

연구보고서

# 화학물질의 폭발사고 피해예측 및 적용방안 연구

한우섭·한인수·최이락

산업재해예방  
안전보건공단  
산업안전보건연구원





## 요 약 문

### 1. 연구제목 : 화학물질의 폭발사고 피해예측 및 적용방안 연구

### 2. 연구 필요성 및 목적

화학물질에 의한 폭발사고를 저감하기 위해서는 사고발생 전에 피해 최소화를 위한 예방대책을 충분히 검토해야 한다. 그러므로 화학사고와 같은 비정상상태에 따른 화재, 폭발, 누출, 확산 등에 의한 화재폭발사고 피해예측까지 고려하는 종합적인 안전대책이 필요하다. 또한 화학사고의 예방대책에는 폭발에 따른 사전 피해 예측자료나 신속한 폭발사고피해에 대한 추정자료를 통하여 이에 근거한 안전대책 수립이 요구된다. 이를 위해서는 화학물질의 정량적 위험성에 대한 실험적 자료를 활용하여 해당 물질의 화재폭발사고 피해예측을 통한 폭발사고영향평가 자료를 확보하는 것이 중요하다. 화학물질은 안전보건상 산업안전보건법에서 위험물질로 규정하고 있으며, 위험물질은 모두 7종(폭발성 물질 및 유기과산화물, 물반응성 물질 및 인화성 고체, 산화성 액체 및 산화성 고체, 인화성 액체, 인화성 가스, 부식성 물질, 급성 독성 물질)으로 분류하고 있다. 특히 이러한 위험물질 중에서 인화성 가스에 의한 화재폭발사고는 다양한 산업분야에서 가스가 사용된 이후로 계속하여 발생하고 있다. 가스폭발사고에 의한 피해는 대부분 심각한 결과를 초래하기 때문에 폭발사고 방지대책을 검토하기 위해서는 폭발특성, 폭발 발생과정을 상세히 조사하는 것이 필요하지만, 그 밖에도 폭발피해에 대한 예측 등의 적용방안이 이루어진다면 피해 저감이나 사고발생 억제를 위한 대책강구에 활용할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실험에 기초한 폭발모델로서 지금까지 가장 많이 사용되고 있는 계산모델의 결과를 비교, 분석하여 그 적용성을 검토하였다. 가스폭발 시의 피해예측에 가장 많이 사용되고 있는 TNT Equivalent method을 비롯하여 가스폭발

의 특성인 폭연 폭발의 강도를 표현할 수 있는 TNO Multi-Energy method, 그리고 화염전파속도(Flame expansion speed) 예측을 위한 Baker-Strehlow method를 사용하여 가스 누출 시의 폭발시나리오에 따른 피해예측결과를 검토하였다. 그리고 폭발시물레이션 결과와 비교하기 위해 메탄가스 폭발 시의 화염전파특성을 실험적으로 조사하였다. 구체적인 실험내용은 메탄-공기혼합기 농도에 따른 폭발압력과 화염온도를 조사하고, 메탄의 연소가스 조성을 고려한 화염온도의 계산 및 밀폐 공간 내의 메탄 가스폭발 시의 화염전파속도를 검토하였다. 메탄가스 폭발사고에 의한 피해 시물레이션으로서 VEXDAM(Vapor Explosion Damage Assessment Model)을 활용하여 지형 조건, 건물 형태, 건물 재료의 구조적 취약성을 고려한 3차원 공간의 폭발에서 인명손실과 설비피해 확률을 예측하였으며, 이러한 결과들을 근거로 폭발피해영향평가 결과의 활용과 적용성 방안을 제시하였다.

### 3. 연구내용 및 방법

#### (1) 연구내용 및 범위

- 화학물질에 의한 폭발사고사례조사 및 분석
- 화학물질의 위험성 해석 및 피해평가방법 조사
- 평가 대상 화학물질의 폭발특성값에 대한 실험적 검토
- 사업장과 유사한 3차원 공간에서의 폭발피해영향 조사
- 화재폭발 피해평가법 활용방법 검토

#### (2) 연구방법

- 국내 화학사고사례의 폭발원인물질 및 피해조사
- 사고 시나리오에 따른 폭발과압영향 및 피해위험영역 조사
- 폭발사고 피해평가모델 및 정량적 실험자료를 활용하여 실규모 3차원 공간을 가정한 건물, 시설, 장치를 고려한 폭발과압을 평가하고 인적 및 물적피해 영향을 조사
- 폭발피해 영향평가 결과의 활용 및 적용성 방안의 제시

## 4. 연구결과

- (1) 메탄가스의 농도변화에 따른 폭발압력을 조사한 결과 9.6 vol%에서 0.861 MPa로서 최대가 되었다.
- (2) 최대폭발압력 도달시간은 농도에 따라 변화하는데 이론적 화학양론농도 (Cst)인 9.47 vol% 부근에서 가장 작았으며 Cst를 기준으로 그 이하 또는 이상의 농도에서는 증가하였다.
- (3) 메탄 농도에 대한 폭발압력과 최대폭발압력 도달시간은 반비례 관계인 것을 실험결과를 통해 확인할 수 있었다.
- (4) 메탄의 연소반응에 있어서 11종( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}$ )의 연소가스를 고려한 화학반응식을 제시하고 단열화염온도를 계산한 결과 최대 화염온도는 이론혼합비(9.4 vol%)보다 높은 농도인 9.5 vol%에서 2018.75℃의 값이 얻어졌다.
- (5) 메탄가스의 폭발시에 생성되는 연소가스의 물분율을 가스농도에 따라 계산한 결과, 농도로 증가할수록 산소( $\text{O}_2$ )가 급격히 감소하고  $\text{CO}$ 가 반대로 증가하여 불완전연소가 급증하는 것을 알 수 있었으며 연소반응에 관여하지 않는  $\text{N}_2$ 는 가스농도에 관계없이 일정하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- (6) 메탄 폭발시의 초기압력이 단열화염온도에 미치는 영향을 추정된 결과 초기압력이 10 atm까지 증가할수록 단열화염온도도 증가하였으나 10 atm 이상에서는 농도에 관계없이 이러한 경향은 감소하였다.
- (7) 초기압력 조건이 메탄의 화염온도에 미치는 영향을 계산한 결과 이론혼합비에서 초기 압력에 의한 영향이 가장 크며 이론혼합비보다 농도가 증가하거나 감소하는 경우에는 영향이 감소하고 있다. 특히 이론혼합비 이외의 농도에서는 초기압력이 10 atm이상이 되면 단열화염온도에의 영향이 무시될 정도로 작았다.
- (8) 메탄의 농도 변화에 따른 폭발압력( $P_m$ )을 추정하기 위해서 단열화염온도 및 각 분자종의 물분율(Mole fraction)를 고려한  $P_m = \{(\sum n_i RT) / V_0\}$ 의 식을

- 이용하여 계산한 결과 메탄 농도 8~12 vol%에서 폭발압력의 실험값은 계산 값과 거의 일치하였지만 그 이외의 폭발한계농도에서는 큰 오차를 나타냈다.
- (9) 동일 폭발사고시나리오에 대하여 TNT Equivalent model, TNO Multi-Energy model, Baker-Strehlow model의 계산결과를 분석한 결과 250 m 이상의 거리에서는 각 모델 간의 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다.
- (10) 200 m 이하의 거리에서 폭발과압은 Multi-Energy model과 Baker Strehlow model의 결과는 0.24~0.25 bar로서 거의 같았으며, Equivalent TNT Mass model의 결과는 0.06 bar로서 실제보다 과소평가 되고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 계산 결과를 실제 사고피해 상황과 비교, 검토하면 모델의 적용 및 활용성 향상이 가능할 것으로 판단된다.
- (11) 메탄 누출에 의한 폭발피해영향평가를 3차원 공간을 가정한 사업장을 대상으로 실시하여 폭발과압에 의한 폭심으로부터의 거리에 따른 건물 및 사람에 대한 피해확률분석을 실시하였으며 이러한 결과를 통하여 사고조사 및 안전대책에 활용할 수 있음을 확인하였다.

## 5. 활용방안 및 기대성과

- (1) 화학물질의 화재폭발 피해예측평가 정보를 제공하여 동종 화학사고 예방에 기여
- (2) 화재폭발 피해평가의 정량적인 위험성 정보를 통한 공정시설 및 근로자의 안전 확보
- (3) 화학사고의 피해예측 및 화학물질의 폭발위험성 조사를 위한 기초자료 제공

## 6. 중심어

화학물질, 가스폭발, 폭발압력, 화염온도, 화염속도, 폭발시뮬레이션(Chemical materials, Gas explosion, Explosion pressure, Flame temperature, Flame velocity, Explosion simulation)

## 7. 참고문헌 및 연락처

### 가. 참고문헌

- AIChE : Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases (2000).
- Brasie W.C. and Simpson D.W., "Guidelines for Estimating Damage from Chemical Explosions", Symp. on Loss Prevention in Process Industries, 63rd AIChE Meeting, St. Louis, Missouri, USA. (1968)
- Berg van den A.C., "The Multi-Energy Method. A Framework for Vapour Cloud Explosion Blast Prediction", J. Hazard. Mater. 12:1-10, (1985).
- Berg van den A.C, and Lannoy A., "Methods for Vapor Cloud Explosion Blast Modelling", J. Hazard. Mater. 34:151-171, (1993).
- Berg van den A.C., Voort van der M.M., Weerheijm J., and Versloot N.H.A., "Expansion-controlled Evaporation: A Safe Approach to BLEVE Blast", J. Loss Prev. Proc. Industr. 17:397-405, (2004).
- CCPS AIChE : Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards Second Edition (2010).
- Eggen, J.B.M.M., Development of Guidance for the Application of the Multi-energy Method, TNO Prins Maurits Laboratory, The Netherlands, (1998).
- Mercx, W.P.M., Van den Berg, A.C., Hayhurst, C.J., Robertson, N.J.
- Moran, K.C., Developments in vapour cloud explosion blast modelling, J. Hazard, 71, 301-319 (2000).
- Turner, T. and Sari, A., Vapor Cloud Explosion Prediction Methods – Comparison of TNO Multi-Energy (ME) and Baker-Strehlow-Tang

(BST) Models in Terms of Vulnerability of Structural Damage Caused by an Explosion. Structures Congress, 177-188 (2012).

## 나. 연락처

연구책임자 : 화학물질센터 한우섭 연구위원

연구원 담당자 : 산업안전보건연구원 화학물질센터 한우섭 연구위원

연락처 : T:042-869-0321 F:042-863-9002 E:hanpaule@kosha.or.kr



## 차례

<b>I. 서론</b>	<b>1</b>
1. 연구 배경	1
2. 연구 기간	2
3. 연구 내용 및 범위	2
<b>II. 공간 조건에 따른 폭발 및 피해특성</b>	<b>5</b>
1. 개방공간에서의 폭발	5
2. 밀폐공간에서의 폭발	6
3. 부분 개방공간에서의 폭발	8
4. 폭발에 의한 피해의 요인	8
5. 폭발피해의 저감 및 대상	10
<b>III. 밀폐공간 내 폭발현상의 측정과 예측</b>	<b>13</b>
1. 최근의 가스폭발사고 경향	13
2. 밀폐계의 가스폭발특성	15
3. 폭발압력과 화염전파	18
4. 단열화염온도	22
5. 화염전파속도	29
<b>IV. 폭발피해의 예측 및 적용</b>	<b>31</b>
1. 피해예측 모델의 조사	31
2. 폭발피해예측 결과의 비교 및 분석	38
3. 사업장의 폭발피해평가 사례	41

Ⅵ. 결 론 .....	55
1. 조사 및 분석 결과 .....	55
2. 폭발 피해예측 적용방안 .....	57
참고문헌 .....	59
Abstract .....	61

## 표 차례

〈표 1〉 최근 발생한 탄화수소가스의 폭발사고사례 .....	14
〈표 2〉 메탄(CH <sub>4</sub> )의 물리화학적특성 .....	16
〈표 3〉 진공펌프의제원 .....	17
〈표 4〉 Mach number에서의 화염전파속도 .....	37
〈표 5〉 프로판의 물성값 및 계산 조건 .....	38
〈표 6〉 폭발예측모델 계산 조건 .....	39
〈표 7〉 폭발예측모델에 따른 계산 결과 .....	40
〈표 8〉 가스폭발사고 피해예측 모델의 적용성 고찰 .....	40
〈표 9〉 폭발원인물질 및 기상 조건 .....	46
〈표 10〉 폭발피해 판정 기준 .....	50

## 그림 차례

[그림 1] 가스폭발 밀폐용기의 개요	17
[그림 2] 메탄 농도 변화에 따른 최대폭발압력	18
[그림 3] 메탄농도에 따른 최대폭발압력 도달시간	21
[그림 4] 메탄의 폭발압력과 최대압력도달시간의 비교	21
[그림 5] 단열화염온도의 계산방법	25
[그림 6] 메탄의 농도에 따른 단열화염온도	25
[그림 7] 메탄 폭발시의 연소가스의 물분율	26
[그림 8] 메탄 폭발시의 폭발압력의 추정	27
[그림 9] 초기압력 변화에 따른 메탄 폭발시의 단열화염온도	28
[그림 10] 초기온도에 따른 메탄 폭발시의 단열화염온도	28
[그림 11] 메탄 가스폭발 시의 화염전파속도	29
[그림 12] 환산거리에 대한 과압곡선(By Brasie & Simpson)	34
[그림 13] TNO multi-energy model의 계산 흐름도	34
[그림 14] 폭발과압의 강도계산에 따른 환산 거리에 대한 환산 과압	35
[그림 15] Baker-Strehlow model의 계산 흐름도	36
[그림 16] Baker-Strehlow model의 환산거리에 대한 환산과압 곡선	37
[그림 17] 프로판 가스 누출에 의한 폭발사고 모습	38
[그림 18] 폭발피해모델에 따른 환산거리에 대한 폭발과압 계산 결과	39
[그림 19] 이상적인 충격파 형태	42
[그림 20] 폭발피해예측을 위한 사업장의 단면도 (1 mesh=5m)	46
[그림 21] 3차원 공간에서의 건물 및 작업자의 위치 현황	47
[그림 22] 폭발계산을 위한 격자 구조	49
[그림 23] 폭심 주변의 건물 및 작업자 위치	49

[그림 24] 폭심 주변의 과압 분포도 .....	51
[그림 25] 폭발 건물 주변의 3차원 과압분포 .....	52
[그림 26] 폭발원에서부터 거리에 따른 사상자 발생 확률 .....	53



# I. 서론

## 1. 연구 배경

화재폭발사고는 인적 또는 물적 피해를 동반하는 경우가 많기 때문에 사고발생 예방을 우선적으로 고려해야 하지만 충분한 위험성평가가 이루어지지 못한 신규화학물질이나 위험성을 예상하지 못하여 발생하는 사고도 있기 때문에 사고발생 전에 피해 최소화를 위한 예방대책을 충분히 검토해야 한다. 그러므로 화학물질에 의한 폭발사고를 저감하기 위해서는 이러한 화학물질이 가지고 있는 고유한 물리화학적 위험성 정보만이 아닌 화학사고와 같은 비정상상태에 따른 화재, 폭발, 누출, 확산 등에 의한 화재폭발사고 피해예측까지 고려하는 종합적인 안전대책이 필요하다. 또한 화학물질의 화재폭발사고에 의한 물적, 인적피해의 정량적 추정은 공정안전자료를 포함하여 중대화학사고조사의 원인규명과 동종화학사고 예방에 중요한 자료로서도 활용성이 높다. 또한 화학사고의 예방대책에는 폭발에 따른 사전 피해예측자료나 신속한 폭발사고피해에 대한 추정자료를 통하여 이에 근거한 안전대책 수립이 요구된다. 이를 위해서는 화학물질의 정량적 위험성에 대한 실험적 자료를 활용하여 해당 물질의 화재폭발사고 피해예측을 통한 폭발사고영향평가 자료를 확보하는 것이 필요하다. 최근 산업현장에서는 다양한 화학물질을 취급하고 있으며 그 중에서도 인화성물질로 인하여 화학산업 등의 많은 분야에서 화재폭발 사고가 반복적으로 발생하고 있다. 특히 인화성 가스와 인화성 액체는 사고발생빈도가 높고 피해영향이 크기 때문에 폭발사고예방을 위한 사전대책이 중요하며 이를 위해 폭발과정의 해명연구를 비롯하여 폭발위험성을 조사하기 위한 정량적 자료의 축적이 이루어져 왔다. 그러나 현재까지 화학물질의 폭발위험성에 대한 평가방법은 충분하다고는 할 수 없으며 폭발을 예방하기 위한 대책이 갖추어져 있음에도 예기치 못한 사고가 일어나고 있는 실정이다.

본 연구에서는 폭발사고 피해영향 예측을 위한 계산모델의 적용성을 검토하고 폭발성 물질로서 인화성 가스를 대상으로 실험적 방법을 통한 폭발특성 조사를 실시하여 폭발시뮬레이션 결과와 비교하여 활용 가능성을 고찰하였다. 이를 위해 먼저 실험적 모델에 기반한 기존 폭발모델의 적용성 방안 검토를 위한 비교조사와 결과 분석을 실시하였다. 또한 밀폐공간에서의 가스폭발 시의 압력특성, 화염전파속도, 화염온도 등의 실험적 조사와 함께 연소반응식을 고려한 폭발압력 및 단열 화염온도의 계산을 실시하고 이러한 예측결과를 폭발모델링과의 비교평가를 통하여 활용 가능성을 검토하였다. 폭발모델링은 사업장 건물, 규모, 지형 조건 및 근로자 배치 상황 등을 고려한 실규모 공간에서의 폭발사고에 의한 폭발피해영향을 검토하였으며 화학사고 시의 폭발피해 예측모델의 활용 가능성을 제시하여 인화성가스의 화학사고 발생 저감에 기여하고자 하였다.

## 2. 연구 기간

2015년 1월 1일 ~ 2015년 11월 30일

## 3. 연구 내용 및 범위

화학물질은 안전보건상 산업안전보건법(산업안전보건기준에 관한 규칙, 별표 1)에서 위험물질로 규정하고 있으며, 위험물질은 모두 7종(폭발성 물질 및 유기과산화물, 물반응성 물질 및 인화성 고체, 산화성 액체 및 산화성 고체, 인화성 액체, 인화성 가스, 부식성 물질, 급성 독성 물질)으로 분류하고 있다. 특히 이러한 위험물질 중에서 인화성 가스에 의한 화재폭발사고는 다양한 산업분야에 가스가 사용된 이후로 계속하여 발생하고 있다. 가스폭발사고에 의한 피해는 대부분 심각한 결과를 초래하기 때문에 폭발사고 방지대책을 검토하기 위해서는 폭발특성, 폭발 발생과정을 상세히 조사하는 것이 필요하지만, 그 밖에 폭발피해에 대한 예측 등의 적용방안이 이루어진다면 피해 저감이나 사고발생 억제를 위한 대책강구에도 활용될 수 있다.



따라서 본 연구에서는 먼저 기존에 가장 많이 사용되고 있는 실험에 기반한 폭발 모델들에 대해 해석결과를 비교하고 적용성을 검토하였다. 가스폭발 시의 피해예측에 가장 많이 사용되고 있는 TNT Equivalent method을 비롯하여 가스폭발의 특성인 폭연 폭발의 강도를 표현할 수 있는 TNO Multi-Energy method, 그리고 화염전파속도(Flame expansion speed) 예측을 위한 Baker-Strehlow method를 사용하여 가스 누출 시의 폭발시나리오에 따른 피해 예측결과를 검토하였다. 그리고 폭발시물레이션 결과와 비교하기 위해 메탄 가스폭발 시의 화염전파특성을 실험적으로 조사하였다. 구체적인 실험내용은 메탄-공기혼합기 농도에 따른 폭발압력과 화염온도를 조사하고, 메탄의 연소가스 조성을 고려한 화염온도의 계산 및 밀폐 공간 내의 메탄 가스폭발 시의 화염전파속도를 검토하였다. 메탄가스 폭발사고에 의한 피해 시물레이션으로서 VEXDAM(Vapor Explosion Damage Assessment Model)을 활용하여 지형 조건, 건물 형태, 건물 재료의 구조적 취약성 등 고려한 3차원 공간의 폭발에 있어서 인명손실과 설비피해 확률을 예측하여 이러한 결과들을 근거로 폭발피해영향평가 결과의 활용 및 적용성 방안을 검토하였다. 이를 위해서 본 연구에서 다루는 연구내용 및 범위는 다음과 같다.

- (1) 기존의 실증적 모델(Empirical analytic models)에 기반한 해석결과의 비교 및 적용성 검토
- (2) 메탄 가스폭발 시의 화염전파특성에 대한 실험적 조사
- (3) 가스 누출에 따른 폭발피해예측
- (4) 폭발피해영향평가 결과의 활용 및 적용성 방안 검토



## II. 공간 조건에 따른 폭발 및 피해특성

### 1. 개방공간에서의 폭발

산업현장에 있어서 개방공간의 가스폭발사고는 발생 빈도가 많지 않지만 폭발과정에 대한 정보를 통하여 재해예방에 활용하기 위해서는 개방공간과 같은 자유공간에서의 폭발특성 연구가 중요하다. 넓은 공간에서 대량으로 유출된 인화성 가스가 착화한 경우에는 공간 내에 장애물이 없으면 화염이 가속되지 않으며 폭굉(Detonation)으로 쉽게 전이하지 않는다. 개방 공간에 가연성가스가 누출되면 인화성 가스와 공기가 폭발범위내로 혼합되기가 쉽지 않다. 이러한 이유로 인하여 화학공장에서 인화성 가스 또는 압축이나 액화상태에서 누출된 증기운이 폭발에 기여하는 비율은 10 % 이하로 알려지고 있다. 그렇기 때문에 개방공간에서 인화성가스와 공기의 혼합기가 전기불꽃과 같은 일반적인 착화원에 의해 폭굉으로 이어질 가능성은 거의 없다. 개방공간에 누출된 인화성가스의 폭발이 폭굉으로 전이하도록 하기 위해서는 폭약과 같은 강력한 착화원이 필요하다. 예를 들면 메탄-공기 혼합기의 경우에 폭굉파를 일으키기 위해서는 22 kg의 고성능 폭약이 필요하다는 연구 사례도 보고되고 있다. 개방공간에서의 가스폭발 특성은 폭발범위 내에 있는 인화성 가스가 어떻게 누출되었는가에 따라 달라진다. 공기 중에 대량의 인화성 가스가 방출된 경우에는 주위의 공기와 혼합하면서 가연성의 증기운을 형성한다. 이러한 증기운이 폭발하면 화염은 착화원을 중심으로 모든 방향으로 전파하는데 이를 증기운폭발이라 하며 급속한 구형 형태의 화염전파가 보이는 경우를 파이어볼(Fire ball)이라고 한다. 만일 공기보다 비중이 큰 인화성 가스가 누출된 경우에는 지표면을 따라서 일정 높이까지 폭발범위를 형성한다. 이렇게 폭발범위를 형성한 가스혼합기가 착화되면 폭발압력은 거의 상승하지 않으며 폭풍압의 발생도 거의 없지만 화염이 전파하여 가연물에 도달하는 경우에는 피해가 광범위하게 나타날 수 있다.

메탄이 주성분인 액화천연가스(LNG)와 같은 저온의 가연성액체에서 발생한 가연성 증기와 같이 공기보다 비중이 큰 가연성기체가 누출된 경우에는 지표면에 광범위하게 확산하여 가연성증기 층을 형성한다. 이러한 가연성증기 층이 지표면상에서 구형 또는 반구의 형태로 존재하는 경우에 일정 지점에서 착화하면 화염은 모든 방향으로 전파한다. 이 때의 화염전파속도는 연소반응에 의한 발열에 기인하는 기체의 팽창속도에 의존한다.

## 2. 밀폐공간에서의 폭발

인화성가스나 증기가 유출되어 공기중에서 열화학반응이 일어나는 기상반응으로 진행하면 열에너지의 일부가 압력에너지로 바뀌면서 폭발로 발전한다. 건물 내부나 밀폐공간에서 가스 누출이 일어나 가연성혼합기를 형성하고 착화되어 폭발이 발생하면 화염전파와 함께 급격한 압력파로서 방출되어 밀폐공간을 구성하는 벽면이나 설비, 작업자에게 큰 피해를 초래한다. 폭발은 화염이 공기 중을 전파하여 발생하므로 기체상 조건이나 그에 관련하는 인자에 의해 폭발현상에 영향을 준다. 공간의 형태를 예로 들면 실내와 같이 상자 형태의 공간의 경우와 덕트나 배관과 같은 좁고 긴 공간에서의 폭발은 전혀 다른 형태로 나타난다. 밀폐 형태의 공간에서 화염이 전파하는 과정에서는 화염 전방에 기체 흐름을 교란하는 요인이 거의 없지만, 반면에 좁고 긴 배관 내에서의 폭발은 배관 벽면 근방에서 전단류(Shearing flow)가 발생하여 화염 전면의 기체 흐름을 증가시킴으로써 화염 가속이 급격히 커지게 된다. 배관 내의 폭발로 인한 화염전파속도가 음속에 비해 충분히 낮으면 배관 내의 압력은 일정하다. 그러나 화염전파속도가 빨라지면 압력 변동이 전해지는 속도에 차이가 생겨 압축파의 중첩을 일으키기 시작한다. 덕트나 배관처럼 용기가 충분히 긴 경우에는 충격파를 형성하고 폭굉으로 전이하게 된다. 폭굉으로 전이하기 쉬운 정도는 가연성 가스의 종류에 따라 달라지며 가연성 가스 중에는 아세틸렌, 산화에틸렌, 에틸렌, 프로필렌 등이 폭굉을 일으키기 쉽다. 또한 밀폐공간에서 폭발 시의 화염전파속도가 음속보다 매우 작은 경우에는 압력상승이 연소에 의한 발열반응에 주로 의존하며, 압력상승에 의해

공간을 구성하는 벽면 일부가 파괴되어 개구부가 발생할 수 있고, 또한 개구부의 발생으로 압력거동이 크게 변화하는 특징을 가지고 있다. 가연성혼합기가 착화되면 화염이 전파하는데 이 때 발생하는 열은 화염면에서 발생하며 발생열은 연료량과 연소열의 곱에 비례한다. 단위시간당 공간내에서의 발생열( $Q'$ )은 식(2.1)과 같다.

$$Q' = - \int_{A_f} (\alpha \Delta H_f C_f S) dA \quad (2.1)$$

식(1)에서  $S$ 는 연소속도,  $C_f$ 는 가연성가스의 농도,  $-\Delta H$ 는 가연성가스의 몰당 연소열,  $\alpha$ 는 화염통과시의 열방출 비율로서 화학양론농도 이하의 농도에서는 거의 1이며 그 이상의 농도에서는 1보다 작다. 또한  $A_f$ 는 화염면적이며, 식(1)에서의 적분은 공간 내의 화염면 전체에 대해 계산한다. 화염면에 대한 수직 방향의 기체속도를  $u$ , 화염전파속도를  $V_f$ 라고 하면 식(2.1)은 식(2.2)로 표현된다.

$$Q' = - \int_{A_f} [\alpha \Delta H_f C_f (V_f - u)] dA \quad (2.2)$$

만일 공간 내의 가스혼합기농도가 일정하다고 한다면 식(2.1)은 식(2.3)과 같다.

$$Q' = - \alpha \Delta H_f C_f S A_f \quad (2.3)$$

층류화염이면서 일정크기의 연소속도( $S_L$ )라고 하다고 한다면 착화후의 시간  $t$ 에 서의 화염면적( $A_f$ )은 식(2.4)와 같다.

$$A_f = 4\pi (S_L t)^2 \quad (2.4)$$

그러므로 식(4)를 식(3)에 대입하며 식(2.5)가 된다.

$$Q' = - \alpha \Delta H_f C_f S (4\pi S_L^3 t^2) \quad (2.4)$$

### 3. 부분 개방공간에서의 폭발

밀폐공간에서 가스폭발이 발생하면 공간 내의 압력이 상승하는데 만일 폭발압력을 견딜 수 없게 되는 부위가 파손되면 개구부(Opening)가 발생하게 된다. 이러한 개구부를 갖는 공간에서 가스폭발이 일어나면 개구부를 통한 화염 유출을 고려해야 한다. 이 때 폭발압력이 최대가 되는 경우에는 개구부의 발생시, 혼합기의 연소반응이 종료하는 경우, 또는 이러한 2가지 현상이 모두 나타나는 경우에 발생한다. 혼합기의 연소반응 종료 시의 최대압력은 잔류 가연성가스의 연소에 의한 것으로서 개구부의 면적이나 가연성 가스의 연소특성에 따라 변한다. 개구면적이 작을수록 연소속도가 증가할수록 최대압력은 증가한다. 용기에 개구부를 설치하거나 인위적으로 취약한 부분을 만들어 놓고 폭발시에 발생 압력이 취약한 부분을 파괴하고 개구부가 되도록 하는 폭발피해 감소 대책은 유효한 폭발압력 저감법으로 많이 사용하고 있다. 그러나 개구부에서의 폭발압력에 대한 이론적인 연구는 다양한 영향인자가 복잡하게 관여하기 때문에 해석이 쉽지 않아 용기의 개구면적과 폭발압력의 상관성을 다양한 크기의 용기로 조사하여 폭발압력 저감에 필요한 개구 면적을 경험적으로 결정하고 있다.

### 4. 폭발에 의한 피해의 요인

폭발이 발생하면 대부분 압력파가 발생하는데, 이러한 압력파는 느끼지 못하고 소리만으로 들리는 작은 경우도 있지만 건물이나 장치가 파손될 정도로 매우 크게 발생하기도 한다. 폭발이 일어나는 공간을 구성하는 벽면, 창문, 지붕, 도어 등의 피해나 외부에 미치는 피해영향을 예측하기 위해서는 가스폭발 시의 압력파의 발생과 전파특성에 대한 이해가 필요하다. 압력파는 폭풍(Blast wave)이라 불리우며 폭발이 발생하는 공간의 조건과 상황에 따라 발생 메커니즘에 영향을 준다. 기본적으로 폭풍은 폭발에 의해 일어나는 압력상승에 의한 것이므로 압력특성과 관련이 깊다. 개방공간에서 폭발이 일어나는 경우에 발생하는 압력파는 화염전파와 함께 미연소

기체가 압축되어 형성된 압력변동이 전파하는 것이다. 따라서 압력파의 강도는 화염전파속도에 의존하며 화염전파속도가 클수록 강한 압력파가 발생한다. 폭발 압력파가 건물 등의 구조물에 미치는 하중은 매우 짧은 시간이지만 가해지는 크기는 구조물의 허용하중에 대해 최대 수십배 이상이 될 수도 있다. 일반 구조물 중에서 폭발압력파의 피해를 받기 쉬운 것은 창문 유리나 지붕의 슬레이트 등을 들 수 있다. 폭발 시의 구조물 피해가 폭발압력파의 피크압력에 의한 것인지, 아니면 압력을 시간 적분한 임펄스에 의한 것인지는 연구자들 사이에서 오랜 기간 논쟁이 되어 왔는데 최근에는 폭발압력파와 구조물의 양자 간 특성의 조합에 의존하는 것으로 알려지고 있다. 또한 폭발 사고와 같은 큰 폭발에 있어서 폭발압력파의 지속 시간이 긴 경우는 시간의 효과를 포함한 임펄스가 대부분의 경우에서 지배하는 것으로 보고되고 있다. 구조물의 측면에서 보면 폭발 압력파에 의한 하중은 충격 하중으로도 볼 수 있다. 구조물에 하중이 충격으로 작용하여 변형이 정적변형이 아닌 고속변형으로 되면 역학적 비례식에 관성 항목이 추가되어 외관상 항복응력이 증가한다. 그 동안 항복응력의 증가에 대한 실험적 또는 이론적 연구가 이루어져 왔으며 변형 속도의 효과를 고려한 응력, 변형, 변형 속도의 계산법이 제안되고 있다. 이와 함께 금속재료의 충격하중에 대한 거동의 측정과 이론적 검토도 이루어져 왔다. 폭발압력파가 도달한 구조물이 어느 정도의 피해가 발생하는가를 검토하는 경우에는 구조물 변형에 대한 시간적 변화가 필요하지 않다면 에너지보존법칙을 기본으로 하는 보다 간략한 방법이 효과적이다. 그러나 변형에 대한 시간적 변화가 필요한 경우에는 구조물의 응답 특성을 모델링하고 그 응답을 표현하는 방정식을 만들어 해석할 필요가 있다. 이러한 구조물의 응답해석에는 상세한 정보를 얻을 수 있는 모델을 사용하는 것이 바람직하지만 구조물의 피해해석에서 중요한 것은 변위이기 때문에 자유도가 적은 모델을 사용해도 큰 오차가 발생하지 않고 응답계산이 가능하다.

폭발이 일어나면 주위 물체의 파손 등에 의한 비산물이 발생하는데 폭약과 같은 화약류의 폭발은 매우 미세한 비산물이 많이 발생하지만 가스폭발에서는 비산물이 큰 형태로 약간 발생한다. 가스폭발에서는 취약한 부분이 있으면 그 부분이 파손되지만, 압력용기 등과 같이 강도가 균일한 경우에는 용기 전체가 2, 3개 정도로 분

열되어 비산한다. 그러나 폭굉 전이가 발생하면 비산물의 양상은 변화하고 화약류에 가까워질 수도 있다. 비산물의 발생에 대해서는 아직 해명되지 않은 부분이 남아 있어 문제점도 많다. 현재까지의 연구보고를 보면 비산물의 발생에 대해 많은 가정을 세워 계산하고 해석하고 있는 경우가 대부분이다. 그러나 비산물의 모양과 크기, 비산 방향과 속도가 명확해지면 비산거리, 비산물의 파괴 위력을 어느 정도 예측하는 것이 가능해질 것이다. 기존의 연구에 의하면 폭발시 발생하는 에너지 중에서 20~60 %가 비산물의 운동에너지로 사용되는 것으로 보고되고 있다. 또한 실제 비산물을 관찰해 보면 비산물의 비산거리는 가장 멀리까지 비산한 것을 기준으로 할 때 전체 비산거리의 약 30~80 %의 범위에 있는 것으로 알려지고 있다. 비산물에 의한 피해는 폭심의 근방에서 가장 크게 나타나지만 폭발범위는 폭발압력파에 의한 피해도 있고 일반적으로는 폭발압력파가 지배적인 요인이기 때문에 상세한 검토는 거의 이루어지고 있지 않다. 그러나 가스폭발에서 발생하는 큰 비산물이 먼 곳까지 도달하는 경우에는 그 피해도 작지 않다. 하지만 먼 곳까지 비산한 물체가 중요한 설비에 치명적인 피해를 줄 확률은 극히 낮은 데다 그 피해평가가 쉽지 않기 때문에 폭발사고조사 과정에서 검토될 수는 있어도 특수한 경우를 제외하면 피해평가를 위해 폭발 비산물에 대해서 검토하는 경우는 그다지 많지 않다.

## 5. 폭발피해의 저감 및 대상

앞서 언급한 바와 같이 폭발피해를 줄이기 위해서는 폭발이 일어나지 않도록 하는 것이 가장 중요하지만 모든 폭발을 방지하는 것은 현실적으로 쉽지 않으므로 만일의 경우에 대비하여 폭발발생시의 피해를 감소시키는 대책을 강구하는 것이 필요하다. 폭발로 인한 피해는 폭발을 일어난 장치나 구조물이 파괴되는 것만이 아니라 폭발압력파, 비산물 등에 의해 피해범위가 확대될 수 있다. 폭발 가능성이 있는 지역을 예측된 폭발강도에 견딜 수 있는 구조물 등으로 봉쇄하면 폭발피해를 한정된 구역 내에서만 미치게 하여 피해를 크게 줄일 수 있으며 폭발시에 발생하는 유해물질의 확산도 방지할 수 있다. 이러한 방법은 주로 화학공장이나 원자력발전 시설과



같이 높은 안전성을 필요로 하는 경우에 많이 사용되고 있으며, 이러한 방법을 사용하기 위해 중요한 것은 폭발 규모를 가급적 정확하게 추정해야 한다는 점과 추정값 이상의 충분한 내압력을 가진 구조물을 설계해야 한다는 점이다. 대부분의 폭발 사고는 지표면에서 발생하고 지표면에서 근로자나 구조물에 피해를 주는데 폭발이 발생하면 수평방향으로의 확대가 폭발피해를 크게 하는 원인이 된다. 이러한 이유로 방폭벽은 폭발시 폭발압력과나 비산물의 수평 방향으로의 확대를 지지하거나 완화하기 위해 사용되고 있다. 그러므로 방폭벽은 추정된 폭발크기에 견딜 수 있을 정도의 강도가 없으면 효과가 매우 적어진다. 폭발압력과는 일종의 파동이므로 방폭벽이라는 장애물이 존재하여도 압력파의 일부는 방폭벽에 부딪혀 회절하며 확산될 수 있다. 또한 폭발은 폭발의 시작에서 폭발피해가 발생할 때까지 매우 짧은 시간에 일어나기 때문에 화재의 초기소화와 같은 재해의 억제수단을 강구하는 것이 쉽지 않다. 가스폭발은 폭발 종료까지의 일정 시간을 필요로 하므로 폭발의 초기 단계를 감지하는 적절한 센서와 신속한 효과를 갖는 폭발억제방법을 활용하여 이를 기계적작동으로 연결시키는 효과적인 완화대책도 사용되고 있다. 그러나 이러한 방법은 모든 경우에 유용한 것이 아니라 보호 대상 장치에서 예상되는 폭발형태에 따라 제약이 있을 수 있으며 폭발억제장치는 그 설치 목적에서 고속작동과 높은 신뢰성을 요구하므로 많은 비용이 소요된다. 폭발사고에 있어서 발생하는 피해의 원인은 주로 폭발에 따른 압력상승이 가장 큰 요인이므로 폭발피해 영향평가를 통한 정보를 잘 활용한다면 안전대책은 물론 비용효과를 극대화하는 것이 가능해질 것으로 판단된다.



### III. 밀폐공간 내 폭발현상의 측정과 예측

#### 1. 최근의 가스폭발사고 경향

폭발사고를 방지하거나 저감시키기 위해서는 사전예방이 가장 중요하다. 이러한 사전예방은 폭발사고에 대한 원인규명과 폭발사고 시에 어느 정도의 피해가 발생할 것인지에 대한 폭발피해영향평가 활동이 필요하며 이러한 결과를 통하여 동종 폭발사고예방에 효과적으로 활용할 수 있다. 폭발피해영향은 폭발과압에 의한 주변 장치, 시설물, 작업자에 대한 상호작용을 평가하는 것으로서 폭발사고의 원인 규명에도 사용될 수 있다. 국내에서 최근에 발생한 중대재해 가스폭발에 있어서 메탄, LPG 등의 탄화수소가스에 의한 폭발사고사례를 <표 1>에 나타냈다. 최근에는 메탄이 주성분인 LNG 및 메탄의 누설가스가 착화되어 일어난 폭발사고가 발생하여 많은 인명피해가 발생하였다. 또한 성분이 부탄 및 프로판으로 구성된 LPG에 의한 가스폭발사고도 거의 매년 발생하여 많은 인명피해가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 화학산업에서는 복잡한 반응공정이나 조업조건에서 인화성 가스와 발화원을 완전히 격리시키는 것은 현실적으로 쉬운 일이 아니므로 폭발에 대비한 방호대책을 강구하는 것이 중요하다. 누설한 가스가 일단 착화되어 화염이 전파한 경우에는 화염전파를 저지하는 기술이 현재 확립되어 있지 않으므로 폭발의 발생을 전제로 한 폭발방호대책을 강구하였는지의 여부에 따라 피해발생의 크기는 다르게 나타난다. 최근에는 가스 누출로 인한 폭발사고로 인한 사업장내의 피해영향만이 아닌 사업장 외부에의 장외영향평가까지 고려해야 하는 시대가 되었다. 따라서 가스누출에 의한 피해영향평가는 폭발피해저감을 위한 대책강구에 필요한 근거자료만이 아니고 폭발방호에 필요한 비용효과를 검토하기 위한 중요자료로서 활용성이 높다고 할 수 있다.

〈표 1〉 최근 발생한 탄화수소가스의 폭발사고사례

재해발생일	원인 물질	사상자	재해개요
2015.7.3	메탄	사망 6명, 부상 1명	용접 작업 중에 메탄가스로 추정되는 잔류가스가 폭발.
2014.5.8	LNG	사망 1명, 부상 6명	용접 작업 중에 액화천연가스(LNG)로 추정되는 잔류가스가 폭발
2014.2.27	LPG	사망 1명, 부상 1명	누출된 LPG가 폭발되어 작업자 2명중 1명은 사망하고 1명은 부상을 입은 재해임
2012.12.11	LPG	사망 1명	야간업무 작업 중에 가스(LPG) 폭발로인해 전신에 화상을 입고 병원 치료 중에 사망한 재해임.
2012.10.31	LPG	사망 2명, 부상 9명	용접작업 시작 시 누출된 LPG 가스가 폭발하여 작업중이던 근로자 2명이 사망하고 9명이 부상함
2012.09.17	LPG	사망 1명, 부상 1명	건조설비의 가스버너에 라이터로 불을 붙이는 순간 건조설비에 체류LPG가스가 폭발
2012.0316	메탄	사망 1명, 부상 5명	발전기 설비 교체작업 중에 발전기 연료로 공급되는 메탄가스가 배관에서 누출, 착화되어 폭발
2011.12.09	메탄	사망 1명	배관지지 작업 중 메탄 가스가 폭발범위 내에 있는 것을 인지하지 못한 상태에서 점화원으로 추정되는 라이터를 켜는 순간 폭발
2011.06.26	LPG	사망 1명, 부상 8명	단조공정에서 단조기) 예열작업에 사용되는 LPG가 배관 연결부위에서 누설되어 전기스파크 또는 토치 불꽃이 점화원으로 작용하여 폭발사고 발생
2011.06.15	LPG	부상 4명	LPG-산소용접기를 이용하여 형강 절단작업을 하기위해라이터로 토치에 불을 붙이던 중 LPG용기가 폭발하여 본인과 주변 근로자 3명이 화상을 입은 재해임

## 2. 밀폐계의 가스폭발특성

### 2.1 실험목적

폭발로 인해 발생하는 피해는 주로 폭발시의 압력상승과 화염전파에 기인하고 있다. 폭발재해방지 관점에서 예기치 못하게 발생한 폭발사고의 크기에 영향을 주는 압력상승과 화염전파 특성을 파악하는 것이 중요하다. 가스폭발의 최초 과정은 일정 범위에서의 가연조건이 성립하는 것이며 기상폭발은 물질의 성질, 공간의 형태, 공간 내의 온도, 압력, 흐름장 등의 많은 인자가 관여하고 있다. 본 연구에서는 밀폐공간에서의 가연성-공기혼합기의 폭발특성으로서 연소범위내의 농도 조건을 중심으로 조사하였으며 이러한 실험결과를 계산 및 시뮬레이션 결과와 비교하고자 하였다. 이를 위해 관의 형태가 원추 형상인 밀폐용기를 사용하여 폭발실험을 실시하였으며 용기 내의 폭발압력과 화염온도 및 화염전파속도를 측정하였다. <표 1>에서와 같이 가스폭발사고사례가 빈번히 발생하고 있는 인화성가스로서 메탄( $\text{CH}_4$ )을 사용하여 메탄-공기혼합기의 농도변화에 따른 폭발현상을 관찰하고 폭발특성을 측정하였다.

### 2.2 시료

메탄( $\text{CH}_4$ )은 파라핀족 탄화수소 계열의 화합물이며 탄광 내의 폭발성가스로서 처음 알려졌는데 자연에 풍부하게 존재하며 공업적으로는 석탄 가스와 코크스 로의 가스를 제조할 때에 역청탄을 분해증류시켜서 얻거나 활성 슬러지법으로 하수처리하여 얻어진다. 메탄의 물리화학적 특성을 <표 2>에 나타냈다. 비중은 공기보다 가벼운 0.554이며 약간의 수용성을 갖는다. 공기 중에서 약한 불꽃을 내며 쉽게 연소되어 반응종료 후에 이산화탄소와 수증기로 된다. 끓는점 및 녹는점은 각각  $-164.0^\circ\text{C}$ ,  $-182.5^\circ\text{C}$ 이다. 메탄의 주요공급원은 천연가스(Natural gas)이며 상업용 천연가스는 주로 메탄으로 구성되어 있으므로 천연 가스와 실제 성분은 같다고 할 수 있다. 메탄가스로 구성되는 천연가스는 저렴하고 청결하기 때문에 가정, 산업용 연료로 많이 사용되고 있다.

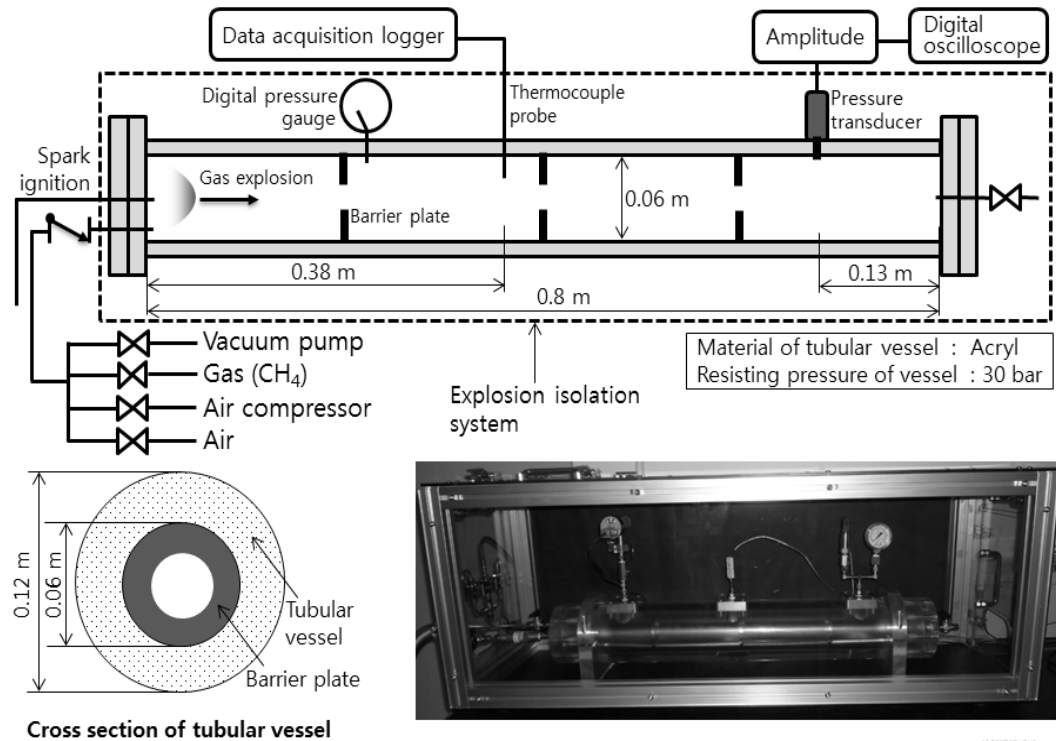
〈표 2〉 메탄(CH<sub>4</sub>)의 물리화학적특성

비중	0.554
녹는점	- 182.5 °C
끓는점	- 164.0 °C
연소열	11.93 kcal/g
이론혼합비	9.47 vol%
발화온도	632 °C
최대연소속도	0.37 m/s
최소발화에너지	0.33 mJ

### 2.3 실험장치 및 방법

실험에 사용한 실험장치 개요를 〈그림 1〉에 나타냈다. 밀폐용기는 화염 가시화를 위하여 아크릴(Acryl) 재질로 만들었다. 폭발용기의 내압력은 압력 30 bar까지 견딜 수 있도록 설계되었으며 이를 위해 용기의 외경은 0.12 m, 내경은 0.06 m, 길이는 0.8 m로 하여 플랜지 접속에 의한 밀폐 구조로 제작되었다. 또한 용기 내에서 발생한 폭발화염은 열전대(Pt-Rd thermocouple)를 사용하여 화염온도의 계측도 가능하도록 하였다. 실험에 사용한 인화성 가스는 메탄으로서 공기와 혼합하여 메탄-공기 혼합기의 2성분계 혼합가스를 시험대상 시료로서 사용하였다. 시료의 농도 조절과 밀폐 용기에의 시료 충전을 위해서 진공 라인을 사용하였다. 본 연구에서 실시한 메탄-공기 혼합기의 폭발특성 실험은 [그림 1]에서 장애물(Barrier plate)이 없는 상태에서 실시하였다. 시료의 조성을 위해 사용한 진공펌프는 〈표 3〉과 같은 제원을 갖고 있으며 진공 도달압력은  $5 \times 10^{-4}$  Torr이다. 구체적인 실험방법은 다음과 같이 진행하였다. 가스 시료의 충전방법은 먼저 진공펌프를 사용하여 밀폐용기 내의 공기를 배기하여 진공 상태로 만든 다음에 진공 여부를 확인한 다음에 메탄 가스를 일정 분압이 되도록 디지털 진공압력계를 보면서 가스를 밀폐용기 내로 충전한다. 그리고 공기 밸브를 열어 용기내의 압력이 대기압이 되도록 공기를 주입하고 균일한 혼합가스가 되기 까지 40분간 방치한 다음에 착화하여 폭발특성을 계측하였다. 착화원으로 사용한 전

극의 간격은 3 mm로 하였으며 전극 위치는 용기의 좌측 끝단에 설치하여 네온트랜스에 의해 발생된 고전압을 전극으로 유도하여 불꽃방전이 일어나도록 하였다.



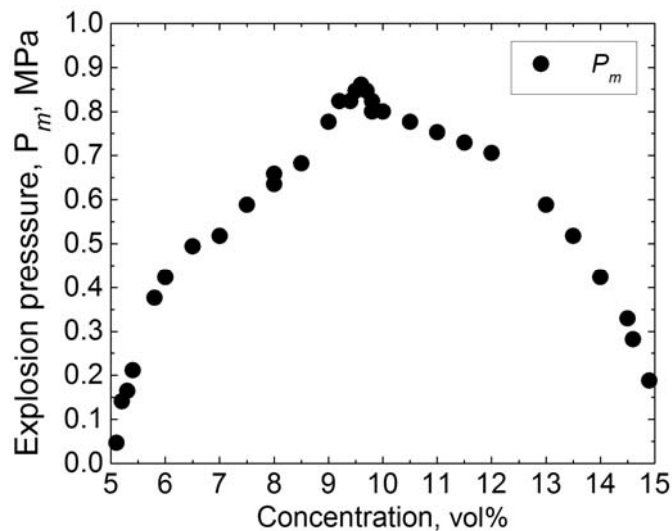
[그림 1] 가스폭발 밀폐용기의 개요

〈표 3〉 진공펌프의제원

Displacement (60Hz)	100 liter/min
Displacement (50Hz)	84 liter/min
Ultimate cacuum	$5 \times 10^{-4}$ Torr
Oil capacity	0,5 liters
Motor(50/60 Hz)	0,4 kW

### 3. 폭발압력과 화염전파

밀폐용기 내의 메탄-공기 혼합기의 가스폭발에서 압력의 측정은 변형게이지(Strain gauge) 방식의 압력계를 사용하였다. [그림 1]에서와 같이 압력계는 용기 좌단으로부터 0.67 m의 지점에 설치하였으며 압력계로부터의 출력은 디지털 오실로스코프를 통하여 계측하였다. 구형(Spherical) 밀폐용기 내의 중심에서 착화가 일어나면 구상 형태의 화염이 전방향(All direction)으로 일정 속도를 가지고 전파하게 되며 이 때 발생하는 압력은 시간의 3승에 비례한다. 그러나 본 연구에서와 같이 관상(Tube type) 형태의 밀폐용기에서 착화 직후에는 구상 형태로 화염이 전파하지만 화염이 밀폐관의 내벽에 도달하면 화염전파 방향이 제한되며 밀폐 관상 용기의 좌단에서 우측 방향으로만 전파한다. 그러므로 화염면적의 증가는 일어나지 않고 관의 단면적에 해당하는 화염면적을 가지고 전파하게 된다. 실제로 동일 농도에서의 화염전파의 관측에 따르면 화염의 가속현상은 발생하지 않았다. 가스폭발 시의 압력상승속도는 화염면적과 연소속도의 곱에 비례하므로 화염면적이 일정하기 때문에 급격히 압력이 상승하지는 않는다. 메탄 농도 변화에 따른 최대폭발압력을 [그림 2]에 나타냈다. 최대폭발압력은 농도 9~10 vol%에서 다소의 측정 오차값이 발생하지만 9.6 vol%에서 0.861 MPa로서 최대가 되었다.



[그림 2] 메탄 농도 변화에 따른 최대폭발압력



폭발이 발생하는 공간이 구형이며 그 중심으로부터 구면(Spherical) 모양의 화염이 밖으로 향해 전파하는 경우에 최대압력과 압력의 시간변화는 다음 식(3.1)과 같이 표현된다.

$$P_m = P_0 \cdot \left( \frac{n_b \cdot T_b}{n_u \cdot T_u} \right) = P_0 \cdot \left( \frac{M_b \cdot T_b}{M_u \cdot T_u} \right) \quad (3.1)$$

식(3.1)에서  $P_m$ 은 폭발압력,  $P_0$ 는 초기압력,  $n$ 은 mole수,  $T$ 는 절대온도,  $M$ 은 분자량, 첨자  $u$  및  $b$ 는 각각 미연소가스와 연소가스를 의미한다. 식(3.1)에서 알 수 있듯이 최대폭발압력은 가연성 가스의 종류와 농도, 초기 압력, 그리고 온도에 의해 영향을 받는다. 용기 내의 가연성 혼합 기 농도의 불균일성과 난류성 기류가 존재하는 경우에는 화염의 확산에 영향을 미치며 폭발시의 압력거동이 불균일하고 평균농도가 폭발범위 내가 아니더라도 국소적으로 농도가 폭발하한농도를 넘어가면 폭발이 일어나며 그러한 압력상승은 무시할 수 없다. 폭발 시의 최대압력상승속도는 농도의 불균일에 영향을 받지 않고 평균농도에 좌우되는 것으로 알려지고 있다. 일정 크기의 용기 체적( $V$ ), 연소속도( $S_u$ ), 연소시간( $t$ ) 및 보정 계수( $k$ )를 고려하면 식(3.1)은 식(3.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_m(t) = k \cdot P_0 \cdot \left( \frac{t^3 \cdot S_u^3}{V} \right) + P_0 \quad (3.2)$$

폭발이 일어나면 식(3.2)와 같이 압력은 시간의 3승에 비례하여 증가한다. 폭발 발생 공간이 증가할수록 최대압력에 도달할 때까지의 시간이 길어지지만, 연소 속도의 가속화가 이루어지거나 폭굉으로 전이하는 경우도 있으므로 식(3.2)의 계산값은 폭발조건에 따라 변할 수 있다. 보정 계수( $k$ )는 구형 밀폐용기 내에서의 화염온도의 변화를 나타내며  $\gamma$ 가 비열비( $C_p/C_v$ )라고 할 때 계수( $k$ )는 식(3.3)과 같이 정의된다.

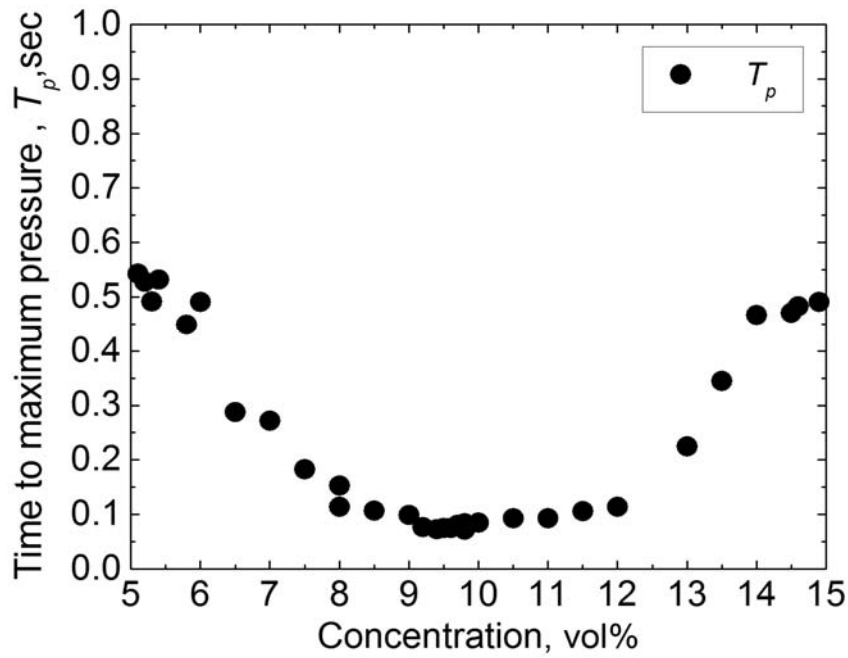
$$k = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left( \frac{n_b \cdot T_b}{n_u \cdot T_u} \right)^2 \cdot \left( \frac{n_b \cdot T_b}{n_u \cdot T_u} - 1 \right) \cdot \gamma \quad (3.3)$$

최대압력 계산식을 표현하는 식(3.1)을 사용하여 메탄농도 9.5 vol%에서의 폭발압력을 계산하고 [그림 2]의 실험결과와 비교해 보았다. 메탄농도 9.5 vol%에 있어서 반응전후의 mol수는 변화가 없으므로 폭발 전의 조건을 대기압, 대기온도 25 °C, 화염온도 2300 K, 비열비( $\gamma$ ) 1.4, 그리고 연소속도 34.7 cm/s라고 할 때 최대폭발압력은 식(3.1)로부터 다음과 같이 계산된다.

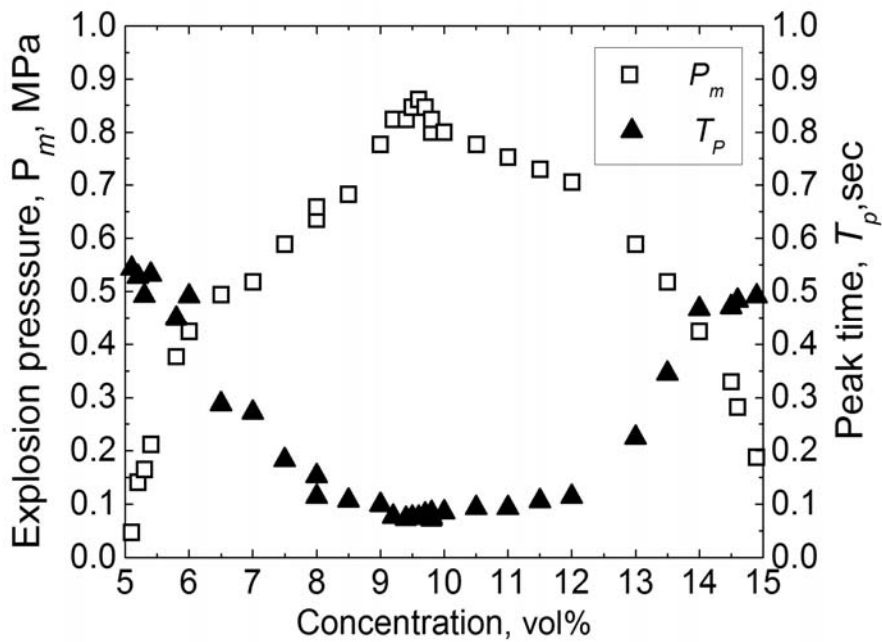
$$P_m = 1.033 \times (2300 / 298) = 7.97 \text{ kgf/cm}^2 = 0.782 \text{ MPa}$$

[그림 2]에서 메탄 농도 9.5 vol%에서의 폭발압력은 0.823 MPa로서 계산값인 0.782 MPa과 거의 유사한 것을 알 수 있다. 화염온도와 연소속도를 측정한 자료를 사용하여 계산한다면 보다 근사한 예측이 가능할 것으로 판단된다.

폭발에 따른 압력증가 개시로부터 최대압력에 도달하기까지 소요되는 시간을 측정하여 [그림 3]에 제시하였다. 최대폭발압력 도달시간은 농도에 따라 변화하는데 이론적 화학양론농도(Stoichiometric concentration ; Cst)인 9.47 vol% 부근에서 가장 작으며 Cst를 기준으로 그 이하 또는 이상의 농도에서는 증가하였다. 종횡비가 1에 가까운 용기에서의 폭발은 용기용적(V)이 최대압력상승에 영향을 거의 미치지 않지만, 최대폭발압력 도달시간과 압력상승속도에 큰 영향을 주는 것이 잘 알려져 있다. 그러나 본 연구에서와 같이 용기의 종횡비가 1이 아닌 길이가 긴 관상형 용기이기 때문에 구상형태의 전파화염이 아닌 평면상으로 화염이 전파하므로 연소 종료에 필요한 전파거리가 용기의 용적에 거의 비례한다. 따라서 화염전파속도가 일정한 값을 가지면 최대폭발압력 도달시간은 화염전파거리에 반비례하는 결과가 된다. [그림 4]는 농도에 대한 폭발압력과 최대폭발압력 도달시간을 함께 나타낸 것으로서 두 지표는 반비례 관계인 것을 알 수 있다.



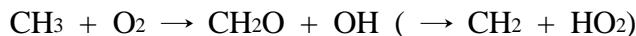
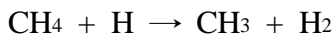
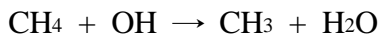
[그림 3] 메탄농도에 따른 최대폭발압력 도달시간



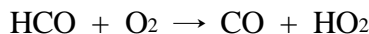
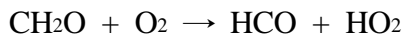
[그림 4] 메탄의 폭발압력과 최대압력도달시간의 비교

#### 4. 단열화염온도

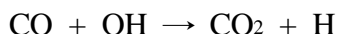
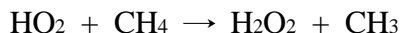
메탄의 연소과정에서 생성되는 소반응(Elementary reaction)은 100종류 이상으로 알려져 있기 때문에 화학반응기구의 해명은 쉽지가 않다. 또한 가스농도가 당량 농도 이상에서는 본래의 분자량보다 큰 화합물도 생성될 수 있으므로 반응 중간 생성물의 결정을 더욱 어렵게 하는 요인이 되고 있다. 메탄의 연소기구에 대해서는 많은 연구가 이루어져 왔으며 연소의 시작 단계에서는 분자의 산화와 분해반응이 일어나며 다음 단계에서는  $H_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$  반응계의 연소로 이어진다. 메탄( $CH_4$ )은 산소( $O_2$ )와의 직접 반응은 속도가 늦기 때문에 이하와 같이 먼저  $OH$ 와  $H$ 와의 반응이 이루어지고 다음에  $CH_3$ 는  $O_2$ 와 반응한다.



또한  $CH_2O$ 는 다음의 화학반응을 통하여  $CO$ 가 되는데 이러한 복잡한 중간 반응을 거치게 된다.

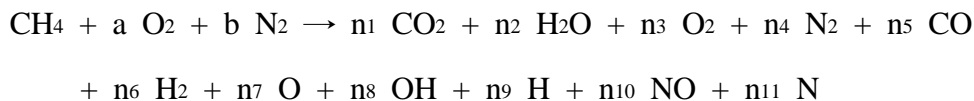


$HO_2$ 는  $CH_4$ 와 반응하여 소실되고  $H_2O_2$ 를 생성한 다음에  $H_2O$ 와  $O$ ,  $OH$ 로 분해되어 이 때 생성된  $OH$ 가  $CO$ 와 반응하여  $CO_2$ 가 만들어진다.



이와 같이  $\text{CH}_4$ 의 연소반응 과정에는  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_2$ ,  $\text{HCO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{H}$  등의 다양한 화학종(Chemical species)이 생성되며 매우 복잡한 반응이 일어난다. 그러므로 실제로 메탄가스의 폭발에서는 폭발시에 발생하는 고온 연소가스는 열해리(Thermal dissociation) 및 브라운 운동이나 분자간 충돌로 인해서 다양한 화학종이 생성되기 때문에 완전연소 ( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ )가 일어나지 않는다. 이러한 화학반응 특성을 고려하여 단열화염온도를 추정하였다. 단열화염온도는 연소반응이 종료한 시점에서 화학평형과 질량보존법칙, 열평형 등이 성립하는 경우에서의 온도를 의미한다. 엔탈피(내부에너지), 평형정수, 분압은 모두 온도의 함수로서 온도를 결정하기 위해서는 열평형 계산이 요구된다. 온도를 일정한 값으로 가정하여 그 온도에서 엔탈피, 평형정수, 분압이 모두 성립하는 경우에 그 온도를 단열화염온도로 가정한다. 이러한 계산을 위해서는 먼저 반응계의 전 몰수를 결정하고 생성계의 분자종의 각 몰수를 가정한다. 평형정수, 온도, 가정한 분자종의 몰수를 사용하여 남은 모든 분자종의 몰수를 계산한다. 그리고 반응계와 생성계의 원소수를 계산하고 질량보존법칙이 성립하는지를 확인한다. 만일 성립하지 않는 경우에는 생성계의 분자종 몰수를 재 가정하여 반복하여 계산을 실시한다. 화학평형에 의해 결정된 조성에 따라 초기온도에서의 생성계와 반응계의 생성열을 계산하고 그 차를 구한다. 이렇게 구한 값은 반응에 의해 발생한 연소열이며, 초기온도의 생성계에서 가정한 온도까지 상승하는데 필요한 열량을 엔탈피(내부에너지)로부터 구한다. 화학평형과 열평형의 2가지 열 수지를 확인하고 열평형이 성립한다면 최초에 가정한 온도가 단열화염온도로 결정이 되지만, 만일 성립하지 않는다면 온도를 재 가정하여 동일한 방법으로 반복하여 계산을 실시한다.

화염온도의 계산은 밀폐계 폭발(Constant-volume combustion)로서 열손실(Heat-loss)을 무시하고 1몰의 메탄이 a몰의 산소와 b몰의 질소가 반응하여 폭발시에 생성되는 각각  $n_i$ 몰의  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}$ 의 연소가스(11종)를 고려한 화학반응식을 대상으로 하였다.



$$n_{\text{C}} : n_1 + n_5 = 1$$

$$n_{\text{H}} : 2 \cdot n_2 + 2 \cdot n_6 + n_8 + n_9 = 4$$

$$n_{\text{O}} : 2 \cdot n_1 + n_2 + 2 \cdot n_3 + n_5 + n_7 + n_8 + n_{10} = 2a$$

$$n_{\text{N}} : 2 \cdot n_4 + n_{10} + n_{11} = 2b$$

각 분자종의 분압( $P_i$ ) 계산은 다음과 같다.

$$P_i = A^2 \cdot n_i$$

$$A^2 = (T_{ad,f}/T_0) \cdot \{P_0/(1+a+b)\}$$

각각의 평형에 대해 정압평형정수(K) 및 이하 식들이 성립한다.

$$(1/2)\text{O}_2 \leftrightarrow \text{O} : n_7 = K_1 \cdot [(n_3)^{1/2}/A]$$

$$\text{CO} + (1/2)\text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 : n_1 = K_2 \cdot n_5 \cdot [(n_3)^{1/2}/A]$$

$$(1/2)\text{N}_2 + (1/2)\text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO} : n_{10} = K_3 \cdot (n_4)^{1/2} \cdot (n_3)^{1/2}$$

$$(1/2)\text{N}_2 \leftrightarrow \text{N} : n_{11} = K_4 \cdot [(n_4)^{1/2}/A]$$

$$(1/2)\text{H}_2\text{O} + (1/4)\text{O}_2 \leftrightarrow \text{OH} : n_8 = K_5 \cdot (n_2)^{1/2} \cdot [(n_3)^{1/4}/(A)^{1/2}]$$

$$(1/2)\text{O}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} : n_2 = K_6 \cdot (n_3)^{1/2} \cdot (n_6)^{1/2} \cdot A$$

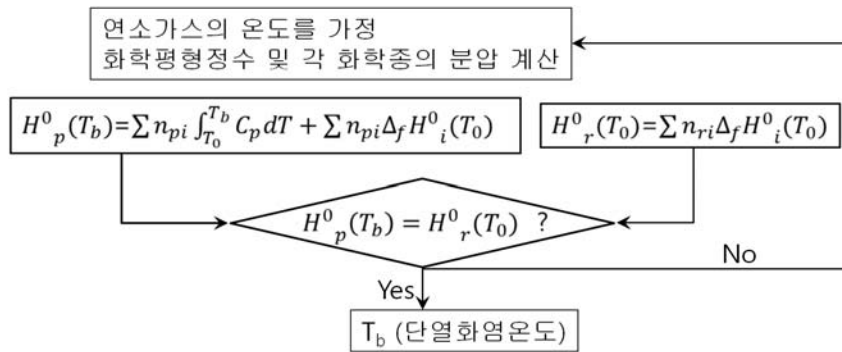
$$2\text{H} + (1/2)\text{O}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} : n_2 = K_7 \cdot (n_9) \cdot (n_3)^{1/2} \cdot A^3$$

또한 분압(P) 및 폭발압력( $P_m$ )은 다음과 같다.

$$P = \Sigma(\pi) = A^2 \cdot \Sigma(N_i), \quad P_m = (\Sigma(N_i) \cdot R \cdot T) / V_0$$

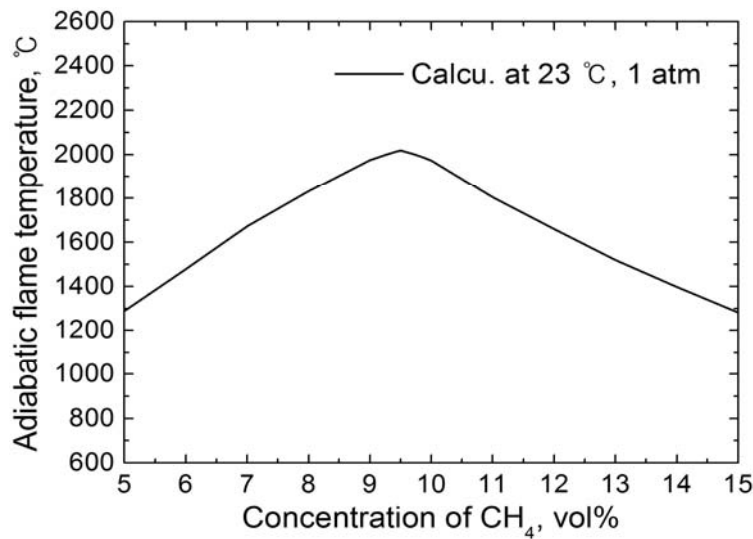
단열화염온도의 계산방법은 [그림 5]와 같으며 생성물의 엔탈피( $H_p^0(T_b)$ )가 반응물 질의 엔탈피( $H_r^0(T_0)$ )와 일치하는 온도를 반복계산을 통하여 구한다.

$H_p^0(T_b)$ 의 관계식에서 우변의 제2항은 표준온도(25 °C)에서의 표준생성열이다. 단열화염온도에 영향을 주는 요인의 조사로서 가스 농도의 변화, 초기압력의 변화, 초기온도 변화 및 가스 농도에 따른 연소가스의 Mole fraction을 추정하였다.



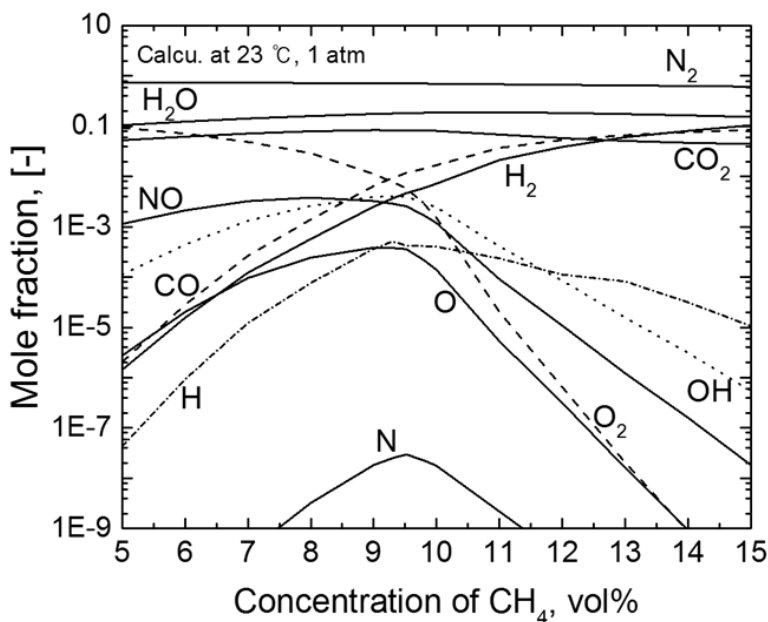
[그림 5] 단열화염온도의 계산방법

메탄의 단열화염온도를 농도에 따라 계산한 결과를 [그림 6]에 나타냈다.



[그림 6] 메탄의 농도에 따른 단열화염온도

단열화염온도의 최대값은 이론혼합비(9.4 vol%)보다 높은 농도인 9.5 vol%에서 2018.75 °C가 얻어졌다. 이론혼합비는 반응이 모두 이산화탄소( $\text{CO}_2$ )와 물( $\text{H}_2\text{O}$ )이 된다는 가정 하에 계산된 것이다. 이론혼합비보다 높은 농도에서 단열화염온도가 나타나는 이유로는 단열화염온도의 계산에서는 연소가스가 고온에서의 해리를 고려하여 화학평형이 되었다는 가정에서 계산하며 화학반응이 종료하지 않은 상태이므로 연료가 보다 많이 존재해야 하기 때문이다. [그림 7]은 메탄가스의 폭발시에 생성되는 연소가스의 물분율을 가스농도에 따라 계산한 결과이다. 최대단열화염온도가 나타나는 가스 농도를 기준으로 그 이상의 농도로 증가할수록 산소( $\text{O}_2$ )가 급격히 감소하고 CO가 반대로 증가하여 불완전연소가 급증하는 것을 알 수 있다. 그러나 연소 반응에 관여하지 않는  $\text{N}_2$ 는 가스농도에 관계없이 일정하게 나타나고 있다.



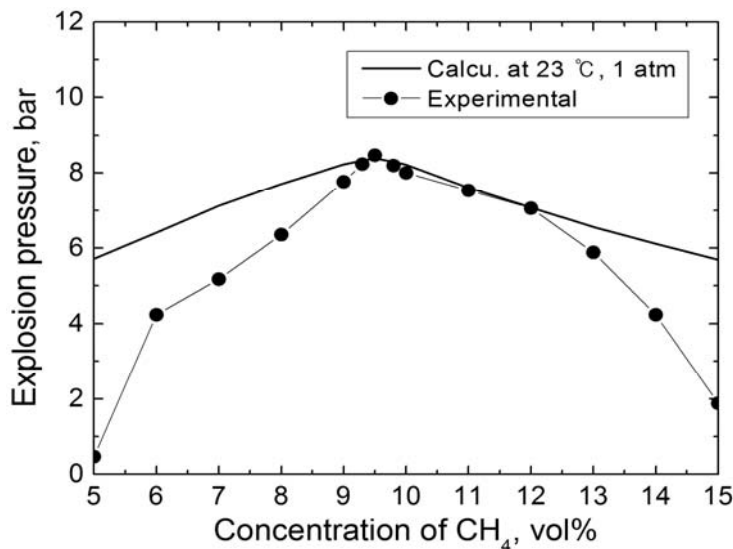
[그림 7] 메탄 폭발시의 연소가스의 물분율

메탄 폭발시의 폭발압력의 추정 결과를 [그림 8]에 제시하였다. 폭발압력을 추정하기 위해서는 먼저 단열화염온도를 계산해야 하며 이렇게 구한 화염온도와 각 분자종의 물분율을 사용하여  $P_m = \{(\sum n_i RT) / V_0\}$ 의 식을 이용하여 계산하였다. 메탄 농도

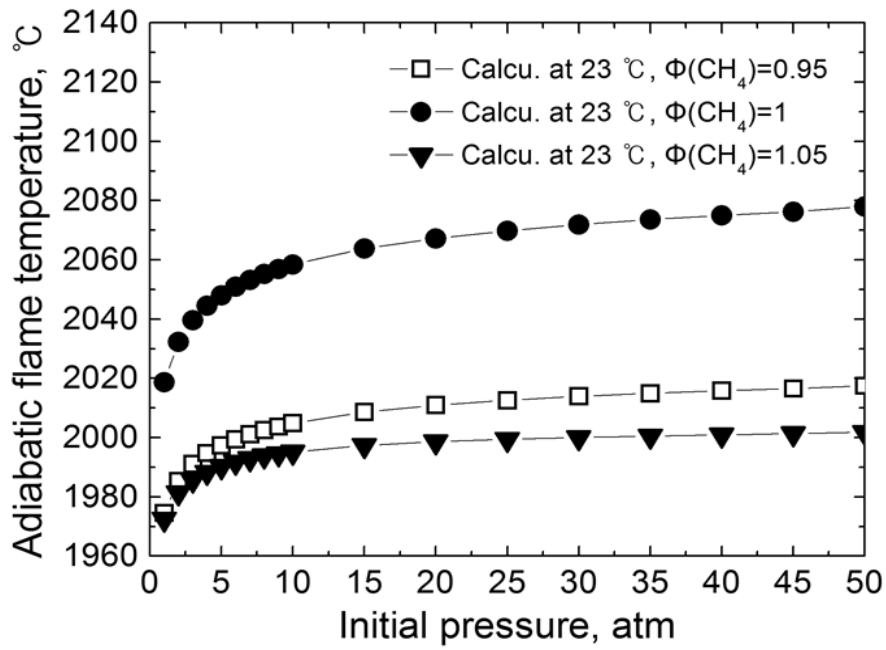


변화에 따른 최대폭발압력의 실험값(그림 2)과 비교해보면 농도 9~12 vol%에서는 실험값과 계산값이 어느 정도 일치를 보이고 있지만 그 이외의 폭발농도에서는 큰 오차를 나타내고 있다.

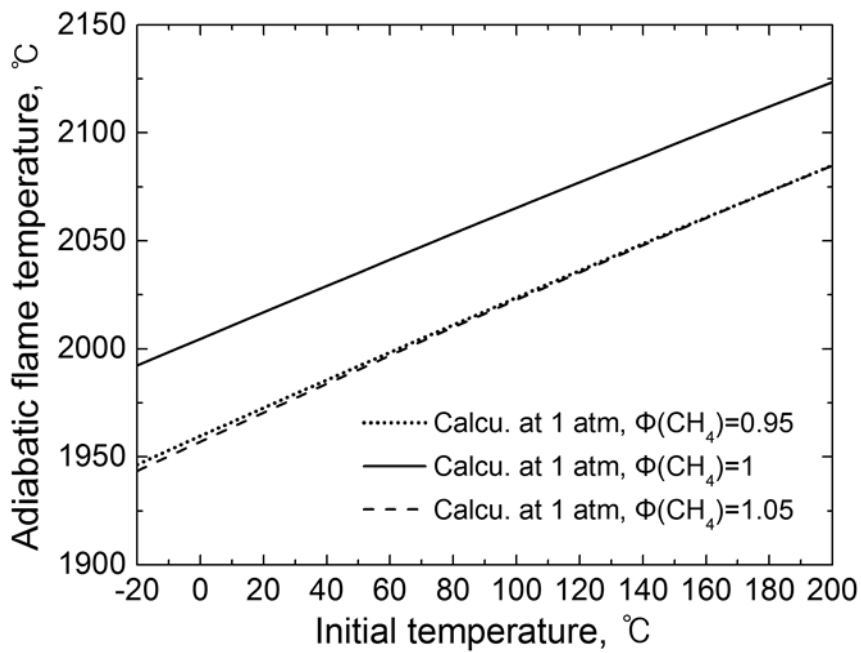
[그림 9]는 메탄 폭발시의 초기압력이 단열화염온도에 어떠한 영향을 주는가를 계산한 결과이다. 초기 압력이 증가할수록 단열화염온도도 증가하는 것을 알 수 있으며 이러한 경향은 10 atm까지 강하게 나타났다. 그러나 10 atm 이상에서는 농도에 관계없이 이러한 경향은 감소하였다. 초기압력 및 농도의 2가지 조건을 고려하는 경우에는 이론혼합비에서 초기 압력에 의한 영향이 가장 크며 이론혼합비보다 농도가 증가하거나 감소하는 경우에는 영향이 감소하고 있다. 특히 이론혼합비 이외의 농도에서는 초기압력이 10 atm이상이 되면 단열화염온도에의 영향이 무시될 정도로 작았다. 초기온도가 메탄 폭발시의 단열화염온도에 미치는 영향을 조사한 결과를 [그림 10]에 나타냈다. 초기온도가 증가할수록 메탄의 가스농도에 관계없이 단열화염온도는 선형적인 비례관계를 가지며 증가하였다. 이러한 계산 결과를 통하여 단열화염온도는 압력과 온도의 영향을 크게 받으며 특히 온도에 의한 영향이 보다 크게 작용하는 것을 알 수 있었다



[그림 8] 메탄 폭발시의 폭발압력의 추정



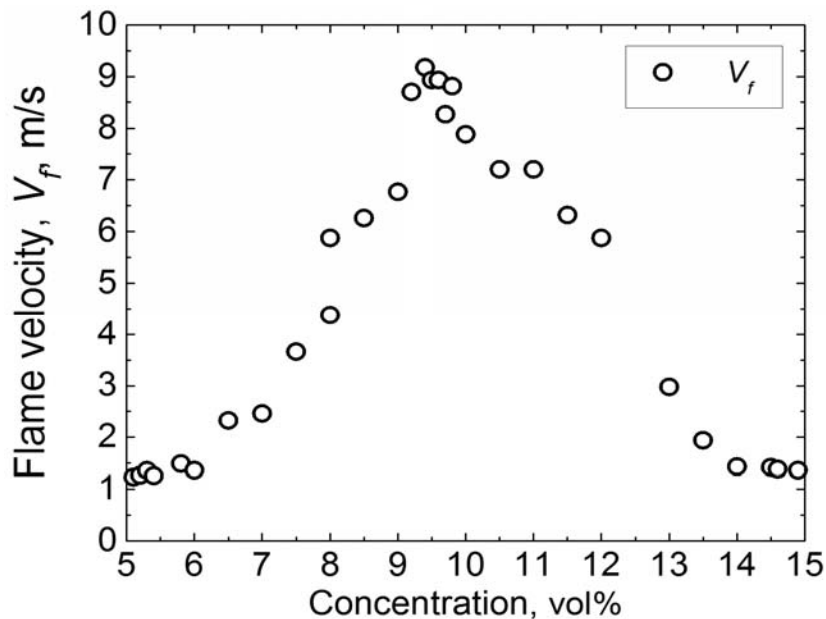
[그림 9] 초기압력 변화에 따른 메탄 폭발시의 단열화염온도



[그림 10] 초기온도에 따른 메탄 폭발시의 단열화염온도

## 5. 화염전파속도

메탄가스 폭발시에 발생하는 화염의 전파속도를 <그림 11>에 나타냈다. 화염전파속도의 최대값(9.1 m/s)은 폭발압력이 가장 높은 9.5 vol%에서 얻어졌다. 본 연구에서 사용된 폭발용기의 길이는 <그림 1>에서와 같이 0.8 m이며 만일 용기의 길이가 증가하는 경우에는 <그림 11>의 시험 결과보다 증가할 가능성이 있다.



[그림 11] 메탄 가스폭발 시의 화염전파속도

일반적으로 화염전파속도는 연소속도와 기체의 유속의 합으로 표현된다. 밀폐 관상 용기의 좌단에서 착화되어 우측단 쪽으로 화염이 전파하면 화염 전방의 기류는 용기의 우측단으로 접근하게 되는데, 관의 길이가 짧을수록 보다 빠른 시간 내에 기체의 흐름이 제한받기 쉬워지므로 화염의 가속이 어려워진다. 배관이나 덕트 내부에서 가연성가스가 착화되어 화염이 전파하는 현상은 가스 농도, 배관이나 덕트의 형상, 크기, 벽면의 상태나 개방 유무 등에 의해 변할 수 있다. 착화위치로부터 떨어진 반대쪽 말단부가 개방상태라고 한다면 다른 공간 조건보다도 용이하게

화염이 가속되고 폭굉으로 전이할 가능성이 높다. 화염이 가연성 혼합기 내를 전파하는 경우에는 전방의 기체에 기류가 생기어 기체의 난류성이 증가한다. 이러한 난류상 기체 속을 통과하면 화염면이 불규칙적으로 변하며 화염면적이 증가하여 단위 시간당 반응면적이 늘어나며 열발생속도가 커진다. 이러한 열발생속도의 증가는 화염 전방의 기체 흐름을 더욱 증가시키고 기체의 난류성은 보다 강해진다. 이러한 현상의 반복 과정을 통해 결국 화염이 음속 이상으로 전파할 수 있다. 화염 전방의 음속은 화염 후방의 음속보다 느리기 때문에 압력파는 겹쳐지게 되어 불연속면을 형성하여 충격파(Shock wave)가 발생하여 폭굉으로 이행된다.

## IV. 폭발피해의 예측 및 적용

### 1. 피해예측 모델의 조사

탱크와 배관이 파손하여 대량의 가연성 가스가 대기중에 방출되면 공기와 혼합하여 가연성 증기운을 형성하고 착화되면 대규모 폭발을 일으킬 수 있다. 그 동안 국내에서는 저장탱크, 플랜트 등에서 누출된 인화성 가스 및 액체에 의한 화재폭발사고가 반복적으로 발생하고 있다. 이러한 재해로 인해 야기되는 폭발압력의 피해를 예측하기 위한 모델이 국제적으로 제시되어 사용되어 오고 있다. 폭발압력의 영향을 산정하기 위한 방법으로는 TNT등가 모델(TNT Equivalent method), TNO 모델(TNO Multi-Energy method), Baker-Strehlow method 등이 있으나 일반적으로 사용되고 있는 것은 TNT 등가모델이다. TNT 등가모델은 계산 방법이 비교적 간단하기 때문에 재해조사나 위험성평가 등에 많이 사용되고 있다. 그러나 TNT 등가모델에 의한 계산값을 실측값과 비교해 보면 폭굉(Detonation)을 일으키는 폭발사고의 경우에는 거의 일치하고 있지만 폭연(Deflagration)에 의한 폭발사고의 경우에는 과대평가의 결과를 제시하는 문제점을 가지고 있다. 또한 TNT 등가법은 개방 공간에서의 폭굉을 전제로 하고 있으므로 현실적으로는 대부분 일어날 수 없는 현상이라는 지적도 많다. 인화성 가스나 폭발에 의한 대부분의 폭발사고가 폭연이라는 점을 고려하면 폭발피해예측의 모델의 유효적절한 사용이 요구된다. 본 연구에서는 상기 3가지 모델을 대상으로 동일 가스폭발에 대해 피해영향평가를 실시하여 결과를 분석하고 적용성에 대하여 분석하였다. TNT 등가모델은 폭발압력과 거리와의 관계는 다음 식 (4.1)과 같이 나타낸다.

$$Z = \frac{L}{(M_{TNT})^{1/3}}, \quad M_{TNT} = \frac{f_E \Delta H_C M_G}{\Delta H_{TNT}} \quad (4.1)$$

$$P_S = \frac{80,800 \left[ 1 + \left( \frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left( \frac{Z}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{1.35} \right)^2}} \quad (4.2)$$

$$L = Z^3 \sqrt[3]{M_{TNT}} = Z^3 \sqrt[3]{\frac{M_G f \psi \Delta H_C Q_G \gamma}{\Delta H_{TNT}}} \quad (4.3)$$

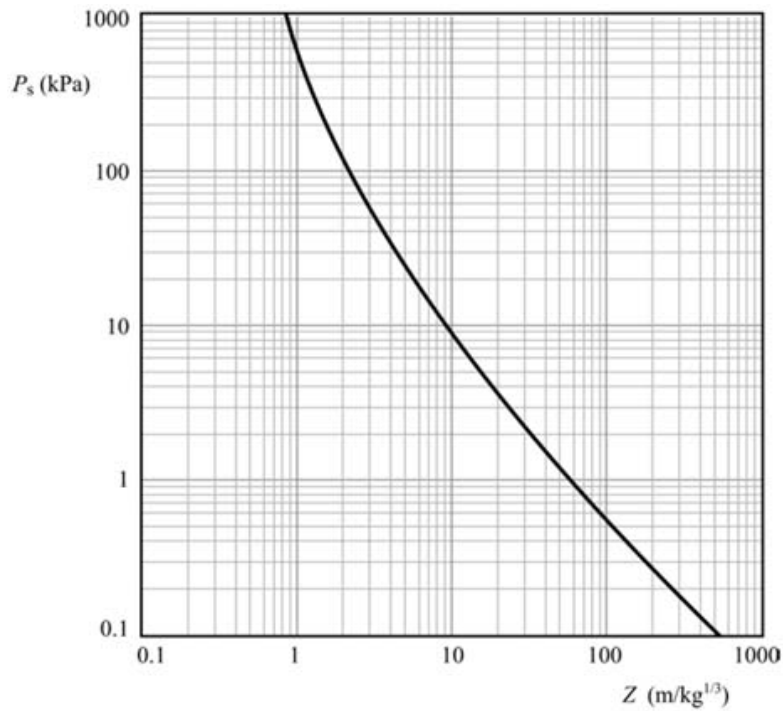
상기 식에서  $Z$ 는 환산거리( $\text{m/kg}^{1/3}$ ),  $L$ 은 폭발중심으로부터의 거리( $\text{m}$ )로서 [그림 12]에 의해 폭발압력과 대응되며,  $M_{TNT}$ 는 등가의 TNT 화약량 (TNT 당량 :  $\text{kg}$ ),  $f_E$ 는 충격파에 의해 발생하는 에너지의 비율로서 0.01~0.1의 값을 가진다.  $P_S$ 는 폭발 과압( $\text{kPa}$ ),  $\Delta H_C$ 는 가연성가스의 연소열( $\text{kJ/kg}$ ),  $\Delta H_{TNT}$ 는 화약의 연소열( $4.184 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ),  $M_G$ 는 가연성가스(액체)의 유출량( $\text{kg}$ ),  $f$ 는 유출된 가스의 기화 비율,  $\psi$ 는 폭발계수,  $\gamma$ 는 TNT 수율을 나타낸다. 폭발계수( $\psi$ )는 유출 기화된 가스 중에서 폭발에 기여한 비율로서 확산가스 중의 농도가 폭발범위 내에 있는 가스로 간주하는데, 일반적으로 10 %가 사용된다. 또한 TNT수율( $\gamma$ )은 폭발에 기여한 혼합기체의 총에너지와 발생한 폭발압력에 상당하는 TNT당량 에너지의 비율이며 일반적으로는 6.4 %를 이용하면 안전한 것으로 알려지고 있다.

TNO Multi-Energy model은 폭연을 기초로 한 Blast Modeling으로서 증기운 폭발의 평가를 위한 계산방법이다. 증기운 폭발은 주로 폭굉보다는 폭연의 형태로 발생하며 본 모델링 이론은 폭발이 한곳에서 시작되어 연쇄 폭발하는 것이 아닌 증기운 중에서 일부분에서 폭발하는 단일 폭발 개념을 갖는다.

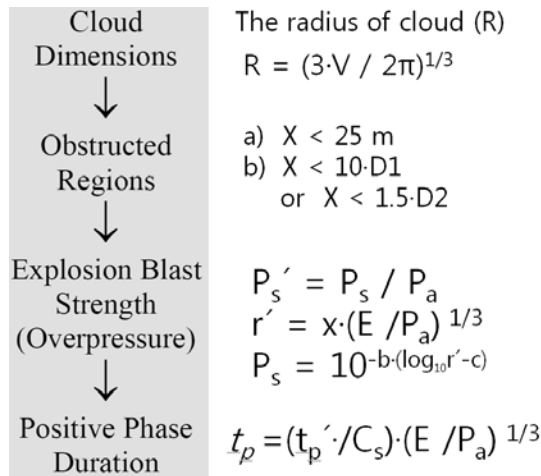
또한 폭발에 의한 에너지가 Point Source TNT Equivalency model과 같이 증기운에 있는 가연성 물질의 질량 비율이 폭발에 많은 영향을 미치는 것이 아니라,

발생 지역의 고립 정도가 폭발 에너지에 더 많은 영향을 미친다고 가정하고 있다. 부분적으로 제한된 지역에서 가연성 증기운의 일부분을 통해 증기운 폭발이 발생한다는 것을 기본적인 전제로 계산한다. 따라서 증기운 폭발 중에서 발생하는 에너지의 양은 제한된 지역에서 가연성 증기운의 크기가 부분적으로 제한된 영역보다 큰 경우나 증기운의 크기가 제한된 공간의 크기보다 작은 경우로 나뉘어 구분된다. TNO Multi-Energy model의 계산방법은 [그림 13]에 제시하였으며, PS는 폭발에 의한 과압(MPa)이며 PS'는 환산 과압(MPa), r'는 환산 거리(m), Pa는 대기압(MPa), x는 폭원으로부터의 거리(m), E는 폭발에 의한 방출에너지(MJ)을 나타낸다.

[그림 14]는 폭발과압의 강도계산에 따른 환산 거리에 대한 환산 과압을 나타낸 그래프로서 여기에서 세로 축은 과압을 대기압으로 나눈 무차원 과압이며 가로축은 연소에너지의 크기에 대한 거리이다. 이 모델에서는 균일한 가연성 혼합기를 가지는 증기운에서의 폭발 시에 일정 크기의 화염속도로 전파하는 것을 가정하며 계산을 한다.

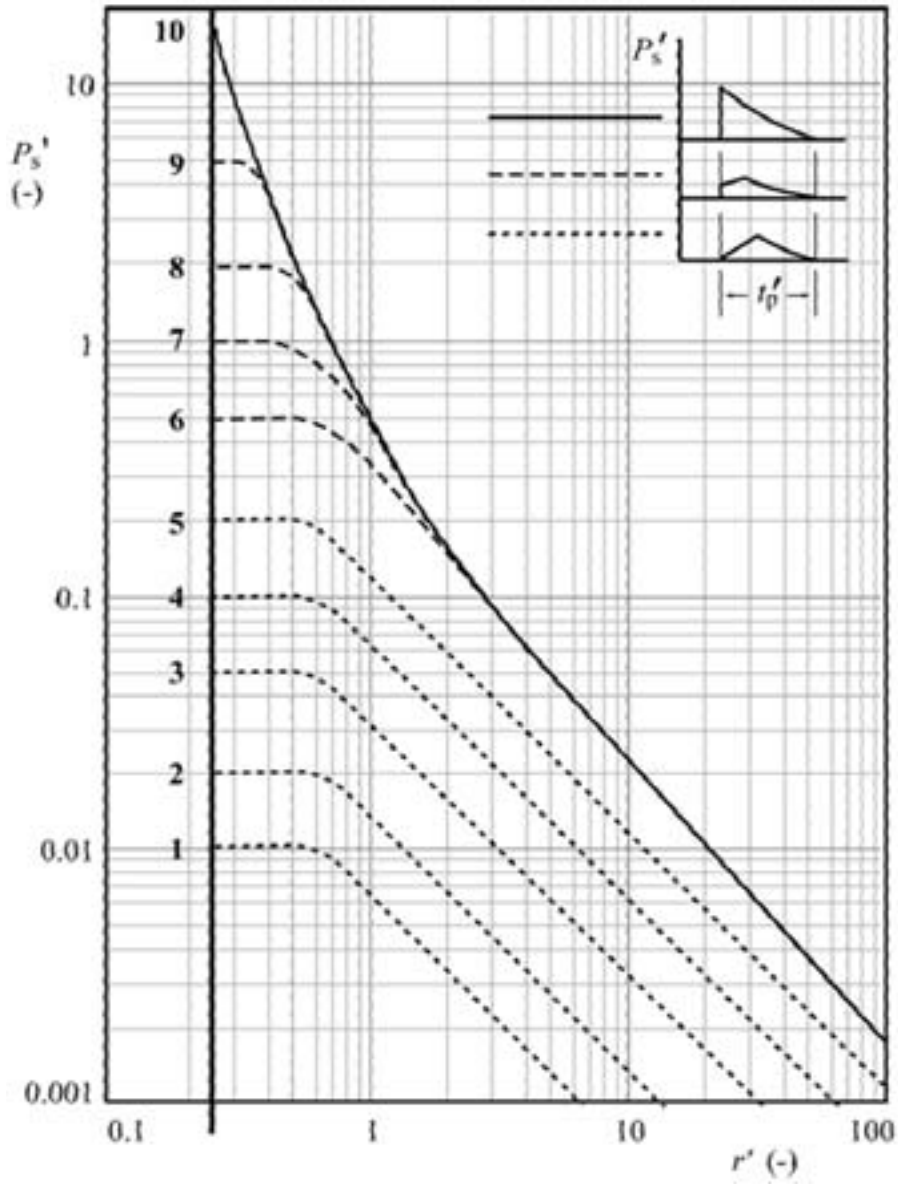


[그림 12] 환산거리에 대한 과압곡선(By Brasie & Simpson)



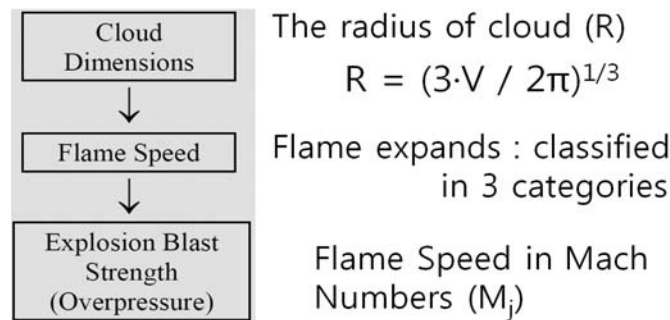
[그림 13] TNO multi-energy model의 계산 흐름도





[그림 14] 폭발과압의 강도계산에 따른 환산 거리에 대한 환산 과압

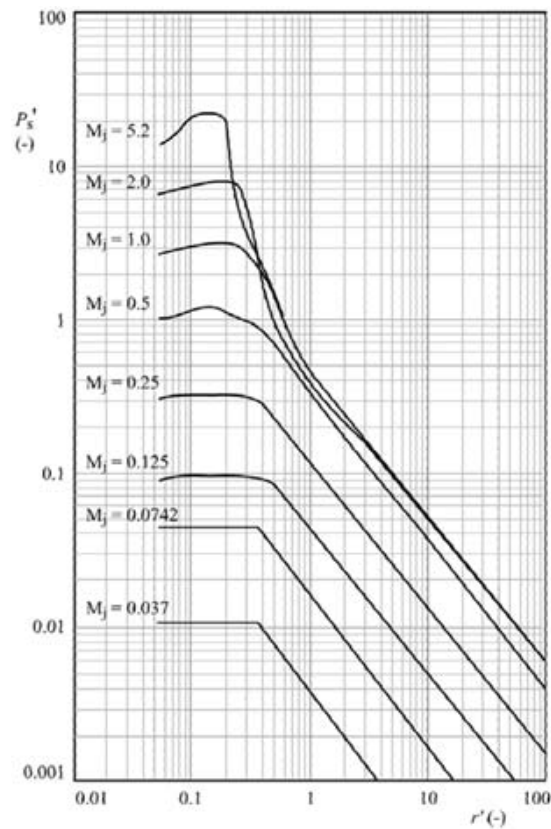
Baker-Strehlow model은 TNO Multi-Energy model과 유사한 부분이 있으며 두 모델들은 부분적으로 고립된 지역이나 공정설비 등이 밀집 되어 있는 곳에서 가연성 증기운의 일부분으로부터 증기운 폭발이 일어나는 것을 가정하고 있다. 가연성 증기운에서의 총 유효에너지를 결정하는 방법은 동일하다. Baker-Strehlow model의 계산은 [그림 15]와 같이 먼저 증기운의 반경을 정하고 화염속도, 과압의 순서로 계산한다. 또한 <표 4>는 Mach Number( $M_f$ )에 따른 화염속도를 나타낸 표이다. 환산거리( $r'$ )에 대한 환산 과압( $PS'$ )은 [그림 16]의  $PS'-r'$ 의 그래프를 사용하여 결정한다. Baker-Strehlow Model에서 사용하는 그래프 곡선은 일정한 화염속도와 구형의 증기운을 통해 전파하는 화염의 가속도의 수학적 모델링에 기초로 한다. 이 방법에서의 Blast Wave의 강도는 증기운에서의 최대화염전파속도에 비례한다. TNO multi-energy model에서는 가연성 가스가 어느 정도의 범위(양)에서 폭발하는지를 설정하여 폭발강도를 예측해야 하며, Baker-Strehlow model은 화염의 확대 방향과 장애물의 상황에 의해 화염속도를 예측할 수 있는 특징이 있다.



[그림 15] Baker-Strehlow model의 계산 흐름도

〈표 4〉 Mach number에서의 화염전파속도

Flame Expansion	Fuel Reactivity	Obstacle Density		
		High	Medium	Low
1-D	High	5.2	5.2	5.2
	Medium	2.27	1.77	1.03
	Low	2.27	1.03	0.294
2-D	High	1.77	1.03	0.588
	Medium	1.24	0.662	0.118
	Low	0.662	0.471	0.079
3-D	High	0.588	0.153	0.071
	Medium	0.206	0.100	0.037
	Low	0.147	0.100	0.037



[그림 16] Baker-Strehlow model의 환산거리에 대한 환산과압 곡선

## 2. 폭발피해예측 결과의 비교 및 분석

폭발피해 예측모델을 동일 조건의 사고시나리오에 적용하여 예측 결과를 비교, 검토함으로써 실제 폭발사고를 얼마나 잘 설명할 수 있는지를 조사하였다. 사고시나리오는 프로판 저장탱크에서 프로판이 누출, 착화하여 [그림 17]과 같은 증기운(Vapor cloud explosion)이 발생하는 것을 가정하였다. <표 5>와 같이 프로판의 밀도는  $1.86 \text{ kg/m}^3$ 이므로 부피는  $4750/1.86 = 2554 \text{ m}^3$ 이다.



[그림 17] 프로판 가스 누출에 의한 폭발사고 모습

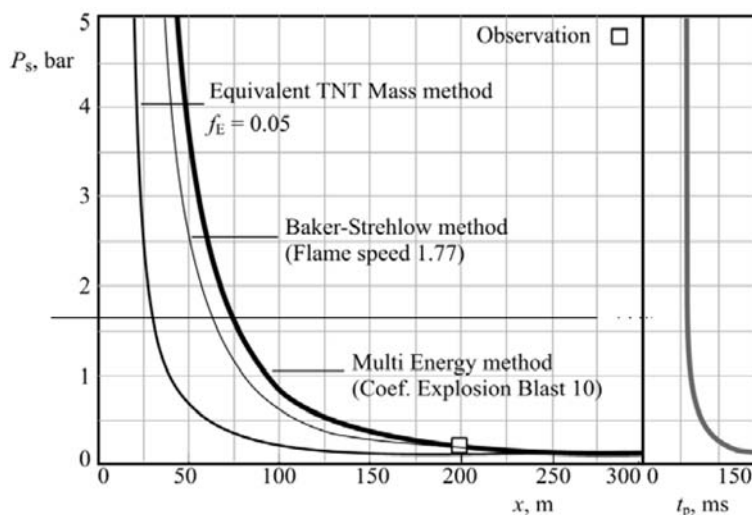
<표 5> 프로판의 물성값 및 계산 조건

사고 물질명	프로판(Propane)
기온 (°C)	15
기압 (atm)	1
누출량 (kg)	4,750
연소열 (kJ/kg)	46,010
밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	1.86 (at 15°C, 1atm)

연소반응식이 “ $C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$ ”이므로 프로판과 산소의 비율은 1:5이며 프로판과 공기의 비는 1:25이므로 프로판-공기 혼합기는  $2554 \times 25 = 63,884 \text{ m}^3$ 이 된다. 증기운의 반경은  $(2\pi R^3/3) = 63,884$ 에서 R(반경)은 31.2 m가 된다. 이상의 기본 자료 및 <표 6>의 폭발예측 모델 계산 조건을 사용하고 4.1 절의 관계식을 통해 각 폭발모델에서의 거리에 따른 과압곡선을 구하여 [그림 18]과 같은 결과가 얻어졌다. [그림 18]은 각 폭발피해모델의 계산을 통하여 얻은 거리에 따른 폭발과압을 나타낸 것이다. 폭심으로부터 거리 250 m 이내에 있어서는 동일 거리 조건에서 TNT Equivalent model에 의한 계산값이 최소였고 TNO Multi-Energy model에 의한 계산값이 최대였으며 Baker-Strehlow model에 의한 계산값은 그 중간값에 해당되었다.

<표 6> 폭발예측모델 계산 조건

TNT Equivalent model	1. $f_E = 0.05$
TNO Multi-Energy model	1. Cloud volume : $61296 \text{ m}^3$ 2. The coefficient of strength of the explosion blast : 10
Baker-Strehlow model	1. Flame speed : 1.7 m/s



[그림 18] 폭발피해모델에 따른 환산거리에 대한 폭발과압 계산 결과

3가지의 폭발피해평가모델을 사용하여 계산한 결과를 <표 7>에 요약하였다. 계산결과 250 m 이상의 거리에서는 각 모델 간의 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다. 200 m 이내 거리에서 폭발과압은 Multi-Energy model과 Baker Strehlow model의 결과는 0.24~0.25 bar로서 거의 같으며, Equivalent TNT Mass model의 결과는 실제 사고와 비교하여 0.06 bar로서 과소평가되고 있음을 알 수 있었다. 특히 Multi-Energy model과 Baker-Strehlow method의 과압은 실제 사고와 유사한 결과를 보여주고 있다. 따라서 계산 결과를 실제 사고피해 상황과 비교, 검토하면 모델의 적용성과 신뢰성 향상이 가능할 것으로 판단된다. 폭발사고 피해예측 모델의 적용성을 검토하고 고찰한 결과 <표 8>의 결과가 얻어졌다.

〈표 7〉 폭발예측모델에 따른 계산 결과

TNT Equivalent model			TNO Multi-Energy model			Baker-Strehlow model
x (m)	Z (m/kg <sup>1/3</sup> )	P <sub>s</sub> (bar)	r' (m)	P <sub>s</sub> (bar)	t <sub>p</sub> (ms)	P <sub>s</sub> (bar)
25	1.90	2.33	—	—	—	—
75	5.69	0.23	0.58	1.69	58	1.10
125	9.49	0.11	0.96	0.50	83	0.40
200	15.16	0.06	1.54	0.24	112	0.25

〈표 8〉 가스폭발사고 피해예측 모델의 적용성 고찰

TNT Equivalent model	1. 개방공간에서의 Detonation을 전제로 해석 2. 폭연(Deflagration) 폭발사고의 경우에는 계산 결과가 과대 평가될 수 있음.
TNO Multi-Energy model	1. Vapor explosion(Deflagration)을 전제로 해석 2. 가연성 가스의 어느 정도의 용적(또는 무게)이 폭발하는지를 정함으로서 폭발강도를 결정하는 것이 요구됨
Baker-Strehlow model	1. Vapor explosion(Deflagration)을 전제로 해석 2. 화염의 확대방향과 장애물 상황을 고려하여 화염전파속도를 추정하는 것이 필요

### 3. 사업장의 폭발피해평가 사례

#### 3.1 폭발계산 이론

폭발압력 및 지속시간의 계산은 TNO multi-energy모델에 의하여 계산 가능하다. 증기운 폭발에 있어서의 연소열( $E$ )의 계산은 식(4.4)와 같이 표현된다.

$$E = m_f \cdot h_c \quad (4.4)$$

여기서  $m_f$ 는 연료 질량이며,  $h_c$ 는 순 연소열이다. 또한  $m_f$ 와 증기운 체적( $V_c$ )의 관계는 식(4.5)와 같이 나타낸다.

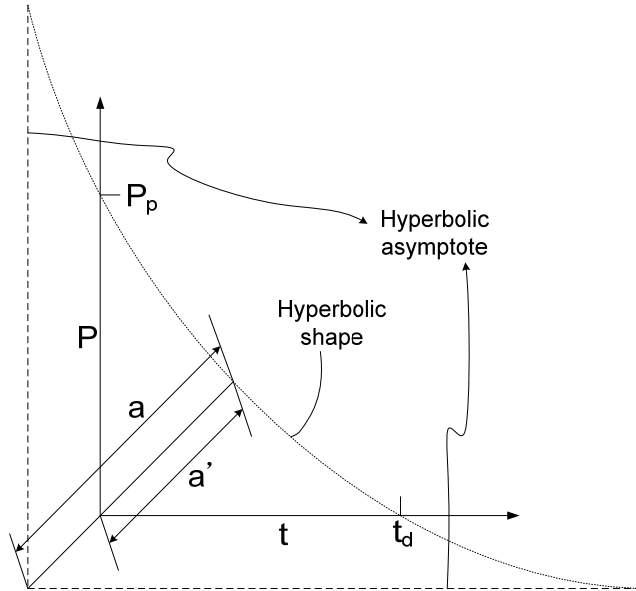
$$V_c = (m_f \cdot R_0 \cdot T_\infty) / (P_\infty \cdot M_{wf} \cdot C_{st}) \quad (4.5)$$

식(4.5)에서  $R_0$ 는 일반 기체상수,  $T_\infty$ 는 주위 온도,  $P_\infty$ 는 주위 압력,  $M_{wf}$ 는 연료의 분자량,  $C_{st}$ 는 체적화화학양론농도이다. 증기운 폭발에 따른 충격파( $I$ )는 다음 식(4.6)과 같이 표현된다.

$$I = \int_0^{t^+} P_p f(t) dt \quad (4.6)$$

함수  $f(t)$ 는 증기운 폭발에 의해 발생하는 충격파의 종류(이상 충격파, 비 이상 충격파, 압력과 등)에 따라 결정되며,  $P_p$ 는 최대 과압(Peak static overpressure)이다. 폭발과압과 양압지속지속곡선은 이상 충격파, 비 이상적 충격파, 그리고 압력파의 3가지 형태의 유형을 포함하며 각 파형은 서로 다른 파형을 가지고 있다. [그림 19]는 충격파 중에서 이상 충격파(Ideal shock wave)의 형태를 개략적으로 나타낸 것으로서,  $t_d$ 는 양압 지속시간(positive phase duration)을 의미한다. [그림 19]에서 알 수 있듯이 이상 충격파는 과압에 의존하는 가로 축의 반신(절반의 길이)을 갖는 쌍곡선으로 취급되며, 이러한 형태를 기초로 폭발에 의한 충격( $I$ )은

이상 충격파와 다음과 같은 식(4.7)이 성립된다.



[그림 19] 이상적인 충격파 형태

$$I = P_p \cdot t_d \cdot \left[ s_0 + a^2 \cdot \frac{\ln \left( \frac{1-s_0}{-s_0} \right)}{2} \right] \quad (4.7)$$

여기서  $s_0$  및  $a'$ 는 이상 충격파 지수,  $a$ 는 쌍곡선의 가로축 반신으로서 다음과 같이 식(4.8) 및 식(4.9)으로 표현된다.

$$s_0 = \frac{-a'^2}{2(1-a' \cdot \sqrt{2})}, \quad a = a' - s_0 \cdot \sqrt{2} \quad (4.8)$$

$$a' = f(P_p) \quad (4.9)$$



증기운 반경과 높이와의 관계는 다음과 같다. 즉, 증기운 반경( $R_0$ )은 증기체적 및 증기운 높이의 함수이며, 구형 증기운의 반경 ( $R_{0s}$ )는 다음 식(4.10)과 같이 체적( $V_c$ ) 만의 함수이다.

$$R_{0s} = \left( \frac{3 \cdot V_c}{4 \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.10)$$

또한 폭발 과압의 감소( $\Delta P$ )는 다음 식 (4.11)과 같이 계산된다.

$$\Delta P = S_F \cdot P'_{12} \quad (4.11)$$

식(4.11)에서  $S_F$ 는 방호팩터(shielding factor)이며,  $S_F$ 와 방호팩터 파라메타 (Shielding factor parameter,  $V^*$ )와의 관계는 식(4.12) 및 (4.13)과 같다.

$$S_F = (1 - V^{*2})^{\frac{1}{2}} \quad V^{*2} \leq 1 \quad (4.12)$$

$$S_F = 0 \quad V^{*2} > 1$$

$$V^{*2} = \sum_{i=1}^3 \left\{ \left( \frac{\partial f_i}{\partial x^*} \right)^2 + \left( \frac{\partial f_i}{\partial y^*} \right)^2 + \left( \frac{\partial f_i}{\partial z^*} \right)^2 \right\} \quad (4.13)$$

또한, 방호 구조물과 요소에 대해 100%의 손실 및 상해를 유발하는 폭발 과압을  $P_1$ 이라 하고, 방호 구조물과 요소에 대한 사고유발 압력을  $P_2$ 라 하였을때,  $P'_{12}$ (폭발압력)는 식(4.14)와 같이 정의되어  $P_1$ 과  $P_2$ 중에서 작은 값이 된다.

$$P'_{12} = \min(P_1, P_2) \quad (4.14)$$

### 3.2 폭발 피해평가 모델

본 연구에서는 사용한 폭발 피해평가 모델은 VEXDAM(Vapor Explosion Damage Assessment Model)을 사용하였다. VEXDAM은 미국 Trinity Consultants, Inc.의 상업용 코드로서 폭발압력 및 지속시간의 계산은 TNO multi-energy모델에 의하여 계산 가능하다. VEXDAM(Vapor Explosion Damage Assessment Model)코드는 가연성 기체 또는 액체의 1차 폭발 및 그에 동반하는 2차 폭발로부터 시설 내의 구조물이 받는 피해를 평가하기 위한 폭발물 피해평가 모델이다. 그 평가 대상은 주로 폭발물저장고 및 공장 시설의 피해분석만이 아니고, 시설물 내의 부상자의 예측도 가능하다. 이를 위해 건조물 및 작업자가 존재하는 특정 지점의 압력 레벨을 예측하기 위하여 동압(Dynamic Pressure) 및 초과압(Overpressure)의 곡선을 사용하고 있다. 또한, 건조물의 피해와 인신 상해는 차단 알고리즘에 기초한 방법이 사용되고 있으며, 2차 폭발의 영향, 건조물 차단이 계산된 후에 결정된다. 단일 구조물의 파라메트릭 해석 기능은, 시설 내의 각각의 건조물마다 실험된 압력과 피해에 대해서 여러 가지 중요 독립변수의 영향을 추정하는 것이 가능하다. 또한, 취약성 파라메타를 작성하기 위한 P-I곡선을 사용하여 기본 구조물의 구성요소 및 각 인체 부분의 상세 특성을 지정할 수가 있다. 폭발 모델링의 최초 단계는, 하나 이상의 구조물 및 인원으로 구성된 설비 내 또는 주변의 일차 폭발을 지정하는 것이다. 시설 내에 폭발 위치를 X, Y, Z좌표, 폭발원의 높이, 그리고 폭발 생성율의 지정이 가능하다. 또한 구조물, 폭풍에 의해 영향을 받을 가능성이 있는 구조물, 그리고 건물 내 외에서의 근로자의 위치나 작업자세 등의 데이터를 입력하여 조건을 지정할 수도 있다. 여기에서 필요한 데이터는 구조물의 종류, 구조물의 X, Y, Z좌표, 높이와 방향을 포함하는 구조물 파라메타, 그리고 구조물을 구성하는 장방형의 수, 재질 등이다. 콘크리트, 알루미늄, 벽돌, 유리, 철강과 같은 표준적인 구조물 구성요소, 빌딩, 격납고, 지하구조, 공업설비, 저장 탱크 등의 복합구조 등이 고려되어 있으며, 이들 요소에 대하여 취약성 파라메타를 정의한다. 폭발에 의한 인명 피해를 예측하기 위해서, 폭풍원(Blast wave)

에 관한 시설 내의 전 인원의 위치 좌표 정보와 장소를 지정하는데, 이 때 각 인원은 북쪽 방향을 기준으로 한 각도, 각 개인의 위치, 자세 정보를 필요로 한다. 또한, 28종류의 특정 인체 부분의 인체 취약성에 관한 특정 정보를 참고하여 지정할 수 있다. 폭발모델링은 입력된 구조물 및 근로자 배치 등의 데이터를 사용하여, 1차 폭발에 의해 시설물 내의 각 구조물과 인간이 받은 폭발 압력(동압)을 예측하는데, 서로 간에 격리되어 있는 구조물의 영향도 고려할 수가 있다. 피해 평가는 폭발압력-피해 레벨의 실험적 결과에 근거하여 각 구조물의 손상과 인간의 상해 정도를 계산한다. 그 밖에, 폭발압력 분포 계산 영역 내에 시설물을 자유롭게 배치하고, 특정 위치에서 형성되는 폭발 압력의 계산, 구조물과 인간 간의 손상 및 상해 분포를 분석할 수가 있다.

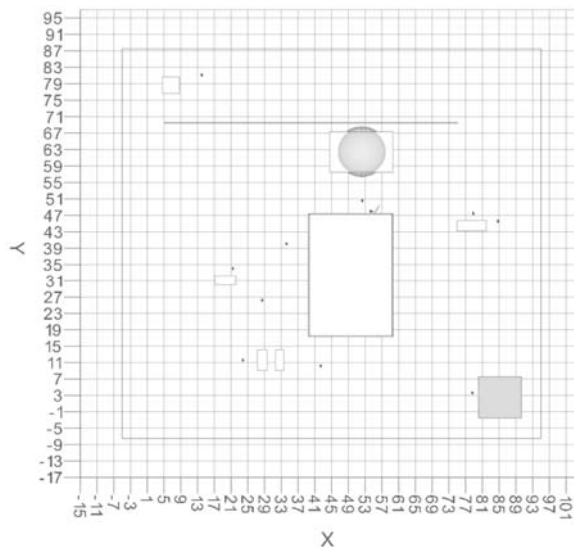
### 3.3 폭발시나리오 및 조건

본 연구에서의 폭발모델링평가는 메탄( $\text{CH}_4$ ) 가스의 누출사고로 인한 가스의 착화, 폭발에 따른 과압의 추정과 피해영향 평가를 목적으로 한다. 폭발 케이스는 VCE(Vapor Cloud Explosion)이며 여기에 적용한 계산 방법은 TNO Multi-energy Modeling이다. TNO Multi-energy Modeling을 사용하여 가압 용기 내의 메탄의 누출량, 증기운의 반경, 가연성 물질의 순 연소열, 폭발에너지, 대상물 거리에 대한 환산거리 등을 고려하고, 충격파 곡선에 따른 대상물과의 과압 분포와 거리에 따른 피해 확률을 추정하는 방법이다. 본 폭발피해평가에서는, 2차원 상의 과압 분포와 같은 기존의 평가법과 같이 실제 현실을 재현하기 힘든 과압 피해 추정법을 지향하고 실제 사업장과 유사한 3차원 상의 작업 공간에서의 폭발 압력 분포를 계산하여 각 주변 건물과 근로자에게 미치는 과압 및 사상자 분포 확률을 추정하여 보다 실제적인 안전대책을 강구하는데 도움이 되는 자료를 제공하고자 하였다. 메탄( $\text{CH}_4$ )의 가스폭발에 따른 과압 계산을 위해 <표 9>와 같은 물질 및 기상 조건을 설정하였다.

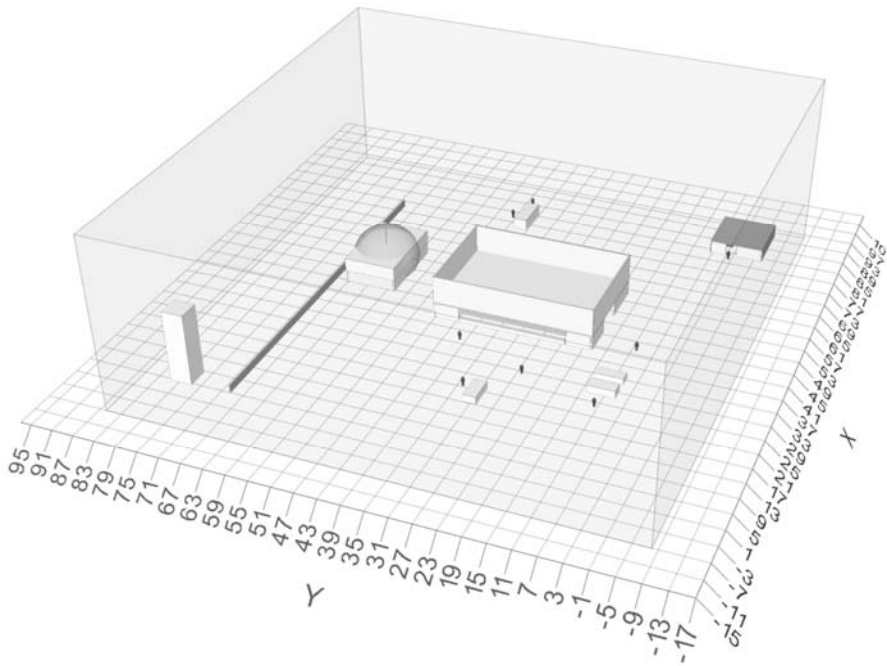
〈표 9〉 폭발원인물질 및 기상 조건

사고 물질명	메탄( $\text{CH}_4$ )
기온 ( $^{\circ}\text{C}$ )	21
기압 (atm)	1
누출량 (kg)	50
분자량 (g/mol)	16.0
순 연소열 (J/kg)	$5.0 \times 10^7$
밀도 ( $\text{kg/m}^3$ )	0.7168 (at $0^{\circ}\text{C}$ , 1atm)
화학양론농도 (vol%)	9.48

다음으로 폭발이 발생하는 3차원 공간의 사업장을 [그림 20]~[그림 21]와 같이 설정하였다. 3차원 상의 폭발과압을 계산하기 위해서는 계산 mesh의 설정과 mesh 상의 건물 및 작업자의 배치 조건이 필요하다. [그림 20]에서 1 mesh 간의 거리는 5 m이며 폭발이 발생하는 0.3 m 두께의 콘크리트 구조 건물이며 가로 20 m, 세로 30 m, 높이 10 m로 하였으며, [그림 21]과 같이 폭발시나리오에서 설정한 사업장 평면도 및 3차원 공간상의 건물과 작업자의 위치를 결정하였다. 이와 같이 하여 사업장과 유사한 3차원 시뮬레이션 공간을 설계하였다.



[그림 20] 폭발피해예측을 위한 사업장의 단면도 (1 mesh=5m)



[그림 21] 3차원 공간에서의 건물 및 작업자의 위치 현황

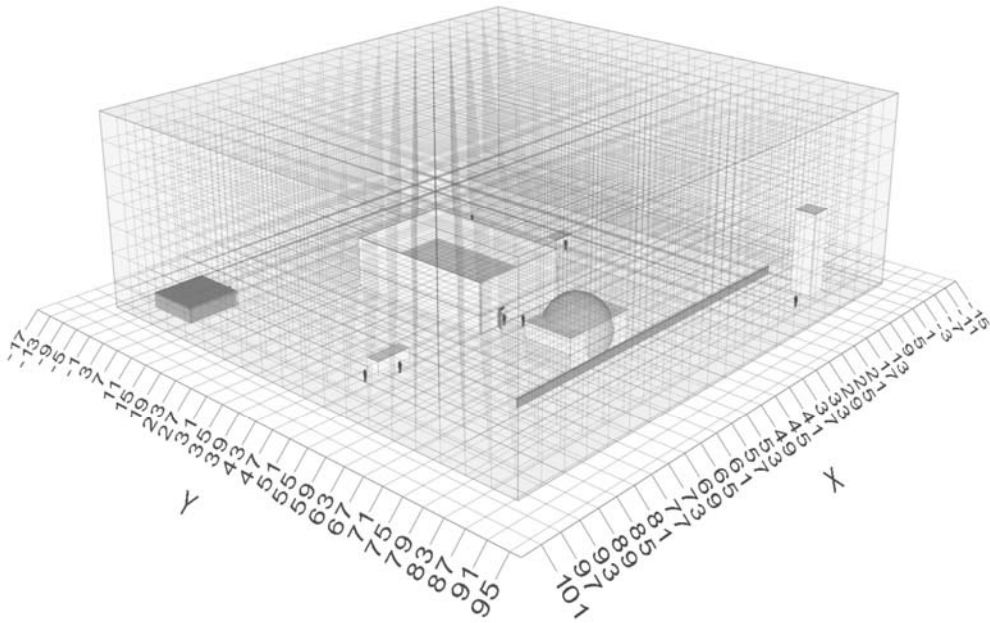
폭발이 본 폭발모델링에서는 압력계산, 차폐효과, 2차 폭발, 펄스 지속효과, 손상-상해 레벨 계산, 구조물의 분할 등을 고려하여 계산하고 있다. 본 폭발피해평가의 계산에 있어서 제한 조건은 다음과 같다.

- 표고 등의 지형의 높낮이는 고려하지 않았다.
- 단일 1차 폭발에 의한 과압 및 동압 만을 고려하였다.

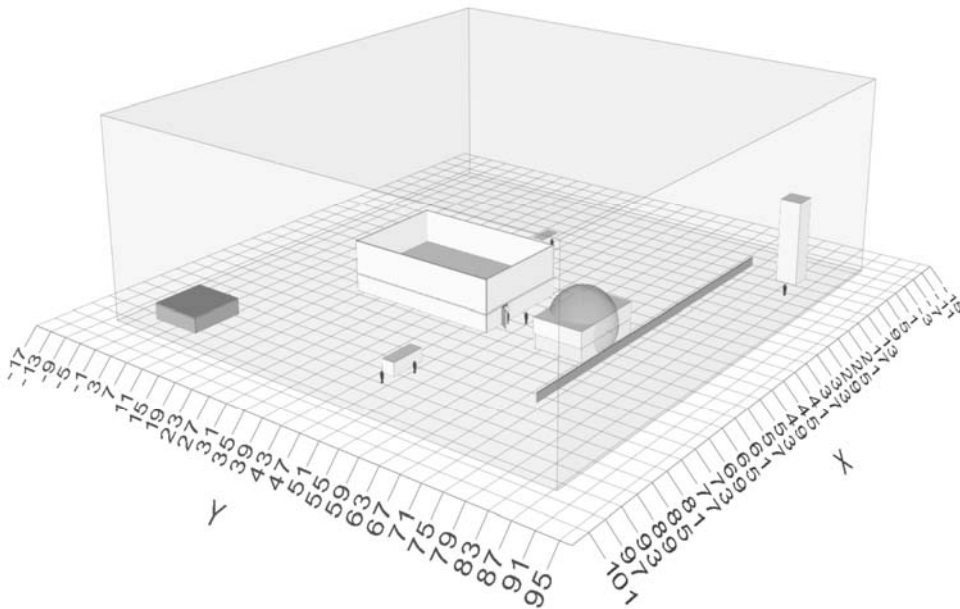
복수 충격파 반사(Multiple shock reflections)에 의한 충격(Impulse) 효과는 실험적으로 아직 명확히 밝혀지지 않았다. 이러한 이유로 본 연구에서는 콘크리트 구조물 내의 폭발에서 나타나는 Multiple shock reflections 효과는 고려하지 않았으며 이 때문에 구조물 손상 및 인명 피해의 예측 정확도는 실제의 폭발사고와 비교한다면 다소 영향이 있을 것으로 판단된다.

### 3.4 폭발계산 결과 및 분석

폭발피해평가 계산을 위해 설정된 계산 메쉬 상의 폭발 발생 건물 내의 가스, 건물 및 작업자 배치 모습을 [그림 22]~[그림 23]에 나타냈다. 폭발과압에 의한 건물 및 사람에 대한 피해판정 기준은 <표 10>과 같다. 폭발 피해평가를 통한 사업장 내 폭발계산 결과로부터 [그림 24]~[그림 25]와 같은 과압 분포가 얻어졌다. 폭발 발생 건물 및 주변의 과압은  $7.73 \times 10^2 \sim 1.03 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 로 나타나 매우 심각한 건물 손상이 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 폭발 발생 건물을 제외한 주변 건물에 대한 피해 충격파의 영향은 손상 및 상해가 적은 결과가 나왔다. 메탄 가스의 폭발에 따른 폭발 압력이 건물 외벽이 0.3 m 두께의 철근 콘크리트의 파괴에 사용되어 대부분의 폭발 에너지가 과압의 감쇄로 이어진 결과로 판단된다. 그러나 본 폭발 피해에서의 평가는 사상자의 발생을 과압 발생 및 분포라는 판단 기준에서 실시된 것으로, 폭발 발생 시의 기타 영향 등에 대해서는 고려되어 있지 않다. 예를 들면 예상되는 폭발피해 영향으로서는 폭발이 발생한 건물 내외의 시설 파괴로 인한 폭발 파쇄물이 주변 지역으로 비산하여 발생하는 피해가 있다. 실제의 가스폭발로 인하여 발생한 콘크리트 파쇄물이 주변 공장 건물이나 사업장 밖의 다른 건물에 도달하여 시설물이나 사람의 신체 부위에 타격이 일어나면 심각한 영향을 줄 가능성은 있다. 그러므로 폭발과압에 따른 직접적인 피해가 없다고 하더라도 폭발 비산물에 대한 안전 대책은 필요하다. [그림 26]은 폭발원에서부터 거리에 따른 사상자 발생 확률로서 폭심(Explosion source)으로부터 거리 40 m 이내까지는 100 %의 사상자 발생율이 예상되며 그 이상의 거리에서는 약 50 % 정도의 사상자 발생 가능성이 있는 것으로 나타났다. 폭심 인근의 건물 안에 있는 작업자의 경우에는 서서 있거나 앉은 작업 자세 등의 몸의 위치에 따라 부상발생 가능성이 달라진다. 이러한 결과로부터 0.3 m 두께의 철근 콘크리트에 되어 있는 건물시설의 외벽은 폭발에너지를 감소시켜 과압의 확대방지를 위해 중요한 역할을 하고 있는 것을 알 수 있다.



[그림 22] 폭발계산을 위한 격자 구조

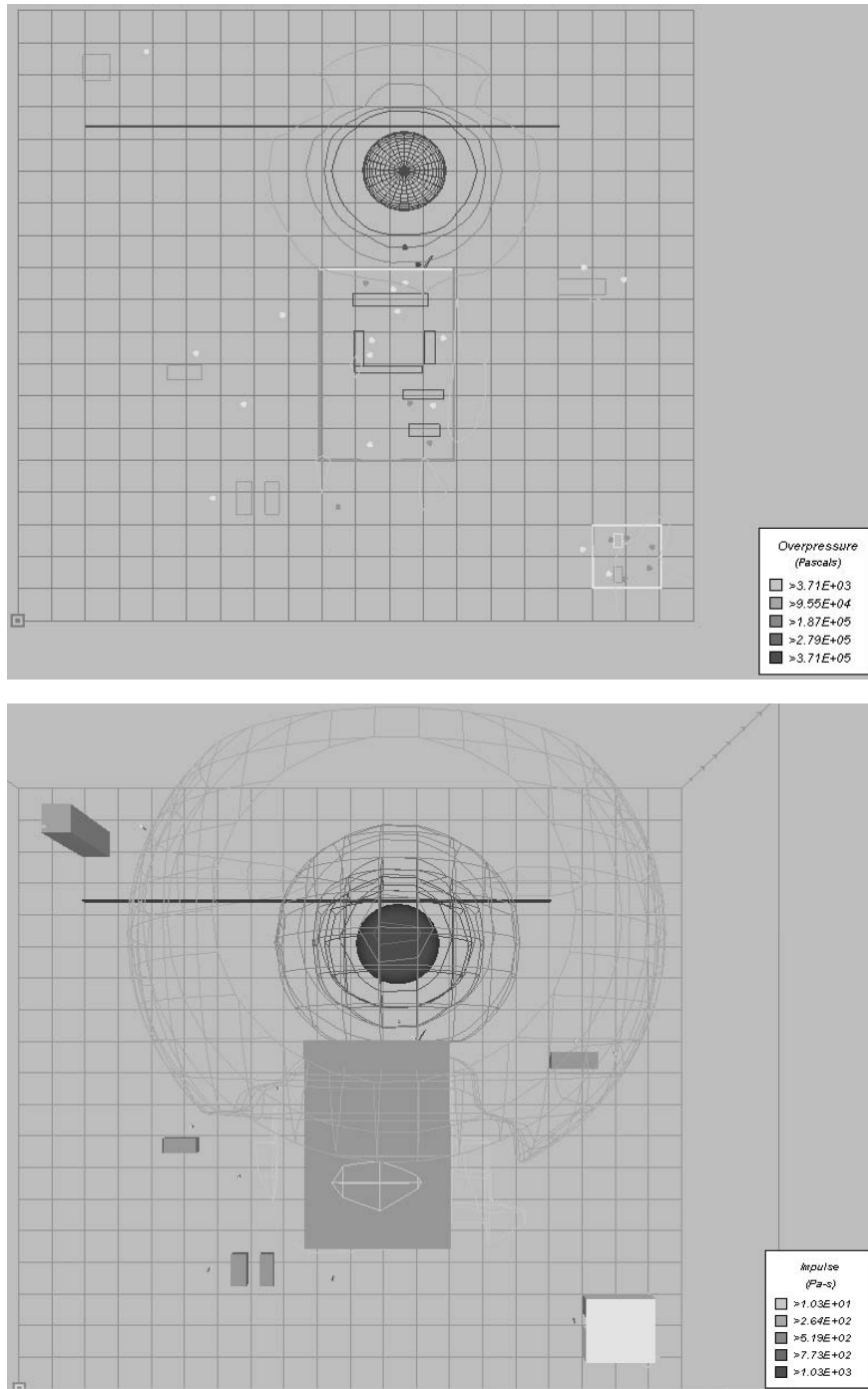


[그림 23] 폭심 주변의 건물 및 작업자 위치

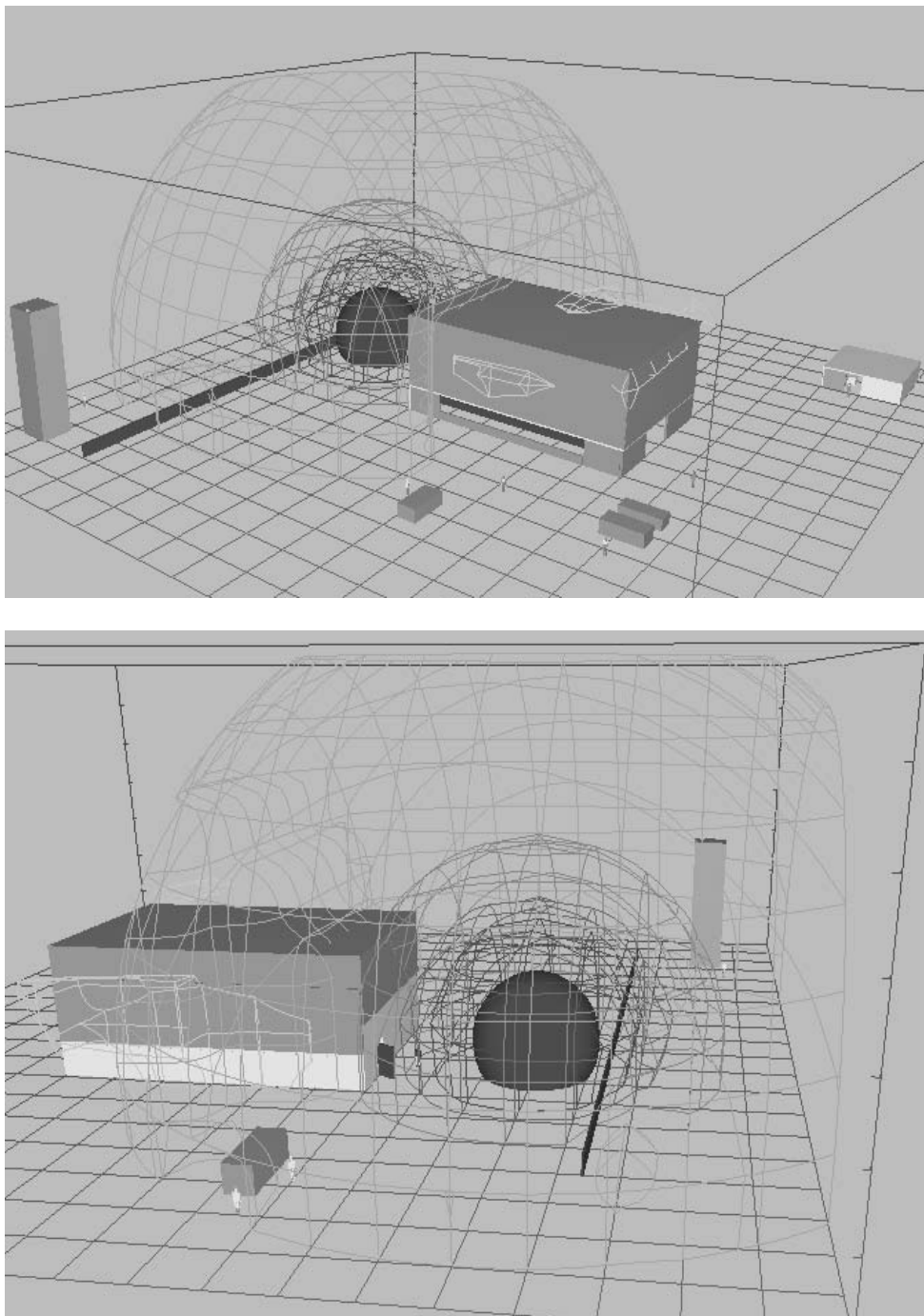
〈표 10〉 폭발피해 판정 기준

Level	상세 설명
녹색(No Injury & damage)	상해, 손상 없음
노랑(Slight Injury & damage)	미세 상해 및 손상으로, 인체 장기 및 외상 발생 확률이 5% 미만이며, 건물의 손상이 매우 경미하여 간단히 수리 가능한 정도.
옐은 주황 (Moderate Injury & damage Level I)	인체 장기 및 외상 발생 확률이 5~15% 미만 및 건물의 일부가 제 기능을 하지 못하여 수리가 요구되는 손상.
진한 주황 (Moderate Injury & damage Level II)	인체 장기 및 외상 발생 확률이 15~30% 미만 및 건물의 효과적인 사용이 제한 받아 수리에 큰 비용이 필요한 손상.
밝은 빨강 (Sever Injury & damage Level I)	인체 장기 및 외상 발생 확률이 30~75% 미만 및 일부 재건축을 요하는 구조물의 커다란 파괴.
진한 빨강 (Sever Injury & damage Level II)	인체 장기 및 외상 발생 확률이 75% 이상 및 전체적 재건축을 요하는 구조물의 완전한 파괴.

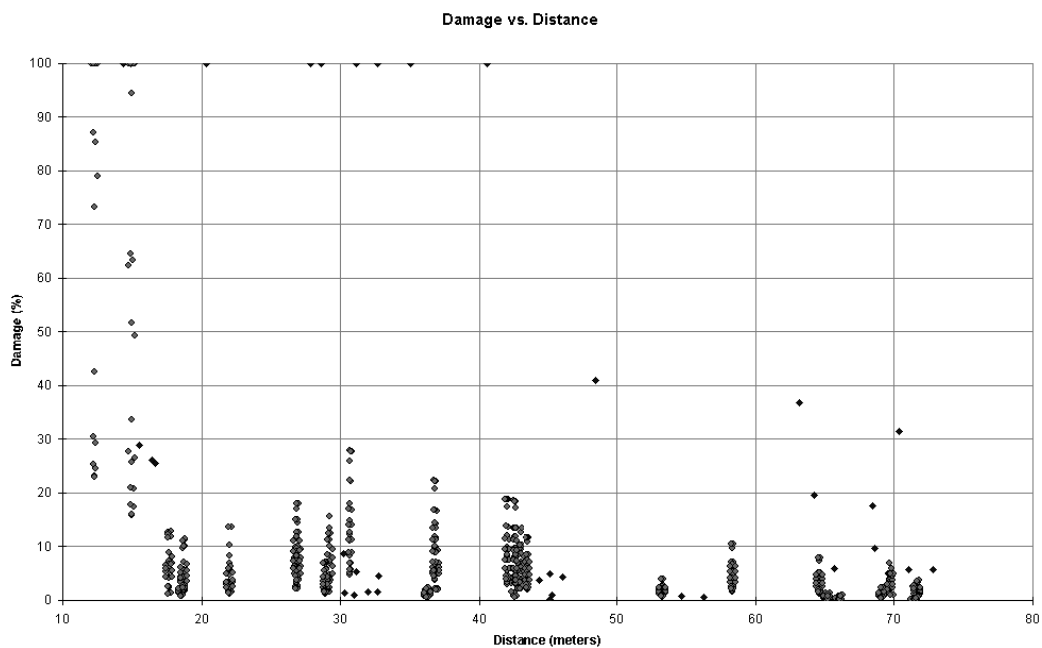




[그림 24] 폭심 주변의 과압 분포도



[그림 25] 폭발 건물 주변의 3차원 과압분포



[그림 26] 폭발원에서부터 거리에 따른 사상자 발생 확률



## VI. 결 론

### 1. 조사 및 분석 결과

본 연구에서는 화학물질 중에서도 인화성가스의 폭발사고에 있어서 그 피해영향 평가 방법을 조사하고 효율적인 평가방안을 제시하여 폭발재해예방 및 저감에 기여하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 먼저 도시가스 및 사업장의 연료원으로 많이 사용되는 메탄을 대상으로 폭발특성을 실험적으로 검토하였다. 폭발압력의 피해를 예측하기 위한 기존의 대표적인 폭발피해예측모델의 활용방안을 제시하고자 동일 조건의 사고시나리오를 적용하여 예측결과를 분석하였다. 또한 현실적인 폭발 피해영향을 검토하기 위하여 사업장 건물, 규모, 구조물 및 근로자 배치 상황 등을 고려한 실규모 공간에서의 폭발피해영향을 검토하여 건물의 손상과 작업자의 상해 가능성을 예측하고 화학사고 시의 폭발피해 예측모델의 활용 가능성을 제시하여 인화성가스의 화학사고 발생 저감에 기여하고자 하였다. 본 연구를 통하여 이하의 결과를 얻었다.

- (1) 메탄가스의 농도변화에 따른 폭발압력을 조사한 결과 9.6 vol%에서 0.861 MPa로서 최대가 되었다.
- (2) 최대폭발압력 도달시간은 농도에 따라 변화하는데 이론적 화학양론농도 (Cst)인 9.47 vol% 부근에서 가장 작았으며 Cst를 기준으로 그 이하 또는 이상의 농도에서는 증가하였다.
- (3) 메탄 농도에 대한 폭발압력과 최대폭발압력 도달시간은 반비례 관계인 것을 실험결과를 통해 확인할 수 있었다.
- (4) 메탄의 연소반응에 있어서 11종( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}$ )의 연소가스를 고려한 화학반응식을 제시하고 단열화염온도를 계산

- 한 결과 최대 화염온도는 이론혼합비(9.4 vol%)보다 높은 농도인 9.5 vol%에서 2018.75 °C의 값이 얻어졌다.
- (5) 메탄가스의 폭발시에 생성되는 연소가스의 물분율을 가스농도에 따라 계산한 결과, 농도로 증가할수록 산소(O<sub>2</sub>)가 급격히 감소하고 CO가 반대로 증가하여 불완전연소가 급증하는 것을 알 수 있었으며 연소반응에 관여하지 않는 N<sub>2</sub>는 가스농도에 관계없이 일정하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
  - (6) 메탄 폭발시의 초기압력이 단열화염온도에 미치는 영향을 추정한 결과 초기압력이 10 atm까지 증가할수록 단열화염온도도 증가하였으나 10 atm 이상에서는 농도에 관계없이 이러한 경향은 감소하였다.
  - (7) 초기압력 조건이 메탄의 화염온도에 미치는 영향을 계산한 결과 이론혼합비에서 초기 압력에 의한 영향이 가장 크며 이론혼합비보다 농도가 증가하거나 감소하는 경우에는 영향이 감소하고 있다. 특히 이론혼합비 이외의 농도에서는 초기압력이 10 atm이상이 되면 단열화염온도에의 영향이 무시될 정도로 작았다.
  - (8) 메탄의 농도 변화에 따른 폭발압력(P<sub>m</sub>)을 추정하기 위해서 단열화염온도 및 각 분자종의 물분율(Mole fraction)를 고려한  $P_m = \{(\sum n_i RT) / V_0\}$ 의 식을 이용하여 계산한 결과 메탄 농도 8~12 vol%에서 폭발압력의 실험값은 계산값과 거의 일치하였지만 그 이외의 폭발한계농도에서는 큰 오차를 나타냈다.
  - (9) 동일 폭발사고시나리오에 대하여 TNT Equivalent model, TNO Multi-Energy model, Baker-Strehlow model의 계산결과를 분석한 결과 250 m 이상의 거리에서는 각 모델 간의 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다.
  - (10) 200m 이하의 거리에서 폭발과압은 Multi-Energy model과 Baker Strehlow model의 결과는 0.24~0.25 bar로서 거의 같았으며, Equivalent TNT Mass model의 결과는 0.06 bar로서 실제보다 과소평가되고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 계산 결과를 실제 사고피해 상황과 비교, 검토하면 모델의 적용 및 활용성 향상이 가능할 것으로 판단된다.
  - (11) 메탄 누출에 의한 폭발피해영향평가를 3차원 공간을 가정한 사업장을 대상으로 실시하여 폭발과압에 의한 폭심으로부터의 거리에 따른 건물 및 사람

에 대한 피해확률분석을 실시하였으며 이러한 결과를 통하여 사고조사 및 안전대책에 활용할 수 있음을 확인하였다.

## 2. 폭발 피해예측 적용방안

폭발압력의 피해를 예측하기 위한 모델로서 국내외 안전기준에 많이 사용되고 있는 것은 TNT등가 모델(TNT Equivalent method), TNO 모델(TNO Multi-Energy method), Baker-Strehlow method 등이 있으나 각 모델의 특성에 따른 활용성이 부족한 실정이다. 본 연구에서는 상기 3가지 모델을 대상으로 동일 가스폭발에 대해 피해영향평가를 실시하여 결과를 분석하고 적용성에 대하여 분석한 결과 적용방안을 다음과 같이 제시하였다.

- (1) TNT Equivalent model은 개방공간에서의 Detonation을 전제로 해석하기 때문에 인화성 가스나 유증기 누출과 같이 폭연(Deflagration)을 동반하는 폭발사고의 경우에는 적용하지 않는다.
- (2) TNO Multi-Energy model은 증기운폭발을 전제로 해석하기 때문에 폭발 강도를 결정하는 것이 필요하므로 누출한 가연성 가스나 액체의 양을 어느 정도 알고 있는 경우에 적용할 수 있다.
- (3) Baker-Strehlow model은 증기운 폭발을 전제로 하고 있으며 화학물질의 연소속도나 화염전파속도의 자료를 활용하여 화염의 확대방향과 건물이나 구조물 등의 장애물이 존재하는 경우의 폭발피해영향 조사에 적용할 수 있다.
- (4) 폭심으로부터의 거리에 따른 건물, 장치, 사람에 대한 피해영향평가를 위한 모델로서 VEXDAM (Vapor Explosion Damage Assessment Model)을 사용하면 3차원 공간에서 간이적인 피해예측 정보를 얻기 위해 활용 가능하다.





## 참고문헌

- AICHe : Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases (2000).
- Brasie W.C. and Simpson D.W., "Guidelines for Estimating Damage from Chemical Explosions", Symp. on Loss Prevention in Process Industries, 63rd AICHe Meeting, St. Louis, Missouri, USA. (1968)
- Berg van den A.C., "The Multi-Energy Method. A Framework for Vapour Cloud Explosion Blast Prediction", J. Hazard. Mater. 12:1-10, (1985).
- Berg van den A.C, and Lannoy A., "Methods for Vapor Cloud Explosion Blast Modelling", J. Hazard. Mater. 34:151-171, (1993).
- Berg van den A.C., Voort van der M.M., Weerheijm J., and Versloot N.H.A., "Expansion-controlled Evaporation: A Safe Approach to BLEVE Blast", J. Loss Prev. Proc. Industr. 17:397-405, (2004).
- CCPS AICHe : Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards Second Edition (2010).
- Eggen, J.B.M.M., Development of Guidance for the Application of the Multi-energy Method, TNO Prins Maurits Laboratory, The Netherlands, (1998).
- Mercx, W.P.M., Van den Berg, A.C., Hayhurst, C.J., Robertson, N.J., Moran, K.C., Developments in vapour cloud explosion blast modelling, J. Hazard, 71, 301-319 (2000).
- Turner, T. and Sari, A., Vapor Cloud Explosion Prediction Methods - Comparison of TNO Multi-Energy (ME) and Baker-Strehlow-Tang (BST) Models in Terms of Vulnerability of Structural Damage Caused by an Explosion, Structures Congress, 177-188 (2012).



## Abstract

### Study on damage prediction in explosion accidents of chemical materials (Focused on Flammable gas)

Ou-Sup HAN

Center for Chemicals Safety and Health,  
Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA  
339-30, Exporo, Yuseong-Gu, Daejeon 305-380, Korea

Objectives : Accident prevention measures for the reduction of explosion damage should be examined sufficiently to minimize the damage before the accident. In this study, the prediction of explosion damage of chemical substances was investigated to reduce the explosion accidents due to leakage, diffusion of flammable gas, especially.

Methods : The explosion models (TNT Equivalent method, TNO Multi-Energy method, Baker-Strehlow method) based on experimental results was investigated and compared the results of analysis on explosion scenario. Explosion properties in methane-air mixtures were conducted to compare the experimental data with the calculation of explosion pressure and temperature. Also, the 3D explosion simulation was investigated to predict the damage of humans and structure in a 3D virtual experimental space.

Results : The chemical equation considering the combustion gases of 11 species was proposed and calculated the adiabatic flame temperature and explosion pressure with concentration of methane. Experimental data of explosion pressure in methane concentration of 8~12 vol% was nearly consistent with the calculated value. For the explosion overpressure at a distance of less than 200 m, Multi-Energy model and Baker Strehlow model was in 0.24~0.25 bar and the calculated result of Equivalent TNT Mass model was 0.06 bar. The explosion damage assessment was performed by the methane leakage in the target sites of the 3-dimensional space. The present study was conducted by using explosion simulation to predict the damage of humans and structure in a 3D virtual experimental space similar with the methane gas explosion accident. For this purpose, the TNO Multi-Energy method model was used to calculate the overpressure distribution at any given distance from methane gas explosion source. And Analysis of the damage to the building and the people in accordance with the distance from explosion source was carried out by the explosion overpressure. As the result, we found that the estimations of percent damage versus distance from the explosion source for each human and building take advantage of the accident prevention and safety measures.

**Key Words** : Chemical materials, Gas explosion, Explosion pressure, Flame temperature, Flame velocity, Explosion simulation

## 《연구진》

연구기관 : 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

연구책임자 : 한 우 섭 (연구위원, 화학물질센터)

연구원 : 한 인 수 (연구원, 화학물질센터)

최 이 락 (연구원, 화학물질센터)

박 상 용 (연구원, 화학물질센터)

## 《연구기간》

2015. 01. 01 ~ 2015. 11. 30

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

**산업안전보건연구원장**

## **화학물질의 폭발사고 피해예측 및 적용방안 연구**

(2015-연구원-1093)

---

발 행 일 : 2015년 11월 27일

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 권혁면

연구 책임자 : 산업안전보건연구원 화학물질센터 연구위원 한우섭

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소 : (34122) 대전광역시 유성구 엑스포로 339번길 30

전 화 : (042) 869-0321

F A X : (042) 863-9002

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

---