뉴얼 모드 입력창에서는 메인 에너지저장장치와 태양광 에너지저장장치의 충/방전량을 직접 조절할 수 있으며, 확인 버튼을 누를 시 입력된 스케줄에 대하여 다음과 같은 유효성 검사를 수행함.

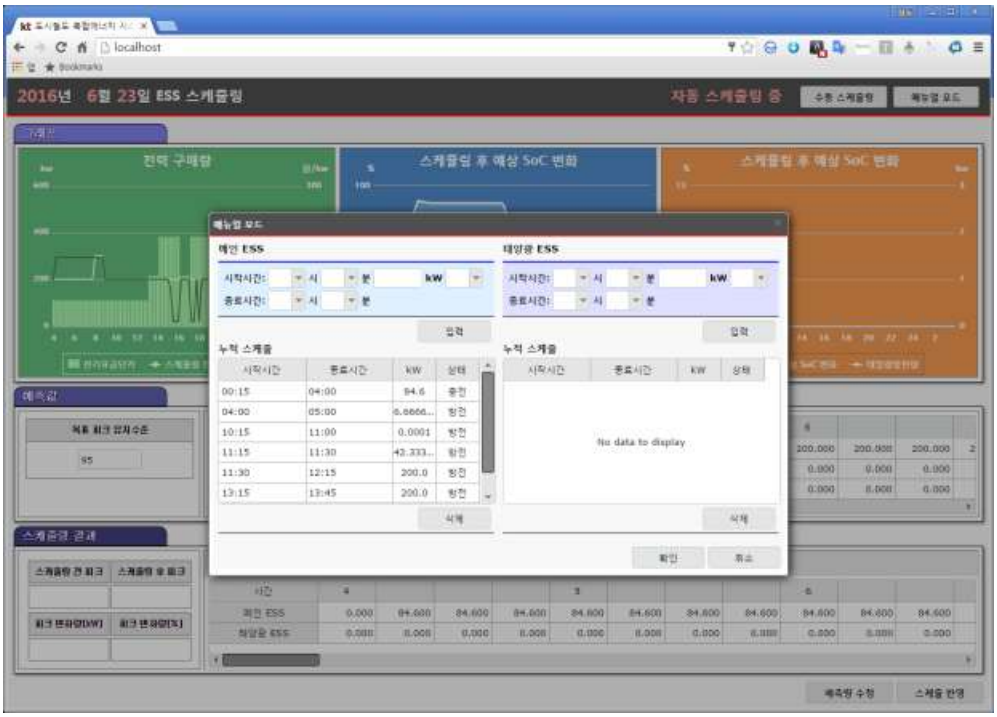
  ㄱ. 제한 SoC 범위 초과 여부

  ㄴ. PCS 출력 제한량 초과 여부

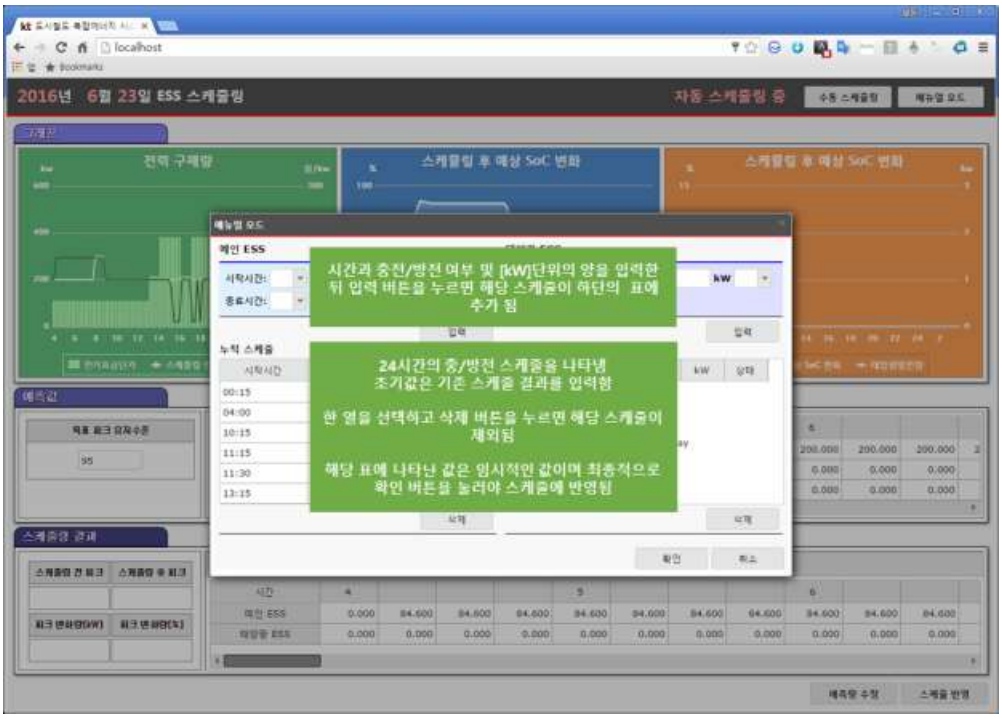
  ㄷ. 시작 시간 및 종료 시간의 SoC 제한량 만족 여부
- 만약 위의 검사 중 하나라도 만족하지 않는다면 경고창을 출력하고 스케줄을 수정하도록 하며, 다음 그림은 매뉴얼 모드 화면의 각 부분의 간략한 설명임.



<그림 3-5-64> 도시철도 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 알고리즘 운영자 UI 설명



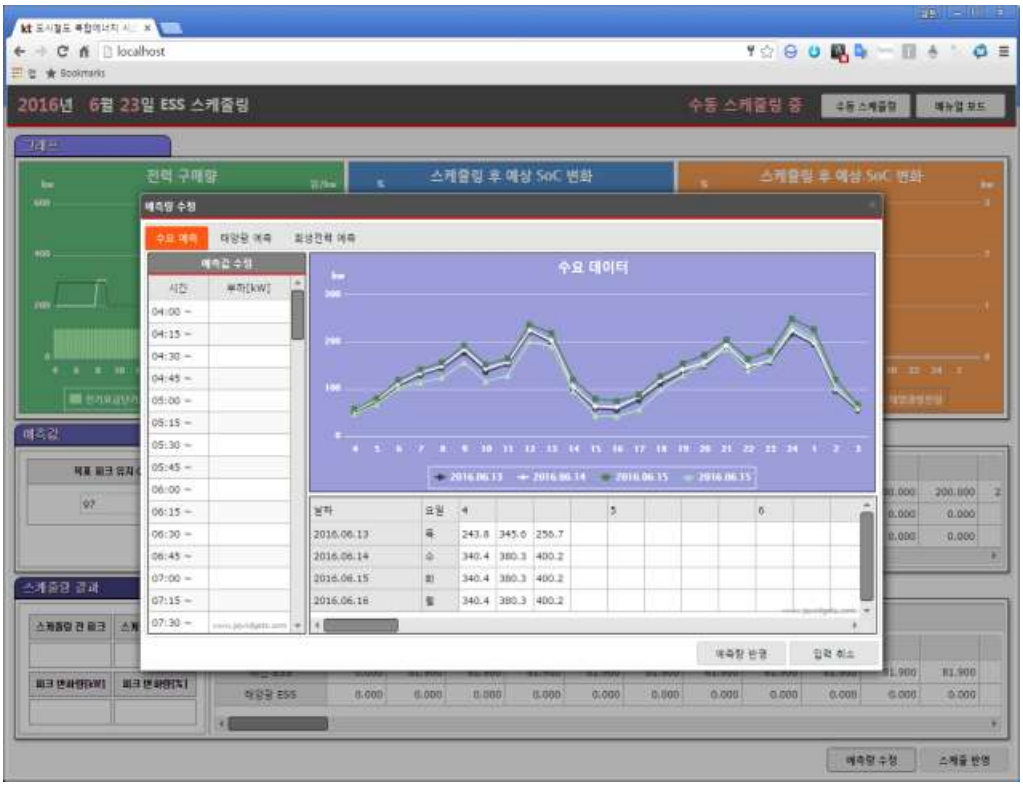
<그림 3-5-65> 매뉴얼모드 화면



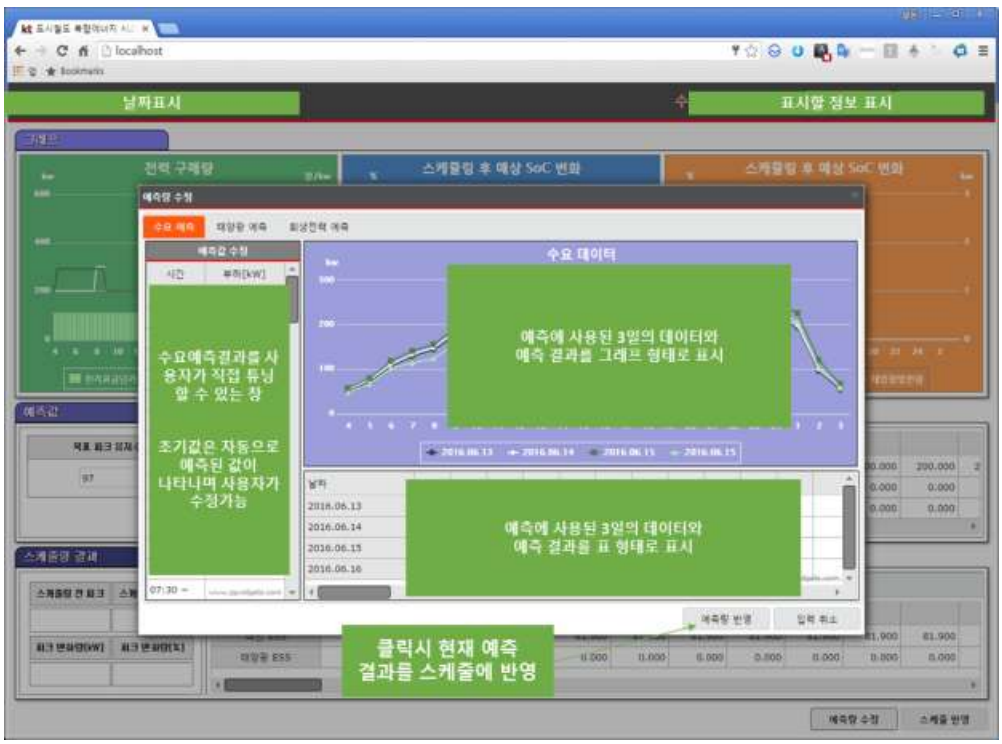
<그림 3-5-66> 매뉴얼모드 화면 설명

- <그림 3-5-67>는 예측량 수정 화면을 나타내며 예측량 수정 화면의 우측 상단의 예측 대상 데이터를 선택하는 창을 통하여 수요, 태양광, 회생전력 발생량의 예측이 가능함. 선택된 날의 수요 데이터는 하단의 표에 표시되며 표의 최상단에는 예측 대상일의 예측 수요가 표시됨. 좌측의 예측값 수정 기능을 통해 예측된 수요를 사용자가 직접 튜닝할 수 있으며, 하단의 예측량 반영 버튼을 누를 시 예측값 수정

표에 적힌 수요 값이 스케줄링 화면에 반영됨. <그림 3-5-68>는 예측량 수정 화면의 설명임.



<그림 3-5-67> 예측량 수정 화면



<그림 3-5-68> 예측량 수정 화면 설명

(7) 도시철도 복합에너지 시스템 통합 스케줄링 알고리즘 현장구축

- 수요 및 신재생 예측기법과 예측에 필요한 아웃라이어 제거 알고리즘을 구현한 후, 스케줄링 프로그램 운영자 UI 및 통합운영시스템 서버와 연동 할 수 있는 모듈을 개발한 뒤, 구현된 스케줄링 알고리즘을 연동하는 것으로 현장 구축을 완료하였음.
- 스케줄링 알고리즘은 통합운영시스템 서버에서 수요 및 회생전력의 발전량을 읽어 예측을 수행 한 뒤, 스케줄링 결과를 다시 서버에 기록하며, 이 때 서버에 기록하는 값은 <표 3-5-9>과 같으며, 저장된 값은 <그림 3-5-69> 및 <그림 3-5-70>과 같이 조회됨.

<표 3-5-9> 스케줄링 결과 저장 테이블

열	타입	설명
starttime	timestamp without time zone	시작시간
endtime	timestamp without time zone	종료시간 (시작시간+15분)
pred_load	real	예측부하
pred_pv	real	예측PV발전량
pred_regen	real	예측회생전력량
p_ess	real	메인ESS방전량
p_sess	real	태양광ESS방전량
soc_ess	real	메인ESS SoC
soc_sess	real	태양광ESS SoC

starttime	endtime	pred_load	pred_pv	pred_regen	p_ess	p_sess	soc_ess	soc_sess
2017-01-23 04:15:00	2017-01-23 04:30:00	227.704	0.15	0	146.64	0	0.192	0.1
2017-01-23 04:30:00	2017-01-23 04:45:00	238.905	0.19	0	0	0	0.192	0.101
2017-01-23 04:45:00	2017-01-23 05:00:00	258.589	0.24	0	200	0	0.317	0.102
2017-01-23 05:00:00	2017-01-23 05:15:00	766.874	0.29	0	200	0	0.442	0.102
2017-01-23 05:15:00	2017-01-23 05:30:00	851.397	0.36	0	200	0	0.567	0.103
2017-01-23 05:30:00	2017-01-23 05:45:00	1148.62	0.44	4	200	0	0.702	0.105
2017-01-23 05:45:00	2017-01-23 06:00:00	1071.07	0.53	2.67	200	0	0.833	0.106
2017-01-23 06:00:00	2017-01-23 06:15:00	1279.43	0.64	4	0	0	0.843	0.108
2017-01-23 06:15:00	2017-01-23 06:30:00	1331.09	0.77	5.33	0	0	0.857	0.11
2017-01-23 06:30:00	2017-01-23 06:45:00	1367.76	0.92	4	0	0	0.867	0.113
2017-01-23 06:45:00	2017-01-23 07:00:00	1623.25	1.1	6.67	0	0	0.883	0.116
2017-01-23 07:00:00	2017-01-23 07:15:00	1486.71	1.31	6.67	0	0	0.9	0.119
2017-01-23 07:15:00	2017-01-23 07:30:00	1828.71	1.54	10.67	-95.7941	0	0.867	0.124
2017-01-23 07:30:00	2017-01-23 07:45:00	1902.86	1.82	10.67	-178.183	0	0.782	0.129
2017-01-23 07:45:00	2017-01-23 08:00:00	1899.82	2.13	12	-174.813	0	0.703	0.135
2017-01-23 08:00:00	2017-01-23 08:15:00	1809.66	2.48	12	-74.6356	0	0.686	0.141
2017-01-23 08:15:00	2017-01-23 08:30:00	1865.04	2.88	10.67	-136.161	0	0.628	0.149
2017-01-23 08:30:00	2017-01-23 08:45:00	1892.29	3.32	10.67	-166.441	0	0.55	0.159
2017-01-23 08:45:00	2017-01-23 09:00:00	1799.35	3.82	8	-63.1729	0	0.531	0.169
2017-01-23 09:00:00	2017-01-23 09:15:00	1832.47	4.37	10.67	-75.1667	24.8076	0.511	0.112
2017-01-23 09:15:00	2017-01-23 09:30:00	1890.26	4.98	10.67	-164.191	0	0.435	0.126
2017-01-23 09:30:00	2017-01-23 09:45:00	1936.1	5.65	9.33	-200	15.1224	0.333	0.1
2017-01-23 09:45:00	2017-01-23 10:00:00	1689.98	6.38	9.33	1.62937e-13	0	0.356	0.118
2017-01-23 10:00:00	2017-01-23 10:15:00	1740.65	7.16	8	0	13.54	0.376	0.1
2017-01-23 10:15:00	2017-01-23 10:30:00	1510.7	8.01	8	-4.07343e-14	8.01	0.396	0.1
2017-01-23 10:30:00	2017-01-23 10:45:00	1572.63	8.92	5.33	-8.14687e-14	8.92	0.41	0.1
2017-01-23 10:45:00	2017-01-23 11:00:00	1520.69	9.89	8	-2.12192	9.89	0.428	0.1
2017-01-23 11:00:00	2017-01-23 11:15:00	1612.25	10.92	5.33	-200	10.92	0.317	0.1
2017-01-23 11:15:00	2017-01-23 11:30:00	1415.96	11.99	8	-200	9.37	0.212	0.107
2017-01-23 11:30:00	2017-01-23 11:45:00	1591.65	13.11	5.33	-200	0	0.1	0.144
2017-01-23 11:45:00	2017-01-23 12:00:00	1498.77	14.27	8	-32	30	0.1	0.1
2017-01-23 12:00:00	2017-01-23 12:15:00	1479.44	15.46	5.33	146.8	15.46	0.205	0.1
2017-01-23 12:15:00	2017-01-23 12:30:00	1538.11	16.67	8	8.14687e-13	0	0.225	0.146

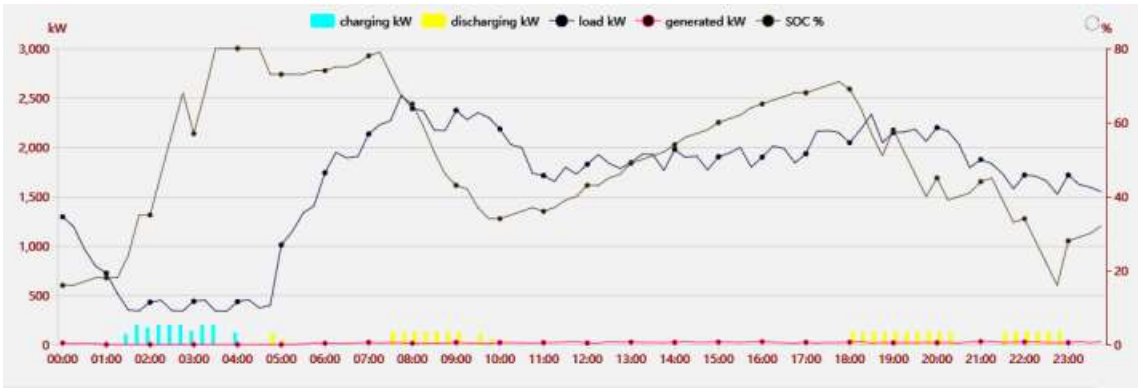
<그림 3-5-69> 저장된 스케줄링 결과 조회(터미널)



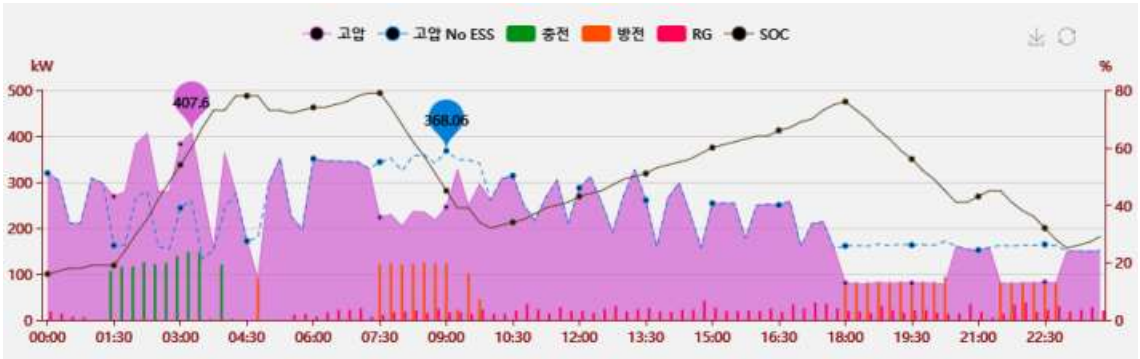
<그림 3-5-70> 저장된 스케줄링 결과 조회(UI)

나. 운영시험 및 종합 성능평가

- 스케줄링 알고리즘에 따라 충전 및 방전을 수행하였으며 스케줄링 수행 결과는 다음과 같으며, <그림 3-5-71>은 통합운영시스템 서버에 저장된 2018년 2월 23일의 스케줄을 보여주며, <그림 3-5-72>는 실제 동작 기록을 보여줌.



<그림 3-5-71> 2018년 2월 23일의 스케줄



<그림 3-5-72> 2018년 2월 23일의 동작결과

- 이 중 오전 1시 경의 스케줄 및 실제 방전량을 비교하면 <표 3-5-10>과 같으며 스케줄과 실제 방전량 사이의 차이가 존재하나, 전체적으로는 스케줄을 따라 동작하는 것을 관찰할 수 있음.

<표 3-5-10> 2018년 2월 23일 오전 1시~2시 사이 스케줄 및 방전량 비교

시간	스케줄[kW]	실제 방전량[kW]
1:00	0	0
1:15	0	106.18
1:30	107	115.23
1:45	200	116.16

- 다음으로는 스케줄링 결과가 최적화 문제의 제약조건 및 목적함수의 방향성에 따라 정상적으로 작동하였는지 관찰함.
- 첫 번째로 회생전력이 발생하는 시간에 충전을 수행할 경우 에너지저장장치에 무리가 갈 수 있기 때문에 충전시간을 회생전력이 발생하지 않는 시간인 오전 1시 30분에서 4시 30분으로 제한하였으며<그림 3-5-72>과 같이 충전은 해당 시간 내에서 이루어 졌음을 확인 할 수 있음.
- 두 번째로 피크에 대비하여 오전 7시 30분부터 9시 30분 사이에 최대 출력으로 방전을 강제하였으며 이는 <그림 3-5-72>과 같이 스케줄에 반영이 되어 있음. 이때 수락산 역사의 부하가 150kW 아래로 떨어지는 시간도 있기 때문에 에너지 저장장치의 방전량을 130kW로 제한하여 역조류 문제를 방지하였음.
- 세 번째로 SoC는 전 시간에 대하여 10%에서 80% 범위에 존재하도록 제약을 두었으며, 이는 잘 반영이 되어있는 것을 알 수 있음. 다만 SoC 제약에 있어, 회생전력이 예측한 것 보다 많이 발생 할 경우, 실제 SoC가 제한을 넘길 수 있기 때문에 스케줄링 시점부터 1시간동안은 SoC 제약을 풀고 다음 시간부터 SoC제약을 만족할 수 있도록 방전을 유도하는 방향으로 제약조건을 설정하였음.
- 마지막으로 피크저감 후 남은 에너지를 최대부하 시간대 (17~20시 및 22~23시)에 방전하며 남는 에너지 역시 중간부하 시간대에 방전하여 전력량 요금을 최소화 하려는 목적함수의 방향성에 부합하는 충·방전 스케줄을 수립한 것을 알 수 있음.
- 다음은 충·방전 스케줄링을 통한 피크저감 효과를 분석하였으며 도시철도 복합에너지 통합 스케줄링 알고리즘의 실제 연동은 2017년 1월 말부터 시작하였으나, 현장의 장비 구축 완료 시점을 고려하여 2017년 7월 20일부터 에너지저장장치 및 태양광, 회생전력을 모두 활용하여 도시철도 복합에너지 시스템을 구축할 수 있었음.
- 따라서 본 보고서에서는 7월 이후의 데이터에 근거하였으며 <표 3-5-11>는 2017년 7월 이후 수락산 변전소 기준 피크저감량 5%이상을 달성한 날들의 스케줄링 전·후 피크 전력, kW 및 % 단위의 피크전력 변화량을 나타냄.

<표 3-5-11> 2017년 7월 이후 5%이상 피크저감을 달성한 날짜의 데이터(변전소 기준)

날짜	스케줄링 전 피크전력[kW]	스케줄링 후 피크전력[kW]	피크전력 변화량[kW]	피크전력 변화량[%]
2017-11-03	1,848.06	1,704.40	143.66	7.77
2017-11-10	1,804.90	1,682.01	122.90	6.81
2018-02-23	2,465.38	2,308.80	156.58	6.35
2017-12-26	2,542.86	2,385.20	157.66	6.20
2017-12-12	1,915.09	1,798.41	116.69	6.09
2017-09-25	2,597.71	2,442.80	154.91	5.96
2017-10-12	2,100.29	1,975.20	125.09	5.96
2017-09-29	2,506.26	2,357.20	149.06	5.95
2017-09-14	2,678.82	2,519.60	159.22	5.94
2017-12-01	1,800.60	1,694.41	106.19	5.90
2017-09-18	2,725.79	2,566.80	158.99	5.83
2018-04-06	2,315.44	2,180.40	135.04	5.83
2018-03-27	2,794.16	2,634.80	159.36	5.70
2017-12-21	2,312.10	2,182.00	130.10	5.63
2018-03-14	2,847.73	2,691.20	156.53	5.50
2017-09-27	2,455.43	2,321.20	134.23	5.47
2018-03-08	2,717.58	2,570.00	147.58	5.43
2018-03-13	2,312.19	2,188.80	123.39	5.34
2018-03-05	2,690.40	2,550.80	139.60	5.19
2018-03-20	2,395.66	2,272.40	123.26	5.15

- 이 때 주말의 경우 피크전력이 낮아 불필요하게 에너지저장장치의 수명을 사용하지 않도록 피크저감을 수행하지 않아 분석에서 제외함.
- 스케줄링 효과를 분석하기 위하여 가장 높은 피크 저감률을 달성한 11월 3일의 데이터이며, <그림 3-5-73>및 <그림 3-5-74>은 2017년 11월 3일의 에너지저장장치 및 태양광 에너지저장장치의 시간별 충·방전량 및 SoC 변화를 나타냄.

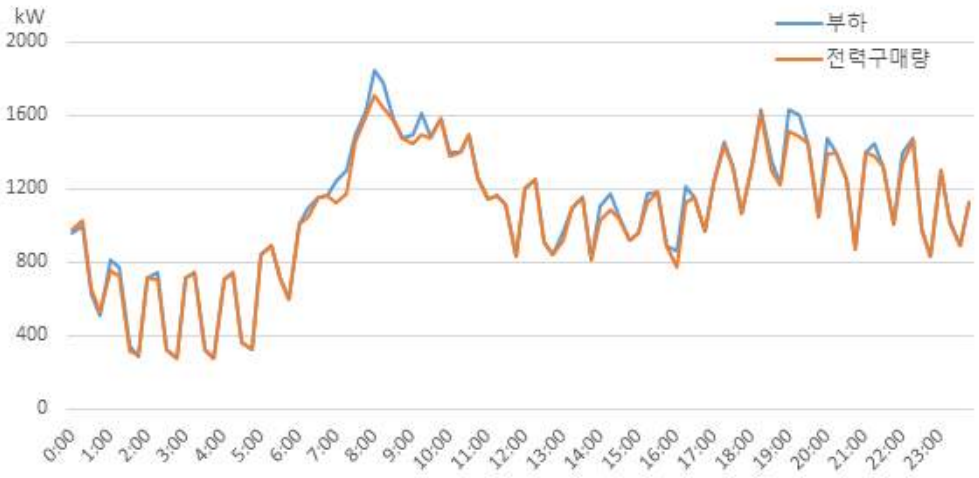


<그림 3-5-73> 2017년 11월 3일 메인 에너지저장장치 방전 결과



<그림 3-5-74> 2017년 11월 3일 태양광 에너지저장장치 충·방전 결과

- 2017년 11월 중에는 10월 말 발생했던 장비 운영 중지로 인한 안전상의 이유로 메인 에너지저장장치는 충전을 수행하지 않고 방전만을 수행하여 피크를 저감하였으며, 약 50%선의 SoC를 유지하도록 하였음.
- 태양광 에너지저장장치의 경우 태양광 발전량을 저장하는 것 외에도 계통에서 직접 충전을 수행하여 피크발생시간에 방전을 수행함.



<그림 3-5-75> 2017년 11월 3일 부하 및 전력 구매량

- <그림 3-5-75>은 2017년 11월 3일의 부하 및 전력 구매량을 나타내며 스케줄링 전 최대전력은 1848.06kW로 오전 8시에 발생하였으며 스케줄링 이후 피크전력은 1704.4kW로 같은 시간에 발생하였음.
- 2017년 11월 3일 다음으로 높은 피크저감률을 달성한 11월 10일 역시 충전 없이 SoC유지를 위한 방전만을 수행하였으므로, 세 번째로 높은 피크저감률을 달성한 2018년 2월 23일의 데이터를 통해 정상적으로 충방전이 이루어진 날의 데이터를 관찰함.



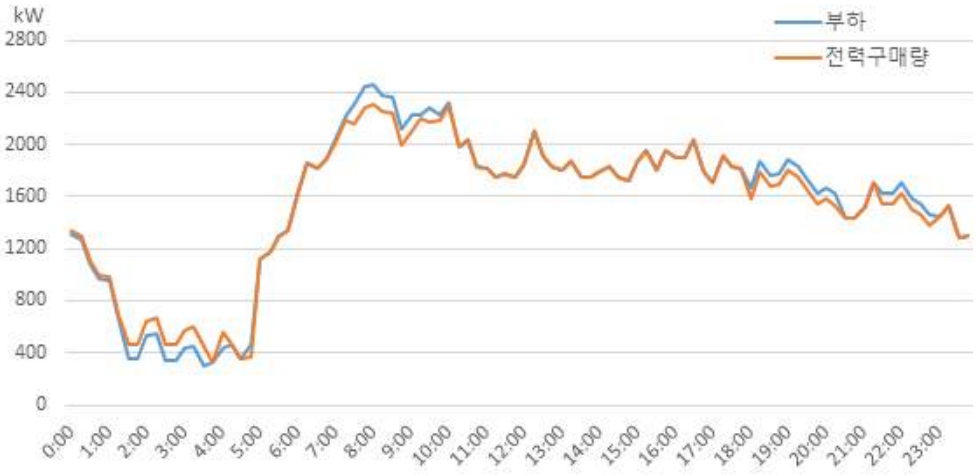
<그림 3-5-76> 2018년 2월 23일 메인 에너지저장장치 충·방전 결과

- <그림 3-5-76>는 2018년 2월 23일의 메인 에너지저장장치의 충·방전 결과 및 SoC를 나타내며 충방전 패턴을 러시아워와 비 러시아워로 구분하여 분석하였음.
- 러시아워는 약 오전 7시 30분부터 오전 9시 30분까지로, 출근시간대에 뚜렷한 피크가 관찰되는데 반해 퇴근 시간대에는 뚜렷한 피크가 발생하지 않아 에너지저장장치는 오전 러시아워에만 피크 저감을 위한 방전을 수행함.
- 비 러시아워의 경우 새벽 1시 30분부터 새벽 4시 30분까지 러시아워 방전을 위해 충전을 수행하였으며 이 때 최대 SoC를 80%로 제한해두었기 때문에 새벽 5시경 열차 운행이 시작 된 이후 회생전력에 의해 충전이 수행되자 SoC 유지를 위해 방전을 수행함.
- 이후 비 러시아워시간에는 발생된 회생전력을 최대부하 요금이 적용되는 시간에 방전함. 겨울철에는 17:00~20:00, 22:00~23:00에 최대부하 요금단가가 적용되므로 해당시간에 방전을 통하여 전력량요금을 절약함을 관찰할 수 있었으며 실제로 17시 이후로 최대요금제가 없는 여름철, 봄·가을철의 경우 심야 시간대에 방전을 수행하지 않고 회생전력을 저장해 두었다가 다음날 방전에 사용함.



<그림 3-5-77> 2018년 2월 23일 태양광 에너지저장장치 충·방전 결과

- 태양광 에너지저장장치의 경우에는 2017년 11월 3일과 비슷한 스케줄을 보이며, 이는 현재 태양광 에너지저장장치가 스케줄링 알고리즘의 스케줄을 따르지 않고 고정된 스케줄에 의해 동작하기 때문임.



<그림 3-5-78> 2018년 2월 23일 부하 및 전력 구매량

- <그림 3-5-78>는 2월 23일의 부하 및 전력구매량을 나타내며, 스케줄링 전 피크전력은 2465.38kW로 8시에 발생하였으며, 스케줄링 후 피크전력은 2308.8kW로 같은 시간에 발생함.
- 앞서 언급한 바와 같이 여름철, 봄·가을철의 경우 심야 시간대에 방전을 수행하지 않고 회생전력을 다음날 방전을 위해 모아두며, 이는 <그림 3-5-79>에서 확인할 수 있음.



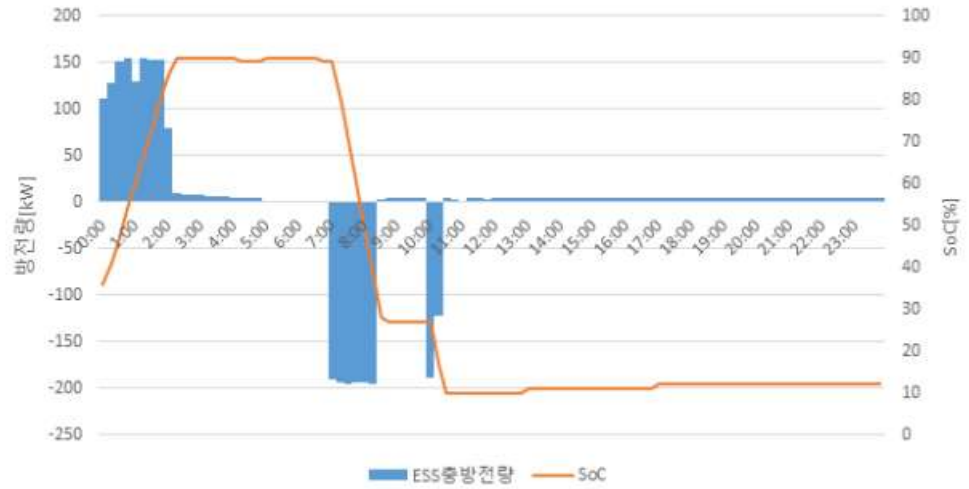
<그림 3-5-79> 2018년 4월 5일 ~ 6일 충·방전 결과

- 상기한 바와 같이 수락산 역사의 역조류 문제를 방지하기 위하여 출력을 130kW로 제한하였으나 연구 초기에는 200kW로 방전하였음. 이러한 기간을 포함하기 위하여 연구기간 전체 (2016년 3월 1일 이후)를 기준으로 피크저감량을 계산할 경우 <표 3-5-12>와 같이 최대 8%이상의 피크 저감이 가능함을 확인함.

<표 3-5-12> 출력제한을 고려하지 않은 연구 전체기간의 피크저감량

날짜	스케줄링 전 피크전력[kW]	스케줄링 후 피크전력[kW]	피크전력 변화량[kW]	피크전력 변화량[%]
2017-05-24	2,191.04	2,013.20	177.84	8.12
2017-03-17	2,414.59	2,220.53	194.06	8.04
2017-03-16	2,413.06	2,220.13	192.94	8.00
2017-05-23	2,349.14	2,163.60	185.54	7.90
2017-11-03	1,848.06	1,704.40	143.66	7.77
2017-02-23	2,461.83	2,273.33	188.50	7.66
2017-05-25	2,515.90	2,330.80	185.10	7.36
2017-06-02	2,549.36	2,362.80	186.56	7.32
2017-04-28	2,359.95	2,188.80	171.15	7.25
2017-11-10	1,804.90	1,682.01	122.90	6.81
2017-05-08	2,466.00	2,298.40	167.60	6.80
2017-06-22	2,554.79	2,384.00	170.79	6.69
2017-06-21	2,721.53	2,540.00	181.53	6.67
2017-06-13	2,589.36	2,418.00	171.36	6.62
2017-06-09	2,507.67	2,346.80	160.87	6.42
2017-05-10	2,338.56	2,189.20	149.36	6.39
2017-05-16	2,385.98	2,234.00	151.98	6.37
2018-02-23	2,465.38	2,308.80	156.58	6.35
2017-05-18	2,304.96	2,158.80	146.16	6.34
2017-05-22	2,481.85	2,327.20	154.65	6.23
2017-12-26	2,542.86	2,385.20	157.66	6.20
2017-06-07	2,603.09	2,443.20	159.89	6.14
2017-12-12	1,915.09	1,798.41	116.69	6.09
2017-04-19	2,517.35	2,364.40	152.95	6.08
2017-06-20	2,561.73	2,407.60	154.13	6.02

- 취득된 데이터에서 가장 높은 피크 저감률은 2017년 2월 14일의 28%(변전소 기준) 이지만 이는 데이터 이상에 의한 값으로 예상되어 결과 분석에서 제외함.
- 이때 5월 24일의 경우 출력량이 150kW로 제한되어있으며, 3월 17일의 경우 기기 이상으로 SoC 데이터가 제대로 수집되지 않았으므로 3월 16일의 충방전 결과를 관찰하면 다음과 같음.



<그림 3-5-80> 2017년 3월 16일 메인 에너지저장장치 충·방전 결과

- 충·방전 결과 192.94kW의 방전을 통하여 피크저감량 8.00%를 달성하였음을 관찰할 수 있으며 이 당시에는 회생전력 연계가 되어있지 않았으며, 태양광 패널 및 태양광 에너지저장장치 역시 동작하고 있지 않을 시기이기 때문에 태양광 에너지저장장치의 충·방전 결과는 생략함.
- 결과적으로 역조류 문제가 없다면 도시철도 복합에너지 시스템은 최대 230kW (메인 에너지저장장치 200kW + 태양광 에너지저장장치 30kW)의 피크전력 저감이 가능하며 이는 연구기간 중 관측된 최대 피크인 2982.8kW(2017년 8월 1일 기준)의 약 7.71%에 해당하는 양으로, 충분한 피크전력 저감이 가능할 것으로 보임.
- 다음으로는 도시철도 복합에너지 시스템의 에너지사용량 및 전력량 요금 절감량을 분석하였으며 <표 3-5-11>과 같이 <표 3-5-13>에 %단위 변전소 단위 기준 에너지사용량 절감량 상위 20일을 나타냄.

<표 3-5-13> 변전소 기준 에너지사용량 절감량 상위 20일 (%기준)

날짜	에너지 사용량[kWh]		에너지 사용량 변화량	
	스케줄링 전	스케줄링 후	[kWh]	[%]
2017-10-02	33,592.14	32,782.80	809.34	2.41
2017-11-07	25,302.90	24,745.30	557.60	2.20
2017-11-04	22,779.10	22,284.73	494.37	2.17
2017-10-09	27,336.95	26,776.70	560.25	2.05
2017-11-15	24,828.91	24,324.43	504.48	2.03
2017-11-17	25,587.74	25,069.43	518.30	2.03
2017-11-06	24,928.26	24,442.50	485.76	1.95
2017-10-20	25,018.12	24,537.58	480.54	1.92
2017-11-10	25,153.75	24,676.13	477.61	1.90
2017-08-21	40,086.75	39,330.10	756.65	1.89
2018-04-06	34,232.07	33,598.30	633.77	1.85
2017-11-03	25,889.78	25,410.95	478.83	1.85
2017-08-26	37,328.98	36,643.30	685.68	1.84
2017-11-14	24,831.51	24,376.23	455.27	1.83
2017-11-29	26,606.41	26,132.73	473.68	1.78
2017-09-18	38,734.04	38,045.40	688.64	1.78
2017-10-26	25,339.21	24,891.50	447.71	1.77
2017-09-30	36,426.15	35,787.40	638.75	1.75
2017-11-13	25,661.23	25,215.23	445.99	1.74
2017-11-12	23,197.97	22,794.83	403.13	1.74

- 최대 절감량을 달성한 2017년 10월 2일 기준으로 총 809kWh의 에너지가 절감되었으며, 이는 실제 수요대비 2.41%에 해당하는 양이다. 메인 에너지저장장치의 경우 778.34kWh의 절감량을 보였으며, 해당일의 수락산 역사의 전력 사용량은 6555.39kWh로 수락산 역사를 기준으로 할 경우 12.12%의 절감량을 달성하였음. 도봉산 역사의 경우 31kWh의 절감량을 보였으며, 해당일의 도봉산 역사의 전력 사용량은 1865.4kWh로 도봉산 역사를 기준으로 할 경우 1.66%의 절감량을 달성하였음. 도봉산 역사의 역우 최데 에너지사용 절감량은 2017년 11월 17일 3.41%로 관측됨.
- <표 3-5-14>은 변전소 단위 전력량 요금 절감량 기준 상위 20일을 보여주며 에너지 사용량 절감량을 기준으로 했을 때와 마찬가지로 2017년 10월 2일의 절감량이 가장 크게 나타났으며 요금 절감량은 2.5%로 관측됨.
- 에너지 절감량 상위 20일의 평균 절감량에 비해 전력량 요금 절감량 기준 상위 20일의 평균 절감량이 높은 것을 알 수 있으며 에너지 사용량 절감량은 회생전력 및 태양광 발전량에 의해 결정되는 값이지만 전력량 요금 절감량은 스케줄링을 통해 줄어든 에너지 소비보다 높은 요금절감 효과를 얻을 수 있었음.

<표 3-5-14> 변전소 기준 전력량 요금 절감량 상위 20일 (%기준)

날짜	전력량 요금[천원]		전력량요금 변화량	
	스케줄링 전	스케줄링 후	[천원]	%
2017-10-02	2,718	2,650	68	2.49
2017-11-06	2,796	2,727	68	2.45
2017-10-09	2,188	2,136	53	2.41
2017-08-29	4,313	4,209	103	2.40
2017-11-07	2,767	2,703	64	2.33
2017-08-21	4,588	4,482	106	2.30
2018-02-26	4,175	4,081	94	2.25
2017-11-15	2,715	2,654	61	2.25
2017-11-04	1,437	1,406	31	2.17
2017-12-11	2,980	2,917	62	2.09
2017-10-20	1,981	1,941	41	2.05
2017-11-17	2,812	2,755	57	2.04
2017-11-10	2,805	2,749	57	2.02
2017-12-08	2,914	2,856	58	1.98
2017-11-27	2,827	2,771	56	1.97
2017-11-29	2,902	2,845	57	1.97
2017-11-20	2,864	2,808	56	1.96
2017-11-14	2,755	2,701	54	1.96
2017-11-21	2,929	2,873	56	1.92
2017-11-13	2,803	2,750	53	1.90

- <표 3-5-15>는 데이터 이상이 있는 날을 제외한 수락산역 및 도봉산역사의 전력량 요금 절감량 상위 5일을 나타냄.

<표 3-5-15> 수락산 및 도봉산역 전력량 요금 절감량 상위 5일 (%기준)

날짜	전력량 요금[원]		전력량요금 변화량	
	스케줄링 전	스케줄링 후	[원]	%
수락산				
2018-01-25	551,868	466,414	85,454	15.48
2018-02-26	636,999	543,111	93,887	14.74
2017-08-21	729,237	623,572	105,665	14.49
2017-08-29	779,066	674,837	104,229	13.38
2017-10-02	493,635	427,922	65,713	13.31
도봉산				
2018-02-05	261,534	251,866	9669	3.70
2018-03-26	159,621	155,170	4450	2.79
2017-11-17	209,349	203,608	5741	2.74
2017-10-12	142,658	139,198	3461	2.43
2017-04-07	150,536	147,001	3534	2.35

- 과제 목표 및 실증 결과를 요약하면 <표 3-5-16>와 같으며 복합에너지 시스템 통합스케줄링 알고리즘은 에너지저장장치의 충·방전 계획을 수립하며, 따라서 피크전력 저감이나 전기요금 절감은 가능하지만 에너지 사용량 절감에는 기여할 수 없는 한계가 일부 있음.

<표 3-5-16> 실증 결과 요약

	피크전력 [%]	에너지사용량 [%]			전력량요금 [%]		
목표량	5	30			10		
절감량	8.12	수락산역	도봉산역	전체	수락산역	도봉산역	전체
		12.12	3.41	2.41	15.48	3.70	2.49

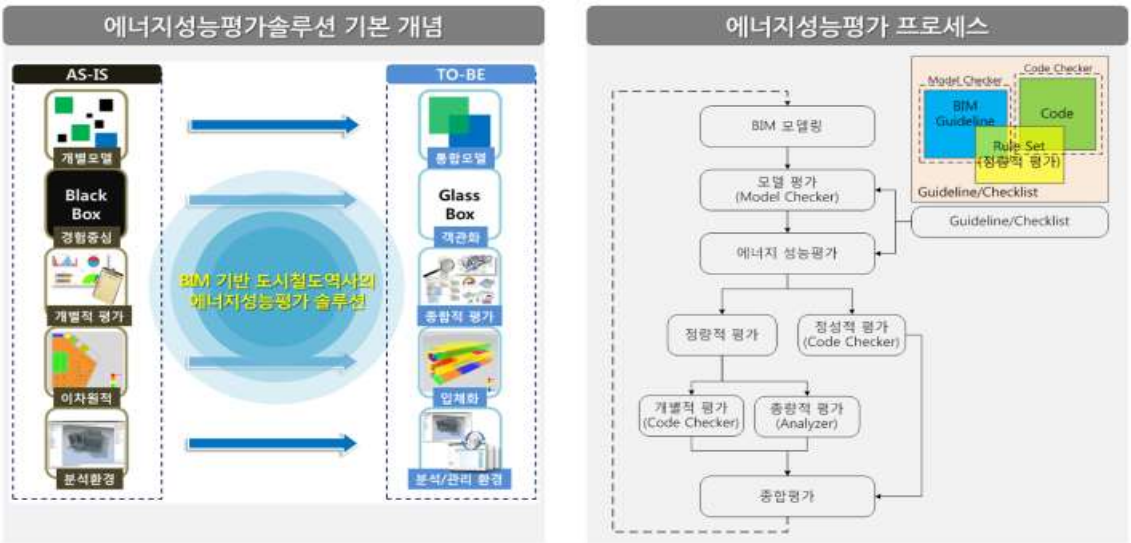
제6절. 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션

1. 솔루션 개요

가. 솔루션 개요 및 구성

(1) 솔루션 개요

- 도시철도 역사의 설계 및 유지관리 단계에서 저에너지 건축물 구현 및 에너지 효율화 향상을 위해 요구 되어지는 에너지 성능평가, 법규검토, 설계대안 비교평가를 BIM Data를 기반으로 지원 가능한 솔루션임.



<그림 3-6-1> BIM 기반 도시철도 역사 에너지성능평가 솔루션 기본개념 및 성능평가 프로세스

(2) 솔루션 구성

- 시스템 모델링
  - 3차원 BIM 기반의 형상정보 및 열적 존 모델링, 설비 시스템 모델링
- 대안 분석을 위한 회귀분석 모듈
  - 에너지 시뮬레이션 및 설계대안 평가
- 웹페이지 연계 기능

나. 시스템 기능 및 성능

(1) 기능

- 신규 도시철도 역사 대상
  - BIM 설계 프로세스에서의 에너지성능평가 지원도구
  - 저에너지 설계관련 법규 검토 지원 도구
  - 도시철도 역사의 저에너지 설계(건축, 설비, 신재생에너지 적용 등)지원 도구
  - 도시철도 역사의 건축물에너지효율등급 평가
  - 저에너지 설계대안의 비교평가

- 기존 도시철도 역사 대상
  - 기존 도시철도 역사의 에너지효율등급 평가
  - 기존 도시철도 역사의 절감안 도출/평가 지원도구
  - 에너지 효율화 향상에 관한 개선안 비교평가
- 기타(간접 활용)
  - 도시철도 역사 에너지 모니터링 시스템과의 BIM Data 통합 가능
  - 공항/항만/경기장 등 반 옥외공간에 대한 에너지 성능평가 솔루션 활용 가능
  - 대심도 지하공간에 대한 에너지 성능평가 솔루션 활용 가능
  - 일반 건축물에도 활용 가능

(2) 목표 성능
- 웹페이지를 통한 테스트베드 역사 에너지 성능평가 가능

2. 테스트베드 모델 구축 및 설계대안 평가

가. 에너지성능 분석 및 대안 평가 시스템 개념 및 구조설계

(1) 에너지성능평가 솔루션의 목적 및 활용
- 건축물의 저에너지 설계 및 BIM 설계에 관한 지침 및 프로세스를 바탕으로, BIM 정보를 활용한 도시철도 역사의 에너지성능평가 솔루션의 목적 및 활용을 정립했으며, 크게 신규역사, 기존역사, 간접적 활용으로 구분하여 제시하였음.
- 솔루션의 최종 목적은 도시철도 역사의 설계 및 유지관리 단계에서 저에너지 건축물 구현 및 에너지 효율화 향상을 위해 요구되어지는 에너지 성능평가, 법규검토, 설계대안 비교평가를 BIM Data를 기반으로 지원 가능한 시스템임.

(2) 에너지성능평가 솔루션의 기본개념
- BIM 기반 도시철도 역사의 에너지성능평가 프로세스는 건축환경에 관한 주요 설계 지침 및 프로세스, BIM에 관한 설계 지침 및 프로세스를 바탕으로 제시하였음.
- 이는 BIM 통합모델을 기반으로 기존의 건물 에너지 성능평가에 대한 (1)프로세스, (2)평가방식, (3)평가환경, (4)사용자 환경을 개선/구축하는 것을 기본 개념으로 함. 우선 성능평가 프로세스는 BIM 모델을 활용하여 건축 설계와 성능평가의 통합 프로세스를 추구하며, 성능평가 방식은 시뮬레이션 기반의 총량적 평가와 관련 제도 내 평가항목에 대한 개별적 평가를 바탕으로 건물의 에너지 성능을 종합적으로 평가함. 이를 위해 본 연구에서는 에너지 시뮬레이션 해석엔진과 관련 제도 및 가이드라인 등을 검토할 수 있는 별도의 분석모듈(Checker)을 이용함.
- 이때, Checker는 크게 Model Checker와 Code Checker로 구분되며, Model Checker는 건물 에너지 성능평가에 적합한 모델인지를 검토하는 것이며, Code Checker는 에너지 성능평가에 관한 인증제도 및 법규를 검토하는 것임. Model Checker와 Code Checker에서 검토되는 항목은 사용자들에 의해 정성적으로 평가되는 부분과 시스템 기반의 정량적 평가가 가능한 부분으로 나눌 수 있음.

정량적 평가가 가능한 항목은 BIM 모델을 바탕으로 자동적으로 평가될 수 있도록 검토항목별로 Rule Set을 정의해야 함. 이러한 성능평가 방식으로부터 투명하고 객관적인 성능평가 환경의 기반을 마련할 수 있음.

- 사용자 환경에서는 건물 에너지 모델링 작업, 성능평가 결과 제시 등이 3D BIM 모델 기반으로 이뤄짐에 따라 사용자에게 가시적이며, 사용자 친화적인 환경을 제공할 수 있음. 아울러 Web 환경 구축을 통해 건물 에너지 성능평가의 결과 조회 및 프로젝트 관리 기능을 제공함에 따라 분석뿐만 아니라, 다양한 관계자들의 협업/관리 환경을 제공할 수 있음.

(3) BIM 기반 에너지성능평가 사용자 프로세스 정립

- 도시철도 역사의 에너지성능평가 솔루션의 기본개념을 바탕으로 아래와 같은 프로세스를 제시하였으며, 이는 총 6단계로 구분됨. 본 프로세스에는 에너지 분석에 있어 선행되어야 할 BIM 모델링 과정, BIM 정보의 변환과정, 도시철도 역사의 에너지 속성입력 과정, 에너지성능 분석과정, 결과 출력 및 가시화단계가 제시됨.



<그림 3-6-2> 도시철도 역사 에너지성능평가 솔루션의 사용자 프로세스 개념도

<표 3-6-1> 에너지성능평가 단계별 업무내용

성능평가 단계	단계별 내용
STEP 1 도시철도 역사의 BIM 모델링 (사용 BIM S/w)	- 분석대상인 도시철도 역사를 상용 BIM S/W를 통해 모델링하여 국제 표준 포맷인 IFC 또는 gbXML로 추출함. - 모델링 시에는 본 연구에서 정립한 BIM Modeling Guideline을 기준으로 객체의 종류, 속성정보의 입력, 객체 모델링 방법을 준수하여야 함.
STEP 2 모델 유효성 및 법규 검토 (PC Planner)	- BIM S/W로부터 생성된 IFC 및 gbXML 파일이 본 연구에서 제시한 가이드라인에 맞게 모델링되었는지를 Model Checker를 통해 검토해야 함. - 도시철도역사의 설계안을 대상으로, Code Checker를 이용하여 건축환경에 관한 설계지침 및 인증기준의 정량적인 평가요소를 자동으로 검토해야 함. - 만약, Model / Code Checker에서 부적합한 파일로 판단될 시에는 검토결과를 바탕으로 BIM 모델링을 다시 수행해야 함.
STEP 3 SBM+gkXML 파일변환 (PC Planner)	- STEP 2로부터 검토된 건물 데이터는 BIM Converter 모듈을 통해 에너지분석용 데이터(SBM+gkXML)로 변환함. - 이는 Web Manager 웹사이트에 등록됨으로써 대상건물의 웹 가시화가 가능하며, 건물 에너지 해석을 위해 추가되어야 할 입력정보들이 사용자 인터페이스를 통해 STEP 5에서 정의됨.
STEP 4 프로젝트 생성 (Web Manager)	- Web Manager 웹사이트 내에서 프로젝트 생성하고, Converter로부터 변환된 에너지분석용 데이터(SBM+gkXML)를 해당 프로젝트에 불러와 건물을 등록함. - Web Manager 웹페이지에서는 회원가입, 로그인 기능이 제공되며, 프로젝트 정보, 건물정보, 성능평가 결과 등을 열람할 수 있음.
STEP 5 건물 에너지 모델링 (Web Manager)	- Web Manager에서는 BIM 공간모델로부터 정의된 정보 외에 건물 에너지 분석에 필요한 속성정보를 입력함. - 속성정보는 공간정보, 구조체 정보, 창호 정보, 스케쥴 정보, 공조시스템, 열원 정보, 신재생에너지시스템 등이 포함되며, 웹페이지 내에 가시화되는 3D 공간모델 기반의 사용자 입력 인터페이스로 손쉽게 입력할 수 있음.
STEP 6 시뮬레이션 수행 및 결과 가시화 (Web Manager)	- 건물 에너지 해석에 필요한 모든 속성정보를 입력했으면, 에너지 분석엔진을 구동시킴. - 시뮬레이션 수행에는 시뮬레이션 기간, 해석 모델의 종류 등을 선택할 수 있으며, 대상건물의 크기에 따라 시뮬레이션은 시간이 상이함. 도출된 결과는 해당 프로젝트의 DB에 기록되며, 3차원 공간모델을 기반으로 다양하게 살펴볼 수 있음. 아울러 성능평가 리포트를 출력할 수 있음.

나. **도시철도 역사 에너지성능분석 및 대안 평가 시스템 연구 방법론 정립**

- BIM 기반 도시철도 역사 에너지 성능분석을 위해서는, 도시철도 역사의 특성을 정확하게 해석 할 수 있는 에너지 해석 엔진, BIM 데이터와 에너지 해석 엔진 간의 상호운용성 확보, 사용자가 에너지성능분석 및 대안 평가를 원활하게 진행 할 수 있도록 솔루션 요구기능 정의가 필요함.
- 철도 역사의 특수성을 감안하여, 도시철도 역사의 특성을 건축, 설비, 운영적 측면에서 분석하여야 함.

<표 3-6-2> 도시철도 역사 에너지성능분석 및 대안 평가 시스템 연구 방법론 정립

구분		연구내용		
도시철도 역사 에너지설계 프로세스 (기반연구)		도시철도 역사 설계 프로세스 조사 설계지침(에너지절약설계기준) 조사		
도시철도 역사 특성		BIM 상호운용성	에너지 해석 엔진	솔루션 요구기능
도시철도 역사의 건축적 특성	대심도 대공간 아트리움 승강장	-BIM 표준 프로토콜 (IFC/gbXML) 분석 -BIM 모델링 가이드라인 작성 -에너지해석을 위한 BIM Data 변환모듈 -BIM Data Validation Module	-대심도 공간에 의한 지중열 전도 반영 -높은 층고에 따른 온도성층 현상 반영 -외기와 실내의 공기 유동 특성 반영	-3D 기반 건축정보 가시화 -3D 기반 에너지 분석정보 가시화 -BIM Data 변환 및 Checking 기능
도시철도 역사의 설비적 특성	공조/비공조 공간 구분 도시철도의 설비시스템	-공조/비공조 영역과 공간의 구분 -공조/비공조 혼재 -공간의 Converter 기술 개발	-설비 시스템 모듈 반영 -공조/비공조 영역에 대한 열적 구분 및 에너지 해석	-공조/비공조 공간 구분 기능 -설비 시스템 DB 관리 기능
도시철도 역사의 운영적 특성	사무공간 여객공간	-	-ISO 공간 분류 조건 검토 -공간에 대한 ISO 에너지 해석 요구 조건 정보 검토	-공간 특성별 DB 관리 기능

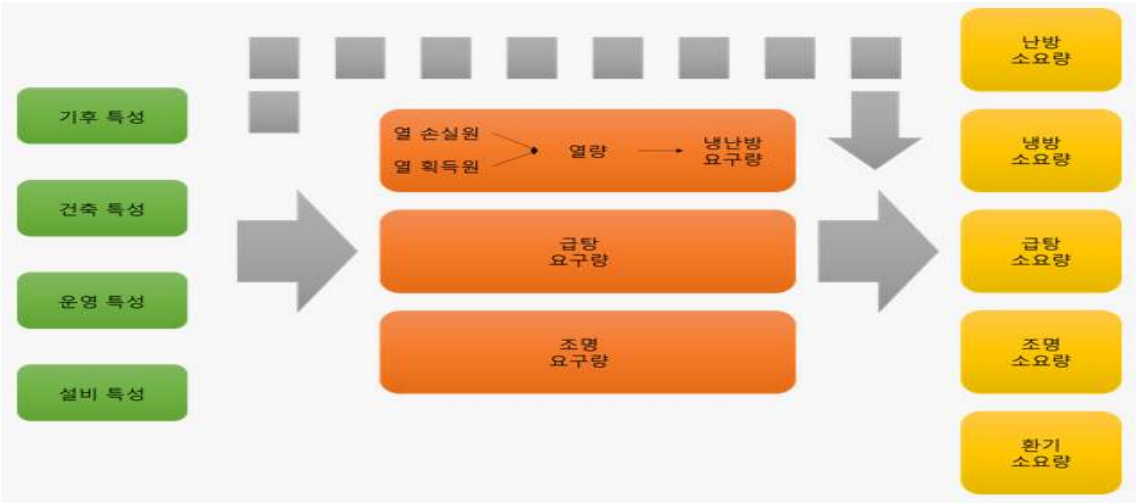
3. 설계 및 제작

가. 3차원 공간정보 기반 도시철도 역사의 에너지 분석모듈 개발

(1) 도시철도 역사 에너지 해석을 위한 ISO 13790+DIN V 18599 알고리즘 분석

- ISO 13790+DIN V 18599 기반 해석은 해석이 신속하고 입력 항목이 간단하며 사용자 수준과 무관한 일정 수준의 결과가 나타나나, 해석 정밀성이 낮으며 지중열, 공기유동 해석이 불가능해 별도의 해석이 필요하다는 기본적인 특성을 가지고 있음.
- 기후 특성 및 건축, 설비, 운영적 특성을 각각의 DB로 작성하여 각 계산 단계에 따라 데이터 및 계산식을 읽어서 해석하는 방식이므로 프로그래밍으로 구현 시 확장에 유리한 구조로 되어 있음.

- 에너지 소모 특성에 기반하여 에너지 요구량을 냉방, 난방, 조명, 급탕, 환기로 계산하며, 해당 값 중 냉난방의 경우 열에너지 손실, 획득에 따라 동시에 계산하며, 건축 및 기후 특성을 고려하고, 조명, 급탕의 경우 실의 운영적 특성과 면적에 따라 계산함.
- 환기 에너지의 경우, 요구량은 존재하지 않고 소요량만 존재하며, 환기 에너지의 특성은 해당 에너지가 냉방 및 난방에 영향을 미친다는 것으로, 냉방 및 난방 에너지가 환기 에너지로 인해 차감이 될 가능성이 있음.



<그림 3-6-3> ISO+DIN 기반 에너지 성능평가 프로세스

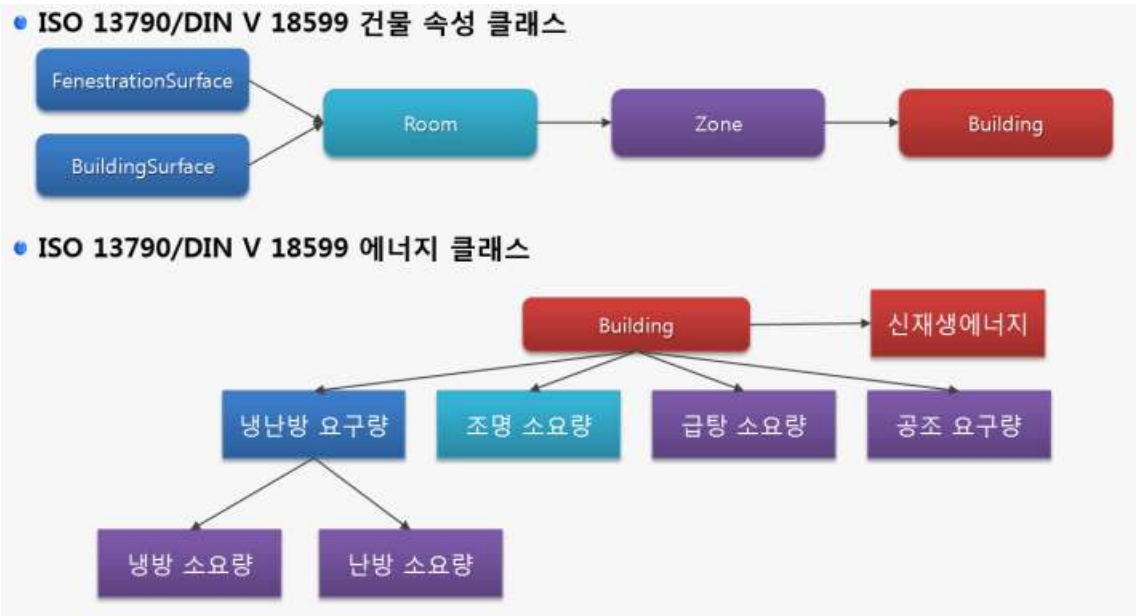
- 소요량 계산 시 설비 및 건축의 특성(효율, 용량, 수송 길이, 시스템 위치, 건물 방향 등)을 반영하여 소요량을 계산하고, 설비의 경우 전기를 사용하는 것으로 간주하여 에너지 소비량을 추가함.
- 에너지 소요량에서만 존재하는 값인 환기의 경우 별도의 계산 알고리즘이 존재하나, 환기량을 측정할 수는 없으므로, 환기량 측정을 위해서는 별도의 알고리즘 모듈을 개발하고 이를 ISO 엔진과 통합하는 방식으로 전체 시스템을 확장하여야 함.
- 이때, 환기량의 경우 AFN을 사용하는 것이 ISO의 계산 범위 및 계산 속도를 감안하였을 때 가장 효과적이며, 전문적인 CFD의 경우 지나치게 많은 계산량으로 빠른 검토가 불가능하므로 비효율적임.

<표 3-6-3> ISO 113790+DIN V 18599 알고리즘 기반 해석엔진 결과 값

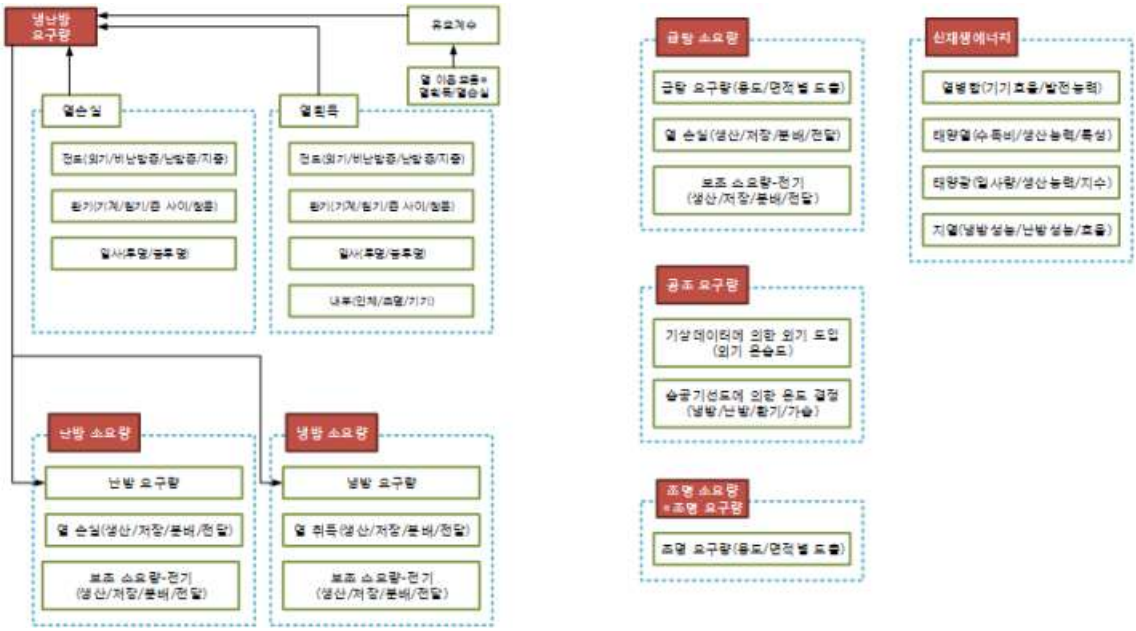
결과값	요구량	소요량	1차에너지 (소요량 환산)
난방	O	O	O
냉방	O	O	O
조명	O	O	O
급탕	O	O	O
환기	X	O	O

(2) 도시철도 역사 에너지 분석 알고리즘의 클래스 설계

- ISO 13790+DIN V 18599 알고리즘은 크게 건물과 에너지 두 가지로 분류할 수 있으며, 건물에는 건물의 방향, 용도, 면적, 높이, 기후 등 다양한 기본 정보가 들어가며, 에너지의 경우 해당 정보를 읽어서 계산 과정에 반영함.
- 해당 정보에 대해 관련된 정보를 클래스 별로 묶어서 프로그래밍을 함으로써 모듈의 관리를 간편하게 하고, 프로그램의 계산 속도를 높일 수 있으며 안정적으로 해석이 가능함.
- 건물의 경우, 건물(Building)/냉난방이 이루어지는 공간 묶음(Zone)/방(Room)/벽(Building Surface)과 창(Fenestration Surface)이 있으며, 이와 별개로 층(Floor)에 대한 개념이 존재하나 해당 값은 에너지 분석 시 의미가 없는 값임.
- 이 중 소요량, 요구량은 기본적으로 Zone 단위로 계산되며, 냉난방 계산 시 필요한 값을 벽과 창, 조명에 필요한 값을 실에서 가져오는 방식을 취하며, 이는 각 에너지 소요량 및 요구량의 특성과 관련이 있음.
- 에너지의 경우, 상기한 바와 같이 기본적으로 5가지 요소에 대해 계산되므로 5가지 클래스가 있으며, 냉난방 요구량 및 신재생 에너지를 위한 별도의 클래스가 추가됨.
- 추가적으로, 에너지의 경우, 열에너지의 이동에 관련된 클래스(전도, 환기, 일사, 내부발열) 및 보조적인 에너지(생산/저장/분배/전달에 따른 보조 및 수송 과정에서의 열 손실, 획득) 등에 대해 각기 클래스를 가지게 됨.

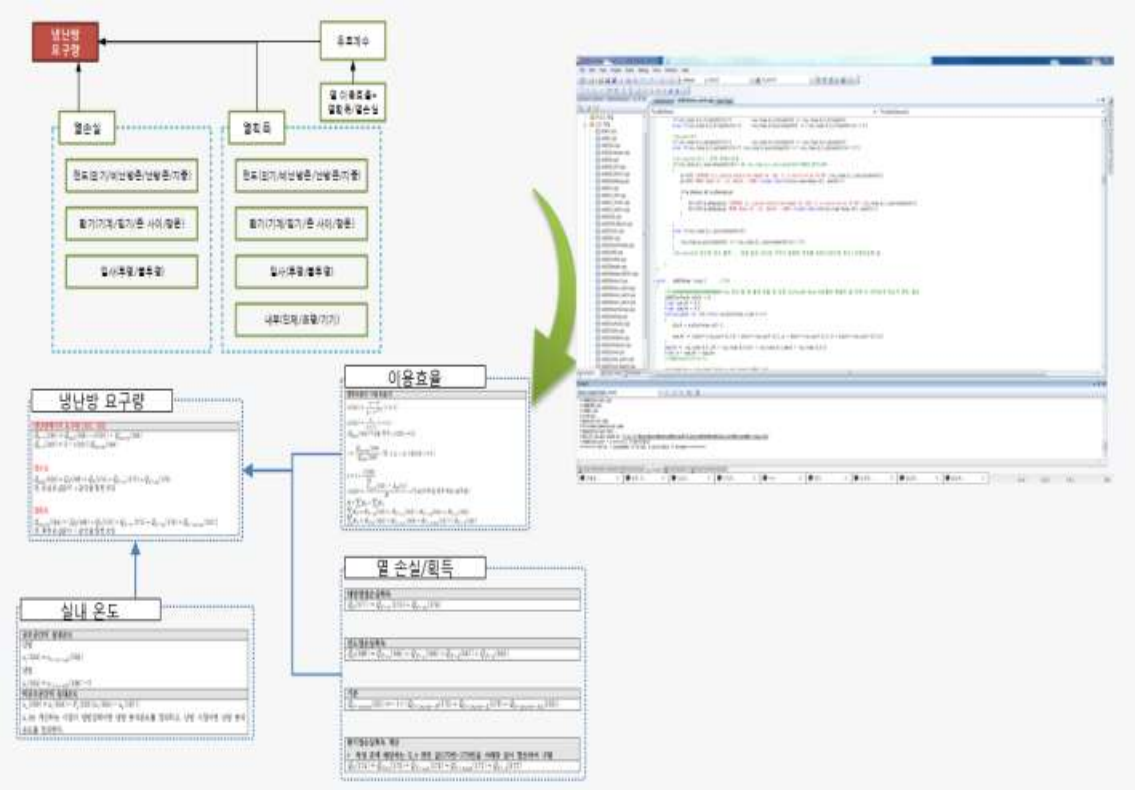


<그림 3-6-4> ISO+DIN 알고리즘의 기본 클래스



<그림 3-6-5> ISO+DIN 에너지 해석 모듈별 클래스

- 해당 클래스에 대해 ISO+DIN의 식들을 분류하고, 각 식들을 구성하는 변수를 정리한 후에 각 식들을 프로그래밍 언어로 작성함으로써 에너지 해석모듈을 작성함.



<그림 3-6-6> 에너지 해석모듈 작성 과정

- 알고리즘을 통해 계산된 결과 샘플과 해석모듈을 통해 계산된 샘플을 비교, 검토함으로써 모듈의 신뢰성을 확보하고, 결과값에 문제가 있는 부분에 대해서는 모듈을 검토, 수정함으로써 모듈의 안정성 확보함.

나. 도시철도 역사의 3차원 공간정보 기반 에너지성능 분석 및 대안 평가 솔루션 개발

(1) 도시철도 역사의 BIM 작성을 위한 역사 특성 검토

- BIM 기반 도시철도 역사 에너지 성능분석을 위해서는, BIM 데이터와 에너지 해석 엔진 간의 상호운용성 확보가 필수적이며, 여기에는 BIM 데이터의 변환이 필요함.
- BIM 데이터 변환을 위해서는 도시철도 역사가 가지는 특성을 명확하게 규정하고, 이 중 에너지 해석에 필요한 데이터를 선정하는 것이 상당히 중요한 과정에 있음.
- 기 분석한 철도 역사의 특성을 고려하여 철도 역사를 조사하고, 이를 기반으로 철도 역사에 대한 프로파일을 작성함으로써 철도 역사의 특성을 일반화하고자 함.
- 또한, 대표 역사를 선정하기 위해 5~8호선 역사를 분석하여 역사 성격을 정리함. 이 때 조사 대상은 지상/지하 여부, 환승 여부, 정거장 형태, 출입구 수, 층 수가 있음.
- 5~8호선 대상 역사 152개에 대해 통계를 분석한 결과, 지하 역사 149개, 지상 역사 3개가 있으며, 환승역 40개, 비 환승역 112개이고, 이 중 환승역에서 5~8호선 간 환승은 5개, 기타 노선과 환승역은 35개 역사임. 정거장 형태로는 섬식은 36개, 상대식은 99개가 있으며 기타 형식이 일부 있음.
- 역사 별 출입구 및 지하 층 수는 아래 표와 같으며, 정거장 형태, 환승 여부, 역별 출입 인원, 환승 인원등과 함께 데이터를 분석함으로써, 역사 별 평균 인구 밀도 및 역사에 대한 평균 거주 시간에 대한 데이터를 제작하여야 함. 이런 방식으로 구성한 데이터는 에너지 성능평가 시 건축물의 속성 정보로 활용할 수 있음

<표 3-6-4> 역사 별 출입구 수

출입구 수	≤2	3	4	5	6	7	≥8
역사 수	8	14	51	9	14	56	47

<표 3-6-5> 역사 별 지하 층 수

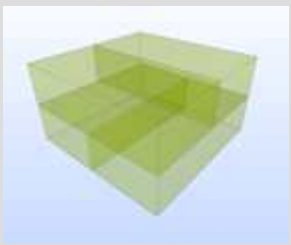
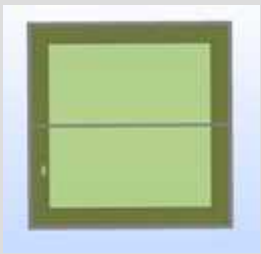
지하 층 수	≤2	3	4	5	≥6
역사 수	52	55	23	15	4

- 여기에, 도시철도 역사에 실제 사용되는 시스템을 실사를 통해 분석(터보냉동기, AHU, 개별 냉방장치)하였는데, 이는 기존 ISO 엔진에 탑재된 시스템을 그대로 활용 할 수 있음.
- 이러한 과정을 통해 도시철도 역사의 기본 특성을 확보하고, 기본적인 스케쥴 및 속성정보 설정에 지원하고 IFC 데이터 분석에 활용.

(2) 도시철도 역사에 대한 BIM Data 작성

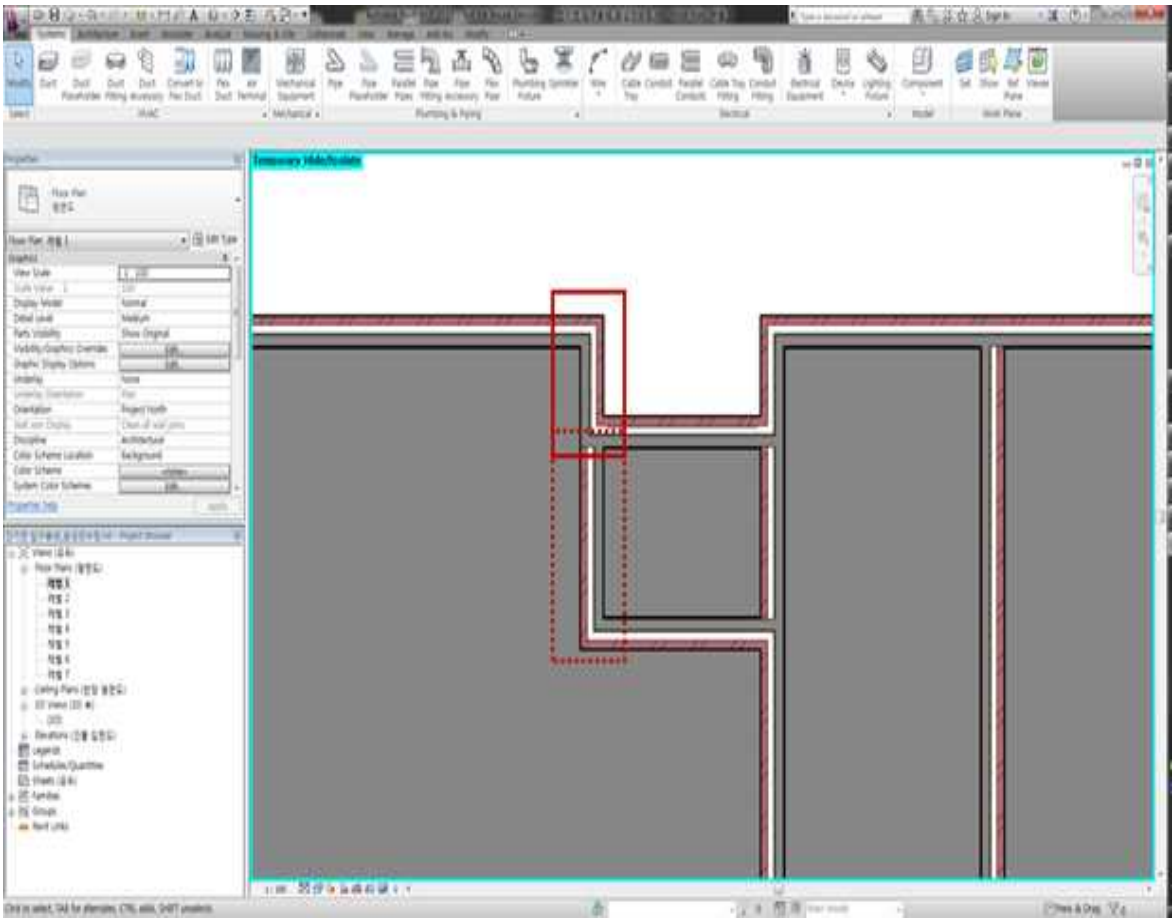
- IFC 데이터는 건축물에 대한 모든 데이터를 포함하고자 하는 것이 목표이므로 상당히 많은 데이터를 가지고 있으며, 이러한 이유로 건축적 개념과 해석을 위한 SpaceBoundary 개념을 별도로 가지고 있음.
- 에너지 해석에서는 건축물의 공간 정보, 벽체 정보와 같은 기본적인 정보만이 요구되며, 그 이외에는 사용되는 설비, 설정 온도, 재실 인원 수, 건물 용도 등 개별로 설정 할 필요성이 있는 정보들이 사용됨.
- 즉, IFC 데이터에서 읽어오는 데이터는 건축의 형상 정보이며, 이 데이터 중 에너지 해석에 대한 데이터인 SpaceBoundary 관점의 데이터가 필요함. 굳이 SpaceBoundary 데이터를 읽어 와야 하는 이유는 에너지 해석 시 실은 건축 벽체 중간을 기준으로 아주 얇은 면(두께가 없는 면)으로 관측하지만, 건축 관점의 경우 벽체는 실제 두께가 있고, 바닥과 천장이 별개로 생각되는 해석적 관점과 동일하게 관측할 수 있는 건축적 관점 등 두 관점간의 차이가 크기 때문이고 IFC 데이터는 두 데이터를 모두 가지고 있으므로 취사 선택이 필요함.
- 하지만 별개로 건물에 대한 3D 가시화를 위해서는 건축 형상 정보 역시 필요하므로 해당 데이터를 취사 선택하되, 각 데이터를 별개로 읽어오는 방법이 필요함.
- 이를 위해서는 BIM 데이터에서 에너지 해석을 위한 건축 형상정보와 건축물의 가시화를 위한 건축 형상정보 두 가지의 포맷을 별개로 작성하고 각각의 데이터를 별개로 읽을 수 있도록 설정하는 것이 현명함.

<표 3-6-6> 건축 형상 정보에 대한 건축 및 IFC 관점 비교

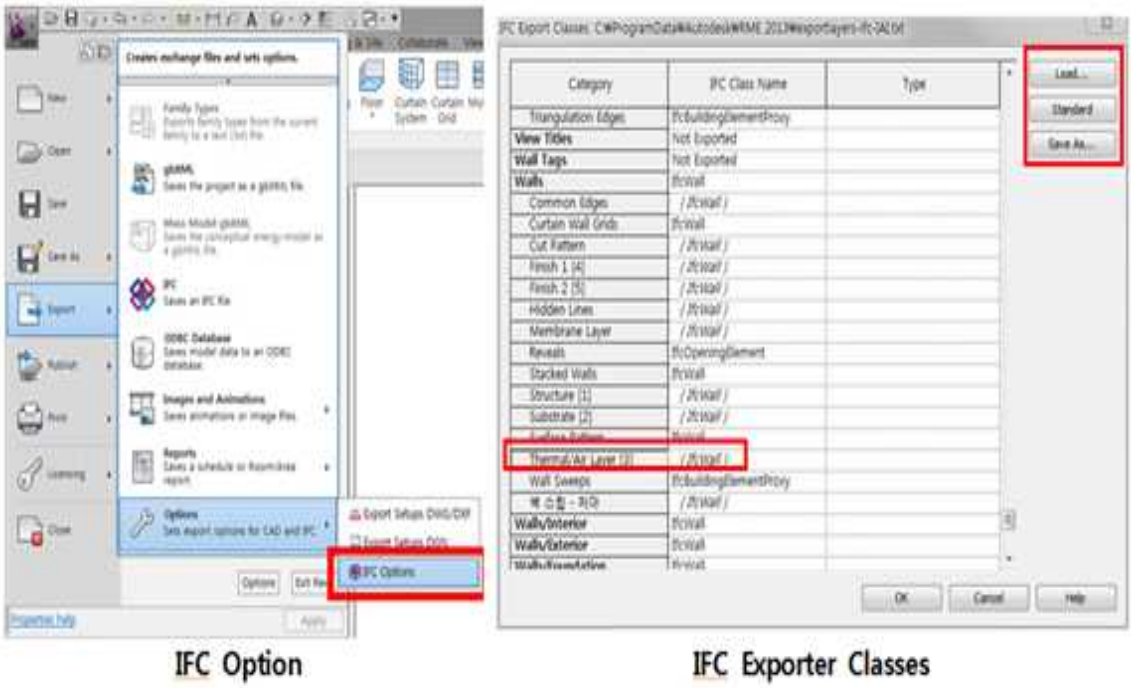
 건물 전체	 1층	 2층
	건축적 관점	SpaceBoundary 관점
Building	1개	1개
Zone	4개	4개
Wall	14개	16개
Floor	4개	6개
Ceiling	없음	4개
Roof	2개	2개

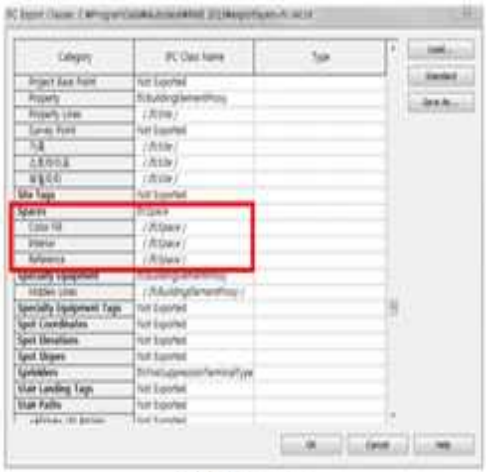
(3) BIM데이터 변환을 위한 가이드라인 작성

- 앞에서 정리한 내용을 바탕으로 BIM을 통한 에너지 해석 시 필요한 데이터를 선정하였으나, 이 데이터만으로는 BIM 데이터를 안정적으로 변환하기에는 어려움이 있음.
- 이는 IFC 내부에 과도하게 많은 데이터를 가지고 있기 때문으로, 변환 시 객체 형상 손실 및 부정확, 불필요한 정보가 전달될 수 있음.
- 또한 BIM 모델 작성 시 IFC 데이터의 구성 방법에 대한 명확한 기준은 없으므로, 동등한 모델을 작성하고 동등한 구조에서 에너지 성능평가를 위해 BIM 가이드라인 작성은 안정적인 변환을 위해서는 필수적임.
- 이를 위해서, 에너지 해석 시 필요한 데이터를 대상으로 다양한 방식으로 모델링을 진행하고, 가이드라인을 작성하며, 여기에는 기본적인 모델링 기법, 그리고 속성 설정 방법을 정의함.



<그림 3-6-7> 모델링 기법에 대한 예시 이미지





<그림 3-6-8> 속성 설정에 대한 예시 화면

(4) 대안 분석을 위한 다중회귀분석

(가) 회귀분석 기법

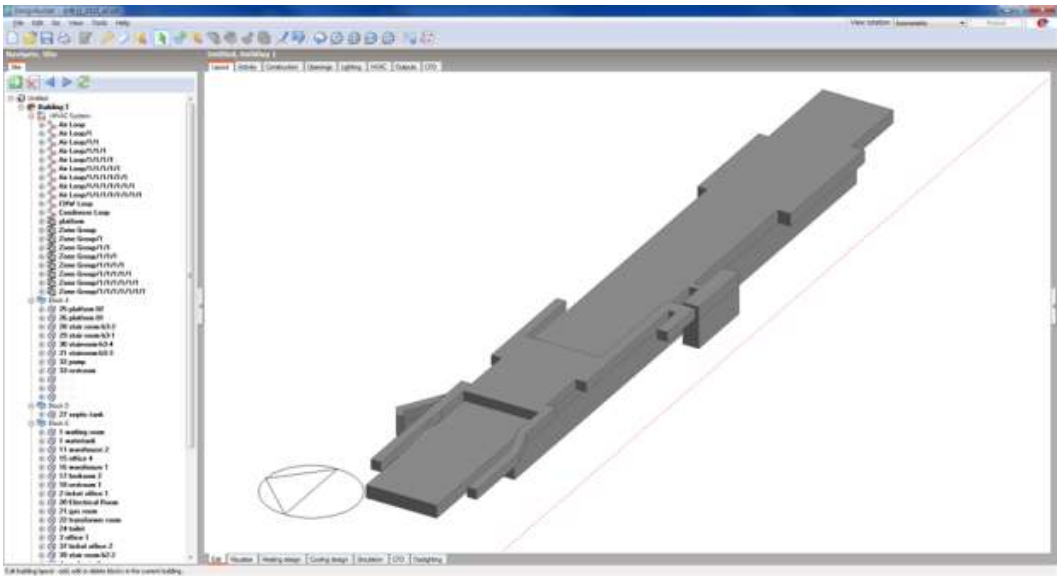
- 시뮬레이션 결과의 대안분석을 위해 회귀분석 모듈 탑재함. 회귀분석은 하나나 그 이상의 독립변수의 종속변수에 대한 영향의 추정을 할 수 있는 통계기법으로 하나 이상의 예측 변수와 반응 변수 사이의 통계적인 관계를 설명하고 새 관측치를 예측하는 방정식을 생성함.
- 본 연구에서는 하나의 연속형 방응 변수와 둘 이상의 예측 변수 사이의 선형 관계를 조사하는 다중 선형 회귀 분석기법을 사용하였으며, 회귀분석은 총 11개의 case를 적용해 산출함.
- 본 연구성과물에 적용된 시뮬레이션 결과는 1년 동안의 사용량을 산출한 것으로 1년 365일 data가 적용되어 있음.

(나) 분석모듈 신뢰성 검토

- 본 연구성과물의 대상시설인 수락산역사의 실제 에너지시용량(kWh)은 프로세스, 조명, 동력, 환기, 냉방이 각각 970984, 501596, 254988, 452097, 129552 이며 시뮬레이션 결과는 973407, 501596, 246322, 454138, 135054로 최대 4%정도의 근소한 차이를 보임으로 신뢰성을 확보함.

(다) BIM 모델링 및 기존 툴을 이용한 시뮬레이션 수행

- Revit을 통해 모델링한 BIM 파일을 동적 에너지 시뮬레이션 툴 디자인 빌더(Designbuilder)로 불러들임 HVAC 시스템, 조명 밀도 값을 서로 다르게 설정하여 시뮬레이션을 수행.



<그림 3-6-9> 수락산 역사 디자인빌더 이미지

<표 3-6-7> 시뮬레이션 수행을 위한 변수 설정

번호	냉동기 COP	가스보일러 효율	팬 효율	펌프모터 효율	조명 밀도(W/m^2)
1	5.5	0.6	0.4	0.9	8
2	6.5	0.6	0.4	0.9	8
3	7.5	0.6	0.4	0.9	8
4	5.5	0.7	0.4	0.9	8
5	5.5	0.8	0.4	0.9	8
6	5.5	0.6	0.5	0.9	8
7	5.5	0.6	0.6	0.9	8
8	5.5	0.6	0.6	0.8	8
9	5.5	0.6	0.6	0.7	8
10	5.5	0.6	0.6	0.9	7
11	5.5	0.6	0.6	0.9	6

<표 3-6-8> 시뮬레이션 수행 결과

번호	Room Electricity (kWh)	Lighting (kWh)	System Fans (kWh)	System Pumps (kWh)	Heating (Electricity) (kWh)	Heating (Gas) (kWh)	Cooling (Electricity) (kWh)	Heat Rejection (kWh)
1	973,407	501,596	454,138	246,433	20,495	489,882	119,285	15,933
2	973,407	501,596	454,138	246,433	20,495	489,882	105,537	15,933
3	973,407	501,596	454,138	246,434	20,495	489,882	95,455	15,933
4	973,407	501,596	454,138	246,433	20,495	419,899	119,285	15,933
5	973,407	501,596	454,138	246,433	20,495	367,412	119,285	15,933
6	973,407	501,596	393,289	238,735	21,989	512,282	117,605	15,928
7	973,407	501,596	352,722	232,521	23,020	527,505	116,276	15,923
8	973,407	501,596	454,138	246,443	20,495	489,882	117,640	15,933
9	973,407	501,596	454,138	246,457	20,495	489,882	116,031	15,932
10	973,407	438,897	452,245	246,369	22,188	490,836	117,760	15,933
11	973,407	376,197	450,361	246,304	23,905	491,795	116,287	15,933

- 시뮬레이션을 수행 결과를 바탕으로 다중선형 회귀분석을 수행하여 다중회귀계수 도출

<표 3-6-9> 다중회귀계수 도출결과

변수	에너지사용량(kWh) 계수정보							
	프로세스	조명	팬(환기)	펌프(동력)	난방(전기)	난방(가스)	냉방(전기)	냉각탑
Y절편	973406.7	0.1	1337708.105	368918.456	11796.85481	516660.7838	181513.402	16016.86621
냉동기 COP	0	2.32091E-12	3888.76015	431.0004511	-93.78575188	-113.0449624	-11913.77079	0.246315789
가스보일러효율	0	-1.10113E-11	38887.6015	4308.604511	-937.8575188	-630978.2496	3675.892105	2.463157895
팬효율	0	-9.46398E-12	-362203.8571	-49691.57143	8998.835714	146862.2857	-8188.75	-35.9
펌프모터효율	0	-3.45477E-13	-473532.2301	-64053.49023	11736.46038	177365.1925	2803.007895	-40.38315789
조명밀도	0	62699.5	-45463.98301	-6329.269023	-528.6159624	16780.57925	153.9807895	-4.554315789

(5) 신재생에너지 적용방안

- 신재생에너지는 사용자가 태양광의 고정식, 추적식, BIPV 방식 중 대상건물에 적용된 방식을 선택하여 적용용량(kW)을 직접 입력하며, 각 방식에 적용되는 생산량 및 보정계수는 다음과 같음.

<표 3-6-10> 태양광에너지 생산량 및 보정계수

구분		단위에너지 생산량 (kWh/kW·yr)	보정계수
태양광	고정식	1,358	1.56
	추적식	1,765	1.68
	BIPV	923	5.48

4. 현장적용 및 평가

가. 에너지성능 분석 및 대안 평가 시스템의 테스트베드 적용 및 평가

(1) 테스트베드 모델 구축 방안

(가) 목표

- 테스트베드 역사에 대한 모델링

(나) 추진 전략 및 방법



<그림 3-6-10> 테스트베드 현장평가 및 모델 구축절차

(다) 모델 구축절차

- 에너지 성능평가 모델 작성을 위해 도면을 재분석하고, 실사를 통해 도면을 보완하고 이후 모델링 툴을 활용하여 작성

(라) 평가 방법

- 테스트베드 역사의 모델 육안 확인

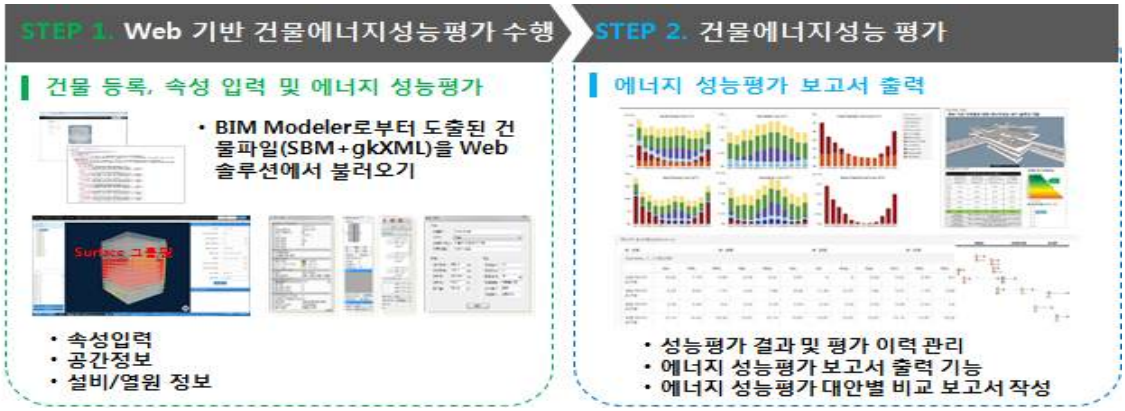
(2) 테스트베드의 설계대안 평가

(가) 목표

- 테스트베드의 설계대안을 확인하고 이에 대한 비용 평가

(나) 추진 전략 및 방법

- 역사 에너지 성능평가 통합 솔루션에 역사 모델 및 정보를 입력하여 에너지 성능평가를 실행하고 연간 에너지 비용을 계산하여 출력함.
- 관계자와 설계대안을 2~3안 선정하고, 에너지 성능평가를 다시 진행, 이후 대안을 솔루션을 통해 비교하여 연간 절감비용 및 회수 연수로 환산하여 설계 대안평가 진행함.



<그림 3-6-11> 에너지 성능평가 프로세스(안)

(다) 평가 방법

- 테스트베드 역사 에너지 비용결과와 실제 비용 검토

(3) 통합설계 프로세스 정립

(가) 목표

- 도시철도 역사 에너지 성능평가 솔루션을 활용하여 대안을 평가하는 프로세스 정립

(나) 추진 전략 및 방법

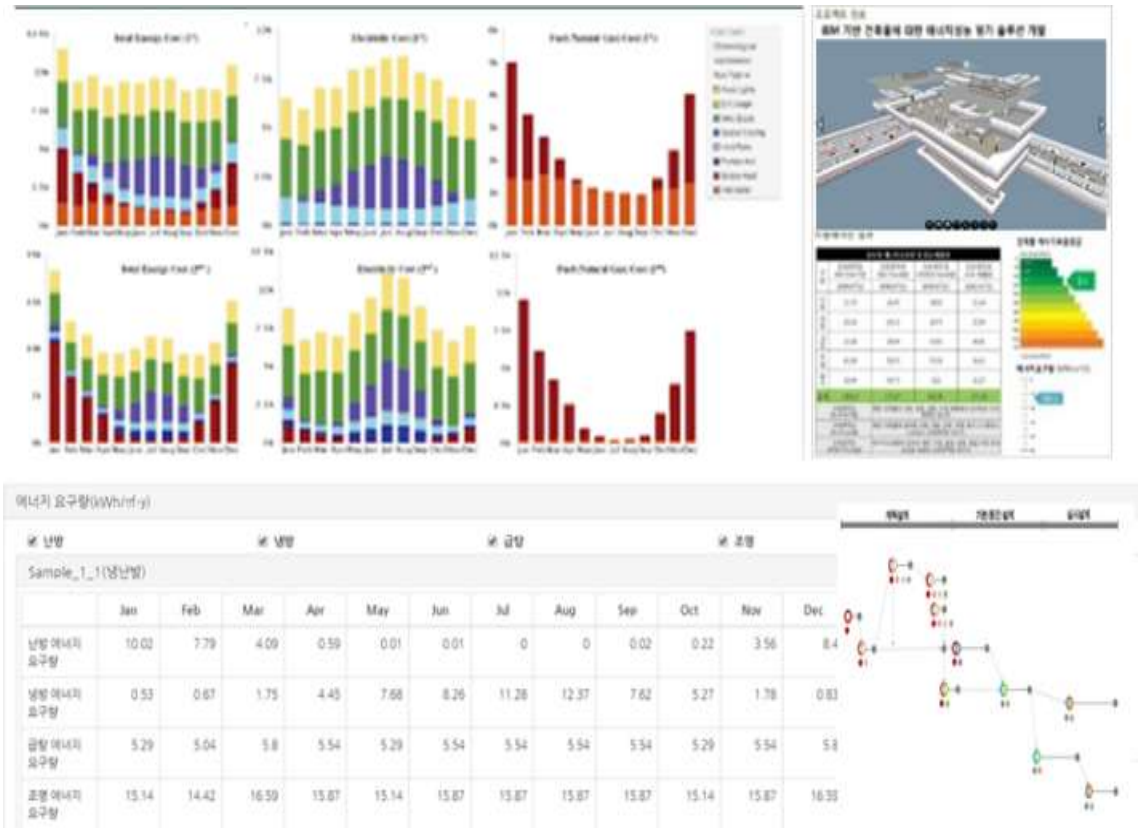
- 도시철도 역사 에너지 성능평가 프로세스 정리함.
- 기존 에너지 성능평가 프로세스를, 도시철도 역사에 적합하게 바꾸면서 설계 단계와 완공 이후의 단계에 각각 적합하게 프로세스를 분리하여 보완.
- 도시철도 역사 에너지 대안평가 프로세스 정립함.
- 대안평가 시 작업의 어려움, 영향력을 분류하고, 이들에 대해 정리하고 재구성.
- 설계 적합한 단계에서 적합한 설계 대안을 평가할 수 있는 가이드라인 제시.

<표 3-6-11> 설계 변경 요소별 영향(안)

	디자인 변경	부재 변경	설비 변경	스케쥴 변경
모델링 난이도	최상	하	중	하
영향	최상	중-하	상-중	하

(다) 평가 방법

- 프로세스 보고서 및 프로세스를 통한 대안평가 보고서 작성

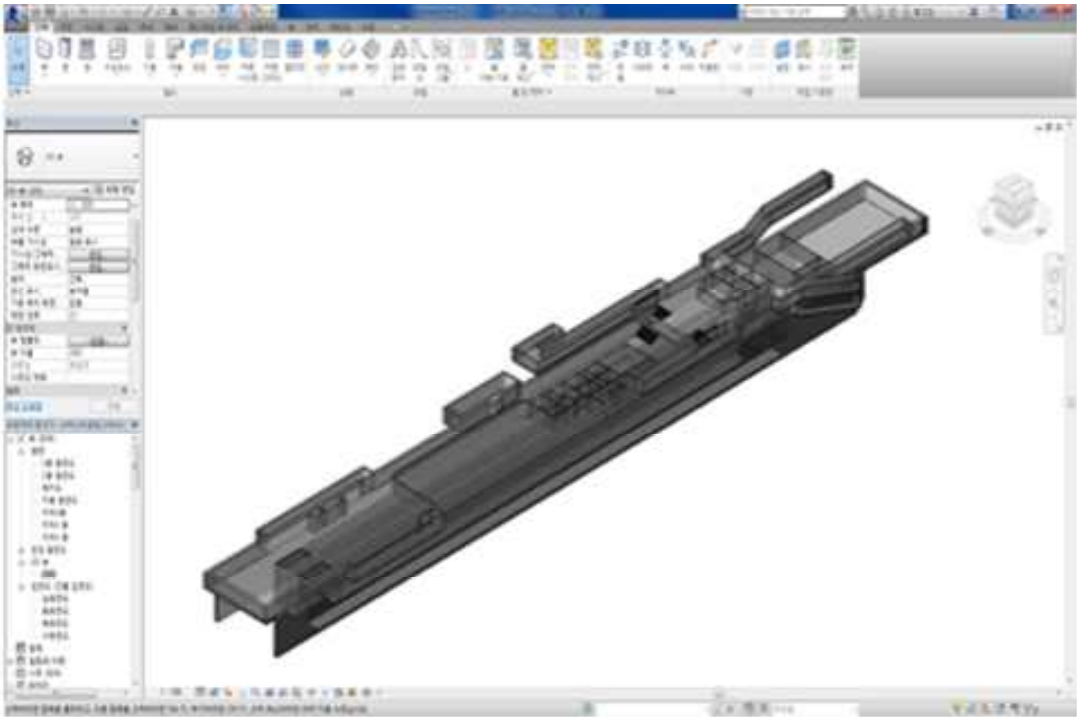


<그림 3-6-12> 프로세스를 통한 대안평가 보고서(안)

나. **웹페이지를 통한 테스트베드 적용 및 평가**

(1) BIM 저작도구를 이용한 테스트 모델 구축

- 본 연구성과물은 3차원 공간정보 기반 에너지성능 분석 및 도시철도 역사설계 통합 프로세스 작성을 위해 테스트베드 모델을 구축하고 이에 대한 시뮬레이션 도구를 개발한 것으로, 수락산역 설비/조명 시스템 교체 및 신재생에너지 추가에 따라 예상되는 에너지 절감량 및 비용을 제시.
- 본 연구성과물에 적용된 회귀방정식의 변수확장을 통해 관리자의 시점에서 적용 가능한 설비시설의 세부적인 정보가 입력 가능하나 본 연구성과물의 경우 사용 대상자에 대한 초점을 비전문가에 맞춰 설정했기 때문에 전문적인 변수를 최소화하 함.



<그림 3-6-13> 테스트 모델 구축

(2) 웹페이지에 BIM 파일 입력 및 건축물 기본 정보 입력

(가) 프로젝트 명, 역 이름, 연면적 및 준공년도 입력
(나) 층수, 구조, gbXML 파일 입력



<그림 3-6-14> 기본정보 입력

(3) 설비정보 입력

(가) 현재 설치된 냉동기, 가스보일러, 송풍기 제어 시스템, 펌프 제어시스템의 준공연도 입력

- 개선 후 설비시스템의 경우 현재 수락산역에 적용된 설비와 동일한 설비방식을 따르나, 효율 및 COP 등 성능자체는 경년변화로 인해 노후되지 않은 신형을 기준으로 적용

(나) 해당 설비시스템의 교체여부 선택

(다) 기존 조명시스템 및 새로 적용한 조명 시스템 선택



<그림 3-6-15> 설비정보 입력

(4) 시뮬레이션 결과 도출

(가) 앞 단계에서 입력한 건축개요 및 3D 이미지 출력

(나) 검토 결과

- 프로세스, 조명, 팬, 펌프, 난방, 냉방에 대한 면적 당 에너지사용량(kW/m2) 개선 전후 결과 비교
- 전기요금 및 가스요금(원/년)의 개선 전후 결과비교
- 이산화탄소 배출량(kg/년) 개선 전후 결과비교

(다) PDF 파일로 결과 보고서 출력



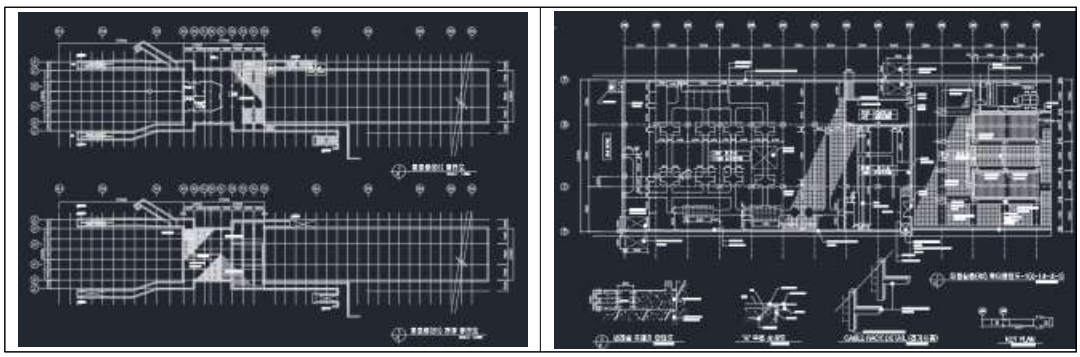
<그림 3-6-16> 시뮬레이션 결과

다. 개발 모듈을 바탕으로 한 수락산 역사 성능평가결과 및 개선안 제시

(1) 설비도면 및 육안조사를 바탕으로 한 입력변수 설정

(가) 연면적

- 건축 도면검토를 통해 역사 연면적 10,423.55m^2 확인



<그림 3-6-17> 수락산 역사도면

(나) 냉동기, 보일러/급탕, 팬, 펌프, 조명 종류 및 설치년도

- 설비 도면검토 및 육안조사를 통해 확인.

터보냉동기(1995.6)	전기 온수기(2012.6)
	
송풍기/펌프 제어 시스템(1995.10)	일반 형광등 조명
	

<그림 3-6-18> 설비 및 전기시스템 현황

(다) 개선안 제시

- 설비시설의 경우 상대적으로 노후화된 터보냉동기와 송풍기/펌프 제어 시스템을 신규 장비로 교체하고, 조명의 경우 고효율 LED 램프로 교체.

(2) 현 사용량과 개선안 비교

- 설비 및 전기시스템의 개선 후 면적 당 에너지 사용량은 17.88% 감소함을 확인하였으며, 전기/가스요금은 16.25%감소함을 확인함.

<표 3-6-12> 면적당 에너지 사용량 비교

면적 당 에너지사용량(kWh/m^2년)		
	개선 전	개선 후
프로세스	138.24	138.24
조명	97.95	35.62
팬(환기)	56.97	67.40
펌프(동력)	33.91	35.43
난방(전기)	2.39	3.78
난방(가스)	60.83	38.30
냉방(전기)	20.75	18.77
총계	411.06	337.54

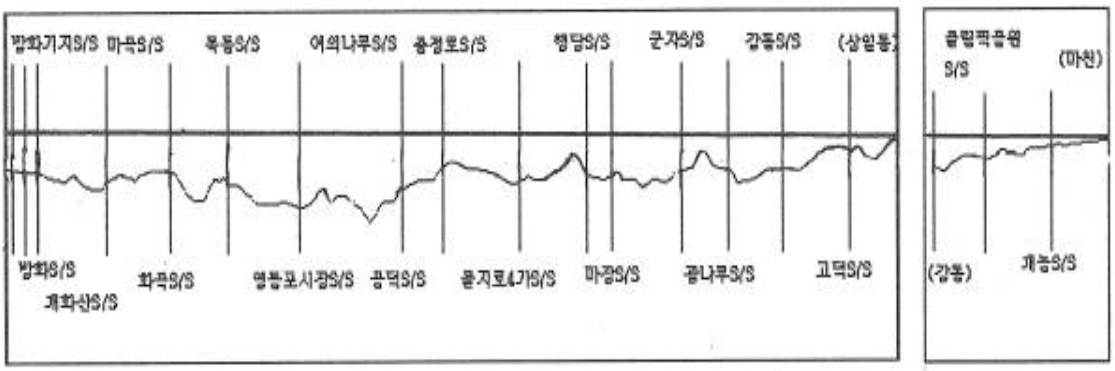
- 본 솔루션의 활용을 통해, 설비 및 전기시스템의 교체를 통해 감소하는 에너지 사용량 및 비용에 대한 정보를 간략하게 계산 할 수 있음.

제7절. 도시철도 역사 테스트베드 구축 및 성능평가

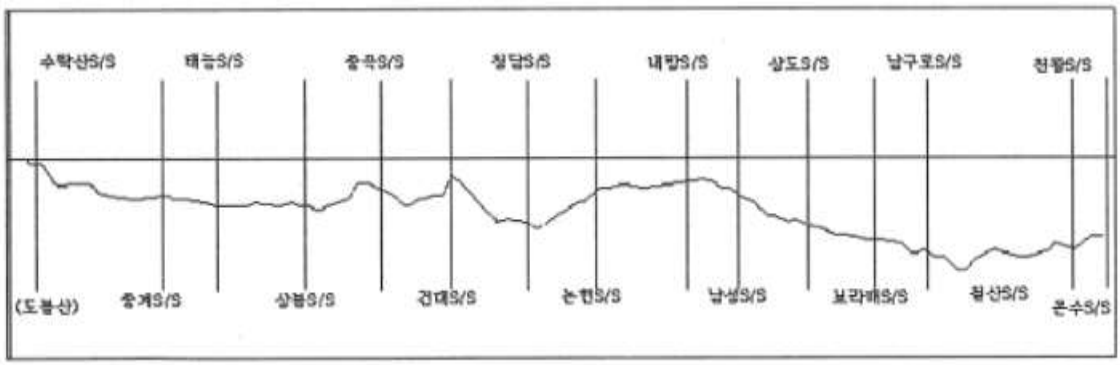
1. 테스트베드 구축

가. 테스트베드 실증역사 선정

- 테스트베드를 선정하기 위한 주요 요소로는 도시철도에 적용할 신재생에너지가 어떤 특성을 가지고 있는지에 대한 검토가 필요하며, 우선적으로 전동차 회생전력을 수집하고, 태양광을 이용한 발전 시스템의 적용이 필요하기에 그에 맞도록 도시철도 역사 선정이 필요함.
- 전동차 회생전력 수집을 위해서는 회생전력의 특성에 따라 단시간에 발생과 소멸이 이루어지기 때문에, 선로 조건을 조사하여, 가급적 회생전력 발생이 길게 이루어지는 구간을 우선 대상으로 검토하였음.

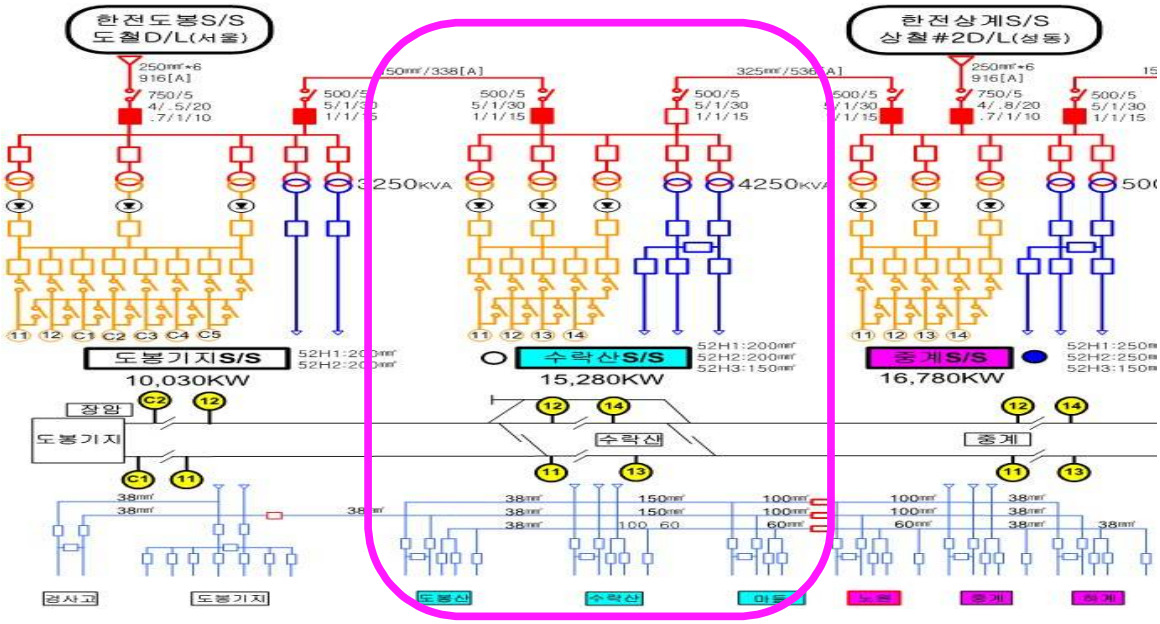


<그림 3-7-1> 5호선 선로 구배도



<그림 3-7-2> 7호선 선로 구배도

- 선로의 최대 표고차와 구배(상, 하) 연속구간을 비교한 결과 5호선 화곡, 영등포시장, 을지로4가 변전소, 7호선 수락산, 건대, 상도 변전소 구간이 표고차 및 구배조건상 전동차 회생전력 발생에 유리한 조건을 가지는 것으로 검토됨.



<그림 3-7-3> 실증역사 전력계통도

<표 3-7-1> 5, 7호선의 표고차 및 구배조건

호선	구 간	최대 표고차	구배 연속구간	비고
5	화곡S/S ~ 목동S/S	27.0m	3.40km	화곡S/S
	목동S/S ~ 영등포시장S/S	25.0m	2.31km	영등포시장S/S
	충정로S/S ~ 을지로4가S/S	18.0m	3.24km	을지로4가S/S
7	수락산S/S ~ 중계S/S	15.0m	2.06km	수락산S/S
	건대입구S/S ~ 청담S/S	33.0m	1.82km	건대입구S/S
	내방S/S ~ 상도S/S ~ 남구로	62.8m	9.02km	상도S/S

- 또한, 대부분이 지하구조물로 설치된 도시철도 역사의 특성에 따라 에너지 절감 시스템을 구축할 수 있는 공간에 대한 검토가 필요하여, 각 역사의 잉여공간을 조사하여 구축여건을 확인함.
- 도시철도의 전력계통은 한전을 통한 수전점에서 전력을 변환하여 약 3개의 역사 그리고 전동차로 전력을 공급하는 방식으로, 에너지 절감시스템의 효과 분석을 위해서는 단일 그룹으로 구성된 3개의 역사를 선정하는 것이 필요하였고, 그중 태양광 발전시스템을 설치할 수 있는 일조권이 확보된 지상부가 있는 역사가 필수적임.
- 종합적으로 단일 전력 공급 구간의 3개 역사로 볼 때 태양광 발전시스템을 설치할 수 있는 도봉산역사와 회생전력 발생에 유리한 수락산변전소의 구간을 테스트베드 역사로 선정함.

나. **실증역사 에너지 사용량**

- 수락산변전소의 경우, 도봉산역, 수락산역, 마들역사에 전력을 공급하고 관할구간의 열차에 전력을 공급하는데, 변전소에서 공급하는 전력을 열차와 역사로 구분하여 표시하면 다음과 같음.



<그림 3-7-4> 수락산변전소에서 공급하는 전력

- 이는 변전소에서 소비되는 전력을 월별로 표시한 것으로, 대체적으로 열차의 전력 사용이 많지만, 역사의 냉방이 시작되는 기간에는 역사의 소비전력이 더 많음.
- 역사에서 소비되는 전력을 보면, 각 역사는 내부 시설과 환경 등에 따라 소비전력에 차이를 보이며, 수락산변전소에서 공급하는 도봉산, 수락산, 마들역사의 월별 전력 소비패턴은 아래와 같음. 역사 소비전력은 도봉산 역사가 3개 역사 중에 가장 작은데, 도봉산역사는 지상부에 건축된 역사로, 별도의 승강장 환기가 필요 없는 역사로, 환기와 관련된 소비전력이 없어, 소비전력이 낮게 나타남.



<그림 3-7-5> 도봉산, 수락산, 마들역사의 월별 젼력 소비 패턴

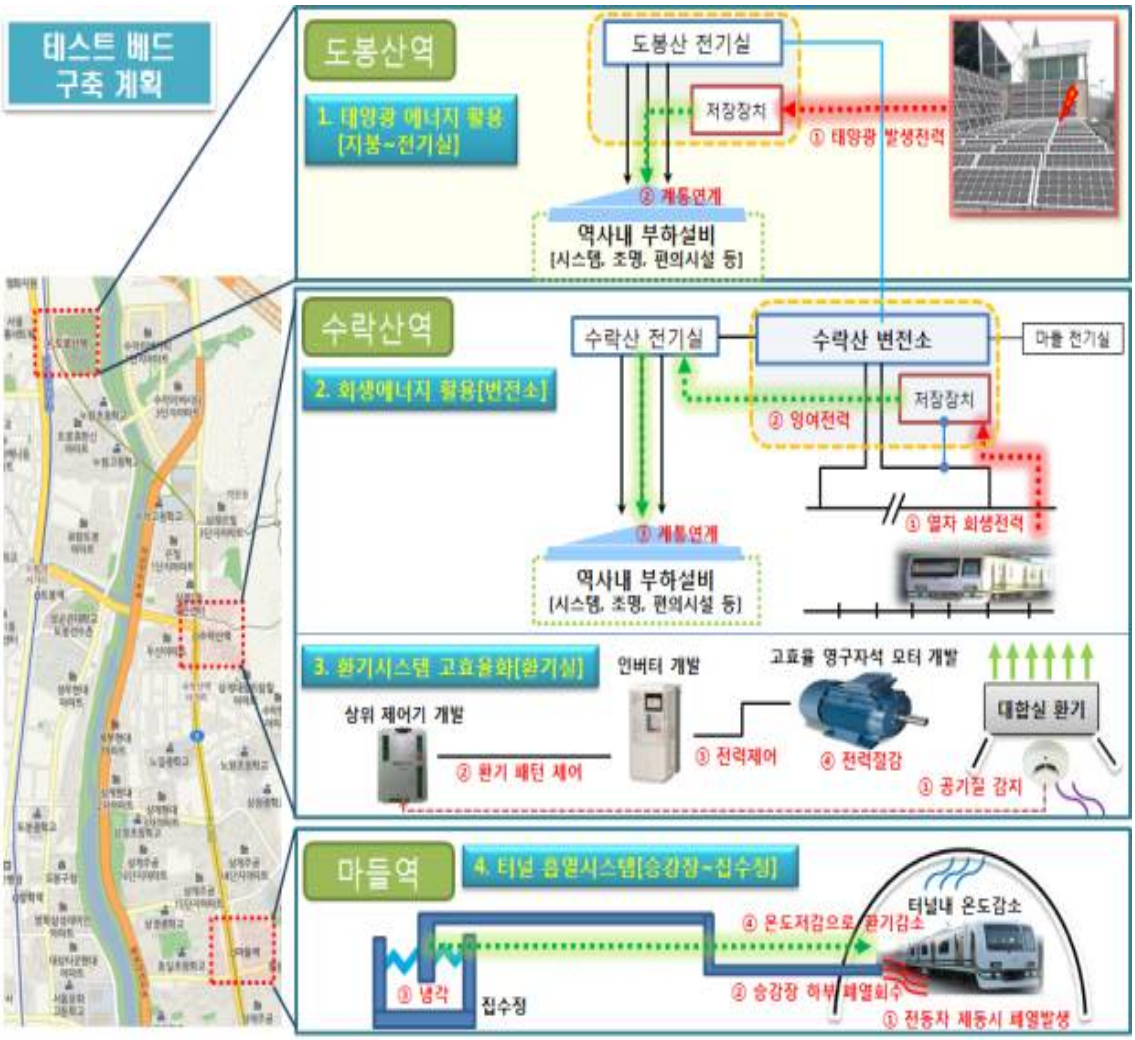
- 에너지 절감시스템 가동을 통한 역사에너지 절감을 위하여, 기준 값은 도봉산, 수락산, 마들의 중 테스트베드가 설치되는 수락산역의 3년간 평균값을 기준으로 절감량을 산정함.

<표 3-7-2> 3개 역사의 평균값

[단위:kwh]	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
도봉산전기실	95,194	71,712	60,437	56,966	50,606	54,878	56,376	60,586	56,573	50,026	53,894	65,083
수락산전기실	208,623	153,258	171,897	168,537	153,015	162,690	169,500	250,149	202,236	168,375	167,718	158,010
마들전기실	218,232	159,552	153,414	177,417	168,201	189,153	192,159	196,929	213,498	186,417	204,300	175,167
평균	174,016	128,174	128,583	134,307	123,941	135,574	139,345	169,221	157,436	134,939	141,971	132,753

다. **테스트베드 설비구축**

- 에너지 절감설비의 성능을 검증하기 위해서 에너지 절감설비별로 테스트베드인 지하역사(수락산역)와 지상역사(도봉산역)에 설비 특성을 고려하여 설치함.
- 지하역사(수락산역) 테스트베드 구축
  - 200kW 계통연계형 PCS
  - 400kWh 전력저장장치(리튬)
  - 500kW 회생에너지 전력변환장치
  - 통합에너지운영시스템(TOS)
  - 고효율 환기시스템(30kW SynRM, 가변제어인버터, 환경센서)
- 지하역사(도봉산역) 테스트베드 구축
  - 태양광 모듈 (10.8kW Si결정질 모듈, 7.2kW CIGS 플렉시블 모듈)
  - 태양광 컨버터(12kW 3대)
  - 90kWh 전력저장장치(리튬) 및 PCS(50kW)
- 흡열모듈 시스템의 경우 집수정~승강장에 이르는 선로구간에 흡열 모듈을 설치해야 하므로 열차 안전운행의 문제로 인해 현장 구축을 시행하지 않음.



<그림 3-7-6> 테스트베드 구축을 위한 전체 계획

• 테스트베드 구축 추진경과

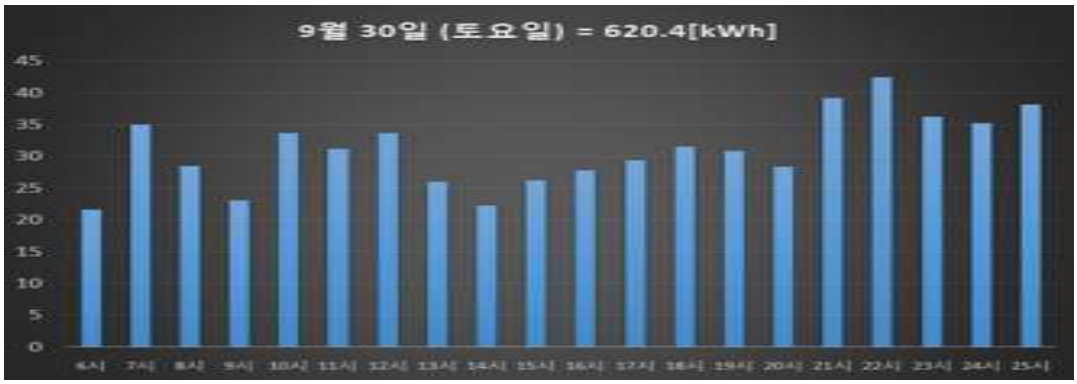
테스트베드 구축 추진경과
○ ‘16. 6. 9. 테스트베드 구축관련 기반공사 자재반입
○ ‘16. 6. 10. 테스트베드 기반공사(케이블 트레이 설치작업)
○ ‘16. 6. 13. 테스트베드 ESS ROOM 칸막이 공사 및 자재반입
○ ‘16. 6. 15. 기반공사(ESS ROOM 조명/전열 공사, 케이블 트레이, PIT 트레이)
夜○ ‘16. 6. 19. PCS 및 BATTERY 장비반입
夜○ ‘16. 6. 21. ~ 22. 테스트베드 구축 기반공사(전기실 트레이, 케이블 포설작업)
夜○ ‘16. 6. 24. 회생장치(IN COMMING, DC 콘덴서, 컨버터) 반입
夜○ ‘16. 6. 28. ~ 29. ESS ROOM내 장비별 케이블 결선 및 기반공사
○ ‘16. 6. 30. ESS ROOM 자동소화설비 설치작업
○ ‘16. 7. 25. 환기실내 SynRM 모터(ABB) 2대 반입
夜○ ‘16. 8. 22. ~ 31. 승강장 공기질 센서 설치작업 및 소방/통신 배관 설치공사
夜○ ‘16. 9. 5. 환기실내 MCC-V-N 이설 및 철거작업
○ ‘16. 9. 21. 환기실내 인버터 반입
夜○ ‘16. 10. 7. 마들역 승강장 온도계측 센서 설치
○ ‘16. 10. 17. PCS내 변압기(3상3선) 반입 및 설치
夜○ ‘16. 10. 18. 마들역 승강장 온도계측 센서 철거
○ ‘16. 11. 9. 마들역 전력모니터링 계측선로(통신) 배관 및 포설작업
夜○ ‘16. 11. 9. ~ 10. 회생에너지 시스템 수정작업 및 PCS내 MCCB 교체작업
○ ‘16. 11. 11. 회생장치 및 PCS 장비별 단품시험
○ ‘16. 11. 22. 회생장치 및 PCS 장비별 단품시험
夜○ ‘16. 12. 1. ~ 2. 회생컨버터 및 BATTERY 시험
○ ‘16. 12. 5. 도봉산 태양광설치관련 도봉구청에 “개발행위 허가” 신청
夜○ ‘16. 12. 14. ~ 15. 회생컨버터 시험 및 SPD 설치
○ ‘16. 12. 16. 인버터 및 고효율 모터설치 관련 회로구성을 위한 합동점검
○ ‘16. 12. 20. 회생컨버터 시험
○ ‘16. 12. 20. 도봉구청 “개발행위 허가” 승인
夜○ ‘16. 12. 22 ~ 23. 변전소 DC반 Control panel(1종접지) ~ ESS ROOM에 접지포설 변전소 IN Comming panel내 (+), (-) 케이블 결선완료 전기실 L-1-1반 후면에 3상4선 케이블 결선완료(FROM. 변전소 PCS)
夜○ ‘16. 12. 27. 수락산변전소 54FS반 (+), Negative반 (-) 케이블 결선완료
○ ‘16. 12. 29. 테스트베드 종합시험 일정협의 및 향후 계획 협의(도시철도 기술연구소)
夜○ ‘17. 1. 3. ~ 4. 수락산 환기실 승강장 급기공조기 모터 --> SynRM 모터로 교체(2대) 및 인버터 설치작업 완료, 수락산 변전소 테스트베드 ~ 전기실간 계통시험
夜○ ‘17. 1. 9. DC 1,500V 가압 ~ DC CAP BANK ~ CONVERTER ~ BATTERY ~ PCS ~ 전기실 1호계 부하 충,방전시험(종합시험)
○ ‘17. 1 12. 수락산 환기실 인버터 Fault 발생관련 EMC 접지볼트 분리(AC용) 및 2대 설치된 모터 케이블 마감처리 작업완료 수락산 변전소내 전열라인 보수 및 서버전원 변경, ESS ROOM 문턱 설치
○ ‘17. 1. 17. 도봉산역 태양광 모듈(플렉시블, Si결정질) 설치작업 - 금오전력, 코원솔라
○ ‘17. 1. 18. 도봉산역 태양광 모듈(플렉시블, Si결정질) 설치완료 - 금오전력, 코원솔라
○ ‘17. 1. 20. 도봉산역 태양광설비 시스템실 칸막이 공사 진행
○ ‘17. 1. 23. 도봉산역 태양광설비 시스템실 칸막이 공사 완료 장비반입(컨버터, PCS, BATTERRY) 및 태양광 구축관련 케이블 배관작업
○ ‘17. 1. 25. 도봉산역 BATTERY BSC와 SETTING 작업(LG화학) 수락산역 환기실 인버터 Fault 발생관련 점검(EMC 접지볼트 제거(DC용)
○ ‘17. 2. 3. 도봉산역 태양광 구축공사(플렉시블 덕트공사 및 케이블 포설 준비작업)
○ ‘17. 2. 6. 도봉산역 태양광 구축공사(케이블 포설 및 전기실, 인버터실 케이블 입선
○ ‘17. 2. 7. 도봉산역 태양광 구축공사(케이블 결선, 분전반내 케이블 결선 등) Si결정질 모듈 케이블 포설 및 결선작업

2. 성능평가

가. 테스트베드 실증을 통한 성능평가

(1) 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템 및 통합운영시스템

- 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템의 경우 전동차 회생시 발생하는 회생전력을 전력저장장치에 저장하고 피크시간이나 전력요금이 비싼 시점에 방전하여 에너지 효율을 향상시키는 시스템임.
- 당초 일일 최대 860kWh 회생전력을 흡수하고 일일 최대 피크전력을 5%(150kWh)를 절감하는 목표임.



<그림 3-7-7> 회생전력 흡수전력량

- 회생전력의 경우 당초 회생컨버터 흡수능력(회생컨버터 및 배터리 용량) 및 회생컨버터의 Unbalancing으로 인해 일 최대 640kWh 회생전력량을 흡수하고 있음.

<표 3-7-3> 회생에너지 발전량 산출

항 목	측정 값
2017년 9월 30일 - 최대 발전 용량	620[kWh/day]
발전 목표량	1,000[kWh/day]
회생 시스템 발전 용량 설정 변경	1,000[kWh] X 90[%] = 900[kWh]
회생 시스템 Unbalancing 발생 빈도	900[kWh] X 72[%] = 648[kWh]
회생 시스템 효율 적용	648[kWh] X 94[%] = 609.1[kWh]
Battery Bank 응동 속도 및 발전량 반응 속도	609.1[kWh] X 80[%] = 487.3[kWh]
회생 에너지 발전 증가량	487.3[kWh] X 127[%] = 618.9[kWh]

- 테스트베드 실증 Data를 근거하여 발전량 감소 원인 및 향후 개선 시 회생 전력 발생 가능량 분석 결과 회생 에너지 시스템의 Balancing 제어기 Upgrade 및 Battery Bank 추가 증설을 통해 최소 20 ~ 최대 30[%]의 평균적인 회생 에너지 발전량 증가가 가능할 것으로 판단 함.(일일 최대 1,062kWh 회생전략 흡수 가능)

<표 3-7-4> 회생에너지 발전량 산출(시스템 개선 후)

항 목	설치 Data	변경 값	비고
Battery Bank 용량	450[kW]	500[kWh]	10[%] 증가
회생 시스템 Unbalancing 발생 빈도	28 ~ 30[%]	10[%]	18 ~ 20[%] 증가
효율 개선 가능	93 ~ 94[%]	94 ~ 95[%]	1[%] 증가



<그림 3-7-8> 회생전력 흡수전력량(시스템 개선 후)

- 수락산역의 피크전력 발생의 경우 최적 스케줄링 기법에 따라 전력저장장치에 충전된 전력을 피크시 발전함으로써 아래와 같이 최대 8.12% 피크전력을 감소시킴을 확인할 수 있음.

<표 3-7-5> 피크전력 변화량 비교

날짜	스케줄링 전 피크전력[kW]	스케줄링 후 피크전력[kW]	피크전력 변화량[kW]	피크전력 변화량[%]
2017-05-24	2,191.04	2,013.20	177.84	8.12
2017-03-17	2,414.59	2,220.53	194.06	8.04
2017-03-16	2,413.06	2,220.13	192.94	8.00

(2) 전력저장장치 연계형 태양광발전시스템 및 통합운영시스템

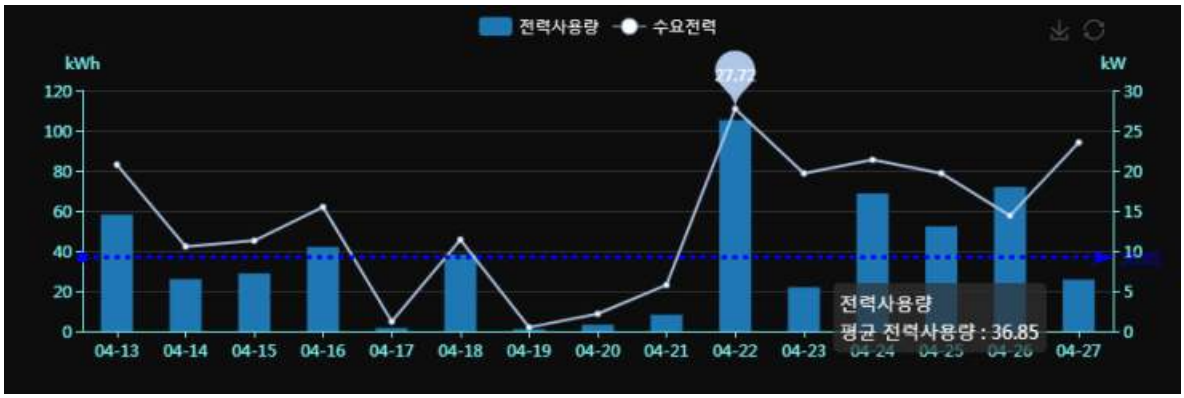
- 도봉산역에 설치된 경량 태양광 모듈은 Si결정질 모듈 10.8kW, CIGS 플렉시블 모듈 7.2kW로 20kW로 일일 최대 3.5h 발전량 기준으로 70kWh/일 목표로 함.
- 다만 기존 태양광 발전설비의 경우 태양광의 발전량이 최대가 되도록 설치 위치 및 각도 등을 고려하여 선정하고 있으나 기존 역사에 설치하는 곳은 역사의 지리적, 위치적인 한계가 있어 최적의 발전량을 생산하기 어려운 실정임. 아래 그림에서 보듯이 53.1kWh 전력량을 생산하였음.



<그림 3-7-9> 태양광 발전량

(3) 고효율 환기시스템

- 수락산역에 설치된 실내 공기질을 고려한 고효율 환기시스템의 경우 수락산역의 환기 설비를 모두 대체할 수 없기 때문에 현재 대체된 설비의 효율 및 에너지 절감량을 통해 전체 역사의 에너지 절감량을 환산함. 급기팬을 위한 전동기 및 가변제어 인버터를 적용하는 경우 일 평균 36.85kWh 전력소비량을 나타났으며, 이 경우에도 실내 공기질의 권고 기준을 만족하고 있음.



<그림 3-7-10> 가변운전실험 4월13일~4월27일까지 15일 전력사용량



<그림 3-7-11> 가변운전실험 4월21일~4월22일까지 공기질 모니터링

- 기존 수락산역에 설치된 급기팬, 배기팬 중 급기팬을 공기질에 따라 가변운전하는 경우 에너지 절감량이 일 206.6kWh~241.6kWh 절감이 가능함. 가변운전 시 지하철 운행 중단 후 배기팬 사용을 중지할 경우 일 배기팬 운전시간은 20시간으로 이 경우 배기팬 에너지소비량은 704kWh으로 감소됨에 따라 최대 에너지 절감량은 347.4kWh~382.4kWh(에너지절감율 : 31.3% ~ 34.5%)으로 나타남.

<표 3-7-6> 가변운전방식 도입결과

항목	기존스케줄 에너지소비량	가변운전 에너지소비량
운전방식	급배기일 운전시간 15시간 기준	배기팬 24시간 운전 급기팬 실내공기질 상황에 따라 속도 제어
배기팬(약 8.8kWh)	8.8(kWh)×4(대)×15(시간) = 528 kWh	8.8(kWh)×4(대)×24(시간) = 844.8 kWh
급기팬(약 18.25kWh)	18.28(kWh)×2(대)×15(시간) = 578.4 kWh	일 소모량 약 20kWh~55kWh (전력량계 실측값)
급배기에너지 소비량 합계	약 1,106.4 kWh	약 864.8kWh ~ 899.8kWh
에너지절감량	-	206.6kWh ~ 241.6kWh
에너지절감율	-	18.6% ~ 21.8%

나. **시험장치 및 시뮬레이션을 통한 성능평가**

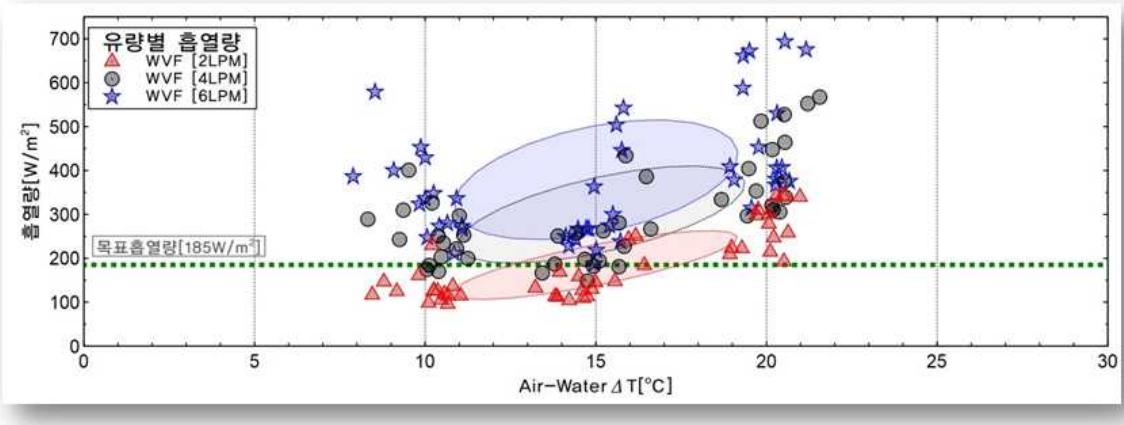
(1) 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템

- 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템은 지하 침출수의 폐열을 이용하여 전동차에서 발생하는 열을 흡수함으로써 터널 냉각을 위한 냉방 부하 에너지를 절감하는 시스템임. 다만 집수정으로부터 선로 측면에 설치되는 흡열모듈까지의 배수관 설치, 흡열모듈의 선로변 설치 등이 안전상에 우려가 있어 흡열 모듈의 성능검증은 도시철도 지하 선로를 모의한 시험장치를 통해 성능을 평가함.
- 모의 시험장치는 승강장 하부공간과 같은 단면의 7.5m 길이의 시험챔버를 구성하여 시험챔버 내부 열환경 및 기류속도 조절이 가능하도록 구성하였으며, 시험챔버 내부에 TLS 패널 5개를 설치하여 시험챔부 내부 온도, 기류속도, TLS 내부 냉각수 유량 등에 따른 흡열성능을 평가함.



<그림 3-7-12> 모의시험장치

- 성능시험시 TLS의 단위면적당 흡열량은 모듈당 185w/m2로 설정하였으며, 이는 지하선로부의 선로 냉각 용량의 25.8%에 해당함. 따라서 지하선로부에 선로부 배기 시스템이 설치된 역사의 경우 TES 소비전력인 408kWh의 25.8%인 105.3kWh를 절감할 수 있을 것으로 예측하며, 선로부 배기시스템이 미설치된 선로의 경우 본선 환기팬의 사용 전력인 696kWh의 25.8인 179.6kWh 전력을 절감할 것으로 예측됨.



<그림 3-7-13> 유량별 흡열량 비교

- 지하수량 4LPM 이상의 경우 적용시 공기-지하수 온도차 10℃이상의 경우 목표 흡열량 185W/㎡ 만족하고 있으며, 터널내 유속3m/s 이상의 경우 대부분 목표흡열량을 만족하며 온도차가 큰 경우 (20℃이상) 300~500W/㎡의 흡열성능이 예상됨.
- 전체적으로 챔버내 유속에 따른 흡열량 편차는 비교적 작은 것으로 나타나고 흡열량은 지하수의 유량과 관계가 높게 나타났으며, 지하수 유량이 4~6LPM 이상인 경우 지하수와 공기의 온도차에 관계없이 모든 경우에 대해 흡열량 목표치 185W/㎡ 만족함.

(2) 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션

- 3차원 공간정보 기반 에너지성능 분석 및 도시철도 역사설계 통합 프로세스 작성을 위해 테스트베드 모델을 구축하고 이에 대한 시뮬레이션 도구를 개발한 것으로, 수락산역 설비/조명 시스템 교체 및 신재생에너지 추가에 따라 예상되는 에너지 절감량 및 비용을 제시함.
- 본 연구성과물에 적용된 회귀방정식의 변수확장을 통해 관리자의 시점에서 적용 가능한 설비시설의 세부적인 정보가 입력 가능하나 본 연구성과물의 경우 사용대상자에 대한 초점을 비전문가에 맞춰 설정했기 때문에 전문적인 변수를 최소화하 함.
- 수락산 역사를 대상으로 시뮬레이션을 수행한 경우 기존 대비 역사설비를 개선한 경우 기존 에너지 사용량 대비 17.6% 에너지 절감 효과를 나타냄.



<그림 3-7-14> 시뮬레이션 결과

다. **종합성능평가**

(1) 일별 에너지 절감성능 평가

- 도시철도 역사 에너지 절감기술의 엔저 절감 목표량은 테스트베드 역사 중 에너지 소비량인 큰 수락산역의 3년(2011~2013)간 에너지 소비량을 기준으로 30%인 1,395[kWh/일]을 절감목표로 선정함. 다만 에너지 소비량은 역사의 설비 증설, 운영 조건에 따라 수시로 변동하고 있으며, 특히 최근 들어 승객에 편의시설 증대 및 지하 공간의 미세먼지 등에 대한 공기질 개선에 대한 요구사항이 커져 역사의 에너지 소비량은 점차로 증가하고 추세임.
- 실증 테스트베드인 수락산역의 경우 본 연구가 시작된 2013년 기준으로 점차적으로 전력 소비량이 증가하는 추세이며, 특히 2016년인 경우 2013년 대비 8.3%의 전력 소비량이 증가함. 하지만 에너지 절감장치가 핵심장치가 현장에 설치되어 운영되는 2017년의 경우에는 전체적인 3.3%의 에너지 절감이 됨을 확인할 수 있음.

<표 3-7-7> 에너지 사용량 비교(연간)

일평균 전력소비량(kWh/일)

	2013년(기준년도)	2016(절감설비 구축 전)	2017년(절감설비 운영)
에너지 사용량	5,846	6,326	5,654
절감량(율) (2013년 대비)	-	480 증가 (8.3%)	192 감소 (-3.3%)

- 특히 에너지 절감설비의 최대 성능을 확인하기 위한 2017년 9월의 경우 2016년 9월 대비 23.4%의 에너지 절감이 됨을 확인 할 수 있음.

<표 3-7-8> 에너지 사용량 비교(9월)

일평균 전력소비량(kWh/일)

	2016 9월(절감설비 구축 전)	2017년 9월(절감설비 운영)
에너지 사용량	8,267	6,330
절감량(율) (2016년 대비)	-	1,937감소 (-23.4%)

- 피크전력 절감량은 실증 테스트베드인 수락산역에 구축된 전력저장장치의 실측값을 바탕으로 정리하였으며, 전력요금을 산출하는 변전소 기준 최대 8,12%의 피크값이 절감되었으며, 수락산역을 기준으로 하는 경우 최대 11.2% 절감이 나타남. 또한 실측 기준으로 전력사용량 및 이에 따른 전력요금 절감율의 경우 수락산역 기준 최대 12.12% 전력사용량 절감이 발생하였으며, 전력량 요금의 경우 최대 15.48%가 절감됨을 확인함.

<표 3-7-9> 피크전력 및 전력량 요금 측정 결과

	피크전력[%]		에너지사용량[%]			전력량요금[%]		
목표량	5		30			10		
절감량	수락산역	변전소	수락산역	도봉산역	전체	수락산역	도봉산역	전체
	11.21	8.12	12.12	3.41	2.41	15.48	3.70	2.49

(2) 에너지 절감설비별 성능평가

- 연구개발 목표인 에너지 절감율 30%, 피크전력 5% 절감을 위해 각 개별 핵심기술별 에너지 절감목표를 설정함. 다만 현장 구축에 있어 안전 및 시스템 구성상에 제약 등으로 인해 당초 목표량을 설치 못하는 경우가 발생하였으며, 이러한 경우에 대해서는 실험실 차원에서의 성능 검증 결과로 대체하였으며, 또한 핵심장치의 설비가 일부만 현장에 구축된 경우에는 당초 계획시 구축 용량을 환산하여 에너지 절감설비의 성능을 비교 평가하였음.

<표 3-7-10> 에너지 절감량 환산

	시스템 구성 (용량 등)	목표량 kWh/일	절감량 kWh/일	환산량 kWh/일	비고
배터리 저장형 회생에너지 활용시스템	ESS:400kWh PCS:200kW DC/DC:500kW	150 (5%)	177.84 (8.1%)	-	일일 피크전력 절감량 기준
		840 (18%)	620	1,062[1)]	1) ESS :500kWh 불평형 개선
전력저장장치 연계형 도시철도 역사용 경량 태양광 발전시스템	결정질10.8kW, 플렉시블: 7.2kW	105	53.1	79.7[2)]	2) 30kWp 설치기준 (과제계획서 기준)
도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템	185w/㎡ (흡열모듈)	176 (4%)	179.6	179.6	TES 미설치 터널개소 기준
도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템	30kW IE4 SynRM, 가변제어인버터	158 (3%)	241.6[3)]	382.4[4)]	3) 급기 제어기준 4)급기, 배기제어 기준
도시철도 통합 에너지 운영시스템	분산형 oBIX(EIG)	232[5)] (5%)	-[6)]	102.1[(7)]	5) 태양광 발전포함 6) 기존 전력부하 제어 절감량 제외 7) 기존 부하 절감량의 10% 기여
합계		1,395	852.7	1423.5	

- 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템의 경우 피크전력 150kWp(5%)는 달성하였으며, 회생전력량의 경우 현장 시험결과 620kWh이며, 당초 목표보다 절감량이 다소 부족하지만 배터리 용량 증가 및 부하불평형을 줄이는 경우 일일 최대 1,062kWh/일을 절감이 가능할 것으로 예측됨.
- 경량 태양광 발전시스템의 경우 당초 30kWp를 설치하고자 하였으나 현장 조건으로 인해 20kWp를 설치하였으며, 기존 구조물에 설치하여 실질적인 일일 발전량은 53.1kWp로 당초 계획대비 발전량이 부족함. 단지 과제계획서 상의 용량으로 환산한 경우 79.7kWh를 생산할 수 있는 것으로 예측됨.
- 도시철도 지하선로 흡열모듈의 경우 기존 운행노선에 직접 설치하는 것에 대한 안전성에 대해 문제 제기로 테스트베드 지하 선로의 열환경 조건을 실사한 시험장치를 통해 흡열량을 측정하고 이로 인한 최대 에너지 절감량을 산출하였으며, 당초 흡열모듈의 흡열량을 만족하는 경우 TES 미설치 터널개소 기준으로 179.6kW의 전력을 절감할 수 있을 것으로 예측됨.
- 도시철도 지하역사 고효율 환기시스템의 경우 급기팬만을 가변제어하여 241.6kWh를 절감함을 확인하였으며, 급기팬뿐만 아니라 배기팬까지 제어하는 경우 최대 382.4kWh를 절감할 수 있을 것으로 예측됨.

- 도시철도 통합 에너지 운영시스템은 기존의 전력설비의 전력사용량을 감시 제어함으로써 에너지를 절감할 수 있는 기능이 있으며, 이를 통해 불필요한 전력설비의 운영을 최소화 할 수 있음. 에너지 절감설비가 테스트베드에 구축되어 본격적으로 운영된 2017년 9월 기준 핵심장치에서 절감된 전력소비량은 대략 914.7kWh이므로 전력 동월 대비 실제 전력사용량이 고려할 때 1,022.3kWh가 기존의 전력설비 운영을 적절히 조정함에 따라 절감된 양으로 판단할 수 있음. 따라서 전년 대비 기존 부하설비의 전력소비량 전체의 10%를 운영시스템을 통해 절감할 수 있다고 가정하며 일일 102.2kWh 절감할 수 있을 것으로 예측함.
- 따라서 이러한 에너지 절감장치의 최종 운영을 통해 당초 절감 목표인 1,395kWh보다 큰 1423.5kWh를 절감할 수 있을 것으로 판단됨.

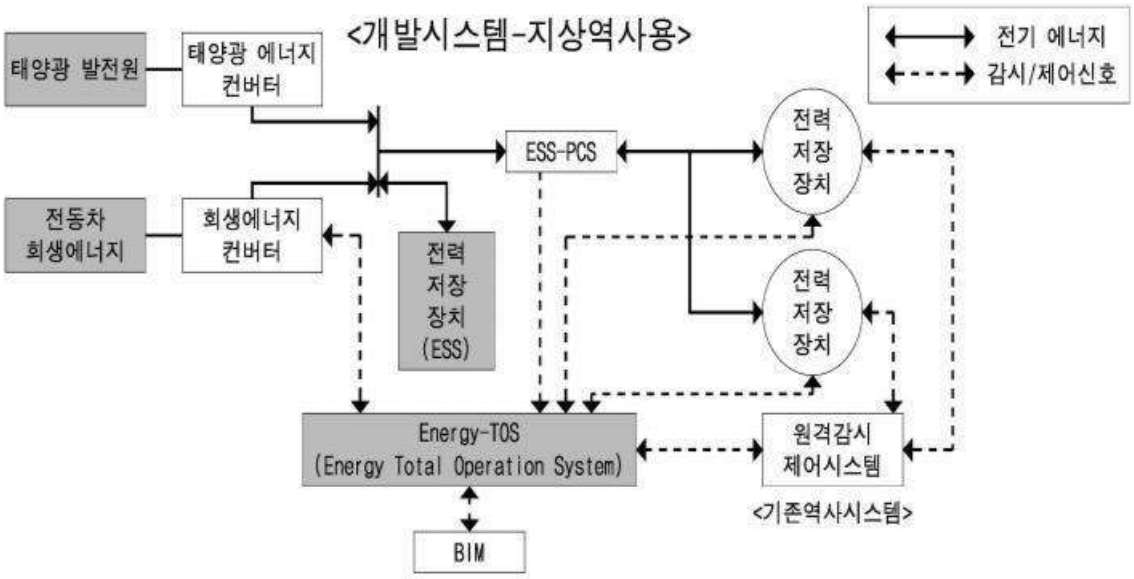
3. 철도산업에서의 에너지원에 따른 절감 사업화모델

가. 다양한 에너지원의 철도적용 사업화모델

(1) 지상역사 에너지원에 따른 절감 사업화모델

(가) 지상역사 에너지절감 개발 시스템

- 태양광발전과 전동차 발생 회생전력을 DC/DC컨버터를 통해 전력저장장치((ESS)에 저장하고, 첨두부하 시 에너지 운영 시스템(TOS/Total Operation System))를 통해 역사부하와 철도전력계통과 연계 운영하는 에너지 절감시스템 구성.
- 전력저장장치(ESS)와 에너지 운영시스템(E-TOS) 및 역사부하연결 ESS-PCS를 기반으로 태양광발전 및 회생전력시스템 단독, 또는 통합관리가 가능하도록 구성.

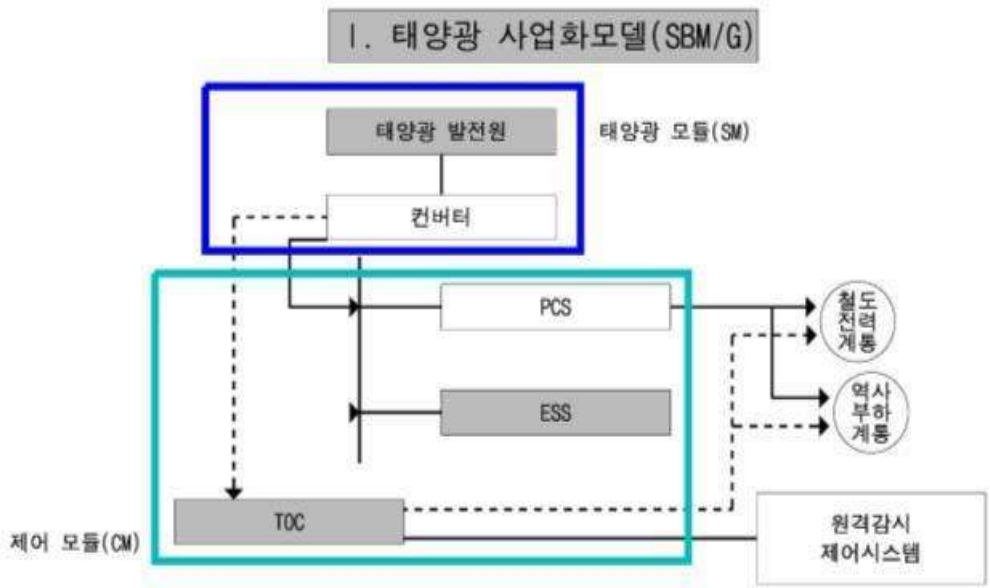


<그림 3-7-15> 지상역사용 에너지 절감 개발시스템

(나) 태양광 발전 에너지절감 사업화모델(SBM/G) 구축

① 구성도

- 태양광발전 사업화모델(SBM/Solar Business Model)은 전력저장장치(ESS)와 에너지 운영 시스템(E-TOS) 및 역사부하연결 ESS-PCS를 기반으로 구성.
- 구성형태 : 태양광발전 사업화모델(SBM/G)
  = 태양광발전모듈(SM/ Solar Module) + 제어모듈(CM/Control Module)



<그림 3-7-16> 태양광발전 사업화모델(SBM/G) 구성도

② 태양광 발전 사업화모델 (SBM/G) 구축

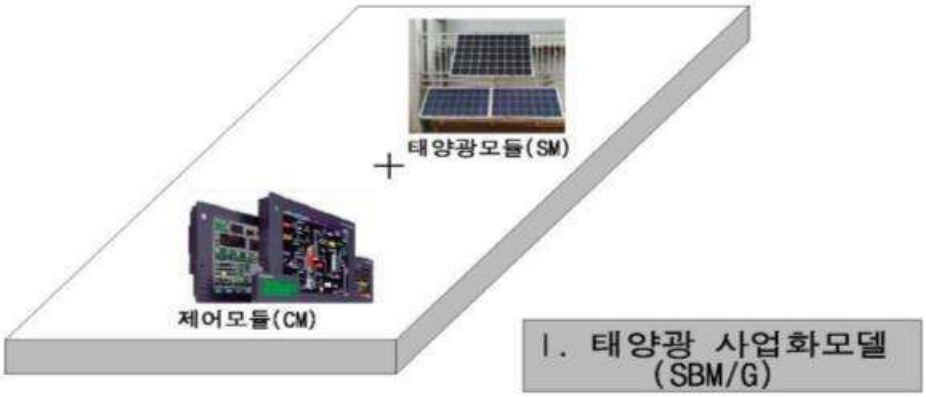
- 태양광 발전 사업화모델 (SBM/G)은 단위 모듈화된 태양광 발전모듈(SM)에 공통 제어모듈(CM)을 결합하여 구축.

㉮ 태양광 발전 사업화모델 (SBM/G) 구축 사양

<표 3-7-11> 태양광발전 사업화모델 구축사양

설치기기	발전 모듈	컨버터	배터리(ESS)	인버터(PCS)
용 도	태양광 발전	DC/DC 변환	전력 저장	DC/AC 변환 역사 전력 공급
용 량	30kW	12kW 3대	45kW 2식	40kW
위 치	도봉산역 지붕	도봉산 전기실		

㉯ 태양광 발전 사업화모델 (SBM/G) 구축도



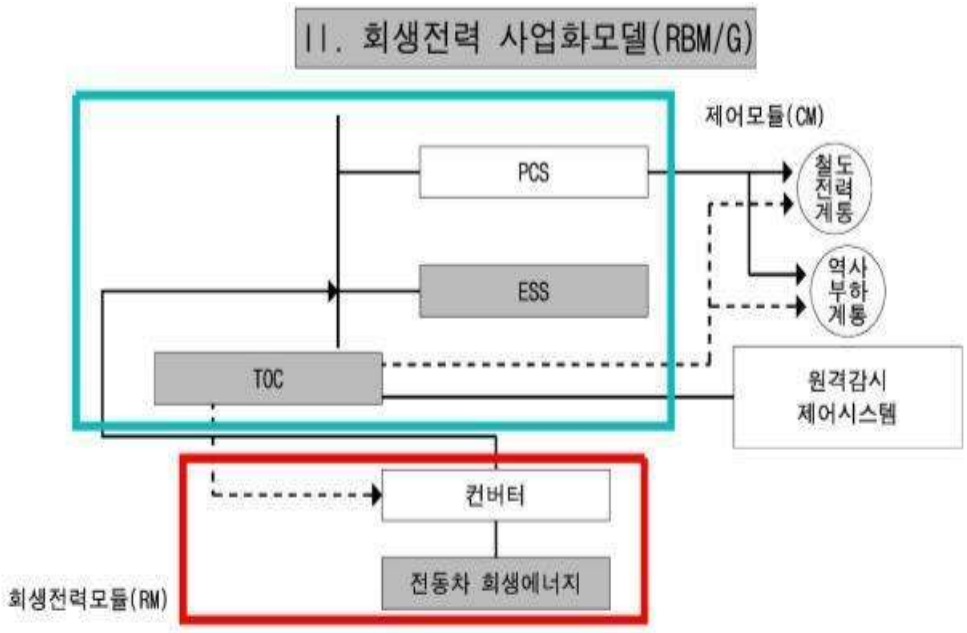
<그림 3-7-17> 태양광발전 사업화모델 구축도

(다) 회생전력 에너지절감 사업화모델(RBM/G) 구축

① 구성도

㉮ 회생전력 사업화모델(RBM/G)은 전력저장장치(ESS)와 에너지 운영 시스템 (E-TOS) 및 역사 부하연결 ESS-PCS를 기반으로 구성.

㉯ 구성형태 : 회생전력 사업화모델(RBM/G) = 회생전력 모듈(RM) + 제어모듈(CM)



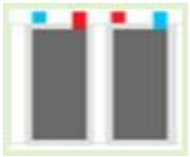
<그림 3-7-18> 회생전력 사업화모델(RBM/G) 구성도

② 회생전력 사업화모델 구축(RBM/G)

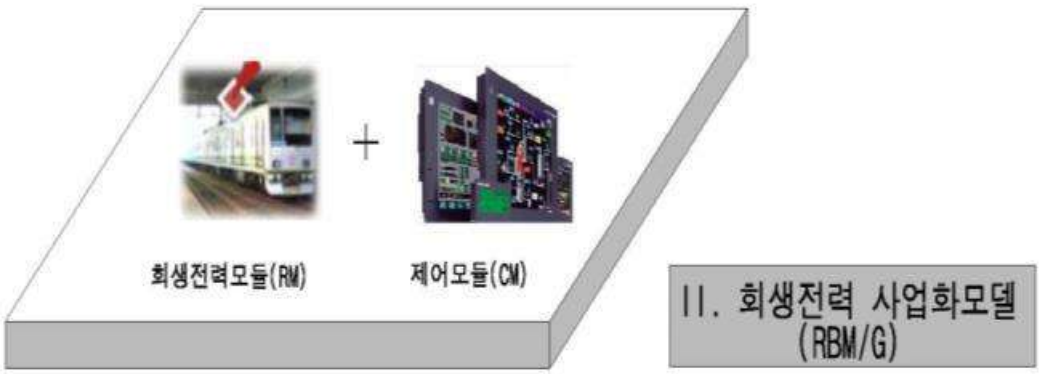
- 회생전력 사업화모델 (RBM/G)은 단위 모듈화된 회생전력 모듈(RM)에 공통 제어 모듈(CM)을 결합하여 구축.

㉮ 회생전력 사업화모델 (RBM/G) 구축 사양

<표 3-7-12> 회생전력 사업화모델 구축사양

설치 기기	회생전력	회생 컨버터	배터리(ESS)	인버터(PCS)	역사내 전기 활용
관련 사진					
용도	회생전력 발생 [DC1680V ~ 1750V]	DC/DC변환 [DC1750V→ DC815V]	전력 저장 [DC588V ~ 815V]	DC/AC 변환 [DC815V→ AC380V]	역사계통연계 [AC380V,3상4선식]
용량	0~400kW	500kW(400A)	400kW	200kW	200kW
위치		지상역 운영실	지상역 운영실	지상역 운영실	지상역 운영실

㉯ 회생전력 사업화모델 (RBM/G) 구축도

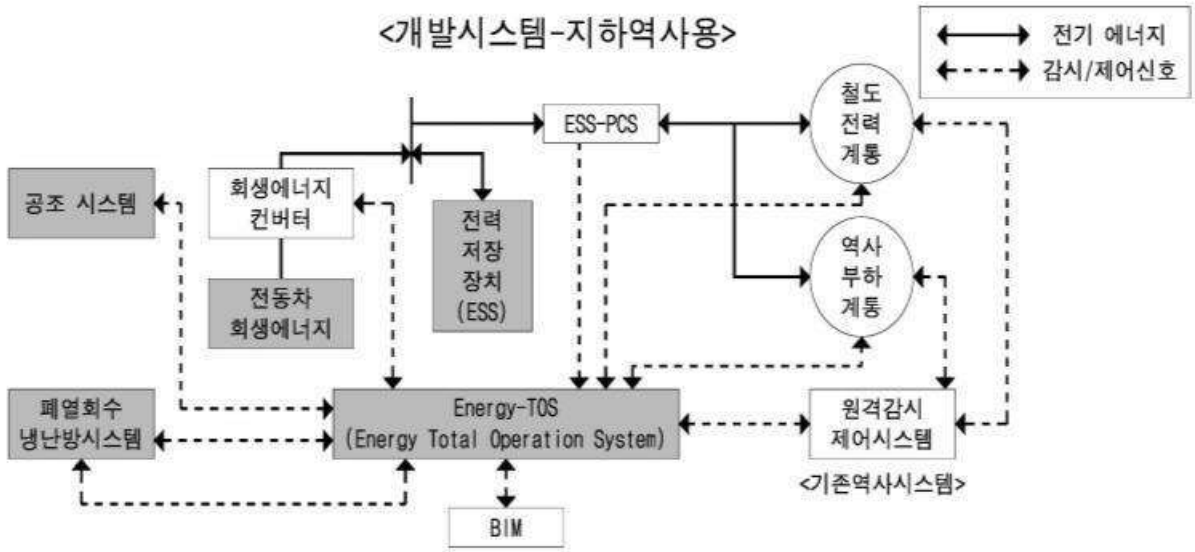


<그림 3-7-19> 회생전력 사업화모델 구축도

(2) 지하역사 에너지원에 따른 절감 사업화모델

(가) 지하역사 다양한 에너지원에 의한 절감 시스템

- 고효율 환기 시스템과 폐열회수 시스템의 절감에너지를 에너지 운영 시스템(TOS/Total Operation System)에 연계 운영하거나 전동차 발생 회생전력을 전력저장장치(ESS)에 저장하여 에너지 운영 시스템(TOS)에 의해 역사 최대부하 시 역사부하와 철도전력계통의 Peak-Shaving 절감시스템을 구성.
- 에너지 운영 시스템(E-TOS) 또는 전력저장장치(ESS)와 역사부하연결 ESS-PCS를 기반으로 고효율 환기 시스템과 폐열회수 시스템 및 회생전력을 단독, 또는 통합 관리가 가능하도록 시스템을 구성.



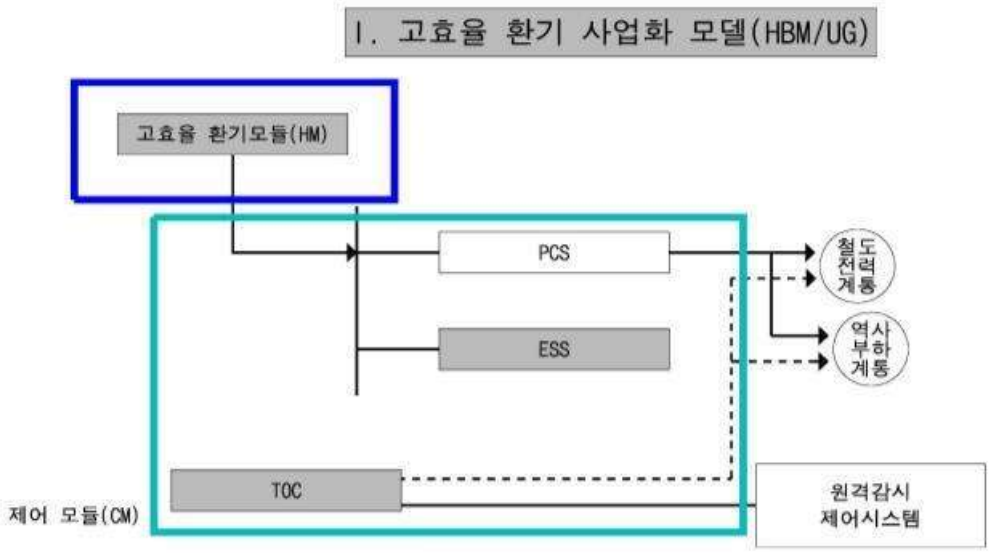
<그림 3-7-20> 지하역사용 에너지 절감 개발시스템

(나) 고효율 환기 사업화모델 (HBM/UG) 구축

① 구성도

㉮ 고효율 환기 사업화모델(HBM/High Ventilative Business model)은 고효율 환기 모듈(HM)과 에너지 운영 시스템(E-TOS)을 기반으로 구성.

㉯ 구성형태 : 고효율 환기 사업화모델(HBM)= 고효율 환기 모듈(HM) + 제어모듈(CM)



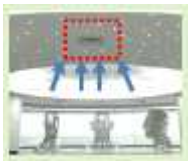
<그림 3-7-21> 고효율 환기 사업화모델(HBM/UG) 구성도

② 고효율 환기 사업화모델 구축(HBM/UG)

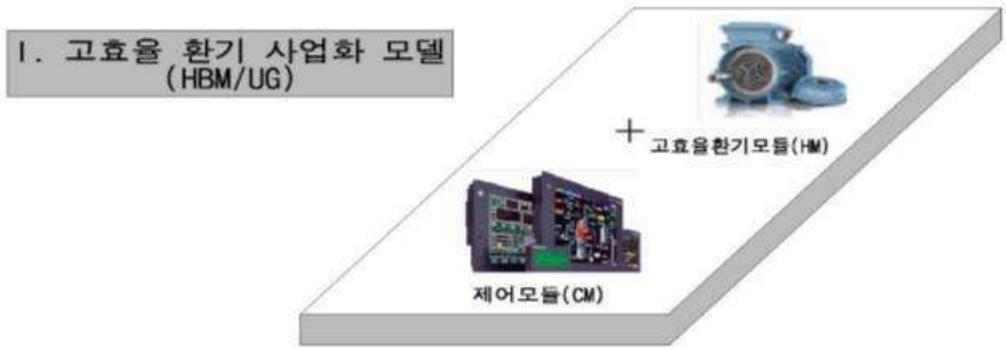
- 고효율 환기 사업화모델 (HBM/UG)은 단위 모듈화된 고효율 환기 모듈(HM)에 공통 제어모듈(CM) 을 결합하여 구축.

㉮ 고효율 환기 사업화모델 (HBM/UG) 구축 사양

<표 3-7-13> 고효율 환기 사업화모델 구축사양

설치 기기	공기질 센서	상위제어기	인버터 제어	영구자석 전동기 (SynRM)	역사 환기 효율화
관련 사진					
용도	공기질 측정	환기패턴 제어	에너지 절감	에너지 절감	역사전력 절감
용량	CO2 센싱	F28335 기반	37kW × 2EA	30kW × 2EA	
위치	수락산승강장	수락산 환기실	수락산 환기실	수락산 환기실	

㉯ 고효율 환기사업화모델 (HBM/UG) 구축도

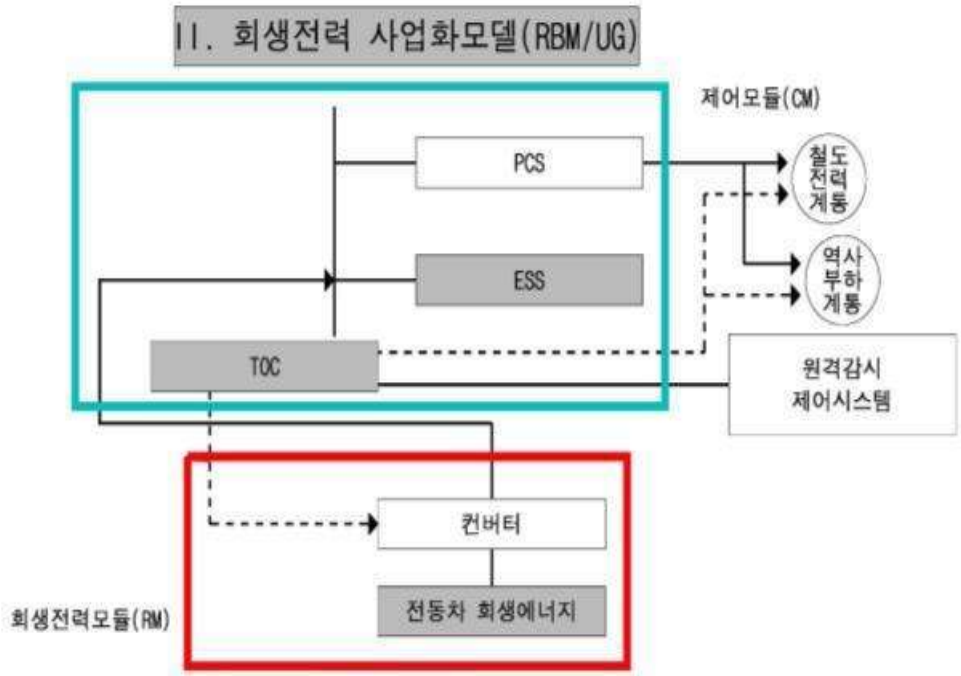


<그림 3-7-22> 고효율 환기 사업화모델 구축도

(다) 회생전력 사업화모델 (RBM/UG) 구축

① 구성도

- 회생전력 사업화모델(RBM/Regenerative Business Model)은 전력저장장치(ESS) 와 에너지 운영 시스템(E-TOS) 및 역사부하연결 ESS-PCS를 기반으로 구성.
- 구성형태 : 전동차 회생전력 사업화모델(RBM/G)
  = 회생전력 모듈(RM/Regenerative Module) + 제어모듈(CM/Control Module)



<그림 3-7-23> 회생전력 사업화모델(RBM/UG) 구성도

② 회생전력 사업화모델 구축(RBM/UG)

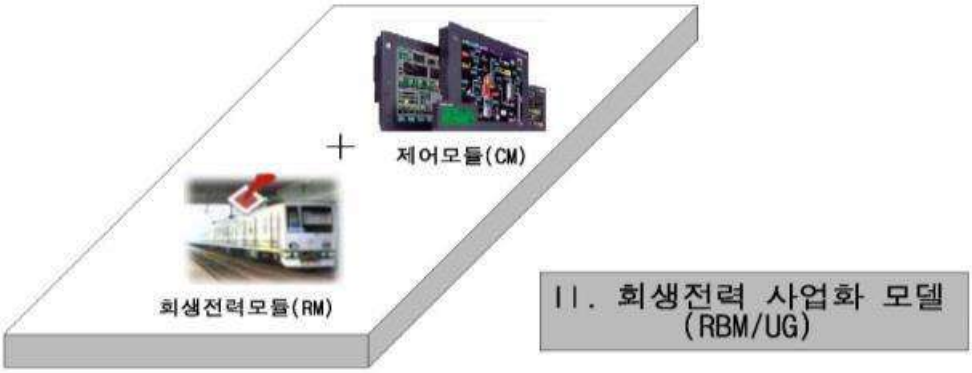
- 회생전력 사업화모델 (RBM/UG)은 단위 모듈화된 회생전력 모듈(RM)에 공통 제어모듈(CM)을 결합하여 구축.

㉮ 회생전력 사업화모델 (RBM/UG) 구축 사양

<표 3-7-14> 회생전력 사업화모델 구축사양

설치 기기	회생전력	회생 컨버터	배터리(ESS)	인버터(PCS)	역사내 전기 활용
관련 사진					
용도	회생전력 발생 [DC1680V~1750V] 0~400kW	DC/DC변환 [DC1750V→DC815V]	전력 저장 [DC588V~815V]	DC/AC 변환 [DC815V→AC380V]	역사계통연계 [AC380V,3상4선식]
용량		500kW(400A)	400kW	200kW	200kW
위치		지상역 운영실	지상역 운영실	지상역 운영실	지상역 운영실

㉰ 회생전력 사업화모델 (RBM/UG) 구축도

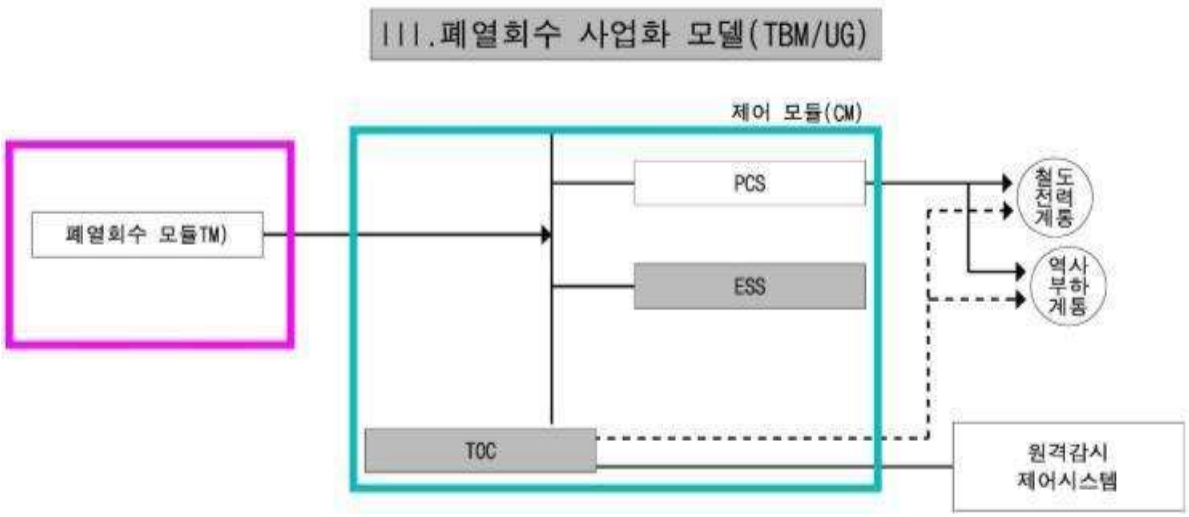


<그림 3-7-24> 회생전력 사업화모델 구축도

(라) 폐열회수 사업화모델(TBM/UG) 구축

① 구성도

- 폐열회수 사업화모델(TBM/TLS Business Model)은 폐열회수 모듈(TM)과 에너지 운영 시스템(E-TOS)을 기반으로 구성.
- 구성형태 : 폐열회수 사업화모델(TBM) = 폐열회수 모듈(TM) + 제어모듈(CM)



<그림 3-7-25> 폐열회수 사업화모델(TBM/UG) 구성도

② 폐열회수 사업화모델 구축(TBM/UG)

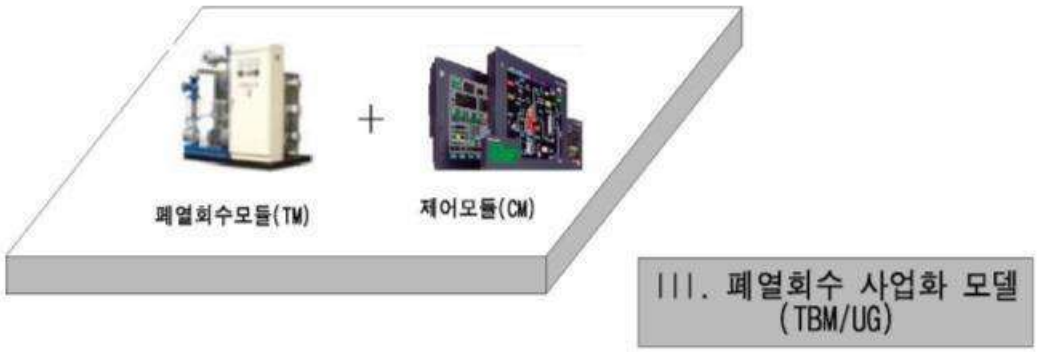
- 회생전력 사업화모델 (RBM/UG)은 단위 모듈화된 회생전력 모듈(RM)에 공통 제어모듈(CM)을 결합하여 구축.

㉮ 폐열회수 사업화모델(TBM/UG)구축 사양

<표 3-7-15> 폐열회수 사업화모델 구축사양

설치 기기	전동차 폐열	모세관 모듈	환수 배관	열교환기	급수 주관
관련 사진					
용도	제동 폐열 발생	폐열 수집	폐열 이동	폐열 냉각	냉각수 이동
용량		-	Ø 60	100×150×50mm	Ø 60
위치		승강장 하부 약 100M	승강장 하부 모듈 ~ 집수정 열교환기	마들 집수정	집수정 열교환기 ~ 승강장 하부 모듈

㉯ 폐열회수 사업화모델 (SBM/UG) 구축도



<그림 3-7-26> 폐열회수 사업화모델 구축도

나. 다양한 에너지원의 비용대비 효과 분석

(1) 비용대비 효과분석 적용기법

- 비용대비 효과분석을 위한 적용기법으로 회수기간법을 선정함. 회수기간법은 계산이 간편하고 자산회계에 따라 감가상각비가 고려되었지만 화폐의 시간가치를 무시하고 있으므로, 은행에서 통상적으로 에너지 투자에 대한 자금 회수기간을 고전적으로 산정하고 있는 12년을 적용함.
- 회수기간은 짧을수록 미래 현금 흐름의 불확실성을 제거할 수 있기 때문에 12년을 기준으로 하고 12년을 다시 세분화하여 6년 이내면 효과가 크고, 7~11년은 효과가 있고, 12년을 넘으면 효과가 없는 것으로 분석함.

- 회수기간법에 의한 회수기간 계산

$$\text{회수기간} = \frac{\text{소요된 투자액}}{\text{연간현금유입액(연간이익} + \text{감가상각비)}}$$

(2) 지상역사 태양광발전 에너지절감 사업화모델(SBM/G) 비용대비 효과분석

(가) 설치사양 및 설치 예상도

- 태양광발전 모듈설치는 지상역사인 테스트베드 도봉산역사 지붕에 30kW를 설치하여 전력저장장치(ESS)에 저장하고, 최대부하 시 운영시스템(TOS)과 PCS를 통해 전력계통 및 역사부하에 공급함.

① 설치 사양

<표 3-7-16> 태양광발전 설치사양

설치기기	발전 모듈	컨버터	배터리(ESS)	인버터(PCS)
용 도	태양광 발전	DC/DC 변환	전력 저장	DC/AC 변환 역사 전력 공급
용 량	30kW	12kW 3대	45kW 2식	50kW
위 치	도봉산역 지붕	도봉산 전기실		

단, 태양광 모듈 : 실리콘 결정질 모듈(Si)/23kW, 플렉시블 모듈 (CIGS)/7kW . 계 : 30kW

② 설치도(도봉산역)



<그림 3-7-27> 도봉산역 태양광발전 설치도

(나) 설치 비용대비 효과 분석

① 설치비용

<표 3-7-17> 태양광발전 사업화모델 설치비용

단위 : 천원

품 목	설치용량	단가	금액	비고
실리콘 결정질 모듈(Si)	23kW	2,000	46,000	
플렉시블 모듈 (CIGS)	7kW	4,500	31,000	
컨버터	40kW	8,500	8,500	
에너지저장장치(ESS)	50kW	30,000	30,000	
인버터(PCS)	40kW	27,000	27,000	
운용장치(TOS)	20kW	14,000	14,000	
합 계			156,500	

② 에너지 절감 효과

<표 3-7-18> 태양광발전 에너지 절감효과

구 분	절감량 [MWh]	산 출 근 거	절감금액 (천원)	참 고
태양광발전	38.3	30kW×3.5h×365일	4,979	평균단가 130원/kWh
에너지저장장치 운용	41.6	50 kWh 3회/일 충·방전 효과 80% 적용 - 경부하충전→최대부하 급전 - 중간부하충전→최대부하급전	5,487	저장 평균단가 : 130원/kWh
		Peak전력 50 kW×95%×12개월	4,742	공급/Peak Cut 8,320원/kWh
계	86.4		14,908	

※ 요금단가(하절기): - 경 부 하:56.1원(1), - 중간부하:109원(1.94), - 최대부하:191.1원(3.4)

③ 비용대비 효과분석

- 태양광발전 사업모델(SBM/G)에 대한 비용대비 효과분석을 위해 설치비용과 절감액을 반영하여 회수기간법에 의한 회수기간을 계산함. 단, 시설물 내용연수는 20년으로 가정.

$$\text{회수기간} = \frac{\text{소요된 투자액}}{\text{연간현금유입액(연간이익} + \text{감가상각비)}}$$

$$= \frac{156,500}{(14,908 + 156,500/20)} = 6.9\text{년 (금액단위 : 천원)}$$

(다) 설치 비용대비 효과 분석 결과

- 태양광 사업화모델(SBM/G)에 대한 비용대비 효과분석 결과 회수기간이 6.9년으로 계산되어 경제성측면에서 비용대비 효과가 작게 나타나 단독으로는 큰 효과를 기대할 수 없는 것으로 분석됨.

- 또한 지하철은 신·재생에너지 의무설치 공공기관이고, 전력저장장치(ESS)도 의무설치 사항으로 입법 예고되어 있어 정부 시책과도 부합되어 법적요건 충족에도 사업화 모델의 효과가 있는 것으로 분석됨.

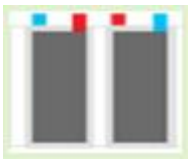
(3) 지상역사 회생에너지 에너지절감 사업화모델(RBM/G) 비용대비 효과분석

- 지상역사에 설치되는 회생에너지 사업화모델은 현재 테스트베드인 도봉산역사 전기실에 설치가 어려워 향후 지상역사 사업화 모델을 고려하여 비용대비 효과분석을 수행함.

(가) 회생에너지 설치 및 절감 사양

① 회생에너지 설치사양

<표 3-7-19> 회생에너지 설치사양

설치 기기	회생전력	회생 컨버터	배터리(ESS)	인버터(PCS)	역사내 전기 활용
관련 사진					
용도	회생전력 발생 [DC1680V~1750V]	DC/DC변환 [DC1750V→DC815V]	전력 저장 [DC588V~815V]	DC/AC 변환 [DC815V→AC380V]	역사계통연계 [AC380V,3상4선식]
용량	0~400kW	500kW(400A)	400kW	200kW	200kW
위치		지상역 운영실	지상역 운영실	지상역 운영실	지상역 운영실

② 회생전력 절감사양

<표 3-7-20> 역사 회생전력 절감 사양

비 목	지상역(도봉산역)	산출근거	비 고
설치위치	지상역 전기실	전기실 설치 여건곤란 / 향후 사업화모델	
절감방법 (일 절감량)	제동시 발전제동 회수 (533kWh/일)	500kW× 10[Sec/회]×19.2회/3600Sec ×20h/일(운전)	
연간 에너지 절감량	194.5MWh/년	533kWh/일×365	
적 용		533kWh/일	

(나) 설치 비용대비 효과 분석

① 설치비용

<표 3-7-21> 회생전력 설치비용

단위 : 천원

품 목	설치용량	단가	금액	비고
회생컨버터	500KW	250,000	250,000	
에너지저장장치(ESS)	400KW	235,000	235,000	
인버터(PCS) 및 기타	200KW	60,800	60,800	
운영시스템(TOS)	200KW	139,000	139,000	
합 계			684,800	

② 에너지 절감 효과

<표 3-7-22> 회생전력 사업화모델 에너지 절감효과

구 분	절감량 [MWh]	산 출 근 거	절감금액 (천원)	참 고
회생에너지	194.5	533kWh/일×365일	25,285	평균단가 130원/kWh
에너지저장장치 운용	221.9	400 kWh 2회/일 충·방전 효과 80% 적용 - 경부하충전→최대부하 급전 - 중간부하충전→최대부하급전	28,847	저장 평균단가 : 130원/kWh
		Peak전력 400 kW×95%×12개월	37,939	공급/Peak Cut 8,320원/kWh
계	416.4		92,071	

※ 요금단가(하절기): - 경 부 하:56.1원(1), - 중간부하:109원(1.94), - 최대부하:191.1원(3.4)

③ 비용대비 효과분석

- 회생전력 사업모델(RBM/G)에 대한 비용대비 효과분석을 위해 설치비용과 절감액을 반영하여 회수기간법에 의한 회수기간을 계산함. 단, 시설물 내용연수는 20년으로 가정

$$\text{회수기간} = \frac{\text{소요된 투자액}}{\text{연간현금유입액(연간이익} + \text{감가상각비)}}$$

$$= \frac{684{,}800}{(92{,}071 + 684{,}800/20)} = 5.4\text{년(금액단위 : 천원)}$$

④ 비용대비 효과분석 결과

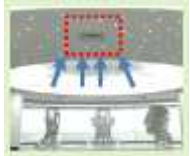
- 회생전력 사업화모델(RBM/G)에 대한 비용대비 효과분석 결과 회수기간이 5.4년으로 6년 이내로 계산되어 경제성 측면에서 효과가 큰 것으로 나타났는데 이는 ESS 저장을 통한 운용으로 첨두부하시간대의 값비싼 전력요금 절감에 기인한 것으로 분석됨.
- 또한 전동차 제동시 발생하는 회생전력은 시격이 짧을 때는 인근 주행열차에서 소모되지만 시격이 길거나(5분 이상) 가선전압이 일정 전압이상(1600~1650V)이 되면 가선전압 상승으로 인해 전차선로 계통의 절연열화나 사고로 이어질 수 있기 때문에 ESS에 저장하게 되면 안정적인 전차선로 계통전압을 유지하는 효과도 있음.

(4) 지하역사 고효율 환기 에너지절감 사업화모델(HBM/UG) 비용대비 효과분석

- 고효율 환기 에너지 절감 사업화모델은 고효율 모터와 가변속 인버터 제어를 통한 고효율 운전이 전제되는 시스템으로 기존 모터 교체와 제어반의 변경이 불가피하며, 에너지절감과 역사내 공기질을 동시에 추구해야 하는 제약도 따름.
- 고효율 환기 사업화모델은 당초 공조시스템 전체에서 환기만으로 축소되어 많은 효과를 기대하기 어려우나, 대표적인 다중이용시설인 지하철역사는 승강장 환기설비의 에너지 소비율이 높기 때문에 전체 공조설비의 확대에 대서 지속적인 검토가 필요함.

(가) 고효율 환기 에너지절감 시스템 설치사양

<표 3-7-23> 고효율 환기 사업화모델 설치사양

설치 기기	공기질 센서	상위제어기	인버터 제어	영구자석 전동기 (SynRM)	역사 환기 효율화
관련 사진					
용도	공기질 측정	환기패턴 제어	에너지 절감	에너지 절감	역사전력 절감
용량	CO2 센싱	F28335 기반	37KW × 2EA	30KW × 2EA	
위치	수락산승강장	수락산 환기실	수락산 환기실	수락산 환기실	

(나) 설치 비용대비 효과 분석

- 고효율 환기시스템 적용을 위한 초기비용, 유지관리비 및 철거비용 측면에서 기준안과 고효율모터와 가변속 인버터 설치를 비교함.

<표 3-7-24> LCCA 및 LCA 분석항목

LCCA 및 LCA 분석항목		기준안		가변운전 대안7	
		IE2 삼상유도전동기		IE4 SynRM(50%할인가격)	
		First Year Cost	Life Cycle Cost	First Year Cost	Life Cycle Cost
초기비용	재료비	4,130	4,310	16,617	16,617
	설치비	800	800	1,400	1,400
유지관리비	교체비	-	-	2,050	842
	일반관리비	5,000	97,876	5,000	97,876
	인건비	32,000	626,404	32,000	626,404
	에너지비	30,105	835,510	27,733	769,654
	CO2절감비용	0	0	151	2,969
철거비용	해체폐기비	400	164	400	164
	잔존가치	144	59	164	67
총비용		-	1,565,005		1,509,921
투자회수기간		-		5.66	

① 설치비용

<표 3-7-25> 고효율 환기 사업화모델 설치비용

품 목	설치용량	단가	금액	비고
영구자석 전동기(SynRM)	30KW × 2EA	33,234/16,617	33,234/16,617	현가/양산가
인버터	37KW × 2EA			
운용장치(TOS)	-		-	제외
합 계			33,234/16,617	

② 에너지 절감 효과

<표 3-7-26> 고효율 환기 사업화모델 절감효과

구 분	절감량 [MWh]	산 출 근 거	절감금액 (천원)	참 고
고효율 환기	12.4	34kWh/일×365일	1,612	평균단가 130원/kWh
계			1,612	

※ 요금단가(하절기): - 경 부 하:56.1원(1), - 중간부하:109원(1.94), - 최대부하:191.1원(3.4)

③ 비용대비 효과분석 결과

- 고효율환기 사업모델(HBM/UG)에 대한 비용대비 효과분석을 위해 설치비용과 절감액을 반영하여 회수기간법에 의한 회수기간을 현 개발단계 투입비용기준과 양산단계 투입기준(50% 절감 예상)에 의해 계산함.
- 현재투입비용 기준으로 고효율 환기 에너지 절감 사업화모델을 위해서는 고효율 전동기를 새로 개발해야 하는데 초기에는 수요가 작아 초기비용 상승이 불가피함.

$$\text{회수기간} = \frac{\text{소요된 투자액}}{\text{연간현금유입액(연간이익} + \text{감가상각비)}}$$

$$= \frac{33,235}{(1,612 + 33,235/20)} = 10.2\text{년}$$

- 양산 시 투입비용 기준 (50% 절감 예상)으로 고효율 환기 에너지 절감 사업화 모델은 환기에너지를 약 21.5% 절감하는 시스템으로 사업 활성화로 인해 확대되거나 공조로 까지 확산되게 되면 양산시점에서 가격을 개발초기 단가의 50%를 가정하여 계산함.

$$\text{회수기간} = \frac{\text{소요된 투자액}}{\text{연간현금유입액(연간이익} + \text{감가상각비)}}$$

$$= \frac{16,617}{(1,612 + 16,617/20)} = 6.8\text{년}$$

(다) 설치 비용대비 효과 분석 결과

- 대표적인 다중이용시설인 지하철역사 승강장 환기설비는 실내 공기질 관리법을 준수하여 국민안전 및 도시기능에 직접적인 관련이 있기 때문에 환기분야의 에너지를 줄이는데 제약이 따름.
- 환기설비 주동력인 고효율전동기와 인버터를 이용한 가변운전을 위한 고효율제품은 기존 설비에 비해 상대적으로 높은 초기 투자가 요구되어 계산결과 회수기간이 10.2년으로 비용대비 효과는 매우 작으나 사업화 활성화를 통한 양산과 전 공조 시스템으로 확대된다면 투자비는 반감되어 회수기간이 6.8년으로 예상되어 효과가 어느 정도 클 것으로 분석됨.

(5) 지하역사 회생전력 에너지절감 사업화모델(RBM/UG) 비용대비 효과분석

- 지하역사 테스트베드인 수락산 변전소에 설치되는 회생전력 사업화모델(RBM/UG)은 수락산역 또는 설치가 어려운 지상역의 회생전력을 포함시켜 비용대비 효과분석을 수행할 수 있는데 수락산역에 국한하여 효과를 분석함.

(가) 회생전력 사업화모델 설치 및 절감 사양

① 회생에너지 설치 사양

<표 3-7-27> 회생전력 사업화모델 설치사양

설치 기기	회생전력	회생 컨버터	배터리(ESS)	인버터(PCS)	역사내 전기 활용
관련 사진					
용도	회생전력 발생 [DC1680V~1750V]	DC/DC변환 [DC1750V→DC815V]	전력 저장 [DC588V~815V]	DC/AC 변환 [DC815V→AC380V]	역사계통연계 [AC380V,3상4선식]
용량	0~400KW	500KW(400A)	400KW	200KW	200KW
위치		지상역 운영실	지상역 운영실	지상역 운영실	지상역 운영실

② 회생에너지 절감 사양

<표 3-7-28> 역사 회생에너지 절감 사양

비 목	지하역(도봉산역)	산출근거	비 고
설치위치	수락산역 변전소		
절감방법 (일 절감량)	제동시 발전제동 회수 (533kWh/일)	500kW× 10[Sec/회]×19.2회/3600Sec ×20h/일(운전)	
연간 에너지 절감량	194.5MWh/년	533kWh/일×365	
적 용		533kWh/일	

(나) 설치 비용대비 효과 분석

① 설치비용

<표 3-7-29> 회생전력 사업화모델 설치비용

품 목	설치용량	단가	금액	비고
회생컨버터	500kW	250,000	250,000	
에너지저장장치(ESS)	400kW	235,000	235,000	
인버터(PCS) 및 기타	200kW	60,800	60,800	
운영시스템(TOS)	200kW	139,000	139,000	
합 계			684,800	

※ 요금단가(하절기): - 경 부 하:56.1원(1), - 중간부하:109원(1.94), -최대부하:191.1원(3.4)

② 에너지 절감 효과

<표 3-7-30> 회생전력 사업화모델 에너지 절감효과

구 분	절감량 [MWh]	산 출 근 거	절감금액 (천원)	참 고
회생에너지	194.5	533kWh/일×365일	25,285	평균단가 130원/kWh
에너지 저장장치 운용	221.9	400 kWh 2회/일 충·방전 효과 80% 적용 - 경부하충전→최대부하 급전 - 중간부하충전→최대부하급전	28,847	저장 평균단가 : 130원/kWh
		Peak전력 400 kW×95%×12개월	37,939	공급/Peak Cut 8,320원/kWh
계	416.4		92,071	

③ 비용대비 효과분석

- 회생전력 사업모델(RBM/UG)에 대한 비용대비 효과분석을 위해 설치비용과 절감액을 반영하여 회수기간법에 의한 회수기간을 계산함.

$$\text{회수기간} = \frac{\text{소요된 투자액}}{\text{연간현금유입액(연간이익} + \text{감가상각비)}}$$

$$= \frac{684{,}800}{(92{,}071 + 684{,}800/20)} = 5.4\text{년(금액단위 : 천원)}$$

(다) 비용대비 효과분석 결과

- 회생전력 사업화모델(RBM/UG)에 대한 비용대비 효과분석 결과 회수기간이 5.4년으로 6년 이내로 계산되어 경제성 측면에서 효과가 큰 것으로 나타났는데 이는 ESS 저장을 통한 운용으로 첨두부하시간대의 값비싼 전력요금 절감에 기인한 것으로 분석됨.
- 전동차 제동시 발생하는 회생전력은 시격이 짧을 때는 인근 주행열차에서 소모되지만 시격이 길거나(5분이상) 가선전압이 일정 전압이상(1600~1650V)이 되면 가선전압 상승으로 인해 전차선로 계통의 절연열화나 사고로 이어질 수 있기 때문에 ESS에 저장하게 되면 안정적인 전차선로 계통전압을 유지하는 효과도 있음.

(6) 지하역사 폐열회수 에너지절감 사업화모델(TBM/UG) 비용대비 효과분석

- 폐열회수 사업화모델은 TLS 냉각능력이 선로 발열량보다 큰 경우 터널 및 스크린도어로부터의 승강장 냉방 부하를 50% 절감 하는 것을 가정한 것으로, 오후 평시 및 오후 혼잡시 스크린도어의 전열 및 침입부하에 의한 냉방부하를 50% 절감 따라서 TLS 적용시 승강장 터널의 선로 발열량 해소를 위한 환기량은 최대 1/2 감소시키므로, 오전 혼잡시기의 경우 스크린도어 부하 중 TLS의 냉각능력 비율의 절반만큼 부하를 감소.

(가) 폐열회수 설치 사양

<표 3-7-31> 폐열회수 사업화모델 설치사양

설치 기기	전동차 폐열	모세관 모듈	환수 배관	열교환기	급수 주관
관련 사진					
용도	제동 폐열 발생	폐열 수집	폐열 이동	폐열 냉각	냉각수 이동
용량		-	Ø 60	100×150×50mm	Ø 60
위치		승강장 하부 약 100M	승강장 하부 모듈 ~ 집수정 열교환기	마들 집수정	집수정 열교환기 ~ 승강장 하부 모듈

(나) 설치 비용대비 효과 분석

① 설치비용

<표 3-7-32> 폐열회수 사업화모델 설치비용

단위 : 천원

품 명	단가 (천원)		개수		비용 (천원)		비고
	연구단계	상용단계	연구단계	상용단계	연구단계	상용단계	
TLS 모듈제작	470	370	80개	160개	37,600	59,200	연구용 용량: 32 kW 상업용 용량: 64 kW
순환 및 열교환 장치	24,750	20,000	1대	1대	29,900	25,150	
배관 설치 자재비	7,500	7,500	1열	2열	17,500	35,000	
설치공사 인건비	50,000	50,000	1열	2열	50,000	100,000	
기타비용	15,000	15,000	1식	1식	15,000	15,000	설비비 및 보험 등
합계					150,000	234,350	

- 순환 및 열교환 장치의 경우 초기 제작품은 자동제어 설계비용 포함됨.
- 테스트베드 설치기준으로 승강장 2개 선로 중 1개 선로의 냉각을 목적으로 함
- 상업용은 일반 상대식 승강장 설치기준으로 승강장 2개 선로를 모두 냉각하는 것을 목적으로 함.

② 에너지 절감 효과

- 터널 열배출 시스템(TLS: Thermal Lining System)은 승강장의 냉방이 이루어지는 시점에는 항상 작동하도록 하고, 오전 혼잡시기의 경우 선로부하가 높아 TLS를 1시간 동안 먼저 가동토록 함.

<표 3-7-33> 폐열회수 사업화모델 에너지 절감효과

구분			오전 혼잡			오후 평시			오후 혼잡		
			절감대상	절감량	절감율	절감대상	절감량	절감율	절감대상	절감량	절감율
승강장 부하		(kW)	33.7	16	47%	62	31	50%	84.4	42.2	50%
선로 부하		(kW)	72.1	32	44%	4.2	4.2	100%	28.2	28.2	100%
승강장 공조용 냉동기	부하절감	(kW)	16			31			42.2		
	전력절감	(kW)	3.7			7.2			9.8		
	냉방 시간	(h)	3			4			3		
	절감전력	kWh	11.2			28.8			29.4		
선로 급배기팬	작동시간	(h)	2			0			2		
	절감 시간	(h)	0.88			0			1		
	절감전력	kWh	36.08			0			41		
절감전력 합계		kWh	47.2			28.8			70.4		
TLS 작동시간		(h)	4			4			3		
TLS 소비전력량		kWh	12			15			15		
TLS 적용효과		kWh	35.2			13.8			55.4		
절감액		천원	104.4kWh×365 = 38.1MWh/38.1MWh×130원/kWh = 4,953천원								

③ 비용대비 효과분석

- 폐열회수 사업모델(TBM/UG)에 대한 비용대비 효과분석을 위해 설치비용과 절감액을 반영하여 회수기간법에 의한 회수기간을 계산함.

$$\text{회수기간} = \frac{\text{소요된 투자액}}{\text{연간현금유입액(연간이익} + \text{감가상각비)}}$$

$$= \frac{150{,}000}{(4{,}953 + 150{,}000/20)} = 12.0\text{년(금액단위 : 천원)}$$

- 폐열회수 사업화모델(TBM/UG)에 대한 비용대비 효과분석을 위해 회수율기간법에 의해 경제성을 분석한 결과 회수기간이 12년으로 계산되어, 경제성이 낮은 것으로 나타남.

(다) 비용대비 효과분석 결과

- 폐열회수 사업화모델(TBM/UG)에 대한 비용대비 효과분석 결과 회수기간이 12년으로 계산되어 경제성 측면에서 효과가 낮은 것으로 분석됨.
- 현재는 승강장 2개 선로 중 1개 선로의 냉각을 목적으로 효과분석 했으나, 향후 상업용은 일반 상대식 승강장 설치기준으로 승강장 2개 선로를 모두 냉각하는 방식임.

다. 사업화모델(SESBM)에 따른 비용대비 효과분석 결과

(1) 지상역사 사업화모델(SESBM/G) 투자대비 효과분석 결과

- 지상역사 테스트베드인 도봉산역에 대한 다양한 에너지원으로, 앞의 태양광발전과 향후에 설치될 회생전력 사업화모델에서 분석한 비용대비 효과분석을 토대로 사업화모델 구축을 위한 분석 결과는 다음과 같음.

<표 3-7-34> 지상역사 사업화모델 비용대비 효과분석 결과

단위 : 천원

요소기술		설치용량	년절감량 (MWh)	투자비용	절감액	회수기간	비고
단독	태양광 모델	30kW	79.9	156,500	14,908	6.9년	금회
	회생전력 모델	500kW(400A)	416.4	684,800	92,071	5.4년	향후
	합 계	530kW	496.3	841,300	106,979	5.6년	
통합모델			496.3	800,300	106,979	5.4년	설치비감소

- 회수기간법에 따른 회수기간을 계산한 결과 태양광 사업화모델(SBM/G)은 회수기간이 6.9년으로 경제적 효과는 있으나 아주 높지는 않고, 회생전력 사업화모델(RBM/G)은 회수기간이 5.4년으로 경제적 효과가 아주 높게 나타났고, 지상역사에 대한 에너지 절감사업화모델의 평균 경제적 절감효과는 5.6년으로 투자대비 효과가 크게 계산됨.
- 그리고 2개 사업을 통합관리하면 설치 및 운용비용이 줄고 관리도 간편해지므로 비용대비 효과가 상승하여 회수기간도 5.4년으로 짧아지나 부분적으로는 확장이 곤란한 단점도 있을 수 있음.
- 회생전력 사업화모델은 현재 지상역사 테스트베드인 도봉산역 전기실의 설치여건이 곤란하여 배제했으나, 지상역사도 지하역사와 마찬가지로 효과가 크게 상승됨은 물론 태양광발전 사업화 효과를 배증시키는 것으로 효과 분석됨.
- 또한 태양광발전 사업화모델은 지하철의 신·재생에너지 의무설치(신재생에너지 개발, 이용, 보급 촉진법 제12조/ 동 시행령 15조/2015.7.31.) 법적조건을 만족하고, 회생전력 사업화모델은 경부하시 전차선로 가선전압 상승을 억제하여 계통의 절연

열화나 사고방지 효과가 있고, 두 사업화모델 공히 ESS에 저장시킨 절감에너지를 역사 첨두부하 시에 공급, Peak전력을 낮추어 높은 전력요금에 대한 절감효과가 있음.

(2) 지하역사 사업화모델(SESBM/UG) 투자대비 효과분석 결과

- 지하역사 에너지 절감 사업화모델인 고효율 환기 사업화모델(HBM/UG)과 회생전력 사업화모델(RBM/UG) 및 폐열회수 사업화모델(TBM/UG)에 대한 비용대비 효과분석한 결과는 아래와 같음.

<표 3-7-35> 지하역사 사업화모델 투자대비 효과분석 결과

단위 : 천원

요소기술		설치용량	년절감량(MWh)	투자비용	절감액	회수기간	비고
단독	고효율 환기	54kW	12.4	33,235	1,612	10.1년	
	회생전력 모델	500kW(400A)	416.4	684,800	92,071	5.4년	
	폐열회수 모델	100kW	38.1	150,000	4,953	12.0년	
	합 계	654kW	496.3	868,035	98,636	6.1년	
통합 모델		654kW	496.3	868,035	98,636	6.1년	운용효율무시

- 회수기간법에 따른 회수기간을 계산한 결과 고효율 환기 사업화모델(HBM/UG)과 폐열회수 사업화모델(TBM/UG)의 회수기간이 각각 10.1년과 12년으로 경제적 효과가 낮은 것으로 나타났고, 회생전력 사업화모델(RBM/UG)만이 회수기간이 5.4년으로 경제적 효과가 아주 높게 나타났으며, 지하역사에 대한 에너지 절감사업화 모델의 평균 경제적 절감효과는 6.1년으로 비용대비 효과가 큰 것으로 계산됨.
- 그리고 3개 사업을 통합 관리하면 설치 및 운용비용이 줄고 관리도 간편해지므로 비용대비 효과가 상승하여 회수기간도 6.1년보다 더 짧아지나(운용효율 무시) 부분적으로는 확장이 곤란한 단점도 있을 수 있음.
- 고효율 환기 사업화모델과 폐열회수 사업화모델은 에너지 절감효과만 있고 태양광이나 회생전력과 같이 ESS를 통한 저장 에너지는 아니기 때문에 역사 최대부하 시 Peak-Shaving에 기여도가 낮아 투자비용 대비 절감효과가 낮게 나타남.
- 따라서 회생전력 사업화모델과 같이 통합 사업화모델을 구축하면 평상시 전력사용량이 절감되고 회생전력을 통한 최대부하시도 Peak-Shaving을 통한 역사 최대전력을 낮추어 값비싼 Peak전력요금이 대폭 감소하게 되는 효과는 증대됨.

4. 도시철도 에너지 관련 기술기준 적용(안)

가. 도시철도 에너지 관련 기존 제도.

(1) 건축물의 에너지 절약 설계기준(발췌)/국토교통부 2015.12.31.

제 2절 기계설계부문 설계기준(제8조～제9조)

제8조(기계부문의 의무사항)
에너지절약계획서 제출대상 건축물의 건축주와 설계자 등은 다음 각 호에서 정하는 기계부문의 설계기준을 따라야 한다.
1. 설계용 외기조건
2. 열원 및 반송설비

제9조(기계부문의 권장사항)
에너지절약계획서 제출대상 건축물의 건축주와 설계자 등은 다음 각 호에서 정하는 사항을 제13조의 규정에 적합하도록 선택적으로 채택할 수 있다.
1. 설계용 실내온도 조건
2. 열원설비
3. 공조설비
4. 반송설비
5. 환기 및 제어설비
6. 위생설비 등
설비별 제어 시스템간 에너지관리 데이터의 호환과 집중제어가 가능하도록 한다.

제 3절 전기부문 설계기준(제10조～제11조)
제10조(전기부문의 의무사항)
에너지절약계획서 제출대상 건축물의 건축주와 설계자 등은 다음 각 호에서 정하는 전기부문의 설계기준을 따라야 한다.
1. 수변전설비
2. 간선 및 동력설비
3. 조명설비
4. 대기전력 자동 차단장치
5.영 제10조의2에 해당하는 공공건축물을 건축 또는 리모델링하는 경우 법 제14조의2제2항에 따라 원격검침전자식계량기를 설치하여야 한다.

제11조(전기부문의 권장사항)
에너지절약계획서 제출대상 건축물의 건축주와 설계자 등은 다음 각 호에서 정하는 사항을 제13조의 규정에 적합하도록 선택적으로 채택할 수 있다.
1. 수변전설비
2. 동력설비
3. 조명설비
4. 제어설비
5. 사용하지 않는 기기에서 소비하는 대기전력을 저감하기 위해 도어폰, 홈게이트웨이 등은 대기전력저감 우수제품으로 등록된 제품을 사용한다.

제 4절 신재생 에너지 설비 부문 설계기준(제12조)
제12조(신재생에너지 설비부문의 의무사항)

제 5장 건축물 에너지 소비 총량 게(제21조～제22조)
제21조 (건축물의 에너지 소요량의 평가)
제22조(건축물의 에너지 소요량의 평가방법)

[별표9] 완화기준
가. 건축물에너지 효율인증 등급 및 녹색 건축 인증등급에 따른 건축기준 완화비율

구분	에너지 효율인증 1등급	에너지 효율인증 2등급
녹색건축 인증 최우수 등급	6%이상 12%이하	4%이상 8%이하
녹색건축 인증 우수 등급	4%이상 8%이하	2%이상 4%이하

(2) 공공기관 에너지 이용 합리화 추진에 관한 규정(발췌)/산업자원부 2015.9.5.

1. 건축물부문 에너지이용 합리화
제6조(신축건축물의 에너지이용 효율화 추진)
제7조(에너지진단 및 ESCO 추진)
제8조(기존 건축물의 에너지이용 효율화)
제9조(신재생에너지 설비 설치)
제11조(고효율에너지기자재 사용)
제12조(조명기기의 효율적 이용)
제13조(대기전력저감)
제14조(적정실내온도 준수 등)

(3) 도시철도법/시행령/시행규칙(발췌) 2016.3.22.

도시철도법(2조)	도시철도법시행령(2조)
제2조(정의) 이 법에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다. <개정 2014.5.21> 6의2. "도시철도부대사업"이란 도시철도시설·도시철도차량·도시철도부지 등을 활용한 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 사업을 말한다. 다. 도시철도시설의 유지·보수 등 국가·지방자치단체 또는 공공법인 등으로부터 위탁받은 사업	제2조(도시철도시설) 3. 도시철도의 건설 및 유지보수를 위하여 해당 사업기간 동안 사용되는 장비와 그 장비의 정비·점검 또는 수리를 위한 시설 4. 그 밖에 도시철도 안전 관련 시설, 안내시설 등 도시철도의 건설·유지보수 및 운영을 위하여 필요한 시설로서 국토교통부장관이 정하는 시설 제2조의2(도시철도부대사업) ① 법 제2조 제6호의2라목에서 "대통령령으로 정하는 사업"이란 다음 각 호의 사업을 말한다.

라. 역세권 및 도시철도시설·부지를 활용한 개발·운영 사업으로서 대통령령으로 정하는 사업	1. 「역세권의 개발 및 이용에 관한 법률」 제2조제2호에 따른 역세권개발사업 2. 도시철도 이용객을 위한 편의시설의 설치·운영사업

(4) 고효율에너지 기자재 보급촉진에 관한규정(발췌)/산업통상자원부, 2014.3.5.

제3조(고효율에너지 인증 대상 기자재)
고효율에너지인증대상기자재와 각 기자재 별 적용범위는 [별표 1]참조

(5) 건축물 에너지 효율등급 인증제도 운영규정(발췌)/한국에너지공단 2016.3.3.

제1조(목적) 제2조(적용범위) 제4조(인증 대상) 제7조(인증평가 세부기준) 제8조(인증업무 운영비용)

(6) 신재생에너지 관련 기술기준 제정현황/김기현외, 대한 전기학회 학술대회 2015.11

- “신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 제 2조”

㉮ 신에너지: 수소에너지, 연료전지, 가스화에너지 등

㉯ 재생에너지: 태양에너지, 풍력, 수력, 해양에너지, 지열에너지, 바이오에너지, 폐기물에너지 등



<그림 3-7-27> 분산형전원 계통연계설비 기준

분산형전원 계통연계설비 기준

태양전지 모듈 시설 기준 현황

현행 규정

제 54조(태양전지 모듈 등의 시설)

① 태양전지 발전소에 시설하는 태양전지 모듈, 전선 및 개폐기 기타 기구는 다음의 각 호에 따라 시설하여야 한다.

1. 충전부분은 노출되지 아니하도록 시설할 것.
2. 태양전지 모듈에 접속하는 부하측의 전로(복수의 태양전지 모듈을 시설한 경우에는 그 집합체에 접속하는 부하측의 전로)에는 그 접속점에 근접하여 개폐기 기타 이와 유사한 기구(부하전류를 개폐할 수 있는 것에 한한다)를 시설할 것.
3. 태양전지 모듈을 병렬로 접속하는 전로에는 그 전로에 단락이 생긴 경우에 전로를 보호하는 과전류차단기 기타의 기구를 시설할 것. 다만, 그 전로가 단락전류에 견딜 수 있는 경우에는 그러하지 아니하다.
4. 전선은 다음에 의하여 시설할 것. 다만, 기계기구의 구조상 그 내부에 안전하게 시설할 수 있을 경우에는 그러하지 아니하다.
   가. 전선은 공칭단면적 2.5mm² 이상의 연동선 또는 이와 동등 이상의 세기 및 굵기의 것일 것.
   나. 옥내에 시설할 경우에는 합성수지관공사, 금속관공사, 가요전선관공사 또는 케이블공사로 제183조, 제184조, 제186조 또는 제193조, 제195조제2항 및 제196조제2항, 제3항의 규정에 준하여 시설할 것.
   다. 옥측 또는 옥외에 시설할 경우에는 합성수지관공사, 금속관공사, 가요전선관공사 또는 케이블공사로 제183조, 제184조, 제186조 또는 제218조제1항제7호 및 제195조제2항, 제196조제2항 및 제3항의 규정에 준하여 시설할 것.
5. 태양전지 모듈 및 개폐기 그 밖의 기구에 전선을 접속하는 경우에는 나사 조임 그 밖에 이와 동등 이상의 효력이 있는 방법에 의하여 견고하고 또한 전기적으로 완전하게 접속함과 동시에 접속점에 장력이 가해지지 아니하도록 할 것.

② 태양전지 모듈의 지지물은 자중, 적재하중, 적설 또는 풍압 및 지진 기타의 진동과 충격에 대하여 안전한 구조의 것 이어야 한다.

-9-

전기저장장치 기준 제정 현황

현 행 ('14.12.15 개정 고시)

제3조(정의) ① 이 고시에서 사용하는 용어의 정의는 다음 각 호와 같다.

1. "발전소"란 발전기·원동기·연료전지·태양전지·해양에너지발전설비·전기저장장치 그 밖의 기계기구[비상용 예비전원을 얻을 목적으로 시설하는 것 및 휴대용 발전기를 제외한다]를 시설하여 전기를 생산[원자력, 화력, 신재생에너지 등을 이용하여 전기를 발생시키는 것과 양수발전, 전기저장장치와 같이 전기를 다른 에너지로 변환하여 저장 후 전기를 공급하는 것]하는 곳을 말한다.

~<생략>

28. 전기저장장치는 전기를 저장하고 공급하는 시스템을 말한다.

제53조의3(전기저장장치의 시설)

① 전기저장장치를 시설하는 경우에는 인체 감전, 화재 그 밖에 사람에게 위해를 주거나 다른 전기설비에 지장을 주지 않도록 시설하여야 한다.
② 전기저장장치는 사용 목적에 따라 전기를 안정적으로 저장하고 공급할 수 있도록 적절한 보호 및 제어장치를 갖추고 폭발의 우려가 없도록 시설하여야 한다.

- 발전소 정의 개정 및 용어정의는 전기저장장치의 전압조정, 주파수조정, 전력 판매 등 다양하게 전력시장 사업에 참여할 수 있도록 제도적 근거 마련
- 전기저장장치 시설 시 최소한의 안전을 확보 할 수 있도록 시설 규정을 제정 사용목적에 따라 안정적으로 전기를 저장 및 공급할 수 있는 보호장치를 갖추고 이차전지를 이용한 전기저장장치 등은 폭발 우려가 없도록 환기 시설 등을 시설하도록 규정

-12-

(7) 신재생에너지 개발,이용,보급 촉진법/시행령/시행규칙(발췌) 2013.1.30.

신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 [법률 제11965호, 2013.7.30., 일부개정]	신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행규칙 [산업통상자원부령 제138호, 2015.7.9., 일부개정]
제2조(정의) 이 법에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다. <개정 2013.3.23, 2013.7.30, 2014.1.21> 1. "신에너지"란 기존의 화석연료를 변환시켜 이용하거나 수소·산소 등의 화학 반응을 통하여 전기 또는 열을 이용하는 에너지로서 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 것을 말한다. 가. 수소에너지 나. 연료전지 다. 석탄을 액화·가스화한 에너지 및 중질잔사유(重质残渣油)를 가스화한 에너지로서 대통령령으로 정하는 기준 및 범위에 해당하는 에너지 라. 그 밖에 석유·석탄·원자력 또는 천연가스가 아닌 에너지로서 대통령령으로 정하는 에너지 2. "재생에너지"란 햇빛·물·지열(地热)·강수(降水)·생물유기체 등을 포함하는 재생 가능한 에너지를 변환시켜 이용하는 에너지로서 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 것을 말한다. 가. 태양에너지 나. 풍력 다. 수력 라. 해양에너지 마. 지열에너지 바. 생물자원을 변환시켜 이용하는 바이오에너지로서 대통령령으로 정하는 기준 및 범위에 해당하는 에너지 사. 폐기물에너지로서 대통령령으로 정하는 기준 및 범위에 해당하는 에너지 아. 그 밖에 석유·석탄·원자력 또는 천연가스가 아닌 에너지로서 대통령령으로 정하는 에너지 3. "신에너지 및 재생에너지 설비"(이하 "신·재생에너지 설비"라 한다)란 신에너지 및 재생에너지(이하 "신·재생에너지"라 한다)를	제2조(신·재생에너지 설비) 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」(이하 "법"이라 한다) 제2조제3호에서 "산업통상자원부령으로 정하는 것"이란 다음 각 호의 설비 및 그 부대설비(이하 "신·재생에너지 설비"라 한다)를 말한다. <개정 2015.4.23> 1. 수소에너지 설비: 물이나 그 밖에 연료를 변환시켜 수소를 생산하거나 이용하는 설비 2. 연료전지 설비: 수소와 산소의 전기화학 반응을 통하여 전기 또는 열을 생산하는 설비 3. 석탄을 액화·가스화한 에너지 및 중질잔사유(重质残渣油)를 가스화한 에너지 설비: 석탄 및 중질잔사유의 저급 연료를 액화 또는 가스화시켜 전기 또는 열을 생산하는 설비 4. 태양에너지 설비 가. 태양열 설비: 태양의 열에너지를 변환시켜 전기를 생산하거나 에너지원으로 이용하는 설비 나. 태양광 설비: 태양의 빛에너지를 변환시켜 전기를 생산하거나 채광(采光)에 이용하는 설비 5. 풍력 설비: 바람의 에너지를 변환시켜 전기를 생산하는 설비 6. 수력 설비: 물의 유동(流动) 에너지를 변환시켜 전기를 생산하는 설비 7. 해양에너지 설비: 해양의 조수, 파도, 해류, 온도차 등을 변환시켜 전기 또는 열을 생산하는 설비 8. 지열에너지 설비: 물, 지하수 및 지하의 열 등의 온도차를 변환시켜 에너지를 생산하는 설비 9. 바이오에너지 설비: 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행령」(이하 "영"이라 한다) 별표 1의 바이오에너지를 생산하거나 이를 에너지원으로 이용하는 설비 10. 폐기물에너지 설비: 폐기물을 변환시켜 연료 및 에너지를 생산하는 설비 11. 수열에너지 설비: 물의 표층의 열을 변환

생산 또는 이용하거나 신·재생에너지의 전력계통 연계조건을 개선하기 위한 설비로서 산업통상자원부령으로 정하는 것을 말한다. 4. "신·재생에너지 발전"이란 신·재생에너지를 이용하여 전기를 생산하는 것을 말한다. 5. "신·재생에너지 발전사업자"란 「전기사업법」 제2조제4호에 따른 발전사업자 또는 같은 조 제19호에 따른 자가용전기설비를 설치한 자로서 신·재생에너지 발전을 하는 사업자를 말한다. [전문개정 2010.4.12]	시켜 에너지를 생산하는 설비 12. 전력저장 설비: 신에너지 및 재생에너지(이하 "신·재생에너지"라 한다)를 이용하여 전기를 생산하는 설비와 연계된 전력저장 설비 [전문개정 2014.11.28]

제12조(신·재생에너지사업에의 투자권고 및 신·재생에너지 이용의무화 등)
1.산업통상자원부장관은 신·재생에너지의 기술개발 및 이용·보급을 촉진하기 위하여 필요하다고 인정하면 에너지 관련 사업을 하는 자에 대하여 제10조 각 호의 사업을 하거나 그 사업에 투자 또는 출연할 것을 권고할 수 있다. <개정 2013.3.23.>

2.산업통상자원부장관은 신·재생에너지의 이용·보급을 촉진하고 신·재생에너지산업의 활성화를 위하여 필요하다고 인정하면 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자가 신축·증축 또는 개축하는 건축물에 대하여 대통령령으로 정하는 바에 따라 그 설계 시 산출된 예상 에너지사용량의 일정 비율 이상을 신·재생에너지를 이용하여 공급되는 에너지를 사용하도록 신·재생에너지 설비를 의무적으로 설치하게 할 수 있다. <개정 2013.3.23., 2015.1.28>

가. 국가 및 지방자치단체
나. 공공기관
다. 정부가 대통령령으로 정하는 금액 이상을 출연한 정부출연기관
라.「국유재산법」 제2조제6호에 따른 정부출자기업체
마. 지방자치단체 및 제2호부터 제4호까지의 규정에 따른 공공기관, 정부출연기관 또는 정부출자기업체가 대통령령으로 정하는 비율 또는 금액 이상을 출자한 법인
바. 특별법에 따라 설립된 법인

3. 산업통상자원부장관은 신·재생에너지의 활용 여건 등을 고려할 때 신·재생에너지를 이용하는 것이 적절하다고 인정되는 공장·사업장 및 집단주택단지 등에 대하여 신·재생에너지의 종류를 지정하여 이용하도록 권고하거나 그 이용설비를 설치하도록 권고할 수 있다. <개정 2013.3.23>

제15조(신·재생에너지 공급의무 비율 등)
1. 법 제12조제2항에 따른 예상 에너지사용량에 대한 신·재생에너지 공급의무 비율은 다음 각 호와 같다. <개정 2013.3.23.>

가. 「건축법 시행령」 별표 1 제5호부터 제16호까지, 제23호가목부터 다목까지, 제24호 및 제 26호부터 제28호까지의 용도의 건축물로서 신축·증축 또는 개축하는 부분의 연면적이 1

천제곱미터 이상인 건축물(해당 건축물의 건축 목적, 기능, 설계 조건 또는 시공여건상의 특수성으로 인하여 신·재생에너지 설비를 설치하는 것이 불합리하다고 인정되는 경우로서 산업통상자원부장관이 정하여 고시하는 건축물은 제외한다): 별표 2에 따른 비율 이상
나. 제1호 외의 건축물: 산업통상자원부장관이 용도별 건축물의 종류로 정하여 고시하는 비율 이상

2. 제1항제1호에서 "연면적"이란 「건축법 시행령」 제119조제1항제4호에 따른 연면적을 말하되, 하나의 대지(垈地)에 둘 이상의 건축물이 있는 경우에는 동일한 건축허가를 받은 건축물의 연면적 합계를 말한다.

3. 제1항에 따른 건축물의 예상 에너지사용량의 산정기준 및 산정방법 등은 신·재생에너지의 균형 있는 보급과 기술개발의 촉진 및 산업 활성화 등을 고려하여 산업통상자원부장관이 정하여 고시한다. <개정 2013.3.23.> [전문개정 2010.9.17]

나. **도시철도 역사 에너지 기술기준 적용(안)**

< 배경 >
(1) 국가사업'도시철도 역사 에너지 절감기술개발'에 따른 도시철도 역사의 에너지 자립화를 위한 전력 저장장치(ESS)기반의 에너지 최적 운영기술 및 에너지 절감시스템 구축과 운영 및 사업화를 위한 도시철도 역사 에너지 기술기준 적용(안)'기준이 필요하다.

(2) 기술기준 적용(안)은 역사 에너지 자립화를 위한 최적의 에너지 절감시스템 개발 및 구축에 대비하여 에너지 기술기준을 새롭게 정함으로써, 역사 에너지 최적 운영 및 사업화에 대응하여 효과적이고 일관된 기술기준을 제공하는데 목적이 있다.

< 도시철도 역사 에너지 기술기준 적용(안) >
제1조(목적)
이 기술기준 적용(안)은 '도시철도 역사 에너지 절감기술개발'이 수립됨에 따른, 역사 에너지 자립화를 위한 에너지 기술기준을 정함으로써, 역사 에너지 최적 운영 및 사업화에 대응한 최적의 에너지 절감시스템 개발 및 구축에 필요한 효과적이고 일관된 기술기준을 제공하는데 목적이 있다.

제2조(적용)
① 이 기술기준은 도시철도법(2조), 동시행령(2조)에 따른다.
② 도시철도의 역사 에너지 자립화를 위한 에너지 절감시스템 개발 및 구축 시설물에 대하여 적용한다.
③ 이 기술기준에 수록되지 아니한 시설물(설비 및 주요부품)에 대하여는 이 기준 중 유사한 종류와 에너지관련 법 및 에너지관련 기관의 에너지 기술 기준을 준용할 수 있다.

제3조(설계기준)
건축물의 에너지 절약 설계기준(국토교통부 2015.12.31.)을 준용한 전기 설계부문, 기계설계부문 및 건축설계부문의 설계기준은 [별지 1]과 같다.

제4조(에너지합리화)
공공기관 에너지이용 합리화 추진에 관한 규정(산업자원부2015.9.5)을 준용하여 공기업은 에너지 이용 효율화를 [별지 2]에 따라 추진하고 구축을 위해 노력해야 한다.

제5조(고효율 에너지 인증기자재 사용)
고효율에너지 기자재 보급촉진에 관한 규정(산업통상자원부,2014.3.5.)
고효율에너지 인증대상 기자재 의 [별지 3]에 따라 적용해야한다.

제6조(신재생에너지 적용)
고효율에너지 기자재 보급촉진에 관한 규정(산업통상자원부, 2014.3.5.)
고효율에너지 인증대상 기자재의 [별지 4]에 따라 적용해야 한다.

제7조(건축물 에너지 효율등급 인증제도 적용)
고효율에너지 인증제도 운영규정(한국에너지 공단. 2016.3.3) 에 따라 [별지 5]에서와 같이 건축물 효율등급을 적용할 수 있다.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템

(1) 성과목표 및 달성도

<표 4-1-1> 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템 성과목표 및 달성도

단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						달성도
		질적 성과지표		목표치	측정방법	검증방법	가중치	
2-가	계통연계형 PCS 시제품 제작 및 전력저장장치 제작/연동시험	①	200kW급 양방향 인버터 설계/제작/성능평가	200kW	시제품 제작 및 성능시험	시제품 시연	10	100%
		②	400kWh급 전력저장장치 제작	400kWh	시제품 제작 및 성능시험	시제품 시연	10	100%
	회생에너지 전력변환장치 시제품 제작/시험	③	회생에너지 전력변환시스템 시제품 제작/시험	500kW	시제품 제작 및 성능시험	시제품 시연	10	100%

(2) 달성내용

○ PCS & ESS : 스마트그리드 단체표준(SGSF-025-4:2016)시험 만족, 대용량(100kW급 이상), 고효율(95%이상)

- PCS 200kW급, ESS 400kWh(리튬전지, 45kWh(3.2kWh 14직렬) x 10병렬)

○ 회생컨버터 : 저압 모듈형 방식으로 비용절감(30%) 및 부피 감소(50%), 회생에너지 활용 효율(6.5%) 증대

- 용량 500kW(20kW 5직렬 x 5병렬), 용량 증설 용이



<그림 4-1-1> 200kW급 PCS





<그림 4-1-2> 400kWh급 ESS(리튬)



<그림 4-1-3> 500kW급 회생컨버터

나. **전력저장장치 연계형 도시철도 역사용 경량 태양광 발전시스템**

(1) 성과목표 및 달성도

<표 4-1-2> 전력저장장치 연계형 도시철도 역사용 경량 태양광 발전시스템 성과목표 및 달성도

단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						달성도
		질적 성과지표		목표치	측정방법	검증방법	가중치	
2-나	태양광 경량화 특수 구조물 및 Si 결정질 모듈 설치 및 태양광 전력변환장치 시스템연계	①	경량화 특수 구조물 및 Si 결정질 모듈 설치	1건	현장구축	현장 시험	5	100%
		②	30kW급 태양광 전력변환장치 시제품 제작/시험	30kW	시제품 제작 및 성능시험	시제품 시연	5	100%

(2) 달성내용

○ 기존 도시철도 역사에 추가적인 보강공사가 필요 없는 경량화/단순화 모듈

○ SiC 결정질 모듈 : 4x9 경량모듈(660㎜ x1,460㎜, 15kg, 150w), 단위 용량(1W) 당 44% 경량화

- 72모듈 10.8kW 설치, 옥외강풍 및 우수시험(50m/sec) : 이상 무

○ CIGS 플렉시블 모듈 기술을 통한 무게 증가 없이 기존 지붕에 태양광 설치 가능

- 2m x 0.45m 표준 30 모듈(기존 모듈의 1/10 중량), 7.2kW 설치

○ ESS 연계형 컨버터 (12kW × 3)

○ 계통 직접 연계형이 아닌 전력저장장치(90kWh) 연계형 방식, 계통 인버터 50kW



<그림 4-1-4> 도봉산역 결정질 태양광



<그림 4-1-5> 도봉산역 플렉시블 설치사진



<그림 4-1-6> ESS 연계 전력컨버터

다. 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템(Thermal Lining System)

(1) 성과목표 및 달성도

<표 4-1-3> 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템 성과목표 및 달성도

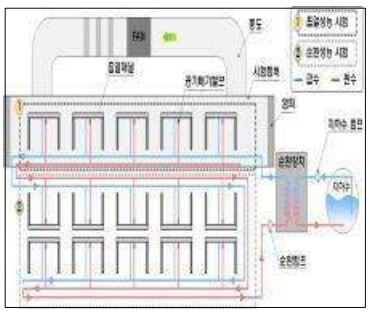
단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						달성도
		질적 성과지표		목표치	측정방법	검증방법	가중치	
2-다	TLS(thermal lining System) 시험 및 현장 실증방안 수립	①	TLS 시험 및 시험사양 작성	160W/㎡, 1건	시제품 시험 및 시험사양 적합성	시제품 시연, 사양작성	10	100%

(2) 달성내용

○ 지하 침출수(또는 냉각 용매)를 활용하여 전동차 하부 열을 흡열하는 방식

○ TES(선로부 배기시스템) 또는 터널환기시스템 동력 절감 가능

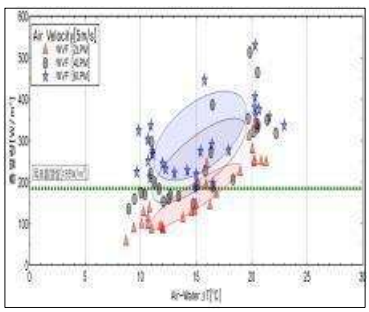
○ TLS 단위모듈당 185W/㎡ 이상의 선로부 흡열량 달성 확인



<그림 4-1-7> 흡열모듈 성능 시험장치



<그림 4-1-8> 흡열모듈 성능검증 챔버



<그림 4-1-9> 성능시험 결과

라. 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템

(1) 성과목표 및 달성도

<표 4-1-4> 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템 성과목표 및 달성도

단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						달성도
		질적 성과지표		목표치	측정방법	검증방법	가중치	
2-라	도시철도역사용 고효율 환기 시스템 설계 및 구축방안 수립	①	경제성 및 환기성능 최적화 환기시스템 설계/제작 및 운영방안	1건	시제품 제작 및 운영방안 적합성	시제품 시연 및 운영방안	5	100%

(2) 달성내용

○ 실내 공기질을 고려한 최적운전패턴 도출 알고리즘 탑재 저비용/고효율 환기시스템

○ 전동기별 도입에 따른 경제성 분석 및 전력소비량 예측 시뮬레이터 개발

○ 가변운전방식을 지원하는 IE4급 고효율 synRM 및 전용 인버터 기술(30kW급, 효율 95%)

○ 승강장 : 환경센서 3개소, 기계실 : 전동기 및 인버터, 상위제어기 1식 환기설비 자동제어



<그림 4-1-10> 환경센서



<그림 4-1-11> 고효율synRM 전동기



<그림 4-1-12> 가변제어 인버터

마. 도시철도 통합 에너지 운영시스템

(1) 성과목표 및 달성도

<표 4-1-5> 도시철도 통합 에너지 운영시스템 성과목표 및 달성도

단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						달성도
		질적 성과지표		목표치	측정방법	검증방법	가중치	
2-마	통합에너지 운영시스템(TOS) framework/UI 개발 및 EIG 시제품 개발	①	통합에너지 운영시스템 framework/ UI 개발	1건	소프트웨어 제작	SW 동작시연	5	100%
		②	EIG 시제품 개발	1건	시제품 제작 및 성능시험	시제품 시연	5	100%
	복합에너지 시스템 통합 스케줄링 알고리즘 적용	③	통합 스케줄링 프로그램 개발	1건	알고리즘 적합성평가	프로그램 해석결과	5	100%

(2) 달성내용

○ 개별 전력설비별 전력사용량 모니터링 및 제어 최초 적용/국제 표준 EMS 적용

○ EIG(Energy Interface Gateway)와 IoT 모듈 분산화를 통한 전력 모니터링 비용 절감

○ 통합 에너지모니터링 시스템 : oBix기반 에너지설비 모델링, 국제 표준 SunSpec/MESA 인증

○ 기본요금 산정 특성 및 수명비용을 고려한 에너지저장장치 최적 스케줄링 알고리즘 탑재



<그림 4-1-13> 통합 에너지모니터링 화면



<그림 4-1-14> EIG/IoT측정Unit



<그림 4-1-15> 에너지 스케줄링 UI

바. 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션

(1) 성과목표 및 달성도

<표 4-1-6> 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션 성과목표 및 달성도

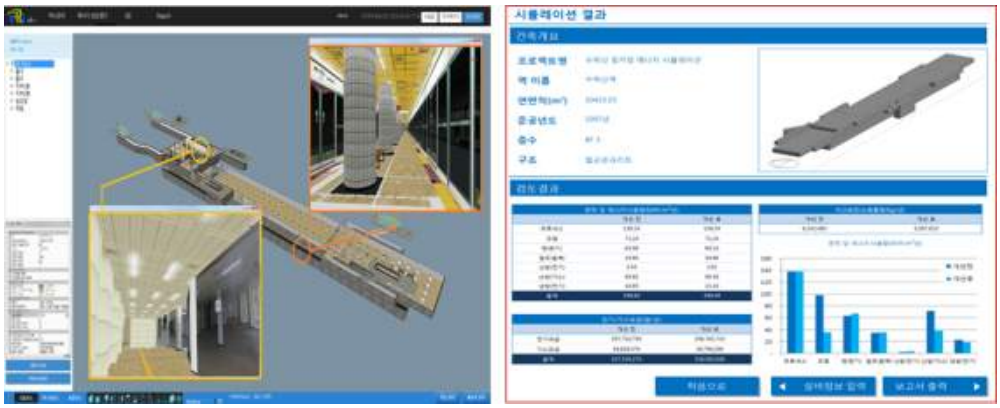
단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						달성도
		질적 성과지표		목표치	측정방법	검증방법	가중치	
2-바	3차원 공간정보 기반 도시철도 역사 에너지 모니터링 시스템 개발	①	단위 모듈 통합을 통한 S/W 개발	1건	솔루션 구동 여부	SW 동작시연	5	100%

(2) 달성내용

○ BIM 기반 도시철도 역사 에너지 성능평가 솔루션(역사 설계 및 리모델링 적용 가능)

○ 다중회귀분석을 통해 입력변수를 최소화, 비전문가의 접근성 강화

○ 사용자 편의성을 고려한 객체정보모델 기반 철도역사 에너지 시뮬레이션 웹 연동 툴



<그림 4-1-16> 에너지 성능평가 솔루션 입력/평가결과 화면

사. **도시철도 역사 테스트베드 구축 및 성능평가**

(1) 성과목표 및 달성도

<표 4-1-7> 실증 테스트베드 구축 및 평가 기술 성과목표 및 달성도

단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						달성도
		질적 성과지표		목표치	측정방법	검증방법	가중치	
2-사	실증표준 테스트베드 기초공사 및 운영방안 수립	①	실증표준 테스트베드 현장 구축을 위한 설계 및 기초공사	1건	설계도, 현장공사 결과	현장공사	10	100%
	에너지 절감장치의 개별 시험평가	②	설비 구축 및 개별 시험평가	1건	시험결과 적합성 평가	시험결과	5	100%
	실용화 전략수립	③	제도/경제적 타당성 검토	1건	검토 적합성평가	검토보고서	10	100%

(2) 달성내용

○ 실증 테스트베드 구축(지하역사 : 수락산역, 지상역사 : 도봉산역)

○ 도시철도 에너지 관련 기술기준 적용(안) 마련

○ 사업화 모델 제시 및 투자효과분석 (회생:6.4년, 태양광:6.9년, 환기:10.1년, 폐열:12.0년)



<그림 4-1-17> 실증 테스트베드 구축 개념도



<그림 4-1-18> 도봉산역 태양광 설치사진

2. 관련 분야 기여도

가. 공공적 기여도

○ 도시철도 역사 에너지 절감 모델 개발 및 실증 테스트베드 구축/운영

- 지하역사 : 서울지하철 7호선 수락산역 변전소(회생, ESS, PCS, TOS)
  서울지하철 7호선 수락산역 승강장, 기계실(환기시스템)
- 지상역사 : 서울지하철 7호선 도봉산역 승강장, 전기실(태양광, ESS, PCS)

○ 도시철도 운영기관의 에너지 비용 절감을 통한 경영 개선에 기여

○ 국가 차원국가차원의 에너지 절감대책 및 기후변화 대응 기술 확보

나. 기술적 기여도

○ 전력저장장치(리튬전지) 연계 회생에너지 역사활용 세계 최초 기술

○ 기존 도시철도 역사 구조물에 설치 가능한 경량 태양광 모듈 제작 기술

○ 국내 최초 지하 침출수를 이용한 열 흡열방식의 터널 냉각시스템 기술

○ 실내 공기질을 고려한 도시철도 역사용 저비용/고효율 환기시스템 기술

○ 개별 전력설비별 전력사용량 감시 및 제어를 위한 국제 표준 EMS 기술 적용

○ 역사 설계 및 리모델링을 위한 BIM 기반 도시철도 역사 에너지 성능평가 솔루션

○ 특허 등록 8건, 특허 출원 7건, 소프트웨어 등록 7건

다. 학술적 기여도

○ SCI급 논문 4편 포함 총 16편 논문 게재

○ 한국철도학회, 대한전기학회 등 국내·외 학술대회 논문 다수 발표

라. 경제적 기여도

○ 실증 테스트베드 기준 에너지 사용량 절감 확인
- 최대 1,000kWh/일 전력사용량 절감 가능, 피크전력 5% 이상 절감 가능
○ 도시철도 역사 에너지 절감을 위한 사업화 모델 제시
- 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템
- 전력저장장치 연계형 도시철도 역사용 경량 태양광 발전시스템
- 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템(Thermal Lining System)
- 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템
- 도시철도 통합 에너지 운영시스템
- 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션
○ 사업화 모델별 경제성 평가 수행

마. **기타**
○ 에너지 절감설비 적용을 위한 관련 제도 검토(안) 작성
○ 타 분야(전력계통, 건축물 등)로 확산을 위한 사업화 모델 다변화 추진
○ 실증 테스트베드 지속 운영을 통한 홍보

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 고려사항

가. 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템

○ 모듈형 방식의 확장 가능한 시스템으로 적용하고자 하는 대상에 따라 설비 용량의 유연성을 확보할 수 있으나 도시철도 역사의 경우 설치 공간 제약을 고려해야 함.

○ 전력저장장치의 경우에는 설치 용량에 비해 실질적인 충·방전 용량은 다소 적게 활용됨으로 용량 설계시 목표 용량 대비 10% 정도의 여유분을 가지고 용량 설계.

○ 본 시스템은 전동차의 회생전력을 활용하는 기술로 지상역사, 지하역사 구분 없이 활용 가능한 기술이나, 기존 변전소가 있는 역사의 경우 변전소 모선과 연결하여 회생전력을 활용할 수 있으나, 전기실만 존재하는 경우에는 별도로 전차선로로부터 회생전력을 활용하기 위한 추가적인 설비 구성이 요구됨.

나. 전력저장장치 연계형 도시철도 역사용 경량 태양광 발전시스템

○ 기존 도시철도 역사에 추가적인 보강공사가 필요 없는 경량화 기술이지만 기존 역사의 노후화로 인한 안전성 검토가 선행되어야 함.

○ 기존 도시철도 역사의 설치로 인한 누수, 모듈 설치 시 풍력 등의 구조 안전성 검토 등이 선행되어야 함.

○ 기존 도시철도 지상역사의 위치적 한계를 있지만 최대한 일조량을 흡수할 수 있는 위치와 설치 각도 확보가 요구됨. 의 설치로 인한 누수, 모듈 설치 시 풍력 등의 구조 안전성 검토 등이 선행되어야 함.

○ 태양광 발전과 전력저장장치를 연계할 수 있는 시스템이긴 하나 기존 도시철도 지상역사에 전력저장장치 등의 추가적인 설비에 대한 설치 공간 확보가 요구됨.

다. 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템(Thermal Lining System)

○ 지하 침출수(또는 냉각 용매)를 활용하여 전동차에서 발생하는 하부 열을 흡열하는 방식으로 지하 역사에서 발생하는 침출수 확보가 중요한 요소임.

○ 흡열시스템의 효율을 극대화하기 위해 기존 지하역사의 환기시스템인 TES(선로부 배기시스템) 또는 터널환기시스템의 설치 및 운영 현황에 대한 검토가 선행되어야 함.

○ 선로부 승강장 하면에 흡열모듈을 설치하므로 건축한계 및 기존 스크린도어와 관계를 고려한 설치 공간 확보 및 차량 진입시 풍압 등으로 인한 안전성 고려.

라. 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템

○ 실내 공기질과 관련된 국내 법적 기준 및 운영기관 자체 기준 고려.

○ 외부 공기질 유입시 공기질 개선을 위한 필터 적용 검토.

○ 고효율 전동기 적용을 위한 기존 환기시스템과의 환기설비 용량, 시스템 호환성 및 경제성에 대한 검토 필요.

○ 실내 공간에 설치된 환경센서로부터 측정된 공기질을 기반으로 하여 자동으로 실시간 제어를 수행하는 시스템으로 환경센서, 상위제어기 및 전동기와 인버터 등의 종합적인 인터페이스 가능 여부 고려.

마. 도시철도 통합 에너지 운영시스템

○ 기존 전력설비를 감시 제어하는 스카다 시스템과의 연계 여부 검토.
○ 통합 에너지 운영시스템을 이용한 자체적인 에너지 절감을 위해서는 조명, 공조, 환기 등 에너지 소비 설비에 대한 모니터링과 제어권이 제공 여부 검토.
○ 전력요금 산출을 위한 요금제, 전력량 산정 범위 등 기존 운영시스템에서의 전력요금을 산출하고 있는 운영절차 검토.
○ 기본요금 산정 특성 및 수명비용을 고려한 에너지저장장치 최적 스케줄링 알고리즘 운영 가능 여부.

바. 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션

○ BIM 기반 도시철도 역사 에너지 성능평가 솔루션으로 신규 역사 설계 및 기존 노후 역사 리모델링 적용 가능한 모듈 개발.
○ 다른 일반 역사에 활용하기 위해서는 역사의 형태 및 특성에 따른 표준모델의 작성이 가능해야 하며 이를 위해 지하철 역사의 전수조사를 통해 데이터베이스를 구축하고 역사의 형태 및 특성에 따른 분류체계 구성 필요.
○ 구축된 분류체계를 바탕으로 역사를 분류한 뒤 각 분류별 표준모델을 작성 및 종합 관리 필요.

사. 역사 형태별 적용 가능기술

(1) 지하역사 대상

○ 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템(전력저장장치, PCS 및 회생컨버터)
  - 지상, 지하역사 구분보다는 변전소 유무가 중요한 요소
○ 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템(흡열모듈, 침출수 순환시스템)
○ 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템(환경센서, 상위제어기, 전동기, 인버터)
○ 도시철도 통합 에너지 운영시스템(환기, 조명 등 설비 제어)
  - 지상, 지하역사 구분 없이 동일하게 적용 가능 기술
○ 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션
  - 지상, 지하역사 구분 없이 동일하게 적용 가능 기술

(2) 지상역사 대상

○ 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템(전력저장장치, PCS 및 회생컨버터)
○ 전력저장장치 연계형 도시철도 역사용 경량 태양광 발전시스템(경량 태양광 모듈, 컨버터, 전력저장장치 및 인버터)
○ 도시철도 통합 에너지 운영시스템(환기, 조명 등 설비 제어)
○ 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션

2. 활용 사례

가. 실증 테스트베드 지속 운영

○ 에너지 절감기술 검증을 위해 테스트베드의 경우 연구과제 종료 후에도 운영기관인 서울교통공사에서 지속적으로 운영 예정, 향후 운영 및 유지보수 등을 위해 소유권 이전 등의 조치가 필요.

- 배터리 저장형 회생에너지 활용시스템 (수락산역)
- 전력저장장치 연계형 도시철도 역사용 경량 태양광 발전시스템(도봉산역)
- 도시철도 통합 에너지 운영시스템(수락산역)

나. 현장 적용 및 제안 사례

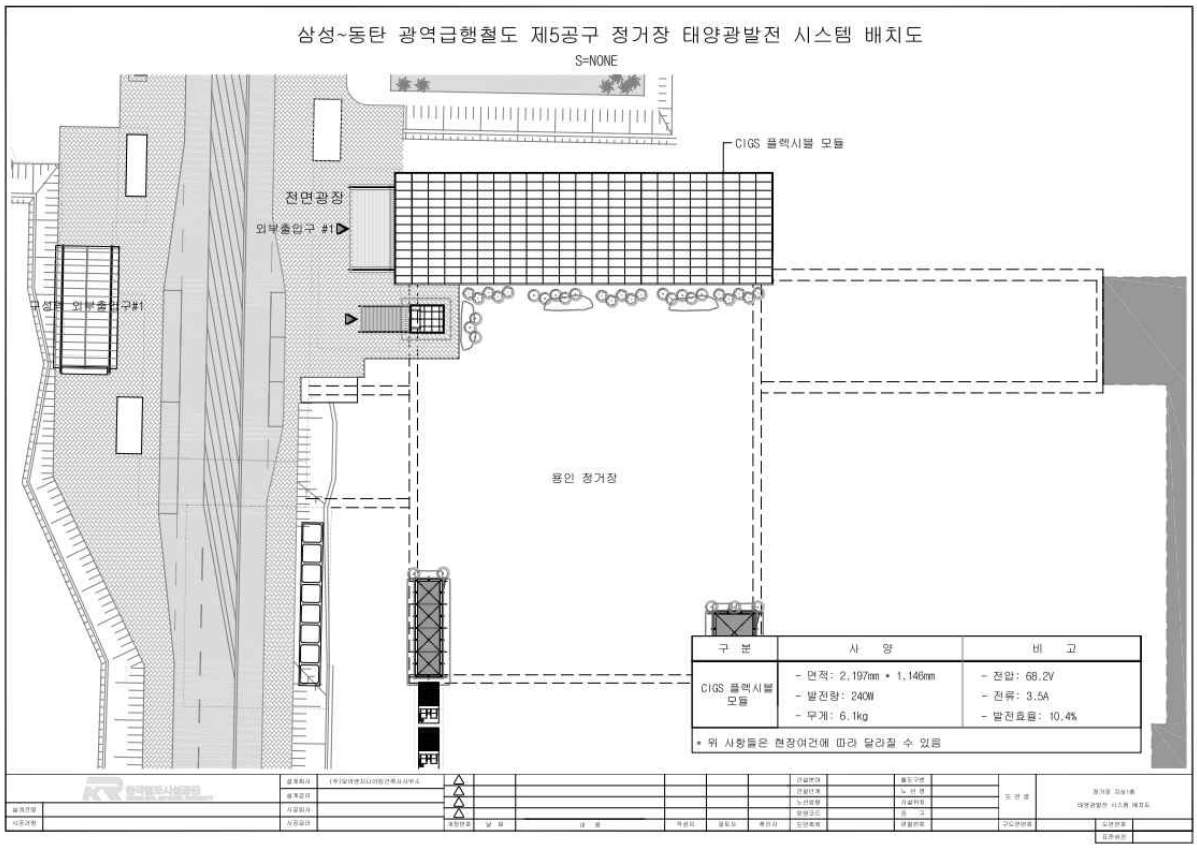
○ 한국철도시설공단 스마트역사 건설 관련 시범역사 선정 시 기술 제안.

- 대상역사 : 삼성~동탄 광역급행철도 제5공구 용인역사
- 적용기술 :

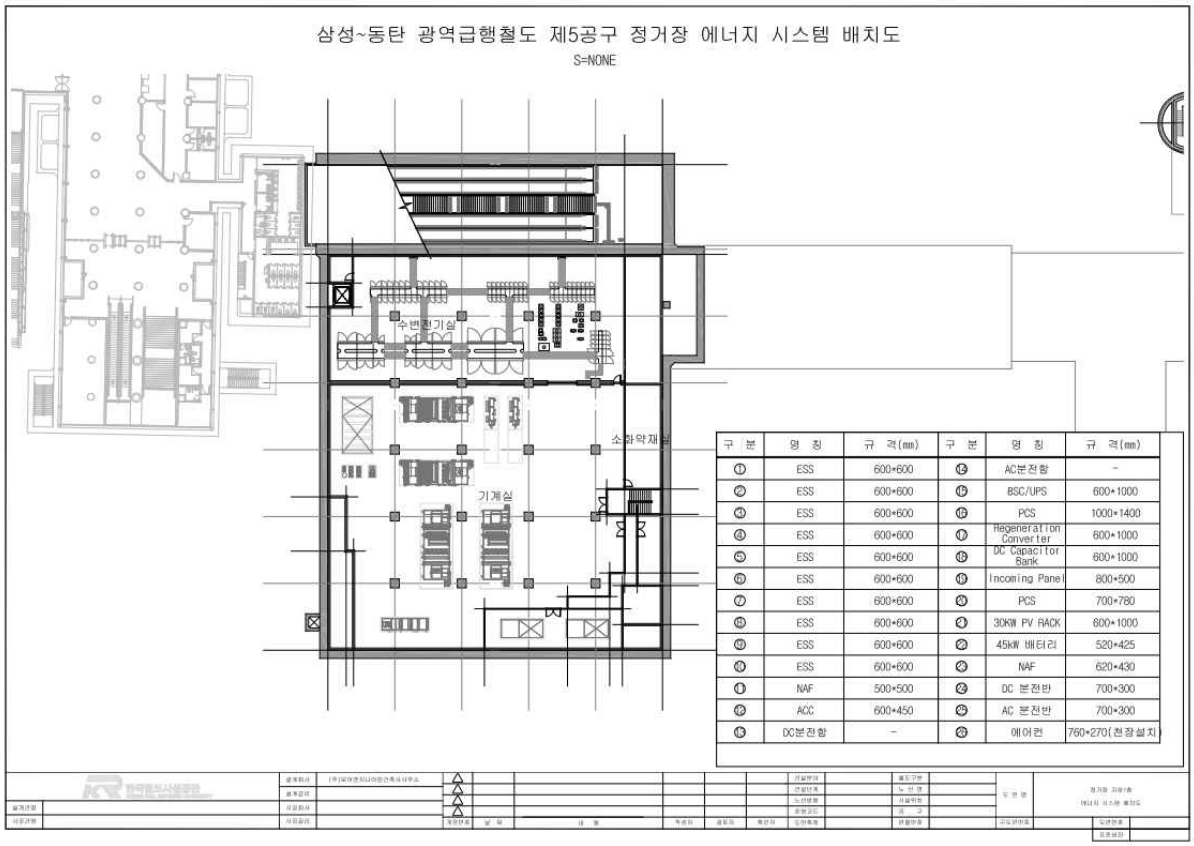
· 시범역사를 대상으로 스마트 에너지 절감을 위해 도시철도 역사 통합 에너지 운영 시스템 제안

· 시범역사에 적용하기 위한 경량 태양광 시스템 제안(PV 컨버터 30kW, CIGS 플렉시블 모듈 240W)

· 역사 비상 전원 및 피크 전력 관리를 위한 전력저장장치(45kWh), PCS 제안



<그림 5-1-1> 시범역사 CIGS 태양광모듈 설치 제안도면



<그림 5-1-2> 시범역사 스마트 전력시스템 설치 제안도면

○ 스마트그리드 보급사업에 관련 기술 적용.

- 스마트그리드 보급사업에 전력저장장치와 PCS 기술 적용

<표 5-1-1> 전력저장장치 시스템 적용 사례

순번	발주처	설치 내용 Battery용량(kWh)	설치 년도
1	한국전력공사 (8개소)	ESS : 60 ~ 180kWh PCS : 30~80 kW	2014
2	한국전력공사 (23개소)	ESS : 40 ~ 130kWh PCS : 30~80 kW	2015
3	한국전자통신연구원(1개소)	ESS : 20kWh PCS : 5kW	2017

○ 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템.

- 대심도 철도 신규 민자철도(LTX) 노선 설계 시 제안 및 설계 검토 진행 중.
  - 철도 승강장(노반) 구간
  - 장대 철도 터널 구간
  - 전력구 구간

○ 에너지 관리시스템 - 역송방지 모드 기술

- 서울 CNG 대화충전소, 강서충전소 에너지 관리시스템 구축시 역송방지 모드기술 적용

3. 활용 계획

○ 배터리 저장형 회생에너지 시스템 기술

- 기존 슈퍼커패시터방식 회생에너지 활용시스템을 대체하는 방식으로 다기능의 전력저장장치(배터리) 방식 회생에너지 활용기술로 제안.
  - 모듈화 방식이 가지는 장점을 강조하여 설치 공간적 제한조건과 시스템 이동 시 발생하는 제약 조건을 해결.
  - 회생에너지 저장, 피크전력 저감, 비상전원 활용 등 다기능 에너지 활용기술 강조.
- 지상 역사 설치 시 역사에 설치되어 있는 태양광 발전 등 다른 신재생에너지원과 연동 운전이 가능하여 지상역사 연계형 다기능 전력저장장치 활용기술로 제안.
- 스마트그리드 확산사업 등 전력저장장치 확산 사업에 제안 .
  - 타 역사 및 타 건축물 등 수용전력에 맞게 PCS 용량을 50kW~200kW까지 다양하게 구성하여 설치 가능
  - 전력저장장치의 경우 배터리 에너지 밀도가 향상되어 수락산 역사에 설치된 동일 면적에 2배 이상의 에너지 밀도가 향상되어 있어 고밀도 고에너지 효과 강조

○ 도시철도 역사용 경량 태양광발전 시스템 기술

- 철도 지상선로 방음벽, 역사 지붕(캐노피) 등 기존 철도시스템에 적용하기 위한 태양광 발전시스템으로 제안.
- 기존 건축물 벽면 등에 적용하기 위한 시스템으로 활용 .
- CIGS플렉시블 모듈의 현재 가격이 1Wp당 $2.6이나 가격이 점차 내려가고 있어 1Wp당 $1 이하로 내려가는 경우 투자회수기간 약 5년으로 줄일 수 있어 도시철도 역사 구조물 외에 다양한 건축물의 지붕, 벽면에 적용하기 위한 시스템으로 활용.
- 태양광 발전과 전력저장장치 연계를 위한 컨버터 기술의 경우 최근 확산되고 있는 아파트 소형 태양광발전 시스템을 위한 컨버터, 인버터 시스템으로 활용.

○ 도시철도 지하 선로 흡열모듈 기반 터널 냉각시스템

- 남부 내륙철도 터널구간 및 광주 2호선 저심도 철도 터널/승강장 구간 제안.
- 일반적인 지하정거장에 계획된 집수정 및 기계실을 활용할 수 있는 시스템으로 신설 및 기존정거장에 모두 적용 가능하므로 타 지하역사에 적용 제안.
  - 지하 역사 승강장의 다양한 구조적 특성을 반영할 수 있도록 2가지 형태의 TLS 모듈을 개발하여 시스템 적용에 제한이 없음.(메달기식, 벽부착식)
  - TLS 시스템은 일반적으로 승강장의 집수정 및 기계실을 활용하는 시스템으로 신설 및 기존 정거장 적용에 제한이 없음.
  - 열부하 특성에 따른 TLS 시스템의 성능 예측이 가능한 소프트웨어 개발이 완료되어 신설 및 기존 정거장의 다양한 조건에 따른 개발시스템의 적용 가능.

○ 도시철도 지하 역사 고효율 환기시스템
- 기존 도시철도 역사 환기시스템 개보수시 고효율 환기시스템 적용.
  · 기존 도시철도 환기시스템에 적합한 제어체계 및 시스템을 개발함으로써 도시철도역사 환기시스템을 최적화하여 에너지를 절감 가능.
  · 국내에서 고효율 전동기 포함한 블로워 설계기술 및 제작기술을 확보하여 기존 기술 대비 가격경쟁력 확보.
- 기존 노후 전동기 교체 시 IE4급 고효율 전동기 적용.
  · 전동기를 교체 시 구축된 제어 시스템에 알맞은 전동기를 선정 및 구매 가능하도록 하는 소프트웨어 제공.

○ 도시철도 통합 에너지 운영시스템
- 기존 도시철도 에너지 통합 관리를 위한 시스템 적용
  · 철도역사의 특수성을 감안하여 에너지 절감기술을 정형화하여 최적화하는 공통 엔진 적용.(국제 기준을 만족하는 엔진 개발)
  · 철도 역사의 설비 특성에 대해 유연하게 알고리즘을 작성하고 적용할 수 있는 OpenAPI와 스크립트 기반의 프레임워크 제공.
- 대형 건축물, 공공시설 등 대용량 건축물 에너지 관리시스템으로 적용.
- 스마트그리드 확산사업 등 전력저장장치 관리 및 운영시스템으로 적용.

○ 3차원 공간정보 기반 역사 에너지성능평가 솔루션
- 기존 도시철도 역사 리모델링 및 신규 역사 설계 시 에너지 성능평가 도구로 제안.
  · 개발 모듈을 바탕으로 타 역사 적용을 위한 역사의 형태 및 특성을 고려한 시뮬레이션 모델 작성 가능.
  · 다양한 역사에 대한 역사의 형태 및 특성에 따라 표준 모듈 개발이 가능하고 이러한 표준모델을 기반으로 다양한 역사에 확장 가능.
- 대형 건축물, 공공시설 등 대용량 건축물에 대한 에너지 성능평가 도구로 제안.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

○ IEC TC82 WG2(태양광 분야) 국제 회의 참가 : "Curtainwall in building" 진행 중인 IEC62980 Ed.1 관련 정보
○ IEC TC82 WG2(태양광 분야) 국제 회의 참가 : " IEC 62980 Ed.1(PV modules for building curtain wall application) draft 수집
○ EC WG2, ISO TC 160 : BIPV 표준화 관련 자료
○ ISO TC160 국제회의 : 건물적용 태양광 모듈 성능 및 안전성 시험법
○ 고효율 동기전동기 자료(스위스 A사 30kW급 SYNRM 및 인버터 세트)

제7장. 연구개발성과의 보안등급

해당사항 없음

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황

해당사항 없음

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

해당사항 없음

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허	건물 일체형 태양광 발전 시스템용 태양전지 블록 구조체 및 이를 구비하는 건물 일체형 태양광 발전 시스템	한국철도기술연구원	주관	대한민국	-	2015.07.02	단독	-
2	특허	철도 역사 전력 관리 장치	한국철도기술연구원	주관	대한민국	-	2016.06.30	단독	-
3	특허	철도 역사 내 전력 수요 예측 방법 및 그 장치	고려대학교	공동	대한민국	-	2016.09.28	단독	-
4	특허	인덕터 기능을 갖는 3상 변압기	피앤이솔루션	공동	대한민국	-	2017.01.25	단독	-
5	특허	회생에너지 전력변환장치	지필로스	공동	대한민국	-	2017.11.01	단독	-

제11장. 기타 사항

해당사항 없음

제12장. 참고 문헌

- 에너지 관리공단, “신재생에너지 R&D 전략 2030 - 태양광”
- Progress in Photovoltaics: Res. Appl. 2005
- M. Rogol. Solar Power, CLSA Asia-Pacific, 2004
- M. Rogol. Solar Power, CLSA Asia-Pacific, 2004
- REN21, 2007, Renewable 2005 GLOBAL STATUS REPORT
- 한국에너지기술연구원, “신재생에너지 경제성 분석”, 재정경제부 보고서, 2007.
- 김종민, 김기영, “신재생에너지 발전(태양광, 풍력, 소수력, 바이오가스)의 경제성 분석 연구”, 한국태양에너지학회 논문집, Vol.28, pp.70～77, 2008.
- 이진우, “탄소시장 도입에 관한 비판적 고찰”, 에너지 포커스, Vol.16, 2010.
- 건물통합형 태양광발전(BIPV)시스템의 최적화 기법 개발_최종보고서 (2004) 산업자원부, pp.17-50
- 신동빈, 에너지관리공단, 태양광 시스템의 유지관리
- Dorothy Remmer, Jose Rocha (2005) PHOTOVOLTAIC NOISE BARRIER CANADA, SESCI 2005 Conference British Columbia Institute of Technology Burnaby, British Columbia, Canada, pp.2-6
- A. Goetzberger (1999) THERMIE B Project: EU PVNB POT Evaluation of the potential of PV noise barrier technology for electricity production and market share"_Final report, Vol.1, 18-21
- Thomas Nordmann, Andreas Froelich, Adolf Goetzberger, Gerhard Kleiss ,Georg Hille, Christian Reise, Edo Wiemken, Vincent van Dijk, Jethro Betcke, Nicola Pearsall, Kathleen Hynes, Bruno Gaiddon, Salvatore Castello (2000) THE POTENTIAL OF PV NOISE BARRIER TECHNOLOGY IN EUROPE, Paper Presented at the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp.1-4
- IchiroAraki, MitsuhiroTatsunokuchi, HirotakaNakahara, TakashiTomita (2009) Bifacial PV system in Aichi Airport-site Demonstrative Research Plant for New Energy Power Generation, Solar Energy Materials & Solar Cells , pp.911-916
- An, H. R., Lim, J. H., and Huh, Y. K. (2013). “Development of LCC-LCA Integrated Analysis Model for Efficiency.”JOURNAL OF THE KOREA INSTITUTE OF BUILDING CONSTRUCTION, 13(6), pp. 585-593.
- ISO 14040. (2006). “Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework.” <http://goo.gl/RVGNMp> (Jan. 30, 2015)

- Jeong J. W., and No, S. T. (2008). “The Use of Demand Controlled Ventilation in Multi-Purposed Facility.” The Korean Solar Energy Society, 2008, pp. 111-116.
- Jeong, J. W., and No, S. T. (2008). “Possibility of Demand Controlled Ventilation (DCV) in Multi-Purposed Facilities under the Current Korean Ventilation Standard.” ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA, 24(3), pp. 249-256.
- KETEP (Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning). (2011). “Greenhouse gas Reduction technologies Strategy Roadmap.”
- KNHC(Korea National Housing Corporation), (1998) “(A)dtudy on the estimation of energy consumption throughout an apartment life cycle” <http://goo.gl/RMKyZw> (Jan. 30, 2015)
- LEE, G. H., and LEE, G. H. (1996). “The Estimation of Amount of Energy Consumption and Co2 Emission in Construction Activities.” Journal of the architectural institute of Korea, 12(7), pp. 197-205.
- Lee, H. S., Byun, W. S., and Kang, H. S. (2002). “Assessment for Economics of HVAC System by Life - Cycle Cost technique.” The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, 2002(2002), pp. 283-288.
- Lee, J. E., and Lee, J. J. (2012). “A Study on Characteristics of the Cooling Energy Consumption by CAV and VAV HVAC system in Office Building.” The Regional Association of Architectural Institute of KoreaThe Regional Association of Architectural Institute of Korea, 2002(1), pp. 579-580.
- Lee, J. Y., Jang K. J., and Han, H. T. (2013). “Comparison Experiment for Indoor Air Quality and Energy consuming regarding Ventilation Mode.” The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, 2013(1), pp. 352-355.
- Vapnik, V. N. (1995). The nature of statistical learning theory, Springer-Verlag, New York, USA.
- 도시철도표준화사업 최종연구보고서(2006), “도시철도 전력시스템 표준화 연구”, 국토해양부
- 도시철도표준화사업 최종연구보고서(2006), “도시철도 유지보수체계 표준화/정보화 연구”, 국토해양부
- 한국철도공사 전기기술단(2009), “전기업무자료”, 한국철도공사
- 국토해양부(2006), “국가철도망 구축계획”
- US Department of Energy, “Guidance for Electric Metering in Federal Buildings”, DOE/EE-0312, pp.1～29, 2006.
- Eastman, 2011, BIM Handbook
- http://www.ecosian.com
- http://www.ultracapacitor.co.kr
- http://www.hitachi-rail.com
- http://www.duagon.com

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발 성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

ISBN 979-11-88058-92-1