



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

실험적 조건에 따른 내압 방폭형 전동기의 폭발 특성에 관한 연구

A Study on the Explosion Characteristics of flameproof
Electric motor under experimental conditions



지도교수 김 중 수

2019年 2月

한국해양대학교 대학원

기관시스템공학과

손 의 남

본 논문을 손의남의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 : 김 성 환



위 원 : 김 중 수



위 원: 오 세 진



2018년 12월 26일

한국해양대학교 대학원

목 차

목 차	i
List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
기호설명	ix
 제 1 장 서 론	 1
1.1 연구배경	1
1.2 연구내용	2
1.3 논문의 구성	3
 제 2 장 폭발과 방폭	 4
2.1 폭발과 방폭의 정의	4
2.2 방폭형 구조의 종류	8
2.2.1 가연성 물질을 제거하는 형식	8
2.2.2 점화원을 제거하는 형식	9
2.2.3 최소 점화 에너지를 제한하는 형식	10
2.2.4 폭발과 격리시키는 형식	11
 제 3 장 내압 방폭 구조	 13
3.1 내압 방폭 구조의 정의	13
3.2 내압 방폭 구조의 용기에 대한 폭발 압력	14
3.2.1 폭발 압력의 추산	14
3.2.2 압력 상승에 미치는 환경적인 영향	15
3.3 내압 방폭 구조의 형식 시험	17
3.3.1 기준압 시험 (Reference pressure test)	18

3.3.2 과압 시험 (Overpressure test)	19
3.3.3 폭발 인화 시험 (Non-transmission test)	20
제 4 장 내압 방폭형 전동기	21
4.1 내압 방폭형 전동기의 구조	21
4.2 내압 방폭형 전동기의 기준압	22
제 5 장 내압 방폭형 전동기의 폭발 특성 분석	25
5.1 실험 개요	25
5.2 실험 모델	26
5.3 실험 환경의 설정	30
5.3.1 가스 종류에 따른 실험 조건	30
5.3.2 전동기의 공극 크기에 따른 실험 조건	31
5.3.3 전동기의 회전수에 따른 실험 조건	31
5.4 실험 장치의 구성	31
5.5 실험 방법	33
5.6 실험 결과	34
5.6.1 가스 종류에 따른 실험 결과	34
5.6.2 전동기의 공극 크기에 따른 실험 결과	38
5.6.3 전동기의 회전수에 따른 실험 결과	42
제 6 장 결 론	47
참고문헌	49
감사의 글	51

List of Tables

Table 2.1	List of large explosion accident cases	5
Table 2.2	Classification of hazardous areas	6
Table 2.3	Type of explosion-proof structure	7
Table 3.1	Explosion classification of gas according to MESG	18
Table 3.2	Specification of gas-air mixtures for reference pressure test	19
Table 3.3	Application pressure of overpressure test	19
Table 3.4	Specification of gas-air mixtures for reference pressure test	20
Table 5.1	Specification of gas-air mixtures for reference pressure test	27
Table 5.2	List of components of experimental sample	27
Table 5.3	Gas group table	30



List of Figures

Fig 2.1 Three elements of ignition	4
Fig 2.2 ATEX and IECEx Marking	8
Fig 2.3 Principle of Ex p type	9
Fig 2.4 Principle of Ex e type	9
Fig 2.5 Principle of Ex i type	10
Fig 2.6 Principle of Ex d type	11
Fig 2.7 Principle of Ex o type	12
Fig 3.1 Schematic of a flameproof enclosure	13
Fig 3.2 Maximum explosion pressure versus ambient temperature	16
Fig 3.3 Initial pressure vs. the maximum rate of pressure rise	16
Fig 3.4 Test apparatus for MESG	17
Fig 3.5 Type of test procedure for explosion proof products	18
Fig 4.1 Description of flamepath	21
Fig 4.2 Description of flamepath for shaft gland	22
Fig 4.3 Concepts of pressure piling	23
Fig 4.4 Determination of pressure rising time	24
Fig 5.1 Diagram of test sample	26
Fig 5.2 Test model	28
Fig 5.3 Test model	29
Fig 5.4 Diagram for holes of motor cover	29
Fig 5.5 Test configuration diagram	32
Fig 5.6 Installation of test sample	32
Fig 5.7 Installation of cover for test sample	33
Fig 5.8 Test result for Ethylene	35
Fig 5.9 Test result for Acetylene	35
Fig 5.10 Test result for Hydrogen	36

Fig 5.11	Graph for explosion pressure according to type of gas	36
Fig 5.12	Graph for pressure rising time according to type of gas	37
Fig 5.13	Test sample with air-gap 1 mm	38
Fig 5.14	Test sample with air-gap 3 mm	38
Fig 5.15	Test result for air-gap 1 mm	39
Fig 5.16	Test result for air-gap 2 mm	39
Fig 5.17	Test result for air-gap 3 mm	40
Fig 5.18	Graph for explosion pressure according to air-gap	40
Fig 5.19	Graph for pressure rising time according to air-gap	41
Fig 5.20	Installation of test sample for rotational speed condition test	42
Fig 5.21	Test result for stop condition	43
Fig 5.22	Test result for 500 rpm	43
Fig 5.23	Test result for 1500 rpm	44
Fig 5.24	Test result for 2500 rpm	44
Fig 5.25	Graph for explosion pressure according to the number of revolutions	45
Fig 5.26	Graph for pressure rising time according to the number of revolutions	46

A Study on the Explosion Characteristics of flameproof Electric motor under experimental conditions

Ui-Nam Son

Department of Marine Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

The strength of the flameproof casing shall be able to withstand an internal explosion and this criterion shall be subjected to the reference pressure test of international standard IEC 60079-1. For simple structures, explosion pressure can be estimated by engineering calculations, but it is difficult to predict explosion pressure if internal structures, such as motors, are complex. However, there is clearly a lack of research data to support the casing design of flameproof electric motors.

In this paper, conducted an experiment on three conditions that could change the explosion properties inside of flameproof motor. Conditions for changing the gas type were selected for analysis of the explosive pressure characteristics according to the type of explosive gas used in the hazardous area where the motor was installed, Conditions were selected to change the size of the air gap that could form a narrow path inside the motor causing pressure piling. And the conditions for changing the number of rotations of motors that effect on explosion

properties by forming turbulence inside the motor were selected. Based on the results of each set of experiments, the maximum explosion pressure characteristic and the explosion pressure rise time were compared to determine the effects of each test condition on the explosion.

KEY WORDS: flameproof electric motor; Reference pressure test; Pressure piling; Experimental condition;



실험적 조건에 따른 내압 방폭형 전동기의 폭발 특성에 관한 연구

손 의 남

한국해양대학교 대학원
기관시스템공학과

요 약

내압 방폭 케이싱의 강도는 내부의 폭발을 견딜 수 있어야 하며, 이 기준은 국제 규격 IEC 60079-1의 기준압 시험을 따른다. 단순한 구조의 경우에는 폭발 압력을 공학적인 계산으로 추산이 가능하지만, 전동기와 같이 내부의 구조가 복잡한 경우에는 폭발 압력을 예측하기 어려우며 내압 방폭 전동기의 케이싱 설계를 위한 연구 결과가 부족하다.

본 논문에서는 내압 방폭형 전동기에서 폭발 특성을 변화시킬 수 있는 3가지 조건에 대하여 실험을 통해 분석하였다. 전동기가 설치되는 위험 구역에서 사용되어지는 가연성 가스의 종류에 따른 폭발 압력 특성을 분석하기 위하여 산업 현장에서 많이 사용하는 가스와 전동기 내부의 공간을 형성하여 압력 중첩 현상을 야기할 수 있는 공극의 크기를 변경하는 조건을 선정하였다. 또한, 전동기 내부의 난류를 형성시켜 폭발 압력 특성을 변경시킬 수 있는 전동기의 회전수를 선택하였다. 각각의 조건에 따른 실험 결과를 바탕으로 폭발 압력 특성인 최대 폭발압력과 폭발압력 상승시간을 비교 분석하여 각 실험 조건들이 내압 방폭형 전동기의 폭발에 미치는 영향을 평가하였다.

KEY WORDS: 내압 방폭형 전동기; 기준압 시험; 압력 중첩; 실험적 조건;

기 호 설 명

H_{re}	: 가연성 혼합가스의 반응열[kcal]
V_g	: 밀폐용기의 부피[cm ³]
H_c	: 1몰의 연소열[kcal]
C_g	: 가연성 가스의 농도[%]
V_m	: 1몰에 대한 부피[cm ³]
P_m	: 최대 폭발 압력[kPa]
P_i	: 초기 압력[kPa]
N_i	: 초기의 기체 몰수[몰]
T_i	: 초기의 가스 온도[℃]
N_f	: 기체 몰수의 변화[몰]
T_f	: 가스 온도의 변화[℃]
dp/dt	: 폭발 압력 상승률
L/D	: 직경에 대한 길이의 비율
W	: 접합면의 폭[mm]
rpm	: Revolution Per Minute
EPL	: Equipment Protection Level
$MESG$	: Maximum Experimental Safety Gap

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

전 세계적으로 환경오염에 대한 문제가 증가하면서 각 산업분야별로 오염물질 배출 규제를 점진적으로 강화하고 있으며, 이에 따른 여러 규제책을 마련하여 시행하고 있다. 규제에 대응하기 위하여 LNG와 수소 등의 친환경연료 사용에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 수요 또한 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 하지만 LNG와 수소는 폭발의 위험성이 있는 폭발성 물질로써 사용 및 취급을 위해 엄격한 안전 기준이 적용되어야 하며, 이 물질을 사용하는 구역에서 사용되는 장비들은 방폭 인증을 받도록 규정하고 있다.

방폭형 구조의 제품에는 여러 형식이 있으나 이 중에서 내압방폭형 구조는 케이싱에 대한 방폭 요구사항을 만족하면 내부 구성품에 대한 방폭 요구사항의 적용이 필요하지 않기 때문에 많은 용도로 사용되어지고 있다. 내압방폭형 제품은 내부에서의 폭발 압력을 견뎌야 하며 내부의 화염이 외부로 전이되지 않는 구조를 가져야한다. 제품이 견뎌야하는 압력 기준은 국제 규격 IEC 60079-1에 명기된 기준압 시험(Reference pressure test)을 통해 선정하며 시험 데이터를 바탕으로 케이싱의 강도를 선정한다.

일반적으로 내부의 구조가 단순한 제품군의 경우에는 계산적으로 내부 압력 추산이 가능하여 내압 방폭 케이싱의 강도 설계가 어렵지 않지만 전동기와 같이 내부에 복잡한 구조를 가지는 경우에는 폭발 특성을 공학적인 계산으로 정의하는 것이 어려우며 내부에 좁은 공간을 두고 양쪽 공간으로 나누어지는 구조를 가짐으로써 압력중첩(Pressure piling) 현상이 일어날 수 있는 가능성을 가지고 있어 케이싱 강도의 설계 기준 선정이 어렵다. 그리고 내압 방폭형 전동기의 케이싱 강도 설계를 위한 연구 자료도 부족한 상황이다.

따라서 본 논문에서는 내압 방폭 전동기에서 폭발압력 특성에 영향을 미칠 수 있는 조건들을 선정하여 국제 규격에 따른 기준압 시험을 시행하여 분석하고자 한다. 실험 조건으로는 전동기의 설치 장소에 따라 변경될 수 있는 가스

의 종류와 전동기 공극의 크기 및 전동기의 회전수를 선정하고 각 실험 결과를 바탕으로 내압 방폭 전동기의 폭발압력 특성에 영향을 미치는 요소들을 분석하여 평가하고자 한다.

1.2 연구내용

폭발은 아주 복잡한 화학 반응으로써 내압 방폭 케이싱의 강도 설계 기준이 되는 기준압을 공학적인 계산으로 정의하는 것이 어렵기 때문에 국제 규격에서도 시험적인 데이터를 바탕으로 기준을 선정하도록 요구하고 있다. 특히, 전동기와 같이 내부에 복잡한 구조를 가지는 경우에는 폭발 압력의 추산이 난해하여 케이싱의 강도 설계 시 높은 수준의 기술력을 요구하고 있다.

본 논문에서는 공학적인 계산으로 정의하기 힘든 내압 방폭 전동기의 폭발압력 특성을 실험적 데이터를 바탕으로 분석하였다. 내압 방폭 전동기에서 폭발압력 특성인 최대 폭발압력과 압력 상승속도에 영향을 미칠 수 있는 조건들을 선정하고 각 요소들이 폭발압력 특성에 미치는 영향을 실험 결과를 통해 확인하였다.

전동기가 사용되는 위험 구역에 따라 변경되어지는 가연성 가스들에 따른 폭발압력 특성을 분석하고자 가연성 가스의 종류 변경 조건을 선정하였으며 산업현장에서 많이 사용하는 종류를 사용하였다. 가스의 종류는 가장 흔하게 사용되는 가스군을 대표하는 에틸렌, 수소, 그리고 아세틸렌을 선정하였다. 각 가스별 최대 폭발압력과 폭발압력 상승시간을 비교하면서 가스의 종류가 내압 방폭형 전동기에 미치는 영향을 분석하였다.

전동기와 같이 내부에 좁은 공간을 형성하는 공극은 내부의 폭발 압력을 급격하게 상승시킬 수 있는 요소로 작용할 수 있기 때문에 폭발압력 특성에 영향을 미칠 수 있는 공극의 크기를 변경하면서 실험 결과를 분석하였으며 공극의 크기는 1[mm], 2[mm], 3[mm]로 설정하였다.

또한, 전동기의 회전에 의한 내부 난류 발생에 따른 폭발 특성의 변화를 분석하고자 전동기의 회전수를 변경하여 실험하였다. 전동기의 회전수는 정지 상

태, 500[rpm], 1500[rpm], 2500[rpm]으로 설정하였으며 각 회전수에 따른 실험 결과를 바탕으로 회전수에 따른 폭발압력 특성을 분석하였다.

1.3 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다.

1장 서론에서는 연구배경, 내용 및 논문의 구성에 대해 기술하고,

2장에서는 폭발과 방폭의 정의에 대하여 기술하고, 방폭형 구조의 종류들에 대하여 서술하였다.

3장에서는 방폭형 구조 중 폭발과 격리시키는 형식 중 하나인 내압 방폭 구조의 정의, 폭발압력 및 형식 시험들에 대하여 기술하였으며,

4장에서는 내압 방폭형 전동기의 구조와 내압 방폭형 전동기에서 발생할 수 있는 폭발압력 특성에 대하여 기술하였다.

5장에서는 본 논문에서 설정한 폭발압력과 압력 상승시간에 영향을 미치는 요인들에 대한 실험을 위하여 실험 모델을 제작하고 실험 환경의 설정 및 실험 모델의 설치에 대하여 기술하였으며, 각 실험 조건에 따른 실험 결과를 분석하고 평가하였다.

제 2 장 방폭형 전기기기

2.1 폭발과 방폭의 정의

폭발이란 폭발성 가스 및 증기가 공기 또는 산소와 혼합하여 폭발 가능한 농도의 범위로 되는 폭발성 분위기가 조성되고 그 장소에 최소 발화 에너지 이상의 에너지를 가지는 점화원이 존재하여 연소가 아주 짧은 시간 내에 진행되는 화학반응을 말하며 반응에 의한 온도 상승으로 용기 내의 기체 팽창과 더불어 충격력을 동반한 압력 상승을 일으키는 현상을 말한다. 기본적으로 폭발은 가연성 물질의 연소에서 시작되어 연소의 전이가 급격한 속도로 이루어지는 현상이기 때문에 Fig 2.1에서 나타내는 연소의 3요소(가연성 물질, 점화원, 산소)가 같은 공간에 존재할 때 폭발이 발생한다.

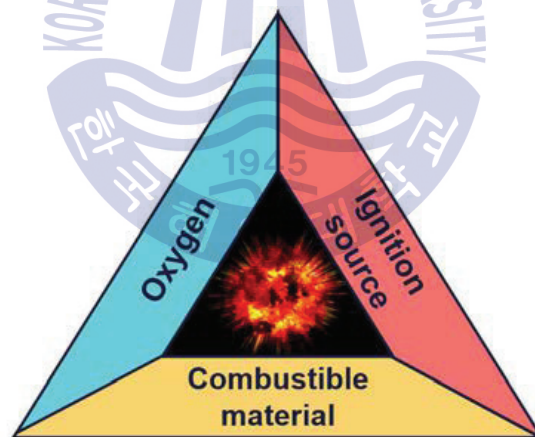


Fig 2.1 Three elements of ignition

폭발은 순간적으로 압력이 급격하게 증가하기 때문에 한 번의 사고가 엄청난 인명 및 재산의 피해를 가져오며 폭발 시 발생하는 열로 인한 2차 화재, 화상 및 폭발 중에 발생하는 유독성 반응 물질과 산소 고갈에 의한 근로자의 질식을 일으킬 수 있는 매우 위험한 현상이다. Table 2.1에서는 대표적인 대형 폭발 사고의 사례를 제시하고 있으며 폭발에 의한 재산 및 인명 피해가 막대하며 폭발

의 위험성을 알 수 있다.

Table 2.1 List of large explosion accident cases

년도	사고명	사고 내용	피해 규모
1992	멕시코 과달라하라 폭발 사고	유입된 하수도로 기름이 인화 폭발 발생	사상자: 706 명
1995	대구 상인동 폭발 사고	공사 중 도시가스 배관을 관통 시키면서 폭발 발생	사상자: 303 명 피해액: 540억원
2013	웨스트 비료 공장 폭발 사고	비료 공장에서 원인 불명의 이 유로 시작된 화재로 폭발 발생	사상자: 115 명
2014	가오슝 시 폭발 사고	석유화학물질 공급관에서 누출 사고가 나면서 폭발 발생	사상자: 340 명
2015	중국 톈진항 폭발 사고	위험물 적재 창고에서 약 550 ton의 시안화나트륨에 의한 대 형 폭발 발생	사상자: 978 명

막대한 인명 및 재산 피해를 초래하는 폭발 사고를 방지하기 위하여 폭발위험장소에서 사용되는 전기기기에 대한 잠재적 폭발 위험성을 제거하거나 폭발로부터 보호하기 위한 조치를 적용한 것을 방폭형 전기기기라고 한다. 국제적으로 폭발성 환경으로 인한 위험 가능성을 개선하고자 법률적 조치를 취하고 있으며, 방폭 국제인증제도 IECEX 또는 ATEX에서는 폭발 위험이 있는 환경에서 사용되는 장비가 국제 안전 표준에 따라 제조 및 작동되고 있다는 것을 보장해주고 있다. 국제 방폭 인증을 받은 전기기기는 EPL(Equipment Protection Level)에 따라서 등급이 나누어지며 가스의 노출 정도에 따라 구분되는 각 위험 구역에 알맞게 사용하도록 규정하고 있다. Table 2.2에는 위험 구역의 분류와 각 위험 구역에서 사용 가능한 EPL 등급을 나타내고 있다.

Table 2.2 Classification of hazardous areas

Classification	IEC	NEC	EPL
Where an explosive atmosphere is continuously present, or present for long periods (>100 hours per year)	Zone 0	Division 1	Ga
Where an explosive atmosphere is likely to occur in normal operation (10-100 hours per year)	Zone 1		Ga, Gb
Where an explosive atmosphere is not likely to occur in normal operation (<10 hours per year)	Zone 2	Division 2	Ga, Gb, Gc

1) IEC: International Electrotechnical Commission

2) NEC: National Electrical Code

3) EPL: Equipment Protection Level

폭발성 가스가 폭발 가능한 농도로 계속해서 존재하는 지역을 Zone “0” 로 규정하고 있으며 탱크의 내부, 파이프 혹은 장비의 내부 등과 같은 곳을 예시로 들 수 있다. 위험구역의 등급이 가장 높은 Zone “0” 에서는 반드시 EPL Ga 등급의 제품을 사용해야 한다. Zone “1” 은 정상 운전조건에서 폭발성 가스의 농도가 위험수준에 이를 수 있는 지역으로 규정하고 있으며 정비 또는 수리 등으로 인해 자주 폭발성 가스가 위험 수준 이상으로 존재할 수 있는 곳을 말한다. 해당 구역에서는 EPL Gb 등급의 제품을 사용하도록 규정하고 있으며, 더 높은 등급인 EPL Ga 등급의 제품 사용을 허용하고 있다. 또한, 이상 상태에서 폭발성 가스가 존재할 수 있는 지역인 Zone “2” 의 경우에는 EPL Gc 등급의 제품 사용을 규정하고 있으며 상위 등급인 EPL Ga와 EPL Gb의 사용이 가능하다.

EPL 등급은 전기기기의 방폭형 구조에 따라 달라지며 각 방폭 형식별 방폭

구조의 원리가 상이하게 적용된다. 적용 원리로는 크게 네 가지로 나눌 수 있으며 폭발의 3요소 중 하나인 가연성 물질을 제거하는 방식, 점화원을 제거하는 방식, 전기기기를 폭발이 일어날 수 있는 구역과 격리시키는 방식 및 전기기기의 에너지를 해당 가스의 최소 점화 에너지 이하로 제한하여 본질적으로 폭발이 발생하지 않도록 하는 방식이 있다. 각 원리에 해당되는 방폭형식의 종류와 형식 종류별 적용 가능한 위험 구역을 Table 2.3에 나타내었다.

Table 2.3 Type of explosion-proof structure

Explosion-proof type	Definition	symbol	Available Zones
flameproof	The enclosure can withstand the explosion pressure, and there is no transmission of flame through the flamepath when explosion occurs	d	1, 2
pressurized	Type of protection in which the protective inert gas inside the enclosure	p	1, 2
increased safety	Type of protection in which measures are applied so as to prevent with a higher degree of safety	e	2
non - sparking	Method of protection for electrical equipment designed so that it will not ignite the surrounding explosive atmosphere in normal operation	n	2
liquid immersion	Type of protection in which the electrical apparatus is immersed in oil	o	1, 2
intrinsic safety	Type of protection when no spark or any thermal effect in the circuit, produced in the test conditions prescribed in the standard, is capable of causing ignition	i	0, 1, 2
encapsulation	Type of protection in which the parts which can ignite an explosive atmosphere are enclosed in a resin	m	1, 2

각 방폭 형식에 알맞은 검증 시험을 통과한 전기기기에 대하여 IECEx 또는 ATEX와 같은 국제 방폭 인증 제도에 따라서 Fig 2.2와 같은 방폭 표시로 제품의 인증 및 등급을 나타낸다.

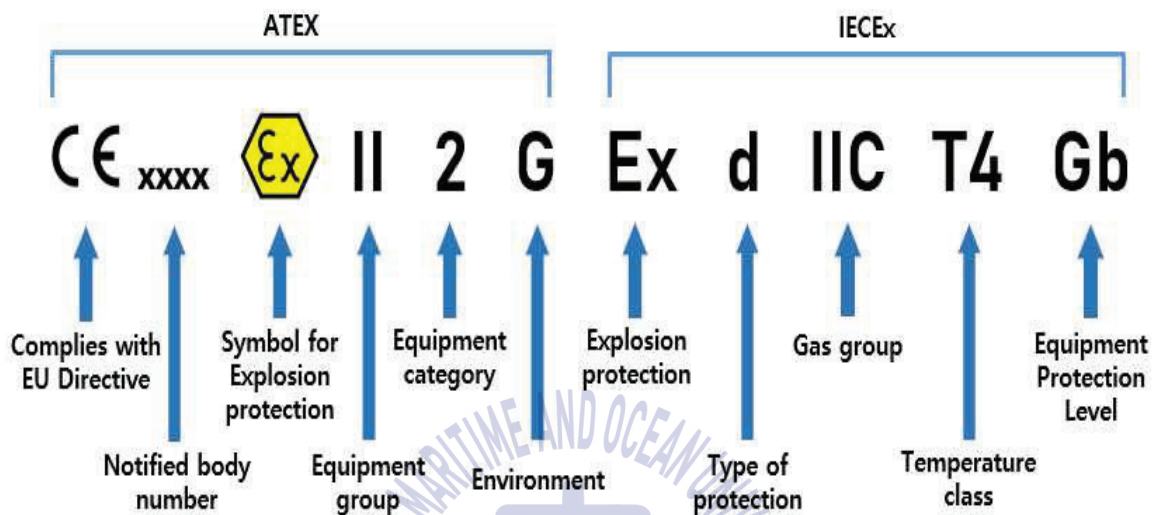


Fig 2.2 ATEX and IECEx Marking

2.2 방폭형 구조의 종류

2.2.1 가연성 물질을 제거하는 형식

폭발의 3요소 중 가연성 물질을 제거하여 폭발이 일어나지 않도록 하는 형식의 대표적인 예로는 압력 방폭 (Ex p)이 있다. 압력 방폭 구조는 전기설비 용기 내부에 질소, 공기, 탄산가스 등의 보호가스를 봉입하여 용기의 내부에 가연성 가스가 침입하지 못하도록 한 구조이다. 용기가 내부폭발에 견디도록 하기 위해 소형 및 중형 용기에 적합한 구조인 내압 방폭 구조에 비하여 용기의 크기 증가에 의한 비용 증가 문제 해결이 가능한 것이 압력 방폭 구조이다. Fig 2.3은 압력 방폭 구조의 원리를 나타내고 있다.

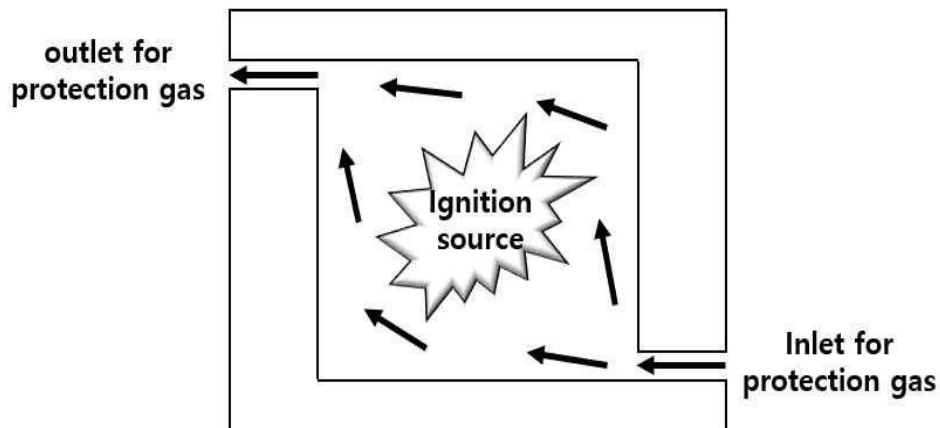


Fig 2.3 Principle of Ex p type

2.2.2 점화원을 제거하는 형식

점화원을 제거하여 폭발이 일어나지 않도록 하는 형식의 예로는 안전증 방폭 구조와 비점화 방폭 구조가 있다. 안전증 방폭 구조 (Ex e)는 정상 운전 중 폭발성 가스에 점화원으로 작용할 수 있는 전기 불꽃, 아크 또는 온도 상승의 발생을 방지하기 위하여 기계적, 전기적인 구조상의 안전도를 증가시킨 구조를 말한다. 안전도 증가를 위하여 구성품들의 최소 이격거리 요구사항을 적용시키거나 권선의 온도 상승을 제한시키고 있다. Fig 2.4는 안전증 방폭 구조의 원리를 나타내고 있다.

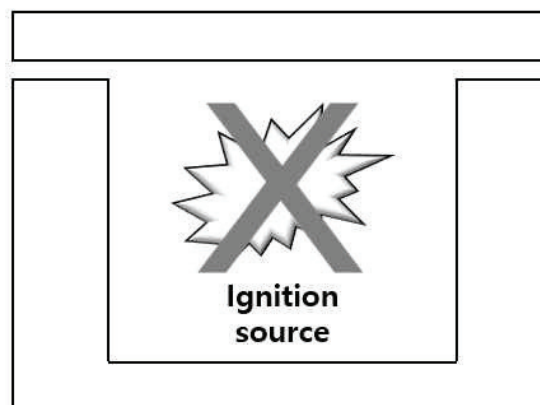


Fig 2.4 Principle of Ex e type

비점화 방폭 구조 (Ex n)는 정상 동작 시 주변의 폭발성 가스에 점화시키지 않고 점화 가능한 고장이 발생하지 않도록 보호형식을 적용한 구조를 말한다. 비점화 방폭 구조는 Zone 2에서만 설치하는 것을 전제로 사용되며, 비점화 방폭 구조의 적용을 위하여 접점 동작 시 아크나 스파크를 발생시키지 않도록 하거나 용기를 적절하게 밀봉하여 점화원이 가연성 가스에 노출되지 않도록 하는 구조가 있다.

2.2.3 최소 점화 에너지를 제한하는 형식

방폭 지역에서 전기의 스파크 및 접점 단락 등에서 발생하는 전기적 에너지를 최소 점화 에너지(Minimum Ignition Energy) 이하로 제한하여 점화원이 발생하더라도 폭발이 발생하지 않도록 방폭 구조를 적용한 형식을 말하며, 구성품들에 대하여 예상되는 특수 고장의 발생에도 폭발이 발생하지 않도록 에너지를 제한해야한다. Fig 2.5는 본질 안전 방폭 (Ex i)의 원리를 나타내고 있다.

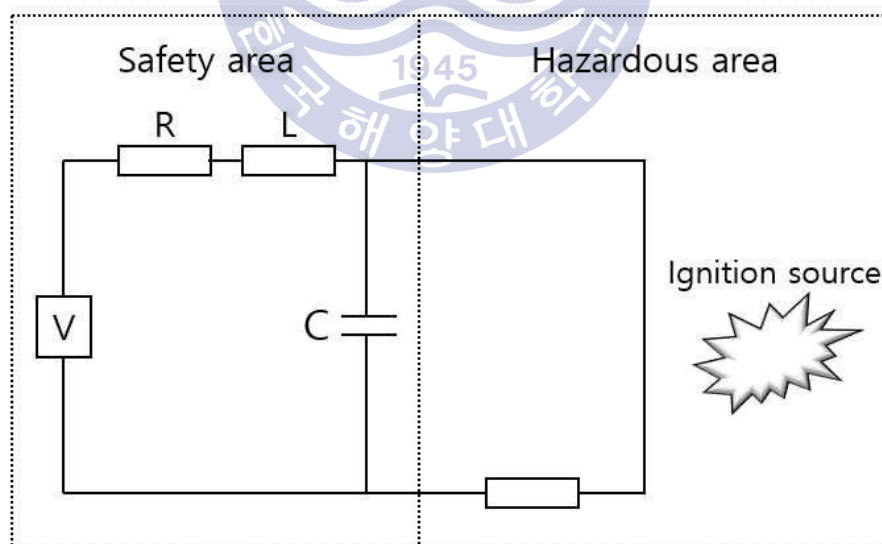


Fig 2.5 Principle of Ex i type

2.2.4 폭발과 격리시키는 형식

폭발성 가스가 존재하는 장소에서 전기기기의 사용 중에 발생할 수 있는 스파크 및 아크, 고온에 의하여 발생할 수 있는 폭발이 용기 외부로 전이되거나 외부의 폭발로부터 격리시키는 보호형식의 대표적인 예로는 내압방폭 형식, 몰드 방폭 형식 및 유입방폭 형식이 있다.

내압 방폭 구조 (Ex d)는 용기 내부에서 폭발성 가스의 폭발 시 용기가 그 압력을 견디고 접합면을 통해서 외부의 폭발성 가스에 인화될 우려가 없도록 전기설비를 전폐구조의 용기에 넣어 보호한 것을 말하며, 방폭 용기에 대한 요구사항을 만족하면, 내부 전기기기에 대한 방폭 요구사항이 없기 때문에 큰 전류를 사용하는 전기기기의 방폭구조에 많이 사용되어지고 있다. Fig 2.6은 내압 방폭 구조의 원리를 나타내고 있다.

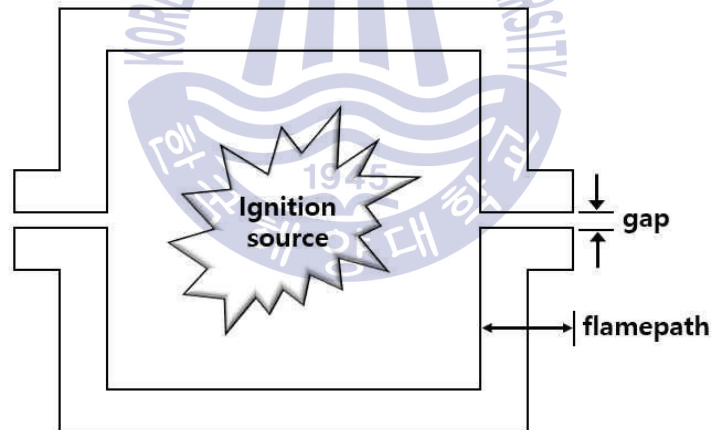


Fig 2.6 Principle of Ex d type

유입 방폭 구조 (Ex o)는 전기기기의 불꽃, 아크 또는 고온이 발생하는 부분을 기름 속에 넣어 기름면 위에 존재하는 폭발성 가스에 인화될 우려가 없도록 한 구조를 말하며, 변압기, 스위치, 개폐장치 등에 주로 많이 사용되어지고 있다. Fig 2.7은 유입방폭구조의 원리를 나타내고 있다.

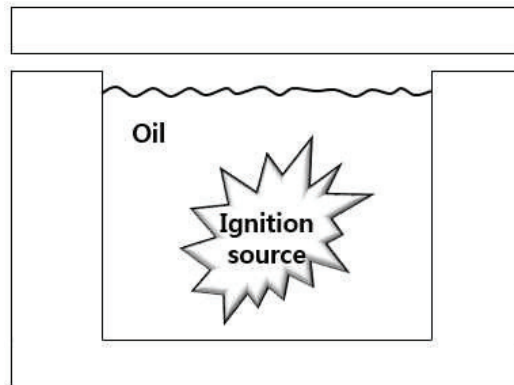


Fig 2.7 Principle of Ex o type

전기기기를 폭발과 격리시키기 위하여 컴파운드와 같은 고체로 차단시켜 열적 안정을 유지하도록 하는 몰드 방폭 구조 (Ex m)도 있으며, 유지보수가 필요 없는 전기기기를 영구적으로 보호하기에 적합하다.



제 3 장 내압 방폭 구조

3.1 내압 방폭 구조의 정의

전기기기 및 기계를 폭발과 격리시키는 원리를 적용하는 대표적인 방폭 형식인 내압방폭 구조는 내부에 폭발의 3요소가 함께 존재할 수 있는 가능성을 고려하고, 실제 폭발에 의한 압력을 견딜 수 있는 구조를 말한다. 국제 규격 IEC 60079-1에서 내압 방폭 구조는 용기 내부에서 폭발성 가스 또는 증기의 폭발시 용기가 그 압력에 견디며 또한, 접합면을 통해서 외부의 폭발성 가스에 인화될 우려가 없도록 전기설비를 전폐구조에 넣어 보호하는 것을 말한다. Fig 3.1은 내압 방폭 구조의 개략도를 나타내고 있다.

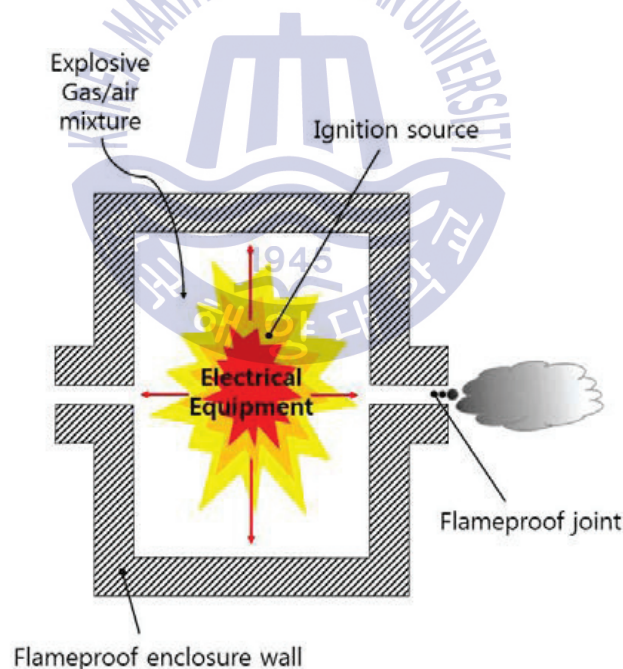


Fig 3.1 Schematic of a flameproof enclosure

내압 방폭 형식의 용기에 대해서만 방폭 형식을 만족하면 내부에 설치되는 전기기기에 대해 방폭 요구사항을 적용할 필요가 없기 때문에 많은 산업 분야에서 다양한 용도로 사용되어지고 있다. 내압 방폭 구조에서 필수적으로 검증

되어야하는 성능은 제품의 최대 표면 온도 제한 등급, 케이싱의 강도, 그리고 내부의 화염이 외부의 폭발성 가스로 전이되지 않도록 되어야 하며, 국제 규격 IEC 60079-0과 IEC 60079-1에 따라 형식 시험이 이루어진다.

3.2 내압방폭 구조의 용기에 대한 폭발 압력

3.2.1 폭발 압력의 추산

내압 방폭 케이싱의 강도 설계 및 형식시험의 기준이 되는 기준압 (Reference pressure)은 밀폐 용기 내부의 용적과 가연성 혼합가스의 반응열을 통해 폭발 압력의 추산이 가능하다. 가연성 혼합가스의 반응열 관계식은 다음 식 (3-1)로 나타낼 수 있다.

$$H_{re} = \frac{V_g \times H_c \times C_g}{V_m} \quad (3-1)$$

여기서, H_{re} 는 가연성 혼합가스의 반응열 (kcal), V_g 는 밀폐용기의 부피 (cm^3), H_c 는 1몰의 연소열 (kcal), C_g 는 가연성 가스의 농도, V_m 은 1몰에 대한 부피 (cm^3)이다.

산출한 가연성 혼합가스의 반응열을 반응열과 폭발압력간의 상관관계 방정식에 대입하여 밀폐용기에서의 폭발 압력을 추산한다. 각 가연성 혼합가스별 상관관계 식은 상이하며 다음과 같다.

$$y = 0.77x + 3.87 \quad (3-2)$$

$$y = 0.67x + 4.18 \quad (3-3)$$

$$y = 0.95x - 1.88 \quad (3-4)$$

$$y = 0.62x + 4.17 \quad (3-5)$$

식 (3-2)는 메탄과 산소의 혼합성 가스, 식 (3-3)은 에틸렌과 산소의 혼합성

가스, 식 (3-4)는 부탄과 산소의 혼합성 가스, 그리고 식 (3-5)는 프로판과 산소의 혼합성 가스에서의 반응열과 폭발압력 상관관계를 나타내고 있다.

3.2.2 압력상승에 미치는 환경적인 영향

밀폐용기 내에서의 폭발 압력은 반응열과 내부의 용적을 이용하여 추산이 가능하나, 추산 값은 정상 대기온도에 기초한 것이며, 구성품에 의한 내부 형상의 변화를 고려하지 않았다. 최고 폭발 압력과 압력 상승률 (dp/dt)에 영향을 미치는 조건들은 다음과 같다.

1) 가스의 온도 및 압력의 영향

밀폐용기 내에서 발생하는 일반적인 폭발은 초기 압력, 온도의 변화, 기체 몰수의 변화 등에 영향을 받게 된다. 따라서 최대 폭발압력은 다음 식 (3-6)과 같다.

$$P_m = \frac{P_i N_f T_f}{N_i T_i} \quad (3-6)$$

여기서, P_m 은 최대 폭발 압력, P_i 는 초기 압력, N_i 와 T_i 는 각각 초기의 기체 몰수와 가스의 온도, N_f 는 기체 몰수의 변화, T_f 는 가스의 온도 변화이다. 가연성 혼합물의 초기 온도에 따라서 최대 폭발 압력 값은 상이하게 나타난다. 정상 대기온도보다 높은 온도에서는 같은 부피 내의 물질의 질량이 상대적으로 적어지기 때문에 최고 압력은 감소한다. 반대로 초기 온도가 영하로 내려가면 같은 부피 내의 물질의 질량이 상대적으로 증가하면서 최고 폭발 압력이 증가한다. Fig 3.2는 각 가연성 가스별 온도 변화에 따른 최대 폭발 압력의 변화를 나타내고 있다. 또한, 폭발 압력 상승률은 초기 온도의 상승에 따라 증가하게 되며 이러한 현상은 초기 온도 상승에 따른 연소속도가 증가하기 때문이다.

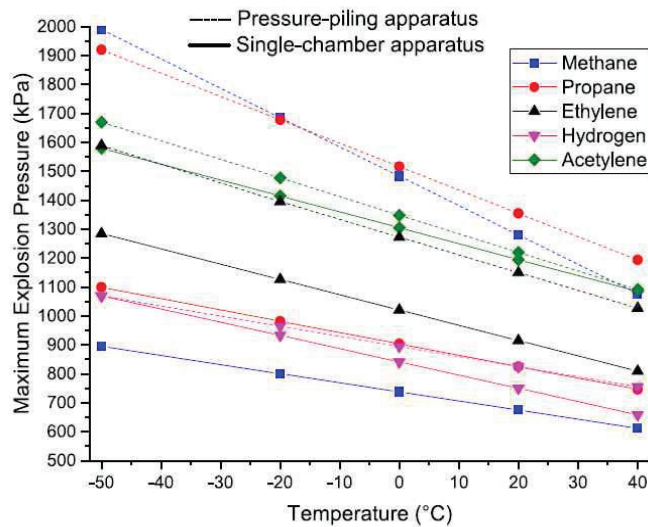


Fig 3.2 Maximum explosion pressure versus ambient temperature

식 (3-6)에 따라 가연성 혼합물의 초기 압력이 최대 폭발 압력의 상승에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 이는 같은 부피 내에서의 압력 증가에 따른 가스의 분자량 증가에 따른 것이며, 초기 압력의 증가에 따라 최대 폭발 압력이 상승하는 것을 Fig 3.3에 의해 확인이 가능하다.

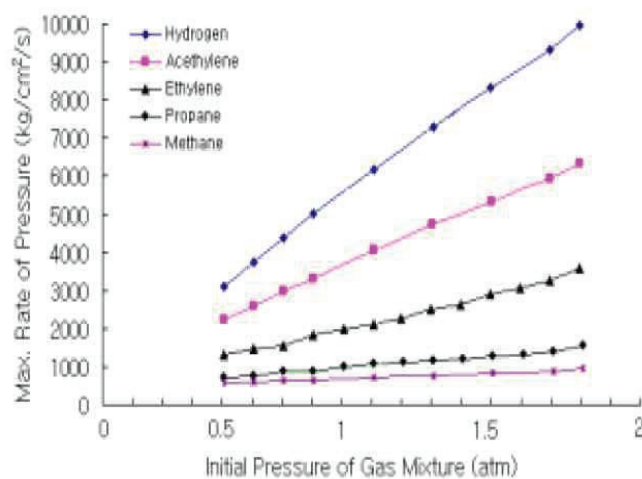


Fig 3.3 Initial pressure vs. the maximum rate of pressure rise

2) 밀폐 용기의 용량 및 형상

최고 폭발압력 P_m 은 밀폐 용기의 용량에 따라 크게 영향을 받지 않지만 용기의 직경에 대한 길이의 비율(L/D)이 커질수록 폭발에서의 열손실이 많아지면서 최고 폭발압력이 낮아지게 된다. 반대로 폭발압력 상승률(dp/dt)은 밀폐 용기의 용량에 따라 크게 영향을 받으며 일반적으로 밀폐 용기의 용량이 적어질수록 폭발 압력 상승률이 증가한다.

3.3 내압방폭 구조의 형식 시험

일반적인 형상의 내압 방폭 용기의 기준압력 추산이 수식적으로 가능하지만 폭발의 특성은 상당히 난해한 현상으로 이를 정확하게 예측하기는 어렵기 때문에 시험적인 접근이 필요하며 국제 규격 IEC 60079-1에서도 반드시 형식시험을 통해 제품의 성능 검증이 이루어지도록 요구하고 있다. 제품의 형식시험은 위험구역에서 사용하는 가스의 종류에 따라서 시험 방법이 달라지며 가스의 최대 안전틈새(Maximum experimental safe gap) 특성을 기반으로 시험이 이루어진다.

최대 안전 틈새는 혼합가스의 폭발화염 전파능력을 나타내는 기준이며 Fig 3.5와 같은 표준 용기에서 폭발에 의한 내부의 화염이 용기 외부로 확산되지 않는 값을 의미한다. Fig 3.5에서 나타내는 내부 용기의 용적은 20 [cm³]이며 접합면의 길이는 25 [mm]로 국제 규격에서 정의하고 있다.

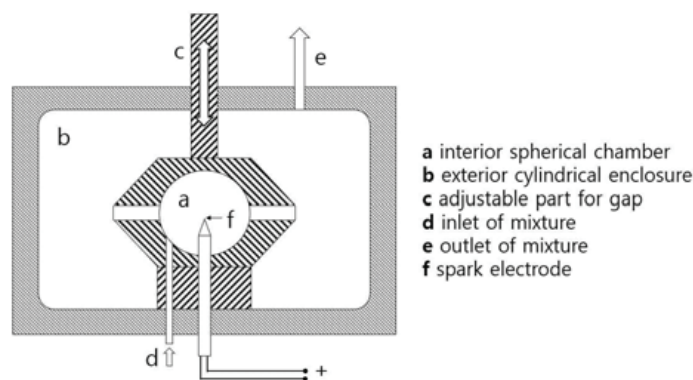


Fig 3.5 Test apparatus for MESG

혼합 가스의 종류에 따라 서로 다른 값을 가지는 최대안전틈새(MESG)는 가스의 폭발등급의 기준이 되며 Table 3.1과 같이 분류한다. IECEx 규격에서는 탄광용을 Group I로 가연성 가스에 대하여 Group II로 나타내며 Group II는 화염일주 한계에 따라 IIA, IIB 및 IIC로 나누고 있다.

Table 3.1 Explosion classification of gas according to MESG

폭발 등급	IIA	IIB	IIC
접합면의 폭 [mm]	$W \geq 0.9$	$0.9 > W > 0.5$	$W \leq 0.5$

제품이 설치되는 장소에서 사용되는 가스의 최대안전틈새 특성에 해당하는 가스 그룹에 따라서 국제 규격 IEC 60079-1에 따른 내압 방폭 구조의 제품 형식 시험이 이루어진다. Fig 3.6은 내압방폭 형식의 주요 시험 절차를 나타내고 있다.

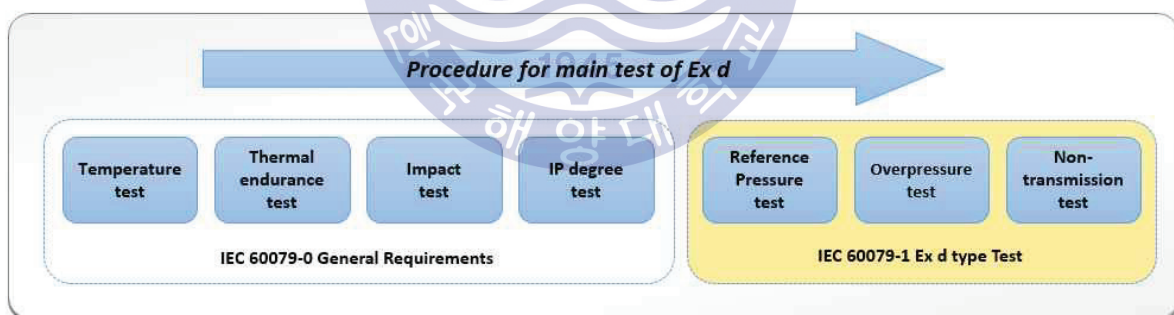


Fig 3.6 Type test procedure for explosion proof products

3.3.1 기준압 시험

기준압 시험의 목적은 내압 방폭 용기가 내부 폭발 압력을 견딜 수 있는지를 확인하기 위하여 시행한다. Table 3.2에 따라서 각 가스 그룹의 폭발성혼합물을 지정된 농도에 따라 조성하고 점화원에 의한 내부 폭발을 발생시켜 폭발 시 폭발 압력을 계측한다. 각 그룹에 해당하는 시험 횟수만큼 시행하며 그 중 가장

높은 압력을 기준으로 선정한다. 시험 후 밀폐함이 방폭 성능에 영향을 미치는 영구적인 손상이나 변형이 없다면 시험은 합격한 것으로 간주한다. 또한, 용기의 접합면이 팽창하여 역할을 하지 못하는 경우가 발생하지 않아야 한다.

Table 3.2 Specification of gas-air mixtures for reference pressure test

Explosion Group	Gas type	Gas in air by volume (%)	Number of tests
I	Methane	9.8 ± 0.5	3
IIA	Propane	4.6 ± 0.3	3
IIB	Ethylene	8.0 ± 0.5	3
IIB (pressure piling)	Hydrogen / methane (85/15)	24.0 ± 1.0	5
IIC	Acetylene	14.0 ± 1.0	5
	Hydrogen	31.0 ± 1.0	5

3.3.2 과압시험 (Overpressure test)

과압시험의 목적은 내부의 가스 폭발에 의해 발생하는 압력을 근거로 제품의 routine test 또는 batch test 대상여부에 따라 Table 3.3의 조건에 따른 기준압의 1.5배, 3배 또는 4배에 해당하는 압력을 용기에 가하여 강도를 검증하기 위하여 시행한다. 과압시험도 기준압 시험과 동일하게 방폭 보호 유형을 무효화시키거나 영구적인 손상을 발생시키지 않고, 접합면이 영구적으로 확대되지 않는다면 용기의 강도는 적합한 것으로 판단한다.

Table 3.3 Application pressure of overpressure test

Classification	relative pressure applied
Enclosures subject to routine test	1.5 times the reference pressure
Enclosures subject to batch test	3.0 times the reference pressure
Enclosures not subject to routine test	4.0 times the reference pressure

3.3.3 폭발 인화시험 (Non-transmission test)

폭발 인화시험의 목적은 내부 폭발에 의해 발생한 화염이 외부로 전이되지 않고 소멸될 수 있는지 검증하기 위하여 시행한다. Table 3.4의 각 가스 그룹별로 요구되는 가스 농도 조건을 내압 방폭 용기의 내부와 외부에 동일하게 조성하고 케이싱 내부의 점화원을 사용하여 내부폭발을 발생시킨 후 내부의 화염이 접합면을 따라 이동하면서 소멸이 되는지 확인한다. 용기의 접합면에 의해 화염이 소멸되는지 확인되어야 하는 시험이기 때문에 실링을 위해 설치되어 있는 모든 오링과 가스켓을 제거하고 시험을 진행하고 화염 전이 여부는 용기 외부의 가스 폭발 여부로 확인한다.

Table 3.4 Specification of gas-air mixtures for reference pressure test

Explosion Group	Gas type	Gas in air by volume (%)	Number of tests
I	Hydrogen / methane (58/42)	12.5 ± 0.5	5
IIA	Hydrogen	55.0 ± 0.5	5
IIIB	Hydrogen	37.0 ± 0.5	5
IIC	Acetylene	7.5 ± 1.0	5
	Hydrogen	27.5 ± 1.5	5

제 4 장 내압 방폭형 전동기

4.1 내압 방폭형 전동기의 구조

내압 방폭에서 가장 중요하게 요구되는 구조는 접합면(Flamepath)의 길이와 공극에 대한 것이다. 접합면은 외함의 마주보는 두 면이 서로 접하는 부분 또는 외함의 접하는 부분으로 내부의 폭발이 외함 주위의 폭발성 대기로 전도되지 않도록 방지하는 부분을 말한다. Fig 4.1은 접합면을 나타내고 있으며 볼트에 의해 발생하는 구멍을 고려하지 않은 L 과 볼트에 의해 발생하는 l 에 대해 국제규격 IEC 60079-1에서는 최소 길이와 최대 틈새에 대한 요구사항을 제시하고 있다.

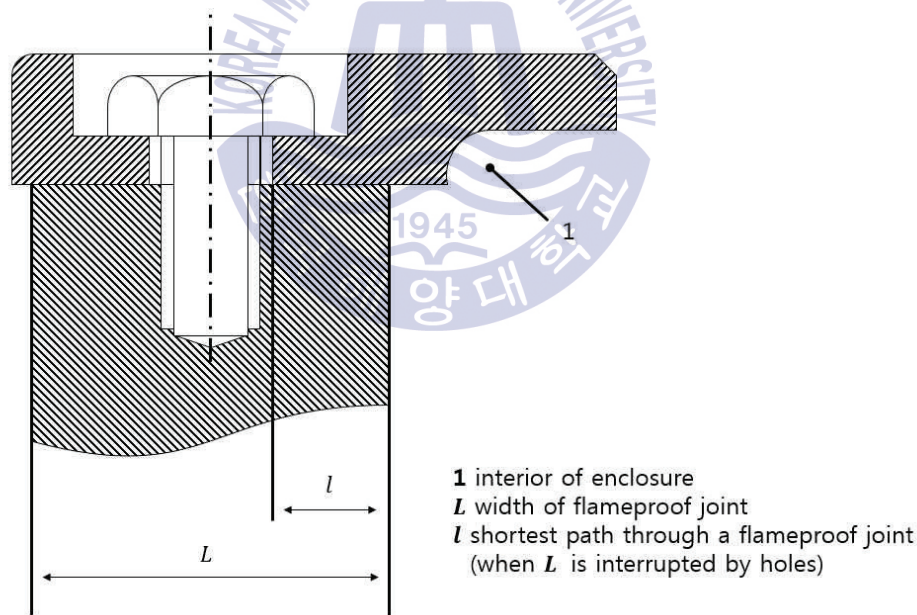


Fig 4.1 Description of flamepath

일반적인 내압 방폭 용기의 경우에는 용기의 본체와 커버 사이에 생기는 접합면에 대해서만 고려하면 되지만 내압 방폭형 전동기는 샤프트 글랜드에 의해 발생하는 접합면과 베어링에 대한 사항이 함께 요구되어진다.

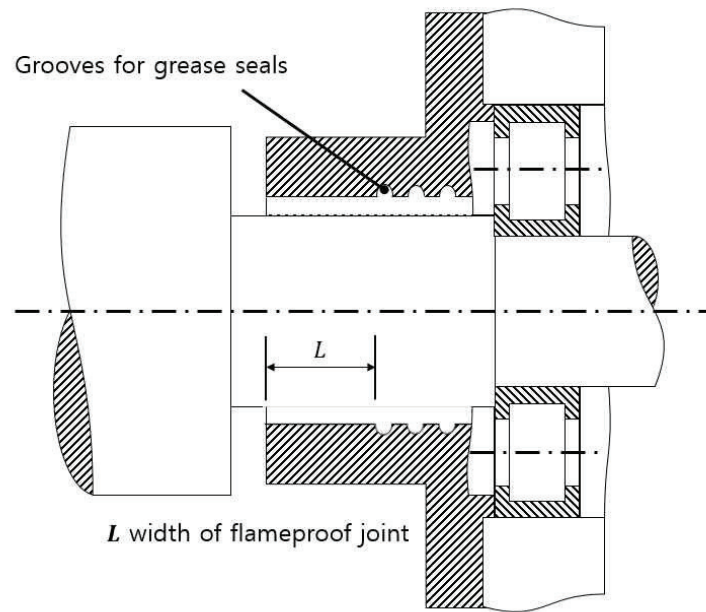


Fig 4.2 Description of flamepath for shaft gland

Fig 4.2는 샤프트 글랜드에 대한 가장 일반적인 접합면 구조를 나타내고 있으며 접합면의 길이 L 은 일반적인 용기의 접합면에 요구되어지는 사항이 동일하게 적용되어야한다. 일반적인 실린더형의 접합면이 아닌 래버린스형의 접합면의 구조도 허용되며 이 형식의 경우에는 내압 방폭 형식에서 요구되는 모든 방폭 시험을 만족하면 길이에 대한 요구조건을 적용할 필요가 없다.

4.2 내압 방폭형 전동기의 기준압

내압 방폭형 전동기에서는 구조적인 요구사항 이외에도 추가적으로 케이싱의 강도 설계에 수준 높은 설계 기술을 요구한다. 단순한 내부구조를 가지는 일반적인 내압 방폭형 전기기기는 기준압 시험 시 약 7~10[bar] 정도의 압력을 나타내며 이에 대해 요구되는 조건에 맞는 과압 시험에 견딜 수 있는 케이싱을 제작하면 된다. 하지만 내압 방폭형 전동기와 같이 내부 구조가 복잡하고 전동기의 공극과 같은 구조로 인해 내부 구조물이 구분되면 한쪽에서의 폭발 압력이 반대쪽으로 넘어가면서 급격한 폭발압력의 상승을 야기할 수 있으며 이러한 현

상을 압력중첩 (Pressure piling)이라고 한다.

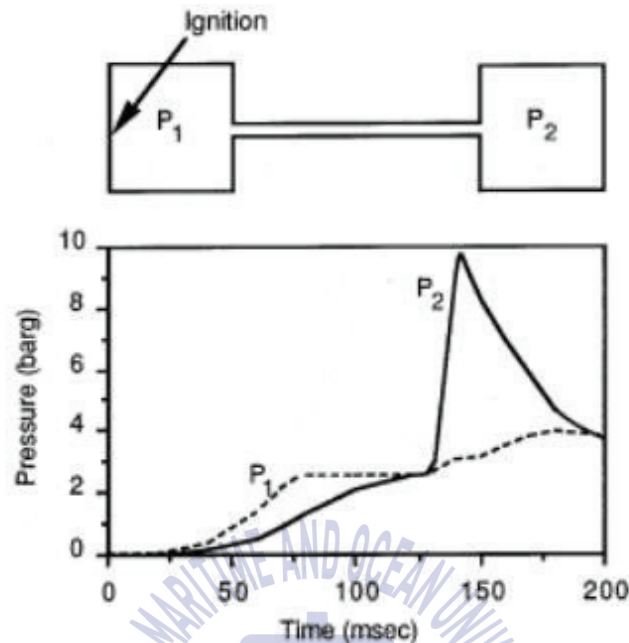


Fig 4.3 Concepts of pressure piling

Fig 4.3에서는 압력중첩 현상을 나타내고 있으며 P1에서 발생한 폭발 압력이 P2로 이어지는 관에서 가연성폭발기체를 압축시키고 뒤따르는 화염에 의해 압축된 폭발성 기체에 불이 붙으면서 그 폭발력이 훨씬 커지게 된다. 이로 인해 P2에서는 내압 방폭 구조의 용기가 본래 견딜 수 있도록 설계된 압력보다 더 큰 폭발이 일어나므로 방폭 형식을 보증할 수 없게 된다.

이러한 현상은 터미널 박스와 터미널 박스를 연결하는 전선관로에서 주로 많이 발생하므로 실제 위험구역에서 전선관로를 설치하는 경우에는 터미널 박스의 폭발 압력이 다른 터미널 박스로 넘어가지 못하도록 독립적으로 만들어 준다. 터미널 박스 이외에도 전동기와 같이 내부 구조에 복잡한 형상을 가지는 제품의 경우에 처음 폭발한 압력이 원활하게 나가지 못하면서 다른 폭발성 가스를 압축 및 폭발시킴으로써 급격한 폭발 압력 상승을 야기할 수 있으며, 이는 방폭 형식을 무효화할 수 있다.

국제 규격 IEC 60079-1에서는 IIB 가스 그룹의 시험 중 타 결과에 비하여 1.5

배 압력이 상승하였거나 폭발 압력 상승시간이 5[ms] 미만인 경우에 압력중첩이 발생하였다고 간주하며 규격에 따라 추가적인 시험을 하도록 명시되어 있다. 압력중첩을 판단하는 요소인 폭발 압력 상승시간은 Fig 4.4에 표시된 것과 같이 최대 폭발 압력의 10~90[%] 사이의 경과 시간을 말한다.

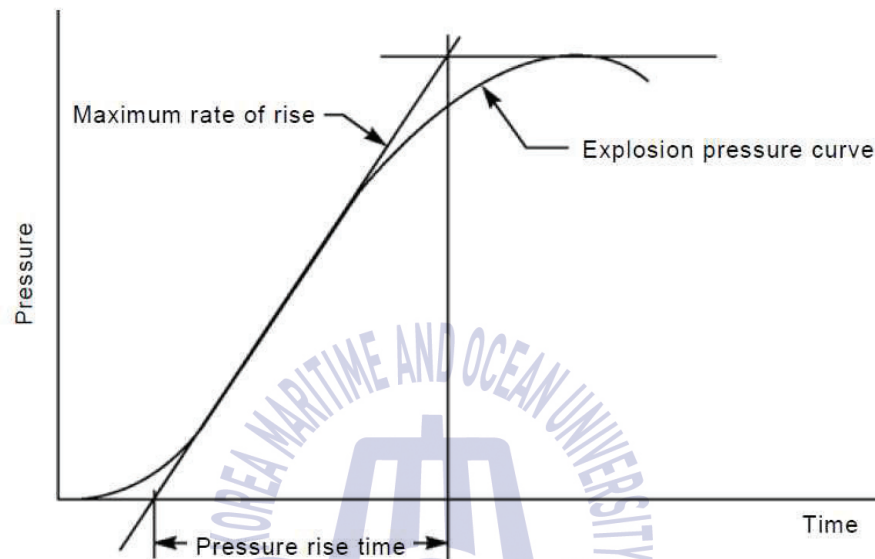


Fig 4.4 Determination of pressure rising time

전동기에서 발생하는 압력중첩 현상은 공학적인 계산에 의해 발생 유무를 판단할 수 없으며 전동기의 프레임 크기와 전동기의 정지 및 운전 상태, 그리고 압력 센서의 위치에 따라서 최대 폭발 압력이 크게 차이가 난다. 이러한 이유 때문에 전동기의 기준압력 시험을 진행할 때에는 전동기의 양쪽 커버에 압력 센서를 모두 설치하고, 각각의 커버에서 점화를 진행하여 폭발 압력을 측정한다. 또한, 전동기의 정지 상태와 최소 90[%]이상의 정격 속도에서 시험을 각각 진행하여 폭발 압력을 측정하고 네 가지의 경우 중에서 가장 높은 압력을 기준 압으로 정한다.

제 5 장 내압 방폭형 전동기의 폭발 특성 분석

5.1 실험 개요

내압 방폭 용기의 기준압에 영향을 미칠 수 있는 3가지 요건(가스의 종류, 공극 크기, 전동기의 회전수)을 변경하면서 실험하여 각 요소들이 폭발 특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

내압 방폭 전동기는 설치 장소에 따라 사용되는 가스의 종류가 달라지며 각 가스에 따른 최대 폭발압력이 상이하어 케이싱 강도의 설계 기준이 달라진다. 따라서 동일한 실험 모델에 대하여 상이한 종류의 가스에 대한 실험을 진행하였으며 대상 가스의 종류는 산업현장에서 많이 사용하고 국제 규격 IEC 60079-1의 가스 그룹에서 대표적인 것을 선정하였다. 규정에 제시된 실험 방법을 간단히 설명하고 그에 따라 실험 결과를 바탕으로 각 가스별 폭발 특성을 분석하고자 한다.

전동기 내부의 회전자와 고정자 사이에 형성되는 공극은 전동기의 양쪽에 좁은 공간으로 형성하고 있는 구조이다. 이러한 공극은 전동기의 효율에 영향을 미치는 것과 동시에 내부의 폭발 압력을 급격하게 증가시킬 수 있는 요인으로 작용할 수 있다. 따라서 동일한 실험 조건과 실험 모델에서 공극의 크기만을 변경하면서 기준압 시험을 시행하였으며 공극의 크기에 따른 폭발 특성을 분석하였다.

또한, 전동기의 회전이 내부의 폭발 압력에 어떠한 영향을 미치는지 확인하고자 한다. 내부에 냉각을 위한 팬이 설치되지 않은 형식의 전동기를 기준으로 동일한 조건과 실험 모델에서 전동기의 회전수만을 변경하면서 기준압 시험을 시행하였다. 회전수 실험 조건으로는 정지 상태, 500[rpm], 1500[rpm], 2500[rpm]을 선정하였으며 각 전동기의 회전수에 따른 폭발 특성을 분석하였다.

5.2 실험 모델

실험적 조건에 따른 내압 방폭 전동기의 폭발 특성을 분석하기 위하여 일반적인 구조 형상을 가지고 있는 전동기를 선정하였으며 앞 절에서 설정한 실험 조건을 용이하게 적용하기 위하여 실제 전동기와 유사한 실험 모델을 제작하였다. 실험 모델은 전동기의 고정자와 회전자, 그리고 공극을 형성할 수 있도록 제작하였으며, 실제 전동기와 동일한 구조로 제작하였다. 슬롯 구조 내에는 권선이 권치되기 때문에 막힌 공간으로 큰 차이가 없다고 볼 수 있으므로 고정자 제작 시 슬롯 구조는 반영하지 않았다. 실험 모델의 재질은 S45C의 탄소강을 사용하였으며 케이싱의 두께는 10[mm]로 제작하였다. Fig 5.1은 실험 모델의 단면도를 나타내고 있다.

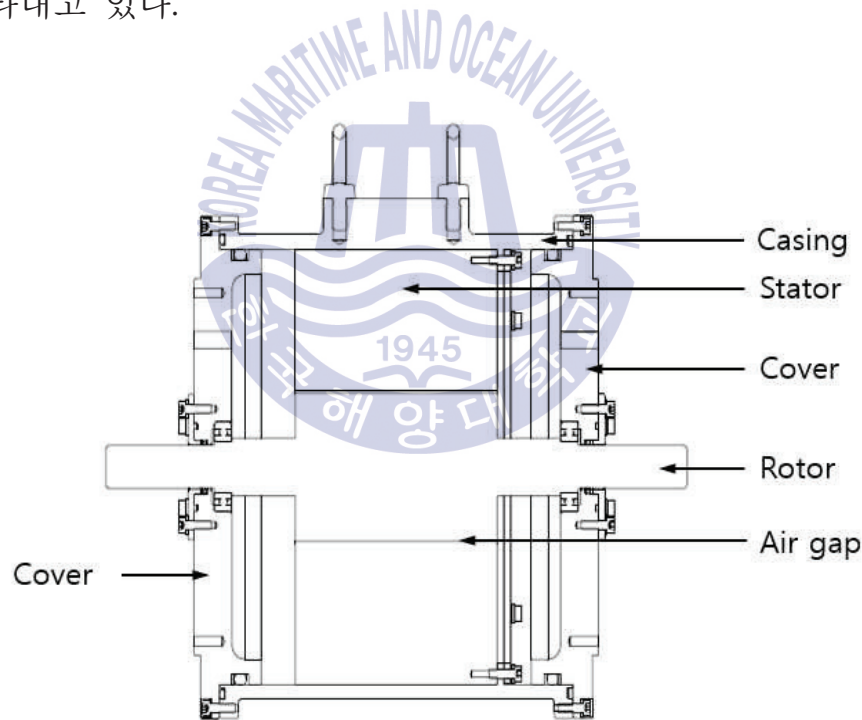


Fig 5.1 Diagram of test sample

실험 모델은 Table 5.1의 사양을 적용하고 2[mm]의 공극 크기를 가지는 모델을 기본으로 제작하였으며 전동기의 공극 조정을 위하여 고정자 형상의 부분을 교환할 수 있도록 제작하였다. 1[mm]와 3[mm]의 공극 크기를 설정하기 위하여 상이한 내경을 가지는 고정자를 추가적으로 제작하여 실험하였으며 실험 모델

의 각 구성품 목록을 Table 5.2에 나타내었다.

Table 5.1 Specification of gas-air mixtures for reference pressure test

Parameter	Specification
Diameter of enclosure	320 [mm]
Length of enclosure	300 [mm]
Outer diameter of stator	300 [mm]
Inner diameter of stator	104 [mm] / 106 [mm] / 108 [mm]
Length of stator	180 [mm]
Diameter of rotor	102 [mm]
Length of rotor	350 [mm]
Air gap	1 [mm] / 2 [mm] / 3 [mm]

Table 5.2 List of components of experimental sample

No.	Component information	quantity
1	Motor shaped cylinder (Length: 270[mm], Material: S45C)	1
2	Cylindrical cover (Diameter: 360[mm], Material: S45C)	2
3	Stator #1 (Outer diameter: 300[mm], Inner diameter: 104[mm], Length: 180[mm], Material: S45C)	1
4	Stator #2 (Outer diameter: 300[mm], Inner diameter: 106[mm], Length: 180[mm], Material: S45C)	1
5	Stator #1 (Outer diameter: 300[mm], Inner diameter: 108[mm], Length: 180[mm], Material: S45C)	1
6	Rotor (Outer diameter: 102[mm], Length: 460[mm], Material: S45C)	1
7	Ring for fixing stator	1
8	Guide for installing rotor (Outer diameter: 100[mm], Inner diameter: 30[mm], Material: S45C)	2
9	bearing (6007ZZ)	2
10	Seal ring for cylindrical cover (o-ring x 4pcs, back up ring x 2pcs)	6

Fig 5.2는 실제 제작한 실험 모델을 나타내고 있으며, (a)는 실험 모델의 전체 사진을 나타내고 (b)는 실험 모델의 내부 구조를 나타내고 있다.



(a) Test model with air-gap 2 mm



(b) Internal construction for test model

Fig 5.2 Test model

Fig 5.3은 공극 크기 조건 적용을 위해 추가적으로 제작한 고정자 2개를 나타내고 있다. 왼쪽은 공극 크기 1[mm]를 적용하기 위하여 제작한 내경 104[mm]의 고정자이며, 오른쪽은 공극 크기 3[mm]를 적용하기 위하여 제작한 내경 108[mm]의 고정자를 나타내고 있다.

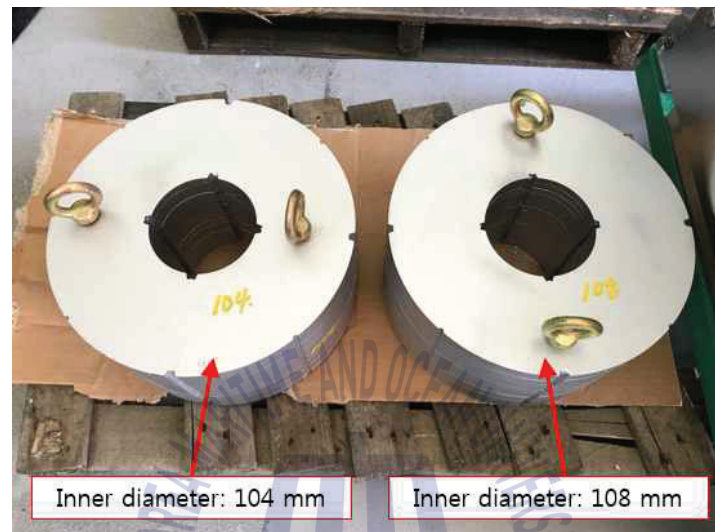


Fig 5.3 Test model

또한, 국제 규격에 따른 기준압 시험을 진행하기 위하여 Fig 5.4와 같이 전동기의 양쪽 커버에 구멍을 가공하였다. 각 구멍들은 폭발성 혼합물을 주입 및 배출, 점화 플러그의 설치 및 압력 센서를 설치하는 용도로 사용하였다.

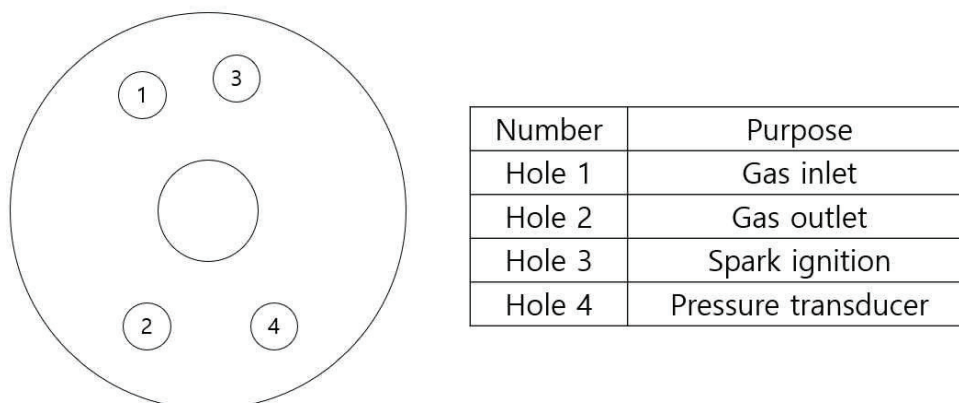


Fig 5.4 Diagram for holes of motor cover

5.3 실험 환경의 설정

5.3.1 가스 종류에 따른 실험 조건

위험 구역에서 방폭 제품을 사용하고자 할 때, 산업현장에서 사용하고 있는 가스에 따른 방폭 인증을 요구하고 있다. Table 5.3은 국제 규격에 따른 가스 그룹과 해당 가스와 그룹 별 대표 시험 가스를 나타내고 있다.

Table 5.3 Gas group table

Equipment group	Gas/vapour or liquid	Test gas (Concentration) %
I	Methane (firedamp)	Methane (9.8 ± 0.5) %
IIA	Ethanal, Acetone, Iso-Butane, n-Butane, Methane, Propane, Kerosene, Ammonia	Propane (4.6 ± 0.3) %
IIB	Ethylene, Ethanol, Hydrogen Sulfide, Carbon monoxide	Ethylene (8.0 ± 0.5) %
IIC	Acetylene, Hydrogen, Carbon Disulfide	Acetylene (14.0 ± 1.0) % Hydrogen (31.0 ± 1.0) %

산업현장에서 주로 사용되고 있는 가스 그룹인 IIB, IIB + H₂, IIC의 폭발 특성을 비교하고자 동일한 실험 모델에 대하여 3가지 가스(에틸렌, 아세틸렌, 수소)에 대한 기준압 시험을 진행하였다. 국제 규격 IEC 60079-1에서는 IIB 조건의 시험에서 3회의 시험을 요구하고 있지만 데이터의 유효성 확보를 위하여 동일한 기준압 시험을 각 5회씩 진행하였다. 각 가스 그룹별 시험 결과를 바탕으로 최대 폭발압력과 폭발압력 상승시간을 비교하였다.

5.3.2 전동기의 공극 크기에 따른 실험 조건

일반적으로 밀폐 용기 내부의 공간 면적 감소는 최대 폭발압력을 감소시키지만 공극과 같이 내부에 좁은 공간을 형성하는 구조는 압력 상승을 가속시킴으로써 압력 증첩에 의한 최대 폭발압력이 상승할 수 있다. 내경 104[mm], 106[mm], 108[mm]를 가지는 고정자를 교환하면서 전동기 공극의 크기를 각각 1[mm], 2[mm], 3[mm]가 되도록 설정하였으며 각 공극 크기에 따라 기준압 시험을 진행하였다. 공극 크기를 제외한 나머지 실험 조건들은 동일하게 하였으며 시험 가스는 8.0 ± 0.5 [%]의 에틸렌을 사용하였다. 동일한 기준압 시험을 각 5회씩 진행하였으며 전동기의 공극 크기에 따른 시험 결과를 바탕으로 최대 폭발압력과 폭발압력 상승시간을 비교하였다.

5.3.3 전동기의 회전수에 따른 실험 조건

전동기의 설계에 있어 전동기의 극수와 정격 주파수를 결정하여 정격 속도를 선정하는 것은 필요하다. 일반적인 전동기에서는 정격 속도를 선정할 때 전동기의 출력 성능만을 고려하면 되지만 방폭형 전동기에서는 회전수에 따른 최대 폭발 특성이 변화할 수 있기 때문에 함께 고려되어야 한다. 따라서 전동기의 회전수를 변화하면서 폭발 특성을 비교하고자 한다. 전동기의 회전수를 제외한 나머지 실험 조건들은 동일하게 하였으며 정지 상태, 회전수 500[rpm], 1500[rpm], 그리고 2500[rpm]에 대해 실험을 진행하였다. 시험 가스는 8.0 ± 0.5 [%]의 에틸렌을 사용하였으며 동일한 기준압 시험을 각 5회씩 진행하여 전동기의 회전수에 따른 실험 결과를 바탕으로 최대 폭발압력과 폭발압력 상승시간을 비교하였다.

5.4 실험 장치의 구성

3가지의 실험 조건(가스 종류, 공극 크기, 전동기의 회전수)에 따라 기준압 시

험을 시행하기 위하여 내압 방폭 시험 챔버에 실험 모델을 설치하였다. Fig 5.5
는 시험의 구성도를 나타내고 있으며, Fig 5.6은 실험 모델을 내압 방폭 시험
챔버에 설치한 사진을 나타내고 있다.

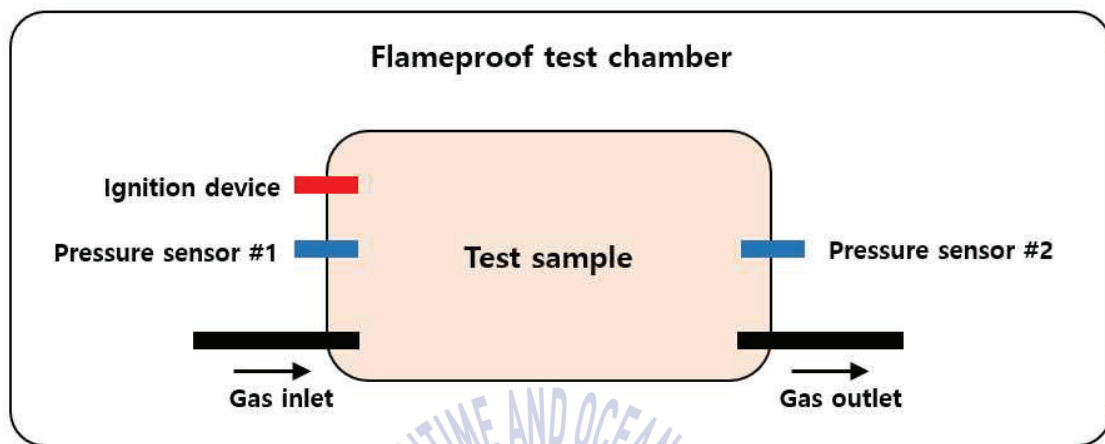


Fig 5.5 Test configuration diagram



Fig 5.6 Installation of test sample

가스의 균일한 혼합을 위하여 가스 주입 라인은 Fig 5.7의 (a) 커버에 설치하였으며 가스 배출 라인은 반대편인 (b) 커버에 설치하였다. 점화원은 가스 주입 라인과 가깝게 설치하였으며, 압력 센서는 실험 모델의 양쪽 커버에 모두 설치하여 폭발 측과 폭발 반대 측의 폭발 압력을 계측하였으며 압력 중첩 발생 여부를 파악하고자 하였다.

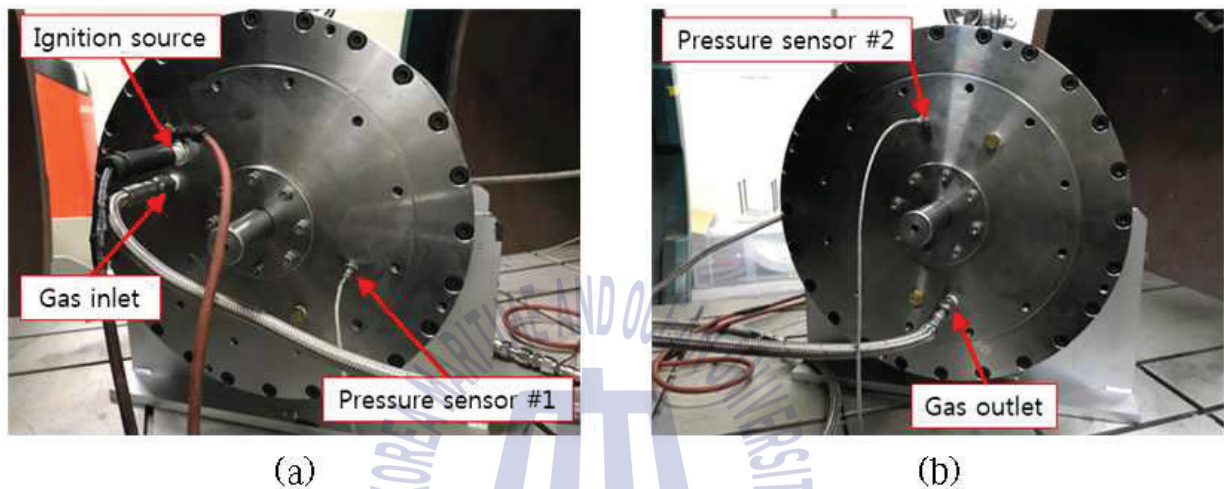


Fig 5.7 Installation of cover for test sample

5.5 실험 방법

폭발성 가스와 공기의 혼합을 위하여 MFC(Mass Flow Controller)를 사용하였으며 산소 분석기를 통해 현재 산소 농도를 측정하여 식 (5-1)을 통해 현재 가스 농도를 역산하였다.

$$G_{sample} = 100 - \left(\frac{O_{sample}}{O_{atm}} \right) \times 100 \quad [\%] \quad (5-1)$$

여기서, G_{sample} 은 시료 내부의 현재 가스 농도, O_{sample} 은 시료 내부의 현재 산소 농도, O_{atm} 은 현재 대기의 산소 농도이다.

IEC 60079-1:2014, Cl. 15.2.2 Determination of explosion pressure (Reference pressure)에 따라서 기준압 시험을 진행하였으며 폭발압력 측정의 유효성을 향

상시키기 위하여 ExTAG - DS - 2013 - 003, Recommendation effectiveness determination explosion pressure의 내용을 적용하였다.

압력 변환 장치의 온도 영향을 피하기 위하여 실리콘 그리스를 압력 센싱 부분에 사용하였으며 제조사에서 명시하는 토크 값으로 센서를 설치하였다. 압력 파형의 잡음을 제거하기 위하여 규격에서 제시하는 5 ± 0.5 [kHz]의 3 [dB] 지점을 갖는 저역 통과 필터를 사용하였다. 또한, 기준압 시험에 의한 폭발 후 충분한 퍼지 시간을 가져서 가스 혼합물 및 시료의 과도한 가열에 의한 시험 오차를 줄이고자 하였다.

5.6 실험 결과

5.6.1 가스 종류에 따른 실험 결과

내압 방폭 시험 챔버에 실험 모델을 설치하고 에틸렌, 아세틸렌, 그리고 수소 가스를 사용하여 가스 종류 변경 조건에 대한 기준압 시험을 시행하였으며, 각 가스별 대표 폭발 특성 그래프를 Fig 5.8 ~ Fig 5.10에 나타내었다. Fig 5.8은 에틸렌 가스, Fig 5.9는 아세틸렌 가스 및 Fig 5.10은 수소 가스에 대한 실험 결과이며 Ch 3은 점화원에 의해 폭발이 발생한 측의 폭발압력을 나타내고 Ch 2는 점화원에 의해 폭발이 발생한 반대 측의 폭발 압력을 그래프에서 나타내고 있다.

가스 종류 별 폭발압력 특성을 분석하고자 Fig 5.11과 Fig 5.12와 같이 가스 종류별 비교 그래프를 작성하였다. Fig 5.11은 가스 종류에 따른 최대 폭발압력에 대한 결과 그래프를 나타내고 있으며 Fig 5.12는 가스 종류에 따른 폭발압력 상승시간에 대한 결과 그래프를 나타내고 있다.

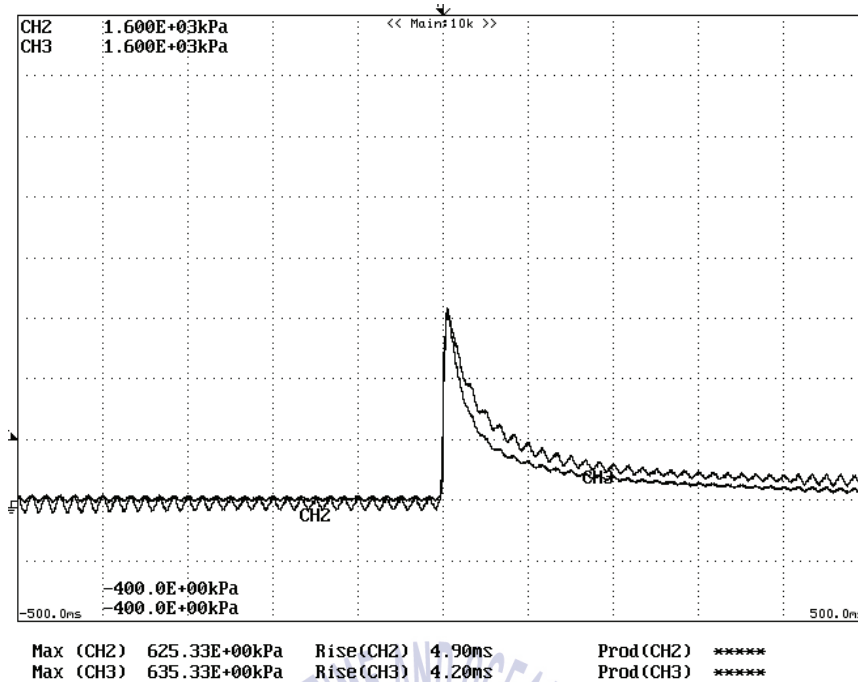


Fig 5.8 Test result for Ethylene

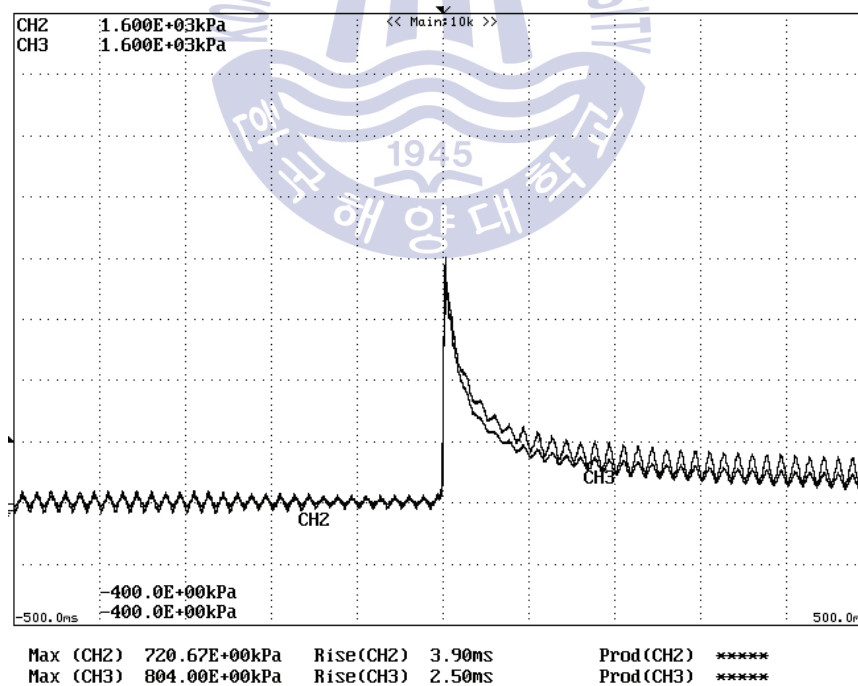


Fig 5.9 Test result for Acetylene

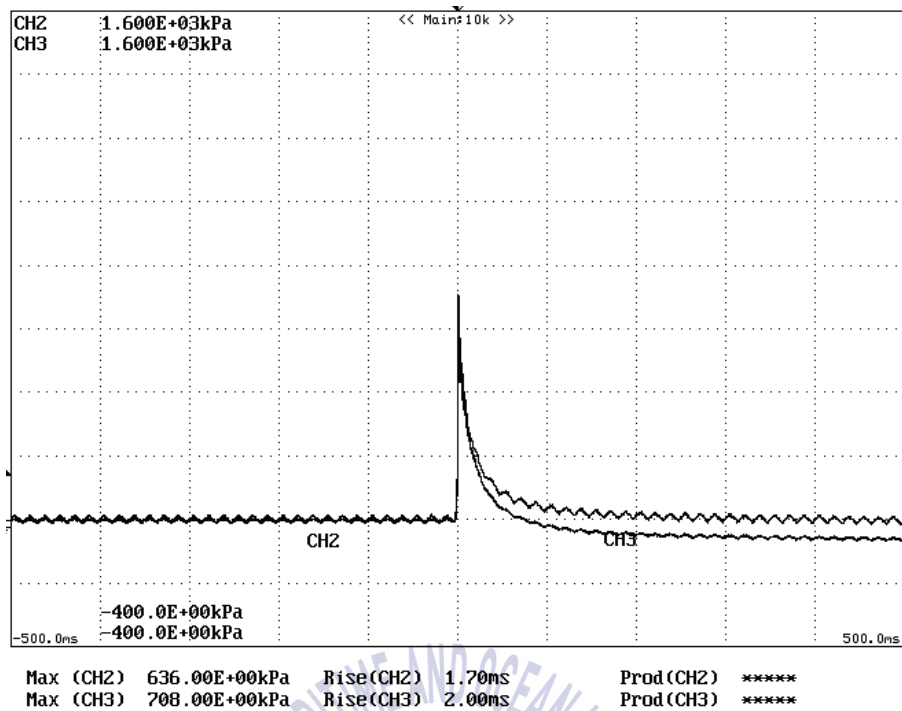


Fig 5.10 Test result for Hydrogen

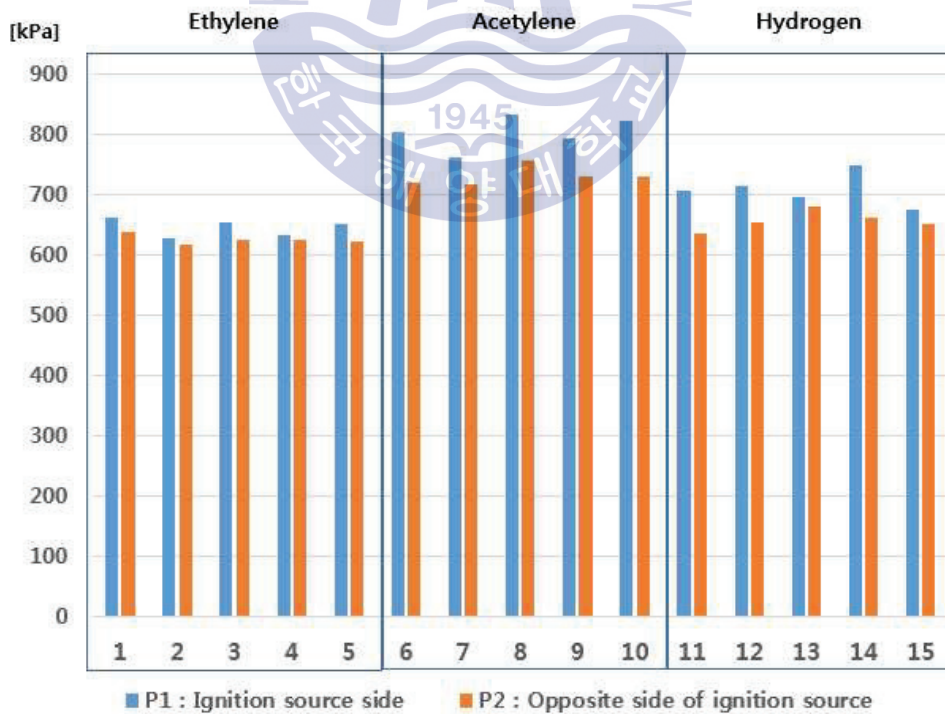


Fig 5.11 Graph for explosion pressure according to type of gas

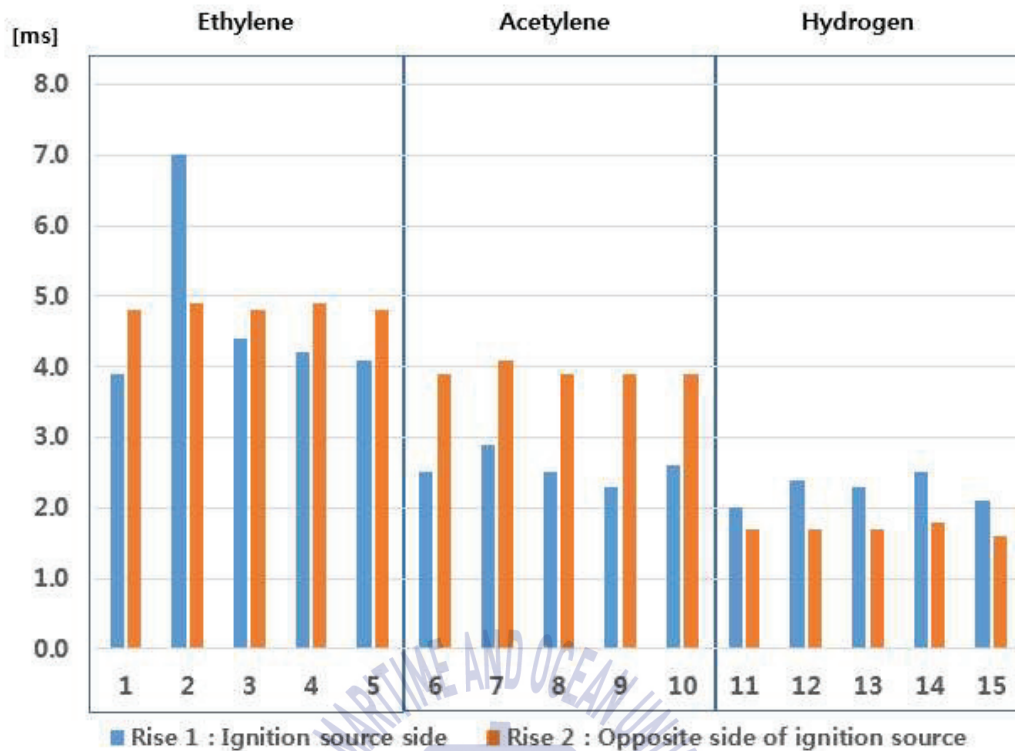


Fig 5.12 Graph for pressure rising time according to type of gas

Fig 5.11에서 볼 수 있듯이 최대 폭발 압력을 기준으로 분석하면 에틸렌, 수소, 그리고 아세틸렌 순으로 폭발 압력이 높아졌으며, 각각 662 [kPa], 750 [kPa], 835 [kPa]의 최대 폭발 압력 결과를 보였다. IIB 그룹에서 사용이 요구되는 전동기는 에틸렌 가스의 최대 폭발 압력을 고려하여 케이싱을 설계하면 되기 때문에 수소와 아세틸렌 가스를 모두 고려해야 되는 IIC 그룹의 전동기의 케이싱 보다 강도 기준을 낮게 잡아도 된다. 만약, 수소 가스의 취급만이 이루어지는 위험 구역에서는, 아세틸렌 가스를 동시에 고려해야 되는 IIC 제품 인증이 아닌 IIB + H₂ 제품 인증을 채택한다면 케이싱 설계비용을 절감할 수 있다.

가스 종류에 따른 폭발압력 상승시간을 분석하면 Fig 5.12와 같이 국제 규격 IEC 60079-1의 기준에 따른 압력 중첩 현상이 모든 가스에서 발생한 것을 확인할 수 있다. (폭발 압력 상승 시간 5 ms 미만) 하지만 폭발 반대 측에서의 급격한 폭발 압력 상승은 발생하지 않았으며, 모든 가스에서 폭발측보다 폭발 반대 측에서 상승 시간이 더 느린 것을 확인하였다.

5.6.2 전동기의 공극 크기에 따른 실험 결과

전동기의 공극 크기 조건별 실험을 위하여 상이한 내경의 고정자를 기본 실험 모델에서 교환하여 기준압 시험을 진행하였다. 기본 모델은 2 [mm]의 공극 크기를 가지고 있으며 108 [mm]의 고정자를 설치한 실험 모델을 Fig 5.14에 나타내었다.



Fig 5.13 Test sample with air-gap 1 mm



Fig 5.14 Test sample with air-gap 3 mm

각 공극 크기 조건별 대표 폭발 특성 그래프를 Fig 5.15 ~ Fig 5.17에 나타내었으며 공극 크기 1 [mm]에 대한 실험 결과를 Fig 5.15, 공극 크기 2 [mm]에 대한 실험 결과를 Fig 5.16, 그리고 공극 크기 3 [mm]에 대한 실험 결과를 Fig 5.17에 나타내었다. Ch 3은 점화원에 의해 폭발이 발생한 측의 폭발압력을 나타내고 Ch 2는 점화원에 의해 폭발이 발생한 반대 측의 폭발 압력을 그래프에서 나타내고 있다.

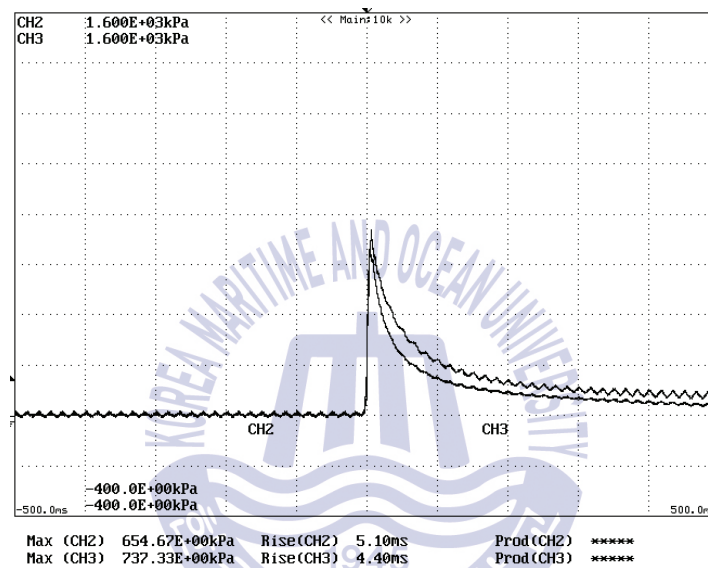


Fig 5.15 Test result for air-gap 1 mm

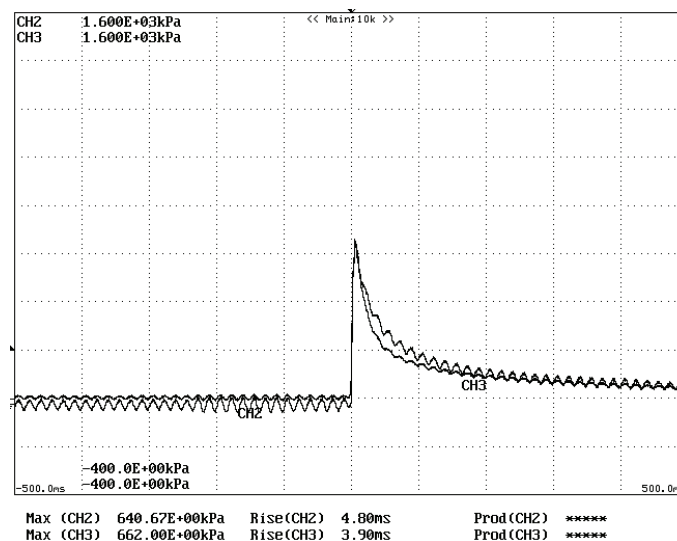


Fig 5.16 Test result for air-gap 2 mm

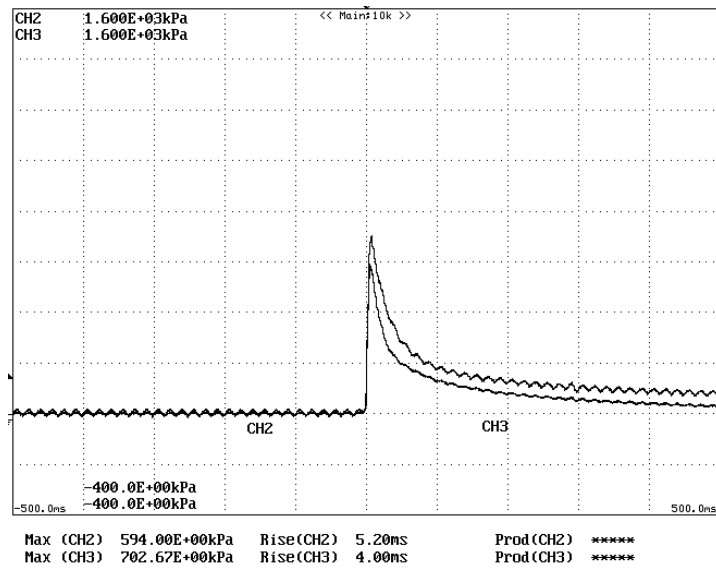


Fig 5.17 Test result for air-gap 3 mm

전동기의 공극 크기별 폭발압력 특성을 분석하고자 Fig 5.18과 Fig 5.19와 같이 공극 크기별 비교 그래프를 작성하였다. Fig 5.18은 전동기의 공극 크기에 따른 최대 폭발압력에 대한 결과 그래프를 나타내고 있으며 Fig 5.19는 전동기의 공극 크기에 따른 폭발압력 상승시간에 대한 결과 그래프를 나타내고 있다.

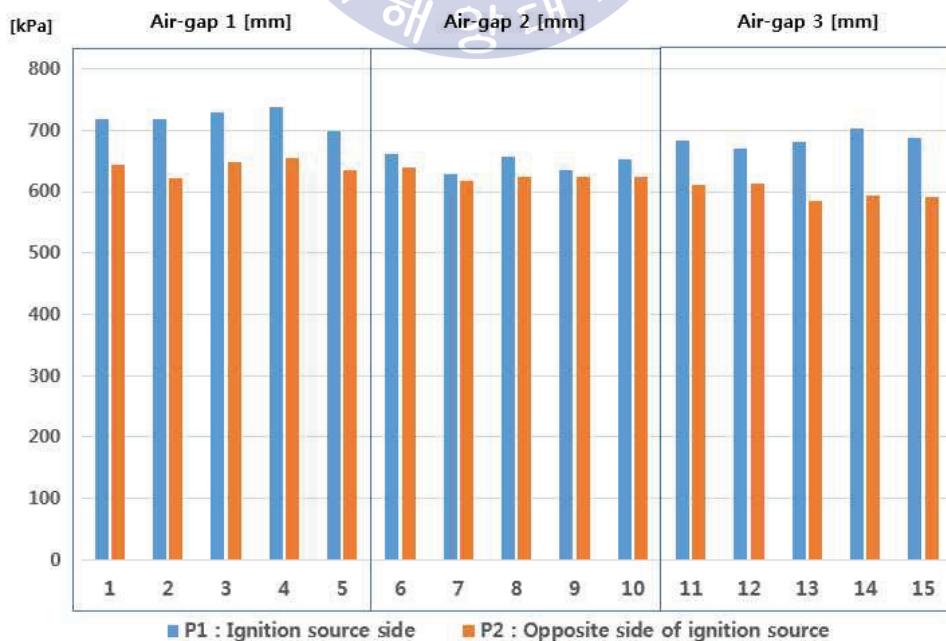


Fig 5.18 Graph for explosion pressure according to air-gap

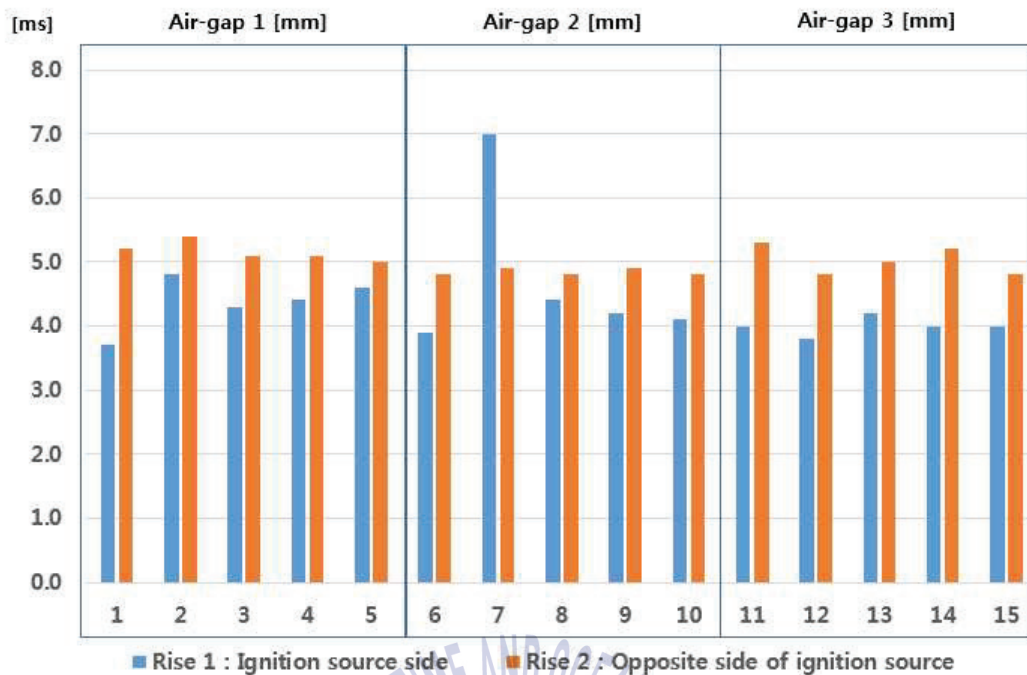


Fig 5.19 Graph for pressure rising time according to air-gap

전동기의 공극 크기에 따른 최대 폭발압력 특성을 분석하면 3가지의 조건인 1 [mm], 2 [mm], 3 [mm] 공극 크기 중 1 [mm]의 공극 크기를 가지는 실험 모델에서 가장 높은 최대 폭발 압력 737 [kPa]을 나타내었다. 2 [mm]와 3 [mm]의 공극 크기를 가지는 실험 모델에서의 최대 폭발 압력인 662 [kPa]과 702 [kPa]의 결과에 비해 상승한 결과 값이다. 하지만 2 [mm] 공극과 3 [mm] 공극 크기를 가지는 실험 모델의 결과 값을 비교했을 때, 공극 3 [mm]의 실험 모델에서 약 40 [kPa] 가량 상승한 폭발 압력을 보였다. 이러한 결과는 전동기 공극의 크기가 커질수록 최대 폭발 압력을 감소하는 요소로 작용하는 것은 아니지만, 공극의 크기에 따라 최대 폭발 압력이 변화하므로 전동기 케이싱 강도 설계 시 고려가 되어져야할 요소임을 확인하였다. 하지만 공극의 크기가 폭발압력 상승 시간에 대하여 크게 영향을 미치는 요소가 아니라는 것을 Fig 5.19를 통해 확인 하였다.

5.6.3 전동기의 회전수에 따른 실험 결과

전동기의 회전수에 따른 실험을 위해 Fig 5.20과 같이 2극 유도전동기를 실험 모델에 커플링을 사용하여 설치하였으며 인버터를 사용하여 전동기의 회전수 조건을 변경하면서 기준압 시험을 시행하였다.



Fig 5.20 Installation of test sample for rotational speed condition test

0[rpm], 500[rpm], 1500[rpm], 2500[rpm]에 대한 회전수 조건을 적용하고 각 회전수별 대표 폭발 특성 그래프를 Fig 5.21 ~ Fig 5.24에 나타내었으며 Fig 5.21은 정지 상태, Fig 5.22는 500[rpm], Fig 5.23은 1500[rpm], Fig 5.24는 2500[rpm]의 폭발압력 그래프를 나타내고 있다.

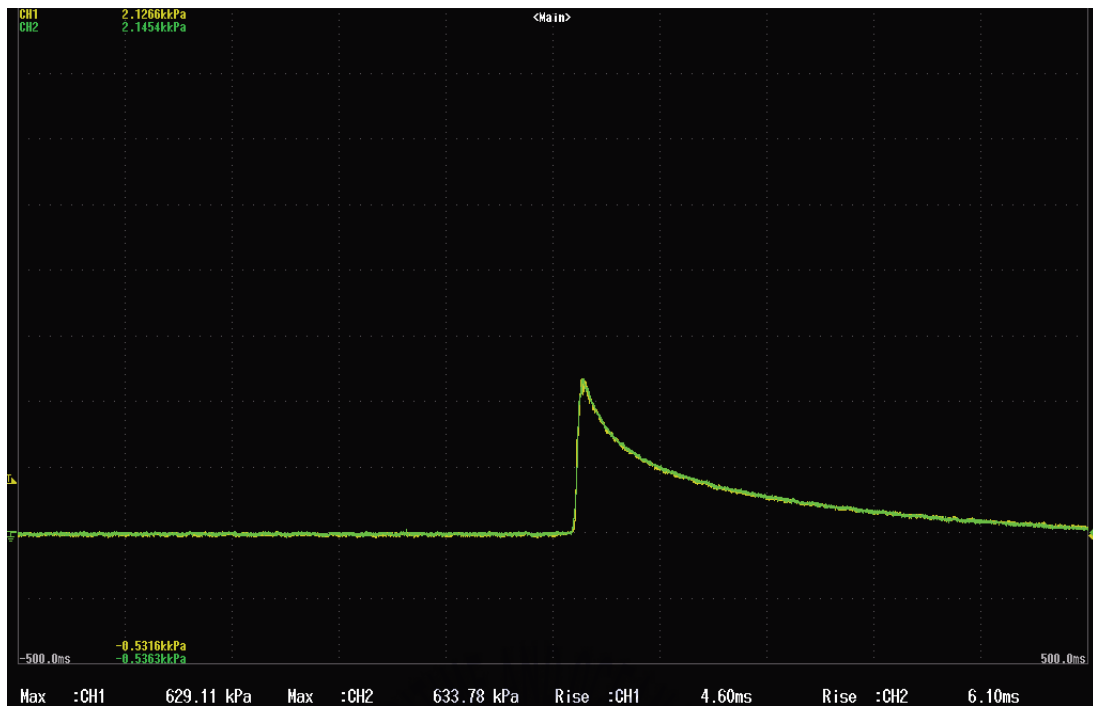


Fig 5.21 Test result for stop condition

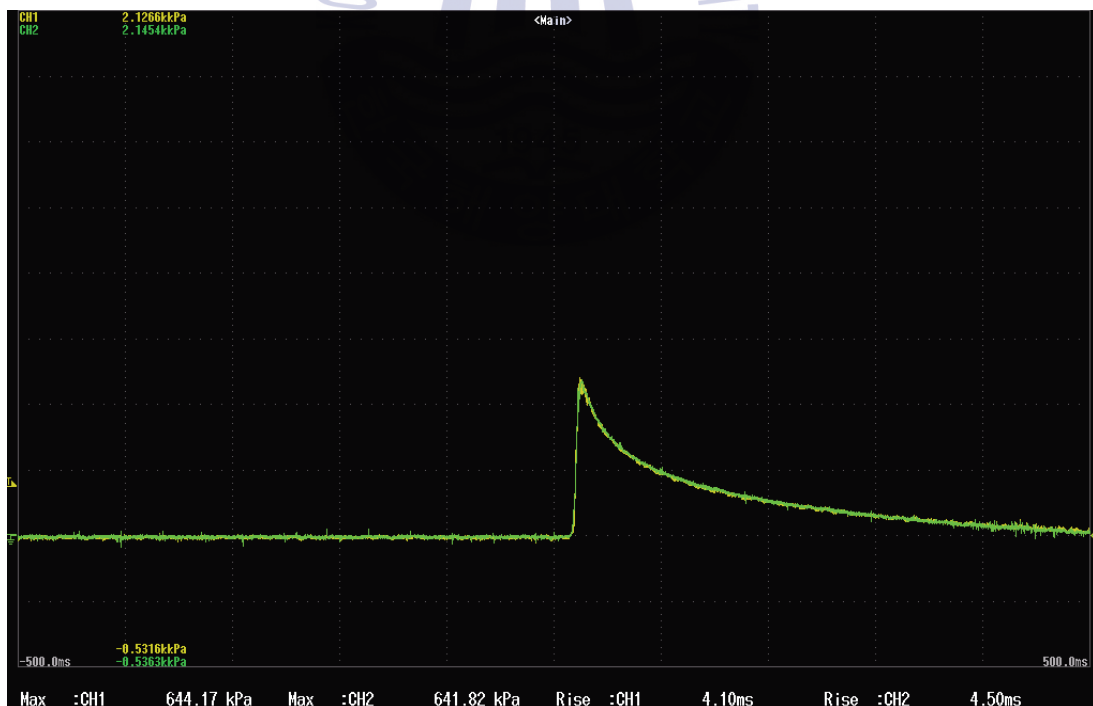


Fig 5.22 Test result for 500 rpm

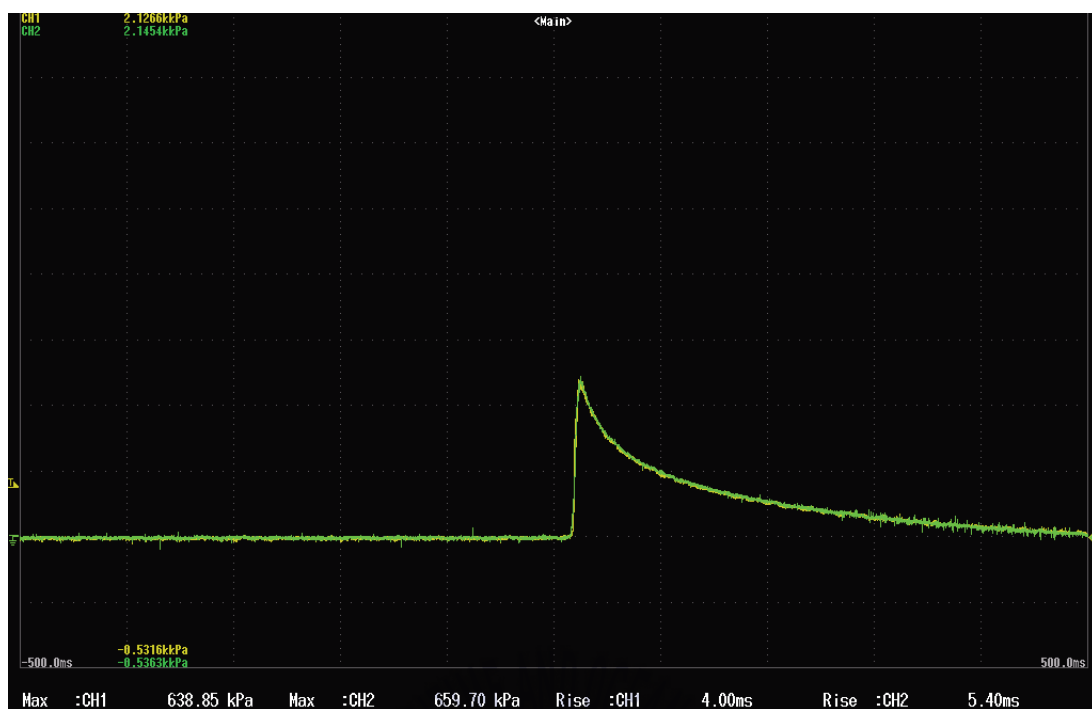


Fig 5.23 Test result for 1500 rpm

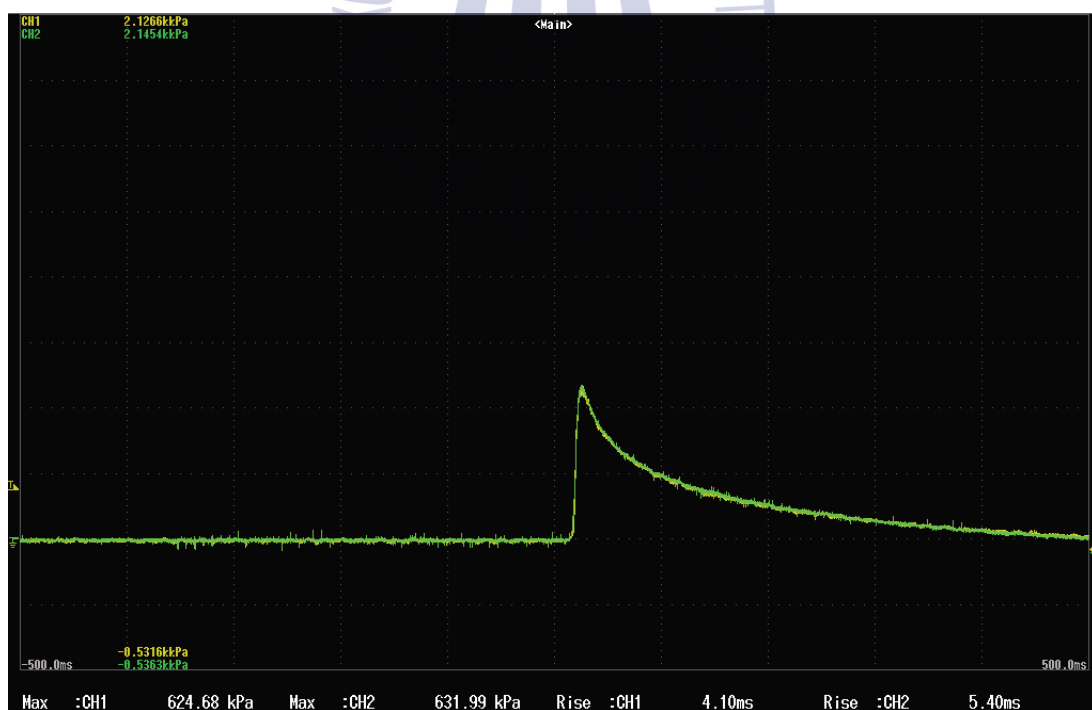


Fig 5.24 Test result for 2500 rpm

전동기의 회전수 속도별 폭발압력 특성을 분석하고자 Fig 5.25와 Fig 5.26과 같이 회전수 속도별 비교 그래프를 작성하였다. Fig 5.25는 전동기의 회전수 속도에 따른 최대 폭발압력에 대한 결과 그래프를 나타내고 있으며 Fig 5.26은 전동기의 회전수 속도에 따른 폭발압력 상승시간에 대한 결과 그래프를 나타내고 있다.

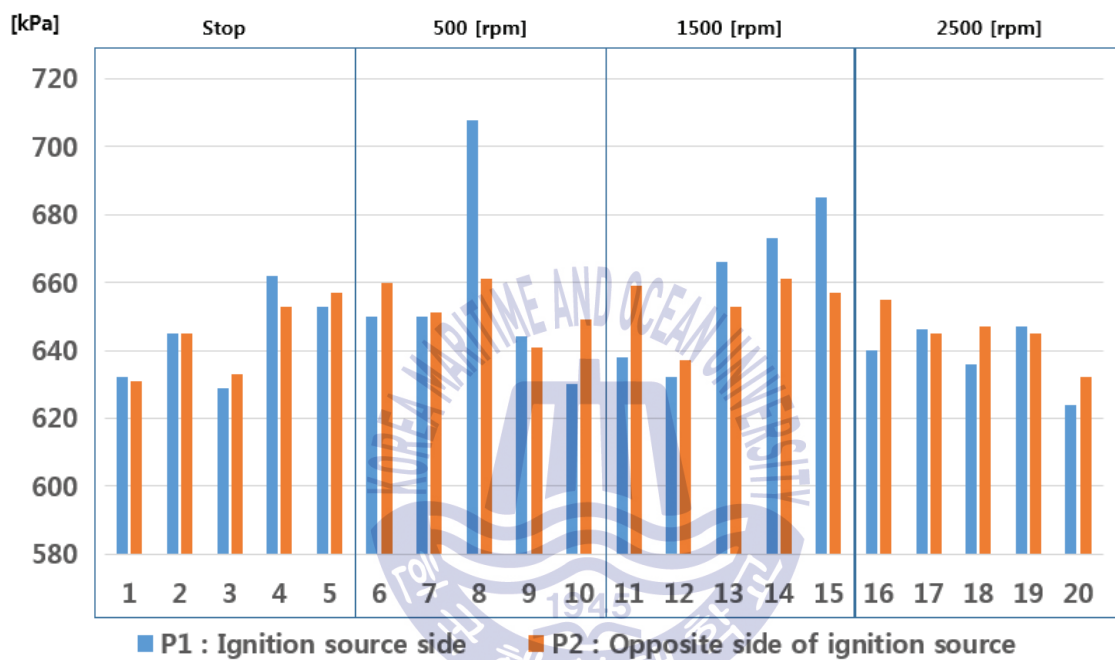


Fig 5.25 Graph for explosion pressure according to the number of revolutions

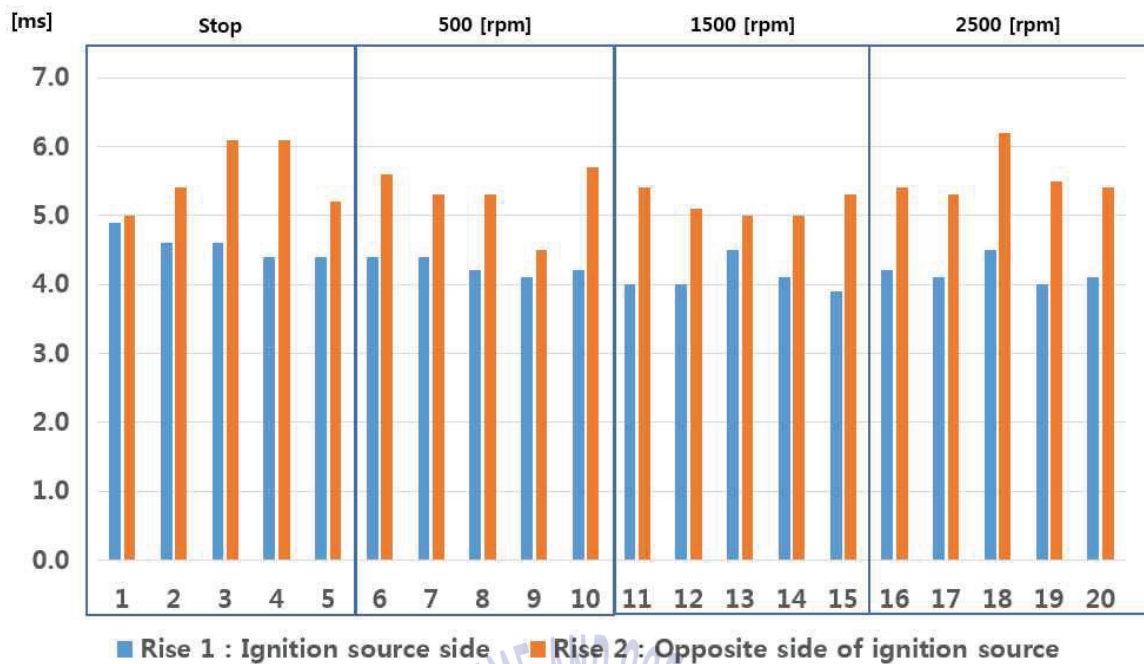


Fig 5.26 Graph for pressure rising time according to the number of revolutions

최대 폭발 압력에 대한 실험 결과를 분석하면 정지 상태에서는 폭발 반대 측에서 약간의 폭발 지연이 일어나면서 압력 중첩 현상이 발생하였지만, 폭발 측과 대비하여 큰 압력 상승은 관찰되지 않았다. 전동기의 회전자를 500[rpm], 1500[rpm], 2500[rpm]으로 순차적으로 증가시키면서 실험한 결과에서 폭발 반대 측의 폭발 지연이 발생하는 것을 확인하였다. 또한, 전동기가 회전한 조건에서는 폭발 측에 대비하여 폭발 반대 측에서 약간의 폭발 압력이 상승하면서 압력 중첩 현상이 간간히 나타났으나 모든 경우에서 나타나는 현상은 아닌 것을 확인하였다. 하지만 전동기가 정지하였을 때와 비교하면 전동기의 회전수가 폭발 반대 측의 압력을 상승시킬 수 있는 가능성을 확인하였다.

제 6 장 결 론

본 논문에서는 공학적인 계산으로 예측하기 힘든 내압 방폭형 전동기의 폭발 특성을 분석하고자 3가지 실험적인 조건을 선정하여 국제 규격 IEC 60079-1에 따른 기준압 시험을 시행하였다. 실험 조건으로는 가스의 종류, 전동기 공극의 크기, 그리고 전동기의 회전수를 선정하였으며 각 조건에 따른 최대 폭발압력과 폭발압력 상승시간을 측정하여 폭발 특성을 비교분석 하였다.

본 논문의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 전동기가 설치되는 위험 구역에서 사용되어지는 가연성 가스의 종류에 따른 폭발 압력 특성을 분석하고자, 동일한 전동기 형상의 실험 모델에서 가스의 종류를 변경하면서 기준압 시험을 진행하였다. 최대 폭발 압력은 에틸렌, 수소, 아세틸렌 순으로 높게 나타났으며 측정값은 662[kPa], 750[kPa], 835[kPa]을 보였다. 모든 가스의 시험에서 폭발 반대 측의 폭발 지연이 발생하면서 압력 중첩 현상을 보였으나 반대 측의 급격한 압력 상승 현상은 발생하지 않음을 확인하였다.
- 2) 전동기의 공극은 내부에 좁은 공간을 형성하면서 폭발 압력을 급격하게 상승시킬 수 있는 요소이다. 폭발압력을 급격하게 상승시킬 수 있는 공극의 크기를 변경하면서 기준압 시험을 시행하였으며 실험 결과를 토대로 폭발 특성을 분석하였다. 3가지의 조건인 1[mm], 2[mm], 3[mm] 공극 크기 중 1[mm] 공극 크기의 실험 모델에서 가장 높은 최대 폭발 압력 737[kPa]을 나타내었으며 이는 2[mm]와 3[mm]의 공극 크기를 가지는 실험 모델에서의 최대 폭발 압력인 662[kPa]과 702[kPa]의 결과에 비해 상승한 결과값이다. 이와 같은 결과에서 확인할 수 있듯이 일반 전동기에서는 공극의 크기를 효율과의 연관성만을 고려하지만 방폭형 전동기에서는 공극의 크기를 효율과 더불어 폭발 압력과 압력 상승시간을 고려하여 케이싱의 강

도 설계에 함께 반영하도록 해야 한다.

- 3) 전동기의 회전수가 폭발 특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 0[rpm], 500[rpm], 1500[rpm], 2500[rpm]의 조건에 대한 기준압 시험을 진행하였으며 전동기의 회전수와는 관계없이 모든 조건에서 폭발 반대 측에서 폭발이 지연되는 현상이 관측되었다. 하지만 정지 상태에서는 폭발 지연에 의한 반대측 폭발 압력 상승은 관측되지 않았으나 전동기가 회전하면서 반대 측의 폭발 압력이 약간 상승하는 것을 확인하였다. 실험 결과에 의해 회전 시에 전동기의 회전수가 폭발 반대 측의 최대 폭발 압력을 상승시킬 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.



참고문헌

- [1] IEC 60079-0, Edition 7.0, 2017, Explosive atmospheres – Part 0: Equipment – General requirements
- [2] IEC 60079-1, Edition 7.0, 2014, Explosive atmospheres – Part 1: Equipment protection by flameproof enclosures “d”
- [3] IEC 60079-20-1, Edition 1.0, 2010, Explosive atmospheres – Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification – Test methods and data
- [4] WIKIPEDIA, 1992 Guadalajara explosions [Online] (Updated 22 September 2017) Available at <https://en.wikipedia.org> [Accessed 23 November 2018]
- [5] WIKIPEDIA, 1995 Daegu gas explosions [Online] (Updated 27 January 2018) Available at <https://en.wikipedia.org> [Accessed 23 November 2018]
- [6] WIKIPEDIA, West Fertilizer Company explosion [Online] (Updated 14 November 2018) Available at <https://en.wikipedia.org> [Accessed 23 November 2018]
- [7] WIKIPEDIA, 2014 Kaohsiung gas explosions [Online] (Updated 16 September 2018) Available at <https://en.wikipedia.org> [Accessed 23 November 2018]
- [8] WIKIPEDIA, 2015 Tianjin explosions [Online] (Updated 23 November 2017) Available at <https://en.wikipedia.org> [Accessed 23 November 2018]
- [9] Dr.-ing Christian Lehrmann, 2013, Latest news on explosion protection
- [10] 윤석규, 김재희, 김윤제, 2018년, 방폭성능 향상을 위한 액추에이터-모터 어셈블리의 최적설계, 한국유체기계학회 논문집 21(4), pp.17-23.
- [11] 오규형, 김홍, 유주현, 김태진, 1997년, 가스 혼합물의 폭발압력과 연소열의 상관관계 연구, 한국가스학회지 1(1), pp.49-55.
- [12] 이내우, 김정훈, 이진우, 이수길, 2009. 방폭공학. 신광출판사
- [13] Jim Munro, 2017, Flame Transmission at Extremely Low Temperatures When Pressure Piling Is Present, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY

APPLICATIONS, VOL. 53, NO. 2, MARCH/APRIL 2017, pp.1685-1693.

[14] 최범식, 2000. IEC 60079-1 내압방폭 시험기준에 의한 가스폭발특성에 관한 연구. 석사학위논문. 충남 아산:호서대학교.

[15] Heinrich, H.-J, 1988, Ablauf von Gas-und Staubexplosionen Gemeinsamkeiten und Unterschiede, VDI Berichte nr. 701, Sichere Handhabung brennbare Staube, Band I, VDI Verlag, W. Germany

[16] NUR FATIN NAJWA BT KAMARUDDIN, 2014. STUDY ON THE EFFECT OF IGNITION LOCATION ON PRESSURE PILING. Bachelor of Chemical Engineering, UNIVERSITY MALAYSIA PAHANG

[17] MIHAI MAGYARI, SORIN BURIAN, MARTIN FIREDMANN, 2013. Design concepts for flameproof enclosures of electric motors for hazardous areas with explosive mixtures of gases, and vapours with air. Recent Advances in Electrical Engineering. pp.124-129.

[18] IECEx Operational document No Ex/OD020, 2005. Guidance for the Sampling of Group I Ex d Motors for Testing as Representative of a Range for Certification Purposes

[19] IECEx/ExTAG Decision Sheet, 2013/003. Recommendation to improve the effectiveness of the determination of explosion pressure

[20] James Munro, 2017, Impact of extremely cold temperatures on the safety of flameproof motors, Doctoral thesis, The University of Sydney