

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구





한우섭·임진호·최이락·김형욱

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

연구보고서

요약문

- 연구기간 2022년 2월 ~ 2022년 11월
- 핵심단어 가스폭발, 불균일성, 폭발압력, 화염전파속도, 폭발지수
- 연구과제명 폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

1. 연구배경

폭발위험장소에서의 연료용 가스 누출은 기류 등의 공정조건 영향에 따른 비균질 확산으로 불균일 혼합기를 형성할 수 있으며, 이에 관련한 화재폭발사고가 매년 반복하여 발생하고 있다. 그러나 기존의 가스폭발특성 문헌값은 균일 혼합기 조건에서 측정된 자료로서 문헌값을 활용하여 화재폭발 위험성을 평가하는 경우에는 실제 가스누출에 따른 폭발사고와 다른 피해예측 결과가 얻어질 수 있다. 또한 폭발 시의 폭발압력 특성이 가스농도 분포에 영향을 받는다는 것은 기존 연구에서 제시되고 있지만 이에 대한 연구는 매우 적으며 관련 정보도 제한적인 상황이다. 그러므로 보다 정확한 폭발위험성 예측과 사고발생 저감대책을 강구하기 위해서는 혼합기 농도의 불균일성에 따른 폭 발발생 가능성 및 크기를 추정할 수 있어야 하며 이를 위해 다양한 불균일 혼합기의 폭발특성 정보가 필요하다. 본 연구에서는 사업장에서 가장 많이 사용하고 있으며 폭발위험장소에서 반복하여 발생하고 있는 연료용가스의 누출에 따른 농도 불균일성의 폭발특성을 조사하였다. 이를 위해 실제 설비의 누출상황과 유사한 농도변화를 갖는 불균일 가스혼합기의 폭발과압, 화염 전파속도 등의 폭발특성을 조사하고 균일혼합 조건과의 비교를 통해 폭발위험성 차이를 규명하여 폭발사고 피해예측에 활용 가능한 가스폭발특성 자료 제공 및 피해저감 방안 제시를 목적으로 수행하였다.

i 🛑

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

2. 주요 연구내용

○ 연료용 가스의 화재폭발사고사례 및 위험성 실태조사

- 최근 5년간(2017~2021) 국내 연료용 가스의 중대재해사례 조사 결과, 사고원인물질은 LPG(프로판), 수소, LNG(메탄) 순으로 많이 발생하였다.
- 가스폭발사고의 점화원 비율은 용접작업 불티가 가장 많았으며, 다음으로 충격·마찰, 열원(가스 점화기, 불꽃, 라이터 등), 정전기 방전, 고온표면의 순으로 분석되었다.
- 국내 가스별 구분에 따른 화재폭발사고 원인물질에 대한 조사 결과, LPG, LNG, 부탄연소기, 고압가스의 순으로 발생빈도가 높았다.
- 연료가스 구분에 따른 인명피해 발생 비율을 분석한 결과에서는 LPG, LNG, 고압가스의 순으로 높게 나타났으며, 가스 사고의 형태별 분석에서는 폭발이 가장 많았으며 화재, 누출 순으로 많이 발생하고 있다.
- 미국의 파이프라인에서 발생한 연료용(LNG) 가스의 화재폭발사고는 액체이송, 가스이송 및 집결라인, 가스분배의 순으로 발생빈도가 높았으며, 사망 및 부상자는 가스분배, 가스이송 및 집결라인, 액체이송의 순으로 발생율이 높았다.
- 국내외 연료용 가스의 사고실태 분석을 통하여 대부분의 사고는 LPG 및 LNG가 실내 또는 장치 내부 등의 밀폐 공간에서 발생하는 경우로서, 이러한 조건에서의 누출은 불균일성 가스 형성이 용이할 것으로 추정된다.

○ 불균일 가스혼합기의 화재폭발 위험성 평가

• 가스 불균일성의 정량화에 대해 폭발용기 내의 시간에 따른 농도 차이 변화를 회귀분석 모델로 검토하였으며, 이에 기반한 혼합기의 불균일성(Non-uniform ; C_{NU})을 평균 가스농도에서의 혼합 후에 농도차이의 초기값(C_i)에 대한 지연시간에서의 농도 측정값(C_{dt}) 차이의 비율[C_{NU} = 1 - (C_i-C_{dt}) / C_i]로 제안하였다.

- CH₄ 및 C₃H₈의 화염전파에서 불균일성이 증가할수록 화염면의 면적이 증대되는 것이 관찰되었는데 난류화염(Turbulent flame)에서 존재하는 주름 형태의 화염구조(Wrinkled flame)와 유사하였으며, 이는 화염가속에 영향을 주어 폭발위험성을 증가시키는 원인으로 판단된다.
- CH₄ 및 C₃H₈의 화염전파속도는 농도증가에 따라 화학양론농도(당량비 1) 보다 높은 농도(CH₄은 10 vol%, C₃H₈은 5 vol%)에서 최대가 되며, 불균일성의 증가가 화염전파속도를 높이는 요인이 되는 것을 확인할 수 있었다.
- CH₄ 및 C₃H₈의 폭발에 있어서 폭발 발생 재현성(착화 확률)은 불균일성이 증가할수록 감소하였으며 이러한 결과를 통하여 불균일성이 혼합기의 착화성 (폭발 발생 위험성)에 영향을 주는 것으로 나타났다. 이러한 원인으로는 불균일성이 가스혼합기 착화 시의 농도 분포의 불규칙성을 증가시켜 화염의 전파 경로에 영향을 주기 때문인 것으로 추정된다.
- CH4 및 C₃H₈의 폭발특성에 있어서 최대압력 도달시간(Time to peak pressure)은 불균일성이 증가할수록 감소하였으며, 폭발압력은 불균일성이 증가할수록 증가하였다. 또한 C₃H₈에서의 불균일성에 의한 최대 폭발압력은 CH4보다 높았지만 최대압력 도달시간은 C₃H₈이 CH4보다 작게 나타났다.
- CH₄ 및 C₃H₈의 폭발에서 폭발압력상승속도는 불균일성이 증가할수록 폭발압력상승속도가 높아지는 경향을 보였다. 압력상승속도는 화염면적과 연소속도에 곱에 의해 비례하기 때문에 압력은 직선적으로 증가하는데, 불균일성이 증가하면 화염면적이 늘어나며 연소속도의 증대로 이어지므로 폭발압력상승속도를 증가시키는 것으로 판단된다.
- CH₄ 및 C₃H₈ 혼합기에 있어서 농도 불균일성에 따른 CH₄ 및 C₃H₈의 K_G(폭발강도)의 범위는 각각 1.30~1.58 [MPa·m/s] 및 2.07~2.41

[MPa·m/s]가 얻어졌으며, 또한 불균일성이 증가하는 경우에는 대부분의 농도 변화에 있어서 증가하였다.

- · 균일성(C_{NU}=0.01)에서 불균일성(C_{NU}= 0.98) 혼합기로 변할 때의 K_G의 증가율은 CH₄에서는 17.7 %, C₃H₈에서는 14.1 %로 나타났다. 이러한 결과로부터 농도 불균일성은 폭발크기(강도)에 영향을 주어 폭발피해를 증가시키는 요인이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.
- 가스폭발사고의 피해예측에 사용하는 문헌값에 농도 불균일성 영향을 함께 고려하여 평가하는 "불균일성에 따른 가스폭발의 피해예측 방안"을 제안 하였다.

○ 폭발 시뮬레이션에 의한 위험성 평가

- 실험 조건과 동일 스케일의 폭발공간에 대해 폭발 시뮬레이션을 실시한 결과, CH4의 과압분포는 불균일성의 증가에 대해 미세한 증가를 나타냈지만 이러한 불균일성 조건에 따른 과압 차이는 화염가속 등의 영향요인이 존재하는 실험결과보다는 매우 작았다.
- 실험과 유사한 조건에서 CH4의 폭발피해확률에 대한 시뮬레이션에서는 농도 균일성 및 불균일성 조건의 폭발피해 확률은 각각 50~70 % 및 50 ~90 %가 얻어졌는데, 이러한 결과로부터 농도 불균일성이 폭발피해 위 험성을 높이는 것으로 판단되며 이는 실험에서의 폭발강도(K_G)의 결과와 유사한 경향을 나타냈다.

3. 연구 활용방안

불균일 가스폭발 특성자료 제공을 통한 사업장의 장치 및 공정에서 발생
 할 수 있는 가스폭발 사고피해의 예측 및 저감에 활용

- 가스폭발 중대산업사고의 조사, 사업장의 위험성평가 및 기술지원 자료로 활용
- 관련 사업장의 농도 불균일 조건의 가스폭발 안전기술자료 보급에 활용

4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 산업안전연구실 부장 한우섭
 - **☎** 042) 869. 0331
 - E-mail : hanpaule@kosha.or.kr

목 차

I.	서 론	1
1.	연구 배경 및 목적	3
2.	선행 연구	4
3.	연구 내용 및 범위	5
Π.	연료용 가스의 화재폭발사고사례 및 위험성 조사 …	7
1.	연료용 가스의 화재폭발사고사례	9
	1) 국내	.9 18 23
2.	가스 누출에 따른 화염 발생 및 화재폭발	<u>2</u> 4
3.	가스폭발에서의 화염전파 특성	26

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

Ⅲ. 불균일 가스혼합기의 화재폭발 위험성 평가 …31

1.	가스혼합기 불균일성의 정량적 평가	33
	1) 불균일성의 물리적 의미	33
	2) 기존 연구에서의 불균일성 평가방법	35
	3) 가스 불균일성의 정량화 정의 및 방법	37
2.	실험장치 및 방법	42
	1) 연료용 가스의 시료 선정	42
	2) 폭발용기 및 화염관측	43
	3) 화염전파속도 및 폭발압력의 측정 방법	44
3.	화염전파속도	46
	1) 화염전파 거동	46
	2) 농도 불균일성에 의한 영향	49
4.	폭발압력	55
	1) 시간압력 특성	55
	2) 농도 불균일성에 의한 영향	57

목 차

5.	폭발압력상승속도	61
	1) 압력상승 경향	61 61
6.	폭발강도지수	63
	1) 밀폐공간에서의 가스폭발의 압력특성	63 65
7.	농도 불균일성을 고려한 폭발예방대책	67

Ⅳ. 폭발 시뮬레이션에 의한 위험성 평가 …………69

1.	폭발 시뮬레이션의 개요	71
	1) 폭발계산의 이론	71 74
2.	폭발 시뮬레이션의 시나리오 및 계산 조건	75
3.	시뮬레이션 결과 및 분석	78
	1) 균일 가스 혼합기	78

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

2) 불균일 가스 혼합기	79
4. 폭발피해평가의 활용 방안	
V. 결론 ······	85
1. 주요 결과	
1) 연료용 가스의 화재폭발사고사례 조사 및 위험성 분석 2) 불균일 가스 혼합기의 화재폭발 위험성 평가 3) 폭발시뮬레이션에 의한 실험결과 조사 및 타당성 검토	
2. 활용 방안	90
참고문헌	93
Abstract	97

표 목차

〈표	Ⅱ-1〉 최근 5년간 국내에서 발생한 중대재해 가스폭발 사고사례	9
〈표	Ⅱ-2〉 최근 5년간 국내 연료가스 폭발사고의 점화원	11
〈표	Ⅱ-3〉국내 가스별 구분에 따른 가스 화재폭발사고 현황	12
〈丑	Ⅱ-4〉연료가스 구분에 의한 사고발생 건수	13
〈丑	Ⅱ-5〉가스 구분에 의한 인명피해 발생 건수	14
〈표	Ⅱ-6〉국내 연료가스 사고의 형태별 분석 결과	15
〈丑	Ⅱ-7〉 국내 연료가스 사고의 유해위험성 분류에 따른 구분	16
〈丑	Ⅱ-8〉 국내 가스 사고의 발생원인 분석 결과	17
〈丑	Ⅱ-9〉 가스사고의 인적 및 설비적 요인의 분석 결과	17
〈丑	Ⅱ-10〉미국에서 발생한 액화천연가스(LNG) 등의 이송배관 화재폭발사고…	18
〈표	Ⅱ-11〉 최근 10년간(2011~2019) 중국의 LPG가스폭발 사고사례	21
〈丑	║-1〉미시적인 공간 불균일성의 요소	34
〈표 〈표	Ⅲ-1〉미시적인 공간 불균일성의 요소	34 36
〈丑 〈丑 〈丑	 Ⅲ-1〉미시적인 공간 불균일성의 요소 ······ Ⅲ-2〉기존 연구의 불균일성 가스 평가방법 ······ Ⅲ-3〉가스 농도장 조건에 따른 평가방법 ····· 	34 36 41
〈丑 〈丑 〈丑 〈丑 〈丑	 Ⅲ-1〉미시적인 공간 불균일성의 요소	34 36 41 41
<田 <田 <田 <田 <田 <田 <田	 Ⅲ-1〉미시적인 공간 불균일성의 요소 ···································	34 36 41 41 42
<田 <田 <田 <田 <田 <田 <田 <田 <田	 Ⅲ-1〉미시적인 공간 불균일성의 요소 ···································	34 36 41 41 42 76

그림목차

[그림	Ⅱ-1] 연료가스 폭발사고의 점화원 종류별 비율	·11
[그림	Ⅱ-2] 가스 구분에 의한 사고발생 비율	·13
[그림	Ⅱ-3] 연료가스 구분에 의한 인명피해 발생 비율	·15
[그림	Ⅱ-4] 연료가스 사고의 형태별 발생 경향	·16
[그림	Ⅱ-5] 미국 액체이송 이송배관의 화재폭발사고 추이	·19
[그림	Ⅱ-6] 미국 액체이송 이송배관의 화재폭발사고 원인	·19
[그림	Ⅱ-7] 미국 가스이송 및 집결라인 이송배관의 화재폭발사고 원인	·20
[그림	Ⅱ-8] 미국 가스분배 이송배관의 화재폭발사고 원인	·21
[그림	Ⅱ-9] 중국 베이징 소재의 식품회사의 LPG/DME 가스폭발사고 모습…	· 23
[그림	Ⅱ-10] 가연성가스 누출에 따른 가스화재와 가스폭발	·25
[그림	Ⅱ-11] 가스폭발에서의 화염전파속도	·26
[그림	Ⅲ-1] 공간적인 불균일성의 분류	·34
[그림	Ⅲ-2] 가스농도 분포 조사를 위한 시험장치 개요	·37
[그림	Ⅲ-3] 메탄가스 혼합 후의 시간에 따른 농도 차이의 변화	·38
[그림	Ⅲ-4] 지연시간에 따른 메탄가스 혼합기의 불균일성 추정	·39
[그림	Ⅲ-5] 가스 농도 차이를 고려한 불균일성의 정량화	·40
[그림	Ⅲ-6] 불균일성 가스폭발 실험장치의 개략도	·44
[그림	Ⅲ-7] 균일농도(C _{NU} =0.01)에서의 CH₄의 화염전파 모습	·46
[그림	Ⅲ-8] 불균일농도(C _{NU} =0.98)에서의 CH ₄ 의 화염전파 모습	·47
[그림	Ⅲ-9] 불균일성 변화에 따른 C3H8의 화염전파 모습	·48
[그림	Ⅲ-10] CH4(8 vol%) 폭발에서의 화염면의 이동 특성	· 50

그림목차

[그림	∭−11]	CH4 폭발(8 vol%)에서 화염전파속도의 시계열 변화	· 52
[그림	∭−12]	농도 변화에 따른 CH4의 불균일성에 의한 화염전파속도의 변화…	· 52
[그림	∭−13]	C ₃ H ₈ 폭발(5 vol%)에서 화염면의 이동 특성	· 53
[그림	∭−14]	C ₃ H ₈ 폭발(5 vol%)에서 화염전파속도의 시계열 변화	· 54
[그림	∭−15]	불균일성 따른 C3H8 폭발 시의 화염전파속도	· 54
[그림	∭−16]	CH ₄ (9 vol%) 폭발의 불균일성에 따른 시간압력 파형 예시…	· 55
[그림	∭−17]	C ₃ H ₈ (5 vol%) 폭발의 불균일성에 따른 시간압력 파형 예시	· 56
[그림	∭−18]	Noise필터(1.5Hz cut-off)에 의한 C ₃ H ₈ (4 vol%)의 폭발압력 파형·	· 57
[그림	∭−19]	농도 변화에 따른 CH4 폭발압력에서의 불균일성의 영향	· 58
[그림	∭−20]	농도 변화에 따른 CH4 폭발 시의 최대압력 도달시간	· 59
[그림	∭-21]	농도 변화에 따른 C_3H_8 폭발압력에서의 불균일성의 영향	·60
[그림	∭−22]	농도 변화에 따른 C_3H_8 폭발 시의 최대압력 도달 시간	·60
[그림	∭−23]	불균일성에 따른 CH4의 폭발압력상승속도의 변화	·62
[그림	∭−24]	불균일성에 따른 C ₃ H ₈ 의 폭발압력상승속도의 변화	·63
[그림	∭−25]	불균일성에 따른 CH4의 폭발강도지수	·66
[그림	∭−26]	불균일성에 따른 C ₃ H ₈ 의 폭발강도지수	·66
[그림	∭−27]	불균일성에 따른 가스폭발의 피해예측 방안	· 68
[그림	V−1] (이상적인 충격파 형태	·72
[그림	IV-2] 3	3D 폭발시뮬레이션을 위한 폭발공간 설정	·77
[그림	IV-3] .	동도 불균일성에 따른 시뮬레이션 절차	·77
[그림	IV−4] (CH4(Φ=1, Uniform)의 폭발과압 분포의 계산	· 79

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

[그림	IV-5]	CH₄(<i>Φ</i> =1,	Non-uniform	Case-I)의	폭발과압	분포의	계산 …	80
[그림	IV-6]	CH₄(<i>Φ</i> =1,	Non-uniform	Case-II)의	폭발과압	분포의	계산 ·	81
[그림	IV−7]	CH₄(<i>Φ</i> =1,	Uniform)에서의	의 폭발피해	확률			83
[그림	IV-8]	$CH_4(\Phi=1,$	Non-uniform	Case-II)에	서의 폭발	피해 확	률	84



I. 서 론

1. 연구 배경 및 목적

폭발위험장소에서 연료용 가스가 누출되면 사업장 내에서 발생하는 기류 등의 공정조건이나 비균질 가스 확산으로 인하여 불균일 가스 혼합기를 형성할 수 있으며 점화원이 존재하면 화재폭발사고 위험이 있다. 실제로 이와 관련하여 화재폭발사고가 국내에서 매년 반복하여 일어나고 있다. 공단(KOSHA 중대재 해사고사례) 화재폭발재해 통계에 따르면, 최근 10년간(2010~2019) 사업장의 연료가스(LPG, NG)에 의한 화재폭발사고의 발생 건수는 223건이며, 사망 22명 및 부상 201명의 인명피해로 이어졌다.

가스 누출의 폭발사고에 의한 피해를 예측하고 예방하기 위해서는 가스폭발 발생 시의 폭발압력특성에 대한 지식이 필요하다. 이러한 이유로 인하여 가스 폭발이 일어날 수 있는 다양한 폭발공간의 상황에 대하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 지금까지의 관련 연구결과에 따르면 가스폭발이 일어나는 공간에서 가연성 가스의 농도가 불균일한 경우에는 가스폭발의 압력특성이 농도분포에 영향을 받는다는 실험적 결과가 제시되고 있다. 또한 가스의 농도 분포가 층상 구조인 경우에서는 압력거동이 농도분포에 크게 의존하고 있는 것으로 알려지고 있다. 이러한 일부 연구결과를 보더라도 가스 누출에 의한 농도 분포에 의해 화재폭발 피해 크기가 달라질 수 있음을 쉽게 알 수 있다. 그러나 기존의 가스 폭발특성 문헌값은 균일 혼합기 조건에서 측정된 자료로서 문헌값을 활용하여 화재폭발 위험성을 평가하는 경우에는 실제 가스 누출에 따른 폭발사고와는 다른 피해예측 결과가 얻어질 수 있다. 따라서 보다 정확한 폭발위험성 예측과 사고발생 저감을 강구하기 위해서는 혼합기 농도의 분균일성에 따른 폭발의 발생 가능성 및 크기를 추정할 수 있어야 하며 이를 위해서는 다양한 불균일성 혼합기의 폭발특성 정보가 필요하다. 본 연구에서는 사업장의 폭발위험장소에서 반복하여 발생하고 있는 주요 연료용 가스의 누출에 따른 화재폭발사고와 관련하여 실제 누출 상황과 유사한 농도변화를 갖는 불균일성 가스혼합기의 폭발과압 및 화염전파속도 등의 폭발특성을 조사 하였다. 또한 균일혼합 조건의 문헌 자료의 폭발특성 비교를 통해 폭발위험성 차이를 규명하고 폭발사고 피해예측에 활용 가능한 가스폭발특성 자료 제공 및 활용 방안을 제시하고자 하였다.

2. 선행 연구

가스폭발이 발생하는 공간에서 가연성가스의 농도가 불균일한 경우에는 폭발 시의 과압 특성이 가스농도의 분포에 의존하는 것으로 알려지고 있지만 이에 대한 연구는 아직 충분하지 않은 상황이다. 국내외 관련 연구결과에 따르면 가 연성가스의 농도분포가 층상으로 형성되어 있는 경우에는 폭발 시의 압력 특성이 농도분포에 많은 영향을 받는다는 사실이 다수의 연구자들에 의해 실험적으로 확인되고 있다.

폭발용기 내에서 불균일 상태를 만들기 위하여 가스의 분출 시간 및 가스분출 후에 지연시간을 변화시키면서 폭발특성을 조사한 결과에서는 폭발용기 내로 가스 분출 후의 지연시간이 짧은 경우는 불균일 상태가 클 것으로 예상되며 이 때의 하한농도는 균일농도의 경우보다 낮을 수 있음을 제시하고 있다(BAE, J.I., et al., 1993). 또한 밀폐 공간에서 가스가 누출되는 경우에 가스의 혼합 정도는 누출구의 크기 및 누출속도에 영향을 받는데 누출구의 크기와 누출속도 증가에 따른 불균일성을 변화시키는 조건에서 수행하여 얻어진 실험값은 편차가 크기 때문에 일관성 있는 결과를 얻을 수는 없었지만 불균일 정도가 클수록 폭발압력에 영향을 주는 것으로 나타났다(KIM, S.S., et al., 2003). 가로, 세로, 높이가 각각 100cm, 60cm, 45cm의 폭발용기를 이용하여 불균일 농도 상태의 LPG-공기 혼합가스에 대하여 시료가스를 주입하는 노즐의 직경과 유속을 변화시키면서 용기 내에서의 불균일 혼합정도를 조절하여 폭발압력을 조사한

4

결과, 유속과 가스 주입 시간이 용기 내 가스 혼합에 중요한 요소임을 알 수 있었으며, 불균일 정도가 심화될수록 폭발압력과 압력상승속도가 감소하였다 (OH, K.H, 2003). 메탄 혼합기에 대한 화염 및 압력 발생에 대한 실험적 연구를 직경 2.5m, 길이 10m의 반밀폐 튜브에서 분출시간을 달리한 불균일성의 메탄-공기 폭발에 대해 수행한 결과 화염전파 특성에 영향이 주는 것이 확인되었다 (Hjertager, B.H., et al., 2003). 농도 기울기가 있는 가연성 혼합기의 폭발성을 조사하기 위하여 무거운 기체(프로판) 및 가벼운 기체(수소)의 2가지 유형의 기체 혼합물을 사용하여 분자 확산, 중력 및 난류에 의한 농도 불균일성을 만들어 폭발을 관찰하고 한계 지연시간을 조사한 결과에서는 초기 기체 조성 및 혼합기 부피에 영향을 받았다(Sochet, I., et al., 2000). 밀폐 원통형 폭발 용기(내경 10 cm, 높이 21.3 cm)에서 일정 농도 및 분출시간을 변화시키면서 폭발특성을 조사하였으며, 용기 내의 평균농도가 폭발범위에 들지 않더라도 착화가 일어나는 경우가 있는데 이는 농도가 불균일한 경우에는 국소적으로 폭발범위 내에 포함되는 혼합기가 존재하는 것으로 추정되었다(Harayama, M., et al., 1980).

이상과 같이 지금까지의 불균일성 가스혼합기에 대한 기존 연구는 주로 불균일 혼합기의 형성 조건 등의 정성적 변화에 따른 폭발특성 및 영향 요인의 연구가 대부분인 것을 알 수 있다.

3. 연구 내용 및 범위

국내외 불균일성 가스혼합기의 폭발특성 연구에서는 대부분 노즐 크기, 분출 시간, 착화 지연시간 등의 변수를 사용하여 가스혼합기의 불균일성을 형성시켜 폭발특성 조사가 이루어지고 있다. 이와 같은 방법에서는 가스 불균일성의 크기에 대하여 정성적인 평가가 이루어지고 있다는 문제점이 존재한다. 따라서 불균일성 가스혼합기의 폭발특성을 파악하기 위해서는, 혼합가스 농도의 변화와 같은 혼합기의 불균일성에 대한 기준이 필요하며 정량적인 불균일성에 기반한 폭발특성 제시가 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 이러한 사항을 고려하여 연구내용 및 방법을 다음과 같이 설정하였다.

1) 연구 내용

- (1) 폭발 위험장소에서의 가스누출 형태 조사 및 밀폐공간 불균일 혼합기의 시험방법 검토
- (2) 불균일 가스혼합기의 농도 기울기 변화에 따른 폭발압력, 화염전파 특성의 실험적 조사
- (3) 3차원 폭발시뮬레이션(VeXDAM)에 의한 불균일 가스혼합 공간의 화염 전파특성 조사
- (4) 가스혼합기의 불균일성 크기에 따른 정량적 폭발위험특성 자료 및 피해 저감대책 제시

2) 연구 방법

- (1) 국내외 연료가스(프로판, 메탄)의 가스 누출, 확산에 따른 화재폭발사고사례 조사를 통한 불균일 혼합기의 폭발현상 조사
- (2) 불균일 가스혼합기에서의 불균일성의 정량화 방법으로서 농도 기울기 크기(강도)의 측정방법 검토
- (3) 정량화된 불균일성 크기를 갖는 연료가스를 사용하여 가스농도 변화에 따른 폭발압력, 폭발범위 등의 화재폭발위험성 변화에 대한 실험적 조사
- (4) 농도 불균일성 크기에 따른 가스폭발 시의 화염전파속도 측정 및 화염 전파 거동 관찰을 통한 폭발 피해확대 조사
- (5) 3차원 폭발시뮬레이션(VeXDAM)을 활용한 불균일 가스 혼합의 화염전 파특성 비교 및 폭발위험성의 예측 가능성 검토
- (6) 혼합가스의 불균일성 크기에 따른 정량적 폭발위험특성 및 안전기술 자료 제시



Ⅱ. 연료용 가스의 화재폭발사고사례 및 위험성조사

1. 연료용 가스의 화재폭발사고사례

1) 국내

최근 5년 동안(2017~2021년)에 국내 사업장에서 발생한 가스폭발 중대재 해를 조사하였다(KOSHA, 2021). 중대재해의 발생건수와 사고에 따른 인명피 해, 점화원 등을 분석하였으며 그 결과를 〈표 Ⅱ-1〉에 나타냈다. 사고원인 기

〈표 Ⅱ-1〉 최근 5년간 국내에서 발생한 중대재해 가스폭발 사고사례

연도	2021년		2021년 2020년		201	2019년		8년	2017년	
가스명	건수	인명 피해	건수	인명 피해	건수	인명 피해	건수	인명 피해	건수	인명 피해
LPG	8	29	6	13	6	9	1	1	2	2
LNG 및 메탄	1	3	0	0	1	1	0	0	1	1
수소	3	14	1	1	4	9	0	0	1	2
납사분 해가스	0	0	2	27	0	0	1	1	0	0
부탄	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0
에틸렌	0	0	0	0	1	9	0	0	0	0
DME	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
합계	13	48	9	41	13	31	2	2	4	5

인물로서 가스명 중에서 납사분해가스는 에탄, 프로필렌, 부타디엔, 아세틸렌 등의 가스를 의미한다. 또한 DME는 디메틸에테르(Dimethyl Ether, DME)로서 액화석유가스(LPG)에 첨가하여 혼합연료로 사용하고 있다. 최근 5년간 발생한 화재폭발사고 중대재해 발생건수를 보면, LPG, 수소, LNG 및 메탄, 납사분해 가스의 순으로 많이 발생하고 있다. 사고발생 빈도가 가장 높은 액화석유가스 (LPG ; Liquefied Petroleum Gas)는 주요 구성 성분이 프로판(약 95 %), 부탄 (약 1 %), 기타(약 4 %)로서 프로판(Propane ; C₃H₈)이 주성분이며, 청정성, 안전성, 높은 발열량, 저장 및 운송의 용이성 등의 장점으로 인해 사업장과 일상생활에서 많이 사용되고 있다. 또한 사고발생 빈도가 3번째로 많은 액화 천연가스(LNG; Liquefied Natural Gas)는 구성 성분이 메탄(72~95%), 에탄 (3~13 %), 프로판(1~4 %) 및 질소(1~18 %)로서 주성분은 메탄(CH₄)이다. 개방 공간에서 메탄 또는 LNG가 공기중에 누출되어 메탄-공기 혼합물을 형성하는 경우에는 공기보다 가볍기 때문에 대기 상부로 이동하여 폭발 가능성은 낮아. 진다(Mishra, S., et al., 2021). 그러나 밀폐공간에서 LNG가 누출되거나 메탄-공기 혼합물이 형성되면 폭발가능성이 높아진다(Planas, E., et al., 2015). 최근 5년 동안에 중대재해 폭발사고의 원인물질로 판명된 가스 중에서 연료용 으로 사용되는 LPG, LNG, 수소, 에틸렌 등에 의한 가스폭발사고의 점화원을 '살펴보면 〈표 Ⅱ-2〉와 같다. 용접작업 시에 발생하는 불티에 의한 사고가 가장 많았으며 충격·마찰에 의한 불꽃, 열원(가스 점화기, 불꽃, 라이터 등), 정전기 방전, 고온표면, 전기 불꽃의 순으로 나타났다. 폭발사고 점화원의 종류에 따른 발생빈도 비율을 보면 [그림 Ⅱ-1]과 같다. 용접 불티, 충격마찰 불꽃, 열원의

절정원도 비절을 모인 [그림 II-1]과 끝머. 증접 걸머, 중적비절 걸文, 걸원과 점화원에 의한 연료용 폭발사고의 발생 비율은 66 %에 이르고 있다. 가스폭발 사고사례를 보면 가스 배관의 용접작업 중에 배관 내부의 가스누출로 인해 폭발하거나, LPG저장탱크의 검사를 위해 맨홀 개방 과정에서 전기불꽃에 의해 착화되어 폭발하였으며, 선체 내외부에서 산소절단 및 피스 취부작업을 실시하는 과정에서 산소 절단기에서 누출된 LPG가 폭발하는 등의 사고가 발생하고 있다.

점화원 종류	건수	비율 (%)
용접작업 불티	16	39
충격, 마찰 불꽃	6	15
열원	5	12
정전기 방전	4	10
고온표면	3	7
전기 불꽃	2	5
미상	5	12

〈표 Ⅱ-2〉 최근 5년간 국내 연료가스 폭발사고의 점화원



[그림 Ⅱ-1] 연료가스 폭발사고의 점화원 종류별 비율

최근 5년 동안에 발생한 가스별 구분(LPG, LNG 및 고압가스)에 따른 가스 사고사례(KGS, 2021)를 조사하였으며, 그 결과를 〈표 II-3〉에 제시하였다. 사고발생 건수를 가스명 기준에서 보면 LPG(255건)가 가장 많았으며, LNG (132건), 부탄연소기(108건), 고압가스(63건)의 순으로 나타났다. 부탄연소기의 사고사례에서는 사용과정 중 만이 아닌 보관 및 폐기 과정에서도 사고가 많이 발생하고 있다. 연료가스 구분에 의한 사고발생 건수를 〈표 II-4〉에 정리하였다. 최근 5년 동안에 있어서 가스사고의 발생 건수를 보면 [그림 II-2]와 같이 연도별로 다소 증감은 있지만 감소 경향은 보이지 않고 있다.

		2021년		2020년		2019년		2018년		2017년	
구분	가스명	건수	인명 피해								
LPG	LPG	35	36	43	51	59	53	56	61	62	62
	부탄연소기	17	15	22	17	18	19	32	28	19	28
LNG	LNG	17	10	23	11	32	13	31	17	29	21
	수소	1	0	3	0	1	8	5	0	3	0
	암모니아	2	1	0	0	2	4	10	1	3	1
	산소	3	2	3	4	3	1	1	2	1	1
	아세틸렌	1	1	1	2	0	0	0	0	2	0
고	이너젠	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
압	탄산가스	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0
가	염소	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
스	프로필렌	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
	부타디엔	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	프레온	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	혼합가스	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1
	기타	0	0	2	11	2	4	1	1	0	0
	합계	78	65	98	96	118	102	143	112	121	114

〈표 Ⅱ-3〉 국내 가스별 구분에 따른 가스 화재폭발사고 현황

연도	LPG	LNG	High-pressure gas
2017년	81	29	11
2018년	88	31	24
2019년	77	32	9
2020년	65	23	10
2021년	52	17	9

〈표 Ⅱ-4〉 연료가스 구분에 의한 사고발생 건수



연료가스 구분에 따른 인명피해(Casualties)의 발생 건수를 〈표 Ⅱ-5〉에 제시 하였다. [그림 Ⅱ-3]과 같이 사고 발생 건수가 가장 많은 LPG에서 인명피해가 가장 많이 일어나고 있다. LNG 및 고압가스(High-pressure gas)의 경우에는 [그림 Ⅱ-2]에서와 같이 LNG가 고압가스보다 사고 발생 건수가 지속적으로 높았지만, [그림 Ⅱ-3]과 같이 2019~2020년 동안에는 인명피해 발생 비율이 고압가스에 의한 사고에서 높게 나타나고 있다. 이러한 원인으로는 〈표 II-3〉에서 알 수 있듯이 수소, 암모니아, 산소, 아세틸렌에 의한 사상자의 발생이 증가하였기 때문으로 나타나고 있다. 국내 가스 사고의 형태별 분석 결과를 〈표 Ⅱ-6〉에 제시하였다. [그릮][-4]에서와 같이 가스 관련의 사고 형태는 폭발이 가장 많았으며 화재, 누출 순으로 나타났다. 사고형태 중에서 파열은 화재폭발 등으로 이어지지 않은 장치 및 설비 등의 기계적 사고이지만 주변 조건에 따라 화재폭발로 이어질 위험성을 가지고 있다. 이러한 관점에서 가스 사고의 유해위험성 분류에 따른 구분으로 본다면. 〈표 Ⅱ-7〉과 같이 가스 사고의 위험성은 건강유해성(중독 및 산소결핍)보다는 물리적위험성(파열, 누출 및 화재폭발)이 대부분을 차지하고 있다. 국내 가스 사고의 발생원인을 살펴보면 ⟨표 Ⅱ-8⟩에서와 같이 "취급 부주의"가 가장 많았으며, 특히 사용자에 의한 취급 부주의가 공급자의 경우보다 상대적으로 높았다. 다음으로는 시설 미비, 제품 노후화의 순으로 가스 사고가

연도	LPG	LNG	고압가스
2017년	90	21	3
2018년	89	17	6
2019년	72	13	17
2020년	68	11	17
2021년	51	10	4

〈표 Ⅱ-5〉 가스 구분에 의한 인명피해 발생 건수

Ⅱ. 연료용 가스의 화재폭발사고사례 및 위험성 조사



[그림 Ⅱ-3] 연료가스 구분에 의한 인명피해 발생 비율

〈표 Ⅱ-6〉 국내 연료가스 사고의 형태별 분석 결과

사고 형태	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년
누출	29	35	29	18	16
폭발	64	39	34	30	17
화재	33	33	30	26	22
중독	9	10	8	6	4
산소결핍	1	0	0	2	1
파열	15	26	17	16	18
합계	121	143	118	98	78



[그림 Ⅱ-4] 연료가스 사고의 형태별 발생 경향

〈표 Ⅱ-7〉 국내 연료가스 사고의 유해위험성 분류에 따른 구분

연도	물리적위험성 (파열, 누출 및 화재폭발)	건강유해성 (중독 및 산소결핍)
2017년	111	10
2018년	133	10
2019년	110	8
2020년	90	8
2021년	73	5
합계	517	41

많이 발생하였다. 사고 원인을 인적요인과 설비적 요인으로 구분할 수 있다. 인적요인으로는 취급부주의, 타 공사(배관 손상), 고의사고가 이에 해당되며, 설비적 요인으로는 시설미비와 제품노후(불량)가 있다. 최근 5년 동안의 사고 원인으로서의 인적 요인과 설비적 요인의 비율을 보면 〈표 II-9〉와 같이 다소 변동은 있지만 비슷한 값을 나타내고 있다.

발생 원인	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년
사용자 취급 부주의	31	23	25	23	25
공급자 취급 부주의	3	6	1	2	3
타 공사(배관 손상)	7	6	14	11	10
시설미비	29	34	29	27	14
제품노후화	18	37	15	16	18
고의사고	9	12	7	0	0
기타	24	25	27	19	8
합계	121	143	118	98	78

〈표 Ⅱ-8〉 국내 가스 사고의 발생원인 분석 결과

※ 기타 : 교통사고, 과열화재, 지반침하 등

〈표 Ⅱ-9〉 가스사고의 인적 및 설비적 요인의 분석 결과

구분	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년
인적 요인 (%)	52	40	52	46	54
설비적 요인 (%)	48	60	48	54	46

2) 국외

미국의 석유, 가스 및 석유화학 관련의 위험정보를 제공하는 FracTracker Alliance(FracTracker Alliance, 2020)에 따르면 미국의 파이프라인 (Pipeline)에서 발생한 액화천연가스(LNG) 등의 화재폭발사고는 〈표 II-10〉과 같이 2010년 1월부터 2019년 12월까지 6,298건으로 조사되고 있으며, 최근 10년간 미국의 파이프라인(Pipeline)에서의 사고건수는 하루에 약 1.7건의 비율로 발생하고 있다. 화재폭발사고의 발생빈도를 파이프라인의 형태별 구분으로 보면 사고건수는 액체이송(Liquids lines), 가스이송 및 집결라인(Gas transmission and gathering lines), 가스분배(Gas distribution)의 순으로 많이 발생하고 있다. 반면에 사망 및 부상자는 가스분배, 가스이송 및 집결라인, 액체이송의 순으로 많이 발생하고 있다. 가스 분배 과정에서의 사고건수는 상대적으로 가장 적지만 인명피해 위험성은 가장 높았다.

구분	사고건수	화재	폭발	사망	부상	피난민	손실액(\$)
액체이송	3,978	130	15	10	26	2,482	2,812,391,218
가스이송 및 집결라인	1,226	133	57	25	108	12,984	1,315,162,976
가스분배	1,094	659	257	105	522	20,526	1,229,189,997
총계	6,298	922	329	140	656	35,992	5,356,744,191

〈표 Ⅱ-10〉 미국에서 발생한 액화천연가스(LNG) 등의 이송배관 화재폭발사고

미국의 액체이송 이송배관(Pipeline)에서의 화재폭발사고 발생 추이를 보면 (그림 II-5), 2010년부터 급격히 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 액화천연가스의 사업장 및 일상 생활에서의 사용량 증가로 인해 이송배관의 설치가 늘어남에 따라 배관과 관련된 사고 요인이 증가하였기 때문으로 추정된다.
Ⅱ. 연료용 가스의 화재폭발사고사례 및 위험성 조사



[그림 Ⅱ-5] 미국 액체이송 이송배관의 화재폭발사고 추이

미국의 액체이송 이송배관(Pipeline) 화재폭발사고(3,978건)의 원인을 보면, [그림 II-6]과 같이 설비 고장이 1,811건으로 전체 사고의 46%를 차지하고 있으며, 부식에 의한 고장이 798건으로 20%이었으며, 다음으로 부적절한 운전



[그림 Ⅱ-6] 미국 액체이송 이송배관의 화재폭발사고 원인

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

조작이 585건(15%)으로 나타났다. 그 밖의 사고원인으로는 파이프 또는 용접 재질의 불량, 자연재해(지진 등)에 의한 피해, 굴착기에 의한 피해, 다른 사고에 의한 원인, 외력에 의한 피해 등이 있다.

가스이송 및 집결라인 이송배관에서의 화재폭발사고 원인은 설비 고장이 가장 많았다(그림 Ⅱ-7). 다음으로 부식에 의한 고장, 굴착기에 의한 피해, 파이프 또는 용접 재질의 불량, 자연력(지진 등)에 의한 피해 등의 순으로 나타났으며, 사고 원인의 약 50 %는 액체이송에서의 경우와 유사한 결과임을 알 수 있다.



[그림 Ⅱ-7] 미국 가스이송 및 집결라인 이송배관의 화재폭발사고 원인

가스분배 이송배관에서 발생한 화재폭발사고의 원인을 보면(그림 II-8), 액체이송이나 가스이송 및 집결라인 이송배관에서와는 달리 외력에 의한 피해가 가장 많았으며 다음으로 굴착기에 의한 피해가 그 다음으로 많은 빈도를 나타내고 있다. 가스분배 이송배관에서의 사고 원인의 경우에는 액체이송, 그리고 가스 이송 및 집결라인 이송배관에서 많이 발생하고 있는 설비 고장 및 부식에 의한 사고 요인이 상대적으로 낮은 특징을 가지고 있다. Ⅱ. 연료용 가스의 화재폭발사고사례 및 위험성 조사



[그림 Ⅱ-8] 미국 가스분배 이송배관의 화재폭발사고 원인

최근 10년(2011~2019) 동안에 중국에서 발생한 LPG 및 LPG/DME 혼합 가스의 폭발사고사례를 〈표 Ⅱ-11〉에 나타냈다(Xinming Q., et al., 2021).

〈표 Ⅱ-11〉 최근 10년간(2011~2019) 중국의 LPG가스폭발 사고사례

사고 발생일	사고건수	사고 장소	인명피해	손실액(\$)
2011.11.14	LPG	산시성 시안시	사망 10, 부상 36	1,390,000
2012.11.23	LPG	산시성 진중시	사망 14, 부상 47	2,260,000
2013.06.11	LPG	장쑤성 쑤저우시	사망 12, 부상 8	1,960,000
2015.10.10	LPG	안후이성 우후시	사망 17	2,160,000
2017.06.05	LPG/DME	산둥성 린이	사망 10, 부상 9	6,320,000
2019.07.19	LPG/DME	베이징 창핑구	부상 3	unknown
2019.12.03	LPG/DME	베이징 순의구	사망 4, 부상 10	2,020,000

2011년부터 매년 LPG에 의한 폭발사고가 발생하여 커다란 인적, 물적 피해가 일어나고 있다. 2019년 12월 3일 베이징에서 LPG/DME 폭발이 발생하여 사망 4명, 부상 10명이 발생하였다. 매년 LPG 수요가 증가함에 따라 연료의 발열량과 환경안전을 저하시키지 않으면서 저렴한 가격으로 LPG와 동일한 물리화학적 특성을 가진 디메틸에테르(DME)를 LPG와 혼합하여 사용하고 있는데, 특히 디메틸에테르(DME)는 무연연소, 높은 세탄가 및 저렴한 가격으로 LPG와의 혼합연료 사용의 장점을 가지고 있다. LPG 등의 가스폭발사고의 발생 장소는 주로 실내에서 많이 일어나고 있는데(Kundu, S.K., et al., 2018), 2016년 중국에서는 909건의 가스폭발사고가 발생하여 사망 127명, 부상 1096명이 발생하였으며, 이 중에서 실내에서 발생한 가스폭발사고는 517건이었다. 2017년에는 702건의 가스폭발사고가 발생하여 부상 1100명 이상 및 사망 126명이 발생하였으며 이 중에서 실내 가스폭발사고는 465건으로 66 %를 점하고 있다. 이러한 실내 가스폭발사고는 인명피해 및 건물파손을 일으키는 주요 요인이 되고 있다.

[그림 II-9]는 2019년 12월 3일 오전 2시 43분경에 베이징 순의구 소재의 식품회사의 작업장에 있는 LPG 등의 가스폭발사고에 의한 폭발사고 모습으로 사망 4명 및 부상 10명의 인명피해와 2,020,000\$ 이상의 물적손실이 발생 하였다. 가스폭발사고로 인해 가스실린더실, 냉장보관실 및 원료보관실의 격벽이 완전히 붕괴되었으며, 철근 콘크리트 기둥은 변형되어 휘어진 형태를 하고 있다. 또한 철근콘크리트 벽체는 폭발과압의 영향으로 구형 형태의 오목면으로 변형 되거나 일부 균열이 나타났으며, 철근 재질의 콘크리트 지붕은 파손되어 균열이 발견되거나 시멘트 지붕이 날아가 철골이 노출된 것을 볼 수 있다. 폭발압력에 의한 충격파의 전파는 방향성이 있는데, 만일 충격파의 전파 경로에 작업자나 장치 및 설비가 있는 경우에는 인명피해와 재산손실을 일으킬 수 있다. 개방 공간에서의 충격파는 일반적으로 주변에 고르게 전파되므로 압력파가 분산되는 효과로 인하여 동일 크기의 과압 기준에서 밀폐공간의 경우보다 피해 효과가 작아질 수 있다. 반면에 밀폐 공간에서는 덕트, 파이프라인 및 터널 등의 방향을 Ⅱ. 연료용 가스의 화재폭발사고사례 및 위험성 조사



[그림 Ⅱ-9] 중국 베이징 소재의 식품회사의 LPG/DME 가스폭발사고 모습

따라 충격파가 전파되므로 전파 과정에서 과압 감소가 없기 때문에 피해 영향이 개방공간의 경우보다 높아질 수 있다.

3) 사고사례 특징 및 위험성 분석

국내외 가스사고 실태 및 경향 분석을 통하여 대부분의 사고가 LPG 및 LNG에 의해 일어나는 것을 알 수 있었다. LNG는 메탄이 주성분으로서 C/H비 (탄소와 수소의 함유비율)가 작아 이산화탄소(CO₂)의 배출 저감을 기대할 수 있다. 예를 들면 연소과정에서 LPG의 CO₂의 배출량을 1로 하는 경우에, 석유는 1.16, 석탄은 1.53인데 비해 LNG는 0.84로 가장 작다. 또한 LPG는 유황성분의

배출과 매연 발생이 거의 없어 친환경 연료로 사용이 증가하고 있다. 그러나 LPG 및 LNG는 무색 투명하기 때문에 누출 시에 눈에 보이지 않으며 누출 가스가 화재폭발이 일어나는 경우에는 폭발과압이 짧은 시간 내에 확대되기 때문에 초기 소화나 피난이 쉽지 않은 문제가 있다. 또한 이러한 가스는 사업장 에서 주요 연료원으로 사용하고 있는 것으로서 사업장 내부나 시설 및 장치와 같이 밀폐된 공간에서 누출이 일어나는 경우에는 불균일한 가스 농도가 형성 될 수 있으며 이에 따른 화재폭발 위험성은 문헌에서 조사된 시험값과는 다른 특성을 나타낼 수 있다. 그러므로 가스 누출에 따른 화재폭발 위험성을 분석하고 이에 대한 대응방안을 강구하기 위해서는 불균일성 가스의 화재폭발 특성을 우선적으로 조사하고 이에 대한 정보를 파악할 필요가 있다.

2. 가스 누출에 따른 화염 발생 및 화재폭발

LPG 및 LNG 등의 연료용 가스를 저장하고 있는 탱크나 파이프라인을 통해 이송하는 과정에서 누출이 발생하는 경우에 점화원이 존재하게 되면 누출 가스가 착화되어 화재 또는 폭발로 이어질 수 있다. 가스 이송 배관이나 저장 탱크에서 가연성가스 누출에 따른 가스화재와 가스폭발의 발생이 가능한 사고 시나리오를 [그림 II-10]에 나타냈다. 가스 누출이 일어나는 순간에 주변의 점 화원에 의해 착화가 일어나게 되면 누출 가스와 공기의 혼합기는 거의 형성되지 않으며 설비나 장치의 누출 부위에서 분출화염(확산화염)이 발생하면서 가스 화재로 이어진다. 이러한 가스화재는 가스 누출부에서 지속적인 연소가 이루어지는 정재화염(定在火炎; Standing flame)이 일어나지만 화염이 전파하는 현상은 발생하지 않는다. 반면에 가스 누출 후에 시간이 지남에 따라 불균일 가연성 혼합기가 대량으로 형성이 되며 이러한 가스 혼합 조건에서 착화되면 예혼합 화염(Premixed flame)이 가연성 혼합기를 화염이 전파하면서 가스폭발이 일어나게 된다. 이와 같이 가스 누출이 일어나면 가스 및 공기의 혼합 상태에 따라 가스화재(확산연소) 또는 가스폭발(예혼합연소)의 사고 형태가 달라지게 Ⅱ. 연료용 가스의 화재폭발사고사례 및 위험성 조사



[그림 Ⅱ-10] 가연성가스 누출에 따른 가스화재와 가스폭발

된다. 가스화재에 의한 피해영향은 주로 화염에서 발생한 열에 의해 주위의 설비 및 장비의 손상으로 나타난다. 가스폭발에서는 가연성 혼합기의 형성 공간 내에서 짧은 시간에 연소하고 이 때 발생한 화염이 가연성 혼합기 내를 전파하기 때문에 급격한 압력상승에 따른 체적팽창으로 폭풍압이 발생하여 장치나 건물을 파괴하고 고온 화염에 의한 열적 소손의 피해가 발생한다. 이와 같이 가스화재 에서는 누출부에서 화염이 고정되어 지속적으로 연소가 진행하는 반면에 가스 폭발 사고에서는 순간적으로 화염이 광범위하게 전파하므로 피해가 확대될 가능성이 높으며 사고 발생 후의 피난이나 소화가 쉽지 않다. 가스폭발의 발생 확률에 영향을 주는 요인을 보면 [그림 II-10]에서와 같이 가연성 기체의 누설량, 가연성 혼합기의 형성에 영향을 주는 혼합상태, 착화원의 유무와 종류에 따른 발생 에너지의 크기, 그리고 폭발이 일어나는 공정 환경의 조건에 따라 폭발 발생 위험성이 달라진다. 따라서 이러한 가스폭발 발생 요인을 저감 또는 제거를 통하여 사고 위험성을 낮출 수가 있다. 만일 가스폭발의 발생을 제어하지 못한 경우에는 피해영향 요인에 따라 폭발 강도가 달라진다. 이러한 피해 영향 요인 으로는 가스 혼합기의 양 및 가스의 연소특성, 폭발발생 장소, 작업자의 유무 및 위치, 그리고 장치 및 설비의 유무가 이에 해당된다. 이와 같이 가스폭발의 피해 평가를 위해서는 화염전파 특성, 압력 상승, 폭풍압 발생 등의 폭발과정의 조사가 중요하다.

3. 가스폭발에서의 화염전파 특성

가스폭발의 피해 영향은 화염전파에 의해 일어나기 때문에 화염전파특성에 대한 정보가 중요하다. 가스폭발이 일어나면 화염전파에 의해 폭발 피해가 나타나므로 화염 거동의 특성이 가스폭발에 따른 피해에 큰 영향을 준다. 밀폐 배관 내에서의 가스폭발 시의 연소속도와 화염전파속도의 관계를 [그림 II-11]에 나타냈다(Hirano, T., 1984; Glassman, I., 1996). 가스혼합기가 착화되어 발생하는 화염은 착화위치(Ignition point)로부터 주변으로 구상 형태 (Spherical shape)로 전파하는데, 배관 내에서는 구상 형태의 화염이 일정 시간 이후에는 반구 형태(Hemispherical shape)로 전파한다. 가스화염은 미연소 혼합기(Fresh gases)에 대하여 화염면(Flame front)에 수직방향의 속도인 연소속도(Burning velocity, S)를 가지며 이동한다. 연소가스는 팽창하여 부피가





증가하기 때문에 화염전방의 미연소혼합기는 착화 위치에서 외부의 화염전파 (Flame propagation) 방향으로 밀리면서 이동한다. 그러므로 실제로 관측되는 화염전파속도(V_i)는 (2.1)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_f = S + u \tag{2.1}$$

상기 식에서 *S*는 연소속도이며 *u*는 미연소혼합기의 이동속도로서 미연소 혼합기의 화염면으로의 수직방향 속도성분을 나타낸다. 또한 [그림 II-11]에서 가스밀도(ρ)는 화염대의 연소가스와 미연소혼합기의 영역에서 달라질 수 있다. 열팽창율(Thermal expansion ratio, σ)은 (2.2)식과 같이 미연소혼합기(ρ_u)와 연소가스(ρ_b)의 밀도 비(ρ_u/ρ_b)로 표현된다(Kadowaki S., et al., 2005). 또한 미연소 혼합기의 이동속도(*u*)는 연소속도(*S*)의 (σ-1)배로 알려지고 있으므로 (2.3식), 결국 화염전파속도(*V*)는 연소속도(*S*)의 열팽창율(σ)의 크기에 비례하므로 (2.4)식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \left(\frac{\rho_u}{\rho_b}\right) \tag{2.2}$$

$$u = S \bullet (\sigma - 1) \tag{2.3}$$

 $V_f = S \bullet \sigma \tag{2.4}$

예를 들면 메탄-공기 화학양론농도 혼합기에서의 층류연소속도(S)는 0.37 m/s 이며 열팽창율(σ)은 6.9이므로 화염전파속도(V_i)는 약 2.6 m/s가 된다. 폭발 발생 공간이 개방공간이 아닌 이송배관과 같이 밀폐공간에서 1차원적으로 화 염전파가 일어나는 장소에서는 연소가스의 팽창 효과가 단일 방향으로 집중되기 때문에 화염전파속도가 확대될 수 있다. 이와 같이 화염전파속도가 증가하는 요인 중의 하나로서 연소가스 팽창으로 인한 난류성 화염을 들 수 있다. 화염 면적이 증가함에 따라 연소속도가 층류연소속도에서 난류연소 속도로 변하면서 화염전파속도의 증가로 이어진다.

화염전파속도의 증대는 가스폭발의 피해영향 평가에서 중요한 요소가 되는데, 화염전파속도의 증가 요인으로는 가연성 혼합기의 기류 발생, 가연성 혼합기의 농도 및 온도의 불균일성, 화염의 불안정성 등을 들 수 있다(Dobashi, R., 1997). 가연성 혼합기의 기류 발생은 화염전파 이전부터 혼합기에 존재하는 기류와 화염전파로 인해 발생한 기체 유동에 의한 난류 흐름이 여기에 해당된다. 화염전파 공간에 시설, 장치 등의 장애물이 존재하면 화염전파에 의해 유도된 기체 흐름이 장애물과 간섭하여 난류성 기류가 발생한다. 가연성 혼합기의 농도 및 온도의 불균일성의 경우는 장소마다 연소속도가 다르기 때문에 화염면이 변형되어 난류성 화염으로 전이하면서 화염전파속도에 영향을 줄 수 있다. 화염의 불안정성은 초기 상태에서 기류 또는 불균일성이 없는 경우에도 발생하는 난류성 흐름으로서, 연료 분자와 산소 분자의 확산 속도의 차이에 의해 유도되는 확산 -열적 불안정성(Diffusive-Thermal Instability), 화염에서 기체의 팽창에 의해 유도되는 유체역학적 불안정성 (Hydrodynamic Instability)이 있다. 또한 밀 도차가 있는 경계면의 화염에 작은 밀도의 유체에서 큰 밀도의 유체로 향하는 화염전파방향으로 과압이 작용하는 경우에 발생하는 외력 불안정성 (Rayleigh-Taylor Instability) 등이 있다. 화염의 외력 불안정성은 실제 가스 폭발사고 시에 피해를 증가시키는 요인으로도 작용하고 있다. 가스폭발사고 시에는 화염전파와 함께 건물 내부의 압력이 상승하고 건물 유리창과 같이 강도가 약한 부분이 파괴되어 개구부가 발생하게 된다. 이러한 개구부로 실내의 연소가스가 급격하게 외부로 분출하며 또한 실내의 화염도 함께 개구부를 통해 가속되는 상황에서 화염의 외력 불안정성이 나타나며 난류성 화염이 발생한다. 이러한 난류성 화염은 연소속도를 증가시키고 가스폭발 피해를 증대시키므로 가스폭발사고에 의한 피해 평가에 있어서 화염의 불안정성을 고려하지 않으면 위험성을 실제보다 작게 평가하여 불충분한 사고저감 대책으로 이어지므로 가스 폭발에서 화염의 외력 불안정성의 조사는 피해영향 평가의 중요 사항이라고 할 수 있다.

4. 농도 불균일성에 따른 폭발위험성

가스의 연소에서 발생하는 화염은 크게 확산화염과 예혼합화염으로 구분된다. 연료원이 되는 가스와 산화제(공기 중의 산소)가 각각 별도로 공급되어 반응대 (Reaction zone)에서 연소하는 확산화염과 연료와 산화제가 미리 혼합되어 혼합기의 반응대에 공급되는 예혼합화염으로 분류된다. 이러한 예혼합화염은 화염이 일정한 위치에 머무는 정재화염과 화염면이 혼합기 내부를 이동하는 전파화염으로 분류된다. 가스폭발의 피해 관점에서 본다면 문제가 되는 것은 전파화염이다. 확산화염 중에서도 누출가스의 유동에 따라 화염 위치가 변하는 경우나 연료가스와 지연성가스의 확산에 의한 공급 균형이 이루어지는 지점이 변하는 경우에는 화염 위치가 이동할 수는 있지만 이는 예혼합화염이 화염의 반응량에 따라 미연혼합기 방향으로 진행하는 전파성과는 구별되어야 한다. 그러므로 전파 화염은 미연혼합기 내부를 전파하는 예혼합화염으로서 가스 폭발시에 관찰된다. 또한 용기 내의 가스폭발 현상에서 전파화염을 사용하여 측정하는 경우에는 화염전파와 함께 미연소기체가 압축되어 압력과 온도가 상승하기 때문에 시간에 따라 화염전파속도(또는 연소속도)의 값이 변할 수 있다. 또한 보다 정확한 연소속도를 구하기 위해서는 연소가스의 체적팽창에 의한 미연소기체의 압축 효과도 고려할 필요가 있다.

가연성가스에 의한 예혼합화염의 가스폭발 피해를 예측하기 위해서는 폭발 압력 특성에 대한 정보가 매우 중요하다. 이러한 이유로 인해 지금까지 많은 연구자에 의해 가스폭발 공간에서의 가스 종류, 농도, 압력, 온도 등의 다양한 조건에 대한 기초적 연구가 이루어져 왔다. 사업장의 저장탱크나 배관 등에서 가스가 누출되어 폭발범위농도가 형성된 폭발 공간에서는 가스 농도가 불균일한 경우가 많으며, 이러한 농도 조건에서는 단위시간당의 가스 발열량과 화염전파 특성이 달라지므로 폭발과압이 변할 수 있다. 그러므로 대부분의 가스폭발 사고에서의 실제 위험성은 농도가 균일한 조건에서 측정된 문헌자료(가스폭발 특성)에 의해 평가된 결과와 다른 결과가 나올 가능성이 높다. 가스폭발에 있어서

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

화염전파의 거동은 가스농도 만이 아니고 폭발공간의 형태, 장애물의 존재, 개구부의 유무 등에도 영향을 받는다. 화염전파의 발생에 의한 폭발과압의 압력파는 화염과 간섭하여 화염이 난류장의 흐름으로 변화하는 요인으로 작용 하고 있다. 그러므로 가스농도 이외의 폭발조건이 없다고 한다면 화염의 불안 전성은 가스농도의 불균일성에 의해 주로 발생한다고 할 수 있다. 미연소기체에 농도 불균일성이 발생하는 경우에는 가연성가스량이 적은 경우라도 국소적으로 폭발범위 내의 혼합기가 존재하면 밀폐공간 내의 압력이 크게 상승하여 화염 거동이 변화할 수 있다(Harayama, M. et al., 1980).

가스농도의 불균일성 분포가 가스폭발 특성에 많은 영향을 주는 것에 대해서는 조사가 많이 이루어져 왔지만, 지금까지의 연구에서는 누출공의 노즐 크기나 누출시간과 같이 농도 불균일성의 정도가 정량적으로 명확하지 않고 혼합기 중의 가스농도 차이 변화에 따른 폭발특성과의 관계를 조사한 연구사례는 거의 없다. 그러므로 사업장에서 발생하고 있는 대부분의 가스폭발사고는 가스의 농도가 불균일한 조건에서 일어나고 있기 때문에 가스농도 불균일성이 폭발거동에 미치는 영향에 대한 상세한 조사가 필요하다.

Ⅲ. 불균일 가스혼합기의 화재폭발 위험성 평가

Ⅲ. 불균일 가스혼합기의 화재폭발 위험성 평가

1. 가스혼합기 불균일성의 정량적 평가

1) 불균일성의 물리적 의미

불균일성(Heterogeneous)은 일반적인 관점에서 보면 물질계의 내부에 물리화학적으로 다른 부분이 존재하는 것을 의미하고 있다. 예를 들면 기체 상태와 고체 상태 물질의 혼합계이거나, 동일한 고상이라도 그 내부에 성질이 다른 부분이 포함되어 있는 경우, 또한 동일한 기체 상태라도 성분이 다르거나 농도가 다른 경우를 나타내기도 한다. 그럼에도 불구하고 물리화학적으로 균일 및 불균일의 개념 분류는 간단하지 않으며 명확하지 않은 점도 존재한다. 물질의 결정격자 등의 주기적인 구조에서 균일성 여부를 예로 들어 보는 경우, 자세히 관찰해 보면 불균일성을 가지고 있지만 표현 가능한 함수가 비교적 간단하게 나타낼 수 있다는 점에서는 균일하다고도 할 수 있다. 이러한 불균일성 분류에 대해서 통계물리학에서는 질서(Regularity)라는 범주에서 분류하고 있다. 분자 간의 상호작용을 기준으로 공간적 불균일성은 구분하면 크게 미시적 (Microscopic) 불균일성과 거시적(Macroscopic) 불균일성으로 나눌 수 있으며, 미시적인 불균일성은 치환형(Substitutional), 기하학형(Topology), 구조형 (Structural)의 3가지 형태로 분류되며 〈표 Ⅲ-1〉과 같다(Ushiki, H., 1985). 치환형의 불균일성은 원자 및 분자의 위치는 규칙적이지만 구조를 구성하는 원자 및 분자의 종류가 불균일한 경우로서 불규칙 합금이나 혼정 (Mixed crystal)이 이에 해당되며, 혼정은 2가지 이상의 물질이 혼합하여 균일한 상을 만들고 있는 기체, 용액, 고용체 등을 의미한다. 기하학형 불균일성과 구조형 불균일성은 모두 원자나 분자의 놓여진 위치가 불균일하지만, 기하학형 불균일성은 구조형 불균일성에 비해 거시적 물성에 어떠한

구분	장거리 질서	단거리 질서
치환형	보존	거의 보존
기하학형	붕괴	거의 보존
구조형	붕괴	다소 보존

〈표 Ⅲ-1〉 미시적인 공간 불균일성의 요소

영향을 주어 원자 및 분자 간의 상호작용 크기가 서로 달라 단거리 질서 (Short distance regularity)의 차이로 인해 발생하며, 기하학형 불균일성의 예로서는 아몰퍼스 반도체(Amorphous semiconductor)가 있다. 그러므로 기하학형 불균일성과 구조형 불균일성은 원자 및 분자 간의 상호작용의 크기를 나타낸다고 할 수 있다. 공간적인 불균일성의 분류 예를 [그림 III-1]에 나타



[그림 Ⅲ-1] 공간적인 불균일성의 분류

냈다. 미시적인 불균일성 3가지 요소의 분류는 질서(Regularity)의 관점에서 〈표 Ⅲ-1〉과 같이 분류가 가능하다. [그림 Ⅲ-1]에서 각 요소에 있어서 질서 (Regularity)를 구성하는 영향요인은 원자와 분자 간의 상호 작용으로서 공유 결합, 금속결합, 다양한 쿨롱 상호작용이 이에 해당된다. 예를 들면 고분자와 관련된 대표적인 상호 작용으로서 반데르발스 상호작용, 수소결합, 포화 화학 결합. 소수결합(극성이 작고 물분자 친화성이 작은 원자단이 물속에서 이루어 지는 결합), 쿨롱 상호작용, 기하학적 상호작용 등으로 분류할 수 있다. 원자와 분자 간의 상호 작용이 결합되어 공간적(배치)으로 균일 및 불균일 구조를 형성하여 [그림 Ⅲ-1]의 공간적인 불균일성이 시간에 따라 변화한다고 볼 수 있다. 또한 기하학형 불균일성과 구조형 불균일성은 원자 및 분자의 진동과 브라운 운동 등을 고려하면 시간에 따른 변화가 일어남을 쉽게 이해할 수 있다. 거시적 불균일성은 미시적 불균일성의 조합에 의해 형성되지만, 미시적인 불균일성 요소에서 거시적인 불균일성을 순차적으로 해석하는 것이 쉽지 않다. 그러므로 최근의 불균일성 연구는 미시적인 불균일성 요소를 포함한 집단 운동이 불균일 물성의 보질적인 역할을 한다는 관점에서 거시적인 불균일성을 직접 해석하는 방법이 중요시 되고 있다.

2) 기존 연구에서의 불균일성 평가방법

국내외에서 지금까지 수행된 불균일 가스의 폭발특성연구를 대상으로 불균일성 평가방법을 조사, 검토하였다. 폭발용기 내부의 가스 불균일성을 만들기 위하여 폭발용기와 보조용기와와 압력차, 가스 분출시간 및 가스분출 종료 후의 점화 지연시간 설정 등을 변화시키면서 인위적인 불균일성이 이루어지도록 하였다 (BAE, J.I., et al., 1993). 또한 혼합기체의 폭발하한 측정은 시간 경과에 따른 압력차를 조사하여 계산하였으며, 구체적으로는 가스 분출시간에 따른 압력차 및 가스농도를 측정하였다. 그러나 이러한 방법은 분출시간이 증가하면 가스 압력차는 감소하며 가스농도는 증가하는 경향을 나타내지만 폭발용기 내부의 분균일성의 정도에 대해서는 확인할 수가 없다. 가스 노즐의 직경 및 가스 주입속도를 변화시키면서 가스 불균일성을 만드는 방법(OH, K.H., 2003; KIM, S.S., et al., 2003)에서는 폭발용기 내에 주입된 가스의 분출속도와 유속은 알 수 있지만 폭발용기 내부에서 농도 기울기가 형성될 것으로 추정하는 것만이 가능하다. 다음으로 폭발용기 내부의 압력 차이를 이용하여 층류성 기류에 의한 불균일성 형성 방법이 제안되고 있다(Hirano, T., 1984). 구체적인 방법으로는 폭발용기의 상하단에 층류성 기류를 만들기 위한 황동재질의 소결 금속판을 설치하고 대기압(Po)의 공기로 채워진 폭발용기의 연소가스 배출구를 밀폐시킨다. 그리고 폭발용기 상부로부터 가연성가스를 용기 내에 주입하여 일정 압력(P1)이 되도록 한 후에 연소가스 배출구를 열고 폭발용기 내부의 압력을 대기압(P₀)으로 한 다음에 연소가스 배출구를 닫는다. 이와 같이 하여 폭발용기 내의 상방에 가연성가스를, 하방에 공기가 도입되도록 하여 가연성가스와 공기가 접촉하는 경계면에 가연범위의 불균일성 예혼합기가 형성되도록 하며 이러한 불균일성 예혼합기 형성층의 두께는 시간과 함께 증가한다. 이러한 방법은 가연성가스와 공기의 상호확산에 의해 농도 불균일성이 형성되도록 하는 것이지만 정량적인 가스 불균일성은 예측할 수가 없다. 국내외에서 수행된 기존 연구에 있어서 사용된 불균일성 가스 평가방법을 조사하였으며, 기존 연구의 불균일 가스 형성 방법을 구분하면 〈표 Ⅲ-2〉와 같다. 불균일성 가스를 만들기 위한 방법은 크게 압력차, 주입 또는 분출시간 그리고 노즐 크기를 변화시키는 방법이 사용되었다. 이들 방법은 불균일 가스 농도장의 형성은 예측되지만 구체적인 불균일성 크기에 대해서는 알 수 없다는 제한점을 가지고 있다. 다시 말하면

방법	상세
압력차	폭발용기와 보조용기 또는 폭발용기 내부의 압력 차이를 이용
주입 또는 분출시간	가스 분출시간 또는 가스 주입속도의 변화
노즐 크기	가스 노즐의 직경에 따른 누출량을 변화

〈표 Ⅲ-2〉 기존 연구의 불균일성 가스 평가방법

Ⅲ. 불균일 가스혼합기의 화재폭발 위험성 평가

압력차, 주입(분출)시간, 노츨 크기에 따라 누출량을 변화시킬 수는 있지만 폭발공간 내의 불균일성이 어느 정도인지에 대해서는 파악하기가 쉽지 않다. 그러므로 이러한 불균일성 방법에 의해 조사된 폭발특성 자료는 정량적인 불균일성 정도를 알 수 없기 때문에 실제 공정에 활용하는 것은 쉽지 않다.

3) 가스 불균일성의 정량화 정의 및 방법

가스가 공기중에 누출되면 시간에 따라 가스 확산을 통하여 농도 차이가 감소 하게 된다. 이는 가스혼합기 공간의 농도 고저의 차이로 인하여 가스 분자의 수(밀도)의 차이가 발생하여 밀도가 높은 공간에서 낮은 공간으로 이동하여 밀도 평형을 유지하여 균일한 농도가 형성되기 때문이다. 서로 다른 종류의 가스 혼합의 경우에는 각각의 비중 및 중력의 영향에 따른 수직방향의 미세한 농도 기울기를 형성할 가능성은 있다. 그러나 이러한 차이는 무시할 정도로 작기 때문에 불균일성을 가스농도의 차이를 조사하여 평가하는 방법은 타당할 것으로 판단된다.

폭발용기에 주입된 가스 혼합기의 농도는 주입 직후에 가장 큰 불균일성을 나타내며 시간에 따라 불균일성은 감소한다(한우섭 등, 2016). [그림 Ⅲ-2]와 같이 정사각형 단면(0.05 × 0.05 m)을 가지는 길이 0.8 m의 튜브 형태 폭발 용기를 사용하여 가스농도의 주입에 따른 용기 양 끝단에서의 농도 차이를



[그림 Ⅲ-2] 가스농도 분포 조사를 위한 시험장치 개요

37

조사하였다. 폭발용기에 일정 농도의 가스를 주입하면 용기 내부의 흐름은 초기에는 난류성 기류를 발생시키며 기체와 공기의 혼합은 대부분 분자 확산에 의해 이루어진다. [그림 III-2]의 튜브형 용기에 일정 가스농도(10 vol%)를 주 입하여 튜브 양 끝단의 농도 차이를 지연 시간에 따라 가스크로마트그래피 (GC)에 의해 분석한 결과를 [그림 III-3]에 나타냈다. 튜브 내의 메탄가스 혼합 기에서의 메탄의 불균일성을 나타내는 튜브 양 끝단의 농도 변화는 가스 주입 직후에 가장 높았으며 시간이 지남에 따라 농도 차이가 감소하는 것을 알 수 있다. 시간(*x*)에 따른 메탄의 농도차이(*Y*)의 변화에 대해서 다항식 회귀 모델 (Polynomial regression model)을 적용하고 회귀분석하여 얻어진 예측식은 (3.1)식과 같으며 [그림 III-3]에 예측값을 실선으로 함께 제시하였다.

$$Y = 1.2569 - 0.0559x + (6.2717 \times 10^{-4})x^2$$
(3.1)

상기의 메탄 농도차이(Y)의 예측식에서 결정계수(R-square ; Coefficient



[그림 Ⅲ-3] 메탄가스 혼합 후의 시간에 따른 농도 차이의 변화

of determination)는 0.99193으로서 시험자료에 대한 예측값의 정확성이 매우 높게 나타났다. 불균일성 평가를 위한 농도분석 시험 결과에 대한 (3.1)식을 사용하여 메탄가스를 튜브에 주입 후 지연시간에 따른 메탄가스 혼합기의 불 균일성 추정 결과를 [그림 Ⅲ-4]에 제시하였다. 예를 들면, 메탄가스 혼합기의 지연시간이 1분인 경우에 농도 차이는 1.20 vol%로 예상되며, 45분 동안의 지연 시간 후에는 농도 차이가 0.011 vol%로서 거의 균일 혼합기가 형성됨을 알 수 있다.



[그림 Ⅲ-4] 지연시간에 따른 메탄가스 혼합기의 불균일성 추정

불균일성의 크기는 평가기준에 따라 표현 방법이 달라지지만, 본 연구에서는 (3.2)식과 같이 가스 혼합기의 불균일성(Non-uniform ; *C*_{NU})을 평균 가스

$$C_{NU} = 1 - \left(\frac{C_i - C_{dt}}{C_i}\right) \tag{3.2}$$

농도에 있어서 혼합 직후의 농도차이의 초기값(*C*)에 대한 지연 시간에서의 농도 측정값(*C*_{dt}) 차이의 비율로서 정의하였다. [그림 Ⅲ-5]는 메탄가스-공기 혼합기의 형성 직후에 있어서의 시간에 따른 불균일성 크기(*C*_{NU}; Non- uniform)를 정량화(*C*_{NU}; 0~1.0)한 것으로서 가스 주입 후의 지연시간과 함께 불균일성이 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 가스혼합기의 균일 및 불균일성 조건에서의 폭발특성을 조사를 위하여 [그림 Ⅲ-5]의 불균일성 크기를 기준으로 하여 수행하였다.



[그림 Ⅲ-5] 가스 농도 차이를 고려한 불균일성의 정량화

구체적인 실험조건으로는 〈표 III-3〉과 같이 가스혼합기의 균일 및 불균일 조건에서 폭발특성 차이를 조사한다. 균일조건에서는 혼합 직후의 불균일성이 가스 확산에 의하여 농도 차이가 거의 없게 되고 초기의 난류성 기류가 층류 및 정지 기류로 변화하게 되므로 층류화염이 발생하게 된다. 반면에 폭발용기를 진공 상태로 하여 공기 및 가스를 주입한 후에는 난류성 기류의 발생과

Ⅲ. 불균일 가스혼합기의 화재폭발 위험성 평가

구분	방법	비고
균일 조건	진공 상태의 폭발용기에 공기 및 가스를 주입하여 충분한 시간(45분 이상)이 후에 는 기류가 정지한 상태가 되며 평균농도 상태에 도달한 후에 착화한다.	균일 농도장 정지 기류
불균일 조건	진공 상태의 폭발용기에 공기 및 가스를 주입하고 일정 시간 후에 착화한다.	불균일 농도장 미세 기류 존재

〈표 Ⅲ-3〉 가스 농도장 조건에 따른 평가방법

폭발공간에서의 농도 차이가 가장 크게 발생하므로 불균일 농도장이 최대가 되며 시간에 따라 불균일성은 감소한다. 본 연구에서의 불균일성은 불균일 농도 및 미세 기류가 존재하는 조건으로 정의하였다. 가스폭발 특성 실험에서의 구체적인 불균일성 조건의 기준은 〈표 III-4〉와 같다. 불균일(Non-uniform) 조건은 가스-공기 혼합 후의 지연시간(Delay time)을 각각 1, 10, 20 분으로 설정하였으며, 균일(Uniform) 조건의 경우에는 가스-공기 혼합 후의 지연시간 (Delay time)을 45분으로 하였다. 이와 같이 실험 조건을 크게 균일조건 및 불균일조건의 농도장을 형성시켜 화염전파와 과압 발생 거동을 비교함으로서 농도 불균일성의 영향에 대하여 조사한다.

Items	Delay time (min)	Non-uniform (C _{NU})
	1	0.98
Non-uniform (불균일 조건)	10	0.76
	20	0.39
Uniform (균일 조건)	45	0.01

〈표 Ⅲ-4〉 가스폭발특성 시험에서의 불균일성 조건 기준

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

2. 실험장치 및 방법

1) 연료용 가스의 시료 선정

본 연구에서 사용하는 메탄 및 프로판의 물리적 특성을 〈표 Ⅲ-5〉에 나타냈다. 국내에서 사용되고 있는 연료용 가스 중에서 화재폭발사고 발생 빈도가 가장

항목	메탄(CH ₄)	프로판(C ₃ H ₈)
분자량	16.0	44.1
비중(-)	0.554	1.550
발열량(kcal/kg)	13,285	12,034
기체 밀도(kg/cm³) at 1atm, 15.6℃	0.6784	1.8954
기체 비중(-) at 1atm, 15.6℃	0.5547	1.5496
녹는점(℃)	-182.5	-188
끓는점(℃)	-164.0	-42.1
연소열(kcal/g)	11.93	11.06
폭발범위(vol%)	5.0~15.0	2.1~9.5
이론혼합비(vol%)	9.47	4.02
이론공기량(kg/kg) at 1atm, 15.6℃	9.56	24.29
발화온도(℃)	632	504
최대연소속도(m/s)	0.45 (at 10 vol%)	0.52 (at 4.5 vol%)
최소발화에너지(mJ)	0.33	0.30
소염거리(cm)	0.25	0.18

〈표 Ⅲ-5〉 시료 가스의 물리적 특성

높은 것은 〈표 II-3〉과 같이 LNG와 LPG이며 이러한 연료용 가스에 의한 사고 발생은 [그림 II-2]에서와 같이 감소하지 않고 있다. 따라서 LNG 등에 의한 화재폭발사고 피해는 계속적으로 발생할 가능성이 높기 때문에 폭발사고 발생만이 아닌 발생 시의 피해저감 대책도 대비할 필요가 있다. 본 연구에서는 LNG와 LPG의 주성분인 메탄과 프로판에 대해 실제 누출사고 시에 발생할 수 있는 불균일성 혼합기에서의 폭발특성을 조사하였다. 메탄은 LNG의 주성분으로서 땅속이나 해저 지하에 자연적으로 존재하는데 대기중에서는 온실효과를 나타내며 무색, 무취, 무미의 가스로서 증기는 공기보다 가볍기 때문에 쉽게 착화 가능성이 있다. 또한 메탄은 옅은 청색의 비발광 화염의 형태로 연소하며 공기가 부족하면 부분적으로 일산화탄소(CO)가 발생한다. 반면에 프로판은 자연적으로 존재하지 않으며 석유정제 공정 또는 천연가스처리의 부산물로서 얻어지며 무색, 무취, 무독성의 가연성 가스이다. 연소 시에 충분한 산소가 없으며 일산화탄소(CO) 및 탄소 화합물의 생성과 같은 불완전연소가 일어나는데, 프로판의 연소는 가솔린의 연소보다 깨끗하지만 메탄보다는 유해 연소가스가 적은 청정한 연료라고 할 수 있다.

2) 폭발용기 및 화염관측

본 연구에서 사용한 불균일성 폭발 실험장치의 개략도를 [그림 III-6]에 나타 냈다. 폭발용기는 스테인리스 재질(STS304)로서 안전성을 고려하여 30 bar의 폭발압력까지 사용가능하도록 제작되었으며 용기의 내부 체적은 단면적(Cross section)이 정사각형(0.072×0.072 m)이며 길이 0.82 m의 관상 형태(Tubular type)의 밀폐형 구조로 되어 있다. 또한 균일 및 불균일조건의 농도장에 있어서의 화염전파 거동을 조사하기 위하여 폭발용기의 측면에는 폭발 시의 화염을 관찰할 수 있는 강화유리 재질의 관측창(Observation window)을 설치하였다. 가스혼합기의 착화는 네온트랜스를 사용한 고전압 유도 전극의 불꽃방전을 사용하였으며 이를 위해 폭발용기의 좌측 끝단에 점화원(Spark ignition)을 전극 간격 3 mm로 설정하였다. 혼합가스 착화 후의 과압거동 및 화염전파속도를

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

조사하기 위하여 [그림 III-6]과 같이 폭발용기 상부에 일정 간격으로 4개 압력센서(Pressure Transducer ; PT, 0~30 bar)를 설치하였다. 압력센서는 교정된 제품을 사용하였으며 사용 과정 중에 압력측정의 신뢰성 확보를 위해 압력교정기(DPI-611, GE Druck)를 사용하여 교정하였다. 또한 균일성 또는 불균일성 조건에서의 가스 농도장의 변화가 화염온도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 온도센서(Thermocouple probe ; R-type)를 [그림 III-6]에서와 같이 관상형태 폭발용기 뒷면(Back plate)의 좌단 및 우단에 각각 1개씩(총 2개)을 설치하여 사용하였다.



[그림 Ⅲ-6] 불균일성 가스폭발 실험장치의 개략도

3) 화염전파속도 및 폭발압력의 측정 방법

본 연구에서 사용된 메탄 및 프로판은 순도 99.95% 이상의 고순도 가스를 사용하였다. 균일 및 불균일 가스 혼합기의 실험방법은 [그림 Ⅲ-6]에서와 같이 먼저 진공펌프(Vacuum pump)를 사용하여 폭발용기 내부를 진공으로 한 상태에서 일정 시험 농도에 해당하는 가스량(메탄 또는 프로판)을 분압(Partial

pressure) 방식에 따라 폭발용기 내에 주입하고 대기압 상태가 되도록 공기를 넣는다. 다음에 설정된 지연시간 후에 점화원(Spark ignition)에 의해 가스혼 합기가 착화되면 화염이 전파하게 된다. 화염전파 거동은 가스농도, 불균일성에 따른 농도 분포의 크기 등에 의해 변동하는데 이러한 폭발특성의 변화는 압력 센서 및 온도센서를 사용하여 과압과 화염온도의 측정을 통해 정량화할 수 있다. 가스혼합기가 착화되면 관상형태의 폭발용기 내를 용기 좌단에서 우측으로 화염이 전파하게 되는데 [그림 III-6]의 실험장치 개략도에 표기된 폭발용기의 일정 거리에 설치된 압력센서(PT-1, PT-2, PT-3, PT-4)를 사용하여 압력파를 측정하고 동시에 폭발용기의 관측창(Observation window)을 통해 컬러 비데오카메라 및 초고속카메라(Optronix CR3000, Germany) 등을 활용하여 화염전파 거동을 관찰하였다. 이와 같이 압력 파장 및 화염전파 영상의 시계열 데이터를 기록, 분석하여 화염전파속도를 측정하였다.

본 연구에서 대상으로 하는 가스혼합기는 연료와 공기가 사전에 혼합된 예 혼합기이다. 예혼합기가 착화되면 화염이 전파하는데 전파화염의 구조는 예열대와 반응대로 구분된다. 예열대는 미연소 가연성혼합기가 화염에 유입되기 직전의 영역으로서 연소반응은 아직 일어나지 않으며 혼합기의 온도만이 상승한다. 반응대는 연소반응이 일어나며 발열과 함께 화염(빛)이 발생하는 구역이다. 이러한 예열대와 반응대를 합한 화염대의 두께는 전파화염이 일어나는 공간의 크기에 비하면 매우 작기 때문에 일종의 단면으로 간주하여 화염면(Flame front)으로 나타내고 있다. 화염의 온도는 가스 농도의 변화에 영향을 받기 때문에 폭발공간에서의 가스농도의 불균일성에 의해서도 온도 변화가 나타날 수 있다. 가스혼합기의 화염온도 변화는 불균일 혼합기의 폭발특성을 나타내는 지표 중에 하나로서, 폭발용기 뒷면에 설치된 온도센서(TP-1, TP-2)의 시간에 따른 온도변화를 조사하여 균일 및 불균일성에 따른 가스폭발시의 화염온도 영향을 조사할 수 있다.

3. 화염전파속도

1) 화염전파 거동

가스폭발에 의한 직접적인 인적 및 물적 피해는 과압에 의한 것이며 이러한 과압은 폭발 시의 화염전파속도 특성에 의해 영향을 받는다. 균일조건 (C_{NU}=0.01)에서의 CH₄의 화염전파 모습을 가스농도 변화에 따라 관측한 결과를 [그림 III-7]에 나타냈다. 균일조건(C_{NU}=0.01)은 〈표 III-3〉에서와 같이 CH₄-공기 혼합기의 정지 기류 및 균일 농도장에서 평가하였다. CH₄의 화염면 (Flame front)은 매끄러운 형상으로 화염의 교란은 거의 관찰되지 않고 있다.



[그림 Ⅲ-7] 균일농도(C_{NU}=0.01)에서의 CH₄의 화염전파 모습

농도 7, 8 vol%의 조건에서 화염면은 장방형 배관의 상부에 근접하며 전파하고 있는데 이는 화염온도에 따른 부력의 영향에 기인하고 있다. 그러나 화학양론 농도에 가까운 9 vol%에서는 화염면이 일정한 형태를 가지며 전파하는데 최대 화염전파속도에 가까워지면서 부력의 영향이 감소하는 것으로 판단된다. 10 vol% 이상으로 농도가 증가하면 화염전파속도가 감소하는데 부력의 영향으로 화염은 배관의 상부를 따라 전파하고 있는 것을 알 수 있다. 반면에 불균일농도 조건 중에서 기류 존재 및 불균일 농도장이 가장 큰 경우(C_{NU}=0.98)에 있어서 CH₄의 화염전파 모습은 [그림 III-8]과 같다. 7, 8 vol%의 농도에서는 균일조건 (C_{NU}=0.01)과 달리 화염면의 면적이 증대되는 것이 관찰되고 있는데, 이는 난류화염(Turbulent flame)에서 존재하며 화염면적을 증가시키는 주름 형태의 화염구조(Wrinkled flame)와 유사하였다.



[그림 Ⅲ-8] 불균일농도(C_{NU}=0.98)에서의 CH₄의 화염전파 모습

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

9 vol% 이상의 농도에서는 화염면이 부력에 의한 영향이 없이 일정한 형태를 가지며 전파하는데 균일조건(C_{NU}=0.01)과 비교하여 화염전파속도가 증가하였기 때문으로 판단된다. 또한 농도 13 vol%에서의 비폭발(No explosion)은 5회의 동일 농도 시험조건에서 폭발이 일어나지 않았다. 이는 불균일성(C_{NU}=0.98) 조건에서 [그림 Ⅲ-6]의 폭발용기 착화원 위치(수평 배관 하단으로부터 수직으로 0.036 m의 지점)에서의 가스 농도가 폭발상한계에 근접할수록 국부적으로 폭발범위 밖의 농도가 형성되기 쉽고 또한 CH₄의 폭발한계농도가 확률론적으로 결정되기 때문에 쉽게 착화되지 않는 것으로 추정된다. [그림 Ⅲ-9]는 C₃H₈-공기 혼합기의 불균일성에 따른 화염전파 거동을 관측 하여 농도별로 화염특성 결과를 나타낸 것이다. 정지 기류 및 균일 농도장에 해당되는 C₃H₈(C_{NU}=0.01) 에서의 화염전파 특성을 보면 저농도에 해당되는 3~4 vol%에서의 전파화염은 CH₄의 경우(그림 Ⅲ-7)와 달리 화염면이 장방형 배관의 하부에 근접하여 전파하고 있는 것을 알 수 있다. 〈표 Ⅲ-5〉와 같이 C₃H₈의 비중은 1.550으로서





CH₄(0.554)보다 약 2.8배 크기 때문에 폭발하한계 근방의 희박 농도 및 정지 기류에서는 수직 방향의 농도 기울기를 형성할 수 있기 때문에 화염면이 배관의 하부를 따라 전파하는 현상이 나타나는 것으로 판단된다. 반면에 농도가 증가하면 이러한 수직 방향의 농도 기울기의 차이는 감소하기 때문에 화염의 연소열에 의한 부력의 영향이 증가하여 화염면은 배관의 상부를 따라 전파하게 된다. 불 균일성이 가장 큰 C₃H₈(C_{NU}= 0.98)에서는 폭발하한농도 근방에서 수직 방향의 농도 기울기의 영향이 없이 화염전파가 이루어지고 있으며 폭발상한농도 근방 에서는 배관 상부를 따라 화염이 전파하는 현상이 나타나고 있다. 또한 화학 양론농도 근방(4~6 vol%)에서는 주름 형태의 화염구조가 증가하며 연소면적 증가에 따른 화염전파 위험성이 높아지는 것으로 추정된다. 불균일성 크기가 감소(C_{NU}=0.76 및 0.39)하는 경우에는 화염면에 있어서 주름 형태 구조의 화염이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 연소속도를 저하시켜 상대적인 위험성의 감소로 이어질 수 있다.

2) 농도 불균일성에 의한 영향

가연성 가스가 누출되면 주변 환경의 기류, 불균일 가스 농도의 분포 등의 외적 요인에 의해 화염전파의 가속이 일어날 수 있으며 이러한 현상은 폭풍압의 크기를 증가시켜 보다 큰 폭발피해로 이어질 수 있다. 이와 같은 화염전파 특성을 규명하기 위하여 동일 가스농도의 조건에 있어서 불균일성에 따른 화염면의 이동 특성을 조사하였다. 농도 8 vol%의 CH4 폭발에 있어서 불균일성이 변동하는 경우의 화염면(Flame edge) 이동 결과를 [그림 III-10]에 제시하였으며, 착화 후의 화염면의 위치를 착화지점으로부터의 거리를 계측하여 경과 시간에 따라 나타냈다. 화염면의 이동 거리는 화염전파 영상에서 33 ms 간격으로 캡쳐한 이미지에 대하여 화상처리(Image processing)를 통하여 계측하였다. 착화 후의 150 ms까지는 불균일성에 관계없이 초기 화염면의 이동은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 형상은 스파크 착화 시에 발생하는 미소 충격파가



[그림 Ⅲ-10] CH₄(8 vol%) 폭발에서의 화염면의 이동 특성

혼합기의 착화에 따른 화염전파속도를 가속화 시키는 요인으로 작용하기 때문으로 추정되었다. 150 ms 이후의 화염이동은 일정한 속도로 이루어지고 있지만 수평 배관의 종단부에 가까워질수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 화염 전파속도의 감소 요인으로는 장방형 수평 배관에서 전파특성과 농도의 불균일성에 기인하는 것으로 판단된다. 화염전파속도는 가연성 가스의 연소속도와 불균일성에 따른 기류속도의 합으로 이루어진다. 기체의 흐름은 균일성에 가까운 경우 (C_{NU}=0.01)에 비하여 불균일성이 증가할수록 (C_{NU}=0.39, 0.76 및 0.98) 상승하며, 이러한 기체의 흐름은 화염전파가 장방형 수평 배관의 말단부로 접근할수록 미연소 혼합기의 체적이 감소하면서 제한되기 때문에 기체 유속은 감소하게 된다. 또한 가연성가스 혼합기에서의 연소속도는 가스의 종류, 가연성혼합기의 화학적 및 물리적 성질에 의존하며 혼합기의 조성에도 영향을 받느다. 연소속도도 압력이 변하면 영향을 받는데, 대기압(*P*₀) 조건에서의 연소속도를 *S*₀라고 하는 경우에 연소속도(*S*)와 압력(*P*)의 관계는 이하 식과 같이 표현되며 메탄의 경우 에는 압력이 상승하면 연소속도가 감소한다(Andrews, G.E. et al., 1972).

Ⅲ. 불균일 가스혼합기의 화재폭발 위험성 평가

$$S = S_0 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\beta}$$

상기 식에서 β의 값은 연소속도(S₀)가 0.5 m/s 이하의 경우에는 음의 값을 가지며, 1.0 m/s 이상에서는 양의 값을 가진다. 메탄의 연소속도(S)는 〈표 Ⅲ-5〉 에서와 같이 0.45 m/s이므로 B는 음의 값을 나타내므로, 과압(P)이 상승하면 연소속도가 감소하며 이는 화염이동속도를 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다. 화염전파속도는 가연성가스의 조건 이외에도 폭발용기의 형상 및 크기. 배관 벽면의 상태. 폭발용기의 개폐 상태 등의 여러가지 요인에 의해 영향을 받는다. 그 밖의 화염이동에 영향을 줄 수 있는 화염가속 현상은 본 연구에서 사용한 폭발장치의 배관이 0.73 m로 작기 때문에 쉽게 이루어지지 않을 것으로 판단 된다. 농도 8 vol%에서의 불균일성에 따른 화염전파속도의 시계열 변화를 [그림 Ⅲ-11]에 나타냈다. 착화 후에 약 50 ms 전후까지는 전기 스파크에 의한 미소 충격파의 영향으로 화염전파속도의 급격한 변화가 일어나지만 이후의 화염 전파속도는 시간에 따라 완만하게 감소하고 있다. 이와 같은 경향은 불균일성에 관계없이 모두 나타나고 있는데, 화염전파가 진행됨에 따라 폭발용기 내부의 미연소 가스의 체적이 감소하고 압력상승에 따른 연소속도의 저하에 의한 영향으로 판단된다. CH4혼합기의 불균일성 조건에 있어서 농도 변화에 따른 CH₄의 화염전파속도의 변화를 [그림 Ⅲ-12]에 제시하였다. 일반적으로 일정 압력 조건에서 화염속도가 증가하는 원인으로서 화염면의 증대에 따른 난류연소 속도의 증가와 화염면 전방의 미연혼합기의 가속을 들 수 있다. 이러한 화염속도의 증가 요인이 동일한 조건에 있어서 [그림 Ⅲ-12]와 같이 CH₄혼합기에서 불균일성의 증가가 화염전파속도의 증가에 영향을 주는 것을 명확히 알 수 있다. 불균일성이 [그림 Ⅲ-8]에서와 같이 CH4 화염면의 연소 면적을 증가시키며 화염전파속도를 가속화시키는 것으로 판단된다. C3H4에 있어서의 불균일성의 변동이 화염면 (Flame edge) 이동에 미치는 영향을 [그림 Ⅲ-13]에 나타냈다. 착화 후의 화염면의 이동 특성을 보면 초기에는 증가 경향을 보이지만 CH4의 경우와



[그림 Ⅲ-11] CH4 폭발(8 vol%)에서 화염전파속도의 시계열 변화



[그림 Ⅲ-12] 농도 변화에 따른 CH4의 불균일성에 의한 화염전파속도의 변화

유사하게 수평 배관의 종단부에 접근할수록 감소하고 있다. 또한 불균일성이 증가할수록 화염면의 이동이 증가하고 있는데, 이러한 영향의 경향은 CH4보다 C₃H₄이 작게 나타났다. 착화 후의 경과시간이 100 ms에서 화염면의 이동을 보면, 그림 III-10에서와 같이 CH4이 0.21~0.36 m이지만 C₃H4에서는 0.48 ~0.59 m로서 C₃H4이 CH4보다 약 2배 빠른 것을 볼 수 있다. 5 vol%의 C₃H4에서 불균일성에 의한 화염전파속도의 시계열 변화를 [그림 III-14]에 나타냈다. 착화 후에 시간 경과에 따라 수평 배관의 우축 말단부로 도달할수록, 화염전파속도는 감소하는 경향을 보이고 있으며 불균일성에 따른 C₃H4 화염면의 이동 차이도 줄어들고 있다. C₃H4의 불균일성 및 농도에 따른 화염전파속도의 변화는 [그림 III-15]와 같다. 불균일성에 의한 화염전파속도는 농도에 따라 다소의 경향 차이는 보이지만 불균일성이 화염전파속도를 증대시키는 요인으로 작용하고 있다는 것을 나타내고 있다.



[그림 Ⅲ-13] C₃H₈ 폭발(5 vol%)에서 화염면의 이동 특성



[그림 Ⅲ-14] C₃H₈ 폭발(5 vol%)에서 화염전파속도의 시계열 변화



[그림 Ⅲ-15] 불균일성 따른 C₃H₈ 폭발 시의 화염전파속도
4. 폭발압력

1) 시간압력 특성

폭발배관 내에서 CH₄ 농도(9 vol%)의 불균일성에 의한 시간-압력 파형 예를 [그림 Ⅲ-16]에 나타냈는데, 노이즈 필터를 적용하지 않은 조건에서 측정된 결과이다. 착화 후에 압력은 시간에 따라 증가하여 최대가 된 후에 급격히



[그림 Ⅲ-16] CH₄(9 vol%) 폭발의 불균일성에 따른 시간압력 파형 예시

감소하고 있다. 초기의 압력 상승은 착화 후의 [그림 Ⅲ-8] 및 [그림 Ⅲ-9]와 같은 화염전파 특성에 의존하게 된다. 불균일성에 따른 시간-압력 파형을 비교해 보면, 불균일성이 가장 작은 C_{NU}=0.01에서 파형 변화 및 피크압력이 상대적으로

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

가장 작게 나타나고 있다. 반면에 불균일성이 증가(C_{NU} = 0.39, 0.76, 0.98)함에 따라 폭발압력이 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이와 같은 농도의 불균일성은 [그림 III-12] 및 [그림 III-15]에서와 같이 화염의 전파속도를 증가시키는데 이는 폭발압력의 상승으로 작용하여 위험성을 높이는 요인이 되고 있다. C₃H₈(5 vol%) 에서 노이즈 필터를 미적용한 시간-압력 파형 예시를 [그림 III-17]에 나타냈다. CH₄의 경우와 유사하게 불균일성이 증가할수록 파형 크기 변화와 폭발압력이 증가하는 것을 알 수 있다. 시간-압력 곡선 측정에 노이즈 필터(1.5 Hz cut-off)를



[그림 Ⅲ-17] C₃H₈(5 vol%) 폭발의 불균일성에 따른 시간압력 파형 예시

적용하면, [그림 III-18]의 C₃H₈(4 vol%)의 시간-압력 파형 예와 같이 작은 스케일의 과압 변화를 구분하기 쉽지 않은 것을 알 수 있다. 그러므로 본 연구 에서는 불균일성의 폭발과압 측정에 있어서 노이즈 필터를 적용하지 않았다.

Ⅲ. 불균일 가스혼합기의 화재폭발 위험성 평가



[그림 Ⅲ-18] Noise필터(1.5Hz cut-off)에 의한 C₃H₈(4 vol%)의 폭발압력 파형

2) 농도 불균일성에 의한 영향

불균일성 조건에 있어서 CH4 농도를 변화시키면서 폭발 시의 압력을 조사 한 결과는 [그림 III-16]과 같다. 불균일성 상태에서는 동일 농도라고 하여도 착화가 확률적으로 일어날 수 있기 때문에 동일 농도 조건에서 5회의 반복 실 험을 실시하였다. 농도 증가에 따라 폭발압력이 증가하여 화학양론농도보다 다소 높은 10 vol% 근방에서 최대가 되고 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 불균일성의 증가에 따라 일부 농도에서 경향성이 작게 나타나기는 하지만 전 체적으로 폭발과압에 미치는 영향이 증가함을 알 수 있다. 균일농도 조건 (C_{NU}=0.01)에서 혼합기 농도가 폭발하한농도로 감소하거나 또는 폭발상한 농도에 근접하여 증가할수록 착화가 확률적으로 일어나는 빈도가 증가하는데 이에 따라 폭발압력의 오차도 증가하는 경향이 확인되었다. 반면에 농도 불균 일성의 조건에서는 농도가 하한농도에서 화학양론농도로 증가하면 착화성이 증가하여 폭발시험의 재현성이 높아졌다. 폭발시의 압력 거동의 재현성은 균일혼합기(C_{NU}=0.01)에 비하여 불균일성이 증가(C_{NU} = 0.39, 0.76, 0.98) 할수록 감소하였다. 이러한 결과를 통해 불균일성이 혼합기의 착화성 및 폭발



[그림 Ⅲ-19] 농도 변화에 따른 CH4 폭발압력에서의 불균일성의 영향

발생 위험성에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. CH4의 농도 변화에 따른 폭발 시의 최대압력 도달시간(Time to peak pressure)을 [그림 III-20]에 나타냈다. 최대압력 도달시간은 혼합기의 착화 후에 폭발압력이 최대로 될 때까지 소요되는 시간을 의미한다. 최대압력 도달 시간은 농도 증가에 따라 감소하다가 화학양론농도(9.47 vol%) 근방의 10 vol%에서 최저값을 나타내며 그 이상의 농도에서는 증가하고 있다. 또한 불균일성이 증가할수록 최대압력 도달시간이 감소하는 경향을 보이고 있다. 폭발압력은 가연성가스 혼합기의 연소에 의해 발생한 발열량에 영향을 받으므로 최대폭발압력은 폭발 시에 연소된 가연성 기체의 체적량이라 할 수 있다. 최대압력 도달시간과 폭발압력의 시간적인 변화는 화염전파속도와 전파경로에 의해 결정된다. 그러므로 폭발범위 내의 혼합기 내부를 화염이 전파하는 경우에 있어서 압력 거동은 화염전파속도에 의존하는 것으로 보는 것이 타당하다. 이와 같은 관점에서 불균일성 혼합기에서 압력특성의 재현성이 낮아지는 원인으로는 화염전파속도와 화염의 전파 경로가 달라지기 때문이며 이는 가스 혼합기의 착화 시에 농도 분포가 불규칙적이며

Ⅲ. 불균일 가스혼합기의 화재폭발 위험성 평가



[그림 Ⅲ-20] 농도 변화에 따른 CH4 폭발 시의 최대압력 도달시간

이러한 농도 불균일성에 기인하는 것으로 판단할 수 있다. 농도 변화에 따른 C₃H₈ 폭발에 있어서 불균일성이 변화하는 조건에서 폭발압력 및 최대압력 도달시간에 미치는 영향을 각각 [그림 III-21] 및 [그림 III-22]에 나타냈다. C₃H₈의 폭발압력이 최대로 나타나는 농도 및 최대압력 도달시간이 최소로 나타나는 농도는 화학양론농도(4.02 vol%)보다 다소 높은 5 vol%에서 나타나고 있다. 또한 C₃H₈ 폭발에서의 불균일성에 따른 폭발압력및 최대압력 도달시간에 미치는 농도의 영향은 CH₄ 폭발에서와 유사한 경향이 나타나고 있다. C₃H₈에 있어서 불균일성에 의한 최대폭발압력은 CH₄보다 높지만, 최대압력 도달시간은 C₃H₈이 CH₄보다 작은 것을 알 수 있다.







[그림 Ⅲ-22] 농도 변화에 따른 C₃H₈ 폭발 시의 최대압력 도달 시간

Ⅲ. 불균일 가스혼합기의 화재폭발 위험성 평가

5. 폭발압력상승속도

1) 압력상승 경향

CH4 및 C3H8의 혼합기가 배관 내에서 폭발이 일어났을 때에 측정된 압력파형 예를 [그림 Ⅲ-16] 및 [그림 Ⅲ-17]에 나타냈다. 모든 시간-압력 파형이 착화 후에 압력이 급격하게 상승하여 직선적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 압력이 상승하고 일정 시간(수백 ms) 후에 피크압력이 나타나며 그 다음에 완만하게 압력이 감소하고 있다. 구형(Spherical container) 형태를 가진 폭발용기에서 폭발이 일어나게 되면 구상화염(Spherical flame)이 일정한 속도를 가지고 전 방향(All directions)으로 전파하게 되는데 이 때 발생하는 압력은 시간의 3승에 비례한다. 반면에 본 연구에서와 같이 장방형 배관에서 폭발이 일어나면 압력이 1차 함수적으로 전파하게 된다. 장방형 배관에서 착화가 일어나면 초기에는 구상화염의 형태로 전파하게 되는데 이 때에는 구형 폭발용기에서의 화염전파와 유사하게 일어난다. 그러나 화염면이 장방형 배관 내벽의 상부 및 하부에 도달 하게 되면 화염의 전파 방향이 제한을 받게 되므로 화염전파는 배관 내부의 수평방향(미연소 혼합기 있는 공간)으로만 진행하게 된다. 이에 따라 화염면적의 증가는 거의 이루어지지 못하며 배관의 단면적과 거의 동일한 화염면적을 가지며 전파하게 된다. 균일혼합기(C_{NU}=0.01)와 같은 조건에서는 화염면적이 일정하므로 연소속도가 변하지 않고 화염가속이 일어나지 않으므로 일정 속도의 화염전파속도가 관찰된다. 압력상승속도는 화염면적과 연소속도에 곱에 의해 비례하기 때문에 압력은 직선적으로 증가하는 경향을 나타내게 된다. 반면에 불균일(C_{NU} = 0.39, 0.76, 0.98) 혼합기에서는 화염면적이 늘어나며 연소속도의 증가로 이어지므로 폭발압력상승속도는 증가하게 된다.

2) 농도 불균일성에 의한 영향

불균일 농도에서의 CH4 및 C3H8의 폭발압력상승속도의 변화를 각각 [그림

III-23] 및 [그림 III-24]에 제시하였다. 각 농도에 있어서 CH₄ 및 C₃H₈의 폭발 압력상승의 최대값을 나타낸 것으로서, 압력상승속도는 농도 증가에 따라 증 가하다가 화학양론농도 부근에서 최대값이 되고 농도가 계속 증가하면 감소한 다. CH₄ 및 C₃H₈의 압력상승속도의 문헌값은 구형 용기 또는 배관 용기 등과 같이 시험장치의 형태에 따라 달라질 수 있다. 폭발용기가 단열 상태라고 한다 면 연소가스의 온도는 용기 체적에 관계없이 일정하므로 최대압력은 폭발용기 형태에 의존하지 않고 동일하게 된다. 그러나 폭발 시의 화염이 용기의 벽면과 접촉하여 열손실(Heat loss)이 일어나기 때문에 용기의 표면적이 증가할수록 열교환이 높아지며 폭발압력이 줄어들기 때문에 결국 압력상 승속도를 감소



[그림 Ⅲ-23] 불균일성에 따른 CH₄의 폭발압력상승속도의 변화

Ⅲ. 불균일 가스혼합기의 화재폭발 위험성 평가



[그림 Ⅲ-24] 불균일성에 따른 C₃H₈의 폭발압력상승속도의 변화

시키는 요인이 된다. 이러한 화염의 열적손실은 구형 용기 보다 배관형태의 폭발 용기에서 보다 크게 나타난다. 또한 압력상승속도를 감소시키는 요인으로서는 연소반응 시에 발생하는 수증기의 응축에 의한 열손실과 불완전한 연소반응에 의한 연소열 감소 등도 일어날 수 있다. CH₄ 및 C₃H₈의 혼합기에 있어서 폭발 압력상승속도에 미치는 농도 불균일성의 영향을 보면, 농도에 따른 차이는 보이지만 불균일성의 증가는 폭발압력상승속도를 증가시키는 요인으로 작용하고 있는 것을 알 수 있다.

6. 폭발강도지수

1) 밀폐공간에서의 가스폭발의 압력특성

밀폐공간에서 가연성가스가 누출되어 가연성-공기 혼합기가 형성되고 착화원이

존재하는 경우에는 화염전파가 일어나는데 공간 내부의 연소가스가 열팽창하여 압력이 급격히 상승한다. 공정이나 사업장 건물 내에서 이러한 압력팽창이 발생하면 장치나 건물 등이 파괴되거나 주변 작업자의 인명피해로 이어질 수 있다. 이러한 밀폐공간에의 최대폭발압력(P_{max})은 이하의 식으로 나타낼 수 있으며, P₁은 가스의 초기압, n1 및 n2는 폭발 전후의 mole수, T₁ 및 T₂는 폭발 전후의 가스온도를 나타낸다.

$$P_{\max} = P_1 \cdot \left(\frac{n2}{n1}\right) \cdot \left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

P_{max}를 알기 위해서는 폭발 후의 몰수(n2)와 화염온도(T2)에 대한 정보가 필요하며 이는 화학평형 계산에 의해 폭발시의 평균 분자량과 최대화염온도를 계산할 수 있다. 최대화염온도의 계산값은 폭발용기 내벽에의 열손실을 고려하지 않는 단열화염온도이기 때문에 실제 폭발에서의 화염온도보다 높은 값으로 계산 된다. 이와 같이 가스폭발 시의 P_{max}는 가스의 종류, 가스 농도, 초기압력, 온도, 폭발용기의 체적 등에 따라 변할 수 있다. 실제 폭발시험에서는 P_{max}가 관찰되는 가스 농도는 공기 중의 산소와 완전연소가 일어나는 화학량론농도보다 다소 높게 나타난다. 일반적으로 P_{max}는 초기압력에 비례하고 온도에 반비례하여 증가하는데, 폭발용기의 체적이 증가하면 단위 부피당의 용기 면적이 작아지므로 벽면에의 열손실 비율이 감소하여 P_{max}는 다소 높아지지만 이러한 영향은 크지 않다. 반면에 폭발용기 체적이 증가하면 P_{max}에 도달하는 데 걸리는 소요 시간이 증가하므로 압력상승속도(dP/dt)는 감소한다. [그림 Ⅲ-23] 및 [그림 Ⅲ-24]에서와 같이 폭발용기 내의 불균일성이 증가할수록 미연소 혼합기의 난류화에 의한 화염면 적이 증가하여 화염전파 속도가 증가하므로 최대압력상승속도([dP/dt]_m)가 증가하게 된다.

가연성 가스 및 증기의 폭발위험성에 있어서 피해평가를 위한 폭발 크기(강도)의 지표로는 최대폭발압력(P_{max}), 폭발압력상승속도([dP/dt]_m), 화염전파속도, 폭발

강도지수(K_G) 등이 사용되고 있다. 이 중에서 밀폐 폭발용기 내의 폭발압력 특성에 의해 얻어지는 K_G는 가스 및 증기의 폭발강도를 나타내며 최대압력 상승속도를 (dP/dt)_{max}, 폭발용기의 체적을 V라고 할 때 다음과 같은 식에 의해 정의된다.

$$K_G = \left(\frac{dP}{dt}\right)_{\text{max}} \cdot V^{\frac{1}{3}} \text{ [MPa·m/s]}$$

상기 K_G식은 폭발압력이 시간의 3승에 비례하여 증가한다고 하는 Cubic Law에 근거하고 있다. 또한 체적이 서로 다른 폭발용기에 있어서 동일한 형태의 폭발 용기, 동일 압력 및 동일 혼합가스, 동일한 점화원과 점화 위치, 유사한 기류상태 등과 같은 조건에서 폭발이 발생한 경우에는 거의 동일한 K_G를 얻을 수 있다는 것을 나타내고 있다. K_G은 폭발압력과 화염전파속도의 파라메타로 이루어져 있으며, 화염전파속도, 화염온도 및 최대폭발압력이 높아질수록 가스 폭발의 강도가 증가함을 나타내고 있다.

2) 농도 불균일성에 의한 영향

불균일성에 따른 CH₄ 및 C₃H₈의 혼합기에서의 K_G의 농도에 따른 변화를 [그림 III-25] 및 [그림 III-26]에 제시하였다. K_G의 최대값은 압력상승속도의 피크가 관찰되는 화학양론농도보다 다소 높은 농도에서 나타났다. 또한 불균 일성이 증가하는 경우에는 대부분의 농도 변화에 있어서 K_G가 증가하는 경향이 나타나고 있다. 본 연구에서 얻어진 불균일성에 따른 CH₄ 및 C₃H₈의 K_G는 각각 1.30~1.58 [MPa·m/s], 2.07~2.41 [MPa·m/s]가 얻어졌다. CH₄ 및 C₃H₈의 K_G 문헌값(NFPA 68, 2018)에서는 각각 5.5, 10.0 [MPa·m/s]가 제시되고 있는데, 문헌값은 본 연구의 K_G보다 약 4~5배가 큰 것을 알 수 있다. 이러한 차이의 원인으로는 K_G의 측정방법의 차이에 의한 것으로 판단된다.



K_G의 표준적인 측정은 구형 폭발용기의 용기 중심에서 착화를 실시하여 화염이 거의 동일하게 폭발공간을 전파하게 된다. 그러나 본 연구에서는 장방형의 수평배관에 있어서 배관 좌단 측면의 벽면에서 착화를 실시하고 있다. 이와 같이 배관내 벽면에서 착화한 경우에는 배관의 수평거리에 해당되는 화염전파거리 (약 0.82 m)가 수평 배관의 수직거리의 화염전파 거리(0.072 m)보다 약 11배로 길어지기 때문에 최대압력상승속도는 K_G의 표준측정의 경우보다 크게 감소하게 된다. 따라서 K_G값은 영향요인을 최소화하여 측정하기 위해서는 폭발용기의 형태와 착화위치 등을 검토할 필요가 있다. 그러나 본 연구에서는 불균일성이 K_G에 미치는 영향을 중심으로 검토하였으며, 그 결과를 통해 불균일성이 폭발 크기(강도)에 영향을 주어 폭발피해를 증가시키는 요인이 될 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 균일혼합기(C_{NU}=0.01)에서 불균일성(C_{NU}= 0.98)으로 변할 때의 K_G를 비교해 보면, CH₄에서는 증가율이 17.7 %, C₃H₈에서는 14.1 %의 증가율을 나타냈다.

7. 농도 불균일성을 고려한 폭발예방대책

압축 또는 액화가스를 저장하는 탱크나 가스를 사용하는 설비 등에서 누출이 일어나면 가스의 분출에 의해 공기 중에 난류성 가연성 혼합기를 형성하며 복잡한 형태의 농도장을 형성하게 된다. 이러한 가스의 농도장은 누출 속도와 누출량에 의해 농도 불균일성 및 혼합기 범위가 결정되게 된다. 저장탱크 등에서 누출이 일어날 때의 누출속도는 최초에는 매우 빠르지만 시간과 함께 감소하게 된다. 그러므로 누출 상태가 정지하더라도 일정 시간 동안에는 농도장의 불균 일성은 일정 크기의 규모로 남아 있게 된다. 시간이 지남에 따라서 가스농도의 불균일성은 공기 확산에 의해 감소하여 균일 혼합기를 형성하게 된다. 이와 같이 사업장의 장치, 설비에서 가스가 누출된 경우에는 작업장 내의 공기 기류와 함께 불균일성 혼합기가 형성될 가능성이 높다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 불균일성을 불균일 농도 및 미세 기류가 존재하는 조건으로 정의하고 불균일성의 크기에 따른 폭발 위험성을 조사하였다. 조사 결과에서와 같이 농도 불균일성이 존재하는 경우와 균일 혼합기에서 존재하는 경우의 폭발특성은 달라지므로 이에 따른 폭발피해도 구분하여 평가할 필요가 있다. 균일혼합기에서는 평균농도가 폭발범위 이외의 농도에서 착화원이 존재하여도 폭발발생 가능성이 매우 낮지만, 불균일 혼합기 조건이 되면 혼합기가 국소적으로 폭발범위 내의 농도를 가지는 공간이 존재하는 것이 가능하며 이러한 농도 공간이 착화원과 접하는 경우에 폭발이 일어날 가능성이 있다. 불균일성을 고려한 가스폭발의 피해 평가 방법을 [그림 III-27]에 제안하였다. 작업장과 같은 밀폐공간에서 가스누출이 일어난 경우의 폭발피해 평가를 위해서는 건물구조와 크기, 작업자 위치 및 장치의 배치 상황, 가스혼합기의 발생 상황, 누출가스의 종류와 발생 위치, 농도장 크기의 설정 등을 검토할 필요가 있다. 특히 농도장 크기의 설정에는 밀폐공간 내의 작업장 내의 발생 기류, 환기 등의 영향을 조사할 필요가 있으며, 이러한 영향요인이 존재하는 경우에는 폭발 피해 예측에 사용하는 문헌값에 농도 불균일성 영향을 함께 고려하여 평가할 필요가 있다.



[그림 Ⅲ-27] 불균일성에 따른 가스폭발의 피해예측 방안

Ⅳ. 폭발 시뮬레이션에 의한 위험성 평가

Ⅳ. 폭발 시뮬레이션에 의한 위험성 평가

1. 폭발 시뮬레이션의 개요

1) 폭발계산의 이론

본 연구에서 사용하는 3D 폭발시뮬레이션(VEXDAM)의 폭발 피해평가는 TNO multi-energy모델을 사용하고 있으며 폭발압력 및 지속시간의 계산이 가능하다. 증기운 폭발에 있어서의 연소열(E)의 계산은 식(4.1)와 같이 표현된다 (한우섭 등, 2016).

$$E = m_f \cdot h_c \tag{4.1}$$

식(4.1)에서 m_f는 연료 질량이며, h_c는 순 연소열이다. 또한 m_f와 증기운 체적 (V_c)의 관계는 식(4.2)와 같이 나타낸다.

$$V_{c} = (m_{f} \cdot R_{0} \cdot T_{\infty}) / (P_{\infty} \cdot MW_{f} \cdot C_{st})$$

$$(4.2)$$

식(4.2)에서 R₀는 일반 기체상수, T_∞는 주위 온도, P_∞는 주위 압력, MW_f는 연료의 분자량, C_{st}는 체적화학양론농도이다. 증기운 폭발에 따른 충격파(I)는 다음 식(4.3)과 같이 표현된다.

$$I = \int_{0}^{l+} P_p f(t) dt \tag{4.3}$$

함수 *f(t)*는 증기운 폭발에 의해 발생하는 충격파의 종류(이상 충격파, 비 이상 충격파, 압력파 등)에 따라 결정되며, *P*_p는 최대 과압(Peak static overpressure)

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

이다. 폭발과압과 양압지속곡선은 이상 충격파, 비 이상적 충격파, 그리고 압력파의 3가지 형태의 유형을 포함하며 각 파형은 서로 다른 파형을 가지고 있다. [그림 IV-1]은 충격파 중에서 이상 충격파(Ideal shock wave)의 형태를 개략적으로 나타낸 것으로서, *t*d는 양압 지속시간(Positive phase duration)을 의미한다. [그림 IV-1]에서 알 수 있듯이 이상 충격파는 과압에 의존하는 가로



[그림 Ⅳ-1] 이상적인 충격파 형태

축의 절반의 길이를 갖는 쌍곡선으로 취급되며, 이러한 형태를 기초로 폭발에 의한 충격(I)은 이상 충격파와 식(4.4)가 성립된다.

$$I = P_p t_d \left[s_0 + a^2 \frac{\ln \left(\frac{1 - s_0}{-s_0} \right)}{2} \right]$$
(4.4)

여기서 S₀ 및 α'는 이상 충격파 지수이며, α는 쌍곡선의 가로축 길이의 절반 으로서 다음과 같이 식(4.5) 및 식(4.6)으로 표현된다.

IV. 폭발 시뮬레이션에 의한 위험성 평가

$$S_{0} = \frac{-d^{2}}{2(1-d\sqrt{2})} \qquad a = a^{'} - s_{0}\sqrt{2} \qquad (4.5)$$

$$a^{'} = f(P_{p}) \qquad (4.6)$$

증기운의 반경과 높이와의 관계는 식(4.7)과 같다. 즉, 증기운 반경(*R*₀)은 증기체적 및 증기운 높이의 함수이며, 구형 증기운의 반경 (*R*_{0s})는 (4.7)에서와 같이 체적(*V*₀) 만의 함수이다. 또한 폭발과압의 감소(ΔP)는 다음 식 (4.8)과 같이 계산된다.

$$R_{0s} = \left(\frac{3 V_c}{4 \pi}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\Delta P = S_F \bullet P'_{12}$$

$$(4.7)$$

$$(4.8)$$

식(4.8)에서 SF는 방호펙터(Shielding factor)이며, SF와 방호펙터 파라메타 (Shielding factor parameter, V*)와의 관계는 식(4.9) 및 (4.10)과 같다.

$$S_{F} = (1 - V^{*2})^{0.5} \qquad V^{*2} \le 1$$

$$S_{F} = 0 \qquad V^{*2} > 1$$

$$V^{*2} = \sum_{i=1}^{3} \left\{ \left(\frac{\partial f_{i}}{\partial x^{*}} \right)^{2} + \left(\frac{\partial f_{i}}{\partial y^{*}} \right)^{2} + \left(\frac{\partial f_{i}}{\partial z^{*}} \right)^{2} \right\}$$
(4.10)

또한, 방호 구조물과 요소에 대해 100%의 손실 및 상해를 유발하는 폭발 과압을 P₁이라 하고, 방호 구조물과 요소에 대한 사고유발 압력을 P₂라 하였을때, P'₁₂(폭발압력)는 식(4.11)과 같이 정의되어 P₁과 P₂중에서 작은 값이 된다.

$$P'_{12} = \min(P_1, P_2) \tag{4.11}$$

2) 폭발평가 모델

장치나 설비에서 가연성가스를 취급하는 과정에서 누출에 의한 폭발이 일어날 수 있으며 이러한 폭발에 의한 압력증가가 과압(Overpressure)으로 나타난다. 폭발의 충격파에 후행하여 일어나는 동압(Dynamic pressure)은 가스속도에 의해 생성되어 나타나는 압력으로서 대부분의 시설이나 장치는 폭발 충격에 취약하다. 또한 임펄스(Impulse)는 시간에 대한 압력의 적분으로서 압력과 시간의 곱으로 표현된다. 이러한 폭발에 의한 구조물의 피해는 재료에 따라 달라지는데, 콘크리트 등의 재료는 과압에 취약한 반면에 교량, 전신주 및 타워 등과 같은 구조물은 동압에 의해 피해가 보다 크게 나타난다. 폭발에 의한 피해 정도를 예측하기 위해서는 먼저 장치 및 설비의 구조 취약성을 이해하는 것이 필요하며 이를 위해 폭발모텔에서는 압력(P)-충격(I) 다이어그램을 사용하여 가스폭발에 의한 구조물이나 재료의 피해를 예측한다.

본 연구에서는 BREEZE VEXDAM의 P-I 다이어그램을 사용하여 취약성 매개변수를 생성하여 다양한 구조물의 종류(24종)와 인체 피해 속성(19종)의 세부 조건을 지정할 수 있다. VEXDAM에서의 인적 및 구조물의 폭발피해 영 향평가는 폭발시나리오 모델에 따른 압력 계산, 차폐 효과, 2차 폭발, 펄스 지 속시간 효과, 손상-상해(Damage-injury) 수준 계산, 구조물의 세분화 사항 중의 일부 또는 전체를 고려하여 계산한다. 폭발피해 예측에 필요한 폭발 시나리오 모델은 폭발공간에서 1개 이상의 구조물과 배치 상황, 작업자의 위치로 구성된 작업장(시설) 내부와 누출원(폭심)을 결정한다. 누출원은 3차원의 X, Y, Z좌표를 지정하고 폭발효율(Explosive yield)을 설정한다. 증기운 폭발의 경우에는 연료 종류, 부분 증기운(Subclouds)의 수와 위치, 증기운의 질량이나 증기-공기 혼합물의 부피, 그리고 각각의 부분 증기운의 폭발강도를 입력한다. 폭발의 영향을 받아 피해평가의 대상이 되는 작업자(인체)의 위치 및 구조물(시설, 장치)의 배치도 X, Y, Z 좌표와 높이와 방향을 포함한 구조의 매개변수, 구조물을 구성 하는 재료, 크기, 용도 등의 내용을 코딩해야 한다. 특히 작업자(인체)의 지정은 X, Y, Z 좌표의 위치만이 아닌 자세 정보에 대한 설정이 가능하며 이를 위해 북쪽을 기준으로 각 작업자의 방향과 다양한 포즈(서 있거나 앉아 있는 등)를 지정할 수 있으며 각 신체 부위에서의 폭발에 대한 인체 취약성 정보를 사용할 수 있다. 이러한 작업자와 구조물의 특성 정보에 기반하여 1차 폭발에 의한 각각의 구조물과 작업자(인체)가 받는 압력을 계산할 수 있으며 폭발압력의 크기와 구조물 및 인체의 압력 취약성 정보에 따라 모든 구조물의 손상과 작업자의 부상 확률을 추정한다. 이러한 폭발모델링 결과를 활용하여 가스폭발에 의한 작업자 및 시설물의 피해 영향과 크기를 사전에 확인하고 인명 피해와 시설물의 손상을 최소화하기 위한 예방대책 계획을 수립하는데 활용할 수 있다.

2. 폭발 시뮬레이션의 시나리오 및 계산 조건

균일 및 불균일 가스혼합기 조건에서의 폭발위험성을 비교, 검토하기 위하여 미국 Trinity Consultants, Inc.에서 상업용으로 개발한 3D-폭발시뮬레이션 소프트인 VEXDAM(Vapor Explosion Damage Assessment Model)을 사용하였다. VEXDAM은 3차원 폭발공간에서의 가연성 가스 및 액체의 1차 폭발과 그에 동반하는 2차 폭발로부터 폭발공간 내의 구조물과 직업자에게 미치는 과압 피해를 평가하기 위한 폭발피해 평가 모델로서 과압분포 계산과 피해예측에 대한 확률적 평가가 가능하다. 이러한 평가를 위해 3차원 폭발공간 내에 위치한 작업자와 구조물이 위치하는 지점에서의 동압(Dynamic Pressure)과 과압(Overpressure)의 압력곡선을 사용하고 있다. VEXDAM에서의 폭발모델은 TNO Multi-energy Modeling을 사용하고 있으며 가연성 가스 등의 누출량, 가연성 물질의 순 연소열, 증기운의 반경, 대상물 거리, 폭발에너지 등에 대한 환산거리를 고려하고 충격파 곡선에 의한 평가 대상물과의 과압분포와 거리에 따른 피해 확률을 계산한다.

⟨표 IV-1⟩은 폭발 시뮬레이션에 사용된 CH₄의 계산 조건을 나타낸 것이다.
 불균일성에 따른 화염전파 및 과압 특성에 대하여 실험적으로 조사하였으며,
 불균일성이 폭발 위험성을 증가시키는 영향 요인임을 확인할 수 있었다. 실험

구분	상세
물질명	CH ₄
기온 (℃)	20
기압 (atm)	1
누출농도 (vol%)	9.5(Ø=1)
분자량 (g/mol)	16.0
순 연소열 (J/kg)	5.0 × 107
밀도 (kg/m³)	0.7168 (at 0°C, 1atm)
화학양론농도 (vol%)	9.5

〈표 IV-1〉 폭발 시뮬레이션에 사용된 CH₄의 계산 조건

조건과 동일한 폭발 스케일에 대하여 CH₄의 불균일성에 따른 과압 분포와 피해 영향평가를 폭발시뮬레이션을 통해 검토하였다. 3D 폭발시뮬레이션을 위한 폭발계산 공간은 [그림 IV-2]와 같이 [그림 III-6]의 가스폭발 실험장치와 동일 크기로 설정하였다. 실험에서 최대폭발압력은 화학양론농도 근방에서 나타났기 때문에, 폭발피해평가를 위한 누출농도는 〈표 IV-1〉과 같이 당량비(Equvalance ration)가 1이 되는 9.5 vol%로 정하였다. 농도 불균일성에 따른 시뮬레이션 방법 및 순서는 [그림 IV-3]과 같다. 불균일성이 폭발압력에 미치는 영향을 계산하기 위해서 폭발시뮬레이션에서의 CH₄ 농도 설정은 균일 및 불균일의 2가지로 구분하였으며, 폭발공간의 가연성혼합기는 여러 개의 증기운(Vaporclouds)의 합으로 구성되어 있는 것으로 가정하였다. 균일성(Uniform) 조건 에서는 13개의 모든 서브 증기운이 동일 농도(C1 : Ø=1)를 가지는 가연성 혼합기를 설정하였다. 반면에 불균일성(Non-uniform)에서는 2가지의 농도 불균일 조건을 설정하였다. 불균일성(Non-uniform)의 Case-I에서는 서로 다른 농도(C2 = 9.3 vol% 및 C3 = 9.7 vol%)의 서브 증기운이 서로 교차하여 존재하는 것으로 정의하였으며 평균농도가 Ø=1인 가스혼합기에 해당된다.

Ⅳ. 폭발 시뮬레이션에 의한 위험성 평가



[그림 Ⅳ-3] 농도 불균일성에 따른 시뮬레이션 절차

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

또한 불균일성(Non-uniform)의 Case-II는 서로 다른 농도(C2 = 9.0 vol% 및 C3 = 10.0 vol%)의 서브 증기운이 서로 교차하여 인접하여 존재하는 가스 혼합기(평균농도 Ø=1)로 설정하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

1) 균일 가스 혼합기

균일성(Uniform) 조건에서 CH₄의 혼합기 농도(∅=1)의 과압분포의 계산 결과를 [그림 IV-4]에 나타냈다. 본 폭발시뮬레이션의 목적은 농도 불균일성에 따른 과압분포의 영향을 평가하는 것이기 때문에 실제 폭발실험에서 나타나는 기류, 열손실, 화염전파에 따른 배관 벽면과의 전단류에 의한 화염면적의 변형 등과 같은 영향은 고려되지 않고 있다. 그러므로 시뮬레이션에서의 화염전파에 기인한 화염가속은 고려되지 않기 때문에 순수한 농도차이에 따른 연소속도의 가감속 등에 의한 결과라고 보는 것이 타당하다. 밀폐 장방형 배관 내에서의 화염전파 실험결과를 보면 착화 초기에는 화염이 빠르게 이동하다가 100 ms 이후에 일정 속도로 진행하며(그림 Ⅲ-10), 화염전파속도의 시계열 변화(그림 Ⅲ-11)에서도 초기 착화로부터 100 ms까지는 화염전파속도가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 초기 과압 분포에 영향을 줄 수 있기 때문에 [그림 Ⅳ-4]와 같이 착화가 일어나 화염전파가 시작되는 배관 좌단의 순간적인 폭발압력 분포가 높게 나타나는 것으로 추정된다. 그러나 이러한 일시적인 압력분포의 불균형은 시간이 지남에 따라 일정한 크기로 수렴하는데. [그림 Ⅲ-16] 에서 알 수 있듯이 폭발배관의 좌단 및 우단에 설치된 압력센서에 의해 측정된 폭발압력은 그 차이가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 또한 실제 실험에서 얻어진 폭발압력과 폭발 시뮬레이션에 의해 계산된 폭발압력은 차이를 보이고 있다. 이러한 원인으로는 실제 폭발현상에서 발생하는 혼합기의 기류는 화염면의 면적을 증대시키고 이는 화염전파속도를 증가시킴으로서 화염 전방의 미연 혼합기 속도를 가속화하기 때문으로 판단된다.

Ⅳ. 폭발 시뮬레이션에 의한 위험성 평가



[그림 IV-4] CH₄(∅=1, Uniform)의 폭발과압 분포의 계산

2) 불균일 가스 혼합기

불균일성 중의 Case-I 조건에서 CH₄의 혼합기(농도 *Φ*=1)의 과압분포의 계산 결과를 [그림 IV-5]에 나타냈다. 과압(Grid Over Pressure)은 좌측단의 음압 에서 우측단 양압의 10단계 레벨 값으로 표시되고 있다. 최고 양압(10단계)에서

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

주황색(8단계)의 5단계까지를 보면 과압 범위가 -1.5~1.13 atm으로서 균일 성(Uniform) 조건(그림 Ⅳ-4)에서의 과압 범위(-1.53~1.13 atm)보다 과압 분포가 좁은 것으로 계산되고 있다. 이는 불균일성 중의 Case-I 조건의 과압이 균일성(Uniform) 조건보다 다소 높게 분포되어 있음을 나타내고 있다. 이러한 불균일성 조건에 따른 과압 차이는 화염가속 등의 영향이 존재하는



[그림 IV-5] CH₄(∅=1, Non-uniform Case-I)의 폭발과압 분포의 계산

Ⅳ. 폭발 시뮬레이션에 의한 위험성 평가

실험결과보다 매우 작은 것을 알 수 있다. 불균일성 중의 Case-II 조건에서 CH₄의 혼합기(농도 Ø=1)의 과압분포 계산 결과는 [그림 IV-6]과 같다. 이 경우 에서는 최고 양압(10단계)에서 주황색(8단계)의 5단계까지의 과압 범위가 - 1.44~1.13 atm으로서 불균일성 중의 Case-I 조건(그림 IV-5)보다 다소 좁게 분포되어 있다. 이는 불균일성에 따른 폭발위험성이 미세하나마 영향을 주는 것으로 판단된다.



[그림 Ⅳ-6] CH₄(Ø=1, Non-uniform Case-II)의 폭발과압 분포의 계산

4. 폭발피해평가의 활용 방안

폭발피해평가에 있어서 농도 불균일성(Non-uniform)은 폭발 과압에 미세 하나마 영향을 주는 것으로 나타났다. 폭발시뮬레이션에서 농도 불균일성은 CH4혼합기(농도 Ø=1)에 대하여 0.4 vol% 및 1.0 vol%의 2개 조건의 불균일 농도 범위에서 평가하였다. 그 결과 폭발압력 분포가 균일성에 비하여 증가하는 영향이 나타났다. 다음으로 농도 불균일성 유무에 따른 가스폭발에 있어서 구 조물 및 작업자(인간)에 미치는 피해영향 평가를 실시하였다. 폭발과압에 따른 피해영향 판정 기준은 〈표 IV-2〉와 같다(한우섭 등, 2016). 과압분포의 색상에

구분	상세
청색 (No Injury & damage)	상해 및 건물 손상이 없음
밝은 청색 (Slight Injury & damage)	미세한 상해 및 손상으로 인체 장기 및 외상 발생 확률 이 5% 미만으로, 건물의 손상이 매우 작아 간단히 수 리가 가능함
밝은 청색~옅은 청색 (Moderate Injury & damage Level I)	인체 장기와 외상 발생 확률이 5~25% 미만이며, 일부 건물이 본래 기능을 하지 못하여 수리가 요구되는 손상
옅은 청색~옅은 노랑 (Moderate Injury & damage Level II)	인체 장기와 외상 발생 확률이 25~50% 미만이며, 건물의 효율적인 사용에 제한이 있어 수리에 큰 비용이 필요한 손상
노랑~옅은 주황 (Sever Injury & damage Level I)	인체 장기와 외상 발생 확률이 50~75% 미만이며, 구조물의 일부 재건축이 필요한 커다란 파손
주황~진한 빨강 (Sever Injury & damage Level II)	인체 장기와 외상 발생 확률이 75% 이상이며, 구조물 의 전체적인 재건축을 요하는 완전한 파손

〈표 Ⅳ-2〉 폭발과압에 따른 피해영향 판정 기준

따라 작업자의 부상 및 구조물의 손상이 발생할 확률이 달라지며 〈표 Ⅳ-2〉에 서와 같이 6단계의 레벨로 구분되어 노랑에서 진한 빨강으로 갈수록 부상 및 손상 발생 위험성이 증가한다.

농도 균일의 CH₄(*Ø*=1, Uniform) 조건에서의 폭발에 따른 피해 확률의 계산 결과를 [그림 IV-7]에 제시하였다. 밀폐공간에서의 폭발에 있어서 과압 분포의 차이는 크기 않지만 폭발피해 확률은 약 50~70 %로 나타나고 있다. 특히 폭심 (착화)이 일어나는 공간에서의 폭발피해 확률이 높게 나타나고 있으며, 화염전파가 종료되는 말단부로 갈수록 폭발피해 확률이 감소되고 있다. 반면에 농도 불균일성의 CH₄(*Ø*=1, Non-uniform Case-II)에서의 폭발피해 확률은 [그림 IV-8] 과 같다. 폭발피해 확률은 약 50~90 %로 나타나고 있으며, 농도 균일의 조건 (그림 IV-7)보다 크게 나타나고 있다. 이는 농도 불균일성의 차이가 1.0 vol%의 조건에서 보여준 결과로서 만일 농도 차이가 보다 증가하는 경우에는 폭발피해 확률도 증가할 수 있다. 실제 폭발사고에 있어서 이러한 농도 불균일성은 화염가속 등의 영향을 함께 동반할 수 있기 때문에 폭발 피해는 보다 증가할 수 있을



[그림 Ⅳ-7] CH₄(Ø=1, Uniform)에서의 폭발피해 확률



[그림 Ⅳ-8] CH₄(Ø=1, Non-uniform Case-II)에서의 폭발피해 확률

것으로 추정된다.

폭발위험장소의 가스 누출에 의한 폭발피해를 산정하는데 있어서, 주로 가스 농도와 관련된 누출량을 중심으로 조사하고 평가하는 경우가 많다. 그러나 본 연구의 결과에서와 같이 농도 불균일성은 화염전파속도를 증가시키고 이는 폭발압력의 증대로 이어지기 때문에 보다 현실적인 가스폭발사고의 피해평가를 위해서는 불균일성의 영향을 함께 검토할 필요가 있다. 불균일성의 폭발 특성을 실험적으로 평가하는 것이 쉽지 않기 때문에 폭발시뮬레이션을 활용하여 평가하는 경우에는 농도 불균일성 파라메타를 고려하여 보수적인 과압 분포 계산을 수행함으로써 보다 정확하며 효율적인 폭발피해 영향평가가 가능할 것으로 기대된다.



V. 결론

1. 주요 결과

연료용 가스를 취급하는 사업장의 폭발위험장소에서 가스 누출에 의한 화재 폭발사고 및 피해저감을 위해, 실제 설비의 누출 상황과 유사한 불균일 가스 혼합기의 폭발과압, 화염전파속도 등의 폭발특성을 조사하였다. 이를 위해 균일 및 불균일 농도조건에서의 폭발위험성 차이를 조사하여 폭발사고 피해예측에 활용할 수 있는 가스폭발 특성자료를 제시하고자 수행하였으며 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 연료용 가스의 화재폭발사고사례 조사 및 위험성 분석

- (1) 최근 5년간(2017~2021) 국내 연료용 가스의 중대재해사례 조사 결과, 사고원인물질은 LPG(프로판), 수소, LNG(메탄)의 순으로 많이 발생하고 있다. 또한 가스폭발사고의 점화원 비율은 용접작업 불티가 가장 많았고 다음으로 충격·마찰, 열원(가스 점화기, 불꽃, 라이터 등), 정전기 방전, 고온표면의 순으로 분석되었다.
- (2) 국내 가스별 구분에 따른 화재폭발사고 원인물질에 대한 조사결과에서 LPG, LNG, 부탄연소기, 고압가스의 순으로 발생빈도가 높았다. 특히 연료가스 구분에 따른 인명피해 발생 비율을 분석한 결과에서는 LPG, LNG, 고압가스의 순으로 높게 나타났으며, 가스 사고의 형태별 분석에 서는 폭발이 가장 많았으며 화재, 누출 순으로 많이 일어나고 있다.
- (3) 미국의 파이프라인에서 발생한 연료용(LNG) 가스의 화재폭발사고는 액체

이송, 가스이송 및 집결라인, 가스분배의 순으로 발생빈도가 높으며, 사망 및 부상자는 가스분배, 가스이송 및 집결라인, 액체이송의 순으로 많이 발생하고 있다.

(4) 국내외 연료용 가스의 사고실태 분석을 통하여 대부분의 사고는 LPG 및 LNG가 실내 또는 장치 내부 등의 밀폐 공간에서 발생하는 경우로서, 이러한 조건에서의 누출은 불균일성 가스 형성이 용이할 것으로 추정된다.

2) 불균일 가스 혼합기의 화재폭발 위험성 평가

- (1) 가스 불균일성의 정량화에 대해 폭발용기 내의 시간에 따른 농도 차이 변화를 회귀분석 모델로 검토하였으며, 이에 기반한 혼합기의 불균일성 (Non-uniform ; C_{NU})을 평균 가스농도에서의 혼합 후에 농도차이의 초기값(C_i)에 대한 지연시간에서의 농도 측정값(C_{dt}) 차이의 비율[C_{NU} = 1 - (C_i - C_{dt}) / C_i]로 제안하였다.
- (2) CH₄ 및 C₃H₈의 화염전파에서 불균일성이 증가할수록 화염면의 면적이 증대되는 것이 관찰되었는데 난류화염(Turbulent flame)에서 존재하는 주름 형태의 화염구조(Wrinkled flame)와 유사하였으며, 이는 화염 가속에 영향을 주어 폭발위험성을 증가시키는 원인으로 판단된다.
- (3) CH₄ 및 C₃H₈의 화염전파속도는 농도증가에 따라 화학양론농도(당량비
 1) 보다 높은 농도(CH₄은 10 vol%, C₃H₈은 5 vol%)에서 최대가 되며,
 불균일성의 증가가 화염전파속도를 높이는 요인이 되는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) CH₄ 및 C₃H₈의 폭발에 있어서 폭발 발생 재현성(착화 확률)은 불균일성이 증가할수록 감소하였으며 이러한 결과를 통하여 불균일성이 혼합기의

착화성(폭발 발생 위험성)에 영향을 주는 것으로 나타났다. 이러한 원인 으로는 불균일성이 가스혼합기 착화 시의 농도 분포의 불규칙성을 증가시켜 화염의 전파 경로에 영향을 주기 때문인 것으로 추정된다.

- (5) CH₄ 및 C₃H₈의 폭발특성에 있어서 최대압력 도달시간(Time to peak pressure)은 불균일성이 증가할수록 감소하였으며, 폭발압력은 불균일성이 증가할수록 증가하였다. 또한 C₃H₈에서의 불균일성에 의한 최대 폭발 압력은 CH₄보다 높았지만 최대압력 도달시간은 C₃H₈이 CH₄보다 작게 나타났다.
- (6) CH₄ 및 C₃H₈의 폭발에서 폭발압력상승속도는 불균일성이 증가할수록 폭발압력상승속도가 높아지는 경향을 보였다. 압력상승속도는 화염면적과 연소속도에 곱에 의해 비례하기 때문에 압력은 직선적으로 증가하는데, 불균일성이 증가하면 화염면적이 늘어나며 연소속도의 증대로 이어지므로 폭발압력상승속도를 증가시키는 것으로 판단된다.
- (7) CH₄ 및 C₃H₈ 혼합기에 있어서 농도 불균일성에 따른 CH₄ 및 C₃H₈의 K_G(폭발강도)의 범위는 각각 1.30~1.58 [MPa·m/s] 및 2.07~2.41 [MPa·m/s]가 얻어졌으며, 불균일성이 증가하는 경우에는 대부분의 농도 변화에 있어서 증가하였다.
- (8) 균일성(C_{NU}=0.01)에서 불균일성(C_{NU}= 0.98) 혼합기로 변할 때의 K_G의 증가율 CH₄에서는 17.7 %, C₃H₈에서는 14.1 %로 나타났다. 이러한 결과를 통해 불균일성은 폭발크기(강도)에 영향을 주어 폭발피해를 증가 시키는 요인이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.
- (9) 가스폭발사고의 피해예측에 사용하는 문헌값에 농도 불균일성 영향을

함께 고려하여 평가하는 "불균일성에 따른 가스폭발의 피해예측 방안"을 제안하였다.

3) 폭발시뮬레이션에 의한 실험결과 조사 및 타당성 검토

- (1) 실험조건과 동일 스케일의 폭발공간에 대해 폭발시뮬레이션을 실시한 결과, CH₄의 과압분포는 불균일성의 증가에 대해 미세한 증가를 나타냈지만 이러한 불균일성 조건에 따른 과압 차이는 화염가속 등의 영향 요인이 존재하는 실험결과보다는 매우 작았다.
- (2) 실험과 유사한 조건에서의 CH₄의 폭발피해 확률에 대한 시뮬레이션 결과, 농도 균일성 및 불균일성 조건의 폭발피해확률은 각각 50~70% 및 50~90 %가 얻어졌는데 농도 불균일성이 폭발피해 위험성을 높이는 것으로 판단되며 이는 실험에서의 폭발강도(K_G) 결과와 유사한 경향을 나타냈다.

2. 활용 방안

사업장에서 가연성 연료(메탄, 프로판 등)를 사용하고 있는 장소는 대부분 폭발위험장소로 구분되어 있다. 이러한 연료가스를 사업장의 건물 내에서 사용하는 경우에는 가스의 누출 위험성이 상존하고 있다. 또한 건물에는 다양한 장치와 구조물이 설치되어 있으며 환기 등에 따른 공기 기류가 존재하는 경우도 많다. 그러므로 대부분의 사업장의 작업 조건에서 가스 누출이 발생하면 혼합기의 농도가 균일하게 확산되는 경우는 거의 없으며 다양한 구조물에 의해 난류성 기류의 발생 가능성도 있다. 가연성 혼합기의 형성은 밀폐공간의 체적, 기체종류, 누출량, 환기율, 공기 유입 등에 따라 달라질 수 있다. 건물의 체적이 클수록 내부에서 누출된 가연성 혼합기가 균일한 농도로 되는 것은 쉽지 않다. 건물 내
체적의 증가는 내부 전체의 확산시간, 국소적인 공간의 확산, 대류 및 환기의 특성 등과 같은 다양한 요인에 의해 공간 내의 전체적인 농도가 균일하게 될 가능성은 매우 작다. 기류가 존재하지 않는 작업장은 반도체 공정 등과 같은 특수한 경우를 제외하고 거의 없기 때문에 가스가 누출하면 농도 불균일성만이 아닌 기류도 함께 형성이 된다. 그러므로 가스 누출은 기류를 포함한 농도 불균일성을 함께 형성하고 있다고 보는 것이 타당하다. 폭발압력은 가스의 발열속도에 의존하기 때문에 가스의 누출량은 폭발특성의 중요 요인에 해당된다. 농도가 불균일한 경우에는 혼합기에 화염이 전파하더라도 잔류 미연소 가연성 가스 및 산소와의 확산연소에 의해 피크 압력이 여러 개가 발생할 수 있다. 그러므로 농도 불균일성의 가스폭발에서는 해당 공간에서의 가스 누출량이 폭 발압력을 지배하는 것이 아닌 연소 형태에 의해 폭발특성이 좌우되는 경우도 일어날 수 있다. 이와 같이 폭발압력 특성은 혼합기 농도가 불균일한 조건에서는 불균일성에 의존하게 되며, 건물 내 체적이 클수록 균일성 농도가 될 가능성이 거의 없기 때문에 가스 누출량이 클수록 불균일성에 의한 폭발특성 효과를 적극적으로 고려할 필요가 있다.

이상과 같은 관점에서 폭발위험장소에서의 가스누출의 경우에는 기류가 존재하는 농도 불균일성으로 정하여 폭발압력 및 과압분포를 조사하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 [그림 III-27]와 같은 불균일성을 고려한 가스폭발의 피해 평가법을 제안하였으며, 또한 농도 불균일 조건에서의 가스폭발에 따른 피해확률의 계산 예(그림 IV-7)를 제시하였다. 문헌자료의 폭발특성값 만이 아닌 가스 농도장 설정에 있어서 누출량, 밀폐공간 내의 기류, 환기 등을 조사하고 농도 불균일성 영향을 함께 고려하여 과압분포를 평가할 필요가 있다. 이러한 평가 방법을 통하여 폭발위험장소의 가스폭발에 의한 폭발피해 영향을 효율적으로 조사하여 사고 저감대책에 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- Andrews, G.E., Bradley, D., "The Burning Velocity of Methane-Air Mixtures", Combustion and Flame;1972;19(2):275-288
- BAE, J.I., et al., "Explosion Characteristics of Nonhomogeneous LPF-Air Mixtures", Journal of KIIS;1993;8(4):114-119
- Dobashi, R., "Experimental Study on Gas Explosion Behavior in Enclousure", J. Loss Prevent. Proc. Ind.;1997;10(2):83-89
- FracTracker Alliance, Annual Report;2020
- Glassman, I., Combustion : 3rd Ed., Academic Press;1996
- Harayama, M., Ohtano, H., Hirano, T., Akita, K., "Explosion of Combustible Gaseous Mixtures with Non-Uniform Concentration Distrbution", Japan Society for Safety Engineering;1980;19(5): 266-271
- Hirano, T., Gas Explosion Prevention Technology, Kaibundo;1984
- Hjertager, B.H., Bjørkhaug, M., Fuhre, K., "Explosion Propagation of Non-homogeneous Methane-air Clouds inside an obstructed 50 m³ vented vessel", Journal of Hazardous Materials;1988;19(2): 139-153
- Kadowaki S., Suzuki H., Kobayashi H., "The Unstable Behavior of Cellular Premixed Flames induced by Intrinsic Instability", Proc Combust Inst;2005;30:169-176

- KIM, S.S., et al., "Effect of Non-uniform Concentration on Gas Explosion", KIGAS;2003;7(4):14-19
- KGS, 한국가스안전공사 가스사고 통계; 2021

KOSHA 화재폭발 중대재해 사고사례; 2021

- Kundu, S.K., Zanganeh, J., Eschebach, D., Moghtaderi, B., "Explosion Severity of Methane-Coal Dust Hybrid Mixtures in a Ducted Spherical Vessel", Powder Technol;2018;323:95-102
- Mishra, S., Mishra, K.B., "Numerical study of large-scale LNG Vapour Cloud Explosion in an Unconfined Space", Process Safety and Environmental Protection;2021;149:967-976
- NFPA 68, "Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting"; 2018
- OH, K.H., "A Study on the LPG Explosion Characteristics of Non-uniform Concentration", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.;2003;17(4):111-116
- Planas, E., Pastor, E., Casal, J., Bonilla, J.M., "Analysis of the Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) of a Liquefied Natural Gas Road Tanker : the Zarzalico accident", J. Loss Prev. Process Ind.;2015;34:127-138
- Sochet, I., Lamy, T., Brossard, J., "Experimental Investigation on the Detonability of Non-uniform Gaseous Mixtures", Shock Waves; 2000;10:363-376

- Ushiki, H., "Nonuniformity of Space-Time Concept in Condernsed Matters", Polymer Journal, The Society of Polymer Science;1985; 44(11):726-731
- Xinming Q., Ruoheng Z., Qi Z., Mengqi Y., Yao Z., "Cause Analysis of the Large-Scale LPG Explosion Accident Based on Key Investigation Technology : A Case Study", American Chemical Society;2021;6(31):20644–20656
- 한우섭 등, 화재폭발 영향도 및 사고 해석 모델 연구(I), 산업안전보건연구원 자체연구과제 보고서; 2016

Abstract

A Study on the Fire and Explosion Characteristics of Non-uniform Gas Mixtures in Hazardous Area

Objectives : Fuel gases such as methane and propane are used in explosion hazardous area of domestic plants and can form non-uniform mixtures with the influence of process conditions due to leakage. Fire and explosion accidents due to fuel gas leaks occur repeatedly every year. In the case of evaluating the fire-explosion risk assessment using literature data measured under uniform mixtures, damage prediction can be obtained the different results from actual explosion accidents by gas leaks. We investigated the explosion characteristics such as explosion pressure and flame velocity of non-uniform gas mixtures with concentration change similar to that of facility leak.

Method : We surveyed the fire and explosion accidents and risk of fuel gases in korea and abroad. And experiments were conducted in a closed 0.82 m long stainless steel duct and cross section of 0.072 x 0.072 m with observation window installed the side of the duct. The flame were recorded by color high-speed camera and piezo pressure sensor was installed at the top side of duct to measure the explosion pressure. Also we investigated the overpressure distribution and damage evaluation under the same conditions as the experiment using 3D explosion simulation.

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구

Results: As a result of the investigation of major accidents in domestic fuel gas explosion in the last 5 years (2017-2021), most of the accidents occurred in the order of LPG(propane), hydrogen, and LNG(methane). The proportion of casualties caused by fuel gas classification was highest in the order of LPG, LNG, and high-pressure gas. In the analysis by type of gas accident, accidents occur most frequently in the order of explosion, fire, and leakage. Fire and explosion accidents of Fuel(LNG) occurred in the order of liquid transfer, gas transfer and collection line, and gas distribution. From a regression analysis model on the change of concentration difference with time in explosion duct, we proposed the guantification method of non-uniform mixtures. The area of flame surface enlarged with increasing the concentration non-uniform in the flame propagation of methane and propane and was similar to the wrinkled flame structure existing in a turbulent flame. The flame propagation velocity of methane and propane was maximized at a concentration(CH₄ was 10 vol%, C_3H_8 was 5 vol%) higher than the stoichiometric concentration (equivalent ratio of 1) and increased with the increase of the non-uniform. The time to peak pressure of methane and propane decreased as the non-uniform increased, and the explosion pressure increased with increasing the non–uniform. The ranges of $K_{G}(explosive index)$ of methane and propane with the concentration non-uniform were 1.30 to 1.58 [MPa·m/s] and 2.07 to 2.41 [MPa·m/s], respectively. The increase rate of K_G was 17.7% in methane and 14.1% in propane with changing from uniform to non-uniform. In the simulation results for the explosion damage probability of methane under conditions similar to those of the experiment, the explosion damage under the conditions of uniform and non-uniform was $50 \sim 70\%$ and $50 \sim 90\%$, respectively.

Abstract

Conclusion : Explosion characteristics depend on the non-uniform of the mixture concentration under non-uniform conditions. The non-uniform concentration is difficult to achieve a uniform concentration as the volume within the building increases. For the case of gas leakage in an explosive location, it is necessary to investigate the explosion pressure and overpressure distribution by determining the concentration non-uniform in which the air flow exists. Therefore, it is possible to efficiently investigate the injury-damage caused by gas explosion in hazardous area by using the evaluation method in non-uniform gas explosion proposed in this study.

Key words : Gas Explosion, Non-Uniform, Explosion Pressure, Flame Propagation Velocity, Explosion Index

연구기관: 산업안전보건연구원 연구책임자: 한우섭(부 장, 산업안전연구실)
연구책임자: 한우섭(부 장, 산업안전연구실)
연 구 원 : 임신호 (사 상, 산업안선연구철) 연 구 원 : 최이락 (연구위원, 산업안전연구실) 연 구 원 : 김형욱 (대 리, 산업안전연구실)
연구기간

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며, 우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

폭발위험장소의 불균일 가스혼합기에 의한 화재폭발 위험성 연구 (2022-산업안전보건연구원-749)

발 행 일 : 2022년 11월 30일발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 김은아연구책임자 : 산업안전연구실 부장 한우섭별 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원주 소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400전 화 : 042-869-0331택 스 : 042-869-9002Homepage : http://oshri.kosha.or.krI S B N : 979-11-92782-09-6