

[붙임]

연 수 결 과 보 고 서

- 대형프레임 안전증 방폭 모터 연구 -

2024. 1.



목 차

1. 연수개요	1
2. 수행사항 및 연수내용	2
3. 세부연수내용	3
4. 주요 연구동향	4
5. 연수소감 및 종합의견	6
6. 수집자료 목록	9
붙임 1. 고정자 절연 시스템의 임펄스, 정상 상태 점화	
및 회전자 점화 관련	10
붙임 2. 온도시험기법 비교 및 온도상승	
특성 시험	39
붙임 3. 회전자 구속 시험기법 비교 및 온도상승	
특성 시험	50
덧붙임 1. 임펄스 시험회로 분석	54
덧붙임 2. 객원 연구과정 인증서	68

1. 연수개요

가. 주제 : 대형프레임 안전증 방폭 모터 내부 폭발가스와 권선간의 스파크로 인한 화염의 거동에 대한 연구

나. 연구 기간 : 2022.12.01.(목) - 2023.12.04.(월)

다. 공동연구 기관 : 독일 물리기술연방연구소(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)

라. 연구 수행자 : 산업안전보건인증원 방호장치인증부 전문직 3급 이기호

마. 주요 수행사항

1) 고정자 절연 시스템의 임펄스, 정상 상태 점화 및 회전자 점화에 관한 연구 수행

- 모터 추가시험(고정자 및 회전자)의 도입배경 및 시험관련 문헌조사
- PTB 시험 조건, 고정자 임펄스/정상상태 점화 시험 및 회전자 점화시험 자료 조사

2) 안전증 방폭 모터 온도시험기법 및 온도상승 특성 시험

- 모터 표면온도 측정시 센서 부착 기법 습득
- 고정자 권선 저항 추정법에 따른 온도 값 비교 및 회전자 온도 추정
- 모터 전압 레인지에 따른 온도상승 값 비교

3) 회전자 구속 시험기법 및 온도상승 특성 시험

- 회전자 슬롯(Open/Closed slot) 타입별 센서 부착 기법
- 구속시험시 전기각에 따른 편차를 감안한 최고온도 시험

2. 수행사항 및 연수내용

가. 연구주제 1

1) 연구명 : 고정자 절연 시스템의 임펄스, 정상 상태 점화 및 회전자 점화에 관한 연구 수행

2) 연구내용

: IEC 국제규격 부합화에 따른 모터 추가시험(고정자 및 회전자) 국내적용을 위하여, 시험 도입배경 조사 및 PTB working group 3.63의 High voltage 시험수행을 위한 시험기법 및 문헌조사에 대한 연구임.

나. 연구주제 2

1) 연구명 : 온도시험기법 비교 및 온도상승 특성 시험

2) 연구내용

: IEC 60079-0 Ed 7.0 및 IEC 60079-7 Ed 5.0 온도시험에 대한 국내와 독일 PTB간의 시험기법 비교 및 온도상승 추이에 대한 연구임.

다. 연구주제 3

1) 연구명 : 회전자 구속시험기법 비교 및 온도상승 특성시험

2) 연구내용

: IEC 60079-7 Ed 5.0 Locked rotor test(회전자 구속시험)에 대해 국내와 독일 PTB간의 시험기법 비교 및 온도상승 추이에 대한 연구임.

3. 세부연수내용

가. 고정자 절연 시스템의 임펄스, 정상 상태 점화 및 회전자 점화 관련 [붙임 1 참조]

- 1) 모터 추가시험의 도입 배경 파악
- 2) 고정자 절연시스템의 시험원리 습득
- 3) 시험설비 구성 파악
- 4) 임펄스 및 정상 상태 점화시험 수행
- 5) 회전자 시험원리 습득
- 6) 국내 적용방안

* 회전자 시험의 경우, 전원 용량의 문제로 PTB에서도 제조 현장에서만 실시하고 있으며, 그 시험 횟수가 희박하고 제조자의 협조가 필요하여 서면으로 습득.

나. 온도시험기법 비교 및 온도상승 추이 관련 [붙임 2 참조]

- 1) 모터 표면 온도측정 기법 습득
- 2) IEC 규격에 따른 고정자 및 회전자 온도추정에 따른 온도차이 비교
- 3) 시험전압 영역에 따른 온도차이 비교
- 4) 컨버터 작동 모터의 온도차이 비교
- 5) PTC 서미스터 과부하 온도시험 비교

다. 회전자 구속시험기법 비교 및 온도상승 특성 추이 관련 [붙임 3 참조]

- 1) 회전자 온도측정 관련 센서 측정 기법 습득
 - 가) 농형회전자 바 및 단락환
 - 나) 회전자 slot 타입별
- 2) 구속시험시 전기각에 따른 편차를 감안한 최고온도 시험

4. 주요 연구동향

가. LSPMSM(line-start permanent magnet synchronous machines) 모터

- 1) 안전증 방폭 영구자석모터에 대한 평가는 IEC 규격은 2015년 IEC 60079-7 Edition 5.0에서 추가되었으며, 영구자석의 방폭과 관련한 연구가 지속적으로 진행되었음.

* N. Yogal, "Analysis of a permanent magnet synchronous machine with regard to explosion protection capability," Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2019.

* N. Yogal, C. Lehrmann, and M. Henke, "Analysis and testing of explosion-protected permanent magnet synchronous machines for operation in hazardous areas," in 19th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2016, 2017.

* N. Yogal and C. Lehrmann, "PM-Synchronmaschine -hohe Energieeffizienz auch in Ex-Bereichen," Antriebstechnik, vol. 3, Mar. 2016.

* N. Yogal, C. Lehrmann, and M. Henke, "Investigations on permanent magnetic materials to be used in explosion-protected permanent magnet synchronous machines," in Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2015, vol. 2015-Aug.

- 2) 그러나 직입기동식 영구자석 안전증 모터에 대한 방폭성능에 대한 분석이 없어, 최근 PTB에서는 이에 대한 연구를 수행하고 있으며, 최근 논문* 을 발표되었으며, 이 후 구속시험에 대한 평가도 진행예정.

* Yogal, Nijan, Christian Lehrmann, and Markus Henke. "Comprehensive Analysis of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Machines with Explosion-Proof Capability in Explosive Atmospheres: Reviewing Standards and Guidelines." 2023 IEEE 14th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). IEEE, 2023.

- 3) 현재 우리나라는 IE 3효율의 전동기 사용이 의무화 되어있으며, 유럽연합 (EU)에서는 2023년부터 IE4 효율의 전동기 사용의무화를 기점으로 미국, 캐나다, 일본 순으로 적용예정이며, 우리나라는 2026년부터 IE4 효율 전동기 사용을 계획하고 있음. 이처럼 고효율 전동기 사용이 의무화 되면서, 국외 산업현장에서도 유도전동기 뿐만아니라 영구자석타입의 전동기 사용이 점차 확대되고 있음.

나. 적합성 평가기관 업무 범위 축소

- 1) 독일연방정부는 적합성평가기관으로서의 PTB 방폭분야 업무 재편 요구하고 있으며, 이에 따른 업무범위 축소가 예정됨.[표 1 참조]
 - * 독일연방정부에서는 인원축소계획을 진행중이며, 인원축소 및 전문가 부족에 따른 업무범위 축소.
 - * 마감일 이후 관련 서비스는 제공하지 않음.
 - * 관련 인증서 및 제조자 심사업무는 타 ATX 및 IECEx 기관으로 이전예정.

Reduction in the range of service of the KBS-sector “Explosion Protection“	Deadline
Submission of documents according to Article 13 (1) of Directive 2014/34/EU	2023-11-30
Performance of manufacturer surveillance according to Annexes IV and VII of Directive 2014/34/EU and according to IECEx	2024-07-31
EU type examination according to Annex III of Directive 2014/34/EU and according to IECEx for the following product groups:	2023-12-31
▶ Flame arresters and other autonomous protective systems	
▶ Industrial trucks	
▶ Cable entries, entry fittings, cable glands, adapter and blanking plugs [as Ex Component or Ex Equipment]	
▶ Luminaries in the decisive type of protection Ex “d”, Ex “e” or Ex “t”	
▶ Ex Equipment and Ex Components in the decisive type of protection Ex “m” (e.g. solenoid valves)	
▶ Filling station equipment (petrol pumps, - valves, - nozzles and gas return flow pumps)	
▶ Thermometers in the decisive types of protection Ex “d”, Ex “e” or Ex “m”	
▶ Internal combustion engines	

표 1 업무축소 내역

5. 연수소감 및 종합의견

□ 연구

- [연구과제 선정] PTB 직원의 경우 인증심사 업무 이외에도 많은 시간을 방폭에 대한 연구 분야에 투자하여, 기존 규격에 대한 연구과제* 선정 및 향후 방폭분야 규격 제·개정에 앞서 사전 연구과제**를 선정하여, 기존 규격의 모호한 해석 및 향후 도입될 규격에 대한 시험을 사전에 수행함으로써 인증·시험 기관으로서의 전문성을 유지·발전.

* 전동기 시험에 사용하는 TC 부착 물질에 대한 종류별 온도차이 비교

** 영구자석형 농형 전동기 구속시험에 대한 폭발 위험성_차기 연구주제

- [연구과제 수행] 선정된 과제에 대해 PTB 직원, 객원 연구원, 박사과정, 제조사 및 여러 대학과의 연계를 통하여 이론에 기반한 지식 뿐만 아니라 실질적인 연구과제 수행을 통한 결과 산출 및 해당 결과물에 대한 적용*을 통하여 PTB의 자체 기술력과 신뢰성 향상에 기여.

* PTB 전동기 시험에 사용중인 LAB VIEW 시스템 개발 등

□ 연구자의 전문성

- [방폭분야 인력 및 숙련도] PTB에서 방폭분야에 종사하는 근로자는 우리 인증원 방폭분야의 7배에 달하는 전문인력이 있으며, 각자의 전공분야를 바탕으로 방폭업무 수행.[표 2,3 참조]

	PTB	KOSHA
총인원	약 2100	약 2200
방폭분야	64	8
백분율	3.05%	0.41%

표 2 전체인원 대비 방폭분야 인원 비율

	PTB	KOSHA
방폭분야	64	8
박사학위	19	0
석사/학사 학위	8	8
테크니션 등	37	0

표 3 방폭분야 전문가 비율

- **[전문가 그룹]** 방폭업무 세부분야에 따라 전문가 그룹이 형성[표 4 참조]되어 있으며, 복합방폭구조에 대해 각 분야의 전문가들이 참여하여, 각자의 전문성에 기반하여 제품의 적합성 평가를 수행하고 있음.

Division. 3		Chemical physics and explosion protection
Department 3.5		Explosion protection in energy technology
	Wg 3.51	Analysis and Simulation in the field of explosion protection
	Wg 3.52	Measurement in explosion protection
	Wg 3.53	Explosion-protected devices power engineering
	Wg 3.54	International harmonization in the field of explosion protection
	Wg 3.55	Renewable energy sources and storage
Department 3.6		Explosion-proof sensors and measurement technology
	Wg 3.61	Intrinsic safety
	Wg 3.62	Electrical Discharges
	Wg 3.63	Explosion-proof electrical drive systems
	Wg 3.64	Manufacturer monitoring in explosion protection
Department 3.7		Basics of explosion protection
	Wg 3.71	Characteristics of explosion protection
	Wg 3.72	Explosion processes in non-atmospheric conditions
	Wg 3.73	Physical Ignition
	Wg 3.74	Hydrogen Metrology

표 4 PTB 방폭업무 세부 조직도

- **[근무연속성]** PTB에서는 각 세부분야에 대한 전문가들이 같은 분야에 역량을 집중하여 경험과 기술을 향상시키는 반면, KOSHA는 방폭업무 담당자들의 잦은 변경으로 인한 기술과 노하우 공백상태 발생.[표 5 참조]

방폭업무 경험	인원
10~15년	1
6~10년	1
1~5년	6

표 5 KOSHA 방폭업무 근무기간

- **[기술기준]** 방폭의 경우 그 구조에 따라 기술기준이 각각 나뉘어져 있으며, 각 제품의 특성에 따른 기준의 요구사항까지 더해질 경우 심사자가 숙지해야 할 기준의 수가 증가하며[표 6 참조], 인력구성상 개별 인원이 모든 기술기준을 숙지해야 하는 상황.

*방폭인증은 폭발위험지역에 사용하는 모든 전기기기를 대상으로 함.

	공통기준	메인기준	모터특성기준
안전증 방폭모터	IEC 60079-0	IEC 60079-7	IEC 60034 Serise

표 6 안전증 방폭모터의 기술기준(예시)

- **[국제기준 일원화]** 국내 방폭기술기준은 거의 99%에 가깝게 국제 기술 기준을 도입하고 있으나, 국내 기술기준의 변경은 국제기술기준의 변경속도를 따라가지 못하고 있는 실정이며, 전문적인 인력배치 없이 방폭인증을 담당하는 직원이 인증업무를 하는 동시에 기술기준 변경업무 또한 동반하여 실행하고 있는 실정임.

	IEC 60079 serise
국제기준	약 39종(IEC Webstore 기준)

표 7 방폭관련 국제기술기준

6. 수집자료 목록

1. Testing and certification procedures(Prüf- und Zertifizierungsverfahren)
2. Work instrument(Prüfung Isoliersystem der Ständerwicklung)
 - ExTL-3 / 3.63- AA-2.26
 - ExTL-3 / 3.63 AA-2.27
3. Measurement protocol(Messprotokoll)
 - Isolationssystem
 - Käfigläufer
4. Investigations on the ignitability of partial discharges on windings of high-voltage machines(Untersuchungen zur Zündfähigkeit von Teilentladungen an Wicklungen von Hochspannungsmaschinenennung)
5. Ignition video(Zuendversuch_geschnitten)

1. 모터 추가시험(고전압 및 회전자)의 도입배경

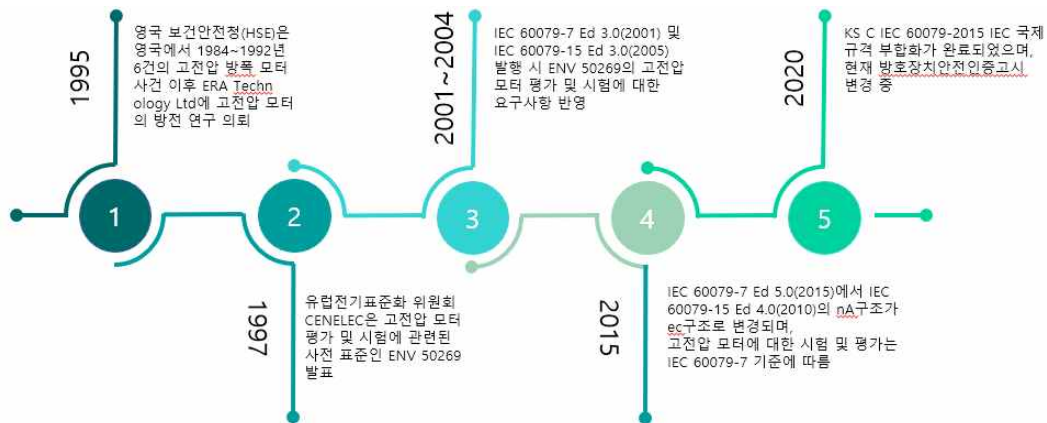


그림 1 시험도입 배경 흐름도

고전압 모터에 대한 추가시험은 1995년 영국에서 발생한 고전압 모터에 대한 6건의 사고*가 발단이 되어 연구기관과 모터 제조사가 원인조사를 실시하였으며, 그 결과 **고전압 방전 메커니즘이 폭발성 대기의 발화를 유발할 수 있다는 결론**을 내렸으며, 이를 방지하기 위해 유럽전기표준 위원회(CENELEC)에서는 고전압 모터에 대한 평가 및 시험에 관련된 사전 표준인 ENV 50269**를 발표함.

이 후, 국제전기기술위원회(IEC)에서 이를 반영한 표준인 IEC 60079-7 Ed 3.0 및 IEC 60079-15 Ed 3.0를 발행하여 국제사회에서는 이후 생산되는 고전압 모터에 대해서는 규격에서 요구하는 추가시험을 실시하여 적용해오고 있음.

* 영국안전보건청(HSE)에서 발표한 “Possible risks associated with the use of explosion protected motors types Ex ‘N’ and Ex ‘e’” Operational Circular OC 498/12 (REV) and associated Information Document, Health and Safety Executive, Field Operations Division, 1995.”에 수록됨.

** ENV 50269 : CENELEC, ENV 50269:1997, “Assessment and representative testing of high voltage machines” Brussels, B: CENELEC.

1) 1984~1992년 영국의 폭발 위험지역 방폭 모터 사고 발생

: 폭발 위험지역에 사용되는 회전 전기기기 고정자 절연 시스템의 임펄스, 정상 상태 점화 및 회전자 점화시험에 대한 도입 배경은, 1995년 영국 보건안전청 (Health Safety Executives, HSE)에서 발행한 1984~1992년 사이 영국의 고전압 방폭 모터 사고[표 8 참조]에서 시작되었음. 조사 결과 영국 기반 기술조직인 ERA Technology Limited은 모터에서 발견된 여러 방전 메커니즘이 폭발성 대기의 발화를 유발할 가능성이 있다고 결론.

Year	Description	Voltage	Duty
1984	Sparking was observed between a terminal box and side plate during starting. No explosion occurred and the motor continued to operate.	13.8 kV	Crude oil pump
1985	Inspection of an 'in-service' motor suggested that an internal explosion had occurred. The motor continued to operate. The source of ignition was not satisfactorily explained.	11 kV	Gas compressor
1988	A motor exploded during a start up procedure. There was evidence of electrical faults within the stator winding. Most of these faults were thought to have occurred as the motor exploded.	11 kV	Gas compressor with combined lube oil system
1989	A motor exploded on start up. Bonding straps had been fitted. Initial conclusions suggested that ignition was due to an electrical fault in the motor, but the possibility of ignition due to sparking, owing to interruption of circulating currents in the motor enclosure or constructional parts, could not be excluded. Nor could the possibility of some other electrical discharge mechanism.	13.8 kV	Gas compressor with combined lube oil system
1991	A motor exploded during start up. There was evidence of motor faults which could have resulted in sparking.	N/a (information not available)	N/a
1992	On start up a small explosion from the motor was heard and a flash observed. The motor started successfully and was left running. Subsequent investigation revealed slight distortion of the motor cooler.	11 kV	Gas compressor with common oil/lube seal system

표 8 영국 고전압 방폭 모터 사고 내역(1984~1992년)

2) 관계당국의 조치사항

: 영국의 고전압 방폭모터 사고와 관련하여 1990년 영국 에너지 사업부 (Department of Energy)에서는 안전증 및 비점화 타입의 고전압 모터 사용자측에 모터의 순환전류(circulating current) 및 고정자 권선의 전기

방전(electrical discharge)에 대한 주의 및 권고사항[표 9 참조]을 통지하였으며, 1995년 영국 보건 안전청에서는 모터 발화를 일으킬 수 있는 요인에 대해 발표[표 10 참조].

순	권고 사항
1	정격전압 3kV를 초과하는 안전증, 비점화, 압력 방폭 모터에 대해 가스침투가 없어야 하며, 대형 모터 순환전류에 대한 대책(스트랩 본딩 등) 적용
2	1종 지역에 위치한 정격전압 3kV를 초과하는 안전증 방폭 모터는 양압화 되어야 하며, 이후 3kV를 초과하는 안전증 방폭 모터는 1종 지역에 선정하지 말 것
3	2종 지역의 3kV~11kV 사이 안전증 및 비점화 방폭 모터는 폭발성 분위기에서 기동하지 말 것
4	2종 지역의 정격전압 11kV를 초과하는 비점화 방폭 모터는 양압화 되어야 하며, 이후 11kV를 초과하는 비점화 방폭 모터는 2종 지역에 선정하지 말 것

표 9 영국 에너지 사업부 권고사항

순	모터의 발화 요인
1	고정자의 고전압
2	회전자 기동시 과전류
3	고정자 권선의 절연물의 오염 (외부 가스 침투, 오염, 작동시간, 효과적인 유지관리 및 절연물의 보호 등과 같은 환경조건에 따라 상이)
4	작동조건 (특히 회전자 바와 코어간에 움직임을 유발할 수 있는 진동 등과 같은 조건)
5	기동빈도

표 10 모터 발화를 일으킬 수 있는 요인

3) 사용자의 조치사항

: 석유산업의 실질적인 문제와, 체계적인 대응방향을 위하여 여러차례 회의가 이루어 졌으며, 탄화수소 환경에 사용되는 나사식 또는 원심 압축기 모터는 기동 시퀀스에서 가스 침투에 취약하므로 비점화 방폭 모터 사용을 제한해야 한다는 결론을 얻었으며, 1994년 안전한 플랜트 가동을 위한 권고사항 발표[표 11 참조].

순	권고 사항
1	1종 및 2종 지역에 사용되는 모터의 등전위 본딩
2	공통 환기 제거
3	1종 지역에 안전증 방폭모터는 배제할 것
4	탄화수소 압축기 쉘 오일과 모터 윤활유의 분리
5	1종 지역의 나사식 또는 원심 압축기 구동에 사용되는 고전압 모터는 내압 및 압력 방폭 모터를 사용하고, 이 후에는 2종 지역에 설치
6	나사식 또는 원심 압축기의 구동에 사용되는 고전압 비점화 및 안전증 방폭모터에 자동 예비기동 퍼지시스템 설치
7	특정 작동타입의 펌프에는 더블 쉘 사용
8	고전압 모터의 수리, 베어링 교환, 기계적 상태 점검시 권선의 오염 확인

표 11 안전한 플랜트 가동을 위한 권고사항

4) 제조사의 연구사항

: 제조사들은 회전자 및 고정자 시험을 통하여 스파크 평가 실시[표 12 참조].

항목	스파크 발생 원인
고정자	고정자 스파크는 부분방전에 의해 발생. 모터 구동중 어느 때라도 발생할 수 있으며, 회로의 과도응답, 표면 오염, 노화에 의해 스파크 발생 위험성 증가
회전자	회전자 스파크는 회전자 바와 코어간의 접촉이 간헐적으로 끊어지면서 발생. 기동시에만 발생하며, 회전자 코어의 첫 번째 부분에 제한적으로 발생.

표 12 스파크 발생원인

5) 규격의 발전

: 1997년 유럽전기표준위원회(European Committee for Electrotechnical Standardization, CENELEC)에서 고전압 모터에 대한 기계 평가 및 대표적인 시험을 다룬 사전 표준인 ENV 50269(Assessment and representative testing of high-voltage machines)를 발표. 이후 EN 규격을 거쳐 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission, IEC)에서 IEC 60079-7:2001(Ex e) 및 IEC 60079 15:2005(Ex n)가 발행되면서 ENV 50269의 주요 요구 사항이 IEC 표준으로 통합되면서 도입됨.

- * 참고문헌 : Rautee, Jussi, Frank Lienesch, and Tom Liew. "Safety improvements of non-sparking and increased safety motors." 2008 5th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe-Electrical and Instrumentation Applications. IEEE, 2008.

2. 고정자 절연시스템의 시험원리

1) 시험적용 대상

: PTB에서는 IEC 60079-7(2015)에 따라 1kV이상의 회전전기기기 절연시스템에 대해 표 13의 조건에 따라 시험을 실시하고 있으며, PTB 시험실의 시험 조건은 표 14과 같음.

Type	Rated voltage	Equipment Group	Ignition test	
			Impulse (Clause 6.2.3.1.2)	Steady state (Clause 6.2.3.1.3)
“eb”	>1kV	ALL	○	○
“ec”	>1kV	IIB or IIC	X	○
	>1kV with random-wound stator	IIA	X	○
	>6.6kV with form-wound stator	IIA	X	○

표 13 고정자(Stator) 점화시험

Weight	Diameter	Electrical capacity
max. 3.5t	max 1m	Up to 6kV : max. 30nF Up to 10kV : max. 19nF Up to 15kV : max. 12nF

표 14 PTB 시험조건

- * 참고자료 1. Requirement to be met by the test winding for type testing of the high-voltage winding under gas
2. Prüfung Isoliersystem der Ständerwicklung(ExTL-3/3.63-AA-2.26)
3. Bewertung einer möglichen Funkenbildung im Luftspalt(ExTL-3/3.63-AA-2.27)

2) 고정자 점화 시험방법

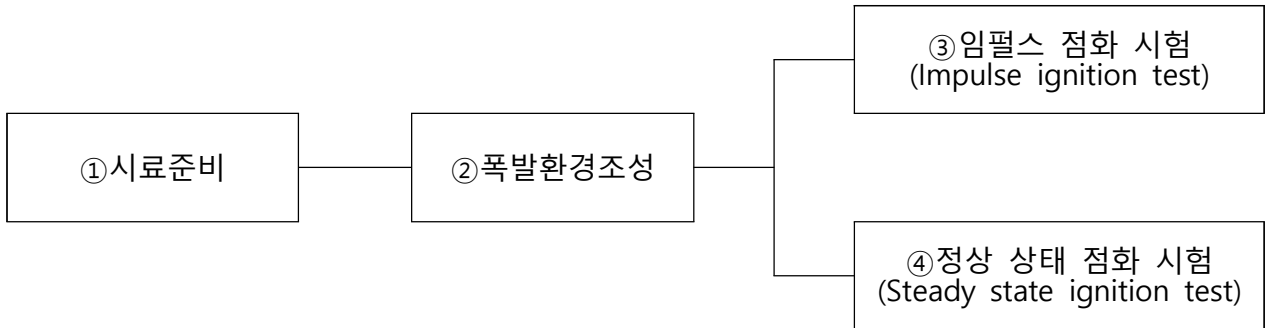


그림 2 시험흐름도

① 시료준비

- 아래 시험 시료 중 하나에 대해 수행.

순	시료
1	완전한 고정자 1개
2	회전 전기기기의 용기가 있는 고정자 1개
3	회전 전기기기 1개
4	부분적으로 권선된 고정자

표 15 시료조건

- 모든 시험 시료는 ‘신품’ 상태여야 함.
- 노출된 도전성 부품은 접지되어야 함.
- 전형적인 고정자 연결 케이블 장치는 하나의 완전한 고정자 또는 대표적인 모델로 시험
- 케이블 상호 간격 및 케이블과 인접한 도전성 부품사이의 간격 주의.
- 상 권선 사이에는 상호연결이 없어야 함.
- 해당시, 코로나 실드, 스트레스 그레이딩, 패킹 및 브레이싱, 함침 및 고정자 코어와 같은 도전성 부품이 있는 완전한 고정자를 대표하여야 함.

② 폭발환경조성

기기그룹	공기 중 시험 혼합물 V/V
IIC	(21 ± 5) % 수소
IIB	(7.8 ± 1) % 에틸렌
IIA	(5.25 ± 0.5) % 프로판

표 16 폭발성 시험 혼합물

③ 임펄스 점화 시험(Impulse ignition test)

: 상 전압의 첨두 값 3배 이상으로, 전압 상승시간은 0.2 μ s에서 0.5 μ s 사이로 하여 20 μ s를 최소로 하는 값의 절반에 해당하는 시간을 갖는 10번의 전압 임펄스 인가.

정격	5.5kV
임펄스 전압	13.5kV
파두시간	0.2 μ s~0.5 μ s
파미시간	min. 20 μ s

표 17 임펄스 점화 시험 파라미터(예시)

④ 정상 상태 점화 시험(Steady state ignition test)

: 최소 3분 동안 정격 실효 선간전압(rated r.m.s. line voltage) 1.5배 이상의 정현파 전압 인가.

정격	5.5kV
실효 선간전압*1.5배	8.25kV

표 18 정상 상태 점화 시험 파라미터(예시)

3) 임펄스(Impulse) 회로

- 현재 자주 사용되는 임펄스 회로는 2가지 타입[그림 3 참조]이 있으며, 현재 PTB에서 사용하고 있는 회로는 Circuit B 회로를 사용하고 있음.

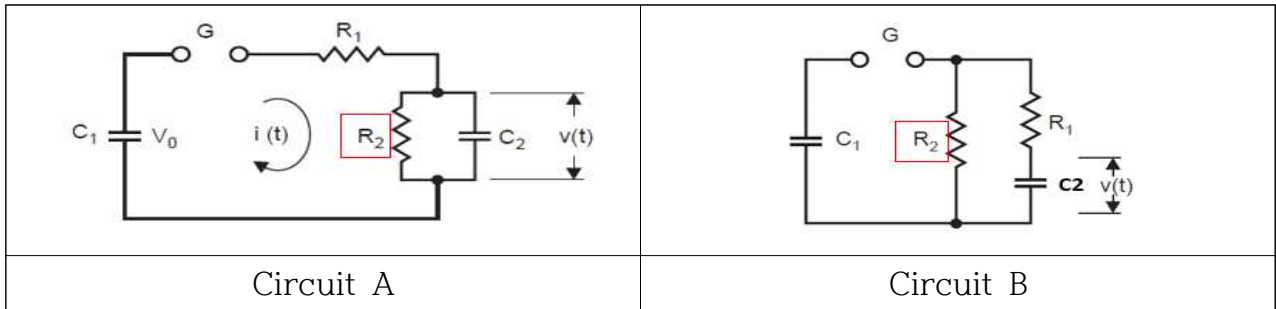


그림 3 임펄스 회로

- “Circuit B” 사용시 파라미터는 아래 표 19와 같음.

순	파라미터		비고
1	Generator capacitance	C_1	-
2	Load capacitance	C_2	시료에 따라 다름
3	Front resistance	R_1	-
4	Tail resistance	R_2	-
5	Time constant	α	$\alpha = \frac{R_1 C_2 + R_2 C_2 + R_2 C_1}{2 R_1 R_2 C_1 C_2}$
6	Time constant	β	$\beta = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{R_1 C_2 + R_2 C_2 + R_2 C_1}{2 R_1 R_2 C_1 C_2} \right)^2 - \frac{4}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$
7	Front time	t_1	$t_1 = \frac{1}{2\beta} \ln \frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta}$
8	Tail time	t_2	$t_2 = K t_1$ $K = \frac{1}{t_1(\alpha - \beta)} \ln \left(\frac{2}{1 - e^{-2\beta t_1}} \right) + 1$
9	Impulse voltage	$v(t)$	$v_{\max}(t) = \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} (e^{-(\alpha - \beta)t_1} - e^{-(\alpha + \beta)t_1})$

표 19 임펄스 회로 파라미터

4) 임펄스(Impulse) 회로분석 [덧붙임 1 참조]

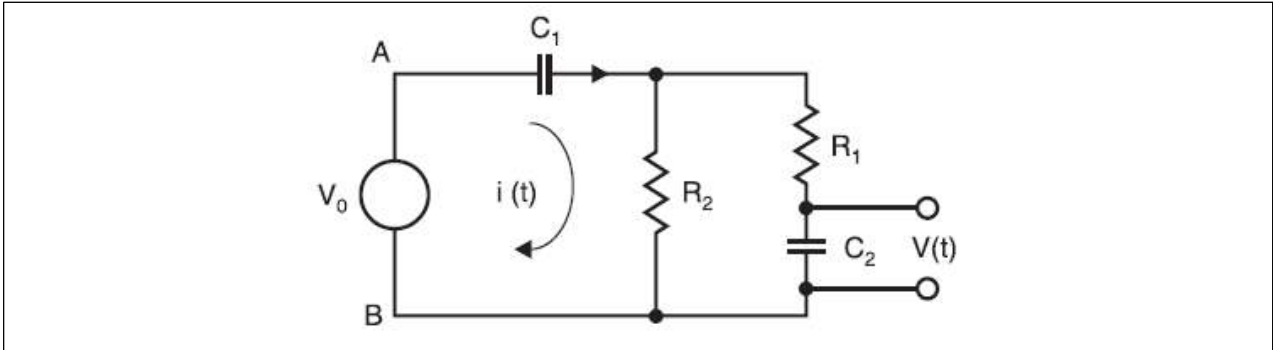


그림 4 임펄스발생 등가회로

- 등가회로의 임피던스 : $Z(s) = \frac{1}{C_1 s} + \frac{R_2(1/C_2 s + R_1)}{R_1 + R_2 + 1/C_2 s}$
- 등가회로의 전류 : $I(s) = \frac{V_0}{s} \cdot \frac{1}{Z(s)}$
- 시료의 임펄스전압 : $v_{\max}(t) = \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} (e^{-(\alpha-\beta)t_1} - e^{-(\alpha+\beta)t_1})$
- 파두시간(Front time) t_1 : $t_1 = \frac{1}{2\beta} \ln \frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta}$
- 파미시간(Tail time) t_2 : $t_2 = K t_1, K = \frac{1}{(\alpha - \beta)t_1} \ln \left(\frac{2}{1 - e^{-2\beta t_1}} \right) + 1$
- 간소화된 파미시간 t_2 : $t_2 = K t_1, K = \frac{0.7}{(\alpha - \beta)t_1} + 1$
- C_1/C_2 비율 γ : $\gamma = \frac{C_1}{C_2}$
 - C_1/C_2 의 비율이 클수록 R_2 (tail resistance)는 일정해지며, R_1 (front resistance)는 변동성이 있는 직선그래프 형성.
- 출력효율 η : $\eta = \frac{v_{\max}(t_1)}{v_0} \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2}, (\text{단}, R_2 C_1 \gg R_1 C_2)$
 - Generator capacitance C_1 값이 클수록 전압 효율 상승.

3. 시험설비구성

1) 시험회로 구성도(PTB)

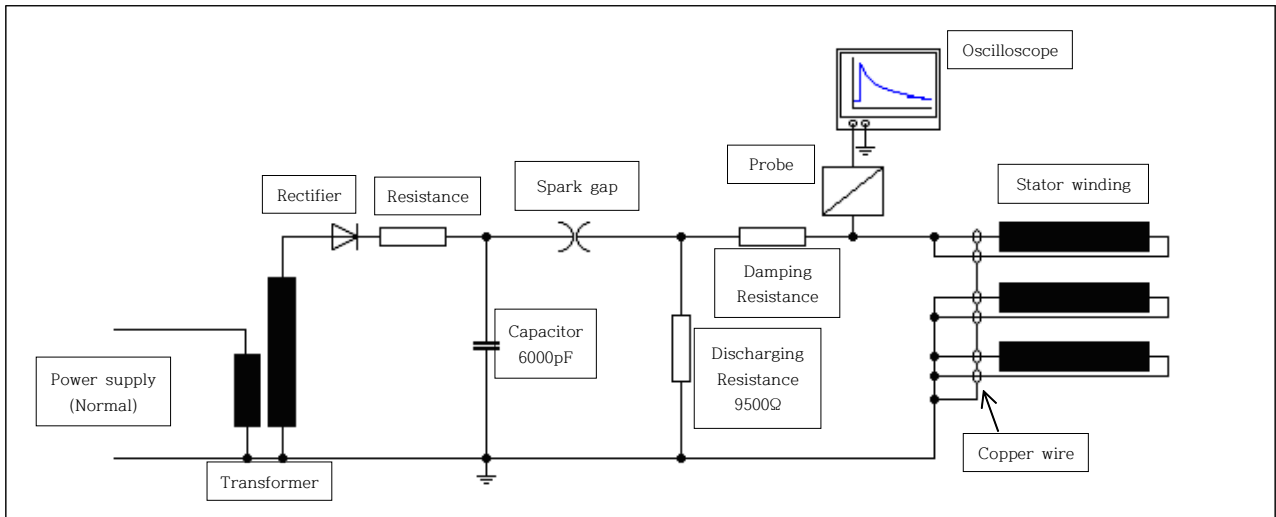


그림 5 임펄스 점화 시험회로 구성도(PTB)

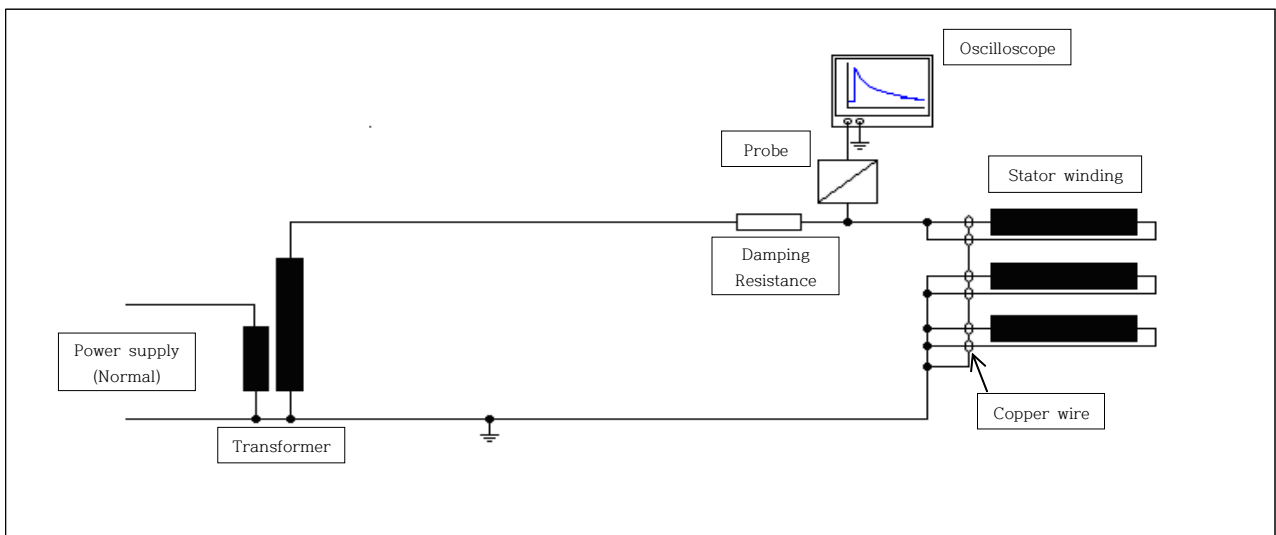


그림 6 정상 상태 점화 시험회로 구성도(PTB)

2) 시험설비 구성품

구성품명	사 진	세부사항
Power Supply		- 전원공급장치 - 230 V 전원사용
Transformer		- 변압기(~ 100 kV)
Rectifier		- Diode 와 Resistance 조합 - 교류전원을 직류로 변환
Resistance/ Damping Resistance		- 저항(9500, 830, 416 Ω 등) - 전류 or 전압값 조절용도 - 시험시료의 사양이 다양하므로 저항도 그에 따라 준비
Capacitance		- 전압의 충전으로 강한 임펄스를 일으키기 위한 용도 - 다양한 사양을 갖추며, 임펄스가 충분치 않으면, Capacitance 병렬 추가 연결

구성품명	사 진	세부사항
Spark making device		- 스파킹을 일으키는데 사용 - Gap은 수동으로 조절가능 - 습도에 따른 간격 조절
voltage divider (5000:1)		- 오실로 스코프와 권선에 공급되는 전원에 대한 완충작용
Oscilloscope & Probe		- 전원 파형 기록용 Oscilloscope - Oscilloscope 의 안전장치 역할을 하는 Probe

표 20 시험설비 구성품

4. 임펄스 및 정상상태 점화시험

1) 시험시료 준비

① 회전 전기기기의 용기가 있는 고정자 1개



그림 7 임펄스 및 정상상태 점화시험 시료



그림 8 폭발가스 주입을 위한 포일 적용

② 시료 준비시 고려사항

- 시료가 완전한 회전 전기기기가 아닌 이상 고정자 권선과 금속부간의 이격거리를 고려하여 시험.[그림 9 참조]

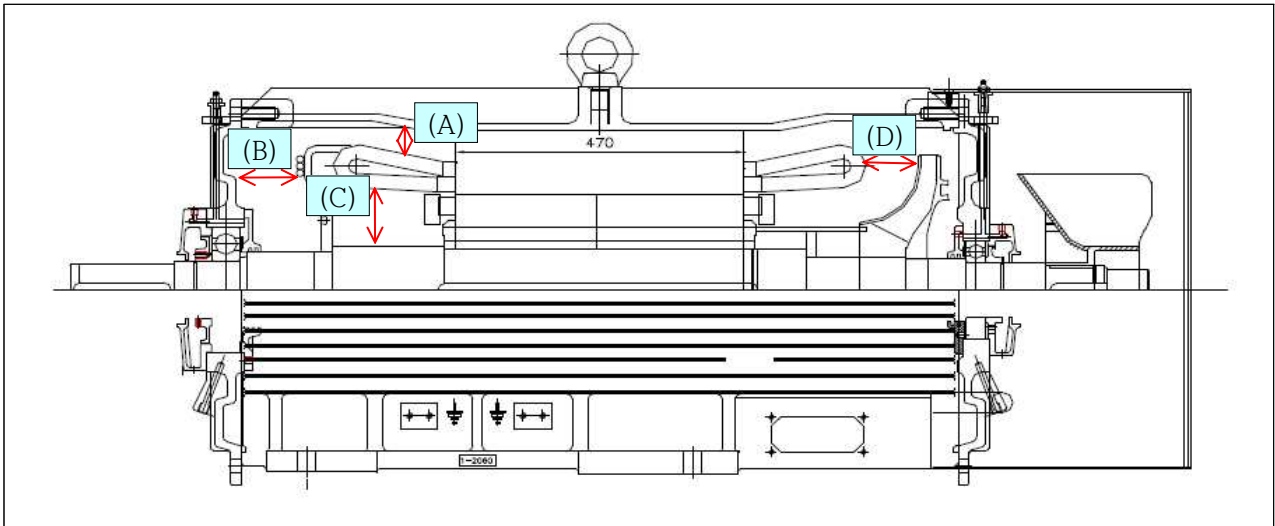


그림 9 고정자 권선과 금속부사이의 이격거리 예시

- PTB에서는 보통 고정자 권선과 프레임 사이보다 적은 이격거리에 대해 (그림 9의 A 거리) 금속으로 구성된 지그(그림 10 참조)를 부착하여 시험진행.
- * 일반적인 모터의 고정자 권선과 프레임 사이의 이격거리는 임펄스 전압에 의해 폭발이 발생하지 않을 정도로 충분하다고 함.
- ** 금속으로 구성된 지그를 포함한 시료는 제조사에서 공급.



그림 10 금속으로 구성된 지그

- 고정자만으로 시험을 하는 시료의 경우, 고정자 권선과 전원 공급단자를 연결하는 접속 케이블의 절연물은 프레임과 접촉할 수 있는 경우를 고려하여 시험 진행 필요.[그림 11 참조]

*PTB에서는 접속케이블에 구리선을 감아 동일한 효과가 구현되는 방법등을 사용

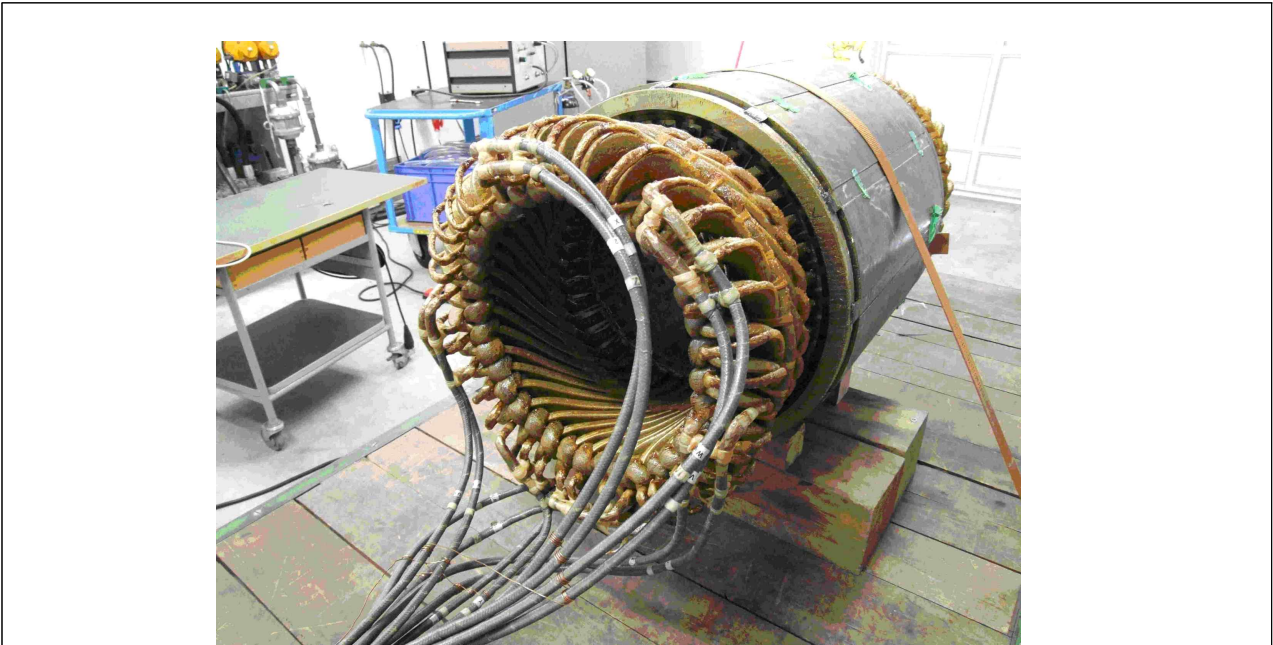


그림 11 접속케이블에 구리선이 감긴 고정자 시료

- 고정자의 절연권선간의 이격거리 준수여부 검토 필요.[그림 12,13 참조]

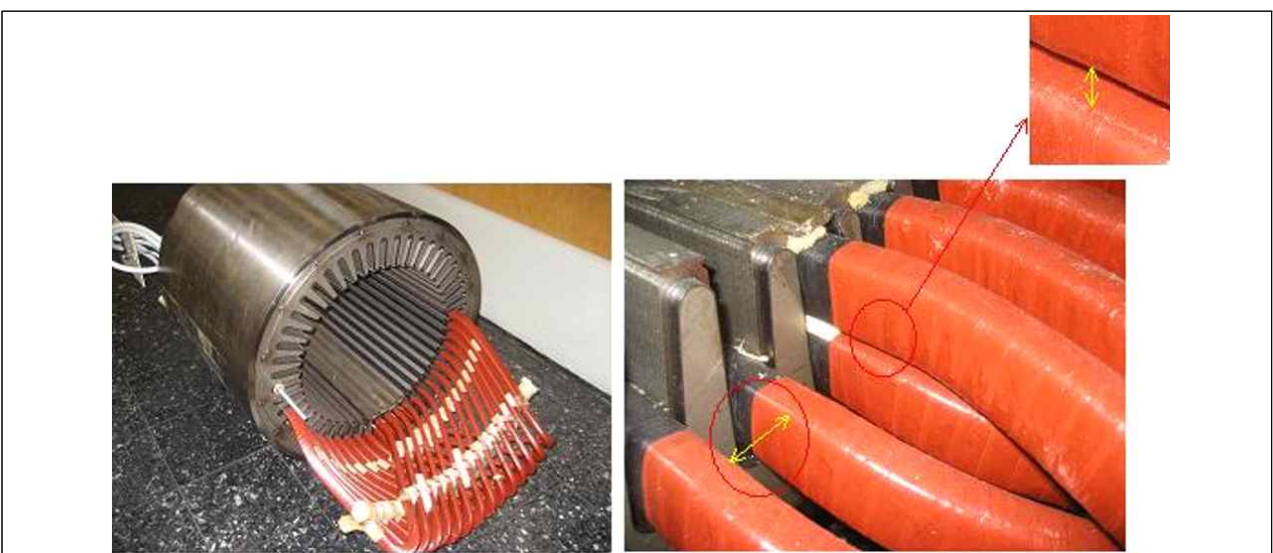


그림 12 절연된 권선 사이의 이격거리

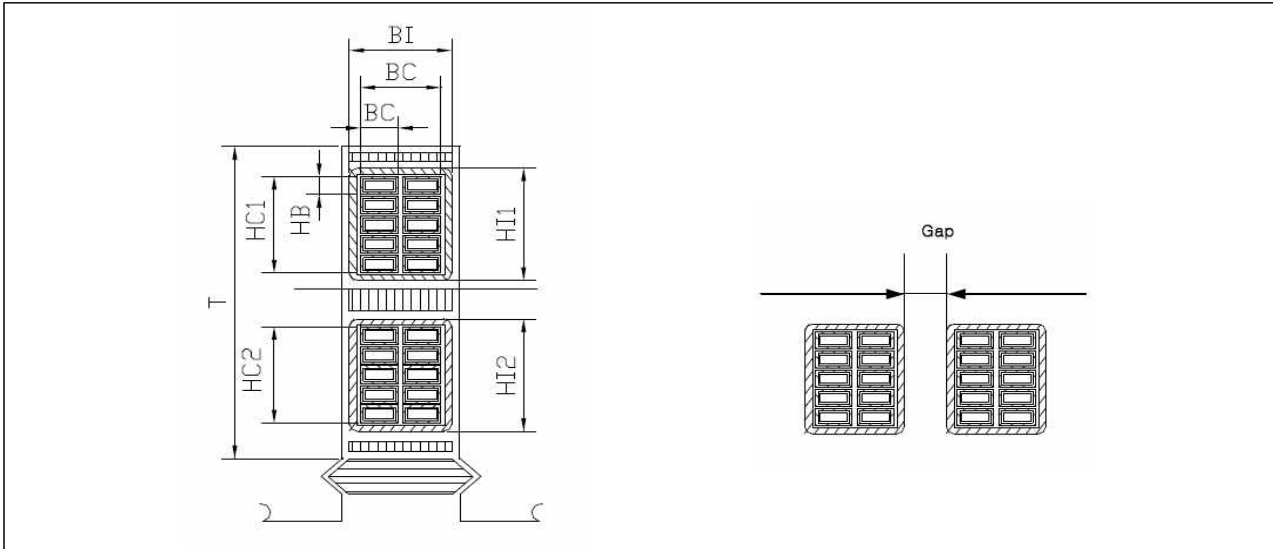


그림 13 고정자 권선 및 슬롯 단면도

③ 폭발환경 조성

: 해당시험은 21% 수소를 이용한 혼합가스 적용.

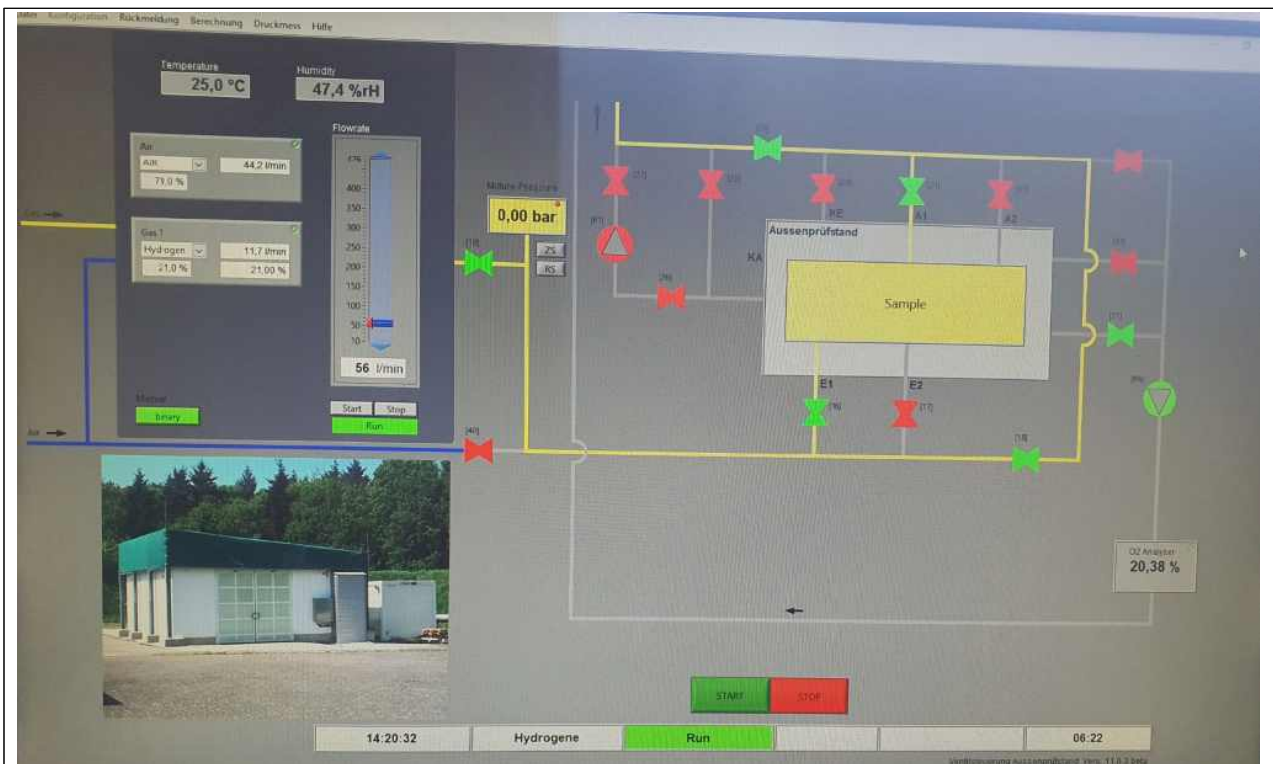


그림 14 폭발시험용 혼합가스 공급 조절 Flow diagram

④ 임펄스 및 정상상태 점화 시험



그림 15 시험사진

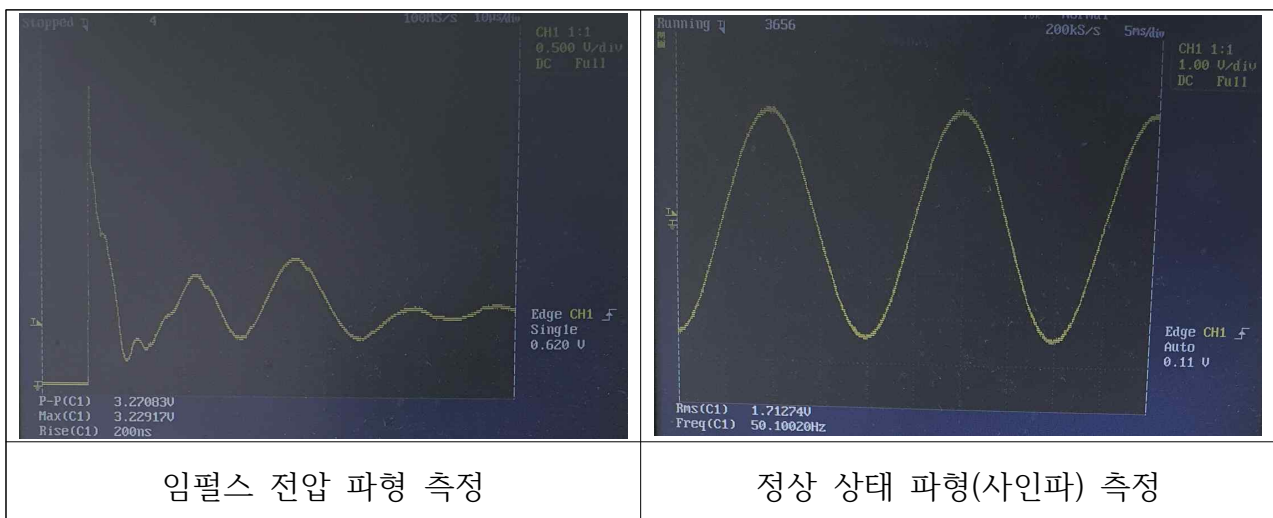


그림 16 오실로스코프를 이용한 전압 파형 분석

⑤ 시험결과

: 6.6kV 정상상태 점화시험에서 2분 15초지점에 폭발.

No	Phase	Distance	U _{Load}	U _{Dvider}	U _{Check}	Pulse count	Test time	Result	Comment
1	U	12.5mm	62.0 V	2.70 V	13.5 kV	10	-	Pass	5.5kV
2	V	12.5mm	62.2 V	2.73 V	13.7 kV	10	-	Pass	5.5kV
3	W	12.5mm	62.1 V	2.70 V	13.5 kV	10	-	Pass	5.5kV
4	W	-	23.8 V	1.70 V	8.5 kV	-	3min	Pass	5.5kV
5	V	-	23.5 V	1.71 V	8.6 kV	-	3min	Pass	5.5kV
6	U	-	24.2 V	1.76 V	8.8 kV	-	3min	Pass	5.5kV
7	U	-	28.6 V	2.05 V	10.3 kV	-	3min	Pass	6.6kV
8	V	-	28.1 V	2.01 V	10.1 kV	-	2.15 min	Fail	6.6kV, Ignition after 2min 15s

표 21 시험데이터

	
시험 전 시료	시험 후 시료 (고정자 정상상태 시험에서 폭발 발생)

그림 17 시험 전/후 시료사진

5. 회전자 시험원리

1) 시험적용 대상 및 보호조치

: IEC 60079-7(2015)에 따라 회전자 케이지에 대하여 공극에서의 스파크 가능성 평가를 요구하고 있으며, 아래 표 22의 조건에 해당되는 경우 표 23에 따른 하나의 추가적인 보호조치가 적용되어야 함.

*공극에서의 스파크 가능성 평가는 전압에 상관없이 모든 안전증 모터에 적용.

Type	Duty type	Safety factor*	Rated power	Ignition test
“eb”	ALL	≤6	-	X
		>6	-	○
“ec”	S1,S2,S6,S9	-	-	X
	S3,S4,S5,S7,S8,S10	≤6	-	X
		>6	≤100kW	X
			>100kW	○
*Safety factor는 IEC 60079-7 Table 5 “Potential air gap sparking risk assessment for cage rotor ignition risk factors” 참조				

표 22 회전자(Rotator) 점화시험

순	보호조치
1	회전자 점화시험
2	회전기기 기동시 폭발성가스 분위기 배제
3	회전기기 기동전류 제한(정격전류의 300%이내)

표 23 추가 보호조치

2) 회전자 점화 시험방법

: 회전자 점화시험은 아래 그림에 따른 순서로 진행되며, 노화시험 후 직입기동 또는 구속시험 중 하나의 시험을 선택하여 진행.

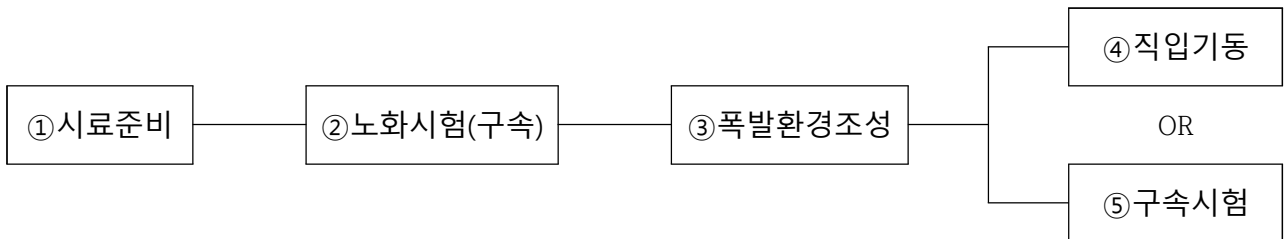


그림 18 시험흐름도

① 시료준비 : 완성된 고정자와 회전자가 있는 회전기기를 사용하여 실시하며, 점화시험에 관련이 없는 부분 제외 가능.

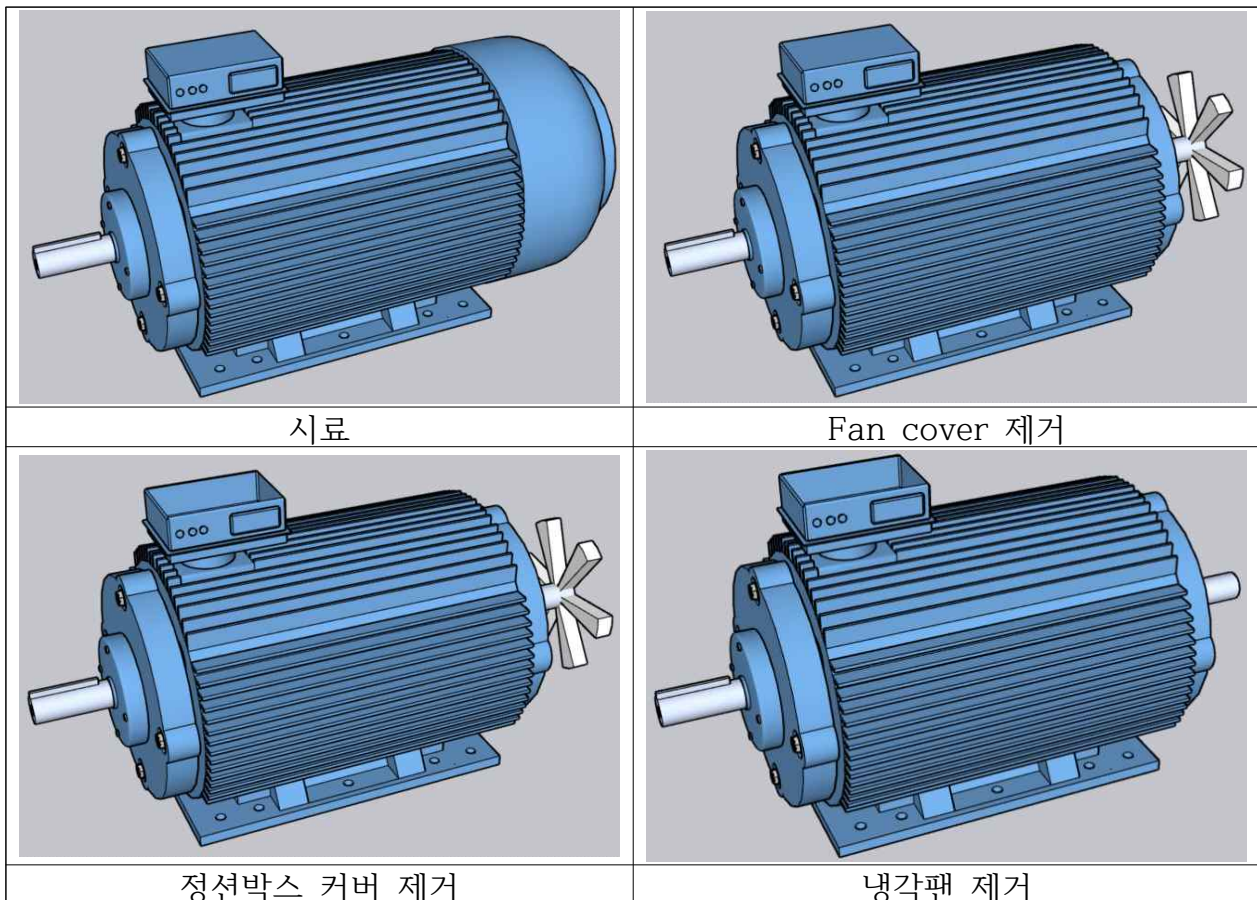


그림 19 시험시 탈착가능한 부분(예시1)

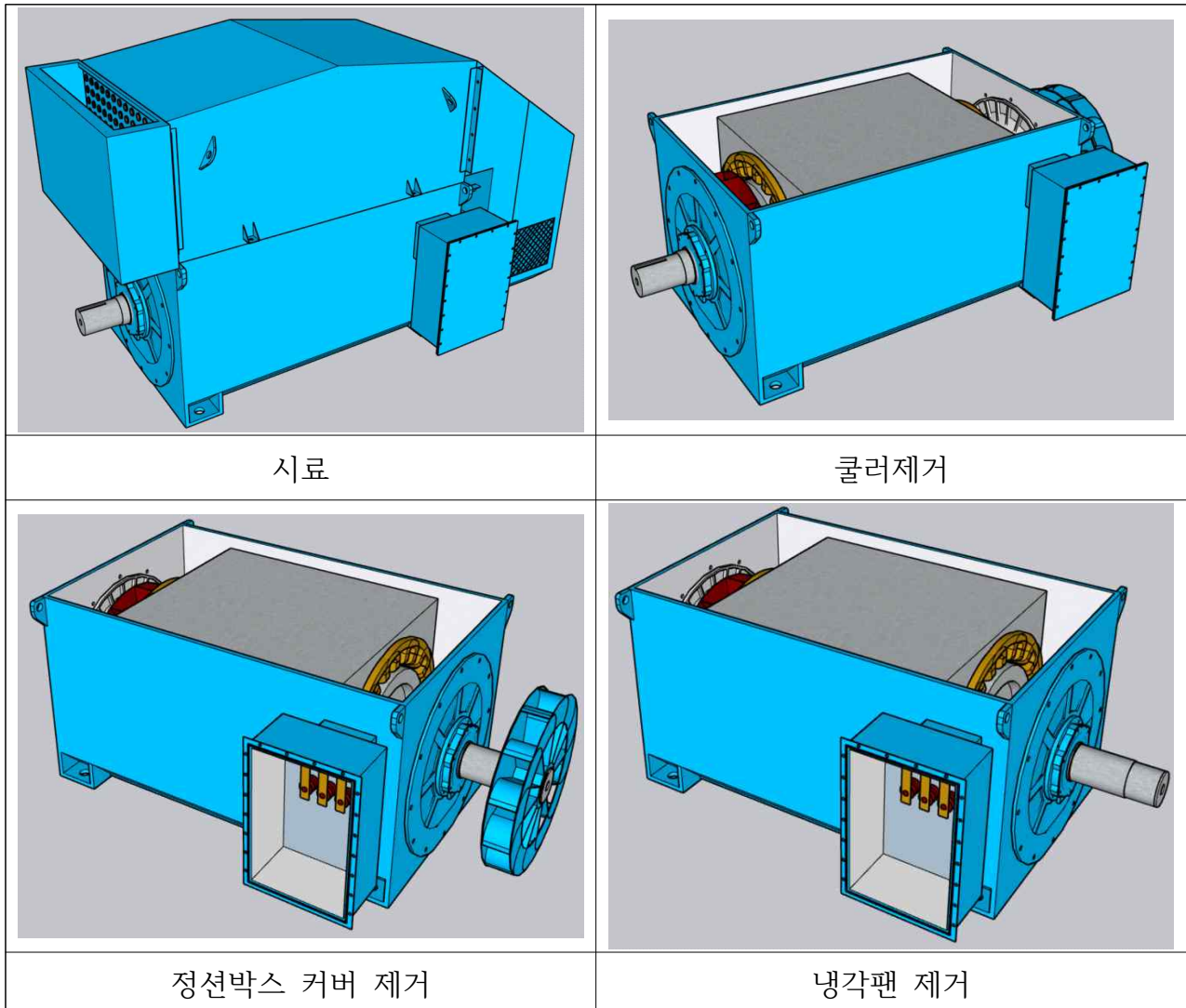


그림 20 시험시 탈착가능한 부분(예시2)

② 노화시험(ageing process) : 본 시험전 5회의 구속시험을 통한 노화과정이 필요하며, 회전자 케이지의 최고온도는 최고 설계온도와 70°C 미만 사이에서 순환*되어야 함. 적용전압은 정격전압의 50% 이상**이어야 함.

* 시험시료의 온도등급이 T3일 경우, 회전자 케이지의 온도는 70°C~195°C이어야 함.

** 적용전압은 전압강하까지 고려하여 정격전압의 50%이상이어야 함.

*** 시험시 회전자의 구속시간은 time tE와 무관하며, 최고설계온도와 70°C사이의 온도만 만족하면 되나, 일반적으로 PTB에서는 최소 5초에서 10초정도 구속.

- ③ 폭발환경조성 : 노화과정을 거친 시료에 대한 아래표 24에 따른 폭발성 시험 혼합물 조성. 단, 점화시 내부폭발압력에 따른 회전기기 구조물의 파손 및 비산으로 인한 안전사고가 발생할 경우가 있으므로, 이에 따른 안전조치 필요
[그림 21,22,23 참조]

기기그룹	공기 중 시험 혼합물 V/V
IIC	(21 ± 5) % 수소
IIB	(7.8 ± 1) % 에틸렌
IIA	(5.25 ± 0.5) % 프로판

표 24 폭발성 시험 혼합물

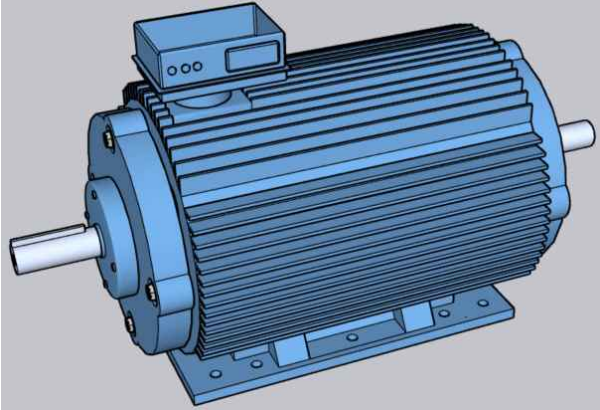
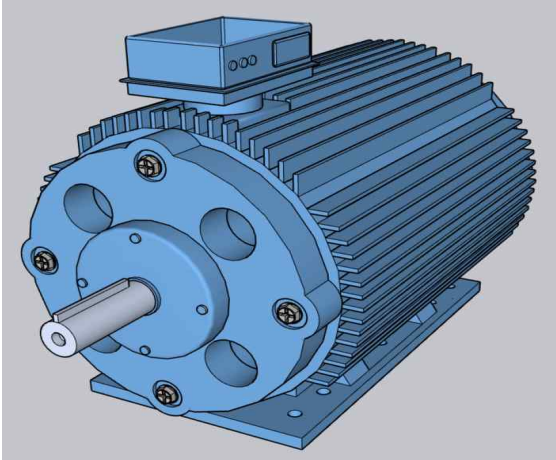
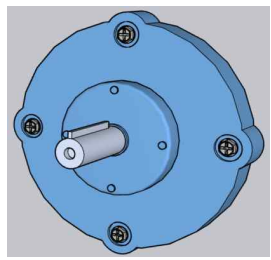
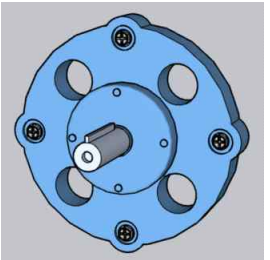
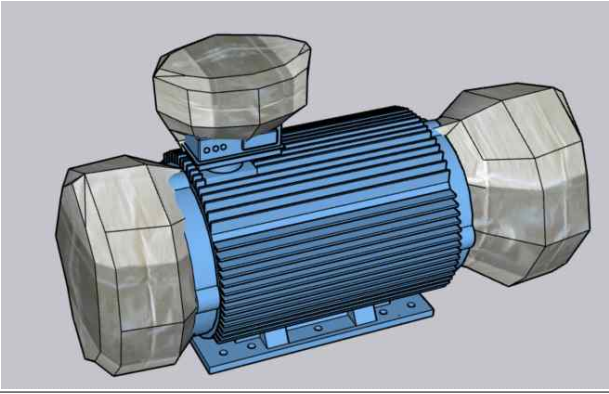
			
시료		엔드플레이트(DE/NDE) 홀가공	
			
가공 전	가공 후	폭발환경 조성을 위한 개구부 막음 처리	
엔드플레이트(양쪽)			

그림 21 회전자 시험 폭발환경 조성(예시1)

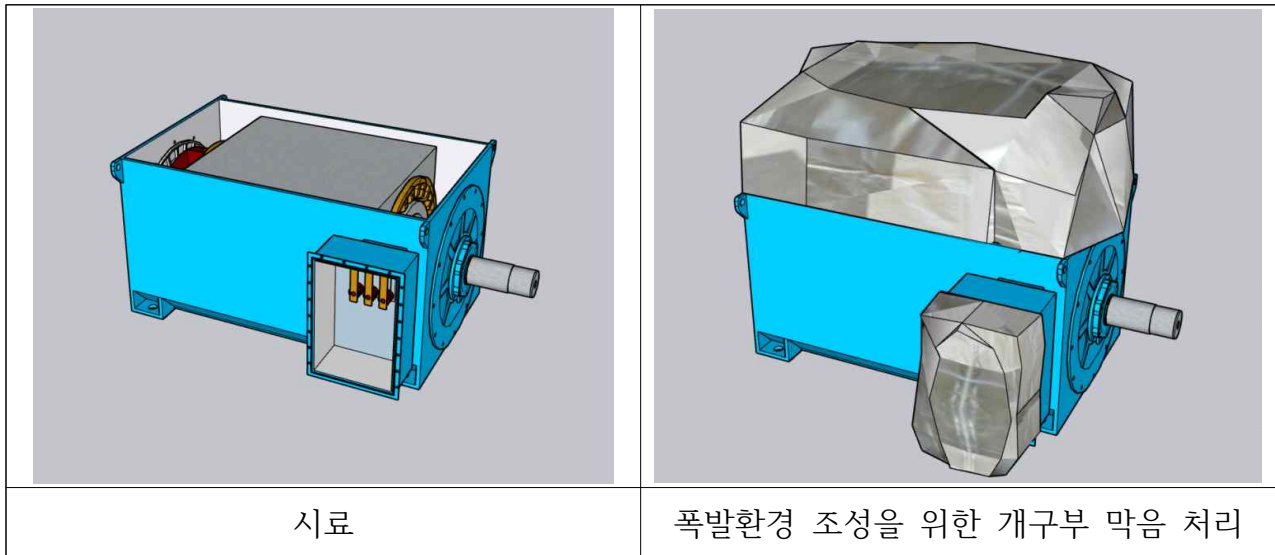


그림 22 회전자 시험 폭발환경 조성(예시2)

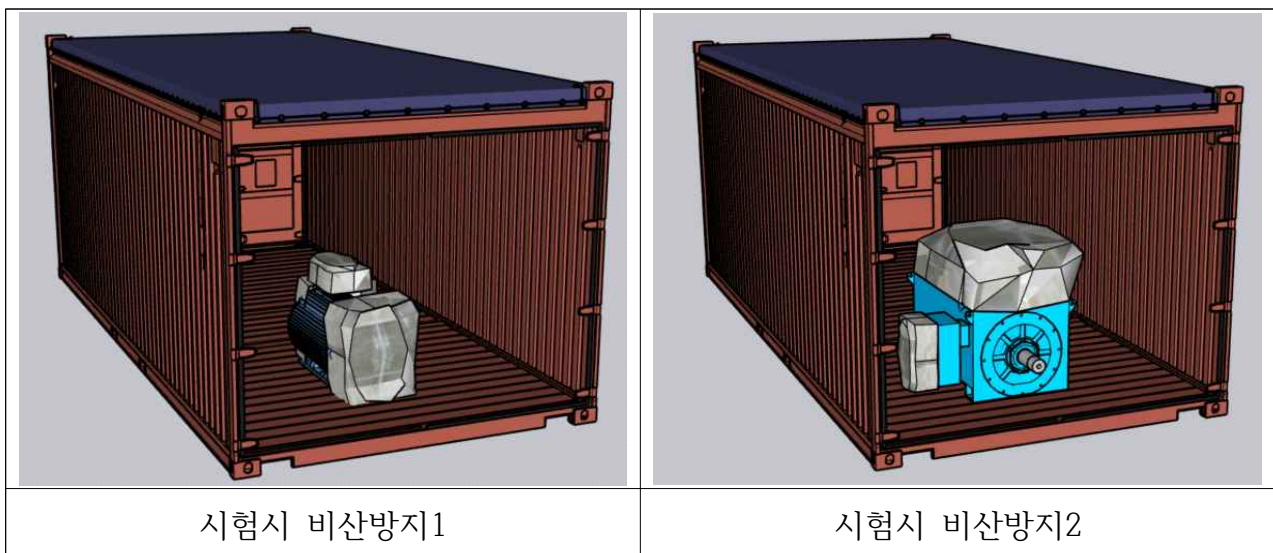


그림 23 폭발시 구성품 비산방지 대책(예시)

- ④,⑤ 직입기동시험(direct-on-line uncoupled start test) 및 구속시험 (locked rotor test) : 노화시험을 거친 시료에 대해 시험을 실시하며, 아래 표 25의 시험 중 하나의 시험만을 선택하여 진행.

	직입기동시험 (direct-on-line uncoupled start test)	구속시험 (locked rotor test)
적용전압*	정격전압	정격전압
시험시간**	정격속도 도달시까지	노화시험과 동일
시험횟수	10회	10회
비고	시험은 반드시 샤프트가 완전히 멈춘후에 다음시험 진행 가능 ▼ 상당한 시험시간 소요 (일반적으로 샤프트 정지시까지 30분이상 소요)	감소된 전압으로 시험불가 ▼ 전원용량 부족시 직입기동시험으로 대체
* IEC 60079-7에 따라 시험시 단자전압(terminal voltage)은 정격전압의 90%이하로 떨어지지 않아야 하므로, 전압강하를 고려하여 정격전압 적용. ** 규격에서는 두 시험모두 최소 1초이상의 지속시간을 갖도록 요구하고 있으나, PTB는 직입기동시험의 경우 보통 회전자 스파크 발생은 정격속도의 80%~100%의 구간에서 관측되는 경우가 많으며, 구속시험의 경우에도 노화시험의 온도순환을 충족시키기 위해 보통 5초에서 10초정도의 구속시간을 적용.		

표 25 직입기동 및 구속시험

6. 국내 적용방안

가. 인증원내 시험설비 구축(예상도)

① Impulse ignition test

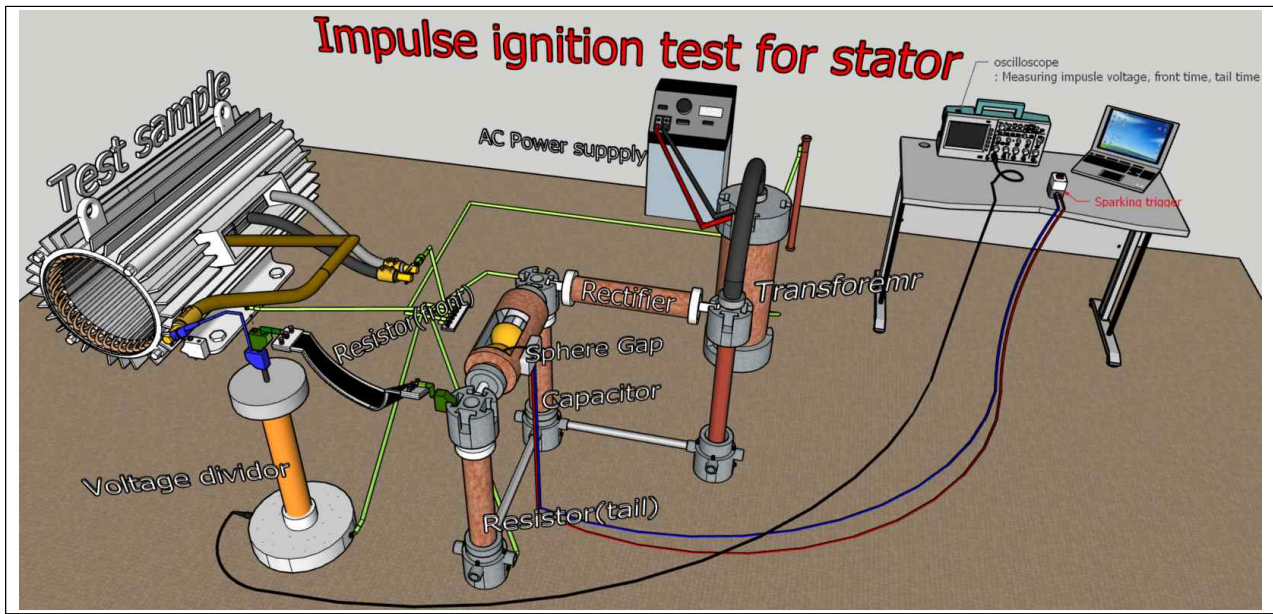


그림 24 임펄스 점화시험 레이아웃(예상)

② Stady state ignition test

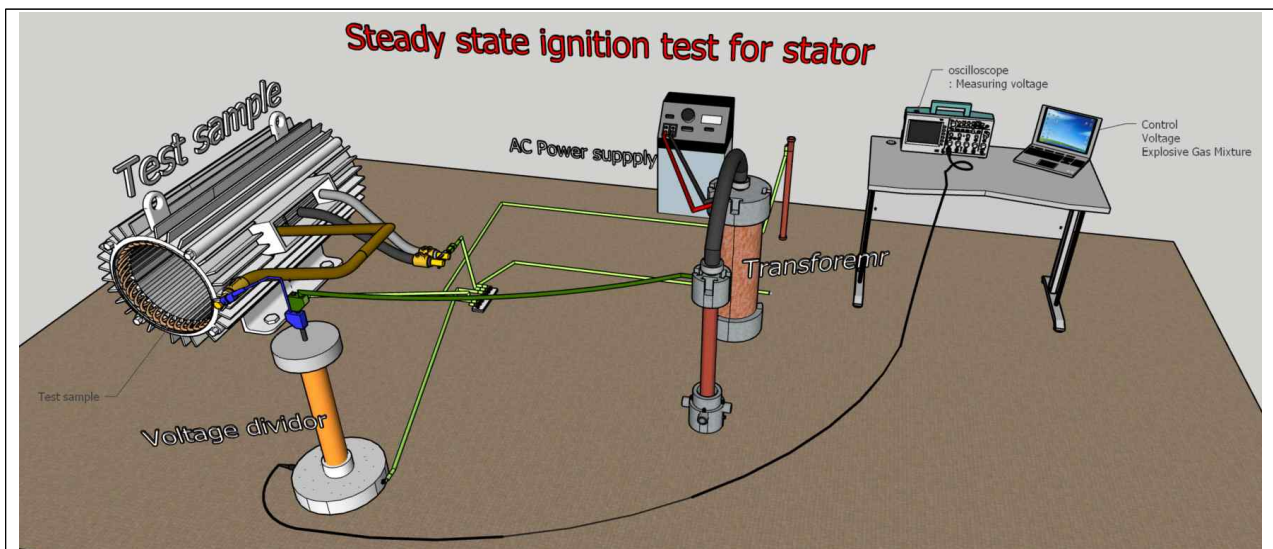


그림 25 정상 상태 점화시험 레이아웃(예상)

나, 설비 구축시 고려사항

① 부품용량 문제 : 본시험은 시험 시료의 정전용량에 따라 시험 파라미터를 만족하기 위하여 개별 구성품(Capacitor, Resistor 등)의 변경이 필요함.

-> 시험 파라미터는 시료의 정전용량에 따라 결정되지만, 독일 모터 제조사에서도 시료의 정전용량을 제공하지 못하는 경우가 많으며, 이러한 경우 이론적인 계산 또는 구성품 변경 및 시험을 반복하여 파라미터 확인.

-> PTB는 전문 연구기관으로서 방폭부서뿐만 아니라 타 부서에도 해당 부품들을 다수 보유하고 있어 필요시 기관 내의 부품을 대여하는 방법으로 시험실시.

② 안전문제 : 폭발시 안전을 확보하기 위하여 대형 폭발시험실의 대형챔버 내에서 시험을 실시하는 등의 안전대책을 강구하여야 하며, 이때 시료는 최대 1.5톤 이하로 제한되어야 함.(챔버 지지하중 약 2톤)

: 해당시험을 위해 PTB에서는 별도의 시험동을 구축하여 폭발시의 안전사고(화재,폭발,비산)를 방지하기 위한 조치를 취하고 있음.



그림 26 PTB 시험실 외부 전경



그림 27 PTB 시험실 내부 전경

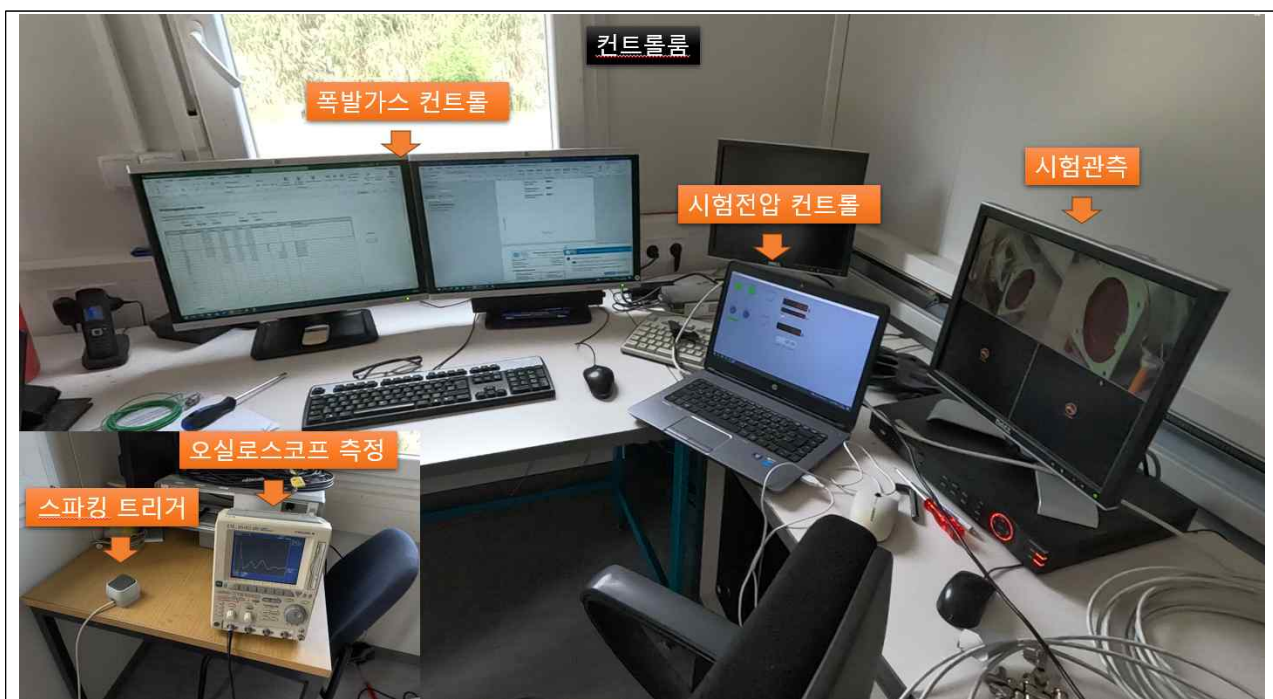


그림 28 PTB 컨트롤룸 내부 전경



그림 28 PTB 시험실 위치(기관 외곽)

1. 온도측정 시험시 모터 외부의 표면온도를 측정하기 위해 K 타입 열전대를 사용하여, 모터의 외함에 삽입하는 방법 사용

1) 시료 준비

: 모터 표면의 드릴 가공된 홀에 열전대 삽입 후 징과 망치로 마감 처리하는 방법을 사용[그림 29 참조]하며, 이 방법은 국내에서 사용 중인 테이프나 고착재료 등을 사용한 방법보다 효과적인 열전달을 통해 온도측정에 있어 더 정확한 데이터를 제공함. PTB는 내부적으로 열전대 부착에 사용되는 재료별 온도측정 특성에 대한 연구를 진행하였으며, 상당수의 재료별 특성에 대한 데이터가 집계되어 있음.

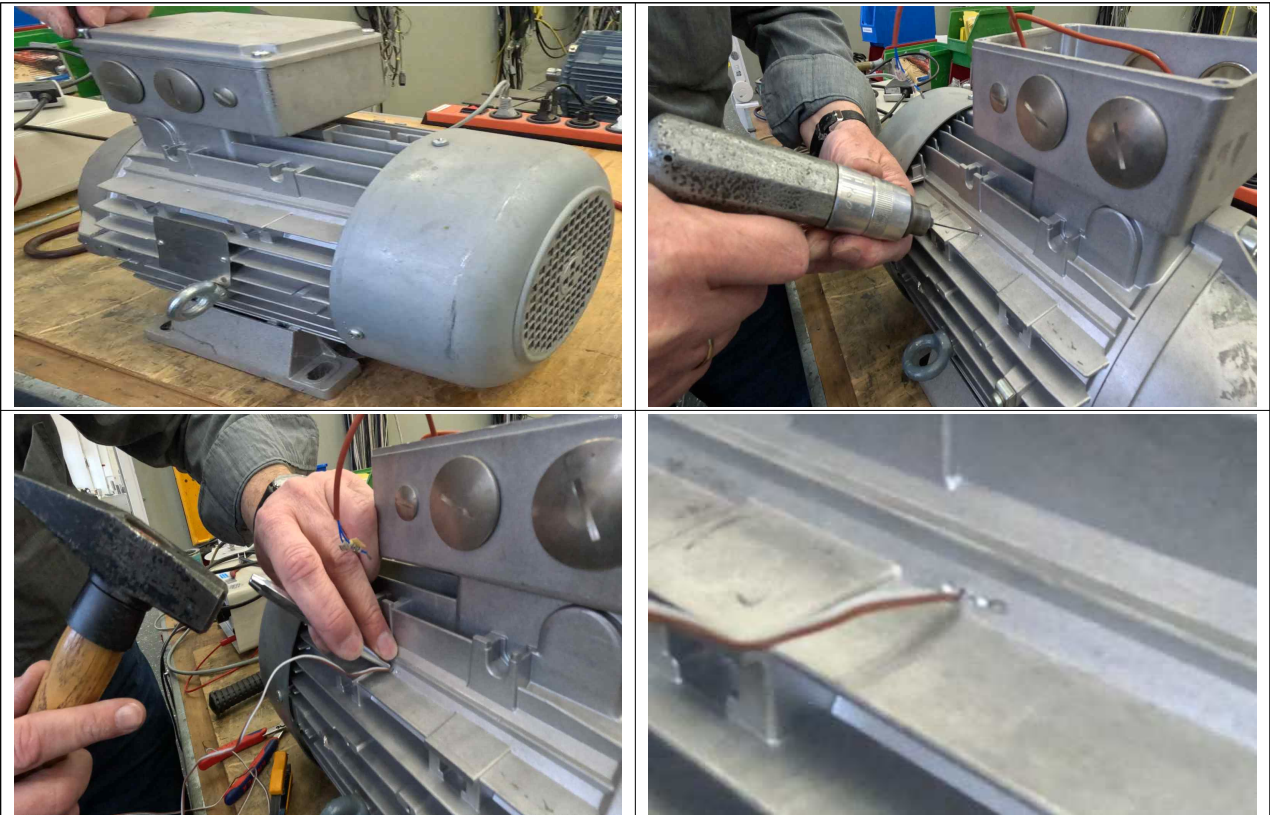
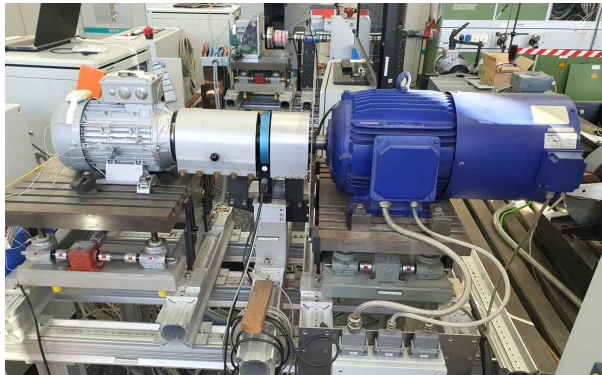


그림 29 모터 표면 센서 부착

2) 시험준비



시험시료 다이내모미터 연결
(Max 50N·m, 6000rpm, 180 Frame size)



파워케이블, 서미스터, 저항측정케이블 연결



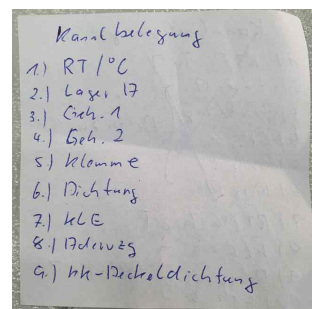
온도기록계(HR1300)



저항측정기(RESISTOMAT 2316)



전력측정기(WT3000)



온도센서부착위치

그림 30 시험준비

3) 권선저항측정

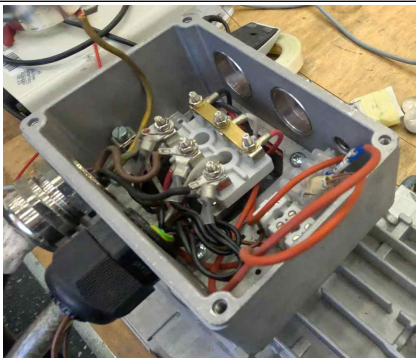
	2316 Excel Datenlogger-Messwerte (Abkühlkurve) Erfassdatum 09.02.2023 10:27:05 Gerätebezeichnung MM-NR_363_100 Geräte-Seriennummer 561824 Beschreibung Cold Resistance GBN SK 112 MH4 star connexion, motor temperatur = 19,6 °C <table><tr><th colspan="4">Messdaten</th></tr><tr><th>Zeit (s)</th><th>Messwert</th><th>Einheit</th><th>Zyklus</th></tr><tr><td>1</td><td>1.9080</td><td>Ohm</td><td>A</td></tr><tr><td>11</td><td>1.7700</td><td>Ohm</td><td>A</td></tr><tr><td>21</td><td>1.7690</td><td>Ohm</td><td>A</td></tr><tr><td>31</td><td>1.7690</td><td>Ohm</td><td>A</td></tr><tr><td>41</td><td>1.7690</td><td>Ohm</td><td>A</td></tr><tr><td>51</td><td>1.7690</td><td>Ohm</td><td>A</td></tr><tr><td>61</td><td>1.7690</td><td>Ohm</td><td>A</td></tr><tr><td>71</td><td>1.7680</td><td>Ohm</td><td>A</td></tr><tr><td>81</td><td>1.7690</td><td>Ohm</td><td>A</td></tr><tr><td>91</td><td>1.7680</td><td>Ohm</td><td>A</td></tr></table>	Messdaten				Zeit (s)	Messwert	Einheit	Zyklus	1	1.9080	Ohm	A	11	1.7700	Ohm	A	21	1.7690	Ohm	A	31	1.7690	Ohm	A	41	1.7690	Ohm	A	51	1.7690	Ohm	A	61	1.7690	Ohm	A	71	1.7680	Ohm	A	81	1.7690	Ohm	A	91	1.7680	Ohm	A
Messdaten																																																	
Zeit (s)	Messwert	Einheit	Zyklus																																														
1	1.9080	Ohm	A																																														
11	1.7700	Ohm	A																																														
21	1.7690	Ohm	A																																														
31	1.7690	Ohm	A																																														
41	1.7690	Ohm	A																																														
51	1.7690	Ohm	A																																														
61	1.7690	Ohm	A																																														
71	1.7680	Ohm	A																																														
81	1.7690	Ohm	A																																														
91	1.7680	Ohm	A																																														
저항 측정케이블 연결	저항 측정 값(10초간격)																																																

그림 31 권선 저항측정

4) 정격운전 시험 및 온도측정

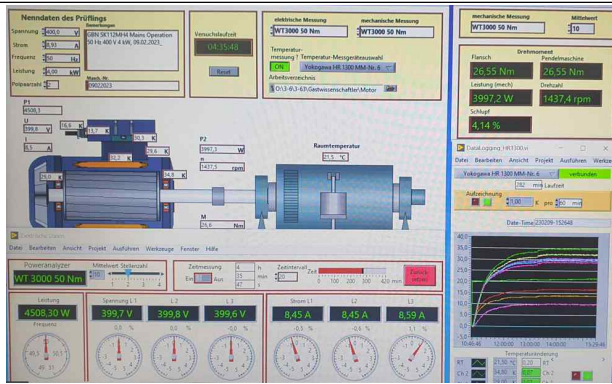
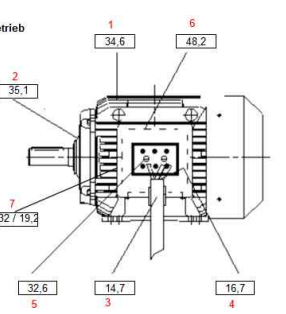
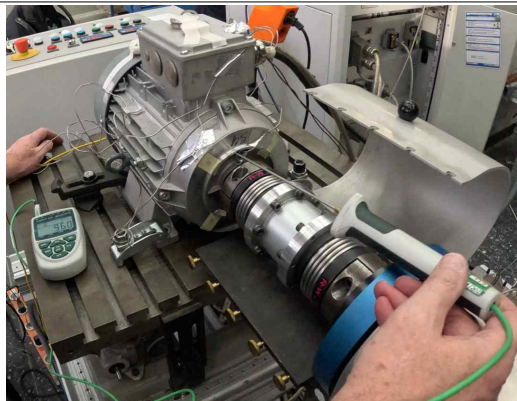
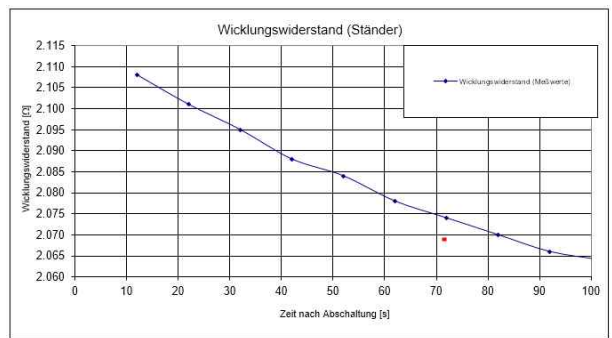
	Verluste bei Nennbetrieb $P_1 = 4535.313 \text{ W}$ $P_{\text{ms}} = \text{---} \text{ W}$ $P_{\text{Fe}} = 0 \text{ W}$ $P_s = \text{---} \text{ W}$ $s = \text{---} \%$ $P_{\text{st}} = \text{---} \text{ W}$ $P_{\text{st}} = 0.00 \text{ W}$ $P_r = \text{---} \text{ W}$ $P_{\text{LL}} = \text{---} \text{ W}$ $P_T = \text{---} \text{ W}$ $P_2 = \text{---} \text{ W}$ $\eta = \text{---} \%$ $\cos \phi = \text{---}$  Höchste Erwärmungen von: Motorgehäuse: 34,6 K 1 Lager A - Seite: 35,1 K 2 Kabeleinführung: 14,7 K 3 Aderverzweigung: 16,7 K 4 Klemmenplatte: 32,6 K 5 Statorwicklung: 48,2 K 6 Dichtung: 32 / 19,2 K 7
Lab view control Ranting : 50Hz 400V 4kW, star connection	모터표면온도 측정*
	
회전자(rotor) 온도 측정	고정자(stator) 저항값 측정

그림 32 정격운전시험

* 모터 표면 온도 측정에 있어 시간당 2K 상승 확인 후 모터 전원 종료 측정값이 아닌, 온도측정 전 구간에 걸친 최고 온도 및 전원 종료 후 상승하는 최고온도 값을 고려하여 최고표면온도를 결정하여야 함

(모터운전 종료시 냉각팬의 회전 또한 멈추므로, 이로 인하여 추가적인 온도상승이 관측 될 수 있음)

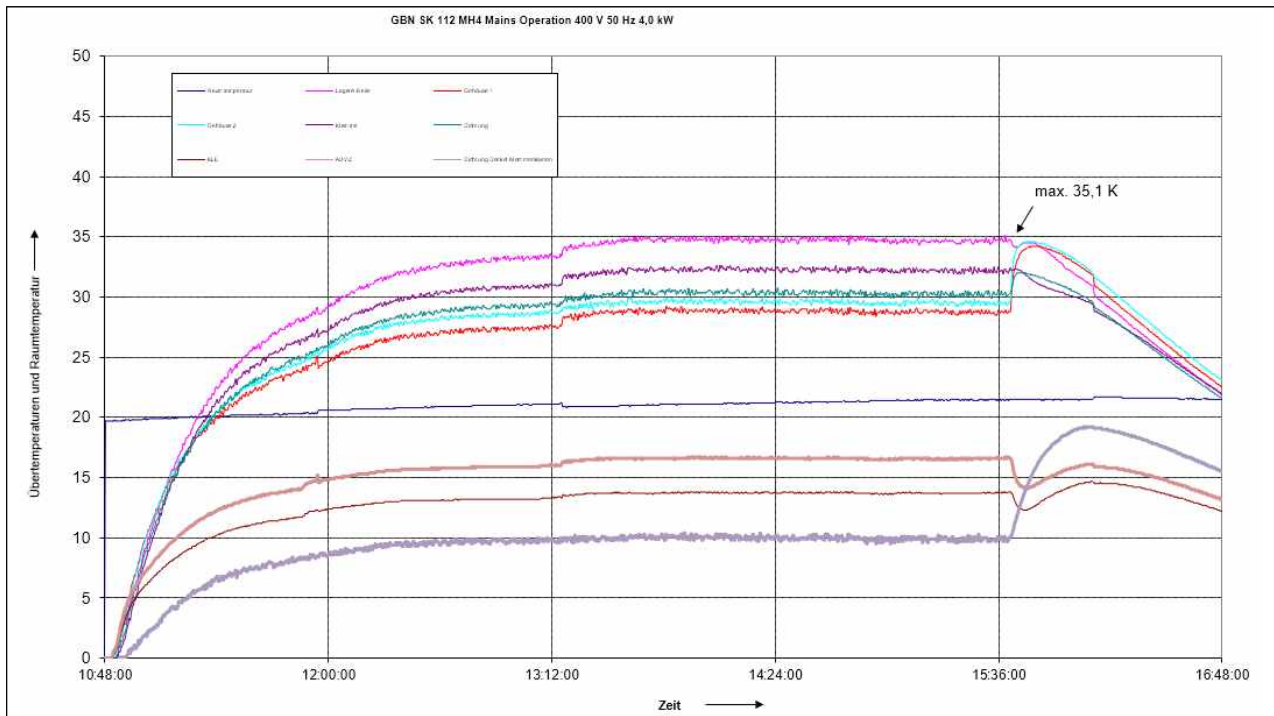


그림 33 전원 종료 후 추가적인 온도 상승 관측

2. IEC 규격에 따른 고정자 및 회전자 온도추정에 따른 온도차이 비교

1) 고정자 온도 추정 방법

: 권선 온도는 회전 전기기기의 전원을 끈 직후 저항법에 의해 결정되어야 하며, 전원 OFF시점에서 기기가 빠르게 냉각되므로, 전원 차단시 최고 온도를 결정하기 위해 지수 곡선 맞춤 기법(Exponential curve fit technique)을 사용하여 시간이 0이 되는 지점으로 그래프를 그리는 방법으로 권선의 저항을 추정하고, 이 저항 값을 이용하여 IEC 60034-1 Clause 8.6.2.2에 따른 계산방법으로 최고 온도를 결정함. PTB에서는 지수 곡선 맞춤 기법이 아닌 3차 곡선 맞춤 기법(Cubic Polynominal curve fit technique)을 사용하여 권선의 저항 값 추정.

(PTB는 오랜 시험적 근거를 바탕으로 이상적인 전원 개로시 온도추정 방법 사용중)

2) 고정자 온도 추정방법에 따른 비교

: 특정샘플(400V, 4kW, 50Hz)로 시험한 결과 이 두방법에 따른 고정자 권선의 최고온도 차이는 1.26K로 PTB에서 사용 중인 3차 곡선 맞춤 기법 사용시 더 높은 온도 상승 관측.[그림 15 참조]

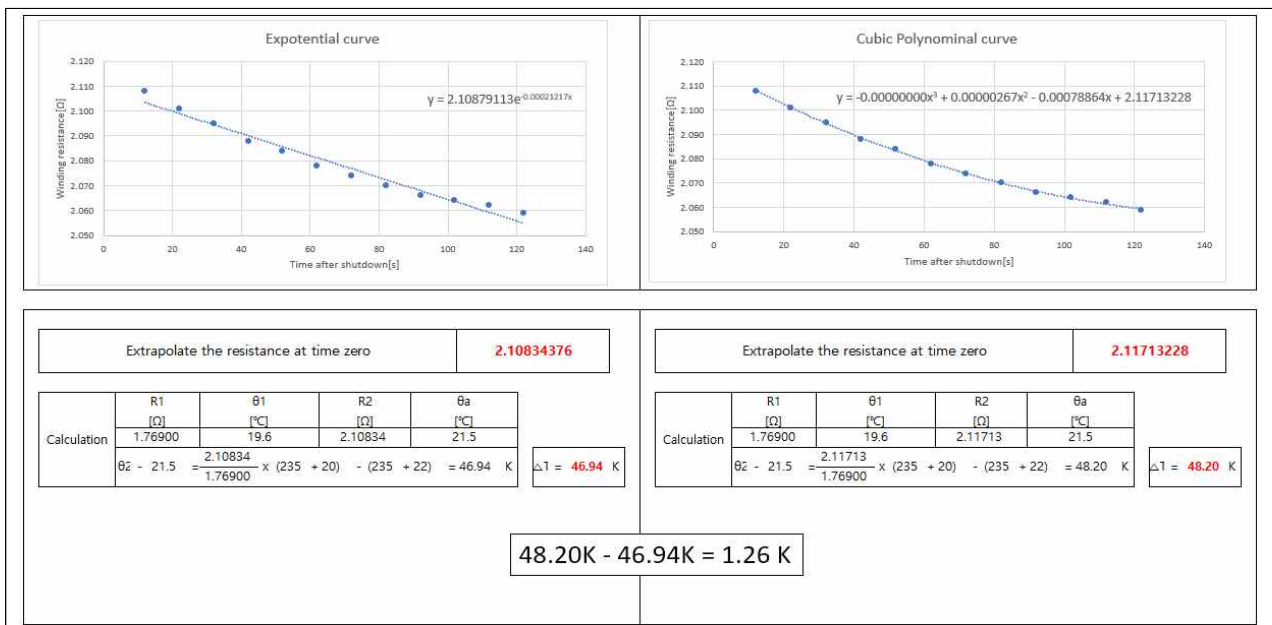


그림 34 지수 곡선 맞춤 기법(좌측) 및 3차 곡선 맞춤 기법을 통한 권선 저항 결정

3) 회전자 온도 추정 방법

: 회전자 온도는 고정자와 마찬가지로 전원 OFF시점에서 기기가 빠르게 냉각되므로, IEC 60079-7 및 IEC 60034-1 8.5.1에 따른 온도계법을 사용하여 회전자의 최고 온도를 결정하기 위해 시간이 0이 되는 지점으로 그래프를 그리는 방법을 사용. PTB에서는 온도측정 기록은 선형적인 시간 스케일을 가지므로, 온도 추과 교차하는 점을 회전자의 최고 온도로 결정[그림 35 참조]. (PTB에서는 고정자와 달리 규격에서 회전자에 대한 명확한 온도추정방법이 정해져 있지 않으므로, 최고 온도를 추정하기 위하여 위와 같은 방법을 사용)

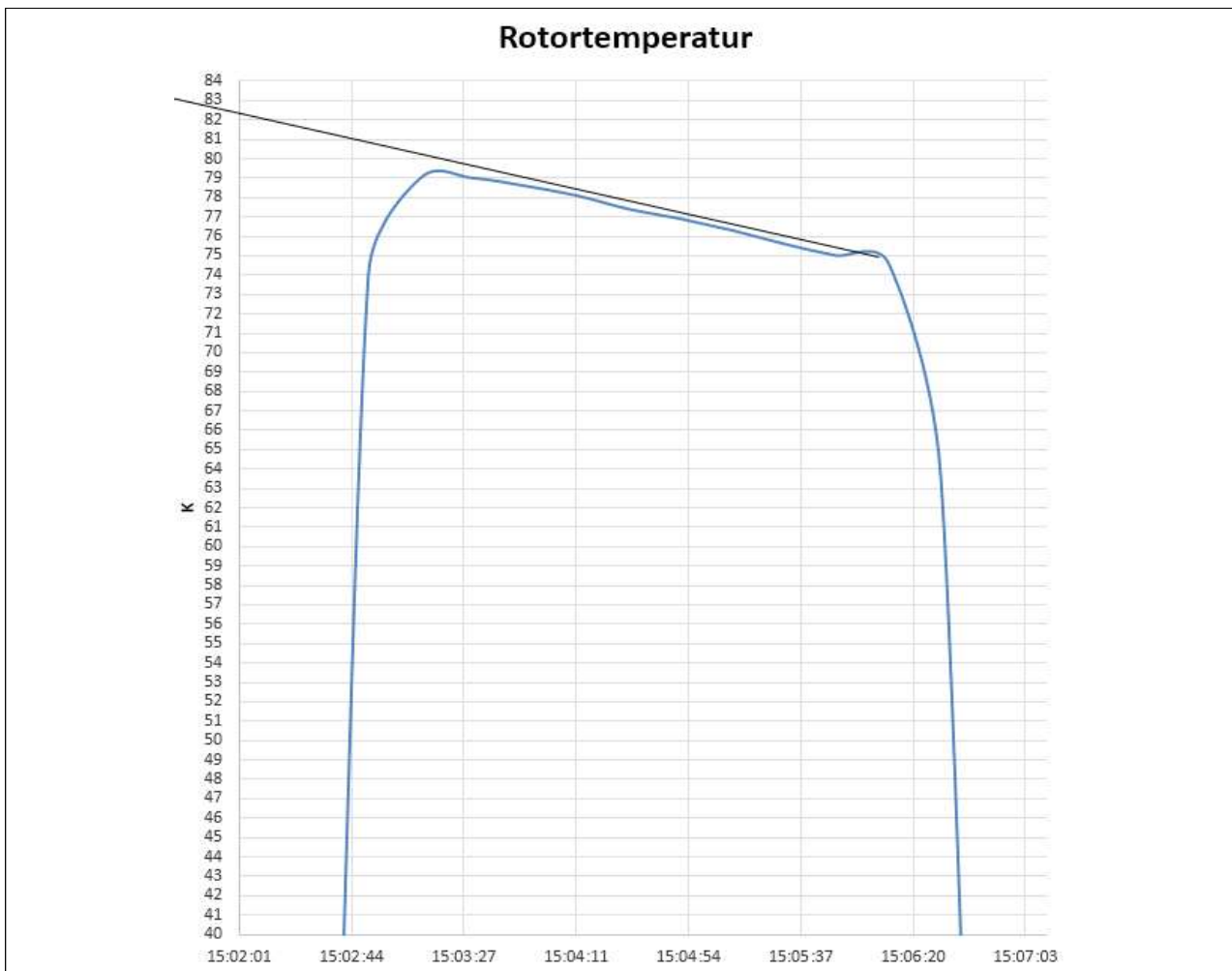
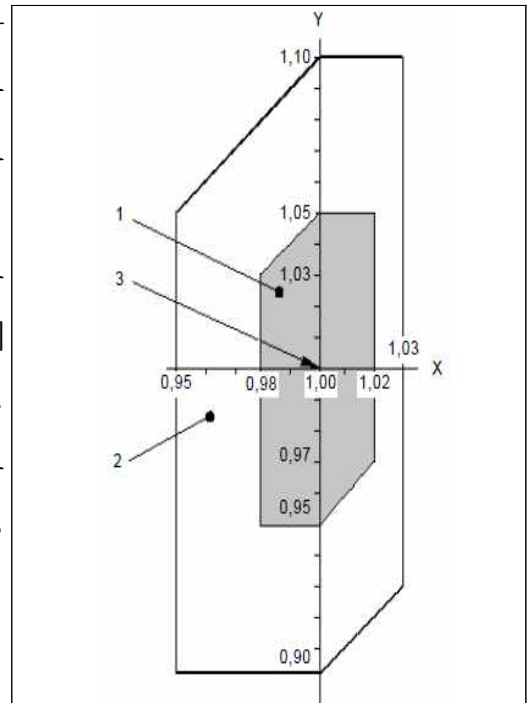


그림 35 회전자 온도 추정

3. 시험전압 영역에 따른 온도차이 비교

: IEC 60079-0 Clause 26.5.1.3에 따라 최고표면온도를 결정하기 위한 시험은 기기 정격 전압의 90% 또는 110% 중 최고 표면온도를 발생시키는 가장 불리한 정격으로 수행되어야 하나, 회전전기기기의 경우 IEC 60034-1에 따른 “Zone A”[그림 36 참조] 내의 최악의 시험전압으로 수행할 수 있음. 이 경우 인증서에 “X”기호를 표시하고 특정사용조건은 최고표면온도가 “Zone A”, 정격 전압의 $\pm 5\%$ 범위에 기초하여 측정되었다는 정보를 포함하여야 함.



1. Zone A

2. Zone B(outside zone A)

3. Rating point

이에 대해 동일 모터에 정격전압 및 IEC 60034-1에 따른 “Zone A, B”로 비교 시험한 결과 아래표와 같이 “Zone B” 영역의 정격전압 90%에서 최고온도가 측정됨. 표 28 참조.

그림 36 IEC 60034-1 Clause 7.3 Voltage and frequency variations during operation

온도단위 : K

	전압	모터 외함	베어링 (부하측)	케이블 인입점	케이블 분기점	터미널	고정자	실링 (모터)	실링 (단자)	회전자
정격	400V	34.6	35.1	14.7	16.7	32.6	48.2	32.0	19.2	74.9
Zone A	380V	36.1	36.1	15.5	17.4	33.2	50.7	33.2	20.4	82.0
	420V	34.8	34.5	14.9	17.5	32.5	49.2	32.2	19.5	78.0
Zone B	360V	40.2	41.2	17.2	20.1	37.7	55.5	36.9	22.7	92.5
	440V	34.3	34.3	16.5	19.0	32.9	48.7	31.8	19.3	72.0

표 28 모터 전압레인지에 따른 온도 측정값

4. 컨버터 작동 모터의 온도차이 비교

: IEC 규격에 따라 컨버터 작동 안전증 모터에 대해 컨버터와 모터의 조합으로 주어지는 작동 조건의 범위에서 관련 제한 온도가 초과되지 않음을 결정하기 위해 시험되어야 함.

1) 컨버터의 모터 조합시험의 필요성

: 컨버터는 일반적으로 교류를 직류로 변환해주는 컨버터부, 맥동전류를 평활화 시키는 평활부, 그리고 직류를 교류로 변환해주는 인버터부로 나누어 지며, 이때 사용되는 비선형부하(ex 다이오드, IGBT 등)로 인하여 기본 주파수의 정수배로 나타나는 고조파성분이 발생. 그리고 이 고조파는 모터의 손실을 증가시켜 기본 주파수 동작에 비해 더 많은 발열을 일으킬 수 있음. 그 외에도 낮은 가변 주파수기능에 의한 낮은 주파수에서 동작시 팬의 회전속도에 따른 모터 냉각효과 저하로 인한 발열이 발생할 수 있으므로, 컨버터와 모터 조합시험이 요구됨.

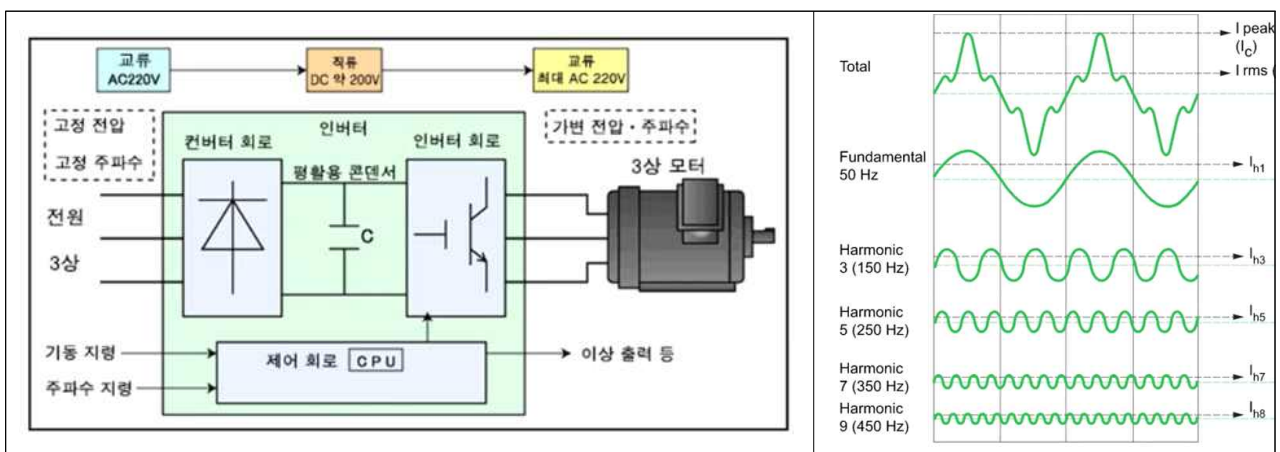


그림 37 컨버터 회로

2) 컨버터 작동 모터의 조합시험

: 컨버터 작동 모터의 조합시험에서 파워아날라이저로 측정한 결과 고조파성분이 검출[그림 38 참조] 되었으며, 이로인한 모터의 온도는 정현파시험 대비 온도가 상승하는 결과가 나타났음.[표 29 참조]

(고정자 3K 상승, 회전자 10K상승)



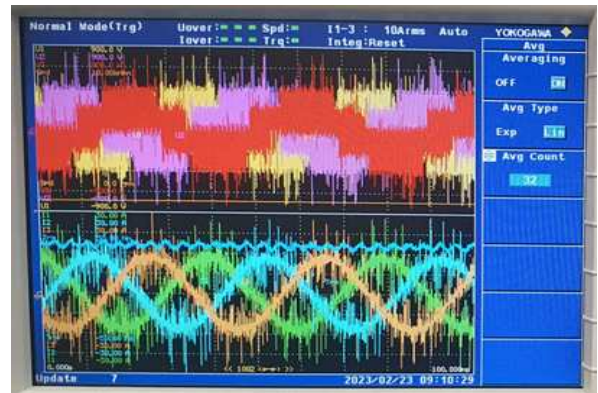
컨버터 모터 조합 시험



사용 컨버터



컨버터 스펙



고조파성분 검출

그림 38 컨버터 작동 모터의 조합시험

온도단위 : K

	전압	모터 외함	베어링 (부하측)	케이블 인입점	케이블 분기점	터미널	고정자	실링 (모터)	실링 (단자)	회전자
정격	400V	34.6	35.1	14.7	16.7	32.6	48.2	32.0	19.2	74.9
컨버터	400V	37.3	37.8	16.5	19.4	34.9	51.3	34.3	21.2	84.8

표 29 모터 정격운전 및 컨버터운전 온도상승 비교

5. PTC 서미스터 과부하 온도시험 비교

- 제한 온도의 초과 방지를 위해 안전전장치와 연관된 권선온도센서를 함께 사용할 경우, 예를 들어 인버터를 사용해서 주파수를 변화시킬 수 있고, 주파수 변화를 통해서 전동기의 속도를 조절하며, 전동기 내부에 PTC가 설치되어 있어 보호장치로서의 역할을 해주면, 전동기 권선의 온도가 130°C가 되면 PTC가 작동해서 전원공급 라인에 신호를 주어서 전동기가 자동적으로 정지하므로, 허용구속시간 t를 구할 필요가 없음.

과부하 시험은 전동기 내부에 설치되어 있는 PTC가 신호를 줄때까지 실시(PTC가 130°C에 세팅이 되어 있으면 전동기의 온도가 그 정도까지 올라가면 보통 정지)하며, 컨버터로 구동되는 모터의 경우 가장 낮은 주파수 및 가장 높은 주파수에서 과부하 시험 실시

온도단위 : K

	주파수	모터 외함	베어링 (부하측)	케이블 인입점	케이블 분기점	터미널	고정자	실링 (모터)	실링 (단자)	회전자
컨버터 운전	5	22.8	20.2	12.7	13.9	20.9	26.6	21.5	13.8	25
	25	50.6	52.8	24.7	28.1	49.3	66.3	47.9	28.3	99.5
	50	37.3	37.8	16.5	19.4	34.9	51.3	34.3	21.2	84.8
	100	27.8	29	12.2	13.4	25	37.6	25.2	16.1	74
과부하 운전	5	85.9	75.7	43.2	47.4	77.7	98.8	77.3	48.8	126
	100	66.3	63.7	27.7	30.3	57.7	90.7	59.5	36.1	169.5

표 30 모터 컨버터운전 및 과부하운전 온도상승 비교

- 과부하 운전시 가장낮은 주파수에서는 팬의 회전시 거의 일어나지 않으므로, 모터 냉각 효과가 미미하여, 모터의 내부와 외부온도의 온도차가 크지 않음. 따라서 분진방폭과 같은 내부가 아닌 외부온도에 따라 방폭에 영향을 미치는 기기는 반드시 확인해야 함.
(예, 안전증 모터의 경우 내부온도가 방폭에 큰 영향을 미치므로, 낮은 주파수에 대한 과부하시험은 필요하지 않으나, PTB에서는 일반적인 낮은 주파수에서도 과부하 시험을 실시하고 있음)
- 과부하 운전시 가장높은 주파수에서는 과부하로 인하여 모터 파워와 슬립이 높아 일반적으로 가장높은 내부 온도가 측정될 가능성이 높음. 이때 팬의 빠른 회전속도로 인하여 냉각효과가 커 내부와 외부온도차가 크게 발생함.

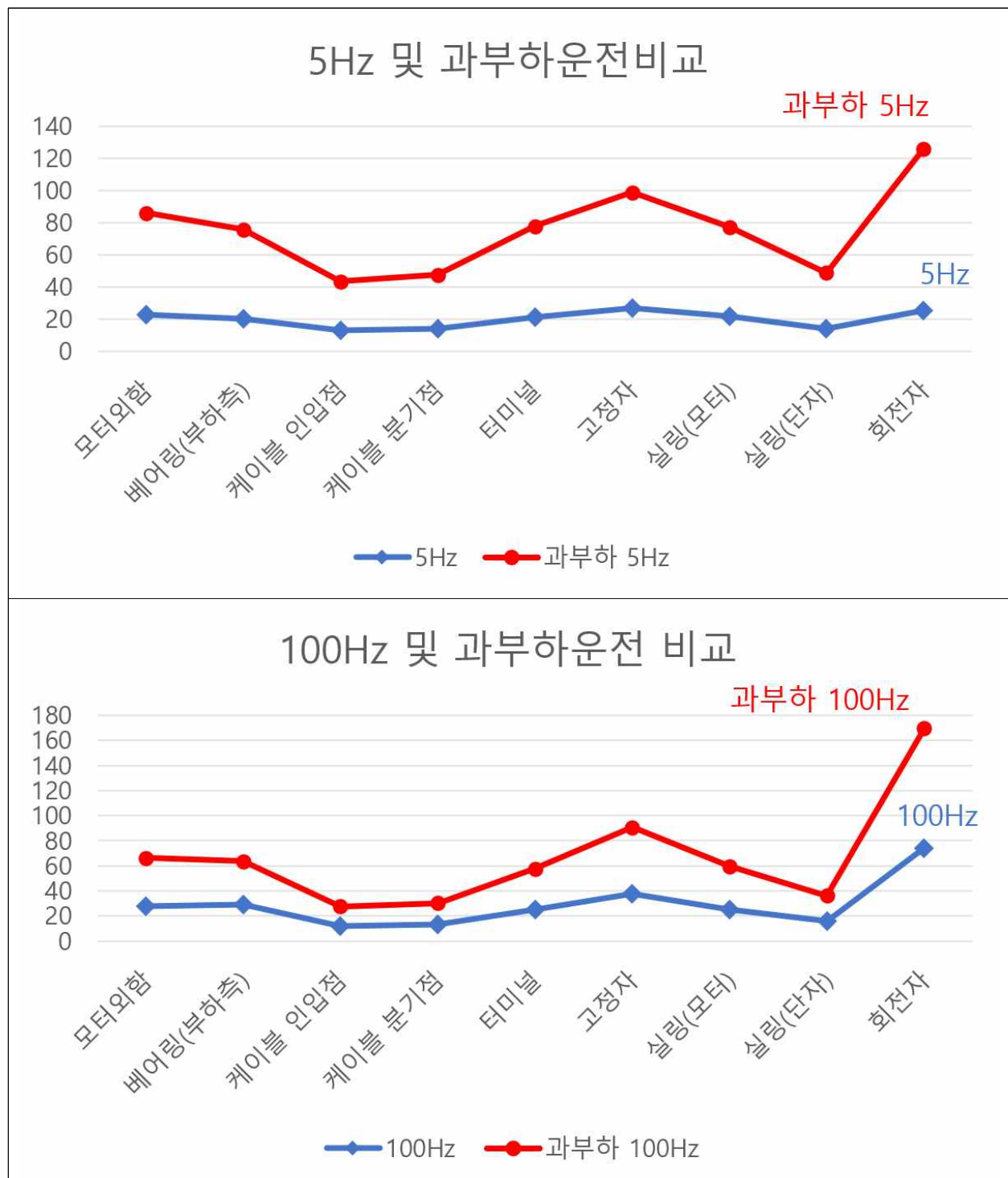


그림 39 컨버터 및 과부하 운전 온도 비교

1. 회전자 슬롯(Open/Closed slot) 타입별 센서부착 기법

- 1) IEC 규격*에 따라 구속시험시 회전자의 온도측정은 회전자 바 및 단락환(그림 40 참조) 부분을 측정하여야 하며, 이때 표피효과**로 인하여 로터 바의 상단 가장 자리에서 가장 높은 온도상승이 발생.

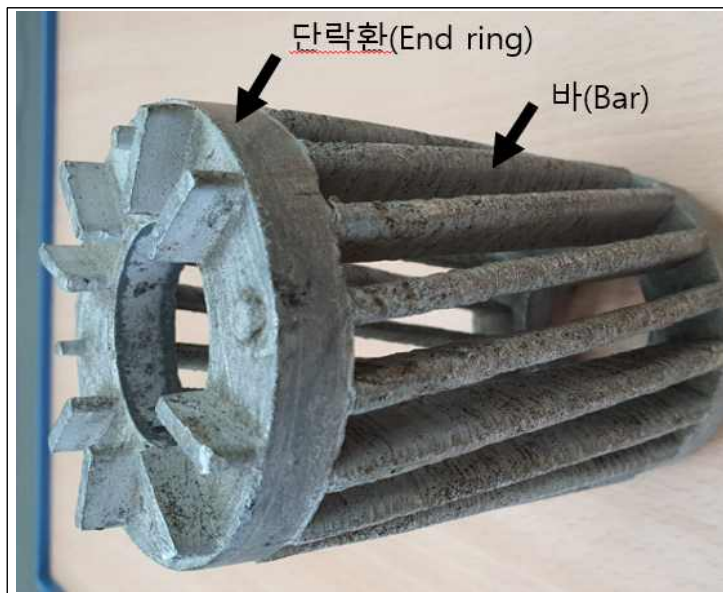


그림 40 농형회전자의 단락환 및 바 부분

* IEC 60079-7 A.3.2.3 “Due to the skin effect, the highest temperature rises occur at the upper edge of the bars. Therefore if thermocouples are used, they shall be inserted as close as possible to the surface of the bars.”

** 표피효과(skin effect) : 교류가 흐르고 있는 도선에서 중심부일수록 자속 왜교수가 크기 때문에 전류밀도가 작고, 주변부로 갈수록 커지는 현상

- 2) 온도측정을 위해 Open slot type의 경우 회전자 바(bar) 및 단락환(short circuit ring) 부분에 센서를 부착(그림 41 참조)하여야 하며, 모터의 고정자와 회전자 부분의 공극(Air gap)이 협소한 경우에는 회전자 바 부분을 가공* 하여 열전대를 삽입함(그림 42 참조).

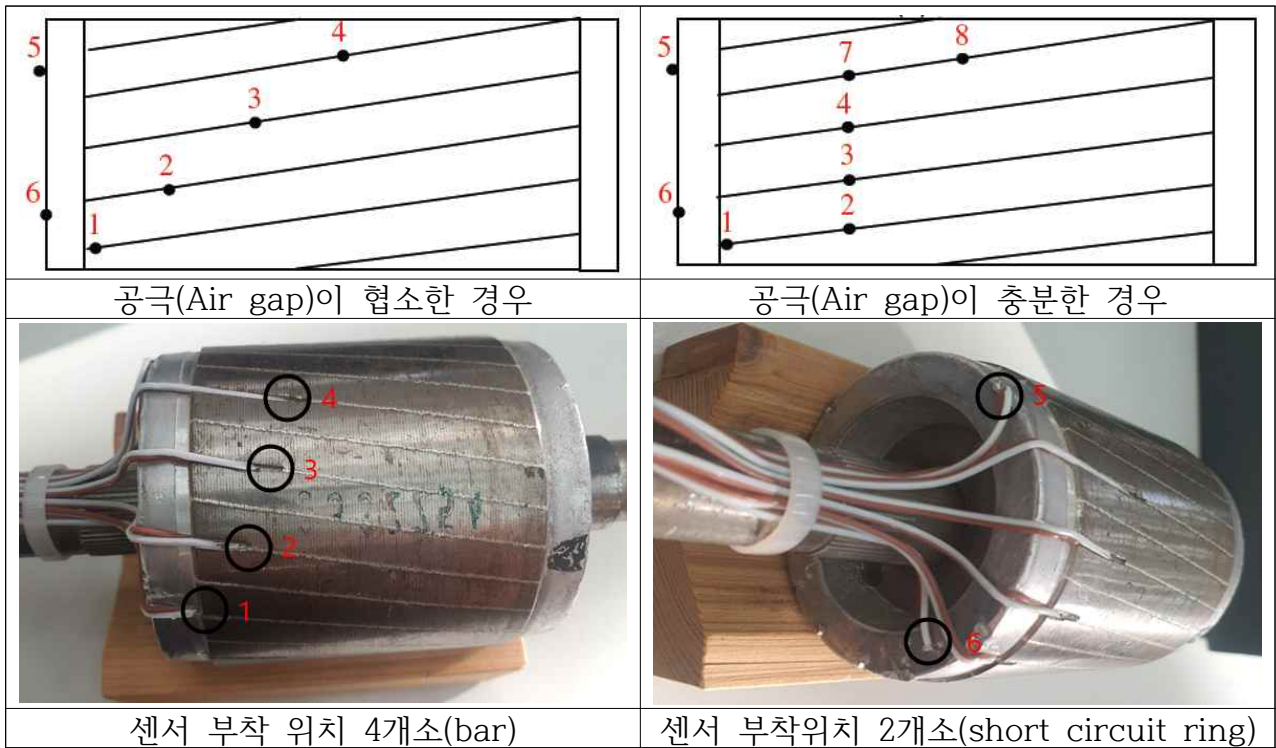


그림 41 Open slot type 회전자 온도측정 센서 부착



그림 42 회전자 바 가공(좌측) 및 센서 부착(우측) 사진

- * PTB에서는 온도측정 센서로 직경 0.5mm K type thermocouple을 사용하고 있으며, 삽입을 위한 홀의 직경은 1.1mm 가공. 측정은 보통 6개소를 측정하며, 측정위치는 회전자 바 부분 4개소, 단락환 부분 2개소 측정,

3) Closed slot type의 경우[그림 43 참조] 회전자 적층코어(laminated core)의 끝단부*에 (단락 환과 만나는 부분) 열전대 부착하여 온도측정

* 단락환의 온도측정은 변위전류로 인해 제일 높은 온도가 예상되는 바깥 모서리부분 측정



그림 43 Open slot(좌측) 및 Closed slot(우측) type 회전자

2. 회전자 포지션에 따른 온도상승 편차를 고려한 모터 회전방향 시험

1) 구속시험시 회전자의 최고 온도 발열부를 측정하기 위해 시험은 각기 다른 회전방향으로 2회 실시하며, Rotor의 각도에 따른 온도편차(보통 10K 이상 편차 발생) 발생[그림 44, 45 참조].

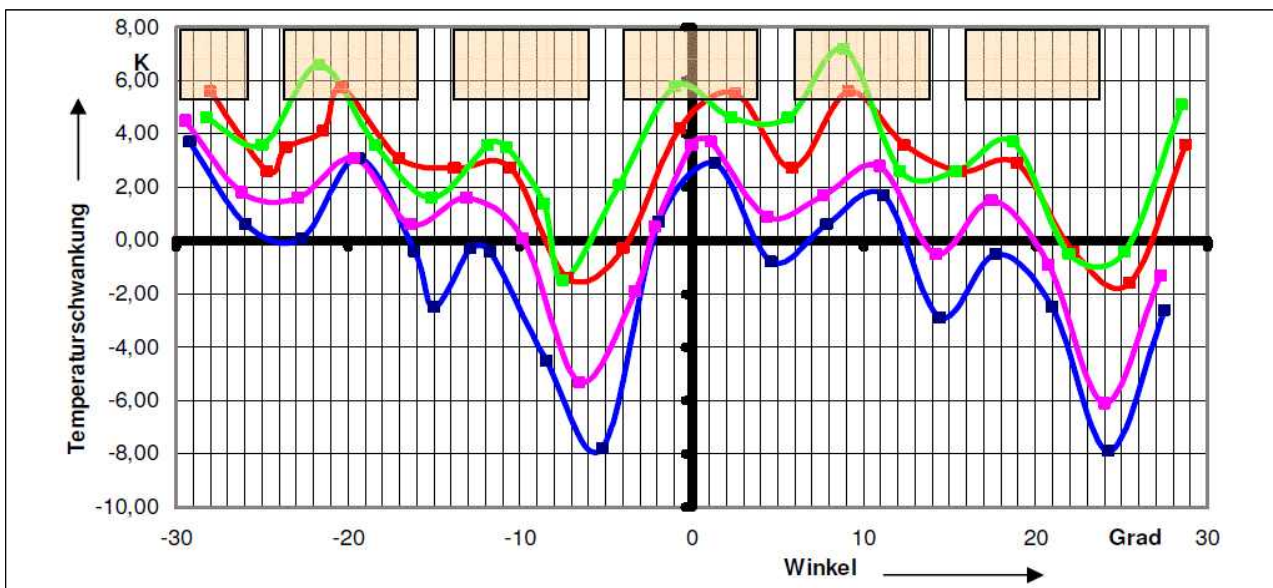


그림 44 회전자 각도에 따른 온도편차 그래프

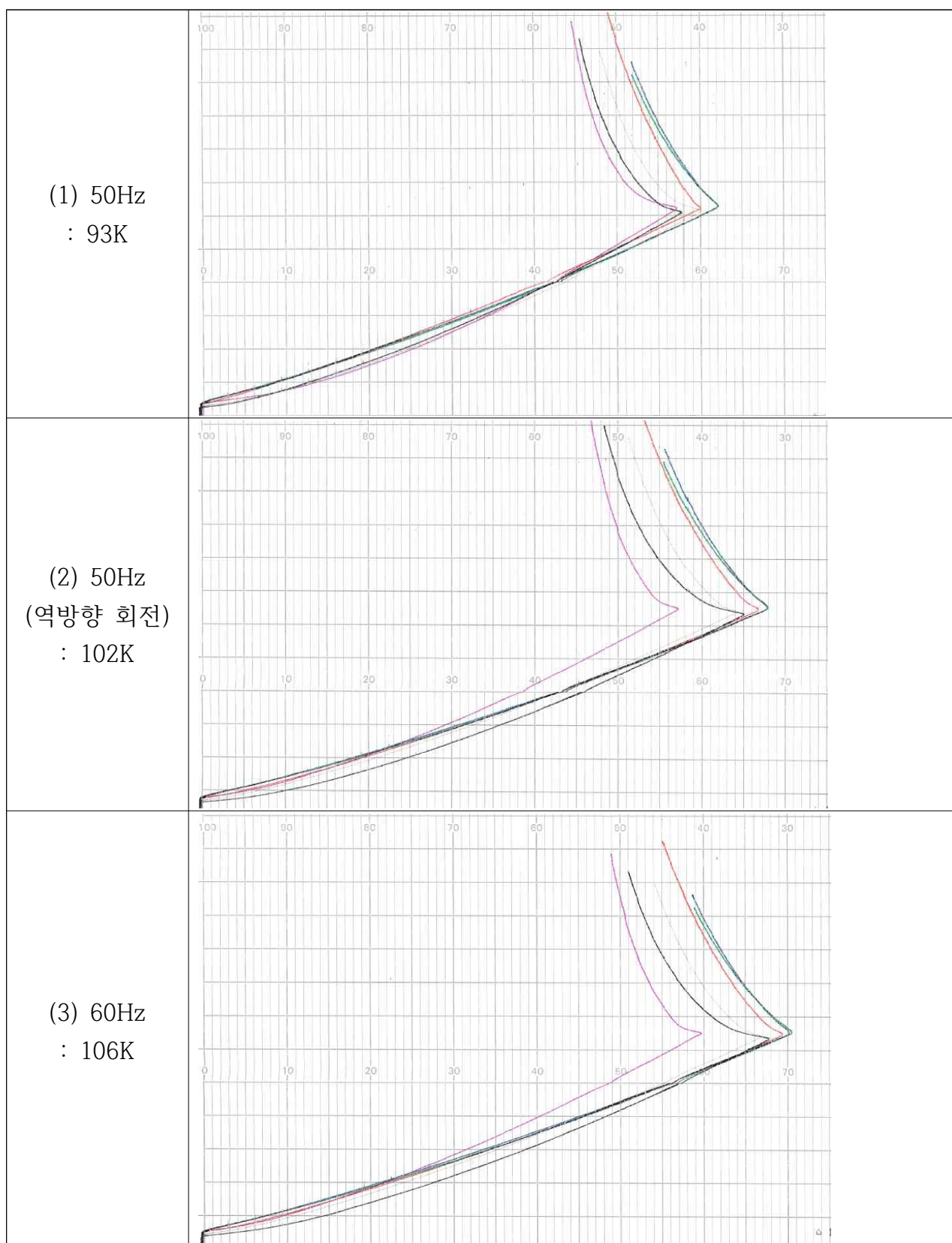
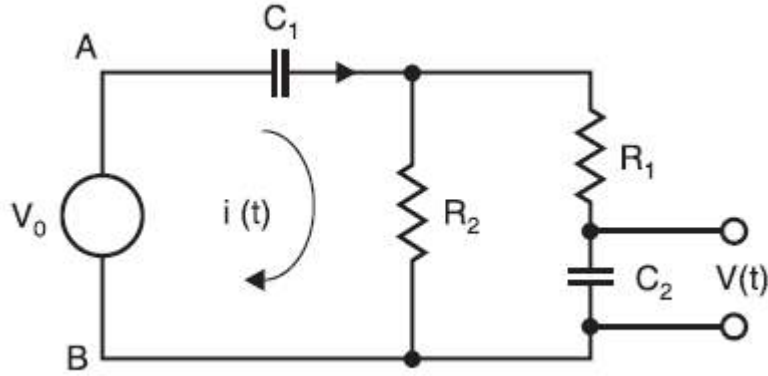


그림 45 50Hz(방향별 2회시험) 및 60Hz(최고온도 측정방향적용) 온도그래프 (1.5K/1칸)

덧붙임 1. 임펄스시험 회로 분석



Simplified equivalent circuit of an impulse generator

1. 등가회로의 임피던스

위 임펄스 등가회로를 라플라스 변환하면, 등가회로의 임피던스는 아래와 같으며,
 $Z_1 = 1/C_1s$

$$Z_2 = \frac{R_2(R_1 + 1/C_2s)}{R_1 + R_2 + 1/C_2s}$$

$$Z(s) = Z_1 + Z_2$$

$$Z(s) = \frac{1}{C_1s} + \frac{R_2(1/C_2s + R_1)}{R_1 + R_2 + 1/C_2s} = \frac{1}{C_1s} + \frac{R_21/C_2s + R_1R_2}{R_1 + R_2 + 1/C_2s}$$

$$= \frac{1}{C_1s} + \frac{R_2(1 + R_1C_2s)}{(R_1 + R_2)C_2s + 1}$$

$$= \frac{(R_1 + R_2)C_2s + 1 + R_1R_2C_1C_2s^2 + R_2C_1s}{R_1C_1C_2s^2 + R_2C_1C_2s^2 + C_1s}$$

$$= \frac{(R_1C_2 + R_2C_2 + R_2C_1)s + R_1R_2C_1C_2s^2 + 1}{C_1s[(R_1C_2 + R_2C_2)s + 1]}$$

2. 등가회로의 전류

등가회로의 전류는 아래와 같음.

$$I(s) = \frac{V_0}{s} \cdot \frac{1}{Z(s)}$$

$$= \frac{V_0}{s} \frac{C_1 s [(R_1 C_2 + R_2 C_2)s + 1]}{(R_1 C_2 + R_2 C_2 + R_2 C_1)s + R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + 1}$$

3. 시료의 임펄스전압 : $v_{\max}(t) = \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} (e^{-(\alpha-\beta)t_1} - e^{-(\alpha+\beta)t_1})$

따라서, Lord capacitance C2 양단의 전압 $v(s) = \mathcal{L}\{v(t)\}$ 는 아래와 같음.

$$**v_{(Z_2)} = \frac{V_0}{s} \times \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{V_0}{s} \times \frac{Z_2}{Z_s} = \frac{V_0}{s} \times \frac{1}{Z_s} \times Z_2 = I(s) \times Z_2$$

$$v(s) = v_{(Z_2)} \times \frac{1/C_2 s}{R_1 + 1/C_2 s}$$

$$= I(s) \times Z_2 \times \frac{1/C_2 s}{R_1 + 1/C_2 s}$$

$$= I(s) \times \frac{R_2 (R_1 + 1/C_2 s)}{R_1 + R_2 + 1/C_2 s} \times \frac{1/C_2 s}{R_1 + 1/C_2 s}$$

$$= I(s) \times \frac{R_2 \cdot 1/C_2 s}{R_1 + R_2 + 1/C_2 s} = I(s) \times \frac{R_2}{(R_1 + R_2)C_2 s + 1}$$

$$= \frac{V_0}{s} \times \frac{C_1 s [(R_1 C_2 + R_2 C_2)s + 1]}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 C_2 + R_2 C_2 + R_2 C_1)s + 1} \times \frac{R_2}{(R_1 + R_2)C_2 s + 1}$$

$$= \frac{V_0}{s} \times \frac{C_1 s [(R_1 + R_2)C_2 s + 1]}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 C_2 + R_2 C_2 + R_2 C_1)s + 1} \times \frac{R_2}{(R_1 + R_2)C_2 s + 1}$$

$$= \frac{V_0}{s} \times \frac{R_2 C_1 s}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 C_2 + R_2 C_2 + R_2 C_1)s + 1}$$

위 식은 아래와 같이 다시 정리할 수 있으며,

$$\begin{aligned}
 v(s) &= \frac{V_0}{s} \frac{R_2 C_1 s \times 1/R_1 R_2 C_1 C_2}{[R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 C_2 + R_2 C_2 + R_2 C_1)s + 1] \times 1/R_1 R_2 C_1 C_2} \\
 &= \frac{V_0}{R_1 C_2} \frac{1}{\left[s^2 + \left(\frac{R_1 C_2 + R_2 C_2 + R_2 C_1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right]} \\
 &= \frac{V_0}{R_1 C_2} \frac{1}{s^2 + \left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}
 \end{aligned}$$

여기서 “ $s^2 + \left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$ ”을 이차방식으로 치환하면 아래와 같으며,

$$s^2 + \left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} = s^2 + As + B$$

$$**A: \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2}$$

$$**B: \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$$

위의 2차 방정식은 근의공식을 이용하여 아래와 같이 다시 치환할 수 있음.

$$s^2 + As + B = 0$$

$$\left(s + \frac{A}{2}\right)^2 = -B + \frac{A^2}{4}$$

$$\left(s + \frac{A}{2}\right) = \pm \sqrt{-B + \frac{A^2}{4}}$$

$$s = -\frac{A}{2} \pm \sqrt{-B + \frac{A^2}{4}} = -\frac{A}{2} \pm \sqrt{\frac{-4B + A^2}{4}} = -\frac{A}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{-4B + A^2}$$

$$s = -\frac{1}{2}(A \pm \sqrt{A^2 - 4B})$$

$$s = -\frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} \right)^2 - \frac{4}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \right]$$

$$^{**}\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} \right)$$

$$^{**}\beta = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} \right)^2 - \frac{4}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$s = -\alpha \pm \beta$$

$$\begin{aligned} s^2 + As + B &= [s - (-\alpha + \beta)][s - (-\alpha - \beta)] \\ &= (s + \alpha - \beta)(s + \alpha + \beta) \end{aligned}$$

따라서 $v(s)$ 는 아래와 같이 다시 정리될 수 있으며,

$$v(s) = \frac{V_0}{R_1 C_2} \frac{1}{(s + \alpha - \beta)(s + \alpha + \beta)}$$

여기서 $\frac{1}{(s+\alpha-\beta)(s+\alpha+\beta)}$ 를 부분분수로 분해하면, 다음과 같은 $v(s)$ 로 정리할 수 있음.

$$\frac{1}{(s+\alpha-\beta)(s+\alpha+\beta)} = \frac{1}{2\beta} \left(\frac{1}{s+\alpha-\beta} - \frac{1}{s+\alpha+\beta} \right)$$

**부분분수 전개식

$$\frac{1}{AB} = \frac{1}{AB} \times \frac{B-A}{B-A} = \frac{1}{B-A} \times \frac{B-A}{AB} = \frac{1}{B-A} \left(\frac{1}{A} - \frac{1}{B} \right)$$

$$\begin{aligned} v(s) &= \frac{V_0}{R_1 C_2} \times \frac{1}{2\beta} \left(\frac{1}{s+\alpha-\beta} - \frac{1}{s+\alpha+\beta} \right) \\ &= \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} \left(\frac{1}{s+\alpha-\beta} - \frac{1}{s+\alpha+\beta} \right) \end{aligned}$$

여기서 $v(s)$ 를 $v(t)$ 로 다시 라플라스 역변환하여 정리하면, 아래와 같으며,

$$v(s) = \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} \left(\frac{1}{s+\alpha-\beta} - \frac{1}{s+\alpha+\beta} \right)$$

$$\mathcal{L}^{-1}\{v(s)\} = \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{s+\alpha-\beta} - \frac{1}{s+\alpha+\beta} \right)$$

$$\mathcal{L}^{-1}\{v(s)\} = \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{s-(-\alpha+\beta)} - \frac{1}{s-(-\alpha-\beta)} \right)$$

$$**v(t) = e^{at}, \mathcal{L}\{v(t)\} = v(s) = \frac{1}{s-a}$$

$$**\mathcal{L}^{-1}\{v(s)\} = v(t) = e^{at}$$

$$\therefore v(t) = \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} (e^{-(\alpha-\beta)t} - e^{-(\alpha+\beta)t})$$

$$4. \text{ 파두시간 } t_1 : 't_1 = \frac{1}{2\beta} \ln \frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta},$$

임펄스 그래프에서 t_1 을 파두시간(front time), t_2 를 파미시간(tail time)으로 두었을 때, t_1 에서 파동그래프가 0인지점에서 단위시간당 전압의 변화량은 0이므로, 이를 적용하면 t_1 파두시간은 아래와 같음.

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} [-(\alpha - \beta)e^{-(\alpha - \beta)t} + (\alpha + \beta)e^{-(\alpha + \beta)t}] = 0$$

$$(\alpha + \beta)e^{-(\alpha + \beta)t_1} = (\alpha - \beta)e^{-(\alpha - \beta)t_1}$$

$$\frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta} = e^{-(\alpha - \beta)t_1} / e^{-(\alpha + \beta)t_1} = e^{-(\alpha - \beta)t_1 + (\alpha + \beta)t_1} = e^{2\beta t_1}$$

$$2\beta t_1 = \ln \frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta}$$

$$\therefore t_1 = \frac{1}{2\beta} \ln \frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta}$$

$$5. \text{ 파미시간 } t_2 : 't_2 = Kt_1', 'K = \frac{1}{(\alpha - \beta)t_1} \ln \left(\frac{2}{1 - e^{-2\beta t_1}} \right) + 1'$$

$V_{\max}(t)$ 값이 $'v_{\max}(t) = \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} (e^{-(\alpha - \beta)t_1} - e^{-(\alpha + \beta)t_1})'$ 파미시간 t_2 는 $V_{\max}$ 값의 50%가 되는 값이므로,

$$v(t_2) = \frac{1}{2} v_{\max}(t_1)$$

$$\frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} (e^{-(\alpha - \beta)t_2} - e^{-(\alpha + \beta)t_2}) = \frac{1}{2} \times \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} (e^{-(\alpha - \beta)t_1} - e^{-(\alpha + \beta)t_1})$$

** $t_2 = Kt_1$ 으로 치환시,

$$\frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} (e^{-(\alpha - \beta)Kt_1} - e^{-(\alpha + \beta)Kt_1}) = \frac{1}{2} \times \frac{V_0}{2\beta R_1 C_2} (e^{-(\alpha - \beta)t_1} - e^{-(\alpha + \beta)t_1})$$

여기서 $e^{-(\alpha-\beta)Kt_1}$ 에 비해 $e^{-(\alpha+\beta)Kt_1}$ 는 아주 작으므로, 식을 간소화 하기 위하여 무시할 수 있으며, 위 식은 아래와 같이 정리 할 수 있음.

$$e^{-(\alpha-\beta)Kt_1} = \frac{1}{2} [e^{-(\alpha-\beta)t_1} - e^{-(\alpha+\beta)t_1}]$$

$$2e^{-(\alpha-\beta)Kt_1} = e^{-(\alpha-\beta)t_1} - e^{-(\alpha+\beta)t_1}$$

양변에 $e^{(\alpha-\beta)t_1}$ 를 곱해주면,

$$2e^{-(\alpha-\beta)Kt_1} \times e^{(\alpha-\beta)t_1} = [e^{-(\alpha-\beta)t_1} - e^{-(\alpha+\beta)t_1}] \times e^{(\alpha-\beta)t_1}$$

$$2e^{-(\alpha-\beta)Kt_1 + (\alpha-\beta)t_1} = e^{-(\alpha-\beta)t_1 + (\alpha-\beta)t_1} - e^{-(\alpha+\beta)t_1 + (\alpha-\beta)t_1}$$

$$2e^{-(\alpha-\beta)(K-1)t_1} = e^0 - e^{-2\beta t_1} = 1 - e^{-2\beta t_1}$$

$$\ln[2e^{-(\alpha-\beta)(K-1)t_1}] = \ln(1 - e^{-2\beta t_1})$$

$$\ln 2 + \ln[e^{-(\alpha-\beta)(K-1)t_1}] = \ln(1 - e^{-2\beta t_1})$$

$$\ln 2 - (\alpha - \beta)(K - 1)t_1 \ln e = \ln(1 - e^{-2\beta t_1})$$

$$\ln 2 - \ln(1 - e^{-2\beta t_1}) = (\alpha - \beta)(K - 1)t_1 \ln e = (\alpha - \beta)(K - 1)t_1$$

$$** \ln e = 1, \ln x - \ln y = \ln \frac{x}{y}$$

$$\ln\left(\frac{2}{1 - e^{-2\beta t_1}}\right) = (\alpha - \beta)(K - 1)t_1$$

$$\alpha - \beta = \frac{1}{(K - 1)t_1} \ln\left(\frac{2}{1 - e^{-2\beta t_1}}\right)$$

$$\therefore K = \frac{1}{(\alpha - \beta)t_1} \ln\left(\frac{2}{1 - e^{-2\beta t_1}}\right) + 1, t_2 = Kt_1$$

6. 간소화된 파미시간 t_2 : ' $t_2 = Kt_1$ ', ' $K = \frac{0.7}{(\alpha - \beta)t_1} + 1$ '

여기서 ' $2\beta t_1 > 4$ '이면, ' $\ln\left(\frac{2}{1 - e^{-2\beta t_1}}\right)$ '은 0.7로 아래와 같이 간소화 할 수 있다.

$$\alpha - \beta = \frac{0.7}{(K - 1)t_1}$$

$$\therefore K = \frac{0.7}{(\alpha - \beta)t_1} + 1, t_2 = Kt_1$$

위 가정의 오차범위는 $\pm 2\%$ 범위로 알려져 있음.

7. C_1/C_2 비율

회로에서 커패시터 C_1 의 값은 특정지을 수 있으나, 커패시터 C_2 는 시료에 따라 다양하며, 여기서 C_1/C_2 비율은 임펄스 회로에 있어 중요 인자로.

- C_1/C_2 의 비율이 클수록 R_2 (tail resistance)는 일정해지며, R_1 (front resistance)는 변동성이 있는 직선그래프 형성.
- Generator capacitance C_1 값이 클수록 전압 효율 상승.

$$^{**}\alpha = \frac{R_1C_2 + R_2C_2 + R_2C_1}{2R_1R_2C_1C_2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_1C_2} \right)$$

$$^{**}\beta = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{R_1C_2 + R_2C_2 + R_2C_1}{R_1R_2C_1C_2} \right)^2 - \frac{4}{R_1R_2C_1C_2}}$$

$$= \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_1C_2} \right)^2 - \frac{4}{R_1R_2C_1C_2}}$$

$$\alpha^2 - \beta^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_1C_2} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_1C_2} \right)^2 + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}$$

$$= \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}$$

$$\frac{1}{R_1C_2} = R_2C_1(\alpha^2 - \beta^2)$$

$$^{**}v(t) = \frac{V_0}{2\beta R_1C_2} [e^{-(\alpha-\beta)t} - e^{-(\alpha+\beta)t}], \quad \frac{1}{R_1C_2} = \frac{v(t)}{\frac{V_0}{2\beta} [e^{-(\alpha-\beta)t} - e^{-(\alpha+\beta)t}]}$$

$$\frac{1}{R_1C_2} = R_2C_1(\alpha^2 - \beta^2), \quad \frac{v(t)}{\frac{V_0}{2\beta} [e^{-(\alpha-\beta)t} - e^{-(\alpha+\beta)t}]} = R_2C_1(\alpha^2 - \beta^2)$$

$$v(t) = V_0 R_2 C_1 \frac{(\alpha^2 - \beta^2)}{2\beta} [e^{-(\alpha-\beta)t} - e^{-(\alpha+\beta)t}]$$

여기서 $\gamma = \frac{C_1}{C_2}$ 라고 두면,

$$**\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} \right), \quad **\alpha^2 - \beta^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$$

$$\frac{1}{R_1 C_2} = R_2 C_1 (\alpha^2 - \beta^2)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_2 C_1} + (\alpha^2 - \beta^2) R_2 C_2 + (\alpha^2 - \beta^2) R_2 C_1 \right]$$

$$**\gamma = \frac{C_1}{C_2}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_2 C_1} + (\alpha^2 - \beta^2) \frac{R_2 C_1}{\gamma} + (\alpha^2 - \beta^2) R_2 C_1 \right]$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{\gamma + 1}{\gamma} (\alpha^2 - \beta^2) R_2 C_1 \right]$$

위 식의 양변을 $\frac{R_2 C_1}{\gamma}$ 으로 곱하면,

$$\alpha \times \frac{R_2 C_1}{\gamma} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{\gamma + 1}{\gamma} (\alpha^2 - \beta^2) R_2 C_1 \right] \times \frac{R_2 C_1}{\gamma}$$

$$2\alpha \frac{R_2 C_1}{\gamma} = \frac{1}{\gamma} + \left(\frac{R_2 C_1}{\gamma} \right)^2 (\gamma + 1) (\alpha^2 - \beta^2)$$

$$\left(\frac{R_2 C_1}{\gamma} \right)^2 (\gamma + 1) (\alpha^2 - \beta^2) - 2\alpha \frac{R_2 C_1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma} = 0$$

$$\left(\frac{R_2 C_1}{\gamma} \right)^2 - \frac{2\alpha}{(\gamma + 1) (\alpha^2 - \beta^2)} \frac{R_2 C_1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma (\gamma + 1) (\alpha^2 - \beta^2)} = 0$$

다음으로 $\left(\frac{R_2 C_1}{\gamma}\right)^2 - \frac{2\alpha}{(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)} \frac{R_2 C_1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)} = 0$ 을 이차방식
으로 치환하면 아래와 같으며,

$$\left(\frac{R_2 C_1}{\gamma}\right)^2 - \frac{2\alpha}{(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)} \frac{R_2 C_1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)} = X^2 - AX + B$$

$$**X = \frac{R_2 C_1}{\gamma}, A = \frac{2\alpha}{(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)}, B = \frac{1}{\gamma(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)}$$

위의 2차 방정식은 근의공식을 이용하여 아래와 같이 다시 치환할 수 있음.

$$X^2 - 2AX + B = 0, \quad (X - A)^2 = A^2 - B$$

$$(X - A) = \pm \sqrt{A^2 - B}, \quad X = A \pm \sqrt{A^2 - B}$$

$$\begin{aligned} \frac{R_2 C_1}{\gamma} &= \frac{\alpha}{(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)} \pm \sqrt{\left(\frac{\alpha}{(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)}\right)^2 - \frac{1}{\gamma(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)}} \\ &= \frac{\alpha}{(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2}{[(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)]^2} - \frac{\frac{(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)}{\gamma}}{[(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)]^2}} \\ &= \frac{\alpha}{(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2 - \frac{(\gamma+1)}{\gamma}(\alpha^2 - \beta^2)}{[(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)]^2}} \\ &= \frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \frac{(\gamma+1)}{\gamma}(\alpha^2 - \beta^2)}}{(\gamma+1)(\alpha^2 - \beta^2)} \end{aligned}$$

$$R_2 = \frac{1}{C_1} \left[\frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \frac{(\gamma+1)}{\gamma}(\alpha^2 - \beta^2)}}{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}(\alpha^2 - \beta^2)} \right], \quad R_1 = \frac{1}{C_1} \left[\frac{(\gamma+1)}{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \frac{(\gamma+1)}{\gamma}(\alpha^2 - \beta^2)}} \right]$$

위에 따라 R2 및 R1의 C1/C2의 비율에 영향을 받는 다는 것을 알 수 있으며,

또한 $\sqrt{a^2 - \frac{\gamma+1}{\gamma}(a^2 - \beta^2)}$ 에서 제곱근의 수는 0보다 크거나 같아야 하므로,

$$a^2 - \frac{\gamma+1}{\gamma}(a^2 - \beta^2) \geq 0$$

$$a^2 \geq \frac{\gamma+1}{\gamma}(a^2 - \beta^2)$$

$$\frac{a^2}{a^2 - \beta^2} \geq \frac{\gamma+1}{\gamma}$$

$$\frac{a^2}{a^2 - \beta^2} \geq 1 + \frac{1}{\gamma}$$

$$\frac{a^2}{a^2 - \beta^2} - 1 \geq \frac{1}{\gamma}$$

$$\frac{a^2}{a^2 - \beta^2} - \frac{a^2 - \beta^2}{a^2 - \beta^2} \geq \frac{1}{\gamma}$$

$$\frac{\beta^2}{a^2 - \beta^2} \geq \frac{1}{\gamma}$$

$$\gamma \geq \frac{a^2 - \beta^2}{\beta^2}$$

이는 주어진 파형을 구현하기 위해 R1 및 R2의 특정 값이 필요하며 이러한 값은 비율 C1/C2에 따라 달라짐을 보여주며,

R1과 R2가 물리적으로 구현 가능한 저항이 되려면 C1/C2 비율이 최소 $\gamma \geq \frac{a^2 - \beta^2}{\beta^2}$ 이어야 함.

만약 C1/C2 비율이 크다면 즉 C1의 값이 C2에 비해 크다면, 저항 R2과 R1는 간소화 될 수 있으며, R2의 간소화된 식은 아래와 같으며,

$$\begin{aligned}
 R_2 &= \frac{1}{C_1} \left[\frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \frac{(\gamma+1)}{\gamma}(\alpha^2 - \beta^2)}}{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}(\alpha^2 - \beta^2)} \right] \\
 &= \frac{1}{C_1} \left[\frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)(\alpha^2 - \beta^2)}}{\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)(\alpha^2 - \beta^2)} \right] = \frac{1}{C_1} \left[\frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - (\alpha^2 - \beta^2)}}{(\alpha^2 - \beta^2)} \right] = \frac{1}{C_1} \left(\frac{\alpha \pm \sqrt{\beta^2}}{\alpha^2 - \beta^2} \right) \\
 &= \frac{1}{C_1} \left(\frac{\alpha \pm \beta}{\alpha^2 - \beta^2} \right) = \frac{1}{C_1} \left(\frac{\alpha \pm \beta}{(\alpha - \beta)(\alpha + \beta)} \right)
 \end{aligned}$$

$$R_2 = \frac{1}{C_1} \left(\frac{\alpha + \beta}{(\alpha - \beta)(\alpha + \beta)} \right) = \frac{1}{C_1} \frac{1}{(\alpha - \beta)}$$

$$\text{or } R_2 = \frac{1}{C_1} \left(\frac{\alpha - \beta}{(\alpha - \beta)(\alpha + \beta)} \right) = \frac{1}{C_1} \frac{1}{(\alpha + \beta)}$$

R1의 간소화된 식은 아래와 같다.

$$R_1 = \frac{1}{C_1} \left[\frac{(\gamma+1)}{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \frac{(\gamma+1)}{\gamma}(\alpha^2 - \beta^2)}} \right]$$

$$R_1 = \frac{1}{C_1} \left[\frac{(\gamma+1)}{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)(\alpha^2 - \beta^2)}} \right] = \frac{1}{C_1} \left[\frac{(\gamma+1)}{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - (\alpha^2 - \beta^2)}} \right] = \frac{1}{C_1} \frac{\gamma+1}{\alpha \pm \beta}$$

$$R_1 = \frac{1}{C_1} \frac{\gamma+1}{\alpha + \beta} = \frac{\gamma+1}{C_1(\alpha + \beta)} = \frac{\gamma}{C_1(\alpha + \beta)} + \frac{1}{C_1(\alpha + \beta)}$$

$$\text{or } R_1 = \frac{1}{C_1} \frac{\gamma+1}{\alpha - \beta} = \frac{\gamma+1}{C_1(\alpha - \beta)} = \frac{\gamma}{C_1(\alpha - \beta)} + \frac{1}{C_1(\alpha - \beta)}$$

위의 두식에서 알수 있듯이 C1/C2의 비율이 클수록 R2(tail resistance)는 일정해지며, R1(front resistance)는 변동성이 있는 직선을 형성함을 알 수 있음.

또한 $R_2C_1 \gg R_1C_2$ 일 때, 임펄스 회로의 출력은 아래와 같이 계산되어지며,

$$\eta = \frac{v_{\max}(t_1)}{v_0} = \frac{1}{2R_1C_2\beta} [e^{-(\alpha-\beta)t_1} - e^{-(\alpha+\beta)t_1}]$$

$$v_{\max}(t_1) = \frac{1}{2R_1C_2\beta} [e^{-(\alpha-\beta)t_1} - e^{-(\alpha+\beta)t_1}]$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_1C_2} + \frac{1}{R_1C_1} \right)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \sqrt{\left[\left(\frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_1C_2} + \frac{1}{R_1C_1} \right)^2 - \frac{4}{R_1R_2C_1C_2} \right]}$$

** $R_2C_1 \gg R_1C_2$ 일때, $\frac{1}{R_2C_1}$ 및 $\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}$ 은 무시될 수 있으며,

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1C_2} + \frac{1}{R_1C_1} \right) = \frac{1}{2R_1} \left(\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_1} \right) = \frac{1}{2R_1} \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1C_2} \right) = \frac{C_1 + C_2}{2C_1C_2R_1}$$

$$\beta = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{R_1C_2} + \frac{1}{R_1C_1} \right)^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1C_2} + \frac{1}{R_1C_1} \right) = \frac{1}{2R_1} \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1C_2} \right) = \frac{C_1 + C_2}{2C_1C_2R_1}$$

$$\alpha \approx \beta$$

$$\eta = \frac{v_{\max}(t_1)}{v_0} = \frac{1}{2R_1C_2\beta} [e^{-(\alpha-\beta)t_1} - e^{-(\alpha+\beta)t_1}] = \frac{1}{2R_1C_2\alpha} [e^{-(\alpha-\alpha)t_1} - e^{-(\alpha+\alpha)t_1}]$$

$$= \frac{2C_1C_2R_1}{2R_1C_2(C_1 + C_2)} [e^{-(\alpha-\alpha)t_1} - e^{-(\alpha+\alpha)t_1}] = \frac{C_1}{C_1 + C_2} [1 - e^{-(\alpha+\alpha)t_1}] \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

따라서, Generator capacitance C1 값이 클수록 전압의 효율은 높아짐을 알 수 있음.

덧붙임 2. 객원 연구과정 인증서



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Nationales Metrologieinstitut

Certificate

Kiho Lee

has successfully participated in the
PTB guest researcher programme
from December 2022 to December 2023,
thereby fostering international cooperation
in science and technology.

Prof. Dr. Cornelia Denz
President of PTB

