

20RTRP-  
C148755-03

보안 과제( ), 일반 과제(√) / 공개(√), 비공개( )발간등록번호(11-B552989-000425-01)

철도기술연구사업 제3차 연도 최종보고서

R&D / 20RTRP-C148755-03

개  
량  
실  
용  
화  
  
연  
구  
개  
발  
  
최  
종  
보  
고  
서  
  
I  
G  
B  
T

철  
도  
차  
량  
  
동  
력  
제  
어  
장  
치  
  
I  
G  
B  
T

# 철도차량 동력제어장치 IGBT 개량 실용화 연구개발 최종보고서

2021. 02. 26.

주관연구기관 / (주)이건산전  
공동연구기관 / 부산교통공사  
공동연구기관 / 에너지인(주)  
위탁연구기관 / 네모시스(주)

2021  
국토교통과학기술진흥원  
국토교통부

국 토 교 통 부  
국토교통과학기술진흥원

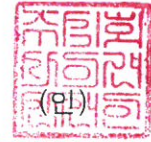
## 제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘철도차량 동력제어장치 IGBT 개량 실용화 연구개발’(연구개발 기간 : 2018. 07. 27 ~ 2021. 02. 28) 과제의 최종보고서 9부를 제출합니다.

2021. 02. 26.

주관연구기관명 : (주)이건산전 (대표자) 이용범



공동연구기관명 : 부산교통공사 (대표자) 이종국 (인)



공동연구기관명 : 에너지인(주) (대표자) 이한민



위탁연구기관명 : 네모시스(주) (대표자) 김종운



주관연구기관책임자: 임동원  
공동연구기관책임자: 이진한  
공동연구기관책임자: 이한민  
위탁연구기관책임자: 김종운

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에  
동의합니다.

### 보고서 요약서

|                   |                   |                              |                            |                            |                                                                          |
|-------------------|-------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 과제 고유 번호          | 20RTRP-C148755-03 | 해당 단계<br>연구 기간               | 2018.07.27 ~<br>2021.02.28 | 단계구분                       | 3/3                                                                      |
| 연구사업명             | 중사업명              | -                            |                            |                            |                                                                          |
|                   | 세부사업명             | 철도기술연구사업                     |                            |                            |                                                                          |
| 연구과제명             | 대과제명              | -                            |                            |                            |                                                                          |
|                   | 세부과제명             | 철도차량 동력제어장치 IGBT 개량 실용화 연구개발 |                            |                            |                                                                          |
| 연구책임자             | 임동원               | 해당단계<br>참여연구원 수              | 총: 19명<br>내부: 19명<br>외부: 명 | 해당단계<br>연구비                | 정부: 480,000천원<br>민간: 177,500천원<br>정부외: 천원<br>상대국: 천원<br>계: 657,500천원     |
|                   |                   | 총 연구기간<br>참여연구원 수            | 총: 63명<br>내부: 63명<br>외부: 명 | 총 연구비                      | 정부: 1,200,000천원<br>민간: 449,000천원<br>정부외: 천원<br>상대국: 천원<br>계: 1,649,000천원 |
| 연구기관명 및<br>소속 부서명 | (주)이건산전 / 기업부설연구소 |                              |                            | 참여기업명<br>· 부산교통공사, 에너지인(주) |                                                                          |
| 국제공동연구            | 상대국명:             |                              |                            | 상대국 연구기관명:                 |                                                                          |
| 위탁연구              | 연구기관명: 네모시스(주)    |                              |                            | 연구책임자: 김종운                 |                                                                          |

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

|                         |                                       |
|-------------------------|---------------------------------------|
| 연구개발성과의<br>보안등급 및<br>사유 | 보안등급 : 일반<br>결정사유 : 국가 실용화 산업관련 개발 연구 |
|-------------------------|---------------------------------------|

#### 9대 성과 등록·기탁번호

| 구분           | 논문                                     | 특허                                                       | 보고서<br>원문 | 연구시설<br>· 장비 | 기술요약<br>정보 | 소프트<br>웨어                                          | 화합물 | 생명자원     |          | 신품종 |    |
|--------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------|--------------|------------|----------------------------------------------------|-----|----------|----------|-----|----|
|              |                                        |                                                          |           |              |            |                                                    |     | 생명<br>정보 | 생물<br>자원 | 정보  | 실물 |
| 등록·기<br>탁 번호 | ·Volume 14,<br>Number 2, February 2020 | ·10-2019-0032631<br>·10-2020-0041249<br>·10-2020-0177827 |           |              |            | ·C-2019-033674<br>·C-2019-033675<br>·C-2019-028007 |     |          |          |     |    |

#### 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

| 구입기관 | 연구시설<br>· 장비명 | 규격<br>(모델명) | 수량 | 구입연월일 | 구입가격<br>(천원) | 구입처<br>(전화) | 비고<br>(설치장소) | NTIS<br>등록번호 |
|------|---------------|-------------|----|-------|--------------|-------------|--------------|--------------|
|      |               |             |    |       |              |             |              |              |
|      |               |             |    |       |              |             |              |              |

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

보고서 면수

## 요약문

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                 |              |             |               |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------|-------------|---------------|
| 연구의<br>목적 및 내용            | <div>□연구 목적</div> <div>○ GT0 전력소자를 IGBT로 적용 STACK을 개량하여 동력제어장치의 성능 개선</div> <div><div>- 동력제어장치의 기본/상세설계 및 시제품 제작</div><div>- 근거리통신 기반으로 동력제어장치 고장 모니터링 시제품 제작</div><div>- 공인기관 시험 및 현차 시험을 통한 성능 및 신뢰성 검증</div><div>- IGBT 개량 동력제어장치에 대한 RAMS 분석 및 가속 수명시험에 의한 신뢰성 확보</div></div> <div>□연구 내용</div> <div>○ 단종추세인 GT0를 대체하여 IGBT를 적용한 STACK 단위의 개량을 하여 차량간 호환성을 유지할 수 있도록 하며, STACK에서 고장 데이터를 검출하여 동력제어장치의 고장 모니터링을 근거리 통신으로 편리하게 확인</div> <div><div>- 부산교통공사 동력제어장치 관련 인터페이스 조사·분석</div><div>- 수요처의 상세요구사항 도출</div><div>- 동력제어장치 IGBT 인버터 스택 모듈 및 근거리 통신 하드웨어 및 소프트웨어 기본/상세설계</div><div>- 동력제어장치 IGBT 인버터 스택, 근거리 통신 소프트웨어 시제품 제작 및 성능평가(환경, 진동, 전자파)</div><div>- 부산교통공사 현차설치, 성능평가 및 보완</div><div>- 동력제어장치 IGBT 인버터 스택 모듈 RAMS 분석 및 가속 수명 검증</div></div> |                 |              |             |               |
| 연구개발성과                    | <div>○ 정량적 실적</div> <div><div>- 시제품 10개 제작</div><div>- 도면 : 2건 이상</div><div>- 지식재산권 : 특허 3건 출원, SW 3건 등록</div><div>- 논문게재 1건, 발표 5건</div><div>- 공인시험성적서 3건</div><div>- 본선 시운전 성적서 1건</div></div> <div>○ 실용화관련 실적</div> <div><div>- 2019년 부산국제철도기술산업전 참가, 2019 폴란드 국제 철도 전시회</div><div>- 부산교통공사 구매계획서 1건</div><div>- 부산교통공사 2021년 구매예산 9억 책정</div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                 |              |             |               |
| 연구개발성과의<br>활용계획<br>(기대효과) | <div>○ 사업화 방안</div> <div><div>- 수요처에서의 요구사항을 만족하는 제품을 통해 부산교통공사 구매 추진</div><div>- 현차시험 실적 등을 토대로 국내 상용화 후 해외시장 진출 가능</div><div>- 신규차량용 혹은 기존차량용 모듈 발주시 연구개발 실적을 활용하여 판로 개척</div></div> <div>○ 기대효과</div> <div><div>- 동력제어장치의 이중 차량간 편성 구성으로 호환성 향상 등을 통해 차량 운영 효율 증대</div><div>- 사용 연한이 되지 않은 차량 중 기존 성능이 감소되거나, 주요소자가 단종된 동력제어장치의 인버터 스택 대체가능</div><div>- 부품의 구성이 간소화 되어 유지보수성 및 생산성 향상을 통한 철도산업 경쟁력 향상</div><div>- 연구성과물의 철도 운영기관 확대적용을 통한 예산 절감</div><div>- 철도외 타산업계의 전력장치 시장 진출 가능</div><div>- 개발 완료 후 인도, 인도네시아, 말레이시아 GT0주변환장치 개량 적용 해외시장 진출가능</div></div>                                                                                                                                                                                          |                 |              |             |               |
| 국문핵심어<br>(5개 이내)          | 동력제어                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 혼합운용            | 비용절감         | 경량화         | 실용화           |
| 영문핵심어<br>(5개 이내)          | Power Control                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Mixed Operation | Cost Savings | Lightweight | Practical Use |

## < 목 차 >

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 1. 연구개발과제의 개요 .....         | 1  |
| 2. 연구수행내용 및 성과 .....        | 4  |
| 3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ..... | 77 |
| 4. 연구개발성과의 활용 계획 등 .....    | 93 |
| 붙임. 참고 문헌 .....             | 97 |

<별첨1> 주관연구기관의 자체평가 의견서

<부록1> 성과점검기준표 및 성과실적증빙

## 1. 연구개발과제의 개요

- 현재 부산교통공사 2호선 전동차(Alstom, 프랑스)는 20년 이상 운행중이지만 한계수명까지는 도달하지 않아 신규차량의 제작은 이루어지지 않고 있는 상황이나, 전동차 핵심 주요장치인 동력제어장치는 노후화 등에 따른 그 성능이 감소하고 있는 추세



그림 1. GTO 전력소자 & IGBT 모듈

- 전동차 핵심장치인 동력제어장치의 주요소자에 대한 고장 발생 시 동일품목의 단종으로 전동차 유지보수 및 정비에 매우 큰 애로점이 발생하고 있는 현실이며, 이로 인한 대체품 선정 시 구매 소요 시간 과중 등으로 구매비용 또한 높음. 압접(GTO, IGBT)형 소자의 부품교체 시 주변 부품을 완전해체하여야 하며, 클린룸과 압접 유압기의 특수 설비가 구비된 한정된 공간에서만 가능하여 이동손실 및 많은 교체시간이 소요된다. 특히 조립시에는 중심을 맞추는 등 기계적으로도 높은 정밀도를 요구함



그림 2. 부산교통공사 인버터 스택



그림 3. GTO STACK 정비 특수설비

- 동력제어장치 시스템 전체를 교체하기 위해서는 운영사의 예산 부족
- 부족한 예산 범위에서 최대한 효율적으로 동력제어장치의 성능을 높이기 위해서 시스템 전체가 아닌 주요 전력 부품인 인버터 스택을 개량하는 방향으로 추진

- 동력제어장치의 전력소자인 GTO를 IGBT로 변경하여 STACK 단위로 개량하는 기술 개발로 저비용 고효율의 동력제어장치에 의한 차량 운영사의 정비효율 및 원가절감 요구사항에 부합

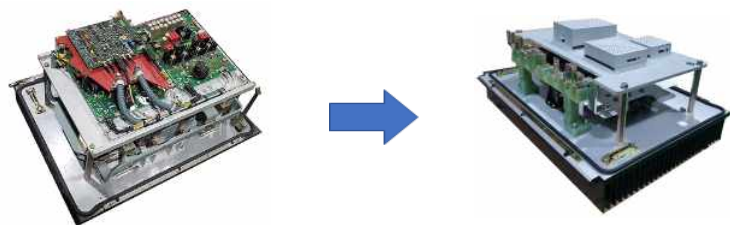
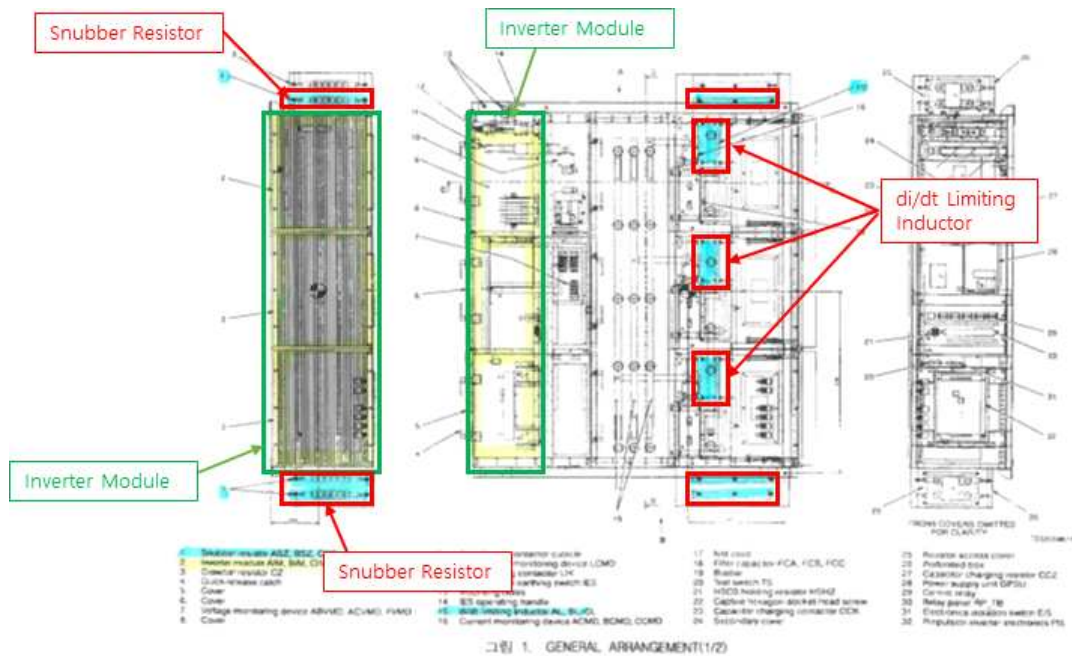


그림 4. 개량 범위

- IGBT모듈에 전압, 전류를 감지할 수 있는 센서를 설치하여 고장 정보 검출하며 이러한 고장정보를 근거리 통신을 통해 데이터를 송출하며 검수자의 소프트웨어를 통해 모니터링하여 예방점검 가능



그림 5. 근거리 통신에 의한 차량 검수

- 전동차는 여러대의 차량의 조합으로 운영되며 부족한 예산으로 인해 IGBT 차량과 기존 GT O 차량을 혼용 구성하여 운행할 수 있도록 연구개발 진행



그림 6. 전동차 혼용 구성

- 도시바, 알스톰, 미쯔비시 등 차량 종류에 상관없이 적용 가능하도록 범용 사용 가능

#### ○ 기술적 차별성

- 인버터의 STACK 부품 단위의 교체에 의한 동일 성능 발휘
- 동력제어장치 단위의 개량에 비해 제어기, 캐패시터등의 교체없이 성능을 발휘
- RAMS 및 가속 수명시험을 통한 신뢰성 확보
- 전동차의 편성구성에서 차량간 다른 타입의 스택 조합으로 차량 운행 가능

#### ○ 경제적 장점

- 차량연한이 남은노선의 전동차의 성능 유지로 인한 원활한 운영으로 차량 운영사 영업 매출 증대
- 차량 부품 단위의 구매에 의한 예산절감
- 중소기업의 차량 개조 사업참여로 매출증대 및 고용창출 효과

#### ○ 기대효과

- 동일 성능의 부품단위 개량으로 예산절감 효과
- 전동차 경량화를 통해 에너지 절감
- GTO와 IGBT(압접)소자를 단위 모듈(스택)만을 개량
- GTO와 IGBT의 혼용사용 가능기술
- 근거리 무선통신 기술로 고장시 상태정보 데이터 확보

#### ○ 실용화

- 동력제어장치의 IGBT 인버터 스택 개량을 실용화 하여 사업화로 연계, 업체의 매출 증대 및 원활한 철도 차량의 운영
- 해외시장 진출 방안
  - 전세계적으로 추진제어장치는 상당수가 GTO형으로 운영되고 있으며, GTO소자의 단종 및 가격상승에 따른 운영의 어려움으로 대만등 일부 국가에서 IGBT 모듈 단위 교체를 추진하고 있어 기대되고 있다.
  - 말레이시아 등 동남아 국가의 차량 개량사업이 추진되고 있어 추진제어장치의 개량 사업이 기대 된다.
- 국내시장
  - 국내에 여전히 GTO 차량이 상당히 있음. 공동연구기관인 부산교통공사의 부산1호선과 2호선에 공급하여 본 과제의 목표인 실용화를 이루고자 함

## 2. 연구수행내용 및 성과

### 가. 철도차량 IGBT개량 동력제어장치 시제품 설계

#### (1) 철도차량 동력제어장치 인터페이스 조사 및 검토

- 개량범위

#### ① 주회로 비교검토

| GTO STACK 인버터 회로                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | IGBT STACK 인버터 회로 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                   |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. GTO 소자 변경(T1, T2) → IGBT 소자 사용(IT1, IT2)</li> <li>2. 스너버 회로 삭제 <ul style="list-style-type: none"> <li>- D1, D2, SD1, SD2, SC1, SC2, C1, Z1, Z2, SCDZ</li> </ul> </li> <li>3. 스너버 상 저항 삭제 <ul style="list-style-type: none"> <li>- ASZ, BSZ, CSZ</li> </ul> </li> <li>4. IGBT소자용 스너버 캐패시터 사용(SC)</li> </ol> |                   |

#### ② 구조적 범위

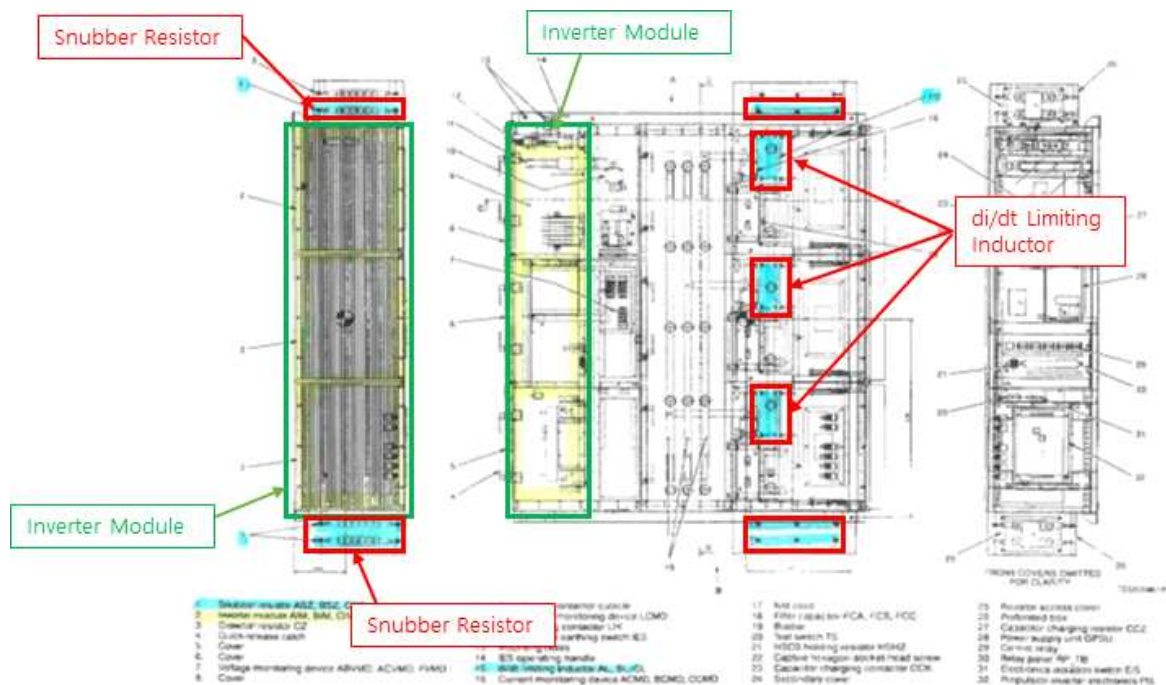
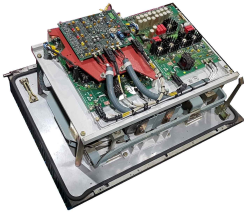
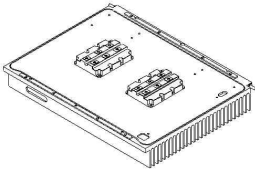


그림 1. GENERAL ARRANGEMENT(1/2)

그림 7. 부산 2호선 동력제어장치 BOX

### ③ 부품 개량 범위

| NO | 부품명              | 개량전                                                                                 | 개량후                                                                                | 수량  | 비 고 |
|----|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|
| 1  | Inverter Unit    |    |  | 3EA |     |
| 2  | 전원공급장치           |    |  | 3EA |     |
| 3  | Gate Drive       |   |  | 6EA |     |
| 4  | Reactor          |  | 사용안함                                                                               | 3EA |     |
| 5  | Snubber Resistor |  | 사용안함                                                                               | 3EA |     |

### ④ 신호/전원 인터페이스 검토

그림2는 STACK으로 입력되는 신호와 전원의 인터페이스를 나타낸 블록도이다.

제어기로부터 스위칭 신호를 스택의 인터페이스 보드에서 입력 받아 시간 추종 회로를 거쳐 GDU를 기동, IGBT를 통전하도록 한다.

기존 전원공급장치를 통해 입력되는 AC전원을 DC로 변환하여 인터페이스 보드, GDU, 근거리 통신 장치, CT에 전원을 공급하도록 한다.

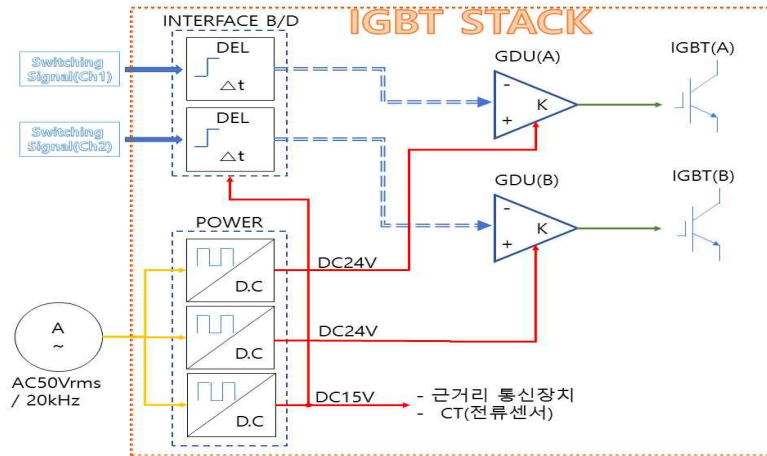


그림 8. 전원 및 스위칭 신호 인터페이스 블록도

⑤ GTO 스택 차량의 파형 측정 및 분석

|       |                 |         |     |
|-------|-----------------|---------|-----|
| 측 정 일 | 2018년 10월 17일   | 대 상 차 량 | 2호선 |
| 장 소   | 부산교통공사 호포차량 사업소 | 비 고     |     |

■ 측정 목적

다음의 회로에서 극전압, 게이트 신호, 상출력 전류를 측정하여 GTO소자를 사용시 게이트 신호의 ON/OFF타입에 비해서 얼마나 Time delay가 발생하는지를 확인한다.

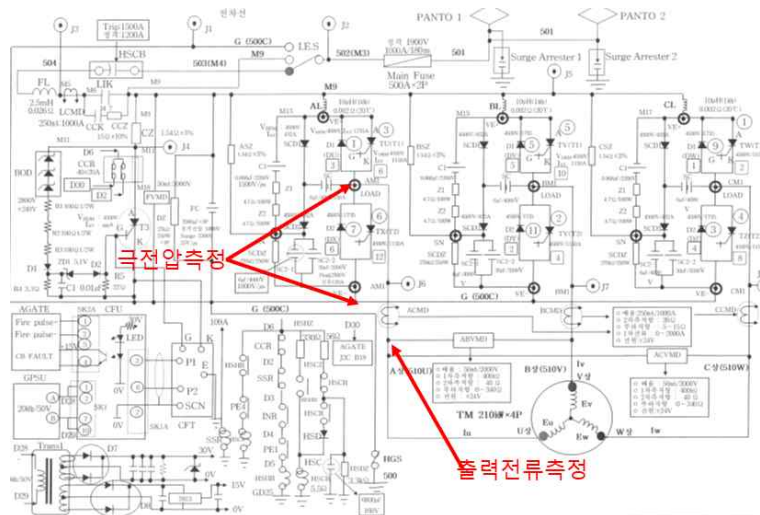


그림 9. GTO 인버터 극전압 측정

■ 측정 방법 및 측정 장비

① 측정 방법

- 극전압(CMW-G간)에 고전압 프로브를 설치하여 GTO소자를 통한 전압 파형 측정
- 게이트 신호(G-K간)에 고전압 프로브를 설치하여 Switching신호를 측정
- 상출력 전류선에 메터를 설치하여 전류 측정

- 위의 극전압, 게이트 신호, 상출력 전류의 측정을 위한 계측기를 오실로스코프에 연결한다.
- 구내시운전을 통해 동력제어장치의 파형을 측정한다.

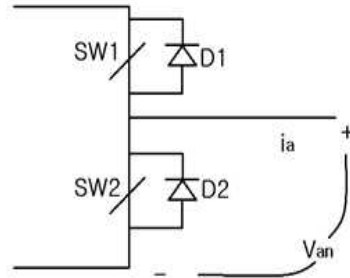


그림 10. 측정 부분 간략 회로

#### ㉞ 측정 장비

| No | 장비명       | 외형                                                                                  | 사용목적                            |
|----|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 1  | 오실로스코프    |   | 파형기록                            |
| 2  | 고압 절연 프로브 |  | 고전압 측정<br>- 극전압<br>- 게이트 스위칭 신호 |
| 3  | 클램프 메터    |  | 상전류 측정                          |

#### ■ 측정 데이터 분석

##### ㉠ Time delay 확인

아래의 파형을 보게 되면 게이트 신호가 off 되고 나서 극전압이 off되는 시간의 차이는 24usec가 발생하게 된다.

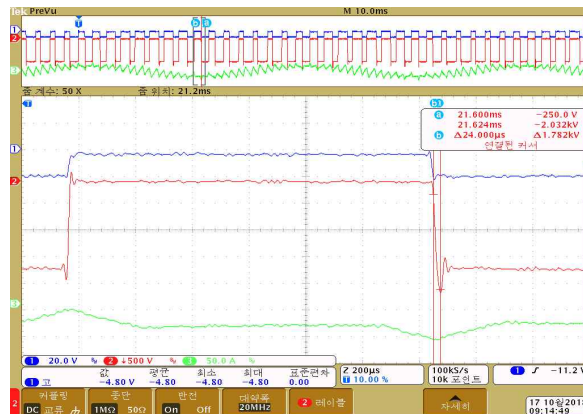
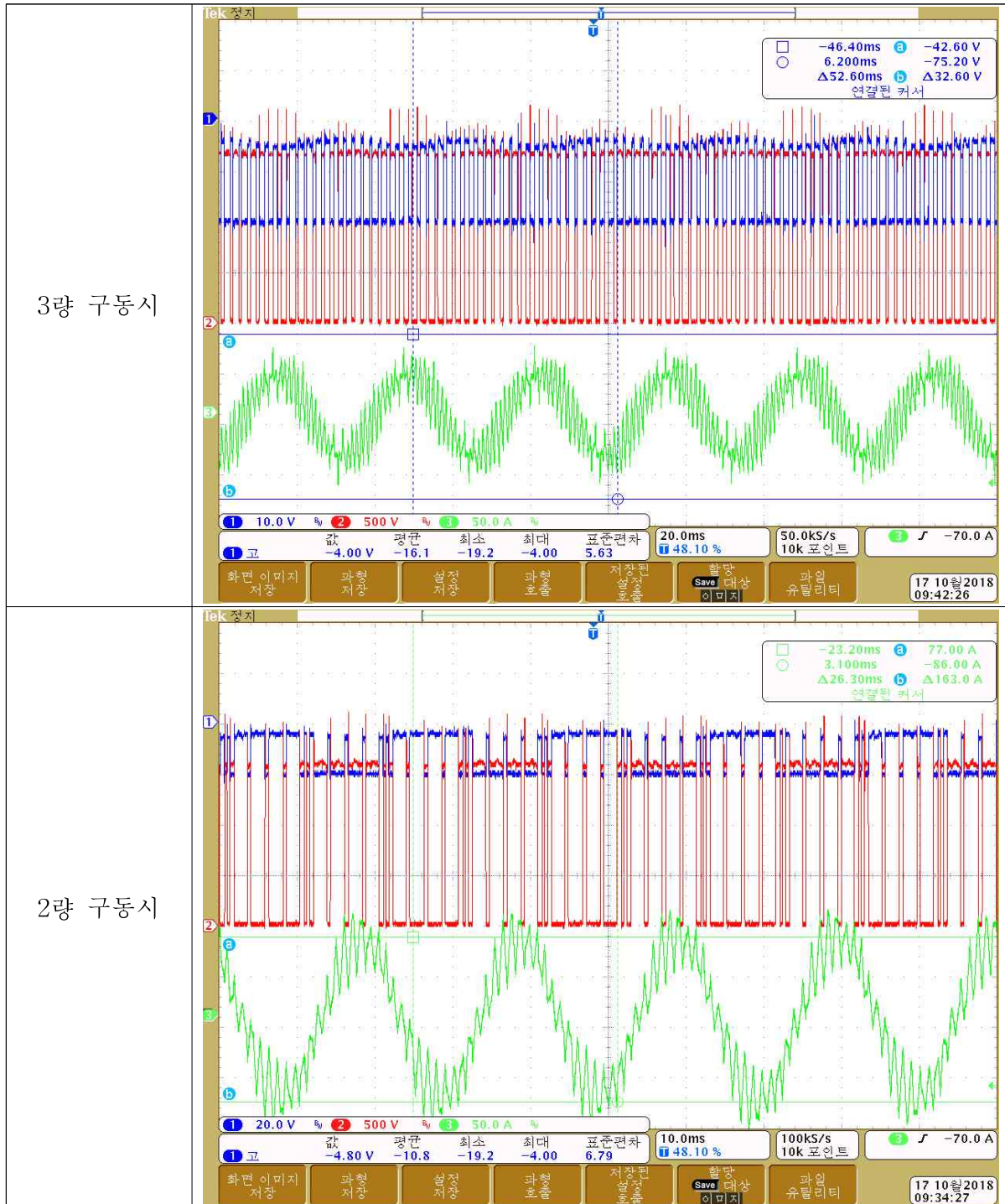


그림 11. Time delay 측정파형

여기서 CH1 : 게이트 신호  
 CH2 : 극 전압(Van)  
 CH3 : 출력 전류 파형

⑥ 모터가 3량 구동과 2량 구동시 모터 전류의 차이  
 파형을 보게 되면 3량을 구동할 때에 비해 2량 구동시 전류치(녹색파형)가 높아지게 되는 것을 확인할 수 있다.



(2) 시제품 설계

① IGBT 전력소자 열손실량 계산

- IGBT 도통손실+스위칭 손실
- FWD 도통손실+스위칭 손실
- INVERTER IGBT 열 손실(1EA)

| No | 항 목                      | 열 손실 값(W)     | 비고 |
|----|--------------------------|---------------|----|
| 1  | IGBT 도통 손실( $P_{COND}$ ) | 267.02        |    |
| 2  | IGBT 스위칭 손실( $P_{SW}$ )  | 139.9         |    |
| 3  | FWD 동통 손실( $P_{COND}$ )  | 84.97         |    |
| 4  | FWD 스위칭 손실( $P_{SW}$ )   | 85.3          |    |
| 6  | 합계                       | <b>577.19</b> |    |

- INVERTET STACK 총열손실= $577.19W \times 2 = 1154.38W$ (IGBT 2EA)

② 히트싱크 온도상승 시험

- 발열체 및 온도측정 센서 설치

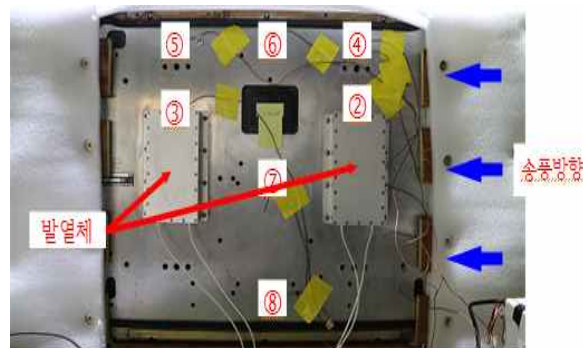


그림 12. 발열체 및 온도 센서 부착 위치

- 발열체 전력 : **1169W**



그림 13. 입력전력(파워미터)

- 열화상 카메라 측정



그림 14. 열화상 카메라 촬영

- 레코더 온도 측정

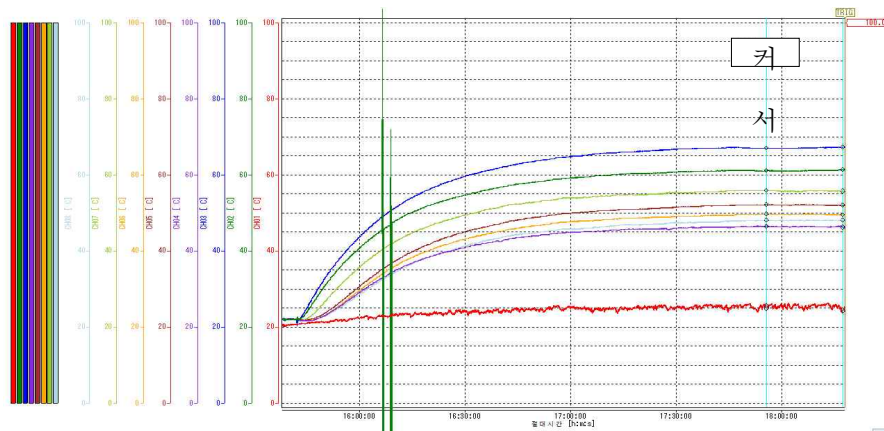


그림 15. 온도상승 그래프

|    |                                                                                                                                                                                         |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 결론 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- IGBT 열손실 계산에 의해 1154.38W의 열을 발생</li> <li>- 3m/s<sup>2</sup> 의 자연풍 송풍</li> <li>- 주위온도 24.5℃와 히트싱크의 온도 측정에서 최고 67.4℃로 약 42.9℃의 차이를 보임</li> </ul> |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

③ 주회로 설계

- GTO 주회로에서 IGBT적용 주회로 설계



#### ④ STACK 설계

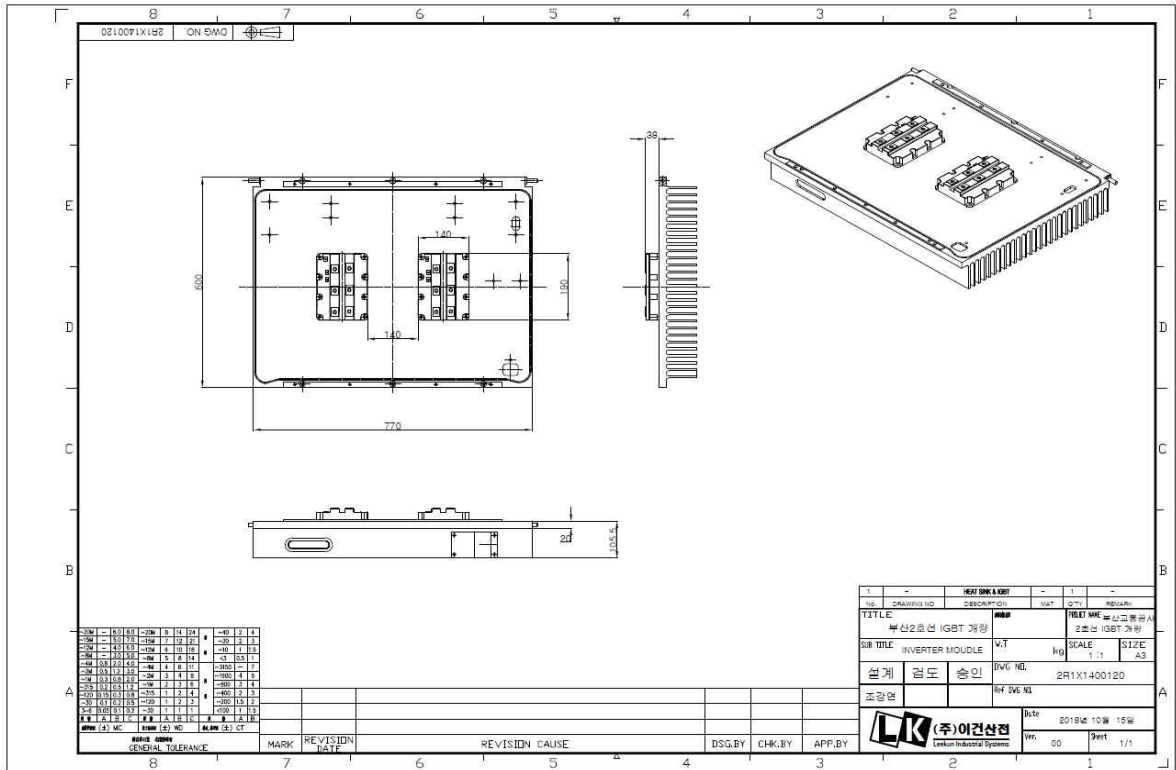


그림 18. IGBT 전력소자 STACK

## 나. 정보 모니터링 근거리 통신 장치 설계

### (1) 최적의 근거리 통신 방식 선정

| Technology            | Wi-SUN                                                        | Wi-Fi                                                                    | Zigbee                                                     | BLE                                          | LoRa WAN                                                          |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Alliances / Standards | Wi-SUN Alliance<br>IEEE 802.15.4g                             | WiFi Alliance<br>IEEE 802.11 (a/b/g/n/ac)                                | ZigBee Alliance<br>IEEE 802.15.4                           | Bluetooth SIG<br>IEEE 802.15.1               | LoRa Alliance                                                     |
| Freq. Bands           | Regional Sub-GHz and Global 2.4GHz                            | Global bands : 2.4G , 5.8GHz                                             | Regional sub-GHz and global 2.4 GHz bands                  | Global bands : 2.4GHz                        | Regional sub-GHz bands                                            |
| Modulation            | MR-FSK/<br>MR-OFDM/<br>MR-O-QPSK                              | CCK, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM                                 | DSSS based BPSK, O-QPSK                                    | FHSS based GFSK                              | FSK                                                               |
| Data Rate             | 50K ~1M bps                                                   | b: 11M bps<br>a/g/h/j : 54M bps<br>n : 600M bps<br>ac : 86.7M ~ 6.9 Gbps | 20 kbps, 40 kbps, 250 kbps                                 | 1Mbps                                        | 0.3K ~ 50K bps                                                    |
| Coverage              | ~1Km                                                          | ~ 200m                                                                   | ~ 100m                                                     | ~ 50m                                        | 5Km ~                                                             |
| Power                 | Low                                                           | High                                                                     | Low                                                        | Low                                          | Low                                                               |
| Topology              | Star, P2P, Mesh                                               | Star                                                                     | Mesh                                                       | Scatternet                                   | Star                                                              |
| Advantages            | Long range, Low power, High data rates                        | Mature technology, High data rates                                       | Low power, Long range than BLE                             | Mature technology, Low power                 | Long range, Low power                                             |
| Limitation            | Not yet adopted widely                                        | Short Range, High Power Consumption                                      | Not widely adopted than BLE                                | Small Data Packets                           | Not Standard, Low data rates                                      |
| Applications          | Smart metering, Smart Home, Smart City, Industrial automation | Home Automation, Smart Metering                                          | Health and Wellness monitoring, Client activity monitoring | Healthcare / Fitness devices, Smart Metering | Smart Metering, Smart street lighting solutions, Asset monitoring |

### (2) 고장정보 메모리 용량 선정

#### ① 근거리 통신장치 데이터 기록

- 측정 항목 : 동작 전압, 전류
- 저장 주기 : 1초에 2회
- 1회 저장 용량 : 200 Byte
- 일일 운행 시간 : 18h

#### ② 저장 용량 계산

$$200 \text{ Byte} \times 2 \text{ 회} \times 60 \text{ 초} \times 60 \text{ 분} \times 18 \text{ Hour} \times 7 \text{ 일} = 181,440,000 \text{ Byte}$$

$$= \text{약 } 182 \text{ MByte}$$

여기에 여유율 200% 적용시 약 **364 MByte** 필요

## (2) 근거리 통신 모니터링 장치 설계

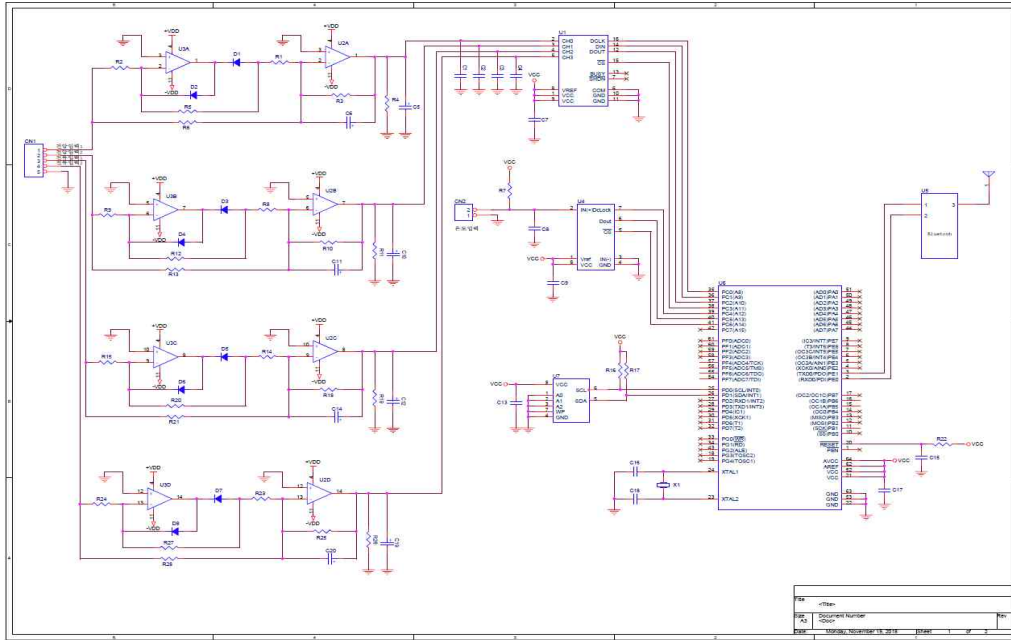
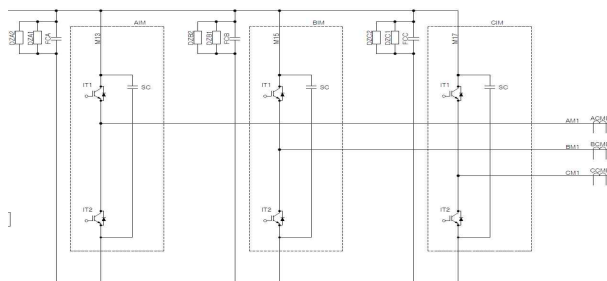
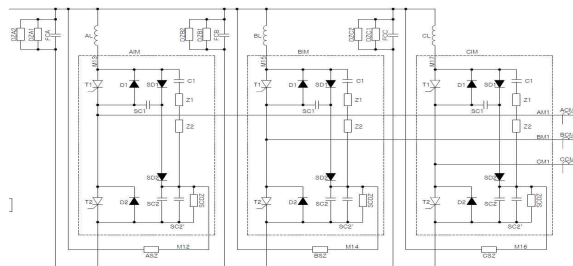


그림 19. 근거리 통신장치 회로

## 다. 철도차량 IGBT개량 동력제어장치 운영방안 조사 및 인터페이스 검토

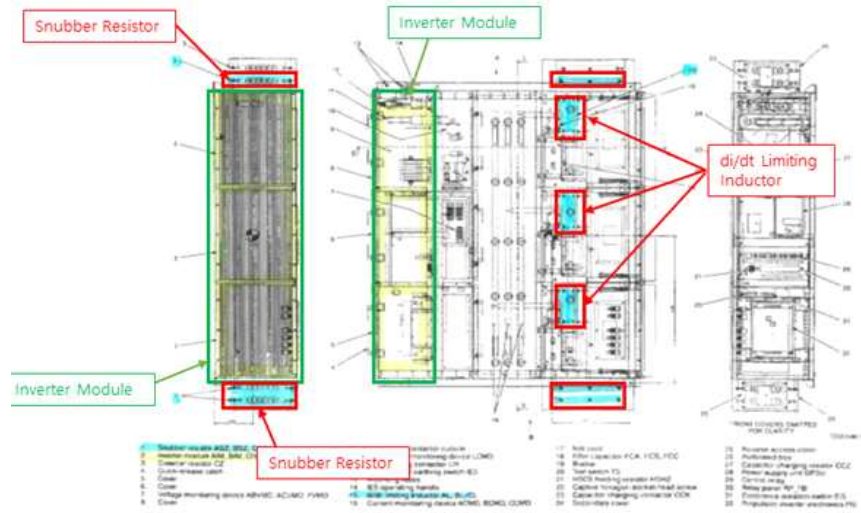
### (1) 운영방안 조사분석 및 인터페이스 연구

#### ① 주회로부 변경 요구



## ② 개량 시 문제 발생 부품 제거

⇒ IGBT 개량 시 소자 특성상 발진이 발생되는 **Snubber Resistor**과 **di/dt limiting Inductor** 부품은 개발 시 배제



## 다. 철도차량 IGBT개량 동력제어장치 시제품 제작

### (1) 주요 제작 부품

#### ■ 히트싱크

- 전력소자가 동작하면서 발생하는 열을 냉각 시키는 기능을 한다. 차량이 움직이면서 발생하는 공기 흐름으로 내부의 열을 외부로 발산한다.
- 열손실량 = 1154.38W(IGBT 2EA)

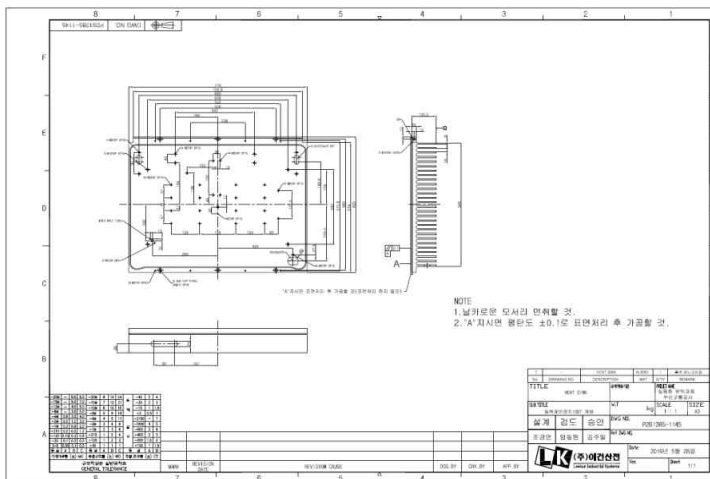


그림 20. 히트싱크

#### ■ 라미네이트 부스바

- IGBT의 C-E간을 연결하여 회로구성
- 절연내전압 = AC5,400V, 60Hz, 1분간

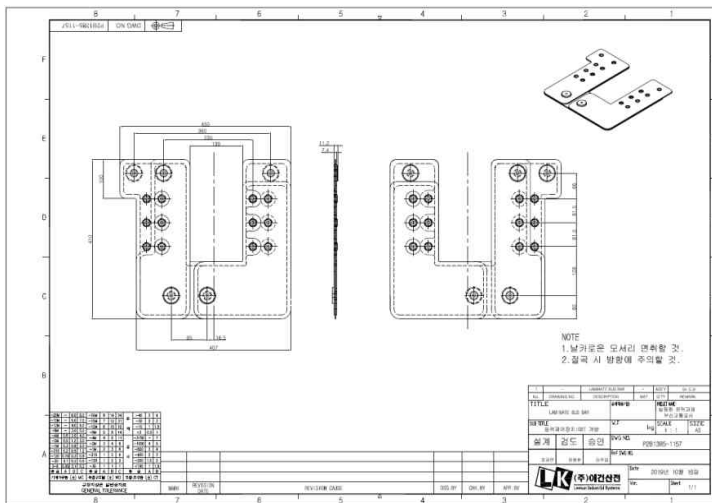


그림 21. 라미네이트 부스바

#### ■ 전원공급기

- Stack의 GDU, BLE 데이터 수집장치, 인터페이스보드, PT, CT의 전원공급
- Input : AC 50Vrms, 구형파, 20kHz
- Output : 24V/50W,  $\pm 15V/30W$

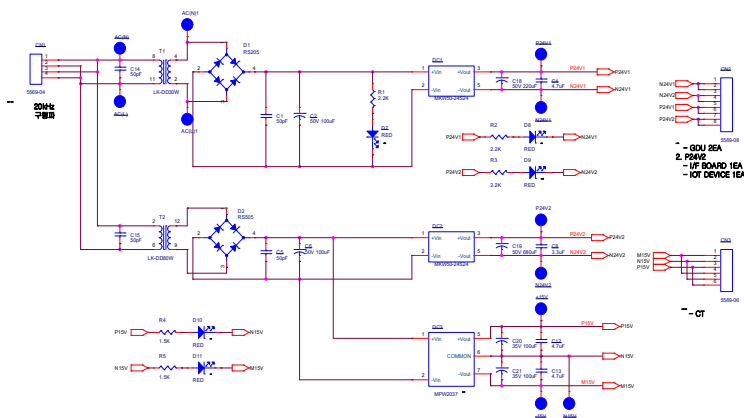


그림 22. 전원공급기

## ■ 인터페이스 보드

- 제어기의 스위칭 신호를 IGBT에 맞도록 스위칭 타임을 조정하여 GDU로 신호를 전송, IGBT 구동

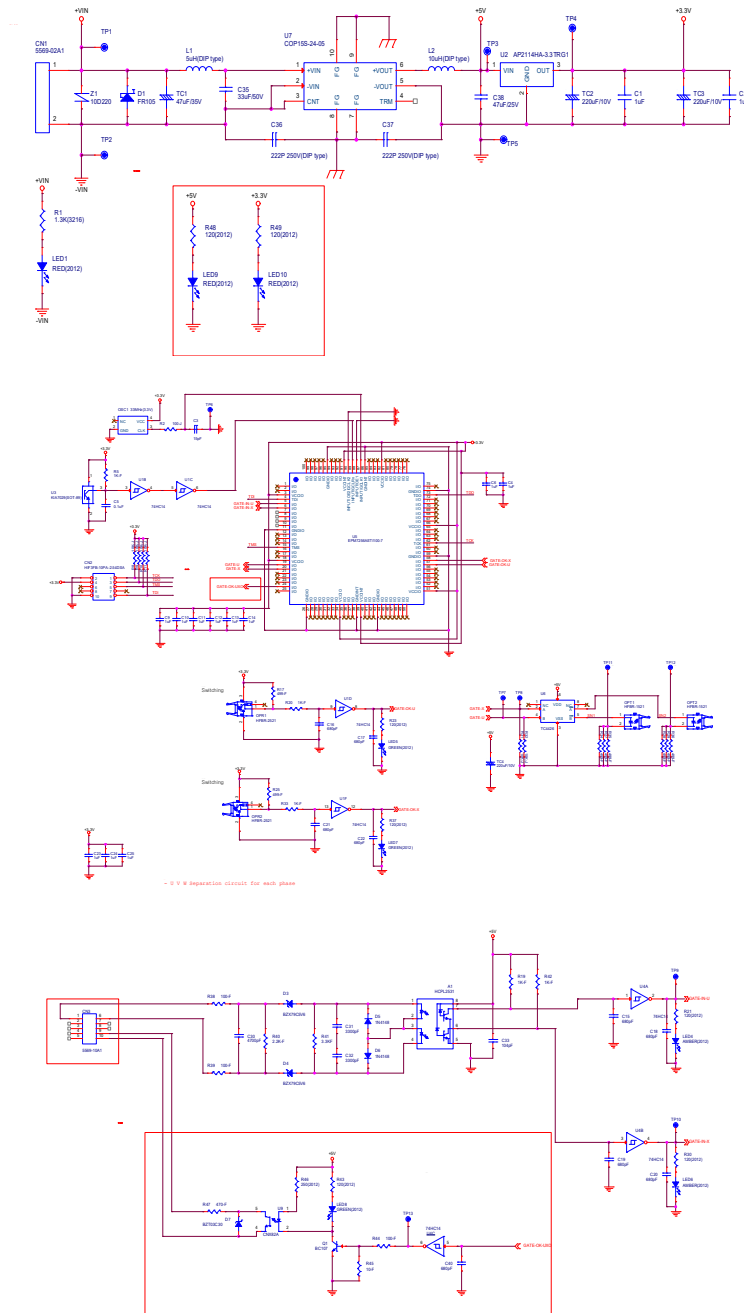


그림 23. 인터페이스 보드

■ BLE 데이터 수집 장치

- ① Stack의 출력전압, 전류, 온도센서의 아날로그 신호를 입력받아 저장하며 근거리 통신(블루투스)을 통해 검수자에게 앱을 통해 데이터 전송

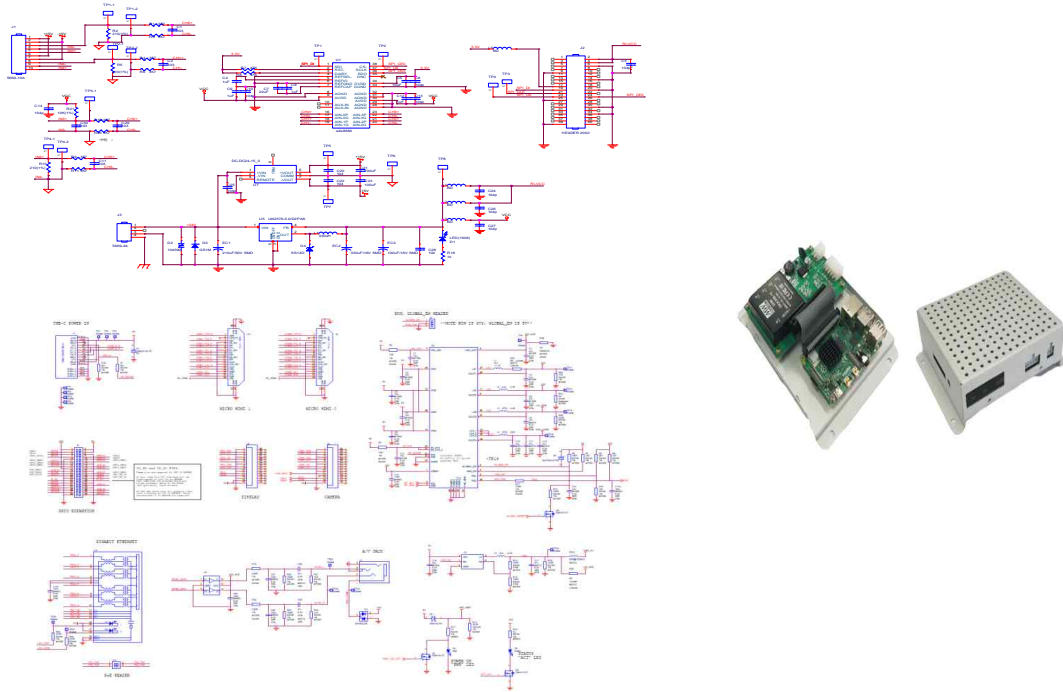


그림 24. BLE 데이터 수집장치

- ② 근거리통신 기반 고장 모니터링 장치 데이터 수집 프로그램

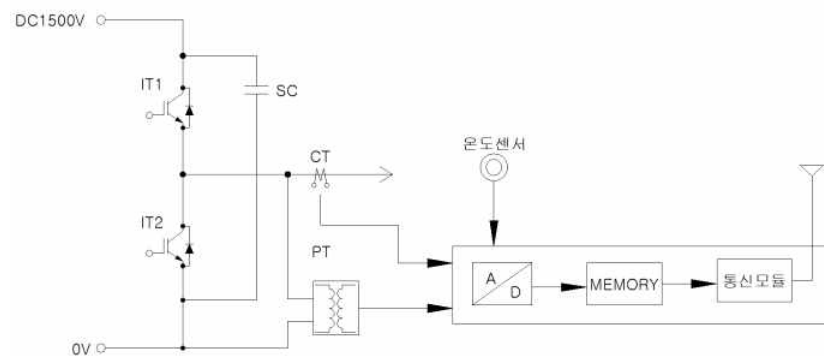


그림 25

그림 25. BLE 데이터 수집장치 블록도

- 부산교통공사 2호선의 BLE 데이터 수집장치의 블록도이다. IGBT의 전압과 전류를 검지기에서 측정한 아날로그 신호를 받아 디지털 신호로 변환하여 저장한다. 또한 온도센서의 아날로그 신호를 변환하여 저장한다.

- 저장된 데이터는 검수고에서 검수자의 근거리 통신(BLUETOOTH)를 통해 단말기에 저장된다.

| 순번 | 항목       | 사양                                                                           |           | 비고 |
|----|----------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|----|
| 1  | 입력전압     | 24VDC                                                                        | 내부 전원     |    |
|    |          | ±15VDC                                                                       | PT, CT 전원 |    |
| 2  | A/D 채널   | 3CH(PT, CT, 온도 아날로그 신호)                                                      |           |    |
| 3  | 통신 방식    | BLUETOOTH                                                                    |           |    |
| 4  | 샘플링      | 20 $\mu$ s                                                                   |           |    |
| 5  | 전압 측정 계산 | - 측정값 / 20.5(고정값) = 전압 (V)<br>ex) 410 / 20.5 = 20 V<br>24,840/20.5 = 1,211 V |           |    |
| 6  | 전류 측정 계산 | - 측정값 / 46.5 = 전류(A)<br>ex) 110 / 8.2 = 13.4 A<br>24600 / 8.2 = 3000 A       |           |    |

표 3 BLU 데이터 수집장치 사양

- 단말기 앱(안드로이드 버전만 가능)
  - 블루투스(Bluetooth) 장비 등록/해제



그림 26. 블루투스 장비 등록 및 해제

- 블루투스 장비 등록  
 블루투스 설정을 누르고 있으면 블루투스 설정 화면으로 이동  
 “연결 가능한 디바이스” 목록에서 sdl-rpi-[숫자]를 선택하여 등록

- 블루투스 장비 해제

블루투스 설정을 누르고 있으면 블루투스 설정 화면으로 이동

“등록된 디바이스” 목록에서 해제할 디바이스 선택하고 “등록된 디바이스” 화면에서 “등록 해제”를 선택

■ 메인화면

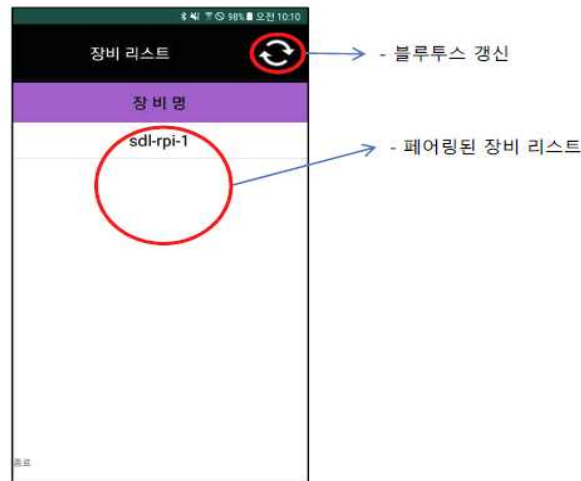


그림 27. 앱 메인 화면

- 블루투스 장비를 등록하면 등록된 장비 리스트가 나옴

- 장비 리스트에서 **장비를 선택하여 연결**

- 장비와 앱은 1:1 연결

- 장비에 연결 실패시 다음 항목을 확인

라즈베리파이 부팅 상태 또는 재부팅(부팅시 1~2분 소요), 블루투스 등록 해제 후 재등록, 안테나 연결 상태 확인

■ 채널 리스트

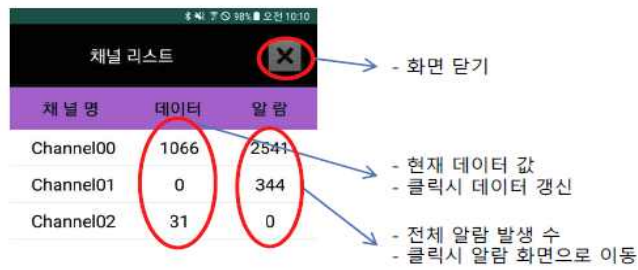


그림 28. 채널 리스트 화면

- 채널 0~1 : 아날로그 값 (전압/전류)
- 채널 2 : 온도 데이터

#### ■ 알람 리스트

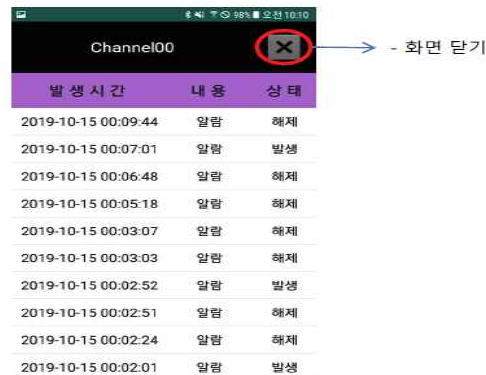


그림 29. 알람 리스트

- 알람 데이터 확인

채널 0 ~ 1의 경우 알람 확인이 가능

알람 시간이 맞지 않는 경우에는 라즈베리파이 내부에 시간을 변경하거나 자동 변경을 위해서 네트워크를 설정. 와이파이를 최초 한번 접속하면 암호가 저장되어, 이 후에 재부팅하면 자동접속

알람 기준값 보다 크면 “발생“이며, 발생상태가 해제되면 “해제“상태가 됨

알람은 채널별로 초 기준으로 저장되며 해당 초에 발생한 최초 이벤트를 제외하고 모두 무시됨

#### ■ 알람 기준값 설정

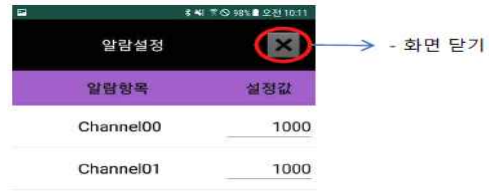


그림 30. 알람 기준값 설정

- 알람 데이터 확인

알람 기준값 보다 크면 “발생“이며, 발생상태가 해제되면 “해제“상태가 됨.

(2) 조립체

| 순번 | 품 목                   | 사 양                                            | 수 량 | 비 고 |
|----|-----------------------|------------------------------------------------|-----|-----|
| 1  | IGBT                  | 3300V, 1500A                                   | 2   |     |
| 2  | Gate Drive Unit (GDU) | DC24V, Optic switching signal                  | 2   |     |
| 3  | Cooling Unit          | Heat-sink                                      | 1   |     |
| 4  | 라미네이트 부스바             | C1100, 적층 절연구조                                 | 1   |     |
| 5  | 스너버 콘덴서               | 6uF, 4,000VDC                                  | 1   |     |
| 6  | 온도 센서                 | -55℃ ~ +125℃                                   | 1   |     |
| 7  | PT                    | 3000V, ±15V<br>ratio=3000V:50mA                | 1   |     |
| 8  | CT                    | 2000A, ±15V<br>ratio=1:5000                    | 1   |     |
| 9  | 전원공급기                 | AC50V, 구형파, 20kHz / 24V, 2.1A<br>2ch, ±15V, 1A | 1   |     |
| 10 | BLE 데이터 수집장치          | 블루투스 통신<br>3ch A/D                             | 1   |     |
| 11 | 인터페이스 보드              | Switching signal time delay                    | 1   |     |
| 12 | 인터페이스 커넥터             | SMS12P1                                        | 1   |     |
| 13 | 절연 Plate              | BMC 마블                                         | 1   |     |
| 14 | 단자대                   | EL-GEM                                         | 1   |     |
| 15 | Bracket               | SPCC                                           | 1   |     |

표 1 IGBT형 인버터 스택 부품 목록



그림 31. IGBT형 인버터 스택

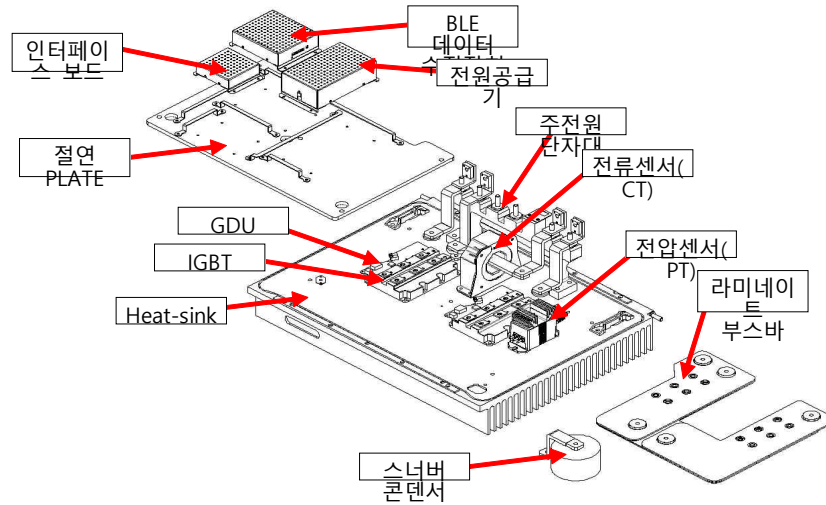


그림 32. IGBT형 인버터 스택 조립

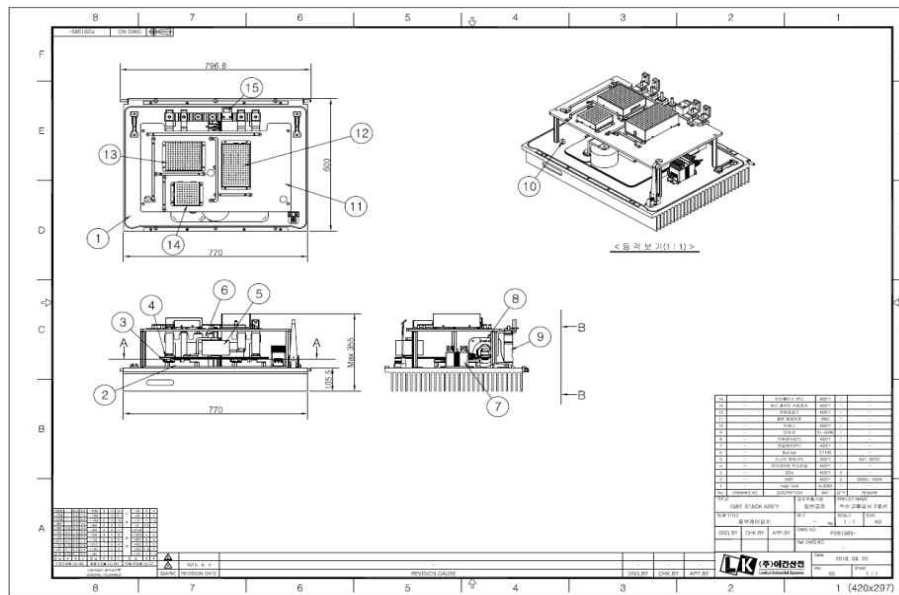


그림 33. IGBT형 인버터 스택 도면



그림 34. 시제품 제작

## 라. 수정사항 검토 및 반영

### (1) 부스바 교체

- 전력 연결을 위한 연결이 부스바로 되어 있는데 이 연결을 부스바가 아닌 라미네이트 부스 패널을 이용하여 연결하여 적용하여 도전율을 향상하고 유도장애, 정전기등을 저감하도록 한다.

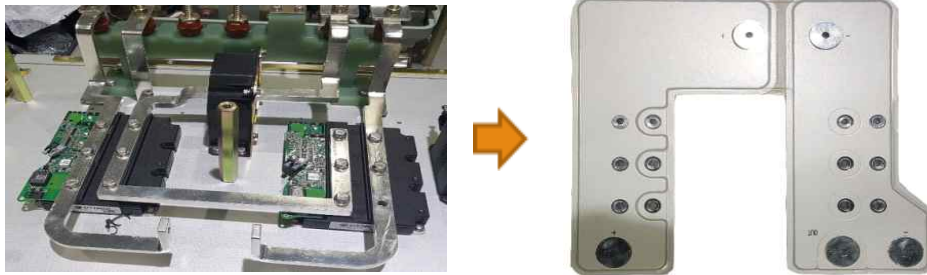


그림 35. 부스바 수정사항

### (2) 보드 케이스 적용

- PCB로 제작된 전원공급기, 인터페이스 보드, BLE 데이터 수집 장치를 보호하기 위해 케이스를 적용한다.

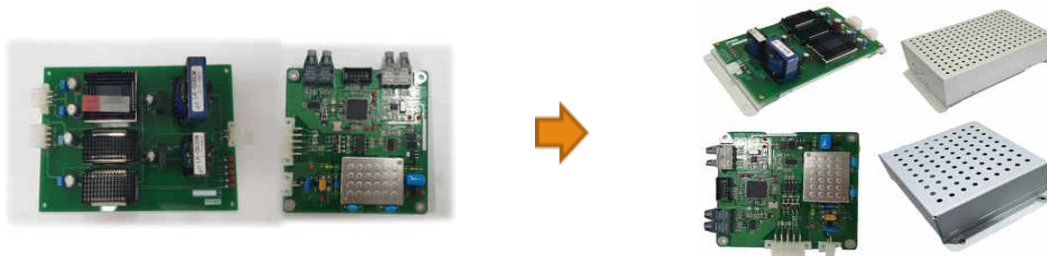


그림 36. PCB 보드 수정사항

### (3) 히트싱크 후처리 색상 변경

- 시작품 히트싱크의 후처리가 백색 아르마이트 처리로 되어 있어 차량에 적용시 전체적으로 색상이 두드러지며 IGBT 전력소자가 부착하는 면에도 후처리 되어 접지 성능이 현저히 떨어진다. 이에 색상은 흑색으로 아르마이트 처리 후 상면을 가공하는 방식으로 하여 접지 성능을 높이도록 한다.

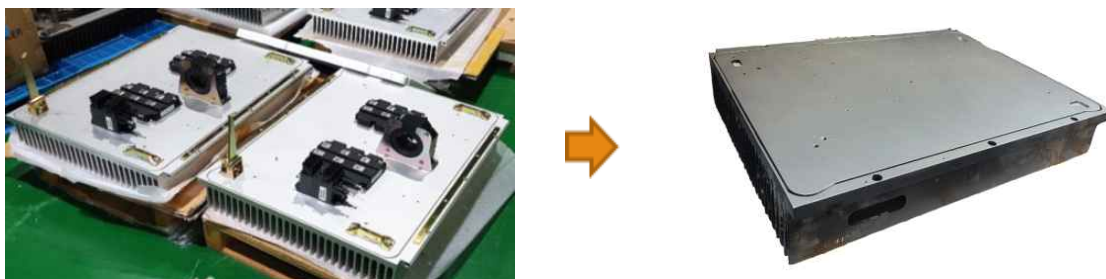


그림 37. 히트싱크 수정사항

## 마. IGBT형 인버터 스택 시험

• 로테코 검사 계약서(철도차량 시험인증 기관 입회)

**검사 계약서**

계약번호 : ISC2019-020

국토교통과학기술진흥원(주) 철도차량 동력제어장치 IGBT 개환 실험장 연구개발  
을 (주)이건산전 대표이사 이 용 발  
(사)한국철도차량엔지니어링 이사장 권준근을 "물"이라 하며 다음과 같이 계약을 체결한다.

----- 다                      을 -----

**제 1 조 [검사 대상]**  
□ 검사대상 : 철도차량 동력제어장치 IGBT 개환 실험장 연구개발 검사용역

**제 2 조 [검사료]**  
□ 발령금액(세금포함)(₩5,600,000) 부가세 별도

**제 3 조 [검사의 범위]**  
1) "갑"이 제시한 검토필문 사항 명세서 및 도면에 의하여 형식 및 전수시험, 현장시험(시운전)에 한함.  
2) 검사가 검사를 수행함에 있어 "갑"의 검사물의 제작공정 확보 및 조립작업 등에 불리한 점이 없도록 하여야 한다.

**제 4 조 [검사에 있어서의 상호 의무]**  
1) "을"의 검사업무상 필요한 제비용은 "물"의 부담으로 한다.  
다만, 해외검사가 필요할시에는 제 2 조의 검사료를 제외하고 국외출장경비에 대한 일체의 경비(물)의 규정에 의거 "갑"이 별도 부담하여야 한다.  
2) 소재의 시험 등에 소요되는 제비용은 "갑"의 부담으로 한다.  
3) 중시중소에서는 "물"의 신청, 물리적 손상이 발생할 경우에는 그것이 "갑"의 고의 또는 과실로 인한 경우가 아니면 "갑"은 그 손실에 대하여 책임을 부담하지 않는다.  
4) 본 계약에 대한 "을"의 업무수행 시간외에 "갑"의 계획 등의 변경으로 야기되거나 휴일에 검사가 필요한 경우 이에 따른 비용을 "을"은 "갑"에게 청구할 수 있다.  
5) "물"이 모든 검사업무에 합치 확인하여 합격 보고한 사항이라 하더라도 "갑"은 제작상의 책임을 면할 수 없다.

**제 5 조 [검사기간 및 장소]**  
1) 본 계약의 물품검사기간은 2020년 12월 30일까지로 한다.  
2) 물품의 검사장소는 "갑"이 지정한 장소로 하며 "갑"은 "을"의 검사업무 수행을 위하여 현장에 사무실 등의 검사업무에 필요한 시설을 제공하여야 한다.

**제 6 조 [증명서 및 성적서 발급]**  
"을"은 검사를 마친후 증명서 4부 및 성적서 3부를 작성하여 일단 서일 내에 발급하기로 한다.

**제 7 조 [검사료 납부]**  
"갑"은 증명서 및 성적서 접수 시 "갑"은 "을"에게 제 2조 검사료를 현금으로 납부하기로 한다.

**제 9 조 [기 타]**  
1) 본 계약에 명시되지 않은 사항은 일반 상거래에 따른 계약수행중 이의가 발생하였을 때에는 "갑" "을" 쌍방 합의하여 결정하며, 분쟁이 발생할 경우 서울중앙지방법원을 1심 관할법원으로 한다.  
2) 본 계약을 체결에 증명하기 위하여 증본 2통을 작성, 각기 기밀일인하고 각 1통씩 보관한다. 끝.

2019 년 10 월 22 일

"갑" (주)이건산전  
대표이사 이 용 발  
경기도 남양주시 진결읍 광복대  
로변광업길 42-110  
☎ 031-534-2975

"을" 사단법인 한국철도차량엔지니어링  
이 사 장 권 준 근  
경기도 수원시 팔달구 서부로 2174  
☎ 031-269-5452

### (1) 검사 및 시험항목

| 순번 | 항목 |                  | 형식시험 | 전수시험 | 비 고 |
|----|----|------------------|------|------|-----|
| 1  | 검사 | 외관 검사            | ○    | ○    |     |
| 2  |    | 치수 검사            | ○    | ○    |     |
| 3  |    | 중량 측정            | ○    | -    |     |
| 4  | 시험 | 절연저항 시험          | ○    | ○    |     |
| 5  |    | 내전압 시험           | ○    | ○    |     |
| 6  |    | 저전압 ON/OFF스위칭 시험 | ○    | ○    |     |
| 7  |    | 온도 시험            | ○    | -    |     |
| 8  |    | 전자파 적합성 시험       | ○    | -    |     |
| 9  |    | 진동 시험            | ○    | -    |     |
| 10 |    | 현차 시험            | ○    | -    |     |

④ 형식시험(TYPE TEST)은 최초 생산품에 대하여 시행하는 시험이다.

⑤ 전수시험(ROUTINE TEST)은 전체 수량에 대하여 개개의 품질과 성능을 확인하기 위하여 시행한다.

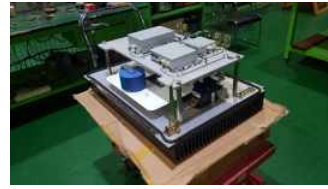
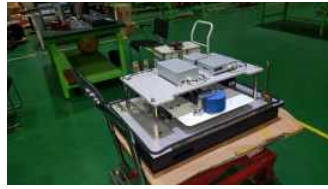


그림 38. 외관검사



그림 39. 치수측정

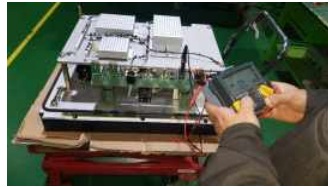


그림 40. 절연저항 시험



그림 41. 내전압시험

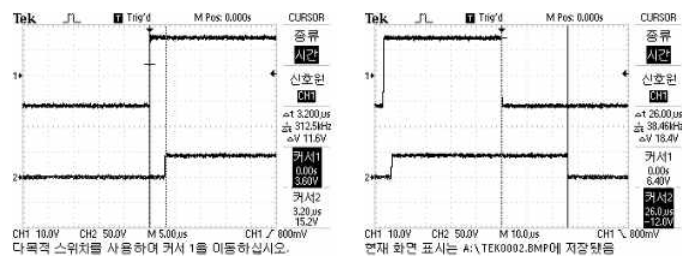


그림 42. 지연시간 측정

## ① 환경, 진동, 전자파 시험

### • 시험 규격

#### ■ 환경시험(온도시험)

##### - 저온시험

IEC 60068-2-1의 시험방법에 의거 시험을 실시하여 장치에 이상이 없어야 한다.

| 항 목   | 내 용  |
|-------|------|
| 온도    | -30℃ |
| 시간(h) | 16시간 |

- 고온시험

IEC 60068-2-2의 시험방법에 의거 시험을 실시하여 장치에 이상이 없어야 한다.

| 항 목   | 내 용  |
|-------|------|
| 온도    | +60℃ |
| 시간(h) | 16시간 |

- 온도 싸이클 시험

IEC 60068-2-14의 시험방법에 의거 시험을 실시하여 장치에 이상이 없어야 한다.

| 항 목 | 내 용         |
|-----|-------------|
| 온도  | -30℃ ↔ +60℃ |
| 횟수  | 5회          |

■ 진동시험

IEC 61373 1종 B 시험방법에 의거 시험을 실시하여 장치에 이상이 없어야 한다.

■ 전자파 시험

KS C IEC62236-3-2에 따라 시험대상 장치를 동작시킨 후 제어전원 입력부에 노이즈 전원을 인가하며 시험을 실시한다. 세부시험 기준은 아래의 표와 같다.

| 순 | 검사항목                 | 규격                | 검사<br>대상 | 판정기준 |                | 성능<br>평가<br>기준 |
|---|----------------------|-------------------|----------|------|----------------|----------------|
|   |                      |                   |          | 항목   | 기준치            |                |
| 1 | 정전기<br>방전내성<br>(ESD) | IEC 61000-4<br>-2 | 기기<br>외함 | 접촉방전 | ±6 kV          | B              |
|   |                      |                   |          | 기중방전 | ±8 kV          |                |
| 2 | 전기자기<br>방사내성<br>(RS) | IEC 61000-4<br>-3 | 기기<br>외함 | 시험레벨 | 20 V/m         | A              |
|   |                      |                   |          | 주파수  | (80~1000) MHz  |                |
|   |                      |                   |          | 변조방식 | 80 % AM(1 kHz) |                |

| 순 | 검사항목                                 | 규격                   | 검사<br>대상                          | 판정기준                |                  |             |             | 성능<br>평가<br>기준    |
|---|--------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------|
|   |                                      |                      |                                   | 항목                  | 기준치              |             |             |                   |
| 3 | RS from Digital Radio telephones     | IEC 61000-4-3        | 기기<br>외함                          | 시험레벨                | 10 V/m           | 5 V/m       | 3 V/m       | A                 |
|   |                                      |                      |                                   | 주파수                 | 1.4~2.1 GHz      | 2.1~2.5 GHz | 5.1~6.0 GHz |                   |
|   |                                      |                      |                                   | 변조방식                | 80 % AM(1 kHz)   |             |             |                   |
| 4 | 전기적 빠른<br>과도 현상<br>내성<br>(EFT/Burst) | IEC 61000-4-4        | I/O<br>단자<br>통신<br>단자             | 시험레벨                | ±2 kV            |             |             | A                 |
|   |                                      |                      |                                   | Tr / Th             | (5 / 50) ns      |             |             |                   |
|   |                                      |                      |                                   | 반복주파수               | 5 kHz            |             |             |                   |
|   |                                      |                      | 전원<br>단자                          | 시험레벨                | ±2 kV            |             |             |                   |
|   |                                      |                      |                                   | Tr / Th             | (5 / 50) ns      |             |             |                   |
|   |                                      |                      |                                   | 반복주파수               | 5 kHz            |             |             |                   |
| 5 | 서지 내성<br>(Surge)                     | IEC 61000-4-5        | 전원<br>단자                          | 시험<br>레벨            | 선과<br>접지         | ±2 kV       |             | B                 |
|   |                                      |                      |                                   |                     | 선과<br>선          | ±1 kV       |             |                   |
|   |                                      |                      |                                   | Tr / Th             | (1.2 / 50) ns    |             |             |                   |
| 6 | 전자기장<br>전도 내성<br>(CS)                | IEC 61000-4-6        | I/O<br>단자<br>통신<br>단자<br>전원<br>단자 | 주파수                 | 10 V             |             |             | A                 |
|   |                                      |                      |                                   | 시험레벨                | (0.15 ~ 80) MHz  |             |             |                   |
|   |                                      |                      |                                   | 변조방식                | 80 % AM (1 kHz)  |             |             |                   |
| 7 | 전기자기<br>전도 장애(CE)                    | EN 55011<br>CISPR 11 | 전원<br>단자                          | 주파수<br>(quasi-peak) | (9 ~ 150) kHz    |             |             | No Limit          |
|   |                                      |                      |                                   |                     | (150 ~ 500) kHz  |             |             | 99 dB<br>μV<br>이하 |
|   |                                      |                      |                                   |                     | 500 kHz ~ 30 MHz |             |             | 93 dB<br>μV<br>이하 |
| 8 | 전기자기<br>방사 장애(RE)                    | EN 55011<br>CISPR 11 | 외함                                | 주파수<br>(quasi-peak) | (150 ~ 500) kHz  |             |             | 99 dB<br>μV<br>이하 |
|   |                                      |                      |                                   |                     | 500 kHz ~ 30 MHz |             |             | 93 dB<br>μV<br>이하 |

주1) 성능평가기준 A : 기기는 시험 중 그리고 시험 후에 의도된 대로 작동을 계속해야 한다. 기기가 의도된 대로 사용될 때, 제조자에 의해 규정된 성능 수준 이하의 성능으로 저하되거나 기능이 상실되는 것은 허용되지 않는다. 성능 수준은 성능에 대한 허용 손실 수준으로 대체할 수 있다. 제조자가 최소 성능 수준 또는 허용 성능 손실 수준을 규정하지 않은 경우, 제품설명 및 자료, 사용자가 기기로부터 합리적으로 기대할 수 있는 것으로부터 이를 도출할 수 있다.

주2) 성능평가기준 B : 기기는 시험 후 의도된 대로 계속 작동을 해야한다. 기기가 의도된 대로 사용될 때, 제조자에 의해 규정된 성능 수준 이하의 성능으로 저하되거나 기능이 상실되는 것은 허용되지 않는다. 성능 수준은 성능에 대한 허용 손실 수준으로 대체할 수 있다. 그러나 시험 중의 성능 저하는 허용된다. 실제 동작 상태나 저장 데이터의 변경을 허용되지 않는다. 제조자가 최소 성능 수준 또는 허용 성능 손실 수준을 규정하지 않은 경우, 제품 설명 및 자료, 그리고 사용자가 기기로부터 합리적으로 기대할 수 있는 것으로부터 도출할 수 있다.

주3) 성능평가기준 C : 기능이 자가 복구식이거나 또는 조작을 통하여 복구 가능한 경우, 일시적인 기능의 상실은 허용된다.

## • 공인시험기관 시험 의뢰

### 공인기관 시험 의뢰서

의뢰기관 : (사)한국철도차량엔지니어링

우편번호 : 16324

주 소 : 경기도 수원시 장안구 서부로 2174

경영지원본부

검사본부, 시험소

KNR : 923-6486

전 화 : 031-269-5452 FAX : 031-269-5453

전 화 : 031-207-7799 팩 :

수 신 : LAB-T

제 목 : 전자파시험

| 의뢰자     | (사)한국철도차량엔지니어링                        | 제                                            | 회사명     | 취이건산    |
|---------|---------------------------------------|----------------------------------------------|---------|---------|
| 공사번호    | CTFM14 철도차량 동력제어장치 IGBT개량 실용화 연구개발 1식 | 주 소                                          | 경기도 남양주 | 경기도 남양주 |
| 제 품 명   | 동력제어장치 IGBT                           | 대 표 자                                        | 이 용 범   | 이 용 범   |
| 시료표시 NO | R-78                                  | 사업자 NO                                       | 127-89- | 127-89- |
| 항 목     | 단 위                                   | 시 험 규 격                                      |         |         |
| 전자파시험   | -                                     | IGBT STACK 규격서 [LK-E-1385-01(Rev.00)] : KS C |         |         |
|         |                                       | ----- 이 하 여 백 -----                          |         |         |
|         |                                       |                                              |         |         |
|         |                                       |                                              |         |         |
|         |                                       |                                              |         |         |

※ 시험 성적서에는 상기 " " 표시 내용이 필히 기록됩니다

### 공인기관 시험 의뢰서

의뢰기관 : (사)한국철도차량엔지니어링

우편번호 : 16324

주 소 : 경기도 수원시 장안구 서부로 2174

경영지원본부

검사본부, 시험소

KNR : 923-6486

전 화 : 031-269-5452 FAX : 031-269-5453

전 화 : 031-207-7799 팩 :

수 신 : KES

제 목 : 진동 및 충격시험, 진동시험

|          |             |                                       |                                             |             |        |                   |
|----------|-------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|-------------|--------|-------------------|
| 의뢰자      |             | (사)한국철도차량엔지니어링                        |                                             | 제<br>작<br>사 | 회사명    | 취이건산              |
| 공사번호     |             | CTFM14 철도차량 동력제어장치 IGBT개량 실용화 연구개발 1식 |                                             |             | 주 소    | 경기도 남양주<br>바람골길 4 |
| 제 품 명    |             | 동력제어장치 IGBT                           |                                             |             | 대 표 자  | 이 용 범             |
| 시료표시 NO  |             | R-78                                  |                                             |             | 사업자 NO | 127-89-           |
| 항 목      |             | 단 위                                   | 시 험 규 격                                     |             |        |                   |
| 진동 시험    |             | -                                     | IGBT STACK 규격서 [LK-E-1385-01(Rev.00)] : IEC |             |        |                   |
| 온도<br>시험 | 저온시험        | -                                     | IGBT STACK 규격서 [LK-E-1385-01(Rev.00)] : IEC |             |        |                   |
|          | 고온시험        |                                       | IGBT STACK 규격서 [LK-E-1385-01(Rev.00)] : IEC |             |        |                   |
|          | 온도<br>사이클시험 |                                       | IGBT STACK 규격서 [LK-E-1385-01(Rev.00)] : IEC |             |        |                   |
|          |             | ----- 이 하 여 백 -----                   |                                             |             |        |                   |
|          |             |                                       |                                             |             |        |                   |

※ 시험 성적서에는 상기 " " 표시 내용이 필히 기록됩니다

## ② 시험 결과

IGBT 스택 단품에 대해 로테코에서 입회한 시험과 각 시험기관에 의뢰하여 완료된 시험성적서는 아래와 같다.

### 부품검사 성적서

**부품검사 확인서**

1. 발 행 번 호 : CA-UD0002

2. 공사번호 / 공사명 : CTFM14 / 철도차량 동력제어장치 IGBT 개량 실험용 연구개발 1식

3. 적용차종 및 수량 : -

4. 차 량 제 작 사 : -

5. 부 품 제 작 회 사 : 이진산전(경기 남양주)

6. 검 수 일 자 : 2019. 10. 22

7. 적 용 규 격 : LK-E-1385-01(Rev.0)

8. 검 사 내 용 :

| 검사번호   | 품 명         | 특수량 (EA) | 검사 수량 | 제품 발판번호       | 검사 결과 | 합격품 수 | 비고 |
|--------|-------------|----------|-------|---------------|-------|-------|----|
| TJA015 | 동력제어장치 IGBT | 9        | 9     | 20001 ~ 20009 | 합격    | 9 EA  | 완료 |

상기 부품검사가 검사기준에 적합함을 증명함.

2020 년 04 월 06 일

검 사 자 : 이 구 철

(사)한국철도차량엔지니어링

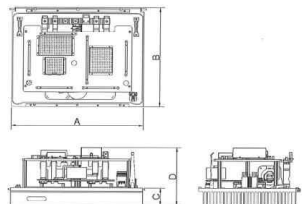
특기사항 : (사)한국철도차량엔지니어링 확인

불합 : 당 당 자 필 장

FPH0002-01(0) ROTECO A4(210x297)

1 / 2

| 구 분          | 철도차량 동력제어장치 IGBT 개량 실험용 연구개발 1식 | ROTECO | 검사자                         | 확인자 |
|--------------|---------------------------------|--------|-----------------------------|-----|
| 제 작 회 사      | (주)이진산전                         |        | 이진                          | 이승환 |
| 종 명          | 동력제어장치 IGBT                     |        |                             |     |
| 검 사 규 격      | LK-E-1385-01(Rev.0)             |        |                             |     |
| 수 량          | 1 EA                            | 검 사 일  | 2020. 01. 22 ~ 2020. 03. 20 |     |
| 도판번호 또는 제품번호 | LK-IGS-01R                      | 판 정    | 합 격                         |     |

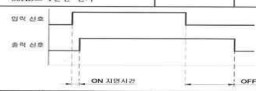


| 순 | 검 사 항목     | 검 사 내용                            | 판 정 기준                                             | 측정(값)                      | 결과 | 비고             |
|---|------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------|----|----------------|
| 1 | 외관 검사      | 유해한 흠, 표면 닳힘, 주요부 보석의 가공상태, 결함 확인 | 이상없을 것                                             | 이상없음                       | 양호 | 2020.01.22 가설사 |
| 2 | 치수 검사 (mm) | 치수 확인                             | A 770 ± 1<br>B 600 ± 1<br>C 105.5 ± 1<br>D Max 355 | 770<br>601<br>105.0<br>352 | 양호 | 2020.01.22 가설사 |
| 3 | 중량측정       | 중량측정                              | 81kg ± 5%                                          | 81.9                       | 양호 | 2020.01.22 가설사 |

ROTECO

### 부품검사 성적서

2 / 2

| 순 | 검 사 항목            | 검 사 내용                                                                                                                                                    | 판 정 기준                                                                         | 측정(값)                         | 결과                   | 비고             |  |
|---|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------|--|
| 4 | 절연저항 시험           | 고압도전부 - 히트싱크 간 1,000V 메가로 측정                                                                                                                              | 30MΩ 이상일 것                                                                     | 2000                          | 양호                   | 2020.01.22 가설사 |  |
|   |                   | 저압도전부 - 히트싱크 간 500V 메가로 측정                                                                                                                                | 5MΩ 이상일 것                                                                      | 1000                          |                      |                |  |
| 5 | 내전압시험             | 고압도전부 - 히트싱크 간 AC 5,000V 60Hz로 1분간 인가                                                                                                                     | 견딜 것                                                                           | 견딤                            | 양호                   | 2020.01.22 가설사 |  |
|   |                   | 저압도전부 - 히트싱크 간 AC 1,200V 60Hz로 1분간 인가                                                                                                                     | 견딜 것                                                                           | 견딤                            |                      |                |  |
| 6 | 저전압 ON/OFF 스위칭 시험 | <br>입력 주파수 1kHz 인가 (GDU G-E간)<br>출력 주파수 1kHz 인가<br>ON 지연시간<br>OFF 지연시간 | 1kHz ± 1%<br>+15V ± 1.5V<br>-9V ± 1.5V<br>9μs ± 10%<br>28μs ± 10%              | 14.4<br>-9.2<br>9.34<br>28.34 | 양호                   | 2020.01.22 가설사 |  |
| 7 | 온도시험              | 저온시험 (-30℃, 16시간)<br>고온시험 (+60℃, 16시간)<br>온도차이 시험 (5회)                                                                                                    | IEC 60068-2-1에 의거 시험 실시<br>IEC 60068-2-2에 의거 시험 실시<br>IEC 60068-2-14에 의거 시험 실시 | 이상없을 것<br>이상없을 것<br>이상없을 것    | 이상없음<br>이상없음<br>이상없음 | 양호             |  |
| 8 | 전동시험              | IEC 61373 1항 B동급에 의거 시험 실시                                                                                                                                | 이상없을 것                                                                         | 이상없음                          | 양호                   |                |  |
| 9 | 전격과 시험            | KS C IEC 62236-3-2에 의거 시험 실시                                                                                                                              | 이상없을 것                                                                         | 이상없음                          | 양호                   |                |  |

ROTECO

### 시험 성적서

2 / 2

**주식회사 케이이에스**  
 경기도 안양시 동안구 시인대로355번길 40, 3701호 (관동동)  
 Tel : +82-31-425-6200  
 Fax : +82-31-424-0400  
<http://www.kes.co.kr>

성적서번호: KES-RE-20T0102  
 페이지 ( 1 ) / ( 18 )



- 의뢰인
  - 기 관 명 : (사)한국철도차량엔지니어링
  - 주 소 : 경기도 수원시 장안구 서부로 2174 (천전동, 한국철도차량엔지니어링)
- 시험대상품목
  - 제 품 명 : 동력제어장치 IGBT
  - 도 말 명 : IGBT STACK
  - 제 조 자 : 이진산전
- 시험기간 : 2020년 03월 05일 ~ 2020년 03월 09일
- 시험 장소 : I/F 고정시험실 / F/현장시험실
  - 주 소 : (12658) 경기도 여주시 가여로 473-21 (하거동)
- 시험방법 : IEC 61373-2010  
 Railway applications - Rolling stock equipment - Shock and vibration tests
- 시험결과 : 시험결과 참조
- 시험성적서 용도 : 품질관리용

이 시험결과서는 의뢰자가 제시한 시험 및 시험 방법에만 한정됩니다.  
 \* 표시한 시험결과서는 시험기관의 인정범위 밖의 것임을 밝힙니다.

시험자  
 확인  
 성명 : 이 병 민

승인자 (시험책임자)  
 성명 : 이 광 선

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 분야에 대한 시험결과입니다.

비고:  
 이 성적서는 고객에 제공한 시험 및 시험 방법 대한 시험결과이며, 총보, 선하, 광도 및 수송물 등으로 사용할 수 있으며, 온도 이외의 시험을 금합니다.  
 이 성적서는 KOLAS에 의뢰한 승인 없이 복제 및 재발급 금지하며, 원본만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄물 및 스캔본은 불공정 취급용으로 사용 가능하지 않습니다.

2020 년 03 월 16 일

한국인정기구 인정 **주식회사 케이이에스** (인)

이 시험결과서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인정기준을 준수합니다.  
 이 시험결과서는 KOLAS에 의뢰한 시험결과이며, KOLAS에 의뢰한 시험결과를 사용할 수 있습니다.  
 이 시험결과서에 대한 진위여부를 확인하기 위하여 KOLAS에 문의하십시오.

A4

## 시험 성적서

|                                                                                                                                                                                                                                                   |  |                                                  |                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>LAB-T 주식회사 랩티</b><br>경기도 용인시 처인구 오현동 벽곡대로<br>2182-42, 2182-40<br>Tel: 031-322-6767, Fax: 031-322-6768                                                                                                                                          |  | 발급번호: TRSKREL20-0032<br>페이지: ( 1 ) / ( 44 ) Page |  |
| 1. 의뢰자<br>* 기관명: (사)한국철도차량연구회<br>* 주소: 경기도 수원시 장안구 서부로 2174                                                                                                                                                                                       |  |                                                  |                                                                                   |
| 2. 제품명(모델명/일련번호): 동력제어장치 IGBT (IGBT STACK / LK IGS 01R)                                                                                                                                                                                           |  |                                                  |                                                                                   |
| 3. 시험기간: 2020년 01월 31일 ~ 2020년 02월 03일                                                                                                                                                                                                            |  |                                                  |                                                                                   |
| 4. 시험방법: IEC 62236-3-2:2018                                                                                                                                                                                                                       |  |                                                  |                                                                                   |
| 5. 시험결과: 적합                                                                                                                                                                                                                                       |  |                                                  |                                                                                   |
| 6. 용도: 품질관리용                                                                                                                                                                                                                                      |  |                                                  |                                                                                   |
| 작성자<br>성명: 양성민                                                                                                                                                                                                                                    |  | 기술책임자<br>성명: 이종호                                 |                                                                                   |
| 이 성적서는 시험의뢰인에 의해 제공된 시료에 한하여, 용도 이외의 사용을 금합니다.<br>* 표시된 시험결과는 시험기관의 인증범위 밖의 것임을 밝힙니다.<br>위 성적서는 국제시험기관인증협약(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 승인 받은 본대에 대한 시험결과입니다. |  |                                                  |                                                                                   |
| 2020년 03월 10일<br>한국인정기구 인증 주식회사 랩티 대표이사 (인)                                                                                                                                                                                                       |  |                                                  |                                                                                   |

\* 시험성적서의 진위여부에 대한 확인이 필요하신 경우에는 info@lab-t.net으로 문의 바랍니다.

TRF-0-017002) 본 시험성적서는 주식회사 랩티의 승인 없이서는 복제 및 재발급이 금지됩니다. 페이지: 1 / 44



G4B(www.g4b.go.kr)진위확인코드: GK7MP4715w=



## 시험 성적서

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |                                                   |                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>LAB-T 주식회사 랩티</b><br>경기도 용인시 처인구 오현동 벽곡대로<br>2182-42, 2182-40<br>Tel: 031-322-6767, Fax: 031-322-6768                                                                                                                                                                                                                           |  | 발급번호: TRSKREL20-0023<br>페이지: ( 1 ) / ( 17 ) pages |  |
| 1. 의뢰자<br>* 기관명: (사)한국철도차량연구회<br>* 주소: 경기도 수원시 장안구 서부로 2174                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |                                                   |                                                                                     |
| 2. 제품명(모델명/일련번호): 동력제어장치 IGBT (IGBT STACK / LK IGS 01R)                                                                                                                                                                                                                                                                            |  |                                                   |                                                                                     |
| 3. 시험기간: 2020년 02월 24일 ~ 2020년 02월 27일                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |                                                   |                                                                                     |
| 4. 시험방법: IEC 60068-2-1: 2007 Environmental testing - Part 2-1: Tests - Test A: Cold, IEC 60068-2-2: 2007 Environmental testing - Part 2-2: Tests - Test B: Dry Heat, IEC 60068-2-14: 2009 Environmental testing - Part 2-14: Tests - Test N: Change of temperature, 8. Test N: Change of temperature with specified rate of change |  |                                                   |                                                                                     |
| 5. 시험결과: 합격                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |                                                   |                                                                                     |
| 6. 용도: 품질관리용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |                                                   |                                                                                     |
| 작성자<br>성명: 안한준                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  | 기술책임자<br>성명: 양재문                                  |                                                                                     |
| 이 성적서는 시험의뢰인에 의해 제공된 시료에 한하여, 용도 이외의 사용을 금합니다.<br>* 표시된 시험결과는 시험기관의 인증범위 밖의 것임을 밝힙니다.<br>위 성적서는 국제시험기관인증협약(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 승인 받은 본대에 대한 시험결과입니다.                                                                                  |  |                                                   |                                                                                     |
| 2020년 03월 16일<br>한국인정기구 인증 주식회사 랩티 대표이사 (인)                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |                                                   |                                                                                     |

\* 시험성적서의 진위여부에 대한 확인이 필요하신 경우에는 info@lab-t.net으로 문의 바랍니다.

TRF-S-007002) 본 시험성적서는 주식회사 랩티의 승인 없이서는 복제 및 재발급이 금지됩니다. 페이지: 1 / 17

G4B(www.g4b.go.kr)진위확인코드: WRwgPUdRAEs=



## 바. 현차시험 및 검증

### (1) 호환성 검증 시험

부산교통공사 2호선을 대상으로 시험을 수행한다. 2호선 차량은 6량 1편성으로 구성되어 있으며 이중 3량의 추진장치는 GTO 스택을 사용하고 있다. 3량 중 1량을 IGBT 스택을 적용하고 이후 순차적으로 2량 및 3량을 IGBT 스택을 적용하여 정상 운행이 가능한지 확인한다.



| 구분               | 역행 | 제동 |
|------------------|----|----|
| IGBT 스택<br>1량 적용 |    |    |
| IGBT 스택<br>2량 적용 |    |    |
| IGBT 스택<br>3량 적용 |    |    |

· 파형은 위에서부터 가선전압, 출력 전압, 출력전류, 가속도 변화 측정

다음표는 GTO스택과 IGBT스택의 Jerk치를 비교하여 차량의 충격량을 비교

| 구분       | GTO스택                 | IGBT스택                | 비고 |
|----------|-----------------------|-----------------------|----|
| 기동시험(1N) | 0.24 m/s <sup>3</sup> | 0.23 m/s <sup>3</sup> |    |
| 기동시험(2N) | 0.31 m/s <sup>3</sup> | 0.33 m/s <sup>3</sup> |    |
| 기동시험(3N) | 0.39 m/s <sup>3</sup> | 0.40 m/s <sup>3</sup> |    |
| 기동시험(4N) | 0.48 m/s <sup>3</sup> | 0.47 m/s <sup>3</sup> |    |
| 추가노치시험   | 0.54 m/s <sup>3</sup> | 0.51 m/s <sup>3</sup> |    |
| 재역행시험    | 0.36 m/s <sup>3</sup> | 0.37 m/s <sup>3</sup> |    |

## (2) 본선 시운전 시험

### ① 본선 시운전 시험 절차

본 시험절차서는 부산2호선 ALSTOM社 전동차 VVVF인버터 유니트의 GTO 전력 소자를 대체하여 IGBT 전력소자를 적용하는 스택에 대한 전동차량의 본선 시운전 시험을 실시하여 성능 및 안전성이 확보되고 있는지를 확인하기 위한 시험방법 및 기

준에 대하여 규정한다.

■ 시험 항목

| 시 험 항 목      |           | 형식<br>시험 | 전수<br>시험 | 비 고                             |
|--------------|-----------|----------|----------|---------------------------------|
| 역행시험         | 기동시험      | ◎        | ◎        | 구내시험으로 실시                       |
|              | 추가노치시험    | ◎        | ◎        | 구내시험으로 실시                       |
|              | 재역행시험     | ◎        | ◎        | 구내시험으로 실시                       |
|              | 점착성능      | ◎        | -        | 구내시험으로 실시                       |
|              | 구배기동      | ◎        | -        | 본선시운전시 실시                       |
| 가속도시험        |           | ◎        | ◎        | 구내시험으로 실시                       |
| 제동시험         | 상용제동시험    | ◎        | ◎        | 구내시험으로 실시                       |
|              | 활주방지시험    | ◎        | -        | 구내시험으로 실시                       |
| 최고속도시험       |           | ◎        | -        | 본선 최고속도 범위에서 확인                 |
| 자동운전시험       | 자동운전      | ◎        | ◎        | 본선시운전시 실시                       |
| 소음시험         |           | ◎        | -        | 구내시험시 차량실내 소음 측정                |
| 온도 및<br>상태시험 | 냉각유닛 표면온도 | ◎        | ◎        | 본선운행직후 온도라벨 또는 레이저 온도계로 각부 온도측정 |
| 신뢰성시험        |           | ◎        | -        | 구내 및 본선시운전시 실시                  |

\* 본선시운전 시험 중 형식시험은 만차 또는 공차 조건에서 시행한다.

\* 성능시험 및 조합시험, 완성차시험, 본선 시운전 시험의 세부항목 및 일정은 부산 교통공사를 중심으로 각 기관 간 협의 후 시행한다.

1) 형식시험(TYPE TEST)은 최초 생산품에 대하여 시행하는 시험이다.

2) 전수시험(ROUTINE TEST)은 전체 수량에 대하여 개개의 품질과 성능을 확인하기 위하여 시행한다.

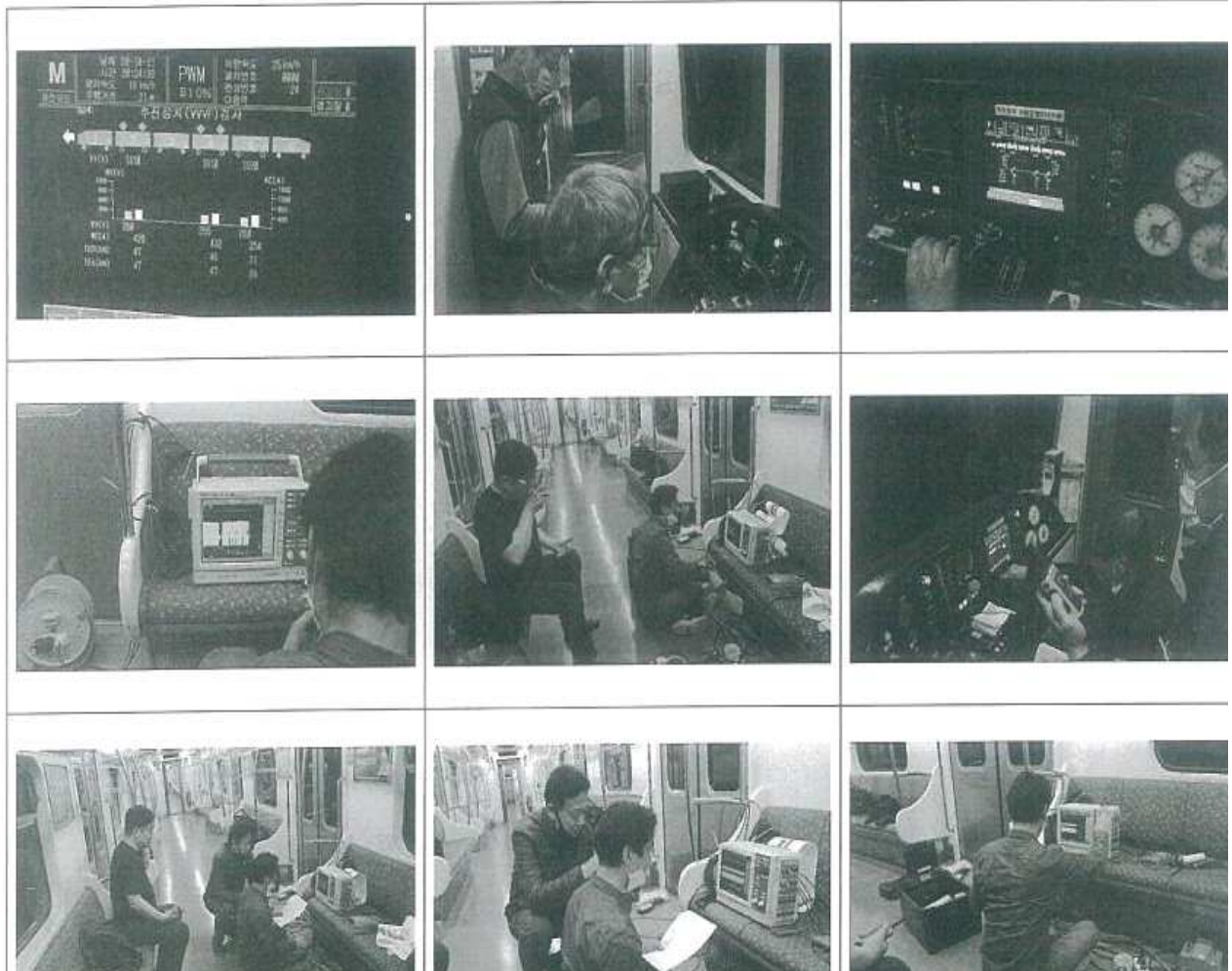
② 측정항목

- 가선헌전압
- 출력 전압(A-B상간)
- 출력 전류(A상)
- 차량의 주행 속도
- 역행신호(PWM신호)
- 제동신호

■ 가속도 센서

③ 시험 사진

시험사진



④ 시험성적서

| 시운전검사 확인서                                                                     |                                          |                                                                                      |          |                                                                                       |           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----|
| 발행번호                                                                          | CA-UK0002                                |                                                                                      |          |                                                                                       |           |     |
| 공사번호 / 공사명                                                                    | CTFM14 / 부산교통공사 2호선 전동차 IGBT 인버터 STACK   |                                                                                      |          |                                                                                       |           |     |
| 운영기관                                                                          | 부산교통공사                                   |                                                                                      |          |                                                                                       |           |     |
| 적용차종 및 수량                                                                     | 도시철도 전동차 1편성                             |                                                                                      |          |                                                                                       |           |     |
| 차량 제작자                                                                        | 현대로템(주)                                  |                                                                                      |          |                                                                                       |           |     |
| 검사대상명                                                                         | IGBT 인버터 STACK 시운전 검사                    |                                                                                      |          |                                                                                       |           |     |
| 검사 장소                                                                         | 호포차량사업소(구내 및 본선)                         |                                                                                      |          |                                                                                       |           |     |
| 검사일자 및 기간                                                                     | 2020. 10. 21.~2020. 10. 22.              |                                                                                      |          |                                                                                       |           |     |
| 접수번호                                                                          | 대상항목(적용규격)                               | 총수량                                                                                  | 검사<br>수량 | 차호<br>(일련번호)                                                                          | 합격품<br>누계 | 비 고 |
| UIA015                                                                        | IGBT형 인버터 STACK 시운전 검사<br>(LK-E-1385-03) | 1편성                                                                                  | 9EA      | 2124(3EA),<br>2424(3EA),<br>2524(3EA).                                                | 9EA       |     |
| <p>상기 완성차검사항목이 검사기준에 적합함을 증명함.</p> <p>2020년 11월 05일</p> <p>(사)한국철도차량엔지니어링</p> |                                          |                                                                                      |          |                                                                                       |           |     |
| 특기사항                                                                          |                                          | (사)한국철도차량엔지니어링 확인                                                                    |          |                                                                                       |           |     |
| 불임 : 시운전검사 성적서                                                                |                                          | 담 당                                                                                  |          | 팀 장                                                                                   |           |     |
|                                                                               |                                          |  |          |  |           |     |

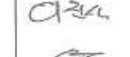
FPHD002-03(0)

ROTECO

A4(210x297)

## 시운전검사(시험) 성적서

Page : 1 / 1

|               |                                  |        |                                                                                    |                                                                                     |
|---------------|----------------------------------|--------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 공 사 명         | 부산교통공사 2호선 전동차<br>IGBT 인버터 STACK | ROTECO | 검사자                                                                                | 확인자                                                                                 |
| 대상 항목         | IGBT STACK 1편성 시운전검사             |        |  |  |
| 검사 규격         | LK-E-1385-03(Rev.0)              |        |                                                                                    |                                                                                     |
| 검사 수량         | 9EA                              |        |                                                                                    |                                                                                     |
| 차호 또는<br>편성번호 | 24편성(2124,2424,2524)             | 제 작 사  | (주)이전산전                                                                            |                                                                                     |
| 검 사 일         | 2020.10.21~22                    | 판 정    | 합 격                                                                                |                                                                                     |
| 시험환경          | 온도: 15 ℃ 습도: 85 % 날씨: 비          |        |                                                                                    |                                                                                     |

### 1. 역행시험

#### 1.1 기동시험

| 구분 | 시 험 방 법          | 판정기준                    | 시험결과 |     | 비고        |
|----|------------------|-------------------------|------|-----|-----------|
|    |                  |                         | TC1  | TC2 |           |
| 1  | 공<br>차<br>시<br>험 | 1N→30km/h→OFF(3초)→B7→정지 | 양호   | 양호  | 본선<br>시운전 |
| 2  |                  | 2N→30km/h→OFF(3초)→B7→정지 | 양호   | 양호  |           |
| 3  |                  | 3N→최고허용속도→OFF(3초)→B7→정지 | 양호   | 양호  |           |
| 4  |                  | 4N→최고허용속도→OFF(3초)→B7→정지 | 양호   | 양호  |           |

#### 1.2 추가노치시험

| 구분 | 시험방법     | 판정기준            | 시험결과 |     | 비고        |
|----|----------|-----------------|------|-----|-----------|
|    |          |                 | TC1  | TC2 |           |
| 1  | 공차<br>시험 | 역행 특성이<br>양호할 것 | 양호   | 양호  | 본선<br>시운전 |
| 2  |          |                 | 양호   | 양호  |           |
| 3  |          |                 | 양호   | 양호  |           |
| 4  |          |                 | 양호   | 양호  |           |
| 5  |          |                 | 양호   | 양호  |           |

FPGH001-07(0)

ROTECO

A4(210x297)

## 시운전검사(시험) 성적서

1.3 재역행시험

Page : 1 / 2

| 구분 | 시험방법  |                                                       | 판정기준            | 시험결과 |     | 비고        |
|----|-------|-------------------------------------------------------|-----------------|------|-----|-----------|
|    |       |                                                       |                 | TC1  | TC2 |           |
| 1  | 공차 시험 | 1N → OFF → 1N → OFF → B7 → 0 km/h                     | 역행 특성이<br>양호할 것 | 양호   | 양호  | 본선<br>시운전 |
| 2  |       | 2N → OFF → 2N → OFF → B7 → 0 km/h                     |                 | 양호   | 양호  |           |
| 3  |       | 3N → OFF → 3N → OFF → 3N → OFF → B7 → 0 km/h          |                 | 양호   | 양호  |           |
| 4  |       | 4N → OFF → 4N → OFF → 4N → 허용최고속도 → OFF → B7 → 0 km/h |                 | 양호   | 양호  |           |

1.4 점착성능시험

| 구분 | 시험방법              | 판정 기준            | 시험결과 |     | 비고        |
|----|-------------------|------------------|------|-----|-----------|
|    |                   |                  | TC1  | TC2 |           |
| 1  | 정지상태 살수 → 4N 역행   | 제점착 제어가<br>양호할 것 | 양호   | 양호  | 본선<br>시운전 |
| 2  | 20km/h 살수 → 4N 역행 |                  | 양호   | 양호  |           |

1.5 구배기동시험

| 구분 | 시험방법                                   | 판정 기준        | 시험결과 |     | 비고        |
|----|----------------------------------------|--------------|------|-----|-----------|
|    |                                        |              | TC1  | TC2 |           |
| 1  | 본선최대구배<br>- 상선 : 냉정↔주제<br>- 하선 : 동원↔급곡 | 구배 기동이 양호할 것 | 양호   | 양호  | 본선<br>시운전 |

2. 가속도 시험

| 구분 | 측정 항목 | 시험 방법    |                             | 판정 기준                  | 시험 결과 |      |      |      | 비고        |
|----|-------|----------|-----------------------------|------------------------|-------|------|------|------|-----------|
|    |       |          |                             |                        | TC1   |      | TC2  |      |           |
|    |       |          |                             |                        | 1회    | 2회   | 1회   | 2회   |           |
| 1  | 가속도   | 공차<br>시험 | 4N→최고허용<br>속도→OFF→B7<br>→정지 | 3.0km/h/s<br>-5%, +10% | 3.1   | 3.1  | 3.1  | 3.1  | 본선<br>시운전 |
| 2  | 저크    |          |                             | 0.8 m/s³               | 0.61  | 0.61 | 0.59 | 0.60 |           |

FPGH001-07(0)

ROTECO

A4(210x297)

## 시운전검사(시험) 성적서

### 3. 제동시험

#### 3.1 상용제동시험

Page : 1 / 3

| 구분 | 시험항목 |           | 판정 기준   | 시험결과 |     | 비고        |
|----|------|-----------|---------|------|-----|-----------|
|    |      |           |         | TC1  | TC2 |           |
| 1  | 공차시험 | 전기제동 동작상태 | 적절할 것   | 양호   | 양호  | 본선<br>시운전 |
| 2  |      | 전공절환      | 이상 없을 것 | 양호   | 양호  |           |

#### 3.2 활주방지시험

| 구분 | 시험항목 |      | 판정 기준 | 시험결과 |     | 비고        |
|----|------|------|-------|------|-----|-----------|
|    |      |      |       | TC1  | TC2 |           |
| 1  | 공차시험 | 회생제동 | 적절할 것 | 양호   | 양호  | 본선<br>시운전 |

### 4. 최고속도시험

| 구분 | 시험항목                | 판정기준                  | 시험결과 |     | 비고        |
|----|---------------------|-----------------------|------|-----|-----------|
|    |                     |                       | TC1  | TC2 |           |
| 1  | 최대 전인력으로 최대 속도까지 가속 | 4N→운행최고속도→<br>상용제동→정지 | 양호   | 양호  | 본선<br>시운전 |

### 5. 자동운전시험

| 구분 | 시험조건         | 판정기준                  | 시험결과 |     | 비고        |
|----|--------------|-----------------------|------|-----|-----------|
|    |              |                       | TC1  | TC2 |           |
| 1  | 운전모드를 자동운전모드 | 본선구간 운행하여<br>이상이 없을 것 | 양호   | 양호  | 본선<br>시운전 |

## 시운전검사(시험) 성적서

### 6. 소음시험

Page : 1 / 4

| 구분 | 시험조건                 | 판정기준                  | 시험결과   |        | 비고        |
|----|----------------------|-----------------------|--------|--------|-----------|
|    |                      |                       | TC1    | TC2    |           |
| 1  | 직선구간에서<br>최고회용속도로 운행 | 객차 실내 측정하여<br>70dB 이하 | 67.7dB | 68.8dB | 본선<br>시운전 |

### 7. 주요기기 온도 및 상태시험

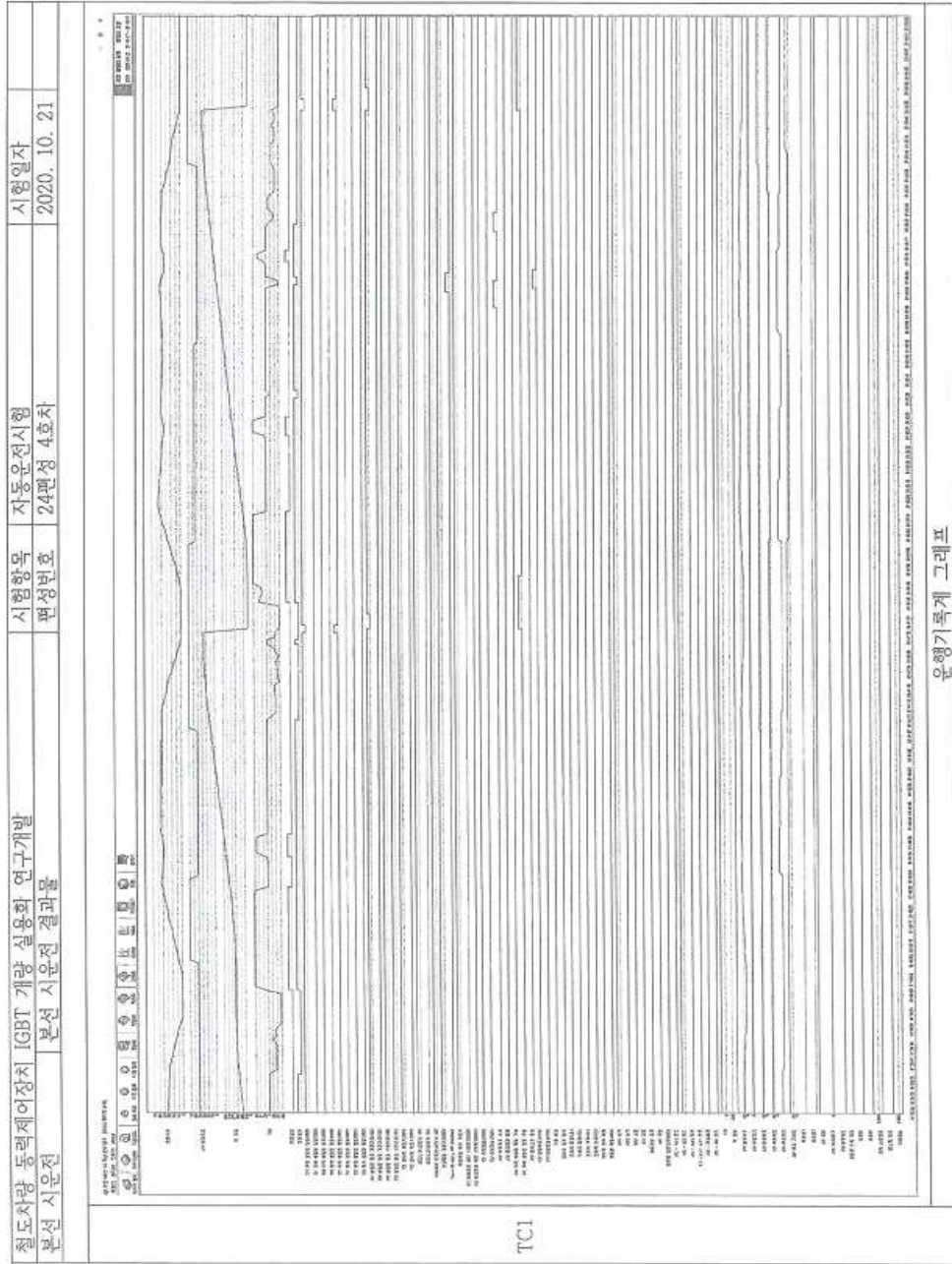
#### 7.1 온도시험

| 구분 | 측정항목                        | 판정<br>기준   | 시험결과 |      |      |      |      |      |      |      |      | 비고        |
|----|-----------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
|    |                             |            | 2124 |      |      | 2424 |      |      | 2524 |      |      |           |
|    |                             |            | A    | B    | C    | A    | B    | C    | A    | B    | C    |           |
| 1  | 외기 온도                       | -          | 15 ℃ |      |      |      |      |      |      |      |      | 본선<br>시운전 |
| 2  | 추진제어<br>인버터<br>냉각유닛<br>표면온도 | 85 ℃<br>이하 | 50.2 | 51.3 | 48.3 | 48.1 | 48.2 | 45.0 | 41.0 | 41.1 | 38.1 |           |

#### 7.2 상태시험

| 구분 | 측정항목                     | 판정기준      | 시험결과 |      |      | 비고        |
|----|--------------------------|-----------|------|------|------|-----------|
|    |                          |           | 2124 | 2424 | 2524 |           |
| 1  | Inverter<br>이상 소음 확인     | 이상<br>없을것 | 양호   | 양호   | 양호   | 본선<br>시운전 |
| 2  | Inverter<br>외부 부품의 소손 확인 | 이상<br>없을것 | 양호   | 양호   | 양호   |           |



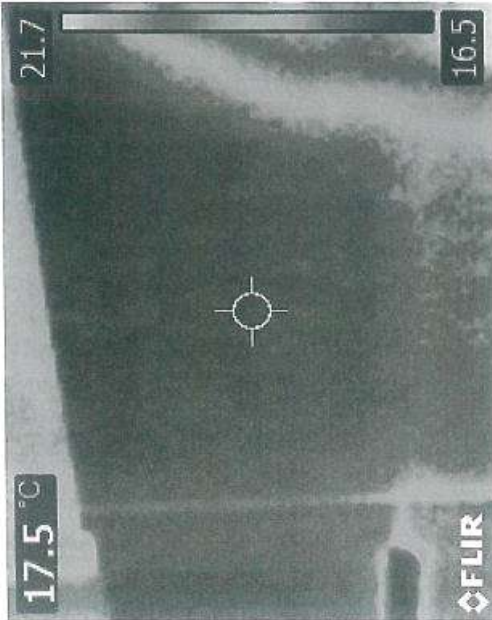
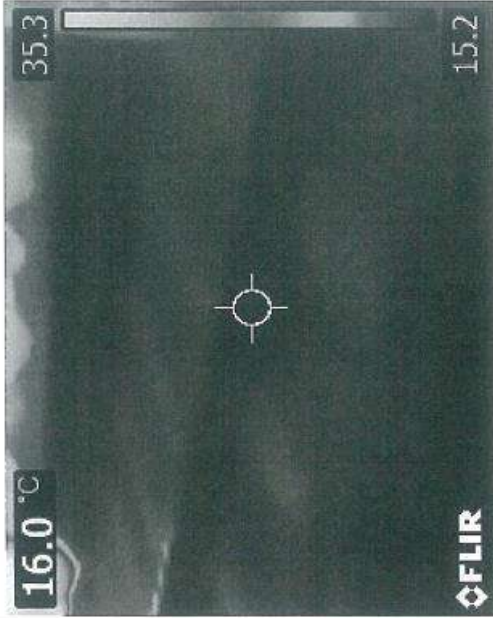


운행기록계 그래프

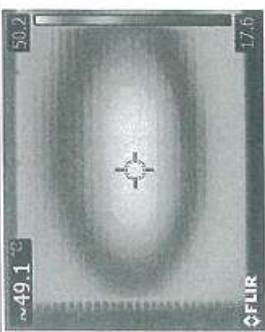
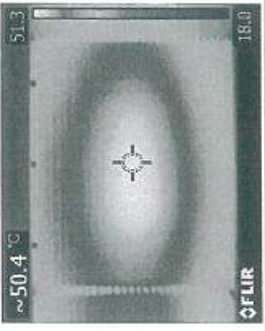
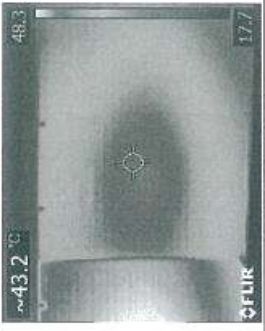
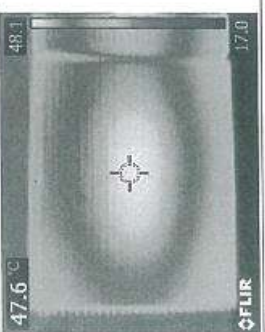
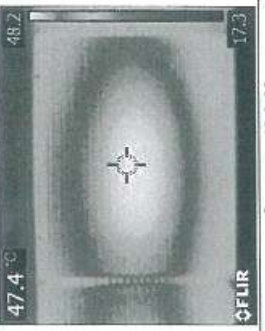
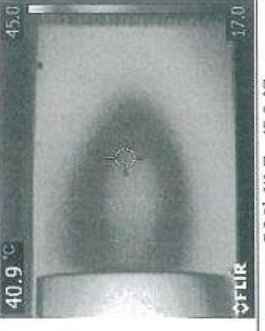
ROTECO  
 C.H. JEONG  
 2020

|                                                                                      |            |            |                                                                                     |                  |                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------|
| 철도차량 동력제어장치 IGBT 개량 실용화 연구개발<br>본선 시운전                                               | 본선 시운전 결과물 |            | 시험항목<br>소음시험                                                                        | 편성번호<br>24편성 4호차 | 시험일자<br>2020. 10. 21 |
|  |            | TC1 67.7dB |  |                  | TC2 68.8dB           |

ROTECO  
AT-JEONG

|                                                                                      |            |                                                                                     |      |              |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|--------------|
| 철도차량 동력제어장치 IGBT 개량 실용화 연구개발                                                         |            | 시험항목                                                                                | 온도시험 | 시험일자         |
| 본선 시운전                                                                               | 본선 시운전 결과물 | 판정번호                                                                                | 24판정 | 2020. 10. 21 |
|  |            |  |      |              |
| 외기온도(차체외부) 16.5℃                                                                     |            | 외기온도(레일부위) 16.0℃                                                                    |      |              |

ROTECO  
CH JONG

| 철도차량 동력제어장치 IGBT 개량 실용화 연구개발<br>본선 시운전                                                                                  |                                                                                                                        | 시험항목                                                                                                                  | 온도시험<br>편성번호    | 시험일자            |                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 본선 시운전 결과물                                                                                                              |                                                                                                                        |                                                                                                                       | 24편성            | 2020. 10. 21    |                 |
| <br>~49.1 °C<br>50.2<br>17.5<br>FLIR | <br>~50.4 °C<br>51.3<br>18.0<br>FLIR | <br>~43.2 °C<br>48.3<br>17.7<br>FLIR | 2호차 U-X 50.2 °C | 2호차 V-Y 51.3 °C | 2호차 W-Z 48.3 °C |
|                                                                                                                         |                                                                                                                        |                                                                                                                       | 5호차 U-X 48.1 °C | 5호차 V-Y 48.2 °C | 5호차 W-Z 45.0 °C |
|                                                                                                                         |                                                                                                                        |                                                                                                                       | 6호차 U-X 40.0 °C | 6호차 V-Y 40.1 °C | 6호차 W-Z 38.1 °C |
| <br>47.6 °C<br>48.1<br>17.0<br>FLIR  | <br>47.4 °C<br>48.2<br>17.3<br>FLIR  | <br>40.9 °C<br>45.0<br>17.0<br>FLIR  | 5호차 U-X 48.1 °C | 5호차 V-Y 48.2 °C | 5호차 W-Z 45.0 °C |
|                                                                                                                         |                                                                                                                        |                                                                                                                       | 6호차 U-X 40.0 °C | 6호차 V-Y 40.1 °C | 6호차 W-Z 38.1 °C |
|                                                                                                                         |                                                                                                                        |                                                                                                                       | 6호차 U-X 40.0 °C | 6호차 V-Y 40.1 °C | 6호차 W-Z 38.1 °C |

ROTECO  
24/20

### (3) 영업 운전 시험

#### ① 철도기술 연구원 차량 개조승인

영업 시운전 시험을 위해 철도안전법 제38조의2(철도차량의 개조 등)에 의거하여 다음과 같은 행정 지원을 수행하였다.

시민이 행복한 동북아 해양수도 부산



**부 산 교 통 공 사**



수신자 한국철도기술연구원  
(경유)

제목 부산도시철도 2호선 전동차 추진제어장치 STACK 전력소자(IGBT) 개선관련 사전협의 및 운행승인 요청

1. 귀 기관의 무궁한 발전을 기원합니다.  
2. 부산도시철도 2호선 전동차 추진제어장치 STACK 전력소자(IGBT) 개선관련 본선영업시운전 시험을 위해 사전협의 및 운행승인을 다음과 같이 요청합니다.

가. 관련근거 : 철도안전법 제38조의2(철도차량의 개조 등), 철도차량 개조검사 시행지침 제6조제6항  
나. 개조대상 : 부산도시철도 2호선 전동차 대표 1개 편성  
다. 요청사유 : 철도차량 개조의 타당성 및 적합성 등에 관한 검토·시험을 위한 철도차량 운행승인

붙임 1. 사전협의 및 운행승인 요청자료 1식(별도송부).  
2. 철도차량 대표편성 운행의 안전성에 대한 검토 자료 1부.(별도송부) 끝.

부산교통공사사장

담당자 이진환 연구개발부장 이달우 기술연구원장 전결 12/04  
이항재

철조자

시행 기술연구원-4186 { 2020.12.04. } 접수 { }  
우 47263 부산광역시 부산진구 중앙대로644번길 20(명전동) / http://www.humetro.busan.kr/  
전화 051-640-7555 /전송 051-640-6951 /jin2023145@humetro.busan.kr / 공개  
**기쁜소식입니다 기쁜소식입니다 열려있는 더키오**

2020/12/16 11:20:52 10.3.2.107

2020.12.4. : 개조승인 요청  
(부산교통공사 → 한국철도기술연구원)

PRIDE KRR1, 미래교통 신기술 원조의 리더



**한국철도기술연구원**



수신 부산교통공사사장  
(경유) 기술연구원

제목 [PR20-40] 부산도시철도 2호선 전동차 추진제어장치 STACK 전력소자(IGBT) 개조 사전협의 및 운행승인 결과 통보

1. 귀사의 무궁한 발전을 기원합니다.  
2. 관련근거  
가. 부산교통공사 기술연구원-4186 (2020.12.04.)  
나. 국토교통부 고시 제2018-758호 철도차량 개조검사 시행지침 제5조(사전협의)

3. 귀사에서 신청한 "부산도시철도 2호선 전동차 추진제어장치 STACK 전력소자(IGBT) 개조 사전협의 및 운행승인"는 한시적 본선 운행시험을 위한 개조로 철도안전법 시행규칙 제75조의4(철도차량의 경미한 개조)1항 6호로 "개조신고"에 해당됨을 통보드립니다.

4. 운행 승인을 위한 신청자 제출 자료를 검토한 결과 철도차량 개조검사 시행지침 제6조 6항에 의한 법적 요건은 만족한 것으로 판단되므로 철도안전관리체계에 따라 안전하게 본선 운행시험을 진행하시기 바랍니다.

붙임: 1. 사전협의 회의록 사본 1부

한국철도기술연구원장

담당자 김인용 원장 12/16  
신덕호

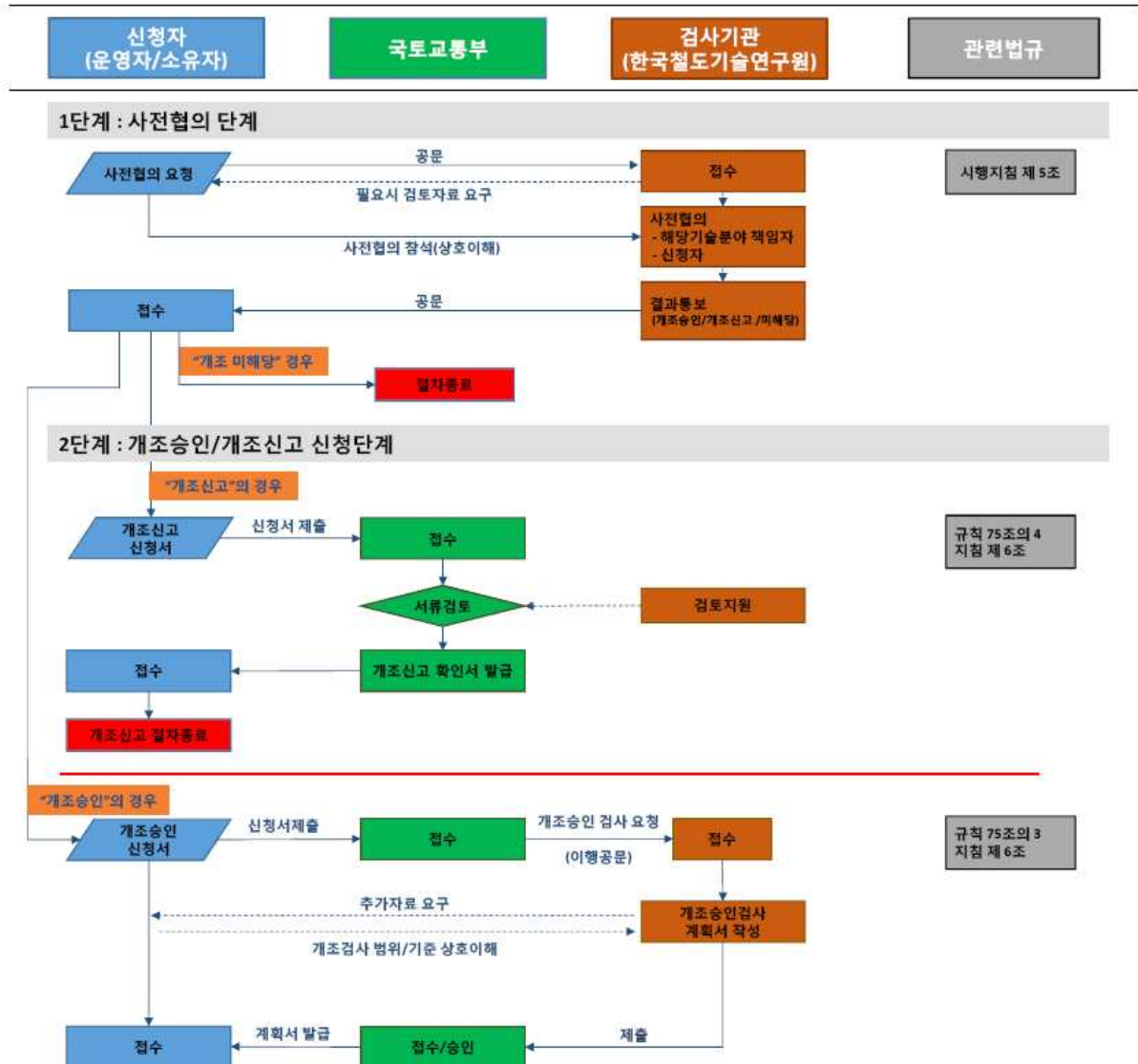
철조자 원장 김영모 원장 김남표

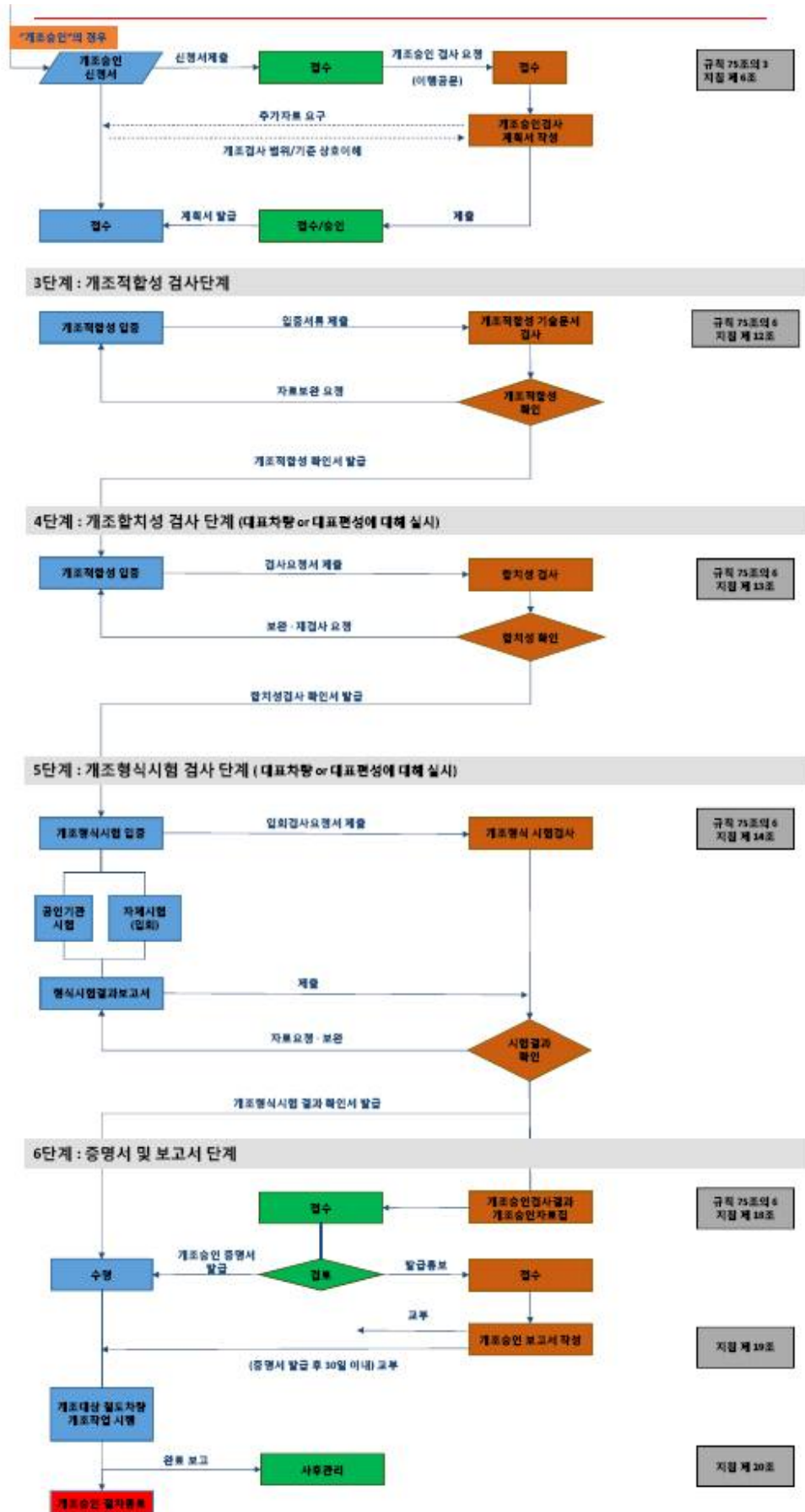
시행 적합성평가원-001427 { 2020.12.16. } 접수 기술연구원-4338 { 2020.12.16. }  
우 16105 경기도 의왕시 철도박물관로 176 / http://www.krri.re.kr/  
전화 043-249-8243 /전송 031-460-5159 /inyong.kim@krri.re.kr / 공개

2020/12/16 11:20:54 10.3.2.107

2020.12.16. : 개조승인 및 결과 통보  
(한국철도기술연구원 → 부산교통공사)

## ② 개조승인업무





③ 3개월 영업 운행

본선 시운전 시험 후 한국철도기술연구원 개조승인을 통해 영업운전 3개월 동안 운행하여 개발품 IGBT 스택이 이상이 없는지 확인한다.

시민이 행복한 동북아 해양수도 부산



**부산교통공사**



수신자 (주)이건산전 대표이사 이용범  
(경유)

제목 국가연구개발사업 개발품 본선 시험을 위한 영업시운전 시행 알림

---

Ⅱ. 귀사의 무궁한 발전을 기원합니다.

2. 기술연구원-4186(2020.12.04.)호 및 한국철도기술연구원 적합성평가팀-1427(2020.12.16.)호, 차량차-7145(2020.12.16.)와 관련, IGBT STACK 개발품의 본선 시험을 위한 영업시운전을 다음과 같이 시행함을 알려드립니다.

가. 영업시운전 일정

- 1) 운행기간 : 2020.12.16.(수) ~ 2021.2.28.(일), 75일간
- 2) 운행구간 : 2호선 본선 구간(양산~장산)
- 3) 운행편성 : 2호선 전동차 제39편성

※ 개발품 취부위치 : 39편성 4호차(향후 운행 안정성 확보후 1개 UNIT 추가확대)

나. 협조사항

- 1) 운행기간내 안전성 확보를 위한 기술지원 및 비상연락체계 구축
- 2) 코로나19 확산에 따른 사회적 거리두기 및 예방수칙 준수철저

붙임 관련 문서사본 각 1부, 끝.

부산교통공사사장



---

|     |                                    |                                |                                    |        |                 |
|-----|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------|-----------------|
| 발신자 | 이전관                                | 영구개발팀장                         | 이달우                                | 기술연구팀장 | 연일 12/16<br>이창재 |
| 참조자 |                                    |                                |                                    |        |                 |
| 시행  | 기술연구원-4356                         | ( 2020.12.16. ) 접수             | ( )                                |        |                 |
| 우   | 47353 부산광역시 부산진구 중앙대로544번길 20(범천동) | / http://www.humetro.busan.kr/ |                                    |        |                 |
| 전화  | 051-640-7555                       | /전송 051-640-6851               | / jin2003145@humetro.busan.kr / 공개 |        |                 |

**기본은 지키고 기준은 높이고 열정은 더하고**



## 사. IGBT 형 인버터 스택 시험기 제작

### (1) 사양

| 항목                           | 제원                                     | 비교 |
|------------------------------|----------------------------------------|----|
| Current Supply Voltage Range | 10 ~ 1,800 V                           |    |
| Collector Current Supply     | 0 ~ 6A                                 |    |
| 제어장치 전원                      | ±45V, 20kHz(5%)                        |    |
| 제어 장치 입력 신호                  | Freq : 500Hz ~ 3kHz<br>duty : 5% ~ 95% |    |

| 항목                  | 제원                  | 비교 |
|---------------------|---------------------|----|
| Test Duration Range | Up to 9,999 Hours   |    |
| 데이터 수집              | 4채널 저장              |    |
| 운용 전압               | 단상 220V / 20A       |    |
| 부하 저항               | 1KW (R-L) LOAD      |    |
| 온도 범위               | -20℃ ~ 65℃          |    |
| 습도 범위               | 30 ~ 80 %           |    |
| 사이즈(W × D × H)      | 600 × 1050 × 1700mm |    |
| 무게                  | < 60 kg             |    |

표 2 시험기 사양

### (2) 제어부가기능

- Collector Current, Voltage 수집 센서
- 데이터 저장 기능 ( 추후 데이터 분석 자료 사용)
- 현차 차량 가변 속도 시뮬레이터 기능
- 속도 가변 기능( 정속, 급속, 저속 등)
- 터치식 모니터로 제어
- 온도 및 각종 전류 / 전압 측정 자료 수집

### (3) 구성블록도

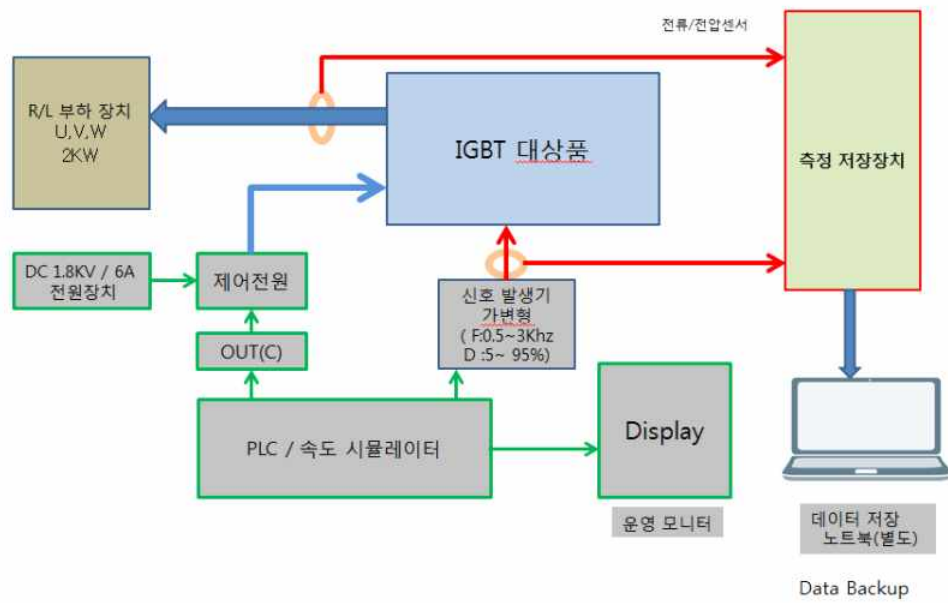


그림 43.IGBT 신뢰성 시험 장치 구성

(4) 시험기 사진



그림 44. IGBT형 인버터 스택 시험기

## 아. 가속수명시험

### (1) 가속수명 모델링

부산2호선 노선의 전동차 운행 구간에서 전력사용 그래프를 보면 다음과 같다. 이 중 한 구간을 보면 역행과 회생시 인버터 모듈이 동작하는 것을 확인할 수 있다.

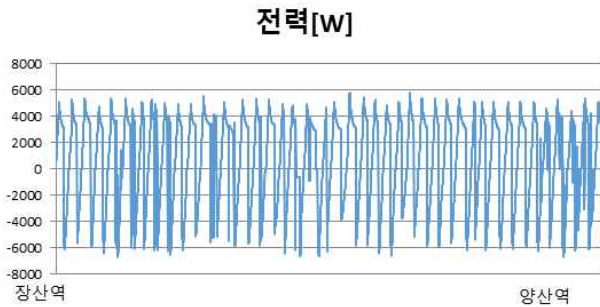


그림 45. 전력 그래프

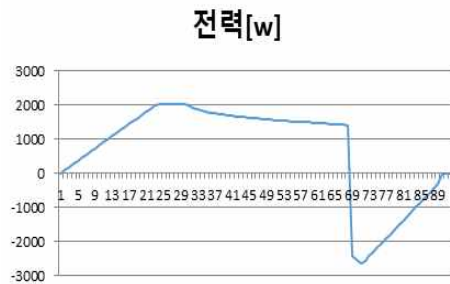


그림 46. 한 역간 전력 그래프

전동차 운행 분석 결과 부산2호선 전동차 IGBT 동작시간은 평균 89초이고 일일 전동차 운행 시간을 5시부터 새벽 1시까지 19시간으로 할 때 12회 왕복 운행하고 이는 44,856초이고 월 12.46시간, 연간 4,548시간 운행하는 것으로 나타났다.

### ○ 스위칭 시간 분석

- 부산2호선 전동차 역간 운행시 평균 스위칭 시간 : 89초
- 부산2호선 역간 수 : 42역간 (총 43개역)
- 1일 왕복운행 횟수 : 12회(편도 운행 1.5시간, 19시간 운행 가정, 오전5시 ~ 오전1시)
- 1일 스위칭 동작시간 : 12.46시간/일 (44,856초)
- 1년 스위칭 동작시간 : 4,548시간/년

시제품 수는 연구과제 여건상 3개밖에 할 수 없어 3개로 정하고 이에 대한 시험시간을 산정할 수 있다. 그러므로 와이블 분포에서 형상모수  $\beta = 5.0$ , 신뢰수준을 90%로 하여 수명과 신뢰수준에 따른 수명비를 산출 하였다.

시험시간과  $B_{10}$  수명의 비 수식은 다음과 같다

$$\frac{t}{B_{10}} \geq \left( \frac{\chi^2_{1-\alpha} [2(C+1)]}{2 \cdot n \cdot \ln[1-0.1]^{-1}} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

$B_{10}$  수명과 신뢰수준에 따른 수명비는 다음 표와 같다.

표 1.  $B_{10}$  수명과 신뢰수준에 따른 수명비

|     | 신뢰성수준90% | 신뢰성수준80% | 신뢰성수준60% |
|-----|----------|----------|----------|
| B10 | 1.488    | 1.385    | 1.237    |
| B20 | 1.280    | 1.192    | 1.065    |
| B40 | 1.085    | 1.010    | 0.902    |

형상모수에 따른 신뢰수준 90%에서의 수명비는 다음과 같다.

표 2. 형상모수에 따른 신뢰수준 90%에서의 수명비

| 신뢰성수준90% | 형상모수 | $\beta=3$ | $\beta=5$ | $\beta=10$ |
|----------|------|-----------|-----------|------------|
| B10      | 수명비  | 1.939     | 1.488     | 1.220      |
| B20      | 수명비  | 1.510     | 1.280     | 1.131      |
| B40      | 수명비  | 1.145     | 1.085     | 1.042      |

즉, 3개의 시제품으로 보증하고자 하는  $B_{10}$  수명의 1,488배 시험을 하여 고장이 한 개도 없으면  $B_{10}$  수명을 90% 신뢰수준으로 보증할 수 있다.

○ 신뢰수준 90%,  $B_{10}$  수명을 보증하기 위한 가속수명 시험시간

- 시제품 수 3개, 형상모수  $\beta=5.0$ 을 고려
- 10년 수명 보증(신뢰수준 90%,  $B_{10}$  수명)
  - 10년 기준 스위칭 동작시간 계산 : 4,548시간/1년으로 설정하고 계산
  - 10년 보증을 위한  $B_{10}$  수명 :

$$4,548\text{시간} \times 10\text{년} \times 1,488 = 67,654\text{시간}/10\text{년}$$

⇒ 가속시험 필요

○ 온도 스트레스에 의한 가속시험

- 가속수명시험 :

수명-스트레스 관계식 : 온도 스트레스 조건이므로 아레니우스(Arrhenius) 모형을 사용하여 시험시간을 도출한다. 가속계수 AF는 다음과 같이 계산한다.

$$AF = L_u / L_a = \exp[(E/k)(1/T_u - 1/T_a)]$$

여기서,  $L_u$  = 실제 사용 환경온도에서의 수명

$L_a$  = 가속 온도에서의 수명

$E$  = 활성화 에너지(단위: eV), 평균활성화 에너지 0.94 eV 고려

$k$  = 기체상수( $8.6173 \times 10^{-5}$  eV/K)

$T_u$  = 사용환경온도

$T_a$  = 가속 온도

표 3. 가속계수에 따른 가속수명시험시간

| 구분 | 사용온도<br>(℃) | 시험온도<br>(℃) | 가속계수<br>(AF) | 시험기간<br>(h) | 시험기간<br>(일) |
|----|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| 1  | 40          | 40          | 1            | 67,654      | 2,819       |
| 2  | 40          | 65          | 13.2         | 5,138       | 214         |
| 3  | 40          | 70          | 21.1         | 3,210       | 134         |
| 4  | 40          | 75          | 33.3         | 2,033       | 85          |
| 5  | 40          | 80          | 51.9         | 1,304       | 54          |
| 6  | 40          | 90          | 121.6        | 557         | 23          |

위 표 중 80℃ 시험시 가속시험시간은 54일로 예상할 수 있다. 가속수명시험 결과 총 54일(1,304시간) 동안 고장이 없는 경우가 발행하는 것을 가정하면, 신뢰수준 90%인 경우 고장률  $\lambda$  와 가속계수 (AF), 가속시험시간( $T_a$ )의 관계식은 다음과 같다.  $\lambda = x^2_{(1-CL)}(2r+2)/2x(1/(n \times AF \times T_a))$ 이고 평균수명 MTTF =  $1/\lambda = 2 \times n \times AF \times T_a / x^2_{(1-CL)}(2r+2)$ 가 된다.

## (2) 가속수명 시뮬레이터 제작

전동차 동력제어장치인 인버터 모듈 또는 스택의 주요 전력 소자인 GTO를 IGBT로 적용하여 개량한 IGBT 스택에 대한 가속수명 시뮬레이터이다. IGBT 스택을 항온항습기 챔버에 넣은 후에 고온에서 전동차 운행 패턴으로 제어를 하여 수명을 확인하는 것이다.

아래 그림과 같이, 가속수명 시험모드에 따라 고온을 유지하도록 하는 챔버와 IGBT 스택을 전동차 운행 패턴으로 제어하도록 하는 시뮬레이터로 구성되며, 시뮬레이터는 IGBT 스택을 구동시키는 전압제어부와 제어부에 전원을 공급하는 전원부, 신호를 발생시키는 파형발생부, 시뮬레이션 및 데이터를 저장하는 컴퓨터 및 소프트웨어로 구성된다.

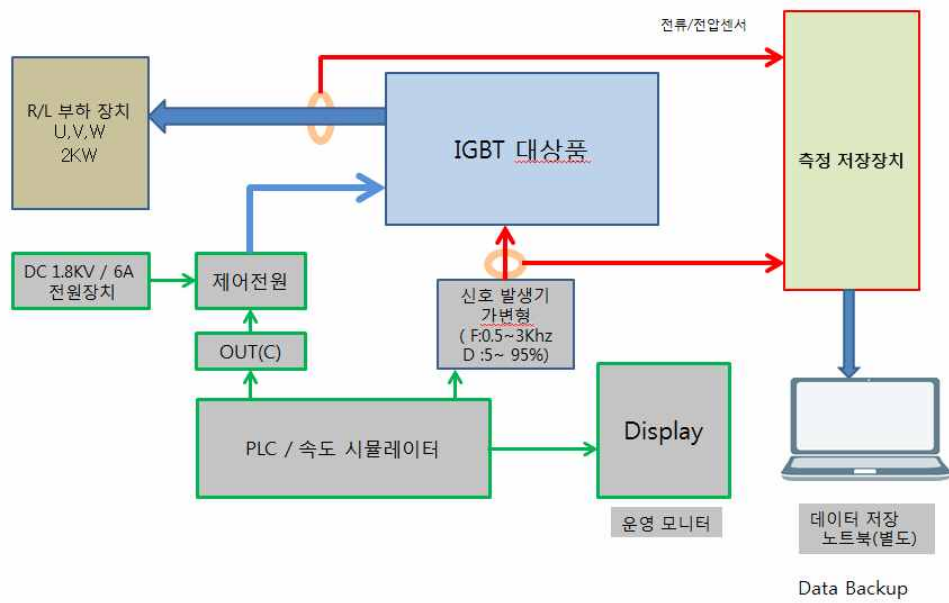


그림 47. 가속수명 시뮬레이터 구성



그림 48. 시뮬레이터 정면



그림 49. 시뮬레이터 측/후면

스위칭 주파수에 따른 스트레스 반복 시험을 진행한다. 다양한 조건에서 시험을 할 수 있도록 시뮬레이터를 제작하였다.

### (3) 가속수명시험

IGBT개량 스택을 항온항습기에 넣고 시뮬레이터와 연결하여 시험을 수행하였다.

#### 1) 현장설치 및 시험



그림 50. 항온항습기



그림 51. 시뮬레이터와 스택 연결 교체



그림 52. 시뮬레이터와 스택 설치



그림 53. 가속수명시험

#### 2) 시험 결과

3개의 시제품을 대상으로 가속수명시험이 수행되었다. 항온항습기 내부 공간 상 1대씩 차례로 시험을 수행하였다. 시험은 온도 80℃, 습도 70%에서 진행하였고 무고장이어서 온도를 올려 90℃에서 시험을 수행하였다. 매 시간 데이터가 저장되나 특정 시간의 데이터를 추출하여 delay time의 기준 범위내에 들어오는지 확인하였다.

• 80℃ : 각 시료마다 54일간 시험

| 온도  | 습도    | 주파수 변화                                              | delay time( $\mu$ s)                                                                                                                                                                                             | 시험 시간(h) | 측정 시간(h)           |
|-----|-------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------------|
| 80℃ | 70%RH | 300Hz(40초)→500Hz(30초)→1kHz(10초)→500Hz(5초)→300Hz(4초) | <ul style="list-style-type: none"> <li>on 기준</li> <li>- 7.5<math>\mu</math>s<math>\pm</math>10%<math>\mu</math>s</li> <li>off 기준</li> <li>- 41.5<math>\mu</math>s<math>\pm</math>10%<math>\mu</math>s</li> </ul> | 1,304    | 0, 500, 1000, 1304 |

- 80℃에서 무고장이어서 온도를 상승시켜 시험. 90℃ : 각 시료마다 23일간 시험

| 온도  | 습도    | 주파수 변화                                              | delay time(μs)                                                                                                                                                     | 시험 시간(h) | 측정 시간(h)                   |
|-----|-------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------|
| 90℃ | 70%RH | 300Hz(40초)→500Hz(30초)→1kHz(10초)→500Hz(5초)→300Hz(4초) | <ul style="list-style-type: none"> <li>· on 기준<br/>- <math>7.5\mu s \pm 10\% \mu s</math></li> <li>· off 기준<br/>- <math>41.5\mu s \pm 10\% \mu s</math></li> </ul> | 557      | 0, 100, 200, 300, 400, 557 |

항온항습기에 1대의 스택만 넣을 수밖에 없는 상황에서 3개의 IGBT 스택을 순차적으로 시험하는 방안으로 하여 2020년 2월 5일부터 시작하였다. 시작 당시 On, Off Delay 시간기준은 on 기준  $7.5\mu s \pm 10\% \mu s$ , off 기준  $41.5\mu s \pm 10\% \mu s$ 으로 하였다. 따라서 3대 모두 동일한 조건으로 시험하여야 하므로 시험이 끝나는 동안 On, Off Delay 시간기준을 동일하게 하여 시험을 수행하였다. 80℃에서 무고장이어서 90℃로 온도를 상승시켜 시험하는 경우에 대해서도 동일한 On, Off Delay 시간기준으로 시험을 수행하였다. 결과 그래프는 반주기 그래프로 나타내었다. 즉, 1kHz는 1주기당 1ms이므로 반주기 0.5ms

$(\frac{1}{1000} \times \frac{1}{2})$ 로 결과 그래프가 나타난다. 500Hz의 반주기는  $1ms(\frac{1}{500} \times \frac{1}{2})$ , 300Hz의 반주기는 1.67ms

$(\frac{1}{300} \times \frac{1}{2})$ 가 된다.

○ 시험데이터 및 파형(80℃ 시험)

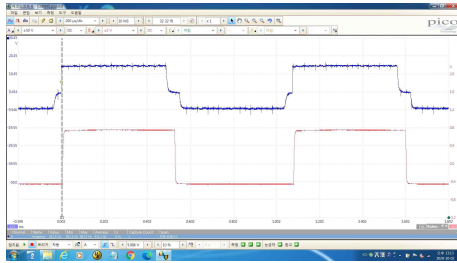
• 시제품 #1

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 0h(2월 5일)             |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 80℃         | 1kHz      | 7.501                                  | 41.56                                    |
|      | 80℃         | 500Hz     | 7.527                                  | 41.52                                    |
|      | 80℃         | 300Hz     | 7.484                                  | 41.34                                    |

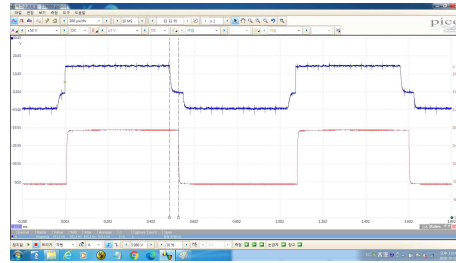
| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 500h(2월 25일)          |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 80℃         | 1kHz      | 7.449                                  | 41.37                                    |
|      | 80℃         | 500Hz     | 7.475                                  | 41.47                                    |
|      | 80℃         | 300Hz     | 7.492                                  | 41.21                                    |

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 1000h(3월 16일)         |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 80℃         | 1kHz      | 7.415                                  | 41.48                                    |
|      | 80℃         | 500Hz     | 7.432                                  | 41.56                                    |
|      | 80℃         | 300Hz     | 7.475                                  | 41.45                                    |

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 1304h(3월 30일)         |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 80℃         | 1kHz      | 7.381                                  | 41.53                                    |
|      | 80℃         | 500Hz     | 7.467                                  | 41.25                                    |
|      | 80℃         | 300Hz     | 7.432                                  | 41.15                                    |



on

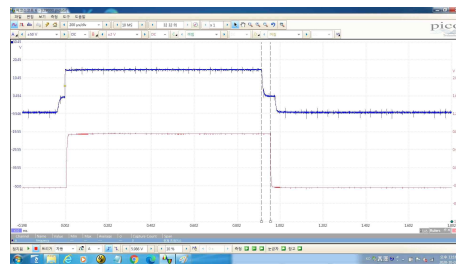


Off

1kHz  
Measuring time : 0h

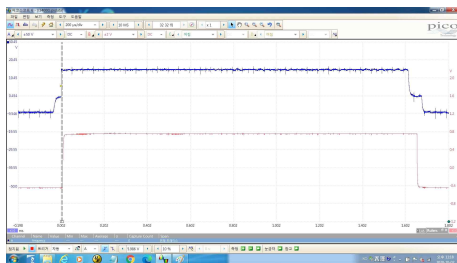


on

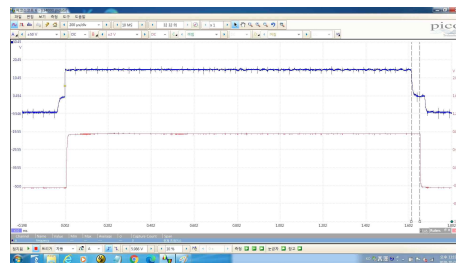


Off

500Hz  
Measuring time : 0h

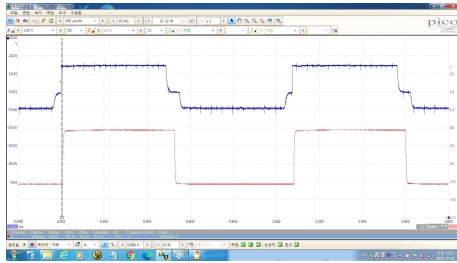


on

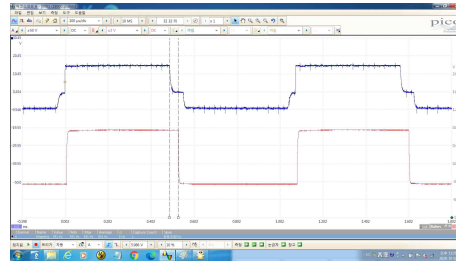


Off

300Hz  
Measuring time : 0h



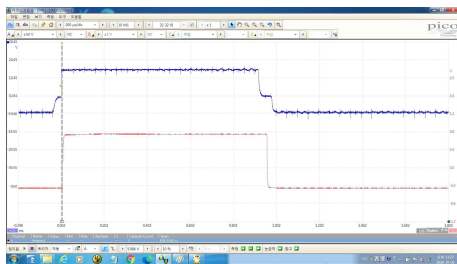
on



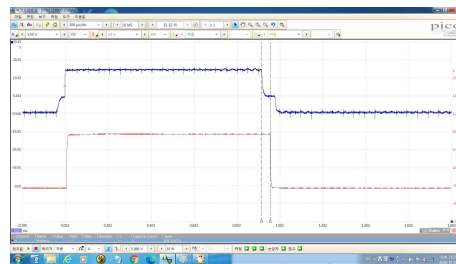
Off

1kHz

Measuring time : 500h



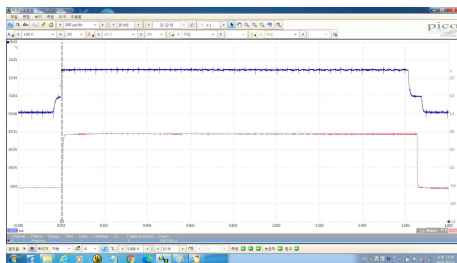
on



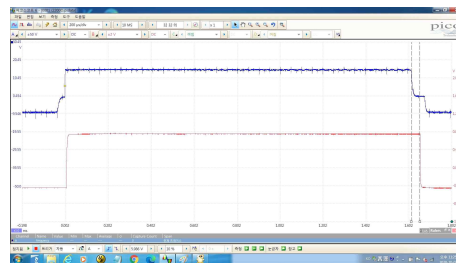
Off

500Hz

Measuring time : 500h



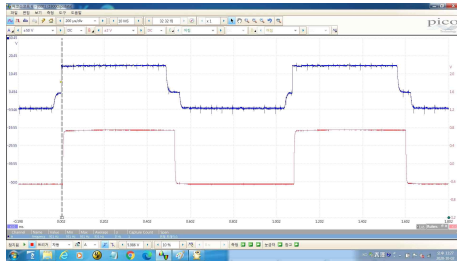
on



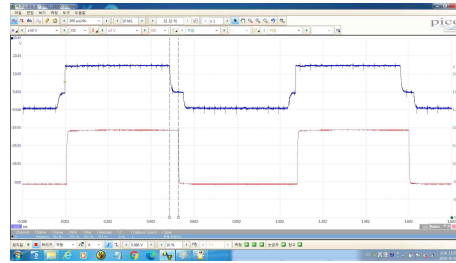
Off

300Hz

Measuring time : 500h

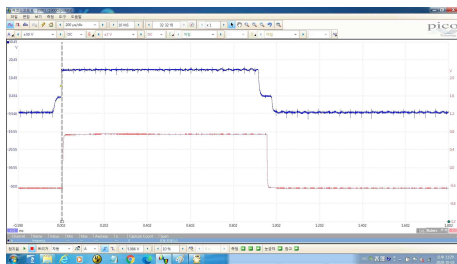


on

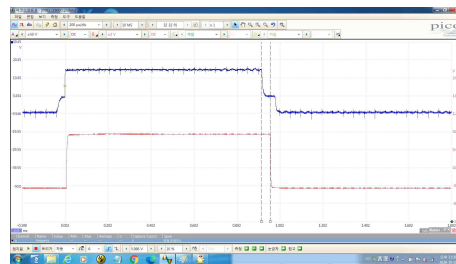


Off

1kHz  
Measuring time : 1000h

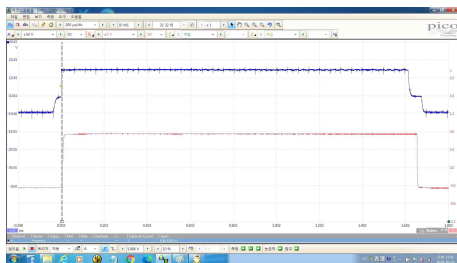


on

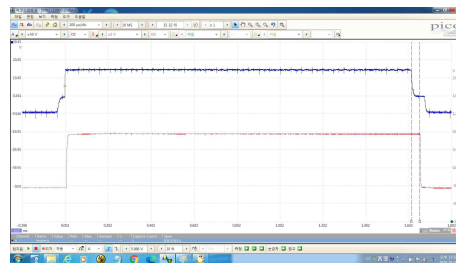


Off

500Hz  
Measuring time : 1000h

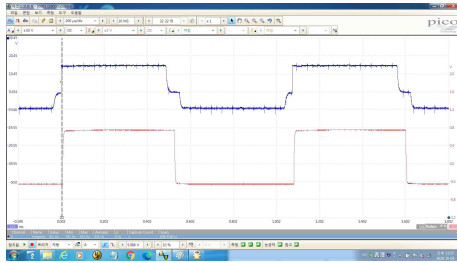


on

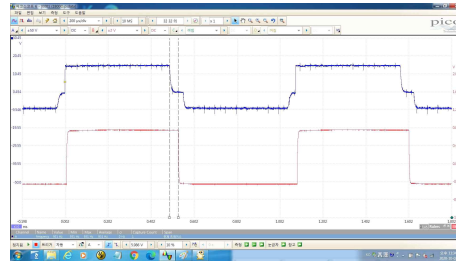


Off

300Hz  
Measuring time : 1000h

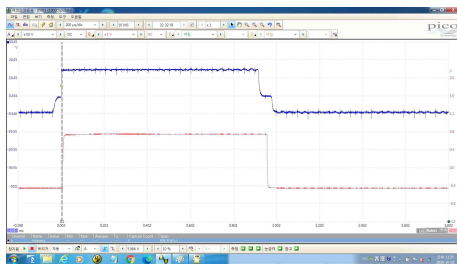


on

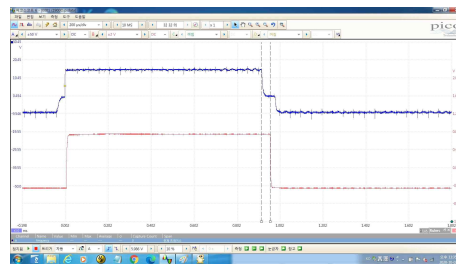


Off

1kHz  
Measuring time : 1304h

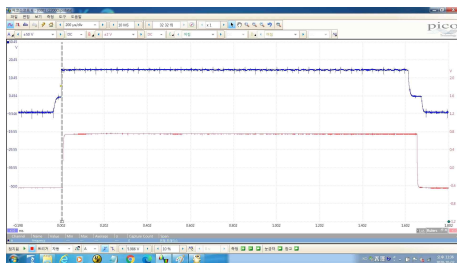


on

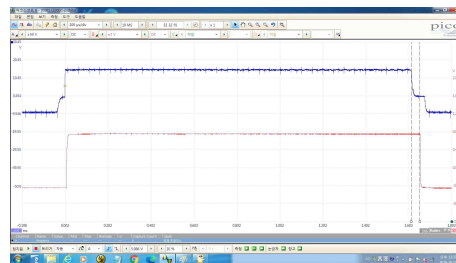


Off

500Hz  
Measuring time : 1304h



on



Off

300Hz  
Measuring time : 1304h

• 시제품 #2

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 0h(4월 3일)             |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 80℃         | 1kHz      | 7.587                                  | 41.24                                    |
|      | 80℃         | 500Hz     | 7.449                                  | 41.17                                    |
|      | 80℃         | 300Hz     | 7.505                                  | 41.43                                    |

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 500h(4월 23일)          |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 80℃         | 1kHz      | 7.217                                  | 41.25                                    |
|      | 80℃         | 500Hz     | 7.553                                  | 41.27                                    |
|      | 80℃         | 300Hz     | 7.467                                  | 41.19                                    |

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 1000h(5월 14일)         |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 80℃         | 1kHz      | 7.484                                  | 41.07                                    |
|      | 80℃         | 500Hz     | 7.587                                  | 41.58                                    |
|      | 80℃         | 300Hz     | 7.518                                  | 41.24                                    |

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 1304h(5월 27일)         |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 80℃         | 1kHz      | 7.586                                  | 41.13                                    |
|      | 80℃         | 500Hz     | 7.449                                  | 41.03                                    |
|      | 80℃         | 300Hz     | 7.381                                  | 41.51                                    |

• 시제품 #3

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 0h(5월 29일)            |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 80℃         | 1kHz      | 7.381                                  | 41.51                                    |
|      | 80℃         | 500Hz     | 7.497                                  | 41.22                                    |
|      | 80℃         | 300Hz     | 7.518                                  | 41.65                                    |

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 500h(6월 18일)          |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 80℃         | 1kHz      | 7.484                                  | 41.34                                    |
|      | 80℃         | 500Hz     | 7.415                                  | 41.41                                    |
|      | 80℃         | 300Hz     | 7.441                                  | 41.09                                    |

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 1000h(7월 9일)          |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 80℃         | 1kHz      | 7.432                                  | 41.15                                    |
|      | 80℃         | 500Hz     | 7.398                                  | 41.25                                    |
|      | 80℃         | 300Hz     | 7.536                                  | 41.19                                    |

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 1304h(7월 22일)         |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 80℃         | 1kHz      | 7.398                                  | 41.46                                    |
|      | 80℃         | 500Hz     | 7.458                                  | 41.42                                    |
|      | 80℃         | 300Hz     | 7.454                                  | 41.29                                    |

○ 시험데이터 및 파형(90℃ 시험)

• 시제품 #1

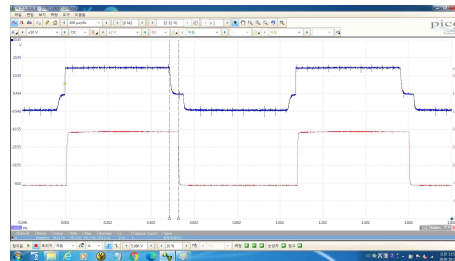
| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 0h(7월 30일)            |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 90℃         | 1kHz      | 7.441                                  | 41.23                                    |
|      | 90℃         | 500Hz     | 7.398                                  | 41.43                                    |
|      | 90℃         | 300Hz     | 7.465                                  | 41.34                                    |

| 시료번호 | Temperature | Frequency | 고장 : 7h(7월 30일)                        |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 90℃         | 1kHz      | -                                      | -                                        |
|      | 90℃         | 500Hz     | -                                      | -                                        |
|      | 90℃         | 300Hz     | -                                      | -                                        |

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 133(8월 4일)            |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 90℃         | 1kHz      | -                                      | -                                        |
|      | 90℃         | 500Hz     | -                                      | -                                        |
|      | 90℃         | 300Hz     | -                                      | -                                        |

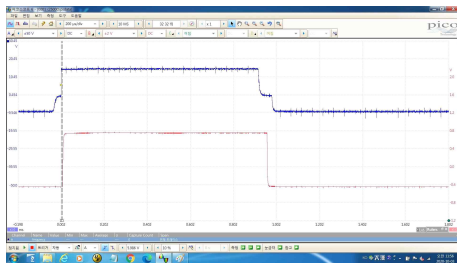


on

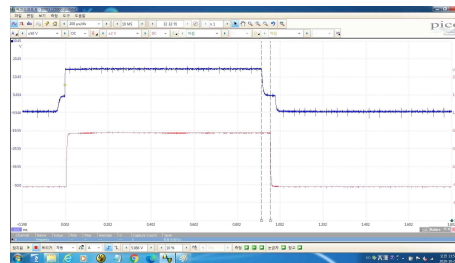


Off

1kHz  
Measuring time : 0h

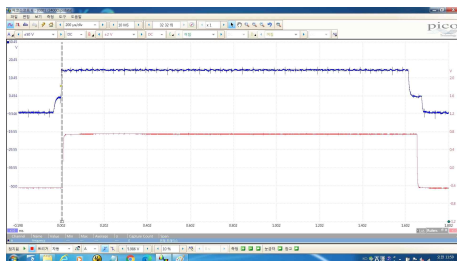


on

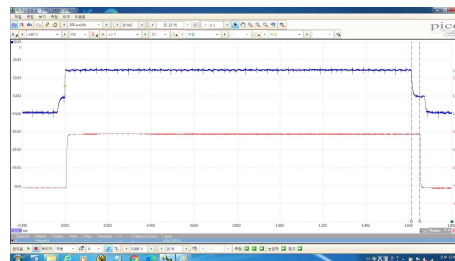


Off

500Hz  
Measuring time : 0h



on



Off

300Hz  
Measuring time : 0h

• 시제품 #2

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 0(8월 10일)             |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 90℃         | 1kHz      | 7.467                                  | 10.91                                    |
|      | 90℃         | 500Hz     | 7.486                                  | 41.38                                    |
|      | 90℃         | 300Hz     | 7.473                                  | 41.16                                    |

| 시료번호 | Temperature | Frequency | 고장 : 27h(8월 11일)                       |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 90℃         | 1kHz      | -                                      | -                                        |
|      | 90℃         | 500Hz     | -                                      | -                                        |
|      | 90℃         | 300Hz     | -                                      | -                                        |

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 122(8월 15일)           |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 90℃         | 1kHz      | -                                      | -                                        |
|      | 90℃         | 500Hz     | -                                      | -                                        |
|      | 90℃         | 300Hz     | -                                      | -                                        |

• 시제품 #3

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 0(8월 20일)             |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 90℃         | 1kHz      | 7.412                                  | 41.12                                    |
|      | 90℃         | 500Hz     | 7.459                                  | 41.40                                    |
|      | 90℃         | 300Hz     | 7.437                                  | 41.22                                    |

| 시료번호 | Temperature | Frequency | 고장 : 5h(8월 21일)                        |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 90℃         | 1kHz      | -                                      | -                                        |
|      | 90℃         | 500Hz     | -                                      | -                                        |
|      | 90℃         | 300Hz     | -                                      | -                                        |

| 시료번호 | Temperature | Frequency | Measuring time : 147(8월 26일)           |                                          |
|------|-------------|-----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|      |             |           | on 기준<br>7.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s | off 기준<br>41.5 $\mu$ s $\pm$ 10% $\mu$ s |
| 1    | 90℃         | 1kHz      | -                                      | -                                        |
|      | 90℃         | 500Hz     | -                                      | -                                        |
|      | 90℃         | 300Hz     | -                                      | -                                        |

가속수명시험 결과 80℃ 시험시 총 54일(1,304시간) 동안 고장이 없었다. 신뢰수준 90%인 경우 고장률  $\lambda$  와 신뢰수준(CL), 고장수(r), 가속계수 (AF), 가속시험시간(Ta), 시료수(n)의 관계식  $\lambda = x^2(1-CL)(2r+2)/2x(1/(n \times AF \times Ta))$ 에 의해 평균수명 MTTF =  $1/\lambda = 2 \times n \times AF \times Ta / x^2(1-CL)(2r+2)$ 이 예측된다.

80℃ 에서 시제품 3대로 가속시험을 고장이 없이 1,304시간 동안 수행한 것으로 가속계수는 51.9이며, 정상 사용조건 40℃ 에서 MTTF를 계산하면  $MTTF = 2 \times 3 \times 51.9 \times 1,304 / x^2(0.1)(2) = 2 \times 202,962 / 4.61 = 88,145$  시간(약 10.06년)으로 예측되었다. 90℃ 로 온도를 높여서 시험한 결과 시제품 3대 중 5시간에서 시료가 처음으로 고장이 발생하여 수명예측은 정상시료와 고장시료를 구분하여 예측한다. 상기 MTTF 식에 고장시간의 합을 대입하여  $MTTF = 2x\{\sum ((n-r)*AF*Ta/x^2(1-CL)(2r+2))\}$  식으로 계산하면,  $MTTF = 2x\{3 \times 51.9 \times 1,304 / x^2(0.1)(2) + 2 \times 121.6 \times 5 / x^2(0.1)(4)\} = 2x\{202,962 / 4.61 + 1,216 / 7.78\} = 88,365$ 시간(약 10.09년)으로 예측되었다.

## 자. RAMS

□ 운영사 유사장치 고장데이터 수집 및 분석

○ 주회로, 추진장치 고장분석

- 부산교통공사의 2호선에 대한 3년치의 고장데이터를 분석하여 인버터를 포함하고 있는 주회로,추진장치 고장 비율을 분석하였다. 비교적 ATC/ATO장치 다음으로 주회로,추진장치의 고장 비율이 많은 편으로 도출되었다.

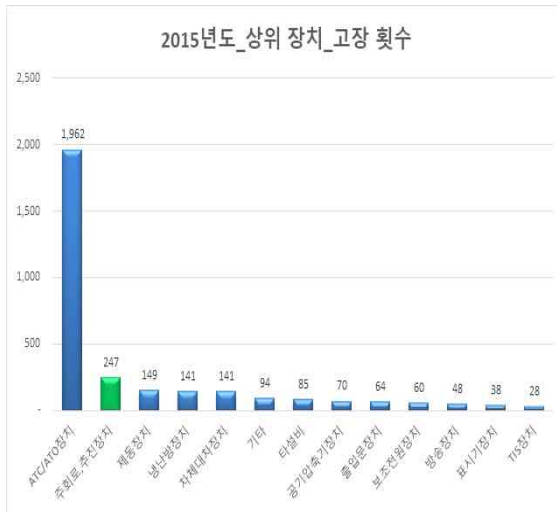


그림 54. 2015년 전동차 구성품 고장 비율

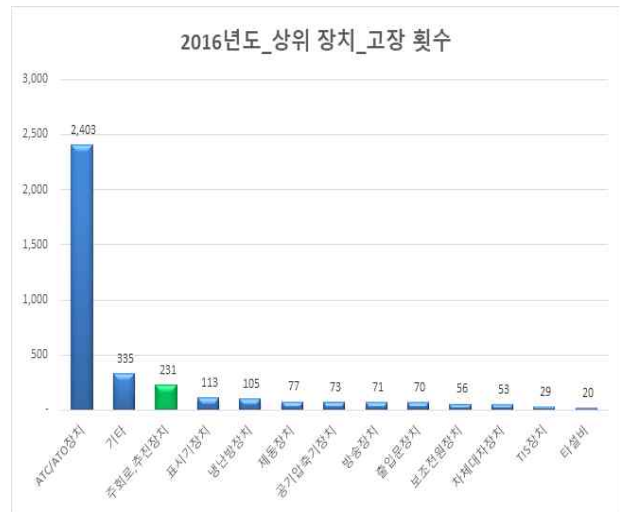


그림 55. 2016년 전동차 구성품 고장 비율

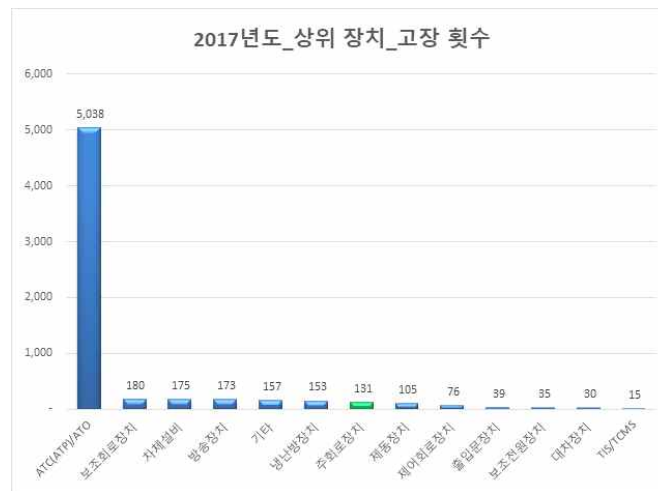


그림 56.. 2017년 전동차 구성품 고장 비율

○ 인버터 고장분석

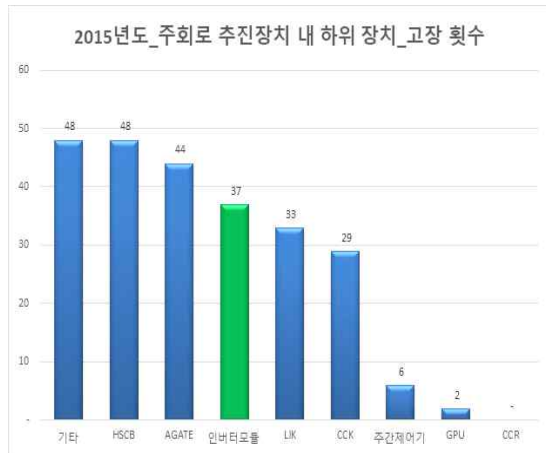


그림 57. 2015년 추진장치 고장 비율

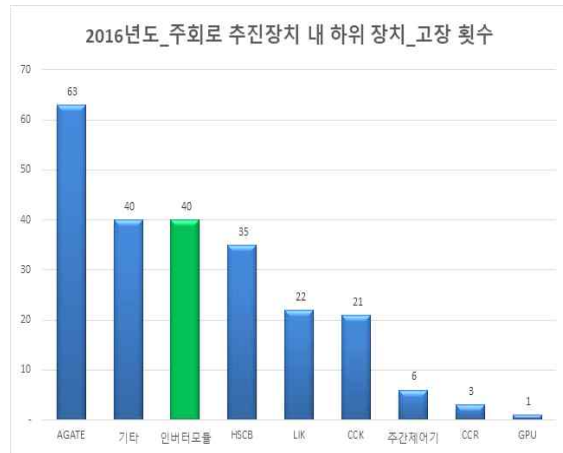


그림 58. 2016년 추진장치 고장 비율

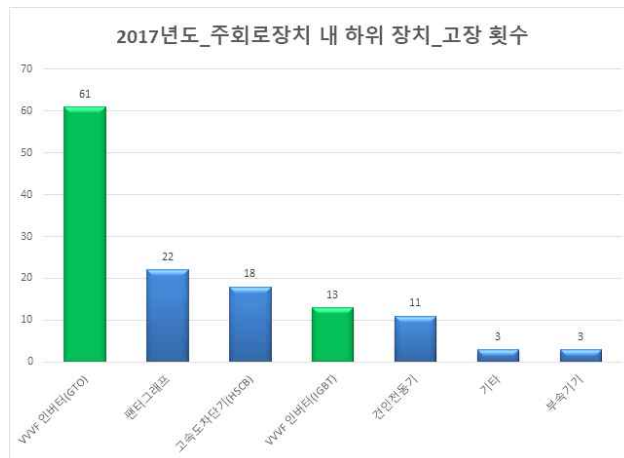


그림 59.. 2017년 추진장치 고장 비율

□ RAMS 요구사항 정의

○ 신뢰성 요구사항

| 요구사항 식별자      | 내 용                                                       |
|---------------|-----------------------------------------------------------|
| REQ-IGBT-R001 | 이상전압 또는 과전류에 대한 보호 기능이 있어야 한다.                            |
| REQ-IGBT-R002 | 충격 및 진동에 견딜 수 있도록 내마모성 및 유연성이 있어야 한다.                     |
| REQ-IGBT-R003 | 외부로부터 발생하는 정전기에 의하여 손상될 수 있는 부품은 점검/교체 또는 보호되어야 한다.       |
| REQ-IGBT-R004 | 고전압이 사용됨으로 감전 등의 인명 사고를 예방하고 설비 성능에 영향을 끼치지 않도록 설계되어야 한다. |
| REQ-IGBT-R005 | 1편성 중 IGBT 스택 차량과 GTO 스택 차량의 혼용하여 사용 가능해야 한다.             |
| REQ-IGBT-R006 | 차량의 종류(도시바, 알스톰, 미쯔비시 등)에 상관없이 적용 가능해야 한다.                |
| REQ-IGBT-R007 | 현차 시험을 3개월간 실시하여 차량 운행에 이상이 없어야 한다.                       |

| 요구사항 식별자      | 내 용                                            |
|---------------|------------------------------------------------|
| REQ-IGBT-R008 | 차량 운행 시 가속도 변화율(Jerk)이 $0.8m/s^3$ 이하이어야 한다.    |
| REQ-IGBT-R009 | 3상 전압형 VVVF 방식으로 제어되어야 한다.                     |
| REQ-IGBT-R010 | 출력전압은 3상 AC, 1,100V, 508A 기준 이상의 성능을 구현되어야 한다. |
| REQ-IGBT-R011 | 출력주파수는 0 ~ 200Hz 범위를 유지해야 한다.                  |

○ 유지보수성 요구사항

| 요구사항 식별자      | 내 용                                                                                  |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| REQ-IGBT-M001 | 고장을 탐지할 수 있는 방법을 제시할 수 있어야 한다.                                                       |
| REQ-IGBT-M002 | 고장에 대한 조치사항이 명확히 제시되어야 한다.                                                           |
| REQ-IGBT-M003 | 고장정비 수행 시 사용되는 일반 공구가 정의되어야 한다. (예: 드라이버, 토크렌치 등)                                    |
| REQ-IGBT-M004 | 고장정비 수행 시 사용되는 특수 장비가 정의되어야 한다. (예: 온도기록계, 점검장비 등)                                   |
| REQ-IGBT-M005 | 고장정비 수행 시 사용되는 일반 공구 및 특수 장비에 대한 교정 주기가 제시되어야 한다. (예: 6개월, 1년 등)                     |
| REQ-IGBT-M006 | 고장정비 대상 장치에 대한 소요 시간(교환시간 및 수리시간)이 제시되어야 한다. (예: 신품 교환시간 : 2시간, 고장 난 부품 수리 시간 : 3시간) |
| REQ-IGBT-M007 | 고장정비(교환 및 수리) 시 소요 정비인원 수가 정의되어야 한다.                                                 |
| REQ-IGBT-M008 | 각 장치에 대한 고장정비 수리 수준의 단계를 정의해야 한다. (예: 1단계-운영사, 2단계-제작사)                              |
| REQ-IGBT-M009 | 필요 시 고장정비를 위한 특수 시설을 정의해야 한다.                                                        |
| REQ-IGBT-M010 | 예방정비 종류별 주요 점검 대상 및 점검 내용을 정의해야 한다.                                                  |
| REQ-IGBT-M011 | 예방정비 종류별 소요시간이 제시되어야 한다.                                                             |
| REQ-IGBT-M012 | 예방정비별 시 소요 정비인원 수가 정의되어야 한다.                                                         |
| REQ-IGBT-M013 | 예방정비별 사용되는 일반 공구가 정의되어야 한다. (예: 드라이버, 토크렌치 등)                                        |
| REQ-IGBT-M014 | 예방정비별 사용되는 특수 장비가 정의되어야 한다. (예: 온도기록계, 점검장비 등)                                       |
| REQ-IGBT-M015 | 필요 시 예방정비를 위한 특수 시설을 정의해야 한다.                                                        |
| REQ-IGBT-M016 | 주요 장치에 대한 예비품의 적정 보유량을 제시해야 한다.                                                      |
| REQ-IGBT-M017 | 주요 장치에 대한 조달 소요 시간이 제시되어야 한다.                                                        |
| REQ-IGBT-M018 | 장치를 정비할 수 있는 정비기지의 위치를 제시해야 한다.                                                      |
| REQ-IGBT-M019 | 타 장치와의 표준화 또는 호환성 있는 제품을 식별할 수 있어야 한다.                                               |
| REQ-IGBT-M020 | 유지보수에 대한 보증 기간, 보증 수준에 대한 계획을 제시할 수 있어야 한다.                                          |
| REQ-IGBT-M021 | 운영자 및 정비자에 대한 교육 방안을 제시할 수 있어야 한다.                                                   |

□ 신뢰도 목표 및 예측 결과

○ IGBT 인버터의 신뢰도 예측결과는 다음과 같다.

표 74 신뢰도 예측 결과

| 구분          | MKBF       | MTBF      |
|-------------|------------|-----------|
| IGBT 인버터    | 506,528 km | 15,829 hr |
| IGBT 인버터 스택 | 633,160 km | 19,786 hr |

※ GTO 타입에 비해 3배 높은 MT(K)BF 값을 가지는 것으로 분석됨.

○ IGBT 인버터스택의 신뢰도 목표값 대비 약 150% 정도 높아, 신뢰도 목표는 충족할 것으로 예측되었다.

표 75 목표값과 예측값 비교

| 구분   | 목표값       | 예측값       | 달성률    |
|------|-----------|-----------|--------|
| MTBF | 13,034 hr | 19,786 hr | 151.8% |

□ 고장모드, 영향 및 치명도분석 (FMECA)

○ 기능 정의

표 2 IGBT 인버터 기능 트리

| 1수준        | 2수준                | 3수준                  |
|------------|--------------------|----------------------|
| 인버터를 제어한다. |                    |                      |
|            | 전압을 제어한다.          |                      |
|            |                    | 직류 전압을 공급받는다.        |
|            |                    | 직류 전압을 교류 전압으로 변환한다. |
|            |                    | 모터에 교류 전압을 공급한다.     |
|            |                    | PWM방식으로 제어한다.        |
|            |                    | 최대 출력을 추종한다.         |
|            | 전류를 제어한다.          |                      |
|            |                    | 역행 전류를 제어한다.         |
|            |                    | 회생 전류를 제어한다.         |
|            |                    | 전류 토크를 제어한다.         |
| 인버터를 보호한다. |                    |                      |
|            | 이상 직류 전압으로부터 보호한다. |                      |
|            |                    | 직류를 검출한다.            |
|            |                    | 직류 지락을 검출한다.         |
|            | 부하로부터 보호한다.        |                      |
|            |                    | 과전압을 차단한다.           |
|            |                    | 과전류를 차단한다.           |
|            |                    | 저전압을 차단한다.           |
|            |                    | 인버터를 냉각시킨다.          |
|            | 인버터를 모니터링 한다.      |                      |

| 1수준 | 2수준 | 3수준       |
|-----|-----|-----------|
|     |     | 전압을 측정한다. |
|     |     | 전류를 측정한다. |

○ 고장 모드 정의

표 3 IGBT 인버터 고장 모드

| 순번 | 고장 모드        | 순번 | 고장 모드     |
|----|--------------|----|-----------|
| 01 | 전압 전달 불능     | 08 | 정지 기능 불능  |
| 02 | 변압 불능        | 09 | 과전압 보호 불능 |
| 03 | 폭 변조 불능      | 10 | 과전류 보호 불능 |
| 04 | 전압 출력량 감지 불능 | 11 | 저전압 보호 불능 |
| 05 | 역행 전류 제어 불능  | 12 | 공랭식 냉각 불능 |
| 06 | 회생 전류 제어 불능  | 13 | 전압 감지 불능  |
| 07 | 전류 토크 제어 불능  | 14 | 전류 감지 불능  |

○ 고장 원인 정의

표 4 IGBT 인버터 고장 원인

| 순번 | 고장 원인 | 순번 | 고장 원인               |
|----|-------|----|---------------------|
| 01 | 단락    | 08 | 절연파괴                |
| 02 | 단선    | 09 | 용량 저하               |
| 03 | 과전압   | 10 | 전압 금강하              |
| 04 | 과전류   | 11 | 이물질 등으로 인한 공기 주입 차단 |
| 05 | 서지 전압 | 12 | 히트싱크 파열             |
| 06 | 통신 불가 | 13 | 센서 오류               |
| 07 | 과열    | 14 | 전원 차단               |

○ 고장 방지 대책

표 5 IGBT 인버터 고장 방지 대책

| 번호 | 방법             | 내용                                 |
|----|----------------|------------------------------------|
| 1  | 과전압 차단 설계      | 과전압의 영향을 최소화 할 수 있도록 설계를 유도한다.     |
| 2  | 과전류 차단 설계      | 과전류의 영향을 최소화 할 수 있도록 설계를 유도한다.     |
| 3  | 서지 전압 차단 설계    | 서지 전압의 영향을 최소화 할 수 있도록 설계를 유도한다.   |
| 4  | 주기적 육안점검       | 주기적인 육안점검을 통하여 장치의 이상 유무를 확인한다.    |
| 5  | 주기적인 통신상태 점검   | 주기적인 통신상태를 점검하여 장치의 이상 유무를 확인한다.   |
| 6  | 주기적인 냉각장치 점검   | 주기적인 냉각장치 점검을 통하여 장치의 이상 유무를 확인한다. |
| 7  | 주기적인 인버터 용량 점검 | 주기적인 인버터의 용량을 점검하여 인버터의 상태를 확인한다.  |
| 8  | 주기적인 센서 점검     | 모니터링 센서의 작동여부를 확인한다.               |
| 9  | 주기적인 전원 계통 점검  | 모니터링 센서에 공급되는 전원의 정상 여부를 확인한다.     |
| 10 | 저전압 차단 설계      | 저전압의 영향을 최소화 할 수 있도록 설계를 유도한다.     |

○ FMECA 분석 결과

표 6 IGBT 인버터 FMECA 결과

| 식별<br>자              | 기능                               | 고장<br>모드                    | 고장<br>원인 | 고장 영향                        |                            |                | 고장<br>빈도 | 심각<br>도 |    | 치명<br>도 |    | 고장<br>범주 | 고장<br>탐지               | 고장<br>방지<br>대책       |
|----------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------|------------------------------|----------------------------|----------------|----------|---------|----|---------|----|----------|------------------------|----------------------|
|                      |                                  |                             |          | 상위<br>기능                     | 차상위<br>기능                  | TRS            |          | R       | S  | R       | S  |          |                        |                      |
| F-IG<br>BT-0<br>1-01 | 직류<br>전압을<br>공급받는<br>다.          | 전압<br>전달<br>불능,<br>접촉불<br>량 | 단락       | 전압<br>제어가<br>불가하다<br>.       | 차량<br>제동<br>성능이<br>저하된다.   | 운행<br>지연<br>발생 | F3       | S3      | S3 | C2      | C2 | FC2      | 육안점<br>검,<br>계측기<br>측정 | 주기적인<br>육안점검         |
| F-IG<br>BT-0<br>1-02 |                                  |                             | 단선       |                              |                            |                |          |         |    |         |    |          | 육안점<br>검,<br>계측기<br>측정 | 주기적인<br>육안점검         |
| F-IG<br>BT-0<br>2-01 | 직류<br>전압을<br>교류<br>전압으로<br>변환한다. | 변압<br>불능,<br>성능저<br>하       | 과전압      | 전압<br>제어가<br>불가하다<br>.       | 인버터를<br>제어가<br>불가하다.       | 운행<br>지연<br>발생 | F3       | S2      | S3 | C2      | C2 | FC1      | 자체고<br>장진단             | 과전압<br>차단<br>설계      |
| F-IG<br>BT-0<br>2-02 |                                  |                             | 과전류      |                              |                            |                |          |         |    |         |    |          | 자체고<br>장진단             | 과전류<br>차단<br>설계      |
| F-IG<br>BT-0<br>3-01 | 모터에<br>교류<br>전압을<br>공급한다.        | 전압<br>전달<br>불능,<br>접촉불<br>량 | 단락       | 전압<br>제어가<br>불가하다<br>.       | 인버터를<br>제어가<br>불가하다.       | 운행<br>지연<br>발생 | F3       | S3      | S3 | C2      | C2 | FC1      | 육안점<br>검,<br>계측기<br>측정 | 주기적인<br>육안점검         |
| F-IG<br>BT-0<br>3-02 |                                  |                             | 단선       |                              |                            |                |          |         |    |         |    |          | 육안점<br>검,<br>계측기<br>측정 | 주기적인<br>육안점검         |
| F-IG<br>BT-0<br>4-01 | PWM방식<br>으로<br>제어한다.             | 폭 변조<br>불능                  | 서지<br>전압 | 전압<br>제어가<br>불가하다<br>.       | 인버터를<br>제어가<br>불가하다.       | 운행<br>지연<br>발생 | F3       | S2      | S3 | C2      | C2 | FC2      | 자체고<br>장진단             | 서지<br>전압<br>차단<br>설계 |
| F-IG<br>BT-0<br>4-02 |                                  |                             | 과전압      |                              |                            |                |          |         |    |         |    |          | 자체고<br>장진단             | 과전압<br>차단<br>설계      |
| F-IG<br>BT-0<br>4-03 |                                  |                             | 과전류      |                              |                            |                |          |         |    |         |    |          | 자체고<br>장진단             | 과전류<br>차단<br>설계      |
| F-IG<br>BT-0<br>4-04 |                                  |                             | 통신불<br>가 |                              |                            |                |          |         |    |         |    |          | 자체고<br>장진단             | 주기적인<br>통신상태<br>점검   |
| F-IG<br>BT-0<br>5-01 | 최대<br>출력을<br>추종한다.               | 전압<br>출력량<br>감지<br>불능       | 과전압      | 전압<br>제어<br>성능이<br>저하된다<br>. | 인버터를<br>제어<br>성능이<br>저하된다. | 영향<br>없음       | F3       | S4      | S3 | C3      | C2 | FC3      | 자체고<br>장진단             | 과전압<br>차단<br>설계      |

| 식별<br>자              | 기능                 | 고장<br>모드                    | 고장<br>원인 | 고장 영향                                 |                      |                | 고장<br>빈도 | 심각<br>도 |    | 치명<br>도 |    | 고장<br>범주 | 고장<br>탐지               | 고장<br>방지<br>대책       |
|----------------------|--------------------|-----------------------------|----------|---------------------------------------|----------------------|----------------|----------|---------|----|---------|----|----------|------------------------|----------------------|
|                      |                    |                             |          | 상위<br>기능                              | 차상위<br>기능            | TRS            |          | R       | S  | R       | S  |          |                        |                      |
| F-IG<br>BT-0<br>5-02 |                    |                             | 과전류      |                                       |                      |                |          |         |    |         |    |          | 자체고<br>장진단             | 과전류<br>차단<br>설계      |
| F-IG<br>BT-0<br>6-01 | 역행<br>전류를<br>제어한다. | 역행<br>전류<br>제어<br>불능        | 과열       | 전류<br>제어가<br>불가하다                     | 인버터를<br>제어가<br>불가하다. | 운행<br>지연<br>발생 | F3       | S3      | S3 | C2      | C2 | FC2      | 자체고<br>장진단             | 주기적인<br>냉각장치<br>점검   |
| F-IG<br>BT-0<br>6-02 |                    |                             | 서지<br>전압 |                                       |                      |                |          |         |    |         |    |          | 자체고<br>장진단             | 서지<br>전압<br>차단<br>설계 |
| F-IG<br>BT-0<br>7-01 | 회생<br>전류를<br>제어한다. | 회생<br>전류<br>제어<br>불능        | 과열       | 전류<br>제어가<br>불가하다                     | 인버터를<br>제어가<br>불가하다. | 운행<br>지연<br>발생 | F3       | S3      | S3 | C2      | C2 | FC2      | 자체고<br>장진단             | 주기적인<br>냉각장치<br>점검   |
| F-IG<br>BT-0<br>7-02 |                    |                             | 서지<br>전압 |                                       |                      |                |          |         |    |         |    |          | 자체고<br>장진단             | 서지<br>전압<br>차단<br>설계 |
| F-IG<br>BT-0<br>8-01 | 전류<br>토크를<br>제어한다. | 전류<br>토크<br>제어<br>불능        | 과열       | 전류<br>제어가<br>불가하다                     | 인버터를<br>제어가<br>불가하다. | 운행<br>지연<br>발생 | F3       | S3      | S3 | C2      | C2 | FC2      | 자체고<br>장진단             | 주기적인<br>냉각장치<br>점검   |
| F-IG<br>BT-0<br>8-02 |                    |                             | 서지<br>전압 |                                       |                      |                |          |         |    |         |    |          | 자체고<br>장진단             | 서지<br>전압<br>차단<br>설계 |
| F-IG<br>BT-0<br>9-01 | 직류를<br>검출한다.       | 정지<br>기능<br>불능,<br>기능<br>정지 | 절연파<br>괴 | 이상<br>직류<br>전압으로<br>부터<br>보호가<br>불가하다 | 인버터<br>보호가<br>불가하다.  | 운행<br>지연<br>발생 | F3       | S2      | S2 | C2      | C2 | FC1      | 육안점<br>검,<br>계측기<br>측정 | 주기적인<br>육안점검         |
| F-IG<br>BT-0<br>9-02 |                    |                             | 단락       |                                       |                      |                |          |         |    |         |    |          | 육안점<br>검,<br>계측기<br>측정 | 주기적인<br>육안점검         |
| F-IG<br>BT-0<br>9-03 |                    |                             | 단선       |                                       |                      |                |          |         |    |         |    |          | 육안점<br>검,<br>계측기<br>측정 | 주기적인<br>육안점검         |
| F-IG<br>BT-1<br>0-01 | 직류<br>지락을<br>검출한다. | 정지<br>기능<br>불능,<br>기능<br>정지 | 절연파<br>괴 | 이상<br>직류<br>전압으로<br>부터<br>보호가<br>불가하다 | 인버터<br>보호가<br>불가하다.  | 운행<br>지연<br>발생 | F3       | S2      | S2 | C2      | C2 | FC1      | 육안점<br>검,<br>계측기<br>측정 | 주기적인<br>육안점검         |

| 식별<br>자              | 기능                 | 고장<br>모드                | 고장<br>원인                           | 고장 영향                         |                           |                | 고장<br>빈도 | 심각<br>도 |    | 치명<br>도 |    | 고장<br>범주 | 고장<br>탐지               | 고장<br>방지<br>대책          |
|----------------------|--------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------|----------|---------|----|---------|----|----------|------------------------|-------------------------|
|                      |                    |                         |                                    | 상위<br>기능                      | 차상위<br>기능                 | TRS            |          | R       | S  | R       | S  |          |                        |                         |
| F-IG<br>BT-1<br>0-02 |                    |                         | 단락                                 |                               |                           |                |          |         |    |         |    |          | 육안점<br>검,<br>계측기<br>측정 | 주기적인<br>육안점검            |
| F-IG<br>BT-1<br>0-03 |                    |                         | 단선                                 |                               |                           |                |          |         |    |         |    |          | 육안점<br>검,<br>계측기<br>측정 | 주기적인<br>육안점검            |
| F-IG<br>BT-1<br>1-01 | 과전압을<br>차단한다.      | 과전압<br>보호<br>불능,<br>과부하 | 과전압                                | 부하로부<br>터<br>보호가<br>불가하다<br>. | 인버터<br>보호가<br>불가하다.       | 운행<br>지연<br>발생 | F3       | S2      | S2 | C2      | C2 | FC1      | 자체고<br>장진단             | 과전압<br>차단<br>설계         |
| F-IG<br>BT-1<br>2-01 | 과전류를<br>차단한다.      | 과전류<br>보호<br>불능,<br>과부하 | 과전류                                | 부하로부<br>터<br>보호가<br>불가하다<br>. | 인버터<br>보호가<br>불가하다.       | 운행<br>지연<br>발생 | F3       | S2      | S2 | C2      | C2 | FC1      | 자체고<br>장진단             | 과전류<br>차단<br>설계         |
| F-IG<br>BT-1<br>2-02 |                    |                         | 용량<br>저하                           |                               |                           |                |          |         |    |         |    |          | 자체고<br>장진단             | 주기적인<br>인버터<br>용량<br>점검 |
| F-IG<br>BT-1<br>3-01 | 저전압을<br>차단한다.      | 저전압<br>보호<br>불능,<br>과부하 | 전압<br>급강하                          | 부하로부<br>터<br>보호가<br>불가하다<br>. | 인버터<br>보호가<br>불가하다.       | 운행<br>지연<br>발생 | F3       | S2      | S4 | C2      | C3 | FC2      | 자체고<br>장진단             | 저전압<br>차단<br>설계         |
| F-IG<br>BT-1<br>4-01 | 인버터를<br>냉각시킨<br>다. | 공냉식<br>냉각<br>불능,<br>소손  | 이물질<br>등으로<br>인한<br>공기<br>주입<br>차단 | 부하로부<br>터<br>보호가<br>불가하다<br>. | 인버터<br>보호가<br>불가하다.       | 운행<br>지연<br>발생 | F3       | S2      | S1 | C2      | C1 | FC1      | 육안점<br>검               | 주기적인<br>육안점검            |
| F-IG<br>BT-1<br>4-02 |                    |                         | 히트싱<br>크 파열                        |                               |                           |                |          |         |    |         |    |          | 육안점<br>검               | 주기적인<br>육안점검            |
| F-IG<br>BT-1<br>5-01 | 전압을<br>측정한다.       | 전압<br>감지<br>불능          | 센서<br>오류                           | 인버터<br>모니터링<br>이<br>불가하다<br>. | 인버터<br>보호<br>성능이<br>저하된다. | 영향<br>없음       | F3       | S4      | S4 | C3      | C3 | FC3      | 자체고<br>장진단             | 주기적인<br>센서점검            |
| F-IG<br>BT-1<br>5-02 |                    |                         | 통신불<br>가                           | 인버터<br>모니터링<br>이<br>불가하다<br>. | 인버터<br>보호<br>성능이<br>저하된다. | 영향<br>없음       |          |         |    |         |    |          | 자체고<br>장진단             | 주기적인<br>통신상태<br>점검      |
| F-IG<br>BT-1<br>5-03 |                    |                         | 전원<br>차단                           | 인버터<br>모니터링<br>이<br>불가하다<br>. | 인버터<br>보호<br>성능이<br>저하된다. | 영향<br>없음       |          |         |    |         |    |          | 자체고<br>장진단             | 주기적인<br>전원<br>계통<br>점검  |

| 식별<br>자              | 기능           | 고장<br>모드       | 고장<br>원인 | 고장 영향                    |                           |          | 고장<br>빈도 | 심각<br>도 |    | 치명<br>도 |    | 고장<br>범주 | 고장<br>탐지                | 고장<br>방지<br>대책         |
|----------------------|--------------|----------------|----------|--------------------------|---------------------------|----------|----------|---------|----|---------|----|----------|-------------------------|------------------------|
|                      |              |                |          | 상위<br>기능                 | 차상위<br>기능                 | TRS      |          | R       | S  | R       | S  |          |                         |                        |
| F-IG<br>BT-1<br>6-01 | 전류를<br>측정한다. | 전류<br>감지<br>불능 | 센서<br>오류 | 인버터<br>모니터링<br>이<br>불가하다 | 인버터<br>보호<br>성능이<br>저하된다. | 영향<br>없음 | F3       | S4      | S4 | C3      | C3 | FC3      | 자체고<br>장진단              | 주기적인<br>센서점검           |
| F-IG<br>BT-1<br>6-02 |              |                | 통신불<br>가 | 인버터<br>모니터링<br>이<br>불가하다 | 인버터<br>보호<br>성능이<br>저하된다. | 영향<br>없음 |          |         |    |         |    |          | 자체고<br>장진단              | 주기적인<br>통신상태<br>점검     |
| F-IG<br>BT-1<br>6-03 |              |                | 전원<br>차단 | 인버터<br>모니터링<br>이<br>불가하다 | 인버터<br>보호<br>성능이<br>저하된다. | 영향<br>없음 |          |         |    |         |    |          | 육안점<br>검,<br>자체고<br>장진단 | 주기적인<br>전원<br>계통<br>점검 |

□ 위험도 분석

○ 평가 기준

- 발생빈도 범주

표 7 발생빈도 범주 (EN 50126-1:2017)

| 구분 | 범주                   | 설명                                               | 빈도 기준                          |
|----|----------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------|
| F1 | Frequent             | 자주 발생 가능<br>사건이 자주 경험될 것으로 예상함                   | 약 6주의 기간 내에<br>두 번 이상          |
| F2 | Probable             | 여러 번 발생 가능<br>사건이 자주 발생할 것으로 예상함                 | 약 6주에 한 번 ~<br>1년에 한 번         |
| F3 | Occasional           | 여러 번 일어날 가능성<br>사건은 여러 번 발생할 것으로 예상              | 1년에 한 번 ~<br>10년에 한 번          |
| F4 | Rare                 | 수명주기 중에 발생할 가능성이 큼<br>사건은 일어날 것으로 합리적으로 예상할 수 있음 | 10년에 한 번 ~<br>1,000년에 한 번      |
| F5 | Improbable           | 발생하지는 않지만 가능함<br>사건이 예외적으로 발생할 수 있다고 가정할 수<br>있음 | 1,000년에 한 번 ~<br>100,000년에 한 번 |
| F6 | Highly<br>improbable | 거의 일어날 것 같지 않음<br>그 사건이 일어나지 않을 것이라고 가정할 수 있음    | 약 10만 년 이상의<br>기간 내에 한 번       |

- 심각도

표 8 심각도 범주 (EN 50126-1:2017)

| 구분 | 범주            | 사람이나 환경에 관한 결과                                          | 서비스/재산에 관한 결과   |
|----|---------------|---------------------------------------------------------|-----------------|
| S1 | Catastrophic  | 다수의 사람에게 영향을 미치고, 복수의 사망자 발생<br>환경에 대한 심각한 손상           | 개인 또는 환경에 관한 결과 |
| S2 | Critical      | 극소수의 사람들에게 영향을 미치고, 그 결과<br>최소 1명의 사망자가 발생<br>대규모 환경 피해 | 주요 시스템 손실       |
| S3 | Marginal      | 사망 가능성 없음, 중상 또는 가벼운 부상만<br>있음<br>환경에 대한 가벼운 손상         | 심각한 시스템 손상      |
| S4 | Insignificant | 가벼운 부상 가능성                                              | 가벼운 시스템 손상      |

- 치명도

표 9 치명도 범주 (EN 50126-1:2017)

| 구분 | 범주          | 적용할 조치                                                               |
|----|-------------|----------------------------------------------------------------------|
| C1 | Intolerable | 위험은 제거되어야 함                                                          |
| C2 | Undesirable | 위험은 감소할 수 없는 경우에, 철도 의무 책임자 또는 안전 공단의<br>동시에 의해서만 인정됨                |
| C3 | Tolerable   | 위험은 적절한 통제 (예: 유지보수 절차 또는 규칙)와 담당 철도 업무<br>담당자의 동의를 얻어 허용되고 수용될 수 있음 |
| C4 | Negligible  | 위험은 철도 의무 책임자의 동의 없이 허용될 수 있음                                        |

표 10 치명도 매트릭스 (EN 50126-1:2017)

| 발생빈도 |                   | 치명도           |             |             |              |
|------|-------------------|---------------|-------------|-------------|--------------|
| F1   | Frequent          | Undesirable   | Intolerable | Intolerable | Intolerable  |
| F2   | Probable          | Tolerable     | Undesirable | Intolerable | Intolerable  |
| F3   | Occasional        | Tolerable     | Undesirable | Undesirable | Intolerable  |
| F4   | Rare              | Negligible    | Tolerable   | Undesirable | Undesirable  |
| F5   | Improbable        | Negligible    | Negligible  | Tolerable   | Undesirable  |
| F6   | Highly improbable | Negligible    | Negligible  | Negligible  | Tolerable    |
|      |                   | Insignificant | Marginal    | Critical    | Catastrophic |
|      |                   | S4            | S3          | S2          | S1           |
| 심각도  |                   |               |             |             |              |

○ 위험도 분석 결과

| 식별자             | 위험요인            | 원인                                  | 영향                                                 | 초기 위험도 |    |    | 안전 대책                                                | 잔존 위험도 |    |    |
|-----------------|-----------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------|--------|----|----|------------------------------------------------------|--------|----|----|
|                 |                 |                                     |                                                    | F      | S  | R  |                                                      | F      | S  | R  |
| SH-IG<br>BT-001 | 직류 전압<br>공급 불가  | 단락, 단선 등으로<br>인한 전압 연결 차<br>단       | 인버터로 전압 전달이<br>불가능하여 차량 운행<br>사고 발생 가능             | F3     | S3 | C2 | 예방정비 시 상태 확인<br>방법을 유지보수 메뉴얼<br>에 작성한다.              | F4     | S3 | C3 |
| SH-IG<br>BT-002 | 변압 불가           | 과전압, 과전류 등<br>으로 인한 변압 불<br>가       | 견인전동기로 전압 전<br>달이 불가능하여 차량<br>운행 사고 발생 가능          | F3     | S3 | C2 | 이상전압 또는 고장 시<br>의 과도전류에 대하여<br>적절한 보호기능을 가져<br>야 한다. | F4     | S3 | C3 |
| SH-IG<br>BT-003 | 교류 전압<br>공급 불가  | 단락, 단선 등으로<br>인한 전압 연결 차<br>단       | 견인전동기로 전압 전<br>달이 불가능하여 차량<br>운행 사고 발생 가능          | F3     | S3 | C2 | 예방정비 시 상태 확인<br>방법을 유지보수 메뉴얼<br>에 작성한다.              | F4     | S3 | C3 |
| SH-IG<br>BT-004 | PWM 제어<br>방식 불가 | 서지전압, 과전압,<br>과전류 등으로 인한<br>폭 변조 불능 | 견인전동기로 전압 전<br>달이 불가능하여 차량<br>운행 사고 발생 가능          | F3     | S3 | C2 | 과전압, 과전류, 과온에<br>대한 고장 검지 로직을<br>적용한다.               | F4     | S3 | C3 |
| SH-IG<br>BT-005 | 최대 출력<br>추종 불가  | 과전압, 과전류로<br>인한 전압 출력량<br>감지 불능     | 견인전동기로 전압 전<br>달이 불가능하여 차량<br>운행 사고 발생 가능          | F3     | S3 | C2 | 이상전압 또는 고장 시<br>의 과도전류에 대하여<br>적절한 보호기능을 가져<br>야 한다. | F4     | S3 | C3 |
| SH-IG<br>BT-006 | 역행 전류<br>제어 불가  | 과열 및 서지전압<br>발생                     | 전류제어가 불가능하<br>여 인버터 손상으로<br>차량 운행 사고 발생<br>가능      | F3     | S3 | C2 | 이상전압 또는 고장 시<br>의 과도전류에 대하여<br>적절한 보호기능을 가져<br>야 한다. | F4     | S3 | C3 |
| SH-IG<br>BT-007 | 회생 전류<br>제어 불가  | 과열 및 서지전압<br>발생                     | 전류제어가 불가능하<br>여 인버터 손상으로<br>차량 운행 사고 발생<br>가능      | F3     | S3 | C2 | 이상전압 또는 고장 시<br>의 과도전류에 대하여<br>적절한 보호기능을 가져<br>야 한다. | F4     | S3 | C3 |
| SH-IG<br>BT-008 | 전류 토크<br>제어 불가  | 과열 및 서지전압<br>발생                     | 전류제어가 불가능하<br>여 인버터 손상으로<br>차량 운행 사고 발생<br>가능      | F3     | S3 | C2 | 이상전압 또는 고장 시<br>의 과도전류에 대하여<br>적절한 보호기능을 가져<br>야 한다. | F4     | S3 | C3 |
| SH-IG<br>BT-009 | 직류 검출<br>불가     | 이상 직류 발생                            | 이상 직류 검출이 불<br>가하여 인버터 손상으<br>로 차량 운행 사고 발<br>생 가능 | F3     | S2 | C2 | 예방정비 시 상태 확인<br>방법을 유지보수 메뉴얼<br>에 작성한다.              | F4     | S3 | C3 |
| SH-IG<br>BT-010 | 직류 지락<br>검출 불가  | 직류 지락 발생                            | 이상 직류 검출이 불<br>가하여 인버터 손상으<br>로 차량 운행 사고 발<br>생 가능 | F3     | S2 | C2 | 예방정비 시 상태 확인<br>방법을 유지보수 메뉴얼<br>에 작성한다.              | F4     | S3 | C3 |
| SH-IG<br>BT-011 | 과전압<br>차단 불가    | 장치 내 과전압 발<br>생                     | 과전압으로 인한 감전<br>사고 발생 가능                            | F3     | S2 | C2 | 이상전압 또는 고장 시<br>의 과도전류에 대하여<br>적절한 보호기능을 가져<br>야 한다. | F4     | S3 | C3 |
| SH-IG<br>BT-012 | 과전류<br>차단 불가    | 장치 내 과전류 발<br>생                     | 과전류로 인한 감전<br>사고 발생 가능                             | F3     | S2 | C2 | 이상전압 또는 고장 시<br>의 과도전류에 대하여<br>적절한 보호기능을 가져<br>야 한다. | F4     | S3 | C3 |
| SH-IG<br>BT-01  | 공랭식<br>냉각 불가    | 먼지/이물질 등으로<br>인한 공기 주입구             | 인버터 온도가 상승하<br>여 화재 발생 가능                          | F3     | S1 | C1 | 예방정비 시 상태를 확<br>인하여 공기청소를 수행                         | F4     | S3 | C3 |

| 식별자         | 위험요인      | 원인      | 영향                    | 초기 위험도 |    |    | 안전 대책                            | 잔존 위험도 |    |    |
|-------------|-----------|---------|-----------------------|--------|----|----|----------------------------------|--------|----|----|
|             |           |         |                       | F      | S  | R  |                                  | F      | S  | R  |
| 3           |           | 막힘      |                       |        |    |    | 한다.                              |        |    |    |
| SH-IGBT-014 | 공랭식 냉각 불가 | 히트싱크 파열 | 인버터 온도가 상승하여 화재 발생 가능 | F3     | S1 | C1 | 예방정비 시 상태 확인 방법을 유지보수 매뉴얼에 작성한다. | F4     | S3 | C3 |

○ 유지보수 분석 결과

| 부품 코드 | 장치명                      | 수량 | 점검 항목 NO. | 유지보수 점검 항목                          | 유지보수 점검 주기 |   |    |    | 교환 주기 (Year s) | 유지보수 유형 | 작업시간 (hr) | 작업자 수 | 유지보수 공수 | 유지보수 도구  |
|-------|--------------------------|----|-----------|-------------------------------------|------------|---|----|----|----------------|---------|-----------|-------|---------|----------|
|       |                          |    |           |                                     | D          | M | 4Y | 8Y |                |         |           |       |         |          |
| 1     | IGBT                     | 2  | 1         | 취부상태 점검                             | ●          | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2       | 리프트      |
|       |                          |    | 2         | 케이스 결함 외관검사                         |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2       | 리프트      |
|       |                          |    | 3         | 저항기 박스 외관검사                         |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2       | 리프트      |
|       |                          |    | 4         | 부품교체                                |            |   |    |    | 16             | 교체      | 1.5       | 2     | 3       | 리프트      |
| 2     | GDU                      | 2  | 1         | 손상여부 점검                             |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2,000   | 리프트      |
|       |                          |    | 2         | 광케이블 및 커넥터 접속 상태 점검                 |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2,000   | 광량계, 리프트 |
|       |                          |    | 3         | 부품교체                                |            |   |    |    | 12             | 교체      | 1.5       | 2     | 3,000   | 리프트      |
| 3     | Cooling Unit (Heat-sink) | 1  | 1         | BCH 유니트용 냉각 핀 청소 및 손상여부 점검          |            | ● | ●  | ●  |                | 청소      | 1         | 2     | 2,000   | 리프트      |
|       |                          |    | 2         | 인버터 유니트용 Heat 파이프, 냉각핀 청소 및 손상여부 점검 |            |   | ●  | ●  |                | 청소      | 1         | 2     | 2,000   | 리프트      |
|       |                          |    | 3         | 부품교환                                |            |   |    |    | 20             | 교체      | 1.5       | 2     | 3,000   | 리프트      |
| 4     | 라미네이트 부스바                | 1  | 1         | 연결된 단자와의 이완이 없는지 확인                 |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2,000   | 리프트      |
|       |                          |    | 2         | 외관 손상 확인                            |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2,000   | 리프트      |
|       |                          |    | 3         | 층간 벌어짐 확인                           |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2,000   | 리프트      |
|       |                          |    | 4         | 부품교체                                |            |   |    |    | 20             | 교체      | 1.5       | 2     | 3,000   | 리프트      |
| 5     | 스너버 캐패시터                 | 1  | 1         | 결함 외관검사                             |            |   | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2,000   | 리프트      |
|       |                          |    | 2         | 고정 및 결선검사                           |            |   | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2,000   | 리프트      |
|       |                          |    | 3         | 필요시 청소                              |            |   | ●  | ●  |                | 청소      | 1         | 2     | 2,000   | 리프트      |
| 6     | 온도센서                     | 1  | 1         | 접점을 테스터를 이용하여 측정하여 상온에서 닫혀있는지 확인    |            |   | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2,000   | 테스터, 리프트 |
|       |                          |    | 2         | 부품교체                                |            |   |    |    | 12             | 교체      | 1.5       | 2     | 3,000   | 리프트      |
| 7     | 전압센서                     | 1  | 1         | 체결볼트 및 단자 이완여부 확인                   |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2,000   | 리프트      |
|       |                          |    | 2         | 외형 손상 확인                            |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2,000   | 리프트      |
|       |                          |    | 3         | 저전압 배선 연결 상태                        |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2,000   | 리프트      |

| 부품 코드 | 장치명          | 수량 | 점검 항목 NO. | 유지보수 점검 항목                     | 유지보수 점검 주기 |   |    |    | 교환 주기 (Year s) | 유지보수 유형 | 작업시간 (hr) | 작업자 수 | 유지보수 공수 | 유지보수 도구 |
|-------|--------------|----|-----------|--------------------------------|------------|---|----|----|----------------|---------|-----------|-------|---------|---------|
|       |              |    |           |                                | D          | M | 4Y | 8Y |                |         |           |       |         |         |
|       |              |    |           | 확인                             |            |   |    |    |                |         |           |       |         |         |
|       |              |    | 4         | 부품교체                           |            |   |    |    | 12             | 교체      | 1.5       | 2     | 3.000   | 리프트     |
| 8     | 전류센서         | 1  | 1         | 체결볼트 및 단자 이완여부 확인              |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2.000   | 리프트     |
|       |              |    | 2         | 외형 손상 확인                       | ●          | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2.000   | 리프트     |
|       |              |    | 3         | 저전압 배선 연결 상태 확인                |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2.000   | 리프트     |
|       |              |    | 4         | 부품교체                           |            |   |    |    | 12             | 교체      | 1.5       | 2     | 3.000   | 리프트     |
| 9     | 전원공급기        | 1  | 1         | 외관 상태 확인                       |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2.000   | 리프트     |
|       |              |    | 2         | 연결된 광 커넥터와 제어 커넥터 연결상태 확인      |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2.000   | 리프트     |
|       |              |    | 3         | 내부 PCB 기판 손상여부 확인              |            |   |    | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2.000   | 리프트     |
|       |              |    | 4         | 부품교체                           |            |   |    |    | 12             | 교체      | 1.5       | 2     | 3.000   | 리프트     |
| 10    | BLE 데이터 수집장치 | 1  | 1         | 각 부품의 열화, 손상 및 콘덴서 누유, 변형여부 점검 |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2.000   | 리프트     |
| 11    | 인터페이스 보드     | 1  | 1         | 각 부품의 열화, 손상 및 콘덴서 누유, 변형여부 점검 |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2.000   | 리프트     |
| 12    | 인터페이스 컨넥터    | 1  | 1         | 외관의 손상여부 점검                    |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2.000   | 리프트     |
|       |              |    | 2         | 컨넥터 연결상태 점검                    |            | ● | ●  | ●  |                | 검사      | 1         | 2     | 2.000   | 리프트     |

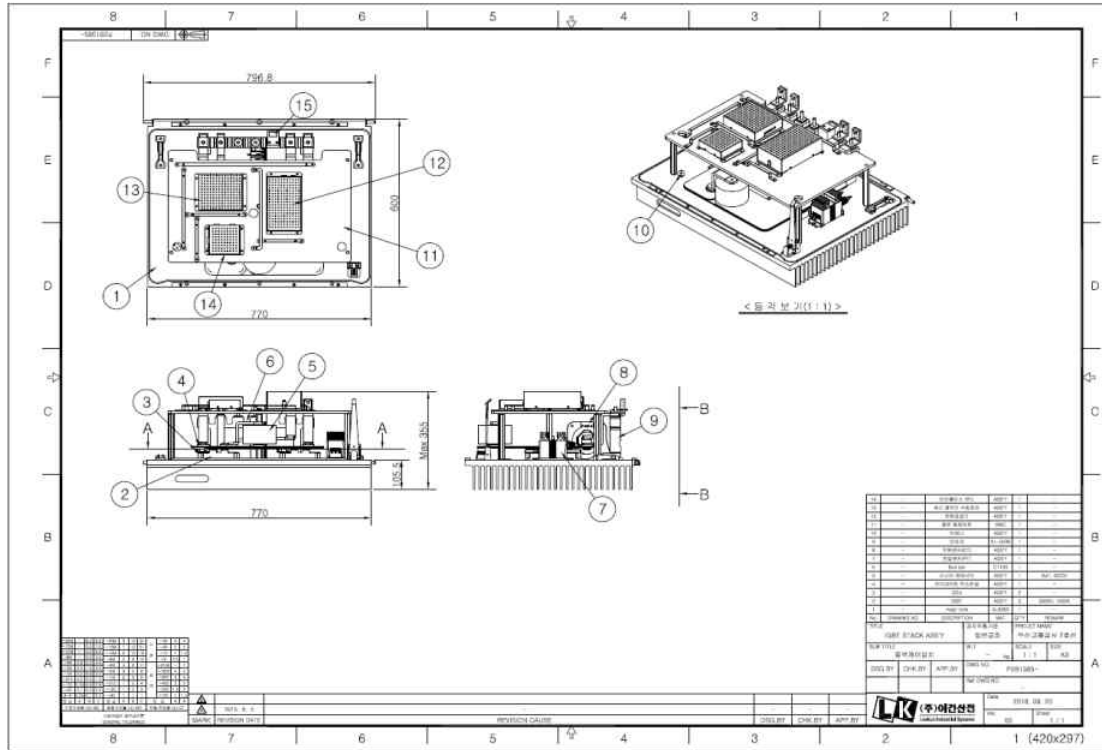
### 3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

#### 3-1. 목표

- GTO 전력소자를 IGBT로 적용한 STACK을 개량하여 **동력제어장치의 성능 개선**
  - 동력제어장치의 기본/상세설계 및 시제품 제작
  - 근거리통신 기반으로 동력제어장치 고장 모니터링 장치 시제품 제작(STACK 모듈측 펌웨어장치 및 프로그램 + 단말기용 App)
  - 공인기관 시험 및 현차 시험을 통한 성능 및 신뢰성 검증
  - IGBT 개량 동력제어장치에 대한 RAMS 분석 및 가속 수명시험에 의한 신뢰성 확보
- 철도운영기관의 요구사항
  - 정량적 요구사항
    - 가) 현차 시험을 3개월간 실시하여 차량운행에 이상이 없어야 한다. 단, 납품실적이 있는 경우 현차 시험을 1개월로 한다.
    - 나) 차량 운행 시 가속도 변화율(Jerk)이  $0.8m/s^3$ 이하 일 것
  - 정성적 요구사항
    - 가) 1편성 중 예산에 따라 차량 1편성 중 일부 차량 IGBT 스택 개량으로 IGBT 스택 차량과 GTO 스택 차량의 **혼용 사용 가능**할 것

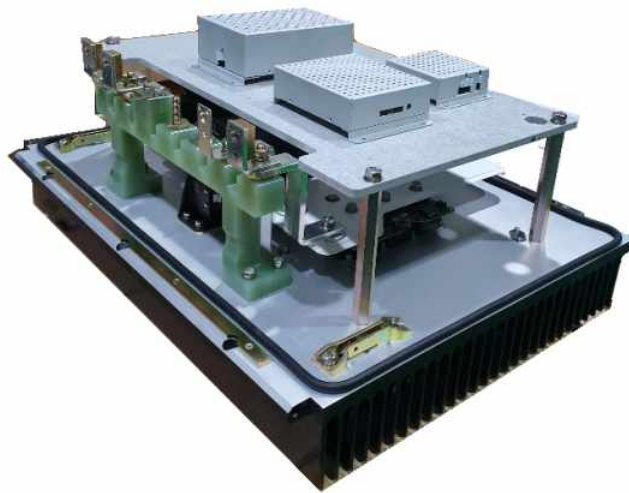
#### 3-2. 목표 달성여부

- GTO 전력소자를 IGBT로 적용한 STACK을 개량하여 **동력제어장치의 성능 개선**
  - 동력제어장치의 기본/상세설계 도면 작성

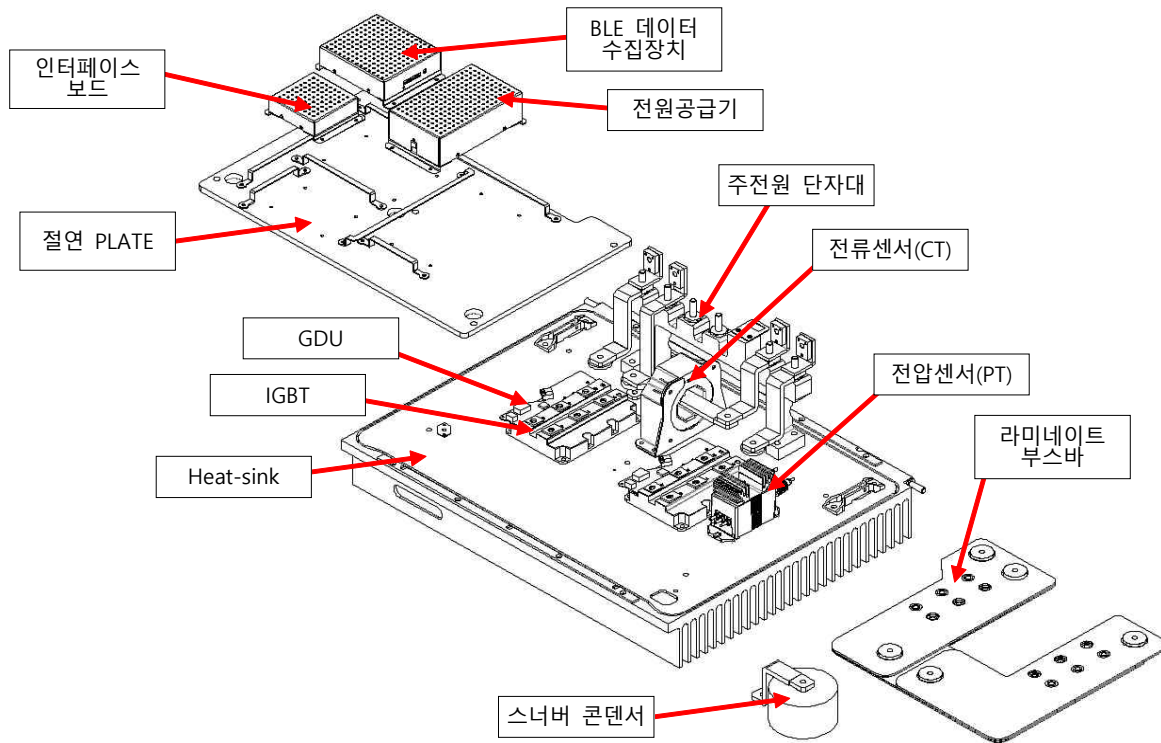


<그림 60. IGBT형 인버터 스택 도면>

- 시제품 10건 제작



<그림 61. IGBT형 인버터 스택>



<그림 62. GBT형 인버터 스택 조립>

- 고장 모니터링 장치 S/W 등록





- 철도 개조승인

- 1) 2020.12.4. : 개조승인 요청 (부산교통공사 → 한국철도기술연구원)
- 2) 2020.12.16. : 개조승인 및 결과 통보 (한국철도기술연구원 → 부산교통공사)

시민이 행복한 동북아 해양수도 부산



**부 산 교 통 공 사**



수신자 한국철도기술연구원장  
(경유)

제목 부산도시철도 2호선 전동차 추진제어장치 STACK 전력소자(IGBT) 개선관련 사전협의 및 운행승인 요청

1. 귀 기관의 무궁한 발전을 기원합니다.

2. 부산도시철도 2호선 전동차 추진제어장치 STACK 전력소자(IGBT) 개선관련 본선영업시운전 시험을 위해 사전협의 및 운행승인을 다음과 같이 요청합니다.

가. 관련근거 : 철도안전법 제38조의2(철도차량의 개조 등), 철도차량 개조검사 시행지침 제6조제6항

나. 개조대상 : 부산도시철도 2호선 전동차 대표 1개 편성

다. 요청사유 : 철도차량 개조의 타당성 및 적합성 등에 관한 검토·시험을 위한 철도차량 운행승인

붙임 1. 사전협의 및 운행승인 요청자료 1식(별도송부).  
2. 철도차량 대표편성 운행의 안전성에 대한 검토 자료 1부.(별도송부) 끝.



**부산교통공사사장**

---

담당자 이진한 연구개발부장 이달우 기술연구원장 전결 12/04  
이창재

협조자

시행 기술연구원-4186 ( 2020. 12. 04. ) 접수 ( )

우 47363 부산광역시 부산진구 중앙대로644번길 20(범천동) / http://www.humetro.busan.kr/  
전화 051-640-7555 /전송 051-640-6951 / jin2023145@humetro.busan.kr / 공개

**기밀은 지킴이 기밀은 지키고 열정은 더킴**

2020/12/16 01:33:53 10.9.2.96F



## 한국철도기술연구원



수 신 부산교통공사사장

(경유) 기술연구원

제 목 [PR20-40] 부산도시철도 2호선 전동차 추진제어장치 STACK 전력소자 (IGBT) 개조 사전협의 및 운행승인 결과 통보

1. 귀 사의 무궁한 발전을 기원합니다.

2. 관련근거

가. 부산교통공사 기술연구원-4186 (2020.12.04.)

나. 국토교통부 고시 제2018-758호 철도차량 개조검사 시행지침 제5조(사전협의)

3. 귀사에서 신청한 "부산도시철도 2호선 전동차 추진제어장치 STACK 전력소자(IGBT) 개조 사전협의 및 운행승인"는 한시적 본선 운행시험을 위한 개조로 철도안전법 시행규칙 제75조의4(철도차량의 경미한 개조)1항 6호로 "개조신고"에 해당됨을 통보드립니다.

4. 운행 승인을 위한 신청자 제출 자료를 검토한 결과 철도차량 개조검사 시행지침 제6조 6항에 의한 법적 요건은 만족한 것으로 판단되므로 철도안전관리체계에 따라 안전하게 본선 운행시험을 진행하시기 바랍니다.

붙임: 1. 사전협의 회의록 사본 1부

한국철도기술연구원장



대표 김인용 12/16  
신덕호

협조자 김영모 김남포

시행 적합성평가팀-001427 ( 2020.12.16. ) 접수 기술연구원-4338 ( 2020.12.16. )

우 16105 경기도 의왕시 철도박물관로 176 / http://www.krri.re.kr/

전화 043-249-8243 /전송 031-460-5159 / inyong.kim@krri.re.kr / 공개

2020/12/16 11:37:46 10.1.2.107

## 철도차량 개조관련 사전협의 결과

□ 개조사업명

“부산도시철도 2호선 전동차 추진제어장치 STACK 전력소자(IGBT) 개조”

검사기관 프로젝트 관리코드 : PR20-40

□ 관련근거

- 국토교통부 고시 제2018-758호(2018.12.04.) 철도차량 개조검사 시행지침 제5조(사전협의)
- 부산교통공사 공문 기술연구원-4186(2020.12.04.)

□ 사전협의 진행경위

- 2020.12.04. 사전협의 신청공문 및 기술자료 접수
- 2020.12.09. 사전협의 개최 공문
- 2020.12.11. 사전협의 실시

□ 검사기관 검토자

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 개조승인 사업부책임자     | 김남포 |
| 개조승인 분야부책임자     | 김인용 |
| 차량/추진장치 분야기술책임자 | 한영재 |

□ 신청기관 담당자

|        |     |
|--------|-----|
| 부산교통공사 | 이진한 |
| ㈜이건산전  | 이용범 |
| ㈜이건산전  | 이재영 |

□ 신청자 제출 기술자료 목록

1. 철도차량 운행승인을 위한 개조신고 관련 사전협의 자료
2. 사전시험결과서(시운전 시험 성적서)
3. 공인기관 시험성적서(구성품 시험 성적서)

□ 개조범위 및 내용

- 국토교통과학기술진흥원 실용화 문턱사업 “철도차량 동력제어장치 IGBT 개량 실용화 연구개발” 과제 본선 운행시험을 위한 한시적 개조
- 개조대상 : 부산2호선 Alstom社 도시철도차량 1개 편성(대표편성)
- 개조범위 및 수량 : 추진제어장치 중 전력변환장치인 STACK 개조(GTO=> IGBT)  
1편성 3개 UNIT 중 2개 UNIT(M-Car 2량)



◦ 전동차 보유현황

| 구 분            | 계               | 도입 구분                    |               |               |
|----------------|-----------------|--------------------------|---------------|---------------|
|                |                 | 1차('99.04)               | 2차('01.03)    | 3차('02.07)    |
| 합 계<br>(차량수)   | 56개 편성<br>(336) | 28 편성<br>(168)           | 16 편성<br>(96) | 12 편성<br>(72) |
| 편성당 차량수<br>(량) | 6량              | 6량 (TC1-M1-T1-M1-M2-TC2) |               |               |

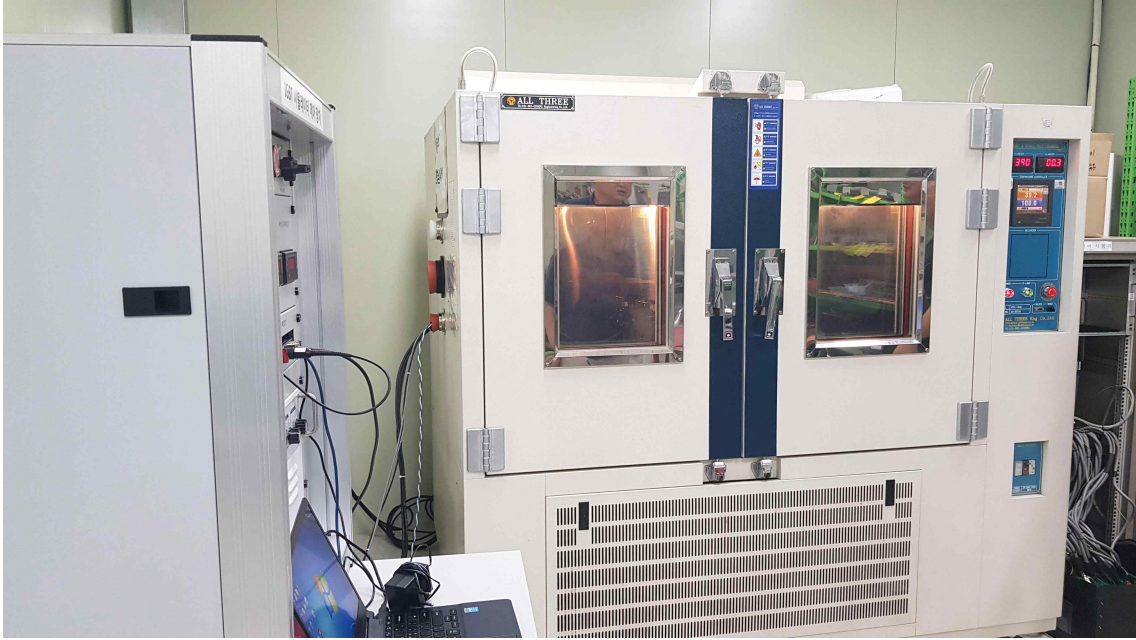
- 가속 수명시험 수행

· 가속수명시험 시뮬레이터 설계 및 제작

- 가속수명 시험모드에 따라 고온을 유지하도록 하는 챔버와 IGBT 스택을 전동차 운행 패턴으로 제어하도록 하는 시뮬레이터로 구성
- IGBT 스택을 구동시키는 전압제어부와 제어부에 전원을 공급하는 전원부, 신호를 발생시키는 파형발생부, 시뮬레이션 및 데이터를 저장하는 컴퓨터 및 소프트웨어로 구성

· 가속수명시험 시험 결과

- 3개의 시제품을 대상으로 가속수명시험이 수행되었다. 항온항습기 내부 공간 상 1대씩 차례로 시험을 수행하였다. 시험은 온도 80℃, 습도 70%에서 진행하였고 무고장이어서 온도를 올려 90℃에서 시험을 수행하였다. 매 시간 데이터가 저장되거나 특정 시간의 데이터를 추출하여 delay time의 기준 범위내에 들어오는지 확인하였다.
- 가속수명시험 결과 80℃ 시험시 총 54일(1,304시간) 동안 고장이 없었다. 신뢰수준 90%인 경우 고장률  $\lambda$  와 신뢰수준(CL), 고장수(r), 가속계수 (AF), 가속시험시간 (Ta), 시료수(n)의 관계식  $\lambda = x^2(1-CL)(2r+2)/2x(1/(n \times AF \times Ta))$ 에 의해 평균수명  $MTTF = 1/\lambda = 2 \times n \times AF \times Ta / x^2(1-CL)(2r+2)$ 이 예측된다.
- 80℃에서 시제품 3대로 가속시험을 고장이 없이 1,304시간 동안 수행한 것으로 가속계수는 51.9이며, 정상 사용조건 40℃에서 88,145시간(약 10.06년)으로 예측되었다. 90℃로 온도를 높여서 시험한 결과 시제품 3대 중 5시간에서 시료 하나가 처음으로 고장이 발생하여 수명예측은 88,365시간(약 10.09년)으로 예측되었다.



<그림 63. 가속수명시험>

- RAMS 분석 수행

• 철도차량 IGBT 개량 인버터모듈의 신뢰도 목표 설정

| 구분   | 목표값       |
|------|-----------|
| MTBF | 13,034 hr |

• 철도차량 IGBT 개량 인버터모듈의 신뢰도 예측 결과

- 부산철도공사 고장데이터를 기반으로 IGBT 인버터 스택의 신뢰도를 예측한 결과 목표값 대비 약 150% 수준으로 신뢰도 목표를 충족할 것으로 예측되었다.

| 구분   | 목표값       | 예측값       | 달성률    |
|------|-----------|-----------|--------|
| MTBF | 13,034 hr | 19,786 hr | 151.8% |

• 철도차량 IGBT 개량 인버터모듈의 고장모드 및 고장원인 도출 및 FMECA 수행

| 순번 | 고장 모드        | 순번 | 고장 모드     |
|----|--------------|----|-----------|
| 01 | 전압 전달 불능     | 08 | 정지 기능 불능  |
| 02 | 변압 불능        | 09 | 과전압 보호 불능 |
| 03 | 폭 변조 불능      | 10 | 과전류 보호 불능 |
| 04 | 전압 출력량 감지 불능 | 11 | 저전압 보호 불능 |
| 05 | 역행 전류 제어 불능  | 12 | 공랭식 냉각 불능 |
| 06 | 회생 전류 제어 불능  | 13 | 전압 감지 불능  |
| 07 | 전류 토크 제어 불능  | 14 | 전류 감지 불능  |

| 순번 | 고장 원인 | 순번 | 고장 원인               |
|----|-------|----|---------------------|
| 01 | 단락    | 08 | 절연파괴                |
| 02 | 단선    | 09 | 용량 저하               |
| 03 | 과전압   | 10 | 전압 금강하              |
| 04 | 과전류   | 11 | 이물질 등으로 인한 공기 주입 차단 |
| 05 | 서지 전압 | 12 | 히트싱크 파열             |
| 06 | 통신 불가 | 13 | 센서 오류               |
| 07 | 과열    | 14 | 전원 차단               |

| 식별자          | 기능                   | 고장 모드          | 고장 원인 | 고장 영향           |                  |          | 고장 빈도 | 심각도 |    | 치명도 |    | 고장 변주 | 고장 탐지        | 고장방지 대책       |
|--------------|----------------------|----------------|-------|-----------------|------------------|----------|-------|-----|----|-----|----|-------|--------------|---------------|
|              |                      |                |       | 상위 기능           | 차상위 기능           | TRS      |       | R   | S  | R   | S  |       |              |               |
| F-IGBT-01-01 | 직류 전압을 공급받는다.        | 전압 전달 불능, 접속불량 | 단락    | 전압 제어가 불가하다.    | 차량 제동 성능이 저하된다.  | 운행 지연 발생 | F3    | S3  | S3 | C2  | C2 | FC2   | 육안점검, 계측기 측정 | 주기적인 육안점검     |
| F-IGBT-01-02 |                      |                | 단선    |                 |                  |          |       |     |    |     |    |       | 육안점검, 계측기 측정 | 주기적인 육안점검     |
| F-IGBT-02-01 | 직류 전압을 교류 전압으로 변환한다. | 변압 불능, 성능저하    | 과전압   | 전압 제어가 불가하다.    | 인버터를 제어가 불가하다.   | 운행 지연 발생 | F3    | S2  | S3 | C2  | C2 | FC1   | 자체고장진단       | 과전압 차단 설계     |
| F-IGBT-02-02 |                      |                | 과전류   |                 |                  |          |       |     |    |     |    |       | 자체고장진단       | 과전류 차단 설계     |
| F-IGBT-03-01 | 모터에 교류 전압을 공급한다.     | 전압 전달 불능, 접속불량 | 단락    | 전압 제어가 불가하다.    | 인버터를 제어가 불가하다.   | 운행 지연 발생 | F3    | S3  | S3 | C2  | C2 | FC1   | 육안점검, 계측기 측정 | 주기적인 육안점검     |
| F-IGBT-03-02 |                      |                | 단선    |                 |                  |          |       |     |    |     |    |       | 육안점검, 계측기 측정 | 주기적인 육안점검     |
| F-IGBT-04-01 | PWM방식으로 제어한다.        | 폭 변조 불능        | 서지 전압 | 전압 제어가 불가하다.    | 인버터를 제어가 불가하다.   | 운행 지연 발생 | F3    | S2  | S3 | C2  | C2 | FC2   | 자체고장진단       | 서지 전압 차단 설계   |
| ~            |                      |                |       |                 |                  |          |       |     |    |     |    |       |              |               |
| F-IGBT-16-01 | 전류를 측정한다.            | 전류 감지 불능       | 센서 오류 | 인버터 모니터링이 불가하다. | 인버터 보호 성능이 저하된다. | 영향 없음    | F3    | S4  | S4 | C3  | C3 | FC3   | 자체고장진단       | 주기적인 센서점검     |
| F-IGBT-16-02 |                      |                | 통신불가  | 인버터 모니터링이 불가하다. | 인버터 보호 성능이 저하된다. | 영향 없음    |       |     |    |     |    |       | 자체고장진단       | 주기적인 통신상태 점검  |
| F-IGBT-16-03 |                      |                | 전원 차단 | 인버터 모니터링이 불가하다. | 인버터 보호 성능이 저하된다. | 영향 없음    |       |     |    |     |    |       | 육안점검, 자체고장진단 | 주기적인 전원 계통 점검 |

• 철도차량 IGBT 개량 인버터모듈의 위험도 평가

| 식별자         | 위험요인         | 원인                             | 영향                                 | 초기 위험도 |    |    | 안전 대책                                     | 잔존 위험도 |    |    |
|-------------|--------------|--------------------------------|------------------------------------|--------|----|----|-------------------------------------------|--------|----|----|
|             |              |                                |                                    | F      | S  | R  |                                           | F      | S  | R  |
| SH-IGBT-001 | 직류 전압 공급 불가  | 단락, 단선 등으로 인한 전압 연결 차단         | 인버터로 전압 전달이 불가능하여 차량 운행 사고 발생 가능   | F3     | S3 | C2 | 예방정비 시 상태 확인 방법을 유지보수 매뉴얼에 작성한다.          | F4     | S3 | C3 |
| SH-IGBT-002 | 변압 불가        | 과전압, 과전류 등으로 인한 변압 불가          | 전인전동기로 전압 전달이 불가능하여 차량 운행 사고 발생 가능 | F3     | S3 | C2 | 이상전압 또는 고장 시의 과도전류에 대하여 적절한 보호기능을 가져야 한다. | F4     | S3 | C3 |
| SH-IGBT-003 | 교류 전압 공급 불가  | 단락, 단선 등으로 인한 전압 연결 차단         | 전인전동기로 전압 전달이 불가능하여 차량 운행 사고 발생 가능 | F3     | S3 | C2 | 예방정비 시 상태 확인 방법을 유지보수 매뉴얼에 작성한다.          | F4     | S3 | C3 |
| SH-IGBT-004 | PWM 제어 방식 불가 | 서지전압, 과전압, 과전류 등으로 인한 폭 변조 불가능 | 전인전동기로 전압 전달이 불가능하여 차량 운행 사고 발생 가능 | F3     | S3 | C2 | 과전압, 과전류, 과온에 대한 고장 검지 로직을 적용한다.          | F4     | S3 | C3 |
| ~           |              |                                |                                    |        |    |    |                                           |        |    |    |
| SH-IGBT-013 | 공랭식 냉각 불가    | 먼지/이물질 등으로 인한 공기 주입구 막힘        | 인버터 온도가 상승하여 화재가 발생 가능             | F3     | S1 | C1 | 예방정비 시 상태를 확인하여 공기정소를 수행한다.               | F4     | S3 | C3 |
| SH-IGBT-014 | 공랭식 냉각 불가    | 히트싱크 파열                        | 인버터 온도가 상승하여 화재가 발생 가능             | F3     | S1 | C1 | 예방정비 시 상태 확인 방법을 유지보수 매뉴얼에 작성한다.          | F4     | S3 | C3 |

- 위험도 평가 결과 14개의 위험요인이 식별되었으며, 잔존위험도가 모두 허용 가능한 수준으로 분석되었다.

| 위험도 등급 | 적용할 조치                                             | 초기 위험도 개수 | 잔존 위험도 개수 |
|--------|----------------------------------------------------|-----------|-----------|
| C1     | 위험은 제거되어야 함                                        | 2         | -         |
| C2     | 위험은 감소할 수 없는 경우에, 철도 의무 책임자 또는 안전 공단의 동의에 의해서만 인정됨 | 12        | -         |
| C3     | 위험은 적절한 통제 와 담당 철도 업무 담당자의 동의를 얻어 허용되고 수용될 수 있음    | -         | 14        |
| C4     | 위험은 철도 의무 책임자의 동의 없이 허용될 수 있음                      | -         | -         |

#### · 철도차량 IGBT 개량 인버터모듈의 유지보수성 분석

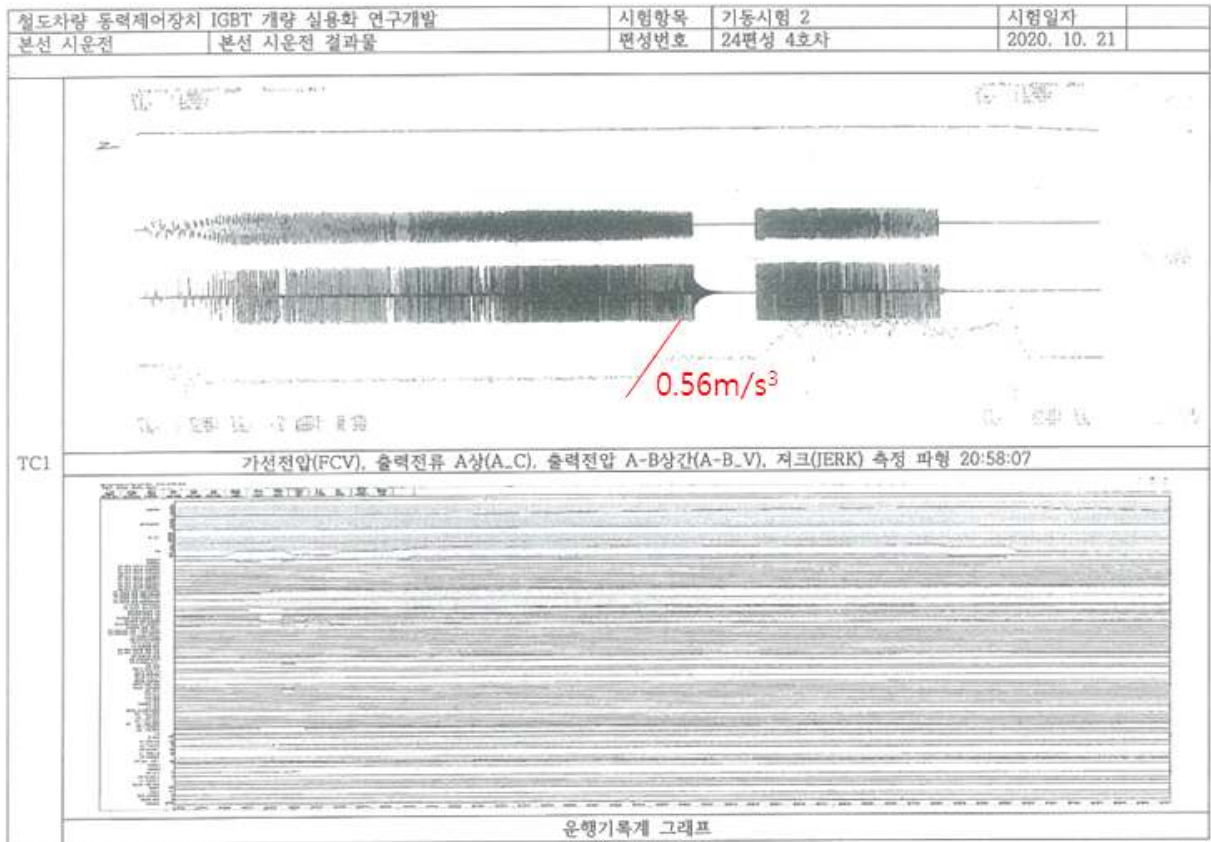
| 코드 | 장치명                      | 수량 | 점검 항목 NO. | 유지보수 점검 항목                          | 유지보수 점검 주기 |   |    |    | 교환 주기 (Years) | 유지보수 유형 | 유지보수 작업시간 (hr) | 유지보수 작업자수 | 유지보수 공수 | 유지보수 도구  |
|----|--------------------------|----|-----------|-------------------------------------|------------|---|----|----|---------------|---------|----------------|-----------|---------|----------|
|    |                          |    |           |                                     | D          | M | 4Y | 8Y |               |         |                |           |         |          |
| 1  | IGBT                     | 2  | 1         | 취부상태 점검                             | ●          | ● | ●  | ●  |               | 검사      | 1              | 2         | 2,000   | 리프트      |
|    |                          |    | 2         | 케이스 결함 외관검사                         |            | ● | ●  | ●  |               | 검사      | 1              | 2         | 2,000   | 리프트      |
|    |                          |    | 3         | 저항기 박스 외관검사                         |            | ● | ●  | ●  |               | 검사      | 1              | 2         | 2,000   | 리프트      |
|    |                          |    | 4         | 부품교체                                |            |   |    |    | 16            | 교체      | 1.5            | 2         | 3,000   | 리프트      |
| 2  | GDU                      | 2  | 1         | 손상여부 점검                             |            | ● | ●  | ●  |               | 검사      | 1              | 2         | 2,000   | 리프트      |
|    |                          |    | 2         | 광케이블 및 컨넥터 접속 상태 점검                 |            | ● | ●  | ●  |               | 검사      | 1              | 2         | 2,000   | 광량계, 리프트 |
|    |                          |    | 3         | 부품교체                                |            |   |    |    | 12            | 교체      | 1.5            | 2         | 3,000   | 리프트      |
| 3  | Cooling Unit (Heat-sink) | 1  | 1         | BCH 유니트용 냉각 핀 청소 및 손상여부 점검          |            | ● | ●  | ●  |               | 청소      | 1              | 2         | 2,000   | 리프트      |
|    |                          |    | 2         | 인버터 유니트용 Heat 파이프, 냉각핀 청소 및 손상여부 점검 |            |   | ●  | ●  |               | 청소      | 1              | 2         | 2,000   | 리프트      |
|    |                          |    | 3         | 부품교환                                |            |   |    |    | 20            | 교체      | 1.5            | 2         | 3,000   | 리프트      |
| 4  | 라미네이트 부스바                | 1  | 1         | 연결된 단자와의 이완이 없는지 확인                 |            | ● | ●  | ●  |               | 검사      | 1              | 2         | 2,000   | 리프트      |
|    |                          |    | 2         | 외관 손상 확인                            |            | ● | ●  | ●  |               | 검사      | 1              | 2         | 2,000   | 리프트      |
|    |                          |    | 3         | 충간 벌어진 확인                           |            | ● | ●  | ●  |               | 검사      | 1              | 2         | 2,000   | 리프트      |
|    |                          |    | 4         | 부품교체                                |            |   |    |    | 20            | 교체      | 1.5            | 2         | 3,000   | 리프트      |
| ~  |                          |    |           |                                     |            |   |    |    |               |         |                |           |         |          |
| 12 | 인터페이스 컨넥터                | 1  | 1         | 외관의 손상여부 점검                         |            | ● | ●  | ●  |               | 검사      | 1              | 2         | 2,000   | 리프트      |
|    |                          |    | 2         | 컨넥터 연결상태 점검                         |            | ● | ●  | ●  |               | 검사      | 1              | 2         | 2,000   | 리프트      |

○ 철도운영기관의 요구사항

- 정량적 요구사항

가) 현차시험 수행 :2020.12.16.~2021.02.28.

나) 본선 시운전을 통해 **가속도 변화율(Jerk)**이  $0.8m/s^3$ 이하 확인



- 정성적 요구사항

가) 부산 2호선 6량 대상으로 3량에 적용된 GTO 스택 중 1량~3량 순차적으로 IGBT 스택 개량으로 혼용 사용되는 것을 확인함



| 구분              | 역행시 | 제동시 |
|-----------------|-----|-----|
| 1량 IGBT 스택 적용시험 |     |     |
| 2량 IGBT 스택 적용시험 |     |     |
| 3량 IGBT 스택 적용시험 |     |     |

○ 실용화 관련 실적

- 2019년 부산국제철도기술산업전 참가, 2019 폴란드 국제 철도 전시회



<그림 64. 부산국제철도기술산업전 연구개발품 전시>



<그림 65. 2019 폴란드 국제 철도 전시회>



## 4. 연구개발성과의 활용 계획 등

- 철도차량 IGBT개량 동력제어장치 시험평가 결과는 향후 IGBT 개조 차량에 적용
- 개발과정에서의 축적된 설계 기술을 바탕으로 **신규차량**의 인버터 및 컨버터 장치에 적용
- 각종 인버터 장치에 적용하여 동남아 지역의 **철도차량 부품의 수출** 기대

### 가. 제품/기술의 핵심가치

#### □ 제품/기술의 장점

- 동일 성능의 부품단위 개량으로 예산절감 : 전체 Box단위 교체가 아닌 부품단위 교체로 동일 성능을 낼 수 있어 철도 운영기관 예산 절감 효과에 기여
- 유지보수 용이 기술 개발 : 유지보수에 용이하게 기술 개발 유지보수 비용의 절감 효과가 있음.

#### □ 차별화 방안

| 핵심가치    | 내 용                                                                                                                                                                                   |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 제품의 차별성 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 동일 성능의 부품단위 개량으로 예산절감 효과</li> <li>• 전동차 경량화를 통해 에너지 절감</li> <li>• GT0와 IGBT(압접)소자를 단위 모듈(스택)만을 개량</li> <li>• GT0와 IGBT의 혼용사용 가능기술</li> </ul> |
| 공공적 가치  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• IGBT 개량제품으로 사회적 비용 절감</li> <li>• 노후화된 GT0방식의 추진제어장치 유지보수방식에 대한 효율적인 대안</li> </ul>                                                            |

[제품/기술의 가치 요약]

### 나. 목표 고객별 판매 전략

| 목표고객 | 해당기업<br>(기업명)    | 판매 전략                                                                                            |
|------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 시행청  | 도시철도공사,<br>코레일 등 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 혼용사용 성능 확보를 통한 홍보</li> <li>• 유지보수성 용이한 기술 개발</li> </ul> |

다. 수요 조사

· 국내 GTO 차량

- 서울1호선 : 311x01~311x12, 311x14~311x15, 311x17~311x34, 311x36, 311x42~311x44, 311x49~311x53, 311x57~311x58, 101~110편성

- 서울3호선 : 371~386편성

- 서울4호선 : 401~426편성, 452~465편성, 467~469편성

- 서울5호선 : 501편성, 503~576편성

- 서울7호선 : 701~717편성

- 서울8호선 : 801~815편성

- 부산1호선 : 101~120편성, 122~124편성, 126~129편성, 132편성, 135~138편성, 140~141편성, 1443~144편성

- 부산2호선 : 217~252편성

- 분당선 : 351x09, 351x11~351x12, 341x14, 351x17~351x18, 351x20~351x24, 351x26~351x28

· 사업규모

- 국내 GTO 동력제어장치 차량 수 : 약 1,068량

- 1량 개조비용 약 80(백만원)으로 산정

- 총 사업비 : 854억원

· 국외 GTO 차량

- UIC 홈페이지 분석

Market potential이 high로 나와 있음 ([http://www.railway-energy.org/static/IGBT\\_28.php](http://www.railway-energy.org/static/IGBT_28.php))




## Energy Efficiency Technologies for Railways

[go back to technology list](#)
[previous technology](#)
[next technology](#)

### IGBT evaluated

Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs) are today's state-of-the-art power electronics for the traction system of electric (and diesel-electric) rail vehicles. They replace the previous inverter generation represented by GTO (gate turn-off thyristors).

**Technology field:** Optimisation of traction technologies

#### General information

##### Description

**Principle**

Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs) are today's state-of-the-art power electronics for the traction system of electric (and diesel-electric) rail vehicles. They replace the previous inverter generation represented by GTO (gate turn-off thyristors). In contrast to conventional transistors, IGBTs operate at very high currents (> 1000 A). The principle benefit of IGBTs over GTOs is a much (3 to 4 times) higher switching frequency. This reduces the current required and therefore the heat generated, giving smaller and lighter units. The high switching frequencies also smoothen the acceleration process and reduce the traction noise.

**Fields of application**

Power electronics based on IGBTs are used in a number of fields in industry and transportation.

##### General criteria

**Status of development: in use**

In the course of the last years, all major manufacturers of railway traction technologies have completely migrated to IGBT technology. This migration has already taken place some years ago in the MU segment and is presently taking place in the locomotive segment of around 7 MW.

**Time horizon for broad application: now**  
(no details available)

**Expected technological development: highly dynamic**

Although IGBTs have reached maturity, R&D dynamics is still high in this field. Major aims are:

- raise blocking voltages
- increase switching frequency
- reduce losses
- reduce weight

The IGBT itself is integrated in a complex power module which includes besides the transistor the circuits and the cooling etc. These "peripherals" offer even more potential for future optimisation than the IGBT itself.

**Motivation:**

**Energy efficiency**

**Benefits (other than environmental): big**

- Reduced switching losses (compared to GTO)
- Less cooling required (no organic coolants required)

**Barriers: low**

**Refurbishment costs**

Refitting old vehicles with IGBTs is usually not profitable (for present energy prices). Diffusion is therefore essentially limited to stock renewal.

**Success factors:**  
(no details available)

**Applicability for railway segments: high**

**Type of traction:** electric - DC, electric - AC, diesel

**Type of transportation:** passenger - main lines, passenger - high speed, passenger - regional lines, passenger - suburban lines, freight

IGBTs are generally applicable to electric traction motors. This includes electric, and diesel-electric traction. Refitting old vehicles with IGBTs is expensive, but has been realised in some cases, e.g. NS Reizigers has refurbished their Sprinter train sets with IGBT choppers.

**Grade of diffusion into railway markets:**

Diffusion into relevant segment of fleet: **5 - 20%**

Share of newly purchased stock: **> 50%**

**Diffusion into relevant segment of fleet**

Most fleets have already a considerable share of vehicles with IGBTs, others like the SBB fleet don't have any IGBT stock yet.

**Share of newly purchased stock**

Siemens claims that virtually all electric rail vehicles presently produced at Siemens Transportation are based on IGBT traction systems.

**Market potential (railways): high**  
(no details available)

**Example:**  
(no details available)

#### Environmental criteria

##### Impacts on energy efficiency:

**Energy efficiency potential for single vehicle: 5 - 10%**

**Energy efficiency potential throughout fleet: > 5%**

**Improved traction efficiency**

According to an expert from Bombardier, the efficiency of the IGBT at payload is about 5 - 6% better than the efficiency of the GTO (95% vs. 90 % efficiency). The effect on energy efficiency in real operation maybe even bigger due to the fact that the relative advantage of IGBTs over GTOs is even higher at low loads. This may push the efficiency gain even beyond 10%. For instance, Japanese JR Hokkaido claims that IGBT controlled 3-phase AC motors save 15 % energy compared to their GTO predecessors.

**Mass reduction**

IGBT modules are generally lighter than GTO modules (some 30%). This may offer constructive advantages but is negligible for energy efficiency.

**Other environmental impacts: positive**

**Noise reduction**

Japanese JR Hokkaido claims that IGBT controlled 3-phase AC motors reduce noise by 10% compared to their GTO counterpart.

#### Economic criteria

##### Vehicle - fix costs: low

IGBT drive technology is a mature technology in rail vehicles. It does not substantially increase the vehicle price compared GTO or other technology.

**Vehicle - running costs: significant reduction**  
(no details available)

**Infrastructure - fix costs: none**  
(no details available)

**Infrastructure - running costs: unchanged**  
(no details available)

**Scale effects: low**

Scale effects within railways have already been exploited. Scale effects from mass markets are unlikely since the specifications (e.g. blocking voltage) for railway IGBTs require dedicated development and production.

**Amortisation: < 1 year**  
(no details available)

#### Application outside railway sector

##### Status of development outside railway sector: in use

  
(no details available)

**Time horizon for broad application outside railway sector: now**  
(no details available)

**Expected technological development outside railway sector: highly dynamic**  
cf. XXX

At present, no innovations in power electronic replacing IGBTs are close to market stage in the low-power segment, which is usually an early monitor for later developments in the power segments relevant for railway applications.

**Market potential outside railway sector: high**  
(no details available)

#### Overall rating

**Overall potential: very promising**

**Time horizon: short-term**

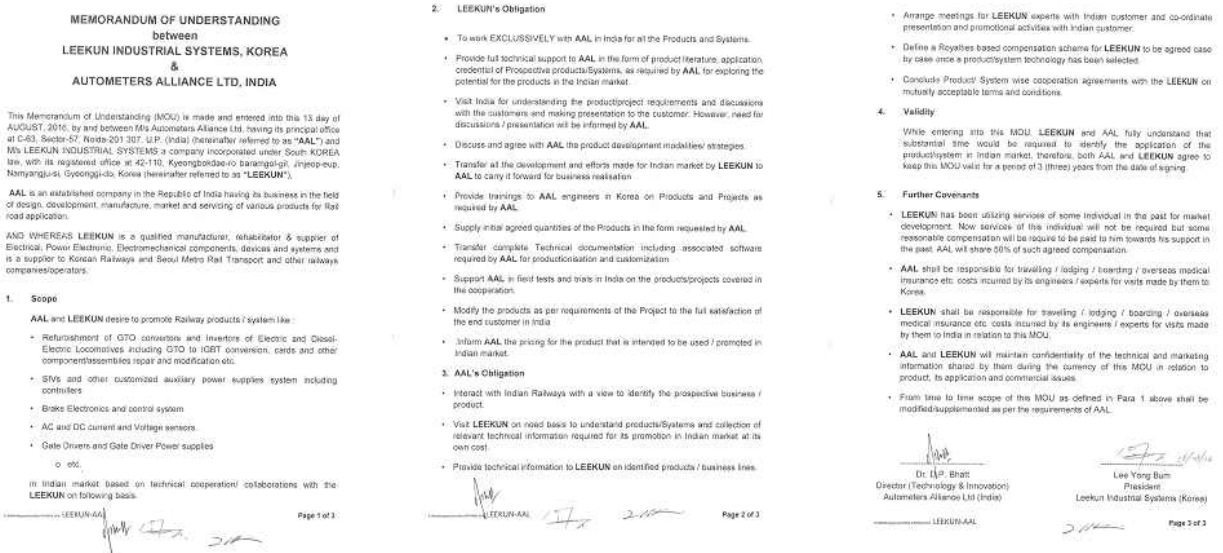
The advent of IGBTs has yielded strong efficiency gains in electric drive technology. There are no barriers for introduction. However, diffusion is essentially limited to stock renewal since refurbishment is possible but usually too expensive.

Windows 7  
[실용] 소프트웨어 이용하기

Windows 7  
[실용] 소프트웨어 이용하기

## - 인도 시장

### 인도시장 진출을 위해 ALL사와 MOU협약



### [ 인도 AAL社와의 MOU 협약서 ]

## - 인도네시아 시장

2019년에 일본으로부터 중고 전동차 다량 구매를 했으며 1990년대의 GTO 동력제어장치를 사용하는 전동차로서 추후 개조 사업추진

## 마. 수익 확보

### (1) 주요 고객군

노후화된 전동차를 운영하는 도시철도공사, 철도공사 등의 수요처  
인도 철도회사 등 해외 철도 운영기관 수요처

### (2) 사업화 모형(BM)을 통한 수익 창출 방안

IGBT 개량화를 통하여 기존 GTO 전동차에 실 적용하여 전체 시스템의 일부로서 고신뢰성의 성능과 기능을 검증받은 후 적절한 공급망, 판매정책, 단가의 달성을 진행하여 점진적으로 국내 외 철도운영기관을 대상으로 수익을 창출할 계획임.

## 붙임. 참고문헌

- [1] 부산교통공사, 부산2호선 정비지침서
- [2] EN 50126-1: 2017, Railway Applications- The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety(RAMS)-Part1: Generic RAMS Process
- [3] 철도차량기술기준 Part 51
- [4] LK-E-1385-01 REV00 IGBT형 인버터 STACK 규격서
- [5] 송인식, 이담복스, 퀄리티 바이블:신뢰성 분석, 2017
- [6] 渡邊 朝記, “車両用電子機器の故障傾向と対策”, RRR, 2005
- [7] 大戸伸信, “車両用電子機器の信頼性評価”, JREAT, 2006
- [8] 松本 隆, “新幹線電車で電子機器の劣化評価”, JREAT, 2006
- [9] 에스엔디파워닉스, 파워 시스템용 양방향 스위치의 가속수명시험 및 신뢰성향상, 2008
- [10] 강명호, 산업용 인버터 제품의 수명예측과 가속시험법 개발, 2016

### 주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.



210mm×297mm[백상지(80g/㎡) 또는 중질지(80g/㎡)]