

연구보고서

화재폭발 영향도 및 사고 해석 모델 연구(I)

한우섭·이정석·박상용·최이락

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



요 약 문

1. 연구제목 : 화재폭발 영향도 및 사고 해석모델 연구(I)

2. 연구 필요성 및 목적

산업안전보건법에서 규정하고 있는 위험물질 중에서 인화성 가스는 고압가스 형태로 고압 용기 또는 탱크 등에 저장되어 사용되고 있다. 이러한 인화성 가스가 용기의 파열 등으로 누출이 일어나면 착화에 따른 폭발사고 위험성이 있으며 그에 따른 인적, 물적 피해가 예상된다. 그러므로 폭발피해 예측을 통한 예방대책이 필요하다. 국내외에서 일반적으로 사용되고 있는 화학물질의 화재폭발사고 피해영향평가는 사고시나리오를 기반으로 누출속도, 누출시간, 누출량 등을 중심으로 과압과 환산거리를 해석하는 경우가 많다. 이러한 화재폭발 해석 방법은 공정안전(PSM)보고서나 위험성성평가보고서에 활용되고는 있지만 해석 결과는 실제 화재폭발사고의 피해영향과 차이가 날 수 있다. 그러므로 실험적으로 평가하기 어려운 대규모 화재폭발사고의 예방과 피해저감 대책을 강구하고 효율적인 화학사고 관리를 위해서는 기존의 폭발피해를 예측하기 위한 평가방법 및 영향도 분석의 적용 가능성을 조사하고 실제 사고의 피해평가에 효과적인 분석모델을 제시하여 체계적인 위험관리구축이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 저장탱크나 배관 등의 파손으로 누출된 가스의 폭발로 발생하는 폭발압력 영향을 산정하기 위한 폭발모델을 조사하였다. 이를 위해 국내외적으로 많이 적용되는 TNT equivalent model(TNT 등가법)을 중심으로 그 활용성을 검토하였다. 또한 저장 용기로부터의 누출 위험성을 평가하기 위해서 저장 탱크의 파열에너지를 추정하는 기존의 평가모델을 대상으로 실제 사고

결과와의 비교, 분석을 통해서 가장 적합한 해석모델이 무엇이지를 조사하였다. 이를 위해 저장 용기의 파열 전후의 압력 차이에 따른 방출에너지를 계산하고 그 결과와 등가인 TNT 화약량을 계산하고 TNT 등가 모델식을 사용하여 일정 지점의 폭발압력을 계산함으로써 모델의 정확성 정도를 평가하였다. 또한 폭발사고의 피해 크기를 지배하는 폭풍압이 폭발공간에 놓여진 장애물에 어떤 영향을 주는가에 대해서 실험적으로 검토하였다. 구체적으로는 화염전파 특성이 장애물의 유무 및 장애 크기 조건에 어떠한 영향을 주는가에 대하여 장애율이라는 평가 파라메타를 도입하여 실험적인 조사를 실시하였으며 연구결과를 활용하기 위한 적용방안을 제시하였다.

3. 연구내용 및 방법

(1) 연구내용 및 범위

- 국내외 화재폭발사고 영향도 연구의 조사 및 분석
- 화재폭발 현상 및 해석모델의 조사와 평가
- 실제 화학사고결과와의 비교검토를 통한 화재폭발해석모델 제안

(2) 연구방법

- 화재폭발 피해 영향도에 대하여 기준값과 그 타당성 검토
- 정상작업시의 가스 및 액체 누출 시의 사고형태 조사
- 실제 사고결과와의 비교를 통한 폭발해석 모델의 적용성 조사
- 폭발공간에서의 장애물 크기에 따른 폭발과압 특성에 대한 실험적 조사
- 폭발피해 영향평가 결과의 활용 및 적용방안 제시

4. 연구결과

- (1) 화재폭발 피해 평가를 위해 파열에너지 및 폭풍압에 대한 평가모델을 검토하였으며 실제 사고피해의 결과와 비교, 검토한 결과 Brode model을 적용

한 폭발과압 환산거리가 가장 오차가 작았다.

- (2) 폭발압 계산을 위한 과열에너지 계산모델로서 Kinney model은 실제 사고 결과보다 과대평가된 값을 나타내며 Baker model은 과소평가의 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다.
- (3) 밀폐용기에서 메탄-공기 불균일 혼합기의 농도 차이가 0.05 %가 되는 조건으로서 용기 길이가 2배가 되면 소요 시간은 약 4배가 늘어났다.
- (4) 11종의 연소가스를 고려한 화학반응식을 적용하여 메탄의 농도변화에 따른 폭발압력을 계산한 결과, 계산값은 모든 농도에 있어서 실험값보다 컸지만 농도에 따른 폭발압력의 증감 경향을 설명할 수 있었다.
- (5) 폭발공간에서 폭발압력 및 화염전파속도에 미치는 영향을 일반화하고자 장애물 파라메타를 도입하였으며, 실험 결과를 통하여 장애물의 개수에 관계없이 장애물이 증가하면 폭발압력이 증가하였다.
- (6) 10 %의 메탄 농도에서 장애물이 없는 조건(장애물이 0)에서 화염전파속도는 3.46 m/s이지만 장애물 0.98에서 24.2 m/s 높아져 약 8배로 증가하였다.
- (7) 동일한 장애물 조건에서는 장애물의 개수가 많을수록 폭발압력 및 화염전파속도가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.
- (8) 밀폐공간에서의 장애물 효과에 대한 실험결과와 동일한 조건으로 시뮬레이션을 통해 검토한 결과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

5. 활용방안 및 기대성과

- (1) 화재폭발 영향도에 대한 위험성 정보 제공을 통한 체계적인 화학사고 관리
- (2) 화재폭발 피해예측 사례 및 예측 정보제공을 통한 재해저감에 기여
- (3) 화학사고조사 및 안전진단 시에 피해예측 자료를 제공

6. 중 심 어

메탄, 가스폭발, 폭발압력, 화염전파속도, 폭발시뮬레이션 (Methane, Gas explosion, Explosion pressure, Flame propagation velocity, Explosion simulation)

7. 참고문헌 및 연락처

□ 참고문헌

- AICHe : Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases (2000).
- Berg van den A.C., "The Multi-Energy Method. A Framework for Vapour Cloud Explosion Blast Prediction", J. Hazard. Mater. 12:1-10, (1985).
- Clancey, V. J., Diagnostic Features of Explosion Damage, 6th International Meeting on Forensic Sciences, Edinburgh, Scotland (1972).
- CCPS AICHe : Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards Second Edition, 253-257 (2010).
- CCPS AICHe : Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis (2000).
- Cleaver, R.P., Robinson, C.G., An analysis of the mechanisms of over-pressure generation in vapour cloud explosions, J. Hazard. Mater. 45:27 - 44 (1996).

Eggen, J.B.M.M., Development of Guidance for the Application of the Multi-energy Method, TNO Prins Maurits Laboratory, Rijswijk, 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).

三井化學岩國大竹工場, レゾルシン製造施設爆発・火災にかかわる報告書(2012).

□ 연락처

- ▶ 연구책임자 : 화학물질독성연구실 한우섭 부장
- ▶ 연구원 담당자 : 산업안전보건연구원 화학물질독성연구실 한우섭 부장
- ▶ 연락처 : T:042-869-0331 F:042-863-9002 E:hanpaule@kosha.or.kr

차 례

요 약 문	i
 I. 서 론	1
1. 연구 배경	1
2. 연구 내용 및 범위	2
 II. 가스폭발사고의 피해 영향 및 기준	4
1. 폭발에 의한 피해	4
1) 폭발압력과	4
2) 구조물 및 인체에의 영향	5
3) 비산물에 의한 위험성	7
4) 화염 방사열의 피해	8
2. 화재폭발 피해 영향도 및 기준	9
1) 사고현상 해석 모델	9
2) 폭풍압 모델	10
3) 저장탱크의 파열 에너지	14
3. 가스 누출에 따른 사고형태 및 분석	16
1) 사고사례 분석	16
2) 파열 및 폭풍에너지의 추정	18
3) 실제사고와 계산결과의 비교	19
4) 폭발공간에서의 장애물 영향	21

III. 장애물이 존재하는 밀폐공간의 폭발특성	22
1. 실험 및 방법	22
1) 시료	22
2) 덕트형 폭발용기	23
3) 화염관측 및 화염전파속도의 측정	24
4) 폭발압력의 측정	25
2. 결과 및 분석	26
1) 가스농도의 시간적 변화	26
2) 폭발압력	28
3) 폭발공간에서의 장애물	32
4) 장애물에 의한 폭발압력특성	34
5) 화염전파에 미치는 장애물에 의한 영향	37
IV. 장애물 조건에 따른 가스폭발 현상의 예측	44
1. 폭발계산의 이론	44
2. 폭발 피해평가 모델	47
3. 폭발 시나리오 및 조건	48
4. 폭발계산 결과 및 분석	51
VI. 결 론	57
1. 조사 및 분석 결과	57
2. 연구결과 활용방안	58
참고문헌	60
Abstract	61

표 차 례

<표 1> 폭발에 의한 주요 인체 피해 영향	5
<표 2> 액화가스의 기화율(재증발율) 예	13
<표 3> 폭풍압(과압)에 의한 피해 영향 기준	13
<표 4> 저장탱크 파열에너지의 해석모델	14
<표 5> 해석모델에 따른 파열에너지의 계산 결과 비교	15
<표 6> 사고사례에 대한 파열에너지 및 TNT당량의 계산	19
<표 7> 실제사고 및 해석모델과의 결과 비교	19
<표 8> 메탄(CH_4)의 물리적특성	23
<표 9> 장애율에 따른 개구면적	34
<표 10> 메탄의 물성 및 기상 조건	49

그림 차례

[그림 1] 폭약(TNT)의 폭발 시에 발생하는 압력과	12
[그림 2] 폭심 근방의 폭발 피해 모습	17
[그림 3] 폭심으로부터 거리에 따른 설비의 피해 상황	17
[그림 4] 폭발로 과열된 반응용기 파편의 비산 형태	18
[그림 5] Brode model(WTNT=1500 kg)에 의한 폭풍압 계산 결과	20
[그림 6] Kinney model(WTNT=2100 kg)에 의한 폭풍압 계산 결과	20
[그림 7] 덕트형 폭발용기 및 장애물의 모습	24
[그림 8] 밀폐용기 내의 CH ₄ 가스 농도 분포의 조사	26
[그림 9] 400 mm 용기의 시간적 가스 농도 변화	27
[그림 10] 800 mm 용기의 시간적 가스 농도 변화	28
[그림 11] 용기의 길이 조건에 따른 폭발압력의 영향	29
[그림 12] 메탄의 폭발압력의 실험값과 계산값의 비교	31
[그림 13] 장애물이 설치된 덕트형 폭발용기의 수직 단면	32
[그림 14] 장벽의 개구면적과 장애율의 관계	33
[그림 15] 장애 조건 및 농도 변화에 따른 폭발압력	35
[그림 16] 1개 장벽 조건에서 장애율에 따른 폭발압력	36
[그림 17] 3개 장벽 조건에서 장애율에 따른 폭발압력	36
[그림 18] 무 장벽 조건에서 농도에 따른 화염전파 모습 예	37
[그림 19] 무 장벽 및 10 vol% 조건에서의 화염전파	38
[그림 20] 1개 장벽, 장애율 0.52 및 10 vol%에서의 화염전파	39
[그림 21] 1개 장벽, 장애율 0.83 및 10 vol%에서의 화염전파	39
[그림 22] 1개 장벽, 장애율 0.98 및 10 vol%에서의 화염전파	40

[그림 23] 3개 장벽, 장애율 0.52 및 10 vol%에서의 화염전파	40
[그림 24] 3개 장벽, 장애율 0.83 및 10 vol%에서의 화염전파	41
[그림 25] 3개 장벽, 장애율 0.98 및 10 vol%에서의 화염전파	41
[그림 26] 1개 장벽에서 장애율에 따른 화염전파속도	42
[그림 27] 3개 장벽에서 장애율에 따른 화염전파속도	42
[그림 28] 이상 충격파 곡선의 형태	45
[그림 29] 장애율 조건을 고려한 3차원 폭발 시뮬레이션의 계산조건	50
[그림 30] 밀폐 폭발배관의 모델링 모습 (1 mesh=1.0m)	50
[그림 31] 3차원 폭발공간 내의 메탄가스 및 계산 격자	51
[그림 32] 메탄 10 vol% 및 장애율 0.98의 폭발계산 격자	52
[그림 33] 메탄 10 vol% 및 장애율 0.98의 폭발계산 결과	53
[그림 34] 메탄 10 vol%와 장애율 0.98의 실험 및 계산 결과 비교	54
[그림 35] 메탄 10 vol%와 장애율 0.83의 폭발계산 격자	54
[그림 36] 메탄 10 vol%와 장애율 0.83의 폭발계산 결과	55
[그림 37] 메탄 10 vol%와 장애율 0.52의 폭발계산 격자	55
[그림 38] 메탄 10 vol%와 장애율 0.52의 폭발계산 결과	56

I. 서론

1. 연구 배경

산업현장에는 다종 다양한 저장탱크와 플랜트 등의 시설이 존재하고 현실적으로 이러한 모든 장치나 시설 등을 대상으로 예방대책을 강구하는 것은 쉽지 않다. 또한 이러한 시설 중에서는 사고가 발생하여도 주변 환경으로의 영향이 크지 않거나 큰 문제가 되지 않는 소규모 설비도 존재한다. 그러므로 화재폭발 피해를 예방하기 위해서는 위험대상 설비를 파악하고 평가대상의 잠재위험성이 큰 설비를 우선적으로 선정하는 것이 중요하다.

최근의 산업에서는 석유화학공업 및 반도체 제조업 등의 기술발전에 따라 다양한 고압가스가 사용되고 있으며 이러한 고압가스 중에서는 누출에 의해 착화되어 폭발사고로 이어지는 사례가 적지 않게 보고되고 있다. 또한 고압가스 설비의 사고는 대형사고로 이어지는 경우가 많고 이로 인한 심각한 인적 또는 물적 피해가 발생하기 때문에 폭발피해를 예방하거나 감소하기 위한 노력이 요구되고 있다. 고압가스는 저장탱크에서 누출 시에 폭발사고 위험성이 클 뿐만이 아니라 재해가 확대될 가능성이 있기 때문에 특히 주의가 필요하다. 고압가스 또는 유증기 가스의 누출사고는 산업현장의 장치나 기기의 손상만이 아니고 오퍼레이터의 휴먼에러에 의해 발생하기도 하지만 최근 국내 석유화학단지에서는 설비 노후화로 인한 부식이나 열화에 의한 원인도 문제가 되고 있으며 설계나 시공 불량에 의해 발생하기도 한다.

가스 및 유증기 등의 위험물에 의한 화재폭발사고를 예방하거나 피해를 최소화하기 위해서는 해당 물질의 물성과 취급량, 그리고 위험물질의 공정조건과 취급장소와 같은 기본적인 사항을 우선적으로 검토해야 한다. 이러한 사항을 고려

하여 화학물질의 화재폭발사고에 대한 정량적인 피해평가를 기반으로 수행된 피해예측 결과를 확보하여 안전대책을 수립하는 것이 필요하다. 현재 국내외에서 일반적으로 사용되고 있는 화학물질의 화재폭발사고 피해영향평가는 사고시나리오를 기반으로 누출속도, 누출시간, 누출량 등을 중심으로 과압과 환산거리를 해석하는 경우가 많다. 이러한 화재폭발 해석방법은 공정안전(PSM)보고서나 위험성성평가보고서에 활용되고는 있지만 해석결과는 실제 화재폭발사고의 피해영향과 차이가 날 수 있다는 연구도 보고되고 있다 (AIChE, 2010). 그러므로 실험적으로 평가하기 어려운 대규모 화재폭발사고의 예방과 피해저감 대책을 강구하고 효율적인 화학사고 관리를 위해서는 기존의 폭발피해를 예측하기 위한 평가방법과 영향도 분석의 적용 가능성을 조사하고 실제 사고의 피해평가에 효과적인 분석모델을 제시하여 체계적인 위험관리구축이 필요하다.

본 연구에서는 산업현장에서의 활용성을 고려한 폭발피해 평가모델을 조사, 분석하고 폭발공간에 존재하는 장애물이 폭발특성에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위해 가연성 가스 탱크의 폭발에 따른 폭발압력 등에 대해 국내외에서 제시되는 폭발계산 모델을 검토하고 실제 폭발사고의 상세조사 내용을 참고로 하여 계산에 의한 추정값이 실제 사고조사 결과와 어느 정도 일치하는지 그 타당성을 검토하였다. 또한 폭발 피해 영향을 조사하기 위한 연구로서 폭발 공간에 놓여진 장애물 특성이 폭발특성에 어떠한 영향을 주는가에 대해서도 실험을 통해 조사하고 실험결과와 비교, 검토하였다. 이러한 연구결과를 바탕으로 밀폐공간의 가스폭발 시의 화염전파 특성 및 폭발모델링을 통한 피해 예측결과활용 가능성을 제시하여 폭발사고예방에 기여하고자 하였다.

2. 연구 내용 및 범위

산업안전보건법(산안법)에서 규정하고 있는 위험물질 중에서 인화성 가스는 고압가스 형태로 고압 용기 또는 탱크 등에 저장되어 사용되고 있다. 이러한 인

화성 가스가 용기의 파열 등으로 누출이 일어나면 착화에 따른 폭발사고 위험성이 있으며 인적, 물적 피해가 예상된다. 그러므로 폭발피해 예측을 통한 예방대책이 필요하다.

본 연구에서는 먼저 가스 저장탱크나 배관 등의 파손으로 누출된 가스의 폭발로 발생하는 폭발압력 영향을 산정하기 위한 폭발모델을 조사하였다. 이를 위해 국내외적으로 가장 많이 적용되는 TNT equivalent model(TNT 등가법)을 중심으로 그 활용성을 검토하고자 하였다. 또한 저장 용기로부터의 누출 위험성을 평가하기 위해서 저장 탱크의 파열에너지를 추정하는 기존의 평가모델을 대상으로 실제 사고결과와의 비교, 분석을 통해서 어느 모델이 가장 적합한지를 조사하고자 하였다. 이를 위해 저장 용기의 파열 전후의 압력 차이에 따른 방출에너지를 계산하고 이와 등가인 TNT 화약량을 계산하여 TNT 등가 모델식에 적용함으로써 폭발심으로부터 떨어진 일정 지점에서의 폭발압력을 계산하여 계산모델의 정확성 정도를 평가하고자 하였다. 또한 폭발사고의 피해 크기를 지배하는 폭발압이 폭발공간에 놓여진 장애물에 어떤 영향을 주는가에 대해서 실험적으로 검토하였다. 구체적으로는 화염전파 특성이 장애물의 유무 및 장애 크기 조건에 어떠한 영향을 주는가에 대하여 장애율(Barrier ratio)이라는 평가 파라메타를 정의하고 장애 정도를 일반화시킴으로써 이를 정량적으로 활용하여 실험적인 조사를 실시하였다.

II. 가스폭발사고의 피해 영향 및 기준

1. 폭발에 의한 피해

1) 폭발압력과

가연성 증기 또는 가스가 유출되어 공기와 혼합하고 여기에 착화원이 존재하는 경우에 가스폭발로 이어질 가능성이 있다. 가스폭발은 매우 빠른 연소현상으로서 이에 동반하는 폭풍압은 주위 건물, 설비 및 사람에게 큰 피해를 초래한다. 최근에 발생하는 중대산업사고에서도 가연성 가스의 유출로 인한 가스폭발사고가 반복하여 발생하고 있다. 가스의 유출은 장치의 고장과 같은 하드웨어적인 요소 외에도 설비의 오조작과 작업자의 실수 등과 같은 인적인 요인이 다양한 원인으로 작용하여 발생하고 있다. 이러한 가스폭발사고를 예방하기 위해서는 사고의 직간접 요인을 조사하여 안전대책에 활용하는 것이 필요하지만, 가스폭발로 인한 피해를 사전에 예측하여 피해저감을 위한 체계적 안전관리대책을 강구하는 것도 매우 중요하다. 가스폭발에 의한 피해는 주로 폭발시에 발생하는 압력과와 화재에 의한 열복사에 의해 발생되는데 인적 및 물적피해는 폭발압력과에 의한 영향이 크게 작용한다 (AIChE, 2000).

폭발압력파는 가연성가스 또는 분진 등의 폭발 시에 발생하며 강한 폭발의 경우에는 폭발압력파가 음속 이상으로 전파하여 충격파(Shock wave)가 발생할 수도 있다. 폭발압력파는 폭발과압(Explosion over-pressure)의 물리적 형태로 구조물에 영향을 주며 이에 대해서는 수 많은 실험적 연구가 이루어져 왔다 (Berg, 1985). 또한 이러한 연구를 통하여 폭발압력파의 예측에 관해 선진국에서는 다양한 경험식이 제안되고 있으며 (CCPS AIChE, 2000 ; CCPS AIChE, 2010), 폭발에 의한 주요 인체 피해 영향은 <표 1>과 같다.

<표 1> 폭발에 의한 주요 인체 피해 영향

분류	원인	주요 피해 부위	피해 유형
1차 상해	충격파, 압력파	기체를 포함하고 있는 신체기관(폐, 귀, 내장 등)	Blasting lung 상해, 고막 파열, 폐포 출혈, 뇌진탕
2차 상해	비산 잔해물, 폭발물의 파편	모든 신체부위	관통상, 안구 손상
3차 상해	폭풍압	모든 신체부위	골절, 찰과상, 두개부 손상
4차 상해	그 밖의 폭발과 관련된 상해	모든 신체부위	화상, 타박상, 머리 손상, 질식

2) 구조물 및 인체에의 영향

폭발에 의해 발생하는 폭발압력파가 구조물에 미치는 하중은 매우 짧은 시간이지만 구조물의 허용 응력보다 매우 큰 경우가 많다. 구조물에 의한 피해가 폭발압력파의 피크압력에 의한 것인지 아니면 압력을 시간 적분한 임펄스(Impulse)에 의한 것인지에 대해서는 많은 논의가 있었지만, 현재는 폭발압력파와 구조물 특성의 조합에 의존하는 의견이 지배적이다 (Cleaver et al., 1996). 가스나 증기의 대량 유출과 같이 규모가 큰 폭발에서는 폭발압력파의 지속시간이 상대적으로 길어지기 때문에 시간의 효과를 포함한 임펄스가 폭발피해를 지배하는 것으로 알려지고 있다. 또한 건물이나 설비 등의 구조물 입장에서 본다면 폭발압력파에 의한 하중은 충격적인 하중으로 볼 수 있다. 이와 같이 구조물에 가해지는 하중이 충격적이 되면 구조물 변형이 이루어지는데 이러한 변형은 정적 변형이 아닌 고속변형으로 진행되어 역학적인 표현식에 관성 항목이 추가되어 항복응력이 증가한다. 폭발에 의한 항복응력 증가에 대한 실험적, 이론적 연구가 많이 이루어져

왔으며 응력과 변형속도에 대한 여러가지 경험적인 실험식이 제안되고 있다.

폭발압력파에 인체가 노출된 경우에는 폭발과압에 의해 상해를 입을 수 있다. 이러한 인체 피해는 폭심과의 거리에 따라 달라지는데 거리가 가까울수록 인체에 가해지는 과압이 크기 때문에 사고피해 영향은 증가하게 된다. 반면에 폭심으로부터 멀어질수록 상해를 입을 가능성은 감소하게 된다. 폭발이 발생하면 처음에는 폭발압력파가 생성되어 대기가 압축되는 대역이 발생하며 이러한 양압의 파장이 주변으로 전파한 후에 전파된 파장의 압축은 음압을 생성시킨 후에 대기압으로 돌아온다. 그러므로 인체가 폭발압력파에 노출되면 먼저 양압에 의한 파장 충격을 받고 이후에 다시 음압 충격을 받는데 이러한 연속적이며 순간적인 폭발압력파를 밀리세컨드 단위의 짧은 시간 동안에 충격을 받게 된다. 폭발압력파는 전파하는 과정에서 구조물에 부딪혀 굴절되는 반사파의 중첩에 의한 보강간섭이 일어나며 충격 크기가 증가하므로 개방공간에서의 폭발보다는 건물이나 지하 터널 등의 제한된 밀폐공간에서 발생하였을 때에 피해 영향이 높게 나타난다. 인체 기관 중에서는 주로 기체가 통과할 수 있는 귀의 고막, 폐 및 창자 등의 장기에 대한 영향이 크게 나타난다. 폭발압력파에 의해 가장 쉽게 상해를 입을 수 있는 민감한 기관이 고막으로 충격과에 의해 쉽게 파열될 수 있다. 폭발을 경험한 피해자들의 41 % 이상이 청각에 상해를 입는 것으로 알려지고 있는데, 5 psi의 압력에서 고막이 파열 위험성이 나타나며, 15 psi의 압력에서는 피해자들의 약 50% 정도가 고막이 파열되는 상해를 입는 것으로 조사되고 있다. 인체의 폐는 폭발 시의 양압 및 음압에 의한 파장 충격으로 인하여 갑작스럽게 수축과 팽창을 하면서 큰 손상이 일어날 수 있다. 이 때 폐포 내에서 폐포중격이 파열되면서 출혈이 발생하여 기도 내에 혈액이 가득 차오르면서 호흡기의 기능이 상실(Blast lung)되는데 이러한 폭발 피해자들은 50~100 psi의 과압 노출에서 약 50 % 정도가 폐에 손상을 입으며, 200 psi의 과압노출에서는 일반적으로 사망에 이르게 된다. 폭발에 의해 상해를 입은 폐는 폐동맥의 심각한 타박상, 출혈, 폐포나 혈관계 부종 또는 이들의 복합적인 상해로 나타나기도 한다. 또한 압축 공기에 의해 소

화기관도 큰 상처를 입을 수 있는데, 반면에 간, 신장 등과 같이 내부에 공간이 없는 조직은 기체가 들어있는 위장과 같은 소화기관 보다 충격파에 비교적 잘 견딜 수 있다. 이러한 인체기관의 피해는 즉시 나타나는 경우도 있지만 폭발에 노출되고 약 8~36시간 정도가 경과된 후에 증상이 나타나는 특징을 가지고 있다. 폭심에 보다 가까운 지점에 있는 경우에는 폭발압력파에 의해 신체의 일부나 전부가 분리되거나 절단되는 피해가 발생할 수도 있다. 이와 같은 조건에 놓여진 폭발 피해자의 신체는 인체 조직과 골편들이 여러 조각으로 분리되어 주변으로 날아간다. 폭심에서 좀 더 떨어진 곳에 있는 경우에는 팔이나 다리와 같이 인체 부위가 분리되어 날아가는 경우도 폭발사고에서 조사되기도 한다. 이러한 신체 분리와 같은 피해 영향이 발생하는 경우에는 대부분 사망으로 이어진다.

그 밖에도 폭발압력파는 매질을 통해 전달되는 파장이기 때문에 두개골에 의해 보호되는 뇌에도 영향을 주는데 폭발압력파가 전달되는 공간에 있는 경우에 안전모나 헬멧 등의 머리 보호구를 착용하고 있더라도 충분히 보호할 수가 없다. 또한 폭발에 의한 2차 상해 피해 요인으로서 폭발 압력에 의해 대량의 공기가 이동하는 폭풍 발생이 있다. 폭발에 의한 폭풍은 주변 물체나 인체를 날려버리며 이동시킬 수가 있는데 바람에 의해 몸이 날아가거나 쓰러지면서 벽이나 바닥 등 고정된 물체에 충격이 일어나기도 하며 높은 장소에서 작업하다가 추락하기도 한다. 이러한 경우에는 골절이나 외상, 뇌진탕 등의 상해가 발생할 수도 있다.

3) 비산물에 의한 위험성

폭발 시의 비산물의 형태는 폭발의 종류에 따라 달라진다. 폭탄과 같은 화약류의 폭발에서는 매우 작은 크기의 비산물이 많이 발생하지만, 가스폭발에서는 큰 비산물이 적은 양으로 발생한다. 구조물 내에서 폭발이 발생하면 충격파에 의해 구조물이 전부 또는 일부가 파괴되어 주변으로 비산하는데 폭발사고 주변에 있는 사람들은 이러한 비산물에 맞아 상해를 입는 경우도 있다. 폭발이 개방된

공간에서 발생하였다고 하여도 바닥의 파편이 주변으로 비산하면서 위험을 발생시킨다.

이와 같이 비산물에 의한 2차 상해는 파편이나 폭발에 의해서 추진된 다른 물체에 의해서 발생한다. 이러한 상해로 인한 신체의 특징으로는 눈으로 쉽게 확인되는 상처 또는 관통상으로 나타난다. 폭발물의 파편이나 분열된 장치의 파편 등이 비산되어 신체에 충격할 때에는 충알보다 더욱 심각한 상해를 입힐 수도 있다. 파편 등의 비산 물체가 몸에 충격하여 박혀 있을 때에는 신체 외부로의 출혈을 막을 수 있지만 체내 장기 등의 큰 기관 출혈을 일으킬 수 있으므로 파편에 의한 상처는 치명적일 수 있기 때문이다. 폭발 영향에 의한 피해는 2차 상해에 의해서 발생하기도 하는데 건물의 창문이나 유리 외벽으로부터 떨어져 비산된 유리 파편들이 인체에 큰 상해를 입히기도 한다. 이러한 비산물은 수백 미터를 날아가기 때문에 일반적으로 더욱 넓은 피해 범위에 영향을 미친다.

4) 화염 방사열의 피해

폭발물은 물론 가스폭발의 경우에도 일반적인 화재의 화염에 노출되는 것에 비하여 현저히 높은 화상을 입게 된다. 일반적인 라이터 불을 손바닥 등에 수초 동안 잠시 스쳐 지나가게 하는 방법으로는 좀처럼 화상을 입지 않는다. 그러나 불과 수 밀리세컨드 동안에 현상이 종료되는 폭발사고 현장에서는 그 짧은 시간 동안에 노출된 화염에 의해서 화상 피해가 많이 보고되고 있다. 주된 이유는 라이터의 화염은 확산연소이며, 가스폭발의 경우는 예혼합연소이기 때문에 순간적으로 모든 에너지가 방출되는 현상이 발생하기 때문이다. 예를 들어 표현하자면 가스-산소 절단기 또는 용접기의 화염을 생각해 볼 수 있다. 토치에 점화를 위해서는 먼저 가스를 개방한 후 점화 시킨 다음 산소 밸브를 열어 공급하는데 산소 밸브를 열면서 화염의 형태가 확연히 달라지는 것을 볼 수 있다. 가스만 연소할

때는 붉은 색의 긴 화염이 보이지만, 산소를 개방하면 화염의 색은 파란색으로 변하며 화염의 길이가 짧아진다. 빨간색의 긴 화염으로는 강철을 녹이지 못하지만 파란색의 짧은 화염은 충분히 강철을 녹여 작업을 할 수 있을 정도로 높은 온도를 제공한다. 폭발은 예혼합연소로 동일량의 가연물이 짧은 시간 내에 완전연소하는 방식이기 때문에 연소속도가 느린 확산연소에 비하여 현저하게 높은 순간적인 열을 발생시킨다. 가연성 증기 또는 가스가 유출되어 공기와 혼합되어 여기에 착화원이 폭발이 발생하였을 때에는 약 2000℃의 고온 가스를 방출하며 인체와 접하게 되면 심각한 화상을 입는다. 의복 등으로 피부가 가려져 있을 때에는 가려진 피부 때문에 복사선 등을 차단시킬 수 있어 화상을 덜 입을 수도 있다. 피부에 직접 노출되었을 경우에는 의복 등으로 가려져 있는 부분에 비하여 더욱 심각한 화상을 입는다. 화염과 직접적으로 접촉하지 않더라도 가까이 있다면 화염으로부터 방사되는 복사선에 의해서도 화상을 입는다. 복사열에 의해 화상을 입는 경우는 복사선과 마주하고 있는 방향에서만 화상을 발생한다. 만일 폭발 지점을 바라보고 있다면 얼굴과 가슴, 팔과 다리의 전면부에 화상을 입으며, 등, 뒤통수, 엉덩이 등의 인체 뒷면에는 화상을 입지 않는다.

2. 화재폭발 피해 영향도 및 기준

1) 사고현상 해석 모델

국내 화학공장과 석유화학 플랜트에서는 다양한 종류의 고압가스가 사용되고 있으며 많은 산업단지에서는 시설의 노후화로 인한 사고 위험성이 지적되고 있다. 이와 함께 최근 고압가스 시설의 화재폭발사고 건수가 증가 추세에 있으며 이러한 사고를 방지하기 위해서는 고압가스로서 취급하고 있는 화학물질의 위험성 파악이 필요하다. 석유화학 플랜트에서 폭발 사고가 발생했을 때 사업장 및 주변 인근 지역에 미치는 영향을 예측하는 방법은 여러 가지 알려져 있지만, 주

로 경험적인 정보를 이용한 것이기 때문에 다양한 종류의 가스에는 적용하기가 쉽지 않다.

사고현상을 해석하기 위한 모델은 일반적으로 정상작업 시를 기준으로 평가하고 있으며 본 연구에서도 이를 적용하였다. 그러나 최근에 한반도에서는 지진의 발생 빈도가 과거에 비하여 증가하고 있기 때문에 향후에는 지진에 의한 사고위험성도 연구할 필요가 있을 것이다. 예를 들면 2011년 동일본 대지진이 발생하였을 때에 일본 이찌하라시에 있는 사업장의 LPG탱크화재에서 BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)가 동반된 폭발이 일어나며 약 3900 m 거리의 창문 유리가 파손되는 등의 피해가 발생한 것으로 조사되었다. 이와 같이 비정상작업 중에서도 지진과 같은 재난 시에 발생하는 폭발사고에서는 폭발피해가 예상 외로 크게 확대될 위험성이 있으므로 여러 가지 사고시나리오를 고려하여 안전대책이 필요하다는 교훈을 남기고 있다.

본 연구에서는 가연성 가스 탱크의 폭발에 따른 폭발압력 등에 대해 국내외에서 제시되는 몇 가지 모델계산을 검토하고 실제사고 조사 내용을 참고로 하여 계산에 의한 추정값이 실제 사고조사결과와 어느 정도 일치하는지를 그 타당성을 검토하였다.

2) 폭풍압 모델

가스 저장탱크와 배관 등이 손상되어 대량의 가연성 가스가 대기 중에 방출되면 공기와 혼합하여 가연성 증기운을 형성하고 점화하여 대규모 폭발을 일으킨다. 그 때의 폭발 압력의 영향을 산정하기 위한 방법으로는 TNT 등가 모델, TNO Multi-energy 모델, Baker-Strehlowa 모델 등이 있으나 일반적으로 많이 이용되고 있는 것은 TNT 등가 모델이다.

미국화학공학회(AIChE)의 가이드라인에서는 TNT 등가 모델 (TNT equivalent model)이 간단하고 쉽게 폭발 압력을 추정할 수 있지만 개방공간에서

의 폭굉(Detonation)을 전제로 하고 있기 때문에 현실적으로는 일어나기가 쉽지 않은 현상이라는 지적이 있다 (AIChE, 2000). 또한 TNT 등가 모델에 대한 최근 연구를 보면 TNT등가 모델에 의한 계산값을 실측값과 비교한 결과 폭굉을 일으키는 경우에 대해서는 거의 일치하고 있는 반면에 폭연(Deflagration)의 경우에는 실측값보다 계산값이 크게 나왔다고 보고하고 있다. 그러나 TNO multi-energy 모델은 가연성 가스가 어느 정도의 범위(누출량)에서 폭발하는지를 설정해야만 폭발강도를 예측할 수 있으므로 쉽지 않으며 (Eggen, 1998), 또한 Baker-Strehlow 모델은 화염의 확대 방향과 장애물의 상황에 따라 화염 속도를 예측할 수 있기 때문에 적용에 있어서 쉽지 않다는 문제점을 가지고 있다 (Turner et al., 2012). 그러므로 본 연구에서는 계산조건이 단순하여 적용이 쉽기 때문에 국내외의 많은 규격에서 사용되고 있는 TNT 등가 모델을 통하여 피해 영향도를 검토하였다. <그림 1>과 같이 폭약(TNT) 폭발에서 TNT 등가 모델에서 폭풍압과 폭원으로부터의 거리(L, m)와의 관계는 다음 식과 같다. 이하 식에서 각 파라메타는 다음과 같다.

$$L = \lambda \sqrt[3]{W^{TNT}} = \lambda \sqrt[3]{\frac{W_G f \psi Q_G \eta}{Q_{TNT}}}$$

L(m) : 폭원으로부터의 거리이며

$\lambda(\text{m/kg}^{1/3})$: 환산거리

WTNT(kg) : TNT 당량으로서 등가의 TNT화약량

WG(kg) : 가연성가스 또는 액체의 유출량

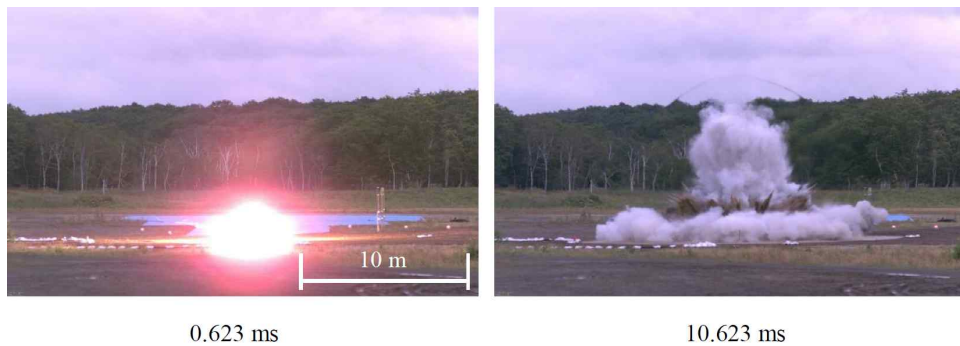
QG(J/kg) : 가연성가스 또는 액체의 연소열

QTNT : TNT 화약의 연소열(4.184×10^6 J/kg)

f : 유출된 가스 또는 액체의 기화율(재증발율)

ψ : 폭발계수

η : TNT 수율



[그림 1] 폭약(TNT)의 폭발 시에 발생하는 압력과

폭발계수는 유출되어 기화된 가스 중에서 폭발에 기여한 비율이며 확산 가스 중의 농도가 폭발범위 내에 있는 가스량으로 취급할 수 있으며 일반적으로 10 %가 사용된다. 또한 TNT 수율은 폭광에 기여한 혼합 기체의 총 에너지와 발생한 폭풍압에 상당하는 TNT 당량의 에너지의 비율이며, 일반적인 폭발에서는 0.3~10 %, 격렬한 폭발에서는 4~10 %가 사용되고 있으며, 폭발강도가 명확하지 않는 경우에는 6.4 %가 적용되고 있다. 기화율(재증발율)은 비점 이상의 온도에서 압력을 가해 액화 된 가스가 누설하여 순간적으로 기화하는 현상을 말하며 기화하는 액량과 누출된 액량의 비율로 나타낸다. 기화율은 액화 가스의 종류와 유출 전에 온도에 의해 결정되며 유출 전의 온도가 높을수록 증가한다 (Mercx et al., 2000). <표 2>에 액화 가스의 기화율을 나타냈다. 만일 액화가스가 소량 누설한 경우에는 기화율이 피해 영향에 미치는 효과가 작기 때문에 액화가스 전부가 기화한 것으로 가정해도 큰 문제는 없을 것으로 판단된다. 또한 <표 3>은 폭풍압(과압)에 의한 피해영향 기준을 나타낸 것으로서 (Clancey., 1972), 안전한계의 영향 기준은 2.1 kPa 이하이며, 이 때의 폭풍압에 의해 95% 확률로 피해가 발생하지 않는 것으로 조사되고 있다.

<표 2> 액화가스의 기화율(재증발율) 예

액화가스의 종류	저장 및 취급 온도(℃)	기화율(-)
프로판	21	0.364
프로필렌	21	0.364
부탄	21	0.124
에틸렌	-30	0.382
암모니아	21	0.183

<표 3> 폭풍압(과압)에 의한 피해 영향 기준

폭풍압(과압)		영향 기준
kPa	(psi)	
0.2	0.03	작은 유리창이 파손
0.7	0.10	큰 유리창이 파손
1	0.15	유리가 파괴되는 일반적인 압력
2	0.3	집의 지붕 일부가 파손. 유리창의 10% 파손. 안전한계(2.1 kPa) 이하에서는 95% 확률로 큰 피해가 없음.
3	0.4	구조물의 가벼운 손상 (2.8 kPa)
3.5-7	0.5-1.0	크고 작은 유리창이 파괴되며 일부 창틀이 파손
5	0.7	주택 일부가 다소 파손
7	1.0	거주가 불가능할 정도로 주택의 일부 파손
9	1.3	철 구조물이 다소 변형되거나 손상
15	2	주택의 벽과 지붕이 일부 파손
15-20	2-3	비 강화 콘트리트 및 블록 벽이 파손
16	2.3	구조물이 심하게 손상하기 시작
18	2.5	주택의 블록이 50%정도 파손
20	3	건축물의 철구조물이 손상되며 기초에서 이탈
20-28	3-4	지지대가 없는 철제 건축물 또는 기름 저장 탱크 파손
30	4	공장건물의 파손
35	5	나무 기둥이 부러짐
35-50	5-7	주택의 완파
50	7	짐 실은 화물차가 전복
50-55	7-8	강화벽이 아닌 두께 20~30 cm의 블록이 파손
60	9	대형 화물차의 전파
70	10	대부분의 건축물이 붕괴

3) 저장탱크의 파열 에너지

압력 상승에 따른 저장탱크 등의 파열에 관해서는 파열 전후의 압력 차이에서 방출 에너지를 계산하고 이와 등가인 TNT 화약량 (TNT 당량)을 구하고, TNT 등가 모델식을 사용하여 일정 지점의 폭발압력을 추정할 수가 있다. 파열 시에 방출되는 에너지를 구하는 방법은 여러 가지 추정식이 제안되어 있으며 <표 4>에 나타냈다. E는 파열에 의한 방출에너지(J), P는 파열 전의 저장탱크 내의 절대 압력(Pa), P_0 는 파열 후의 대기 압력(1.013×10^5 Pa), V는 저장탱크의 내용적(m^3), κ 는 저장탱크 내의 기체 비열비, N은 저장탱크 내의 기체 mole수, R은 기체 상수($8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$)이다. AIChE의 가이드라인에서는 Crowl model을 제시하고 있는데 <표 4>의 식에 평가를 통해 Brode model 및 Crowl model이 가장 실제와 적합하며, Baker model은 과소평가의 결과가 나타나고, 그리고 Kinney model은

<표 4> 저장탱크 파열에너지의 해석모델

증기운 폭발	TNT equivalent model	$L = \lambda \sqrt[3]{W^{TNT}} = \lambda \sqrt[3]{\frac{W_G f \psi Q_G \eta}{Q_{TNT}}}$
저장탱크의 파열에너지	Baker model	$E = \frac{P_0}{\kappa - 1} \left[\frac{P}{P_0} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right] V$
	Kinney model	$E = NRT \cdot \ln \left(\frac{P}{P_0} \right)$
	Brode model	$E = \left(\frac{P - P_0}{\kappa - 1} \right) V$
	Crowl model (AIChE:CCPS)	$E = PV \left[\ln \left(\frac{P}{P_0} \right) - \left(1 - \frac{P_0}{P} \right) \right]$

과대평가의 결과가 얻어졌다고 보고하고 있다 (AIChe, 2010). 이러한 결과를 확인하기 위하여 내용적(V)이 10 m^3 인 저장탱크의 파열 전의 내부 절대압력(P)이 $20 \text{ MPa}(2 \times 10^7 \text{ Pa})$ 이고 저장탱크 내의 기체 비열비(κ)가 1.4, 그리고 TNT 화약의 연소열이 $4.184 \times 10^6 \text{ J/kg}$ 인 경우의 방출에너지와 TNT당량을 계산하였으며 <표 5>의 결과가 얻어졌다.

<표 5> 해석모델에 따른 파열에너지의 계산 결과 비교

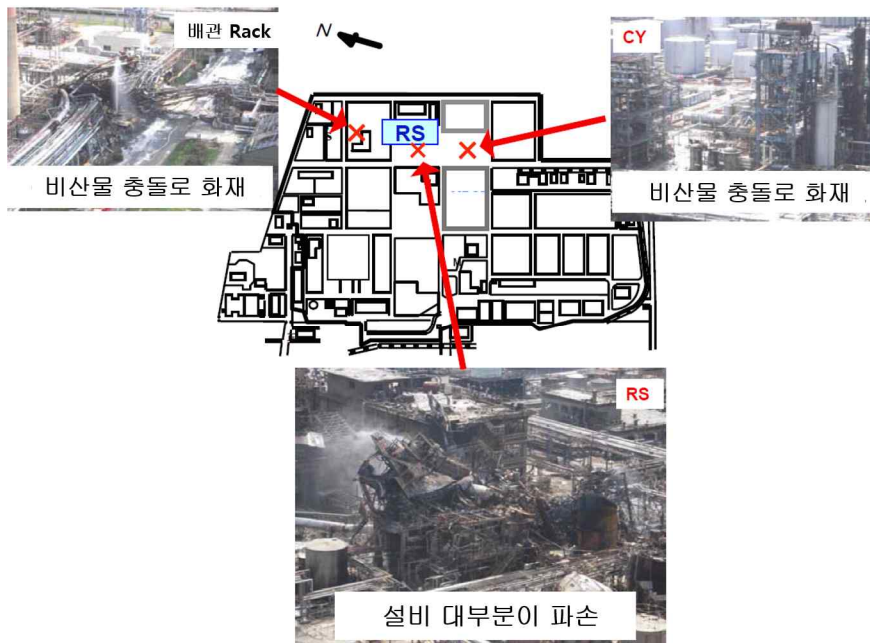
Model	파열전 용기압력(Pa)	방출에너지(MJ)	TNT당량(kg)
Baker model	2×10^7	390	93
Kinney model	2×10^7	1060	253
Brode model	2×10^7	497	119
Crowl model	2×10^7	858	205

<표 5>의 결과에서 알 수 있듯이 방출에너지의 계산 값에 있어서 Kinney model 식은 Baker model 및 Brode model에 비해서 상당히 큰 평가 값을 나타내었다. 또한 Crowl model에 의한 평가 값은 Kinney model보다는 작은 값이 얻어졌다. 이러한 계산 결과를 통해 AIChe의 가이드라인에서 지적한 바와 같이 과대평가 경향이 있는 Kinney model의 결과 값이 가장 크다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 <표 5>의 model식을 이용하여 방출 에너지와 TNT 당량을 계산하기 위해서는 저장탱크가 파열 할 때의 용기 내부압력을 추정할 필요가 있으므로 대규모 설비의 위험성평가에 적용하는 경우에는 보다 정확한 계산을 위해서는 탱크 압력에 대한 정확한 정보가 필요한 경우도 있다.

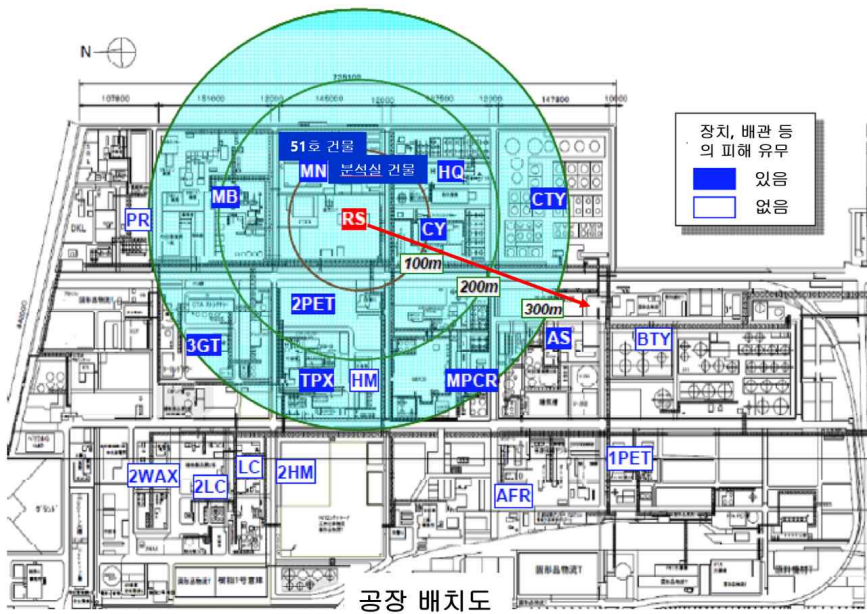
3. 가스 누출에 따른 사고형태 및 분석

1) 사고사례 분석

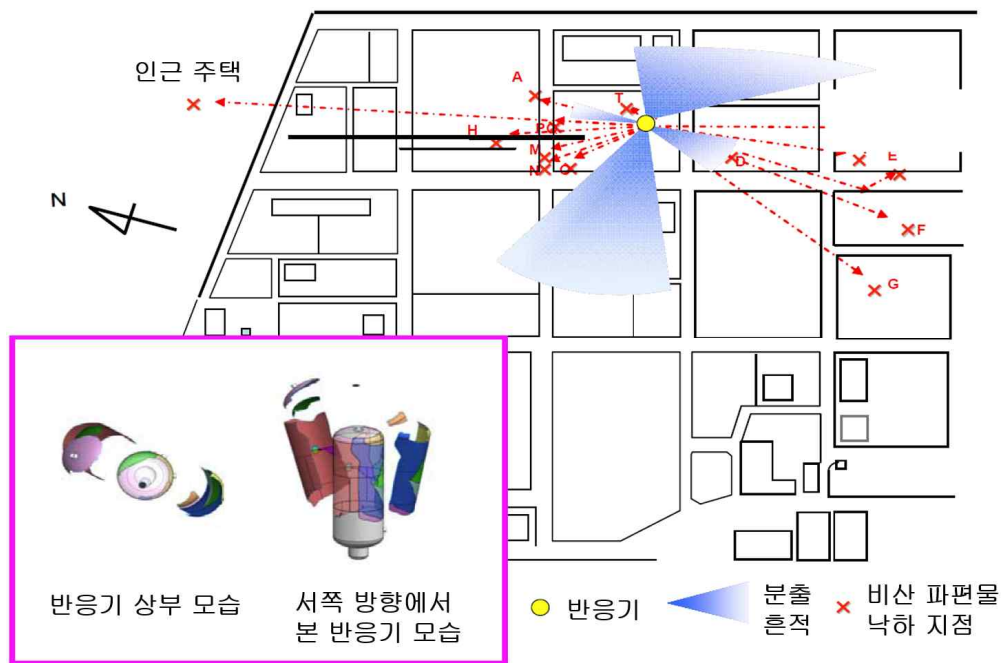
화학공장의 저장탱크에서 유출된 액화가스에 의한 폭발사고는 국내외에서 많이 보고되고 있지만, 사고원인과 함께 폭발로 인한 폭풍압의 피해 영향을 상세히 조사한 사례는 많지가 않다. 장기간에 걸쳐 상세한 사고조사를 통해 작성된 사고 사례조사보고서를 통해 누출 가스의 사고 영향을 분석한 정보를 바탕으로 실제 사고시의 피해 상황과 피해 영향 모델을 적용한 결과를 비교 분석하여 유용성을 검토하였다. 2012년 4월 22일에 일본 Mitsui chemical plant의 Resorcinol 제조공정에서 공정상의 문제가 발생하여 작동하고 있던 인터 락을 해제한 결과 산화반응 용기의 온도·압력이 급상승하여 용기가 과열, 누출되면서 가연물이 착화하여 화재폭발로 이어진 사고로서 폭발압력과 비산물에 의해 사업장 내외에 큰 피해가 발생하였다 (三井化學, 爆發火災にかかわる報告書, 2012). 이 폭발사고로 사망 1명, 부상자 25명이 발생하였으며, 사업장 내의 주변 장치 및 시설로 피해가 확대되어 많은 물적손실이 증가하였으며, 사업장 외부의 999개의 인근 주택이 손상을 입었다. 폭발로 인한 폭심 근방의 폭발 피해 모습을 <그림 2>에 나타냈다. 폭심 장소인 Resorcinol 플랜트는 대부분 파손되어 붕괴된 모습을 볼 수 있으며 반응기의 파편이 비래하여 배관 Rack을 손상시키거나 멀리 떨어진 다른 시설에 충돌하여 손상을 일으켰다. <그림 3>은 폭심으로부터 거리에 따른 설비의 피해 상황을 조사한 결과이다. 설비 장치 및 배관류 등에 피해 영향이 나타난 곳은 폭심으로부터 300 m 범위 내로 조사되었다. 폭발이 발생한 반응용기의 전체 체적은 288 m³이며 이 중에서 기상부분은 198 m³이고 내용물의 비열비는 1.3으로 조사되었다. 또한 사고 조사에서는 반응용기 과열 직전의 게이지 내부압력을 9.7 MPa로 추정하고 있다. 본 연구에서는 사고조사에서 밝혀진 자료를 토대로 과열에너지 및 과열 조건에 해당하는 TNT 당량을 계산하여 비교 분석하였다.



[그림 2] 폭심 근방의 폭발 피해 모습



[그림 3] 폭심으로부터 거리에 따른 설비의 피해 상황



[그림 4] 폭발로 파열된 반응용기 파편의 비산 형태

2) 파열 및 폭발에너지의 추정

반응용기 전체 중에서 기상부분의 체적(V)이 198 m^3 이며, 반응용기 파열 직전의 게이지 내부압력(P)은 $9.7 \times 10^6 \text{ Pa}$ (대기압 $P_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$), 반응기 내용물의 비열비(κ) 1.3인 폭발사고조사 내용을 근거로 하여 Baker model에 적용하여 계산한 결과, 파열에너지(E)는 4200 MJ 이 얻어졌으며 TNT당량(W_{TNT})은 1000 kg 으로 나타났다. 이와 동일한 계산방법을 통하여 Brode model 등의 계산 결과를 <표 6>에 제시하였다.

$$E = \frac{P_0}{\kappa - 1} \left[\frac{P}{P_0} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right] V = 4.2 \times 10^9 \text{ J} = 4200 \text{ MJ}$$

$$W_{TNT} = \frac{E}{Q_{TNT}} = \frac{4.2 \times 10^9}{4.184 \times 10^6} = 1000 \text{ kg}$$

<표 6> 사고사례에 대한 파열에너지 및 TNT당량의 계산

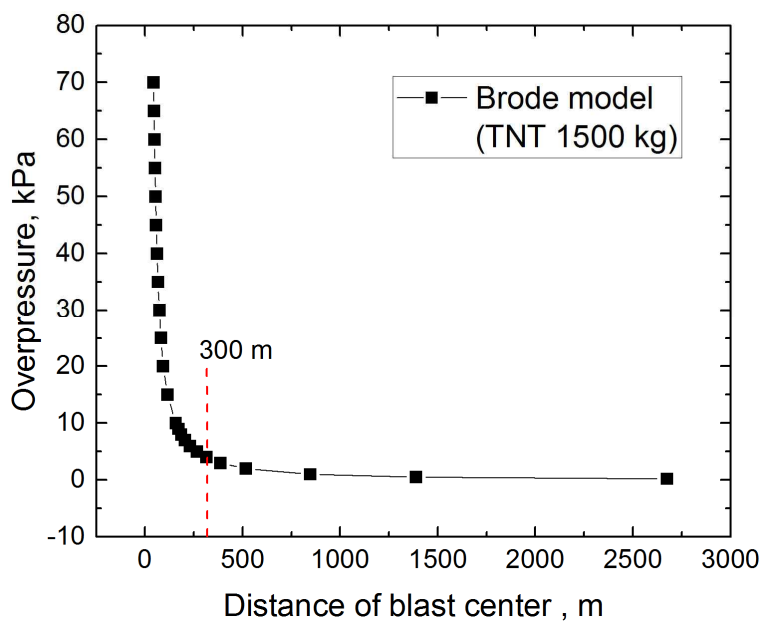
Model	용기압력(MPa)	파열에너지(MJ)	TNT당량(kg)
Baker model	9.7	4200	1000
Brode model	9.7	6300	1500
Kinney model	9.7	8800	2100
Crowl model	9.7	6900	1600

3) 실제사고와 계산결과의 비교

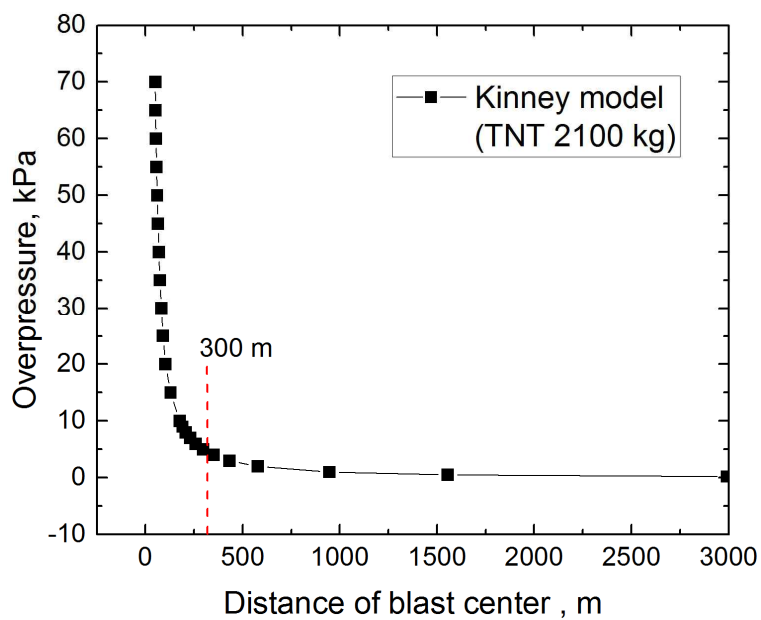
실제사고의 피해 반경은 300 m로 조사되었다. Brode 및 Kinney model을 사용하여 얻어진 TNT당량을 근거로 폭풍압을 계산하였으며 그 결과 일부를 <표 7>에 제시하였다. 실제사고와 비교해 보면 Brode model의 결과가 실제 사고와 가장 일치하였으며 Kinney model은 다소 큰 결과값이 얻어졌다. 2가지 model의 결과를 [그림 5]~[그림 6]에 나타냈다.

<표 7> 실제사고 및 해석모델과의 결과 비교

폭풍압 (kPa)	영향 내용	Brode model의 계산 거리 (m)	Kinney model의 계산 거리 (m)
7	거주 불가능 정도의 파손	205	229
6	건물 일부가 파손	230	258
5	다소의 건물 피해	265	296
4	유리창 및 창틀 파손	313	350
3	건물의 최소 피해 한계	386	432
2	안전 한계(2.1 kPa)	516	577



[그림 5] Brode model($W_{\text{TNT}}=1500$ kg)에 의한 폭풍압 계산 결과



[그림 6] Kinney model($W_{\text{TNT}}=2100$ kg)에 의한 폭풍압 계산 결과

[그림 5]~[그림 6]에서 알 수 있듯이 폭풍압이 20 kPa을 초과하는 100m 이내의 범위에서는 폭풍압의 영향이 크게 작용하지만, 실제 사고에서 발생한 거리 300m 이내의 설비 및 배관류의 피해는 과압(4 kPa)보다는 주로 비산물의 영향이 큰 것으로 추정된다. 또한 저장탱크의 파열 시에 내부에 액체량이 적고 기체상이 많을수록 파열 에너지는 증가하지만, 반대로 저장탱크에서 누설되는 경우에는 액체량이 많을수록 피해 영향이 증가할 수 있다.

4) 폭발공간에서의 장애물 영향

지금까지 밀폐공간의 액체 또는 가스가 외부의 개방공간에 누출되어 발생하는 폭발피해 영향에 대하여 검토하였다. 그러나 가스폭발사고는 밀폐 조건의 장치나 설비에서 발생하는 경우가 폭발위험성이 보다 크고 발생빈도도 상대적으로 많다. 가스 폭발사고 예방을 위해서는 폭발의 발생과 화염의 발전 과정을 아는 것이 중요하다. 특히 폭발 현상을 파악하기 위해서는 반응이 일어나고 있는 부분인 화염의 특성을 아는 것이 필요하다. 가스폭발이 일어나면 압력파에 의해 건물이나 장치가 파손될 수 있기 때문에 폭발이 발생하는 공간에 놓여진 시설이나 장치에 의해 폭발특성이 어떻게 변화하는지를 알 수 있다면 피해를 저감시키는데 활용할 수 있을 것이다. 그러므로 폭발 피해 영향을 예측하고 영향을 저감시켜 피해를 억제하기 위한 기술개발을 위해서는 가스폭발 시의 압력파의 발생과 전파특성에 대한 이해도 우선적으로 필요하다. 밀폐공간에서의 압력특성에 대한 연구는 많이 이루어져 왔지만 폭발 발생 공간의 장애물 조건에 따라 화염이 어떻게 전파하는가에 대한 연구는 상대적으로 충분하지가 않다. 폭풍압은 폭발이 일어나는 공간의 조건에 따라 화염전파 특성이 변화하며 이러한 특성 변화는 폭발 위험성에 영향을 주기 때문에 이에 대한 조사가 필요하다. 본 연구에서는 폭발 피해 영향을 조사하기 위한 기초적 연구로서 폭발 공간에 놓여진 장애물 특성이 폭발특성에 어떠한 영향을 주는가에 대하여 실험적으로 조사를 실시하였다.

Ⅲ. 장애물이 존재하는 밀폐공간의 폭발특성

1. 실험 및 방법

1) 시료

메탄(CH_4)은 파라핀족 탄화수소 계열의 화합물이며 탄광 내의 폭발성가스로서 처음 알려졌는데 자연에 풍부하게 존재하며 공업적으로는 석탄 가스와 코크스로의 가스를 제조할 때에 역청탄을 분해, 증류시켜서 얻거나 활성 슬러지법으로 하수 처리하여 얻어진다. 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.

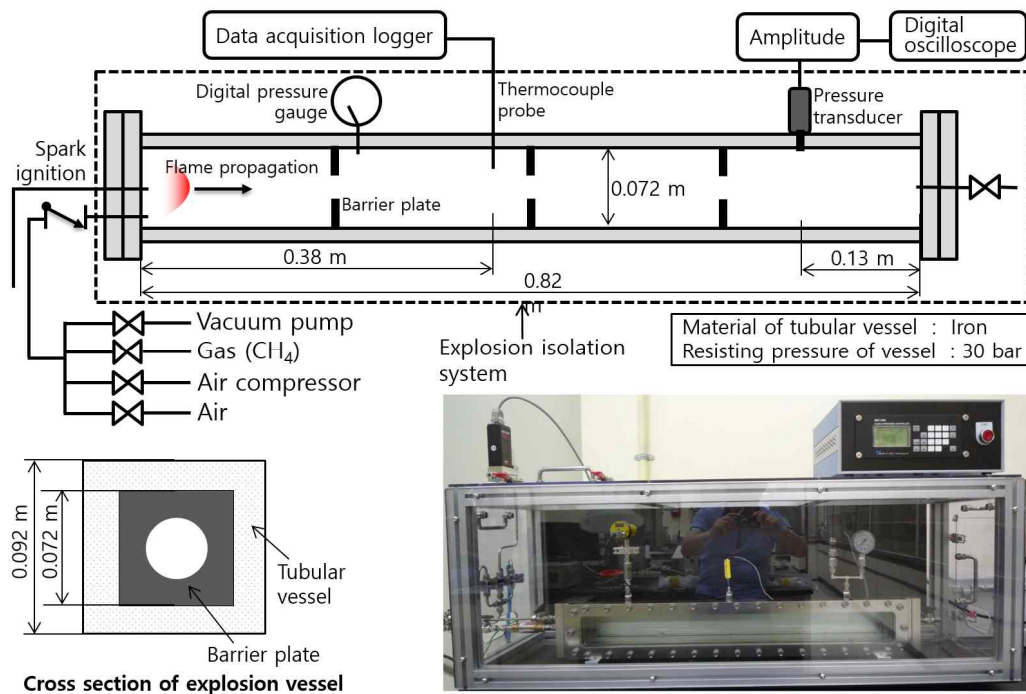
메탄의 물리화학적 특성을 <표 8>에 나타냈다. 비중은 공기보다 가벼운 0.554이며 약간의 수용성을 갖는다. 공기 중에서 약한 불꽃을 내며 쉽게 연소되어 반응종료 후에 이산화탄소와 수증기로 된다. 끓는점 및 녹는점은 각각 -164.0°C , -182.5°C 이다. 또한 색깔, 냄새, 맛이 없기 때문에 흡입하여도 무해하기 때문에 사람의 감각으로 쉽게 알아차릴 수가 없다. 비중이 공기보다 가볍기 때문에 높은 장소에 체류하기 쉬우며, 밀폐 공간에서 누출되면 천장 부근에 체류하며 폭발성 혼합가스를 형성할 수 있기 때문에 폭발위험성이 높으므로 주의가 필요하다.

<표 8> 메탄(CH₄)의 물리적특성

비중	0.554
가스 비열	2.226 kJ/kg · K
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) 덕트형 폭발용기

실험에 사용한 실험장치 개요를 <그림 7>에 나타냈다. 밀폐용기는 화염 가시화를 위하여 전면에는 강화유리 재질로 그 이외에는 SUS재질로 제작하였다. 폭발용기의 내부압력은 압력 30 bar까지 견딜수 있도록 설계되었으며 이를 위해 단면적이 정사각형 덕트형의 폭발용기이며 가로 및 세로가 각각 0.072 m이며, 길이는 0.8 m로 하여 플랜지 접속에 의한 밀폐 구조로 제작되었다. 또한 용기 내에서 발생한 폭발화염의 온도 측정을 위해 열전대가 실험장치 상부 면에 설치되어 있다. 그리고 공기 밸브를 열어 용기내의 압력이 대기압이 되도록 공기를 주입하고 균일한 혼합가스가 되기까지 40분간 방치한 다음에 착화하여 폭발특성을 계측하였다. 착화원으로 사용한 전극의 간격은 3 mm로 하였으며 전극 위치는 용기의 좌측 끝단에 설치하여 네온트랜스에 의해 발생된 고전압을 전극으로 유도하여 불꽃방전이 일어나도록 하였다.



[그림 7] 덕트형 폭발용기 및 장애물의 모습

3) 화염관측 및 화염전파속도의 측정

본 연구에서는 덕트 형태의 밀폐된 폭발용기에서 일어나는 메탄-공기 혼합기의 화염전파 현상을 관찰하기 위하여 [그림 7]에서와 같이 전면에 강화유리 재질의 관측창을 설치하였다. 메탄-공기 혼합기의 농도 및 장애물의 장애 정도(장애율)를 변화시키면서 이러한 파라메타가 화염전파특성에 어떻게 영향을 주는지를 실험적으로 조사하였다. 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 폭발 공간 내에 장애물이 존재하지 않는

조건에서 동일 농도의 화염전파 모습을 관찰해 보면 화염 가속현상은 발생하지 않았다. 이러한 화염전파 특성으로 인하여 가스폭발 시의 압력상승속도는 화염면적과 연소속도의 곱에 비례하므로 화염면적이 일정하기 때문에 급격히 압력이 상승하지는 않는다.

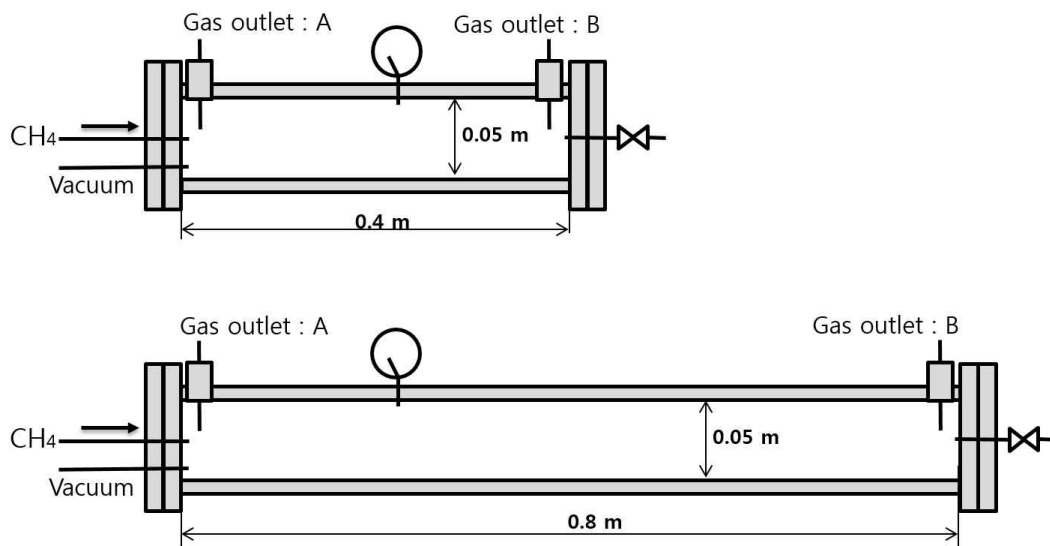
4) 폭발압력의 측정

메탄-공기 혼합기의 폭발에 의한 압력은 스트레인 압력 게이지를 사용하여 측정하였다. [그림 7]에서와 같이 압력계는 용기 좌단으로부터 0.69 m의 지점에 설치하였으며 압력계로부터의 출력은 고속 디지털 데이터 수집장치(Graphtec midi Logger GL900)를 통하여 계측하였다. 단면이 정사각형인 덕트형 폭발용기 내의 중심에서 착화가 일어나면 반구형 형태의 화염이 전방향(All directions)으로 일정 속도를 가지고 전파하게 되며 이 때 발생하는 압력은 시간의 3승에 비례한다. 또한 화염에 의한 온도 상승은 비열 차이를 발생시키며 이러한 요인이 전파 화염의 부력 영향으로 나타난다. 또한 폭발하한농도 근방의 가스 농도에서 폭발에 의한 전파화염은 용기 상부에 치우친 형태로 전파하게 된다. 용기가 단열상태라고 한다면 연소가스의 화염온도는 폭발 용기의 용적에 관계없이 일정하므로 동일 농도에서 폭발압력의 차이가 없어야 하지만 실제로는 용기벽과 가스화염 간에는 열교환이 이루어지며 이러한 열손실(Heat loss)이 클수록 폭발압력은 감소할 수 있다. 메탄-공기혼합기의 연소에서는 연소 전후의 물수가 작기 때문에 압력상승은 연소에 의한 온도상승에 의해 주로 일어난다. 연소가 종료하면 용기 벽을 통해 외부로 열전달이 이루어지므로 연소가스의 온도는 저하하며 이와 함께 압력이 감소하고 초기압력인 대기압 상태로 된다.

2. 결과 및 분석

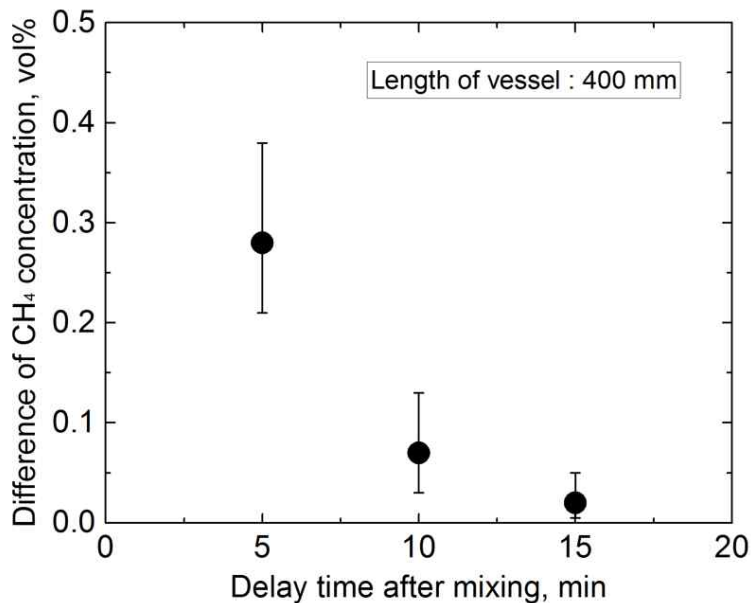
1) 가스농도의 시간적 변화

장애물이 존재하는 폭발공간에서의 연료원은 메탄(CH_4)이며 공기와 혼합하여 메탄-공기의 가연성혼합기 폭발을 대상으로 조사하였다. 메탄 농도의 설정은 분압(Partial pressure)을 활용하여 진공 상태의 폭발용기 내에 메탄 및 공기를 차례대로 대기압 상태에까지 도입한 다음에 일정 시간동안 방치하여 균일한 혼합가스가 형성되도록 하였다. 이러한 가스혼합 방법에 있어서 밀폐 폭발용기 내의 메탄가스 농도가 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 [그림 8]과 같은 장치를 사용하여 조사하였다. 서로 다른 길이를 갖는 2종의 용기(0.4 m, 0.8 m) 내에서 일정 농도의 메탄을 도입 후에 용기의 양쪽 끝단 부분에서 가스를 채취하여 가스 크로마토그래피(GC)에 의한 분석을 실시하였다. 시간에 따른 농도 차이의 조사 결과를 [그림 9]~[그림 10]에 나타냈다. 용기 내의 농도 차이가 거의 없다고 판단되는

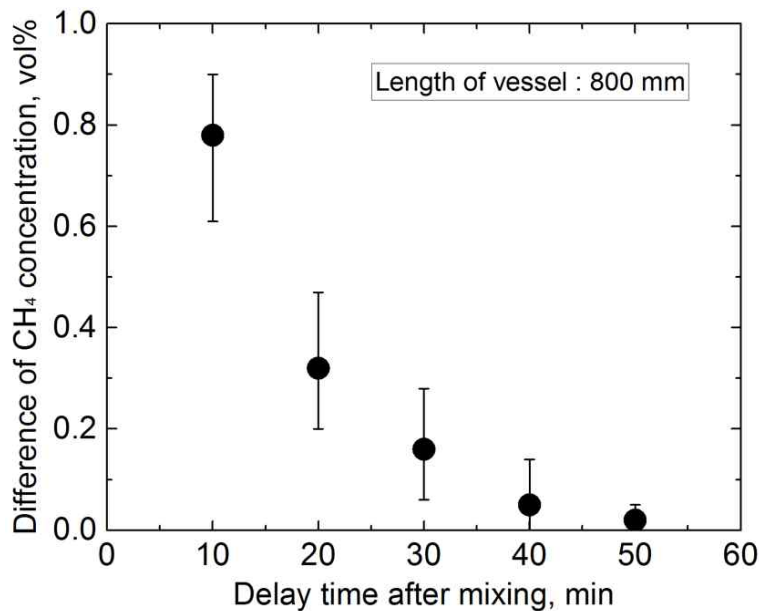


[그림 8] 밀폐용기 내의 CH_4 가스 농도 분포의 조사

0.05 %의 농도가 되기까지 소요되는 시간은 0.4 m의 용기에서는 10분, 그리고 0.8 m의 용기에서는 40분으로 나타났다. 메탄 및 공기를 충전하는 주입구를 기준으로 보면 최초에 메탄을 넣은 다음에 공기를 주입하면 공기에 의해 밀려난 메탄은 주입구에서 멀어질수록 농도가 증가하게 된다. 그러나 시간이 경과함에 따라 가스의 흐름 및 확산에 의해 메탄과 공기가 혼합되며 농도 차이가 균일하게 되는 것으로 판단된다. 본 연구에서 조사한 결과를 보면 용기 길이가 2배가 되면 균일 농도가 되기까지의 소요 시간은 [그림 10]에서와 같이 약 4배가 되는 것을 알 수 있다.



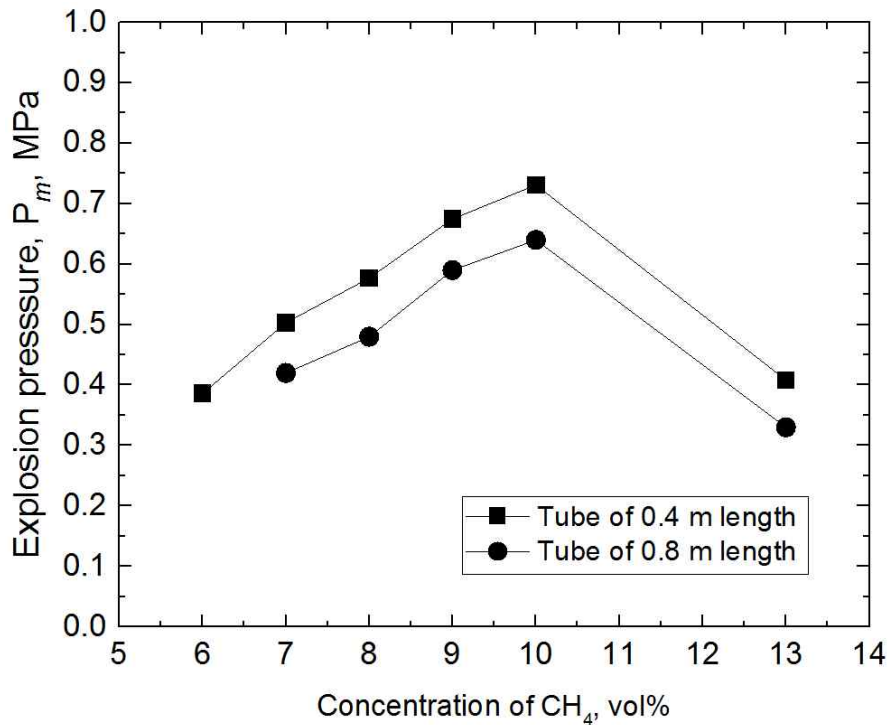
[그림 9] 400 mm 용기의 시간적 가스 농도 변화



[그림 10] 800 mm 용기의 시간적 가스 농도 변화

2) 폭발압력

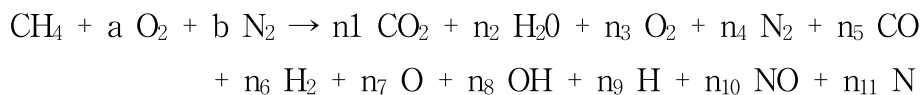
밀폐용기의 배관 길이에 따른 폭발특성 조사를 통해 폭발용기 조건이 폭발압력에 미치는 영향을 조사하였다. [그림 11]은 서로 다른 배관 길이(0.4 m 및 0.8 m)를 갖는 2종의 스테인레스 재질의 폭발용기에서 메탄(CH₄) 농도에 따른 폭발압력을 조사한 결과이다. 가로축은 메탄의 농도이며 세로축은 폭발압력을 나타낸다. 폭발압력은 배관 길이에 관계없이 10 vol%에서의 농도에서 최대가 되는데 0.4 m 및 0.8 m 조건에서 각각 0.73, 0.64 MPa의 최대폭발압력이 얻어졌다. 그러나 전체적인 농도에 걸쳐 폭발압력은 0.4 m의 배관 보다 0.8 m의 배관에서 작게 나타나고 있다. 만일 용기가 열출입이 없는 단열 상태라고 한다면 동일 농도 조건에서 연소 가스의 온도(화염온도)는 배관의 부피에 관계없이 같기 때문에 폭발압력도 동일해야 한다. 그러나 실제로는 용기 벽을 통한 화염온도의 열적 교환이 일어나기 때문에 열손실이 증가할수록 폭발압력도 감소하게 될 것이다. 또한 폭발



[그림 11] 용기의 길이 조건에 따른 폭발압력의 영향

용기 벽을 통한 열손실의 크기는 용기의 재질에 따라 달라질 수 있다. 그러므로 [그림 11]에서 0.8 m의 용기 벽면의 면적은 0.4 m보다 크기 때문에 용기 벽면을 통한 열손실은 용기가 길수록 증가한다고 할 수 있다. 따라서 동일 가스농도에서의 폭발압력은 용기가 길수록 감소할 것으로 판단된다.

0.8 m의 용기 조건에서 측정된 메탄의 폭발압력 측정값을 연소가스의 종류를 고려한 화학반응식에 의한 계산값과 비교, 검토하였다. 밀폐계 폭발(Constant-volume combustion)로서 열손실(Heat-loss)을 무시하고 1몰의 메탄이 a몰의 산소와 b몰의 질소가 반응하여 폭발 시에 생성되는 각각 ni몰의 CO₂, H₂O, O₂, N₂, CO, H₂, O, OH, H, NO, N의 연소가스(11종)를 고려한 화학반응식은 다음과 같다.



$$n_C : n_1 + n_5 = 1$$

$$n_H : 2 \cdot n_2 + 2 \cdot n_6 + n_8 + n_9 = 4$$

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

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

각 분자종의 분압(Pi) 계산은 다음과 같다.

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

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

각각의 평형에 대해 정압평형정수(K) 및 이하 식들이 성립한다.

$$(1/2)\text{O}_2 \leftrightarrow \text{O} : n_7 = K1 \cdot [(n_3)^{1/2} / A]$$

$$\text{CO} + (1/2)\text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 : n_1 = K2 \cdot n_5 \cdot [(n_3)^{1/2} / A]$$

$$(1/2)\text{N}_2 + (1/2)\text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO} : n_{10} = K3 \cdot (n_4)^{1/2} \cdot (n_3)^{1/2}$$

$$(1/2)\text{N}_2 \leftrightarrow \text{N} : n_{11} = K4 \cdot [(n_4)^{1/2} / A]$$

$$(1/2)\text{H}_2\text{O} + (1/4)\text{O}_2 \leftrightarrow \text{OH} : n_8 = K5 \cdot (n_2)^{1/2} \cdot [(n_3)^{1/4} / (A)^{1/2}]$$

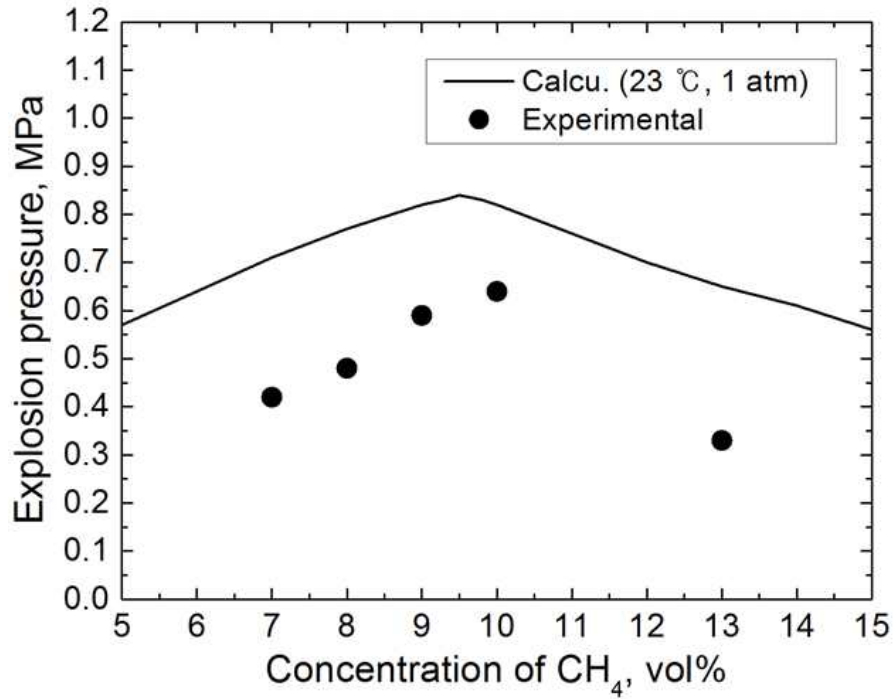
$$(1/2)\text{O}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} : n_2 = K6 \cdot (n_3)^{1/2} \cdot (n_6)^{1/2} \cdot A$$

$$2\text{H} + (1/2)\text{O}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} : n_2 = K7 \cdot (n_9) \cdot (n_3)^{1/2} \cdot A^3$$

또한 분압(P) 및 폭발압력(Pm)은 다음과 같다.

$$P = \sum(p_i) = A^2 \cdot \sum(n_i), \quad P_m = (\sum(n_i) \cdot R \cdot T) / V_0$$

상기 식을 사용하여 메탄의 농도 변화에 따른 폭발압력을 계산한 결과를 [그림 12]에 나타냈다. 실험값은 모든 농도에 있어서 계산값보다 작았지만 농도에 따른 폭발압력의 증감 경향은 유사한 것을 알 수 있다. 계산값에서는 용기벽을 통한 열손실, 불완전한 연소반응, 수증기 응축 등의 요인이 고려되지 않았기 때문에 실험값보다 큰 결과가 얻어진 것으로 추정된다.

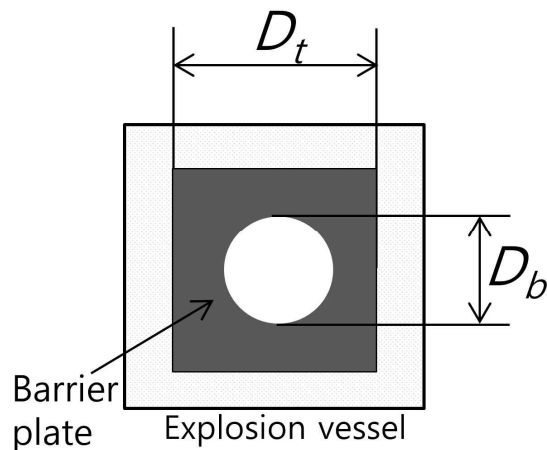


[그림 12] 메탄의 폭발압력의 실험값과 계산값의 비교

3) 폭발공간에서의 장애물

대부분의 가스폭발사고에서 발생하는 폭발피해는 가연성가스-공기 혼합기가 폭발하는 공간에 시설물이나 장치 또는 작업자가 존재하기 때문에 일어나게 된다. 그러므로 폭발사고 피해를 평가하기 위해서는 먼저 폭발공간에 존재하는 장애물이 폭발특성에 어떠한 영향을 주는가를 검토할 필요가 있다. 지금까지 폭발피해를 평가하기 위한 실험 및 시뮬레이션 연구를 살펴보면 일정 크기의 공간에서 폭발이 일어나서 발생하는 폭발과압 크기를 폭원으로부터의 거리로 환산하여 조사하는 경우가 많았다. 이러한 평가 방법을 적용하는 경우에는 본 연구의 제2장에서 검토한 폭발사고 사례분석에서 알 수 있듯이 폭발피해예측 결과는 실제 폭발사고와 차이가 날 수 있다. 본 연구에서는 작업장 내에서의 폭발사고를 고려하여 밀폐 공간 내에 존재하는 장애물이 차지하는 수직 단면적 조건(장애율)이 폭발과압과 화염전파특성에 어떠한 영향을 주는 지를 정량적으로 조사하였다.

장애물의 형상이나 크기 등의 조건은 매우 다양하기 때문에 장애의 정도를 정량화하기 위하여 파라메타로서 장애율(Barrie ratio ; R_b)을 도입하여 사용하였다. 본 연구에서 R_b 는 다음 식과 같이 정의하였으며 [그림 13]에 장벽의 개구면적과

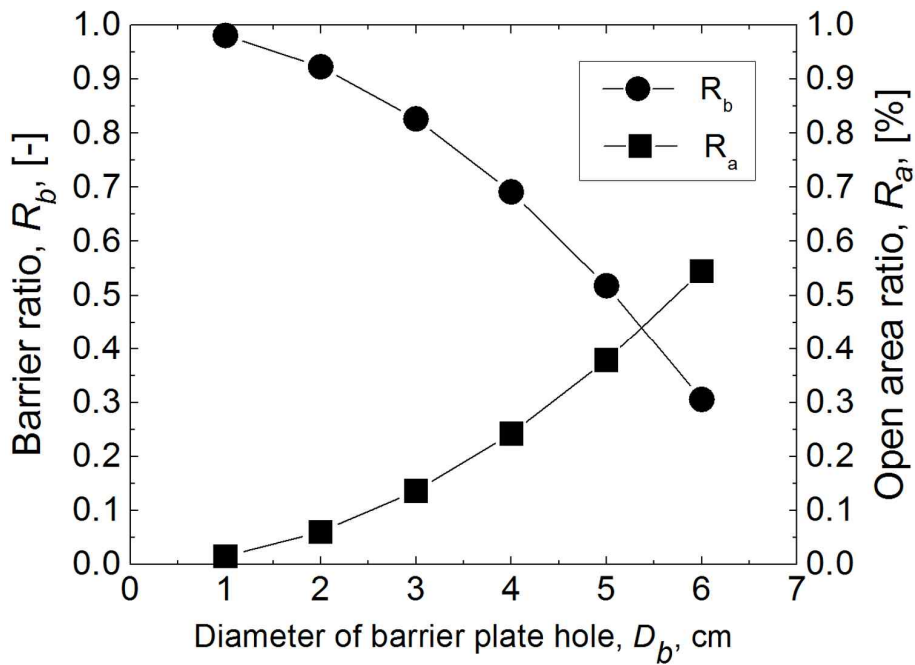


[그림 13] 장애물이 설치된 덕트형 폭발용기의 수직 단면

장애율의 관계를 개략적으로 나타냈다.

$$R_b = 1 - \left(\frac{D_b}{D_t} \right)^2$$

상기 식에서 D_t 는 폭발배관 단면적의 원형 개구부의 최대 직경(Diameter of tube hole)이며, D_b 는 일정 조건 크기의 장벽 개구부의 직경(Diameter of barrier plate hole)을 의미한다. 그러므로 D_b 가 증가할수록 R_b 는 감소하므로 서로 반비례 관계라고 할 수 있다. 장벽의 개구면적과 장애율의 관계는 [그림 14]와 같이 나타낼 수 있다. [그림 14]에서 R_a 는 개구부의 면적비율(Open area ratio)로서 다음 식과 같이 표현된다.



[그림 14] 장벽의 개구면적과 장애율의 관계

$$R_a = \left(\frac{A_b}{A_t} \right)^2$$

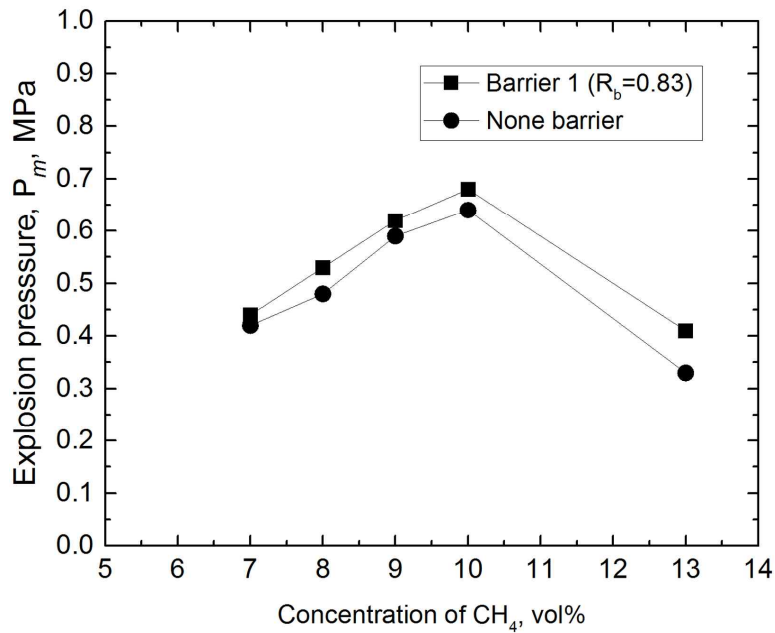
R_a 의 관계식에서 A_b 는 장벽 개구부의 면적(Area of barrier plate hole)이며 A_t 는 배관 수직 단면의 면적(Cross-section area of tube)을 나타낸다. 그러므로 장벽 개구부의 직경(D_b)이 증가하면 개구부의 면적비율(R_a)이 증가하므로 장애율(R_b)은 감소하게 된다. 장애율(R_b)에 따른 개구부의 면적비율(R_a)을 <표 9>에 제시하였다.

<표 9> 장애율에 따른 개구면적

D_b [cm]	R_b [-]	Open area ratio [-]
1	0.98	0.02
2	0.92	0.06
3	0.83	0.14
4	0.69	0.24
5	0.52	0.38
6	0.31	0.55

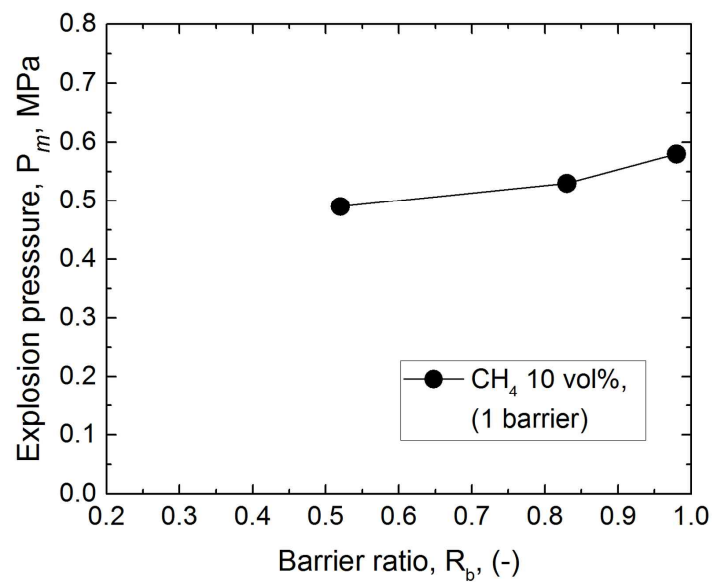
4) 장애물에 의한 폭발압력특성

폭발공간에서 장애물이 과압 및 화염전파특성에 미치는 영향을 알기 위해서 먼저 장애물이 존재하지 않는 조건에서의 폭발압력특성을 조사하였다. [그림 15]는 장애물이 존재하지 않는 조건과 0.83의 장애율 조건을 갖는 장애물이 폭발 배관의 중심부에 존재하는 각각의 경우에서 가스농도에 따른 폭발압력을 조사하여 비교한 결과이다. 농도에 관계없이 폭발압력은 장애율이 증가하면 증가하는 것을

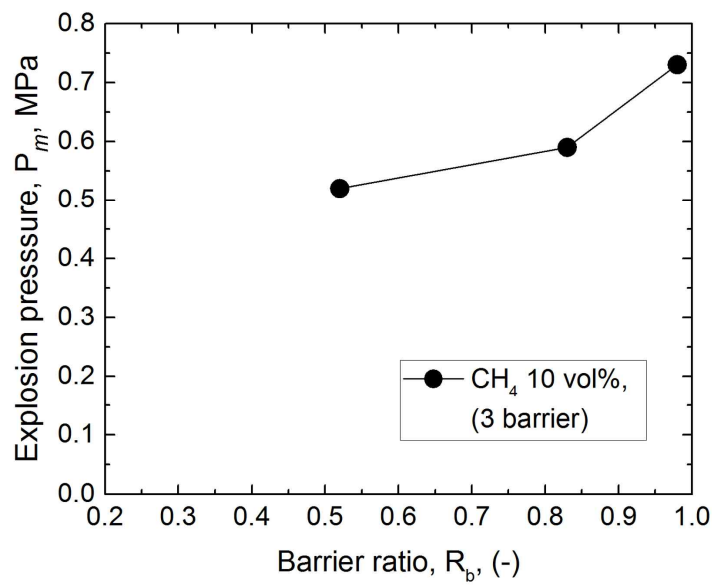


[그림 15] 장애 조건 및 농도 변화에 따른 폭발압력

알 수 있다. 폭발압력이 가장 큰 농도인 약 10 vol%는 이론혼합농도에 가까우며 이를 기준으로 농도가 증가하거나 감소하면 폭발압력이 감소하고 있다. [그림 16] 및 [그림 17]은 장애물의 개수에 따른 영향을 조사한 결과이다. 장애물의 개수에 관계없이 장애물이 증가하면 폭발압력도 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 장애물 조건에서는 장애물의 개수가 많을수록 폭발압력이 증가하는 것으로 나타났다.



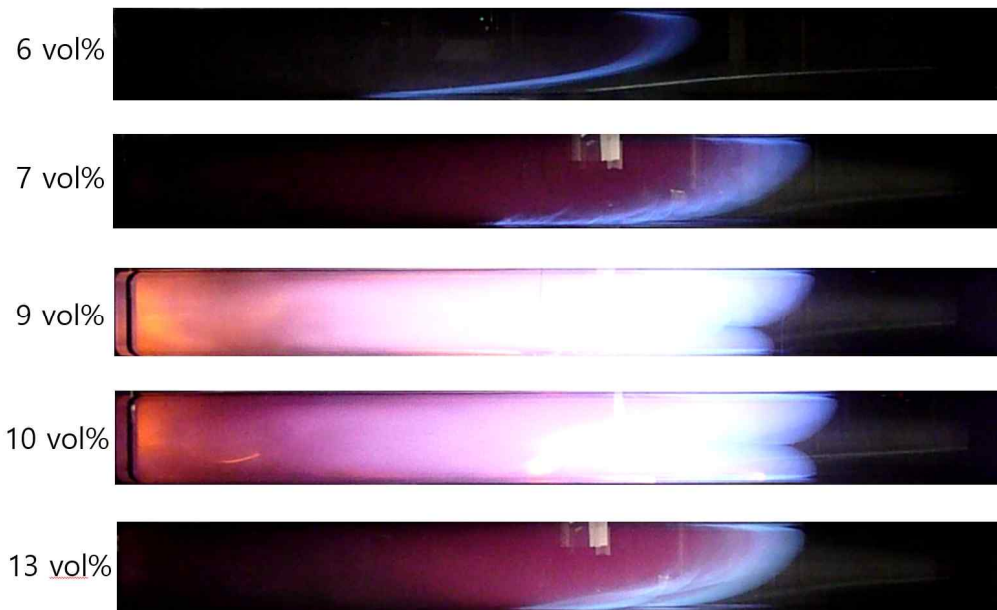
[그림 16] 1개 장벽 조건에서 장애율에 따른 폭발압력



[그림 17] 3개 장벽 조건에서 장애율에 따른 폭발압력

5) 화염전파에 미치는 장애물에 의한 영향

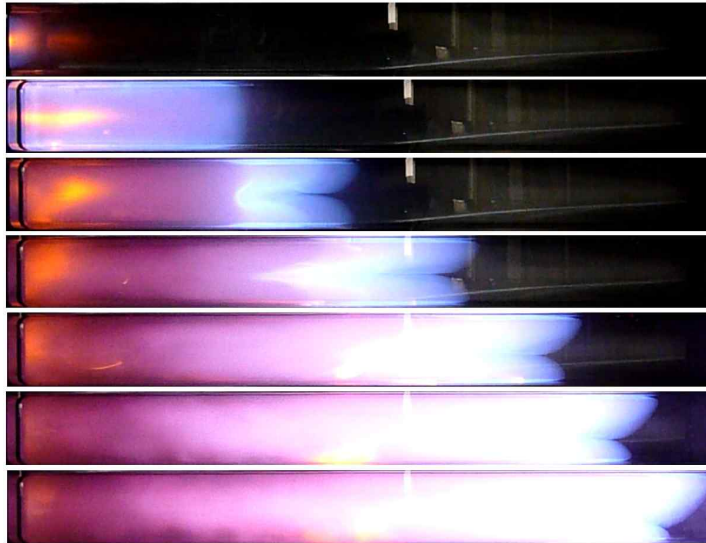
폭발 공간에 존재하는 장애물에 의한 화염전파 특성을 가시화하여 그 영향을 조사하였다. 먼저 장애물이 존재하지 않는 경우에 가스 농도에 따른 화염전파 모습을 관찰하고 그 차이를 [그림 18]에 나타냈다. 메탄의 폭발하한농도(5 vol%)와 상한농도(15 vol%)에 가까운 6~7 vol% 및 13 vol%에서의 화염전파모습을 보면 용기벽면에서의 열손실 및 비열 차이에 의한 부력효과로 화염면이 상부로 치우치며 깨끗한 화염면을 형성하며 전파하는 것을 알 수 있다. 반면에 9~10 vol%에서는 화염의 전파속도가 증가하며 화염면이 불규칙하게 변하는 것을 관찰 할 수 있다.



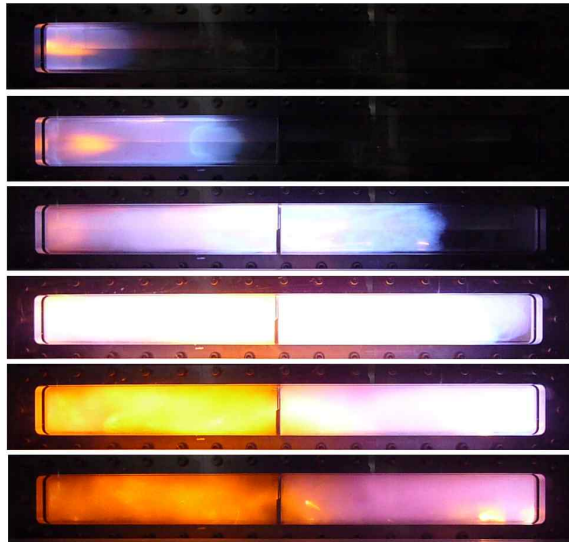
[그림 18] 무 장벽 조건에서 농도에 따른 화염전파 모습 예

[그림 19]는 장애물이 없는 10 vol%에서의 화염전파모습이다. 착화와 동시에 화염면이 반구형의 모습으로 전파하지만 착화 후의 약 33 ms 이후부터 불규칙한

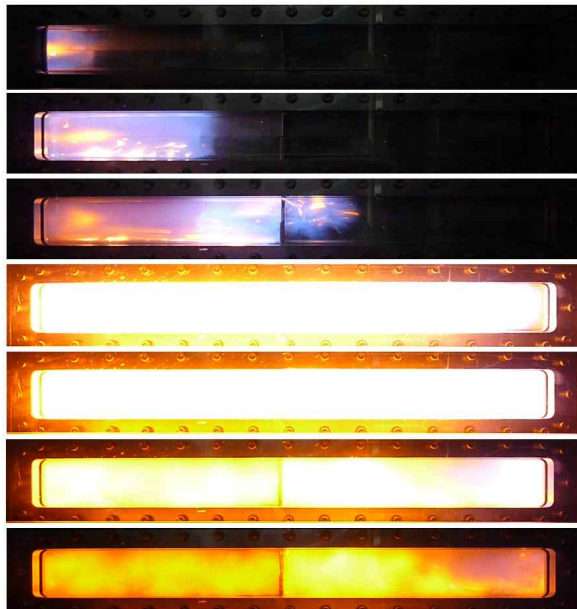
화염면으로 전파하는 것을 볼 수 있다. 다음에 폭발배관의 중심부에 1개의 장애물이 존재하는 조건은 동일하고 장애율이 증가하는 경우의 화염전파 모습을 [그림 20]~[그림 22]에 제시하였다. 장애물의 중심 개구부를 화염이 통과하는 모습을 비교해 보면 장애율이 증가할수록 화염전파속도가 증가하는데 개구부의 면적이 작아질수록 유속의 증가에 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다. 폭발배관 내의 장애물이 증가하여 3개인 조건에서 장애율 증가에 따른 화염전파 모습을 [그림 23]~[그림 25]에 나타냈다. [그림 26]~[그림 27]의 실험결과를 보면 장애물의 증가와 관계없이 장애율 증가는 화염전파속도의 증가로 이어지며, 또한 동일 조건의 장애율에서 장애물의 개수가 증가하면 화염전파속도가 증가하는 것이 관찰되었다.



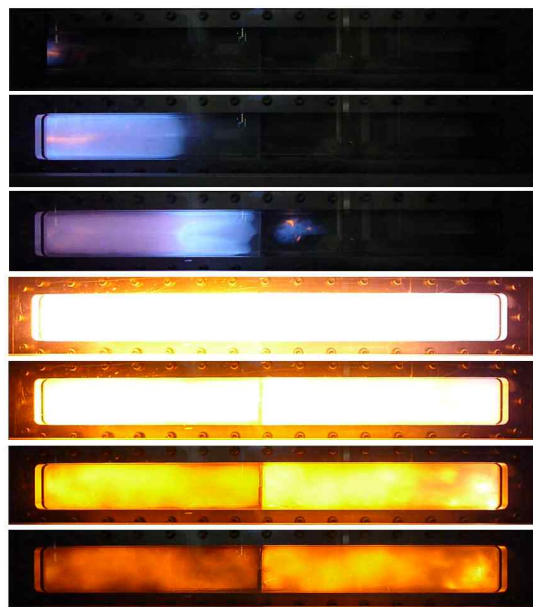
[그림 19] 무 장벽 및 10 vol% 조건에서의 화염전파



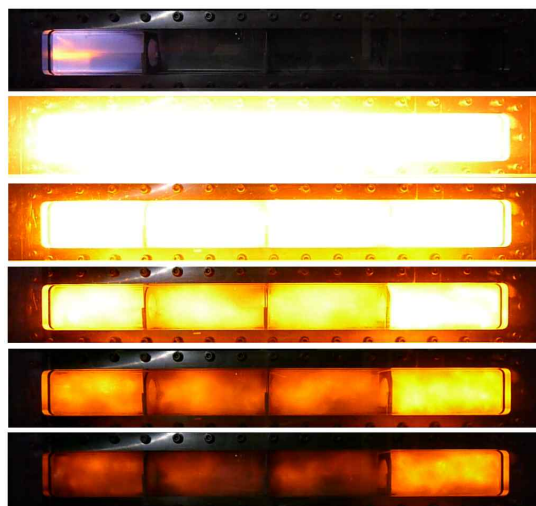
[그림 20] 1개 장벽, 장애율 0.52 및 10 vol%에서의 화염전파



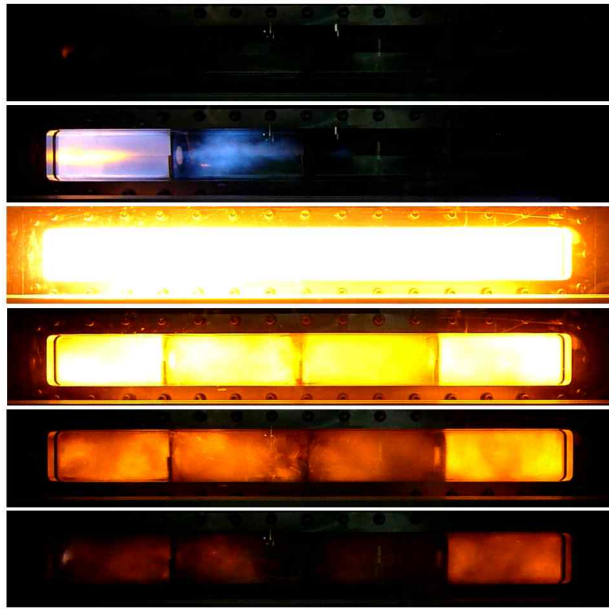
[그림 21] 1개 장벽, 장애율 0.83 및 10 vol%에서의 화염전파



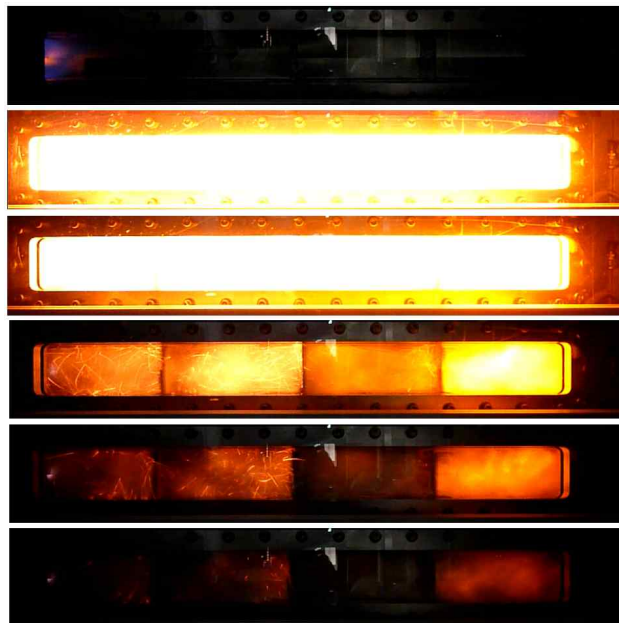
[그림 22] 1개 장벽, 장애율 0.98 및 10 vol%에서의 화염전파



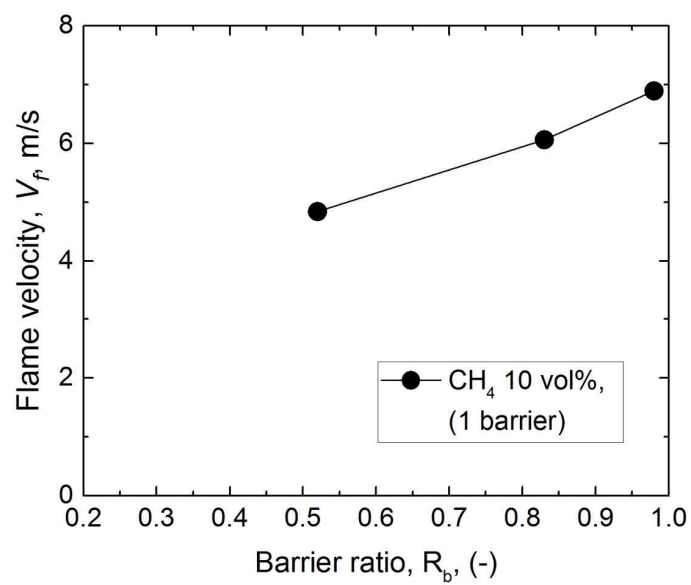
[그림 23] 3개 장벽, 장애율 0.52 및 10 vol%에서의 화염전파



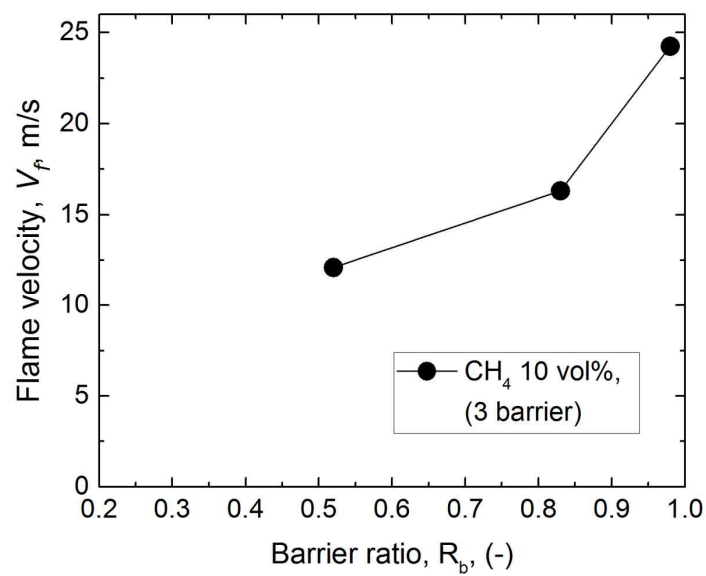
[그림 24] 3개 장벽, 장애율 0.83 및 10 vol%에서의 화염전파



[그림 25] 3개 장벽, 장애율 0.98 및 10 vol%에서의 화염전파



[그림 26] 1개 장벽에서 장애율에 따른 화염전파속도



[그림 27] 3개 장벽에서 장애율에 따른 화염전파속도

밀폐배관 내의 예혼합기의 가스폭발에서 화염전파는 장애물의 유무에 달라지는 것을 본 연구를 통해 관찰할 수 있었다. 장애물이 없는 경우에는 [그림 19]와 같이 일정 농도에서 화염의 가속현상은 관찰되지 않았으며 일정한 속도로 화염이 전파하는 것을 알 수 있다. 반면에 장애물이 존재하는 경우에는 [그림 20]과 같이 화염의 가속되는 것을 알 수 있다. 더욱이 [그림 23]과 같이 동일 농도 조건이라도 장애물의 개수가 증가할수록 화염의 가속이 보다 증가되는 것을 알 수 있다. 화염전파속도는 메탄 고유의 연소속도에 기체 흐름의 유속의 합으로 나타난다. 장애물의 증가는 기체흐름의 유속의 증가로 이어지기 때문에 화염전파속도가 증가하는 것으로 판단된다.

IV. 장애물 조건에 따른 가스폭발 현상의 예측

1. 폭발계산의 이론

폭발압력과 지속시간의 계산은 TNO multi-energy모델에 의하여 계산이 가능하다. 증기운 폭발에 있어서의 연소열(E)의 계산은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$E = m_f \cdot hc \quad (1)$$

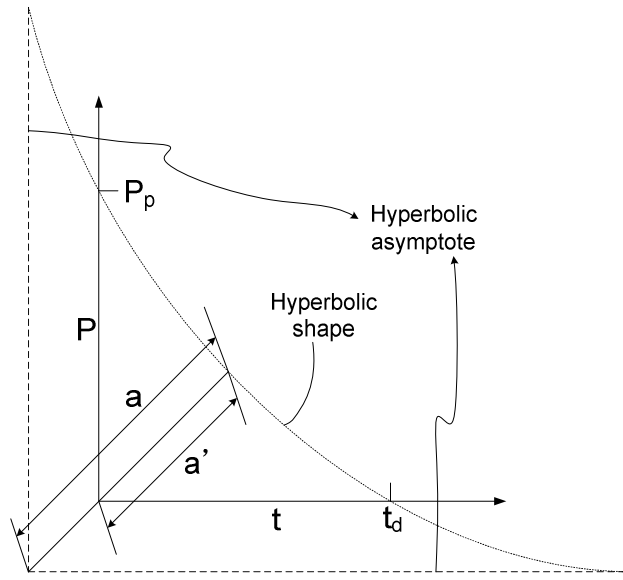
여기서 m_f 는 연료 질량이며 hc 는 순 연소열이다. 또한 m_f 와 증기운 체적(V_c)의 관계는 식 (2)와 같다.

$$V_c = (m_f R_0 \cdot T_\infty) / (P_\infty \cdot MW_f \cdot C_{st}) \quad (2)$$

식 (2)에서 R_0 는 보편 기체 상수, T_∞ 는 주위 온도, P_∞ 는 주위 압력, MW_f 는 연료의 분자량, C_{st} 는 체적화학양론농도이다. 증기운 폭발에 따른 충격파(I)는 다음 식(3)과 같이 표현된다.

$$I = \int_0^{I_+} P_p f(t) dt \quad (3)$$

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. [그림 28]은 충격파 중에서 이상 충격파(Ideal shock wave)의 형태를 개략적으로 나타낸 것으로서, t_d 는 양적단계 지속(positive phase duration)을 의미한다.



[그림 28] 이상 충격파 곡선의 형태

[그림 28]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 관계식 (4)가 성립된다.

$$I = P_p \cdot t_d \cdot \left[s_0 + a^2 \cdot \frac{\ln\left(\frac{1-s_0}{-s_0}\right)}{2} \right] \quad (4)$$

여기서 s_0 및 a' 는 이상 충격파 지수, a 는 쌍곡선의 가로축 반신으로 다음과 같이 표현된다.

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

$$a' = f(P_p)$$

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(5)와 같이 체적 (V_c) 만의 함수이다.

$$R_{0s} = \left(\frac{3 \cdot V_c}{4 \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

또한 폭발 과압의 감소(ΔP)는 다음 식 (6)과 같이 계산된다.

$$\Delta P = S_F \cdot P'_{12} \quad (6)$$

식 (6)에서 S_F 는 방호팩터(Shielding factor)이며, S_F 와 방호팩터 파라메타(Shielding factor parameter, V^{*2})와의 관계는 식(7) 및 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} S_F &= (1 - V^{*2})^{\frac{1}{2}} & V^{*2} &\leq 1 \\ S_F &= 0 & V^{*2} &> 1 \end{aligned} \quad (7)$$

$$V^{*2} = \sum_{i=1}^3 \left\{ \left(\frac{\partial f_i}{\partial x^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial y^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial z^*} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

또한 방호 구조물과 요소에 대해 100%의 손실 및상해를 유발하는 폭발 과압을 P_1 이라 하고, 방호 구조물과 요소에 대한 사고유발 압력을 P_2 라 하였을때, P'_{12} (폭발압력)는 식(9)와 같이 정의되어 P_1 과 P_2 중에서 작은 값이 된다.

$$P'_{12} = \min(P_1, P_2) \quad (9)$$

2. 폭발 피해평가 모델

본 연구에서는 사용한 폭발 피해평가모델로서는 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. 폭발피해평가 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 인신상해는 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-I 곡선을 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 작업 자세 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, 지하 구조, 공업설비, 저장 탱크 등의 복합구조 등이 고려되어 있으며, 이들 요소에 대하여 취약성 파라메타를 정의한다. 폭발에 의한 인명 피해를 예측하기 위해서, 폭발원(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 폭발압력(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.

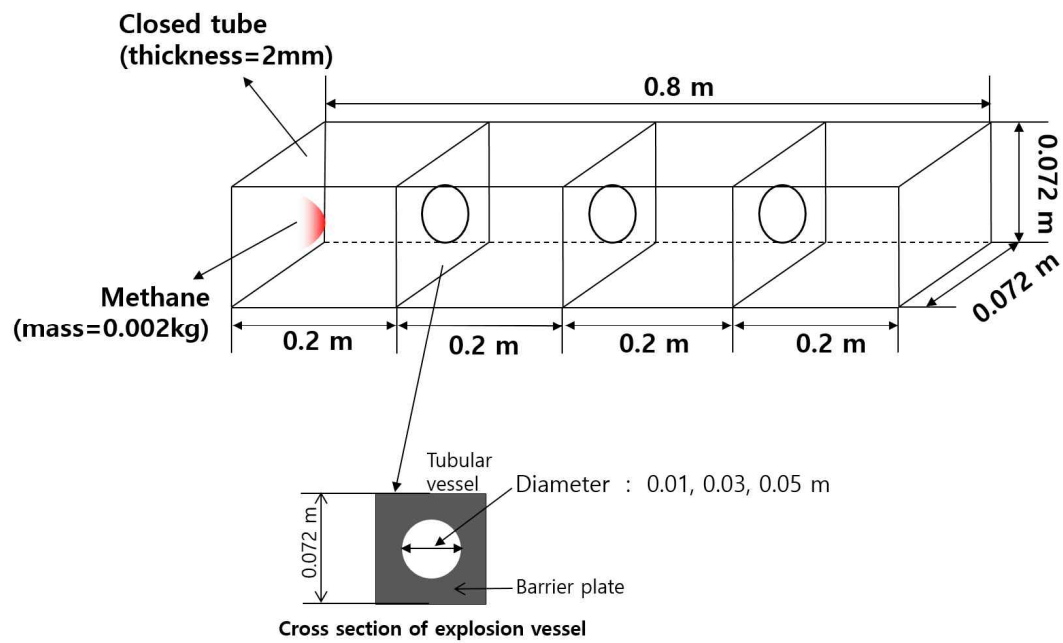
3. 폭발 시나리오 및 조건

본 연구의 제3장에서는 밀폐공간에 있어서 메탄 폭발 시의 화염전파특성을 실험적으로 조사하였다. 특히 장애물이 폭발과압과 화염전파특성에 미치는 영향을 검토하였다. 이러한 실험결과와 동일한 조건에서 폭발모델링평가를 수행하여 활용성을 조사하였다. 폭발평가에 사용된 모델은 TNO Multi-energy Modeling로서 누출된 일정량의 메탄가스가 장애물이 존재하는 밀폐공간에서 폭발하였을 때의 화염전파 특성을 시뮬레이션 하였다. 메탄(CH_4)의 가스폭발에 따른 과압 및 화염전파 특성은 <표 10>의 메탄 물성 및 기상 조건을 사용하여 계산하였다.

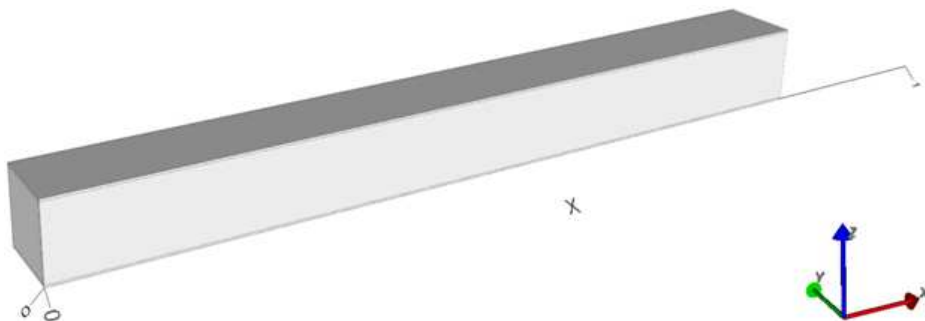
<표 10> 메탄의 물성 및 기상 조건

사고 물질명	메탄(CH ₄)
기온 (°C)	21
기압 (atm)	1
누출량 (kg)	0.002
분자량 (g/mol)	16.0
순 연소열 (J/kg)	5.0×10^7
밀도 (kg/m ³)	0.7168 (at 0°C, 1atm)
화학양론농도 (vol%)	9.48

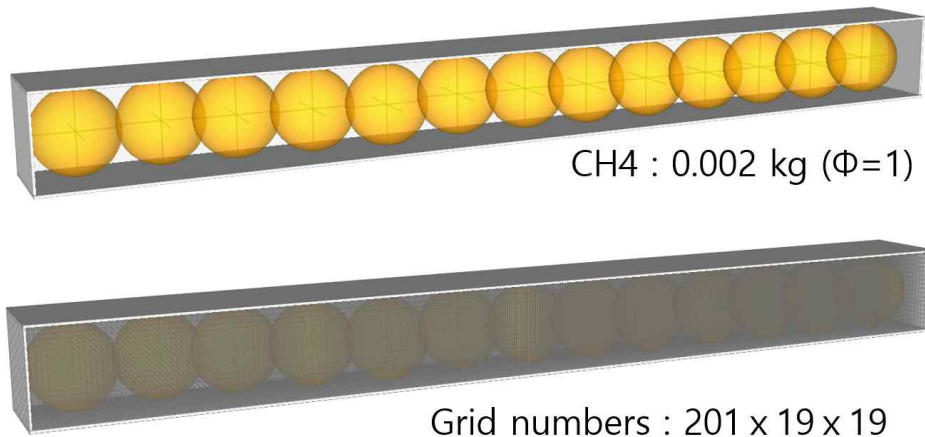
폭발계산을 위한 3차원 폭발공간을 [그림 29]와 같이 설정하였다. [그림 29]의 폭발공간은 본 연구에서 수행한 [그림 7]의 실험장치와 동일한 크기로서 본 연구의 실험에서 얻은 결과와 비교하기 위하여 가로×세로×깊이가 0.72×0.72×0.8 m이며 폭발배관의 두께는 0.02 m, 그리고 배관의 재질은 알루미늄으로 설정하였다. 장애물의 개구부는 직경 0.01, 0.03, 0.05 m의 3가지 종류로 설정하였으며 이를 장애율로 환산하면 각각 0.98, 0.83, 0.52에 해당된다. 밀폐 폭발배관을 모델링한 전체 모습은 [그림 30]과 같으며 1 mesh는 1.0 m가 된다. 또한 폭발과압을 계산하기 위해서는 계산 mesh의 설정은 계산시간을 고려하여 [그림 31]에서와 같이 201×19×19로 하였다. 실제 계산에 있어서 메탄 가스의 농도는 10 vol%로 일정하게 하고 장애물의 유무에 따른 계산을 먼저 평가하였다. 다음에 10 vol%의 일정 농도에서 장애율이 증가(0.52, 0.83, 0.98)하는 조건에서 화염전파 특성이 어떻게 변하는지를 계산하고 실험결과와 비교, 검토하였다.



[그림 29] 장애물 조건을 고려한 3차원 폭발 시뮬레이션의 계산조건



[그림 30] 밀폐 폭발배관의 모델링 모습 (1 mesh=1.0m)

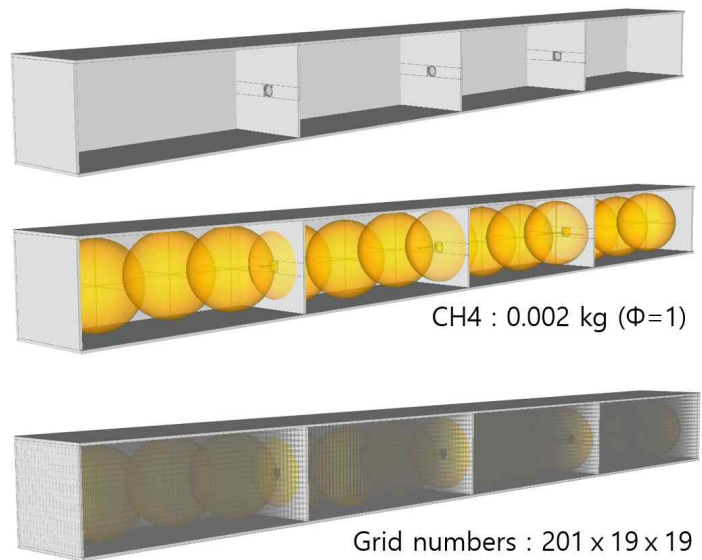


[그림 31] 3차원 폭발공간 내의 메탄가스 및 계산 격자

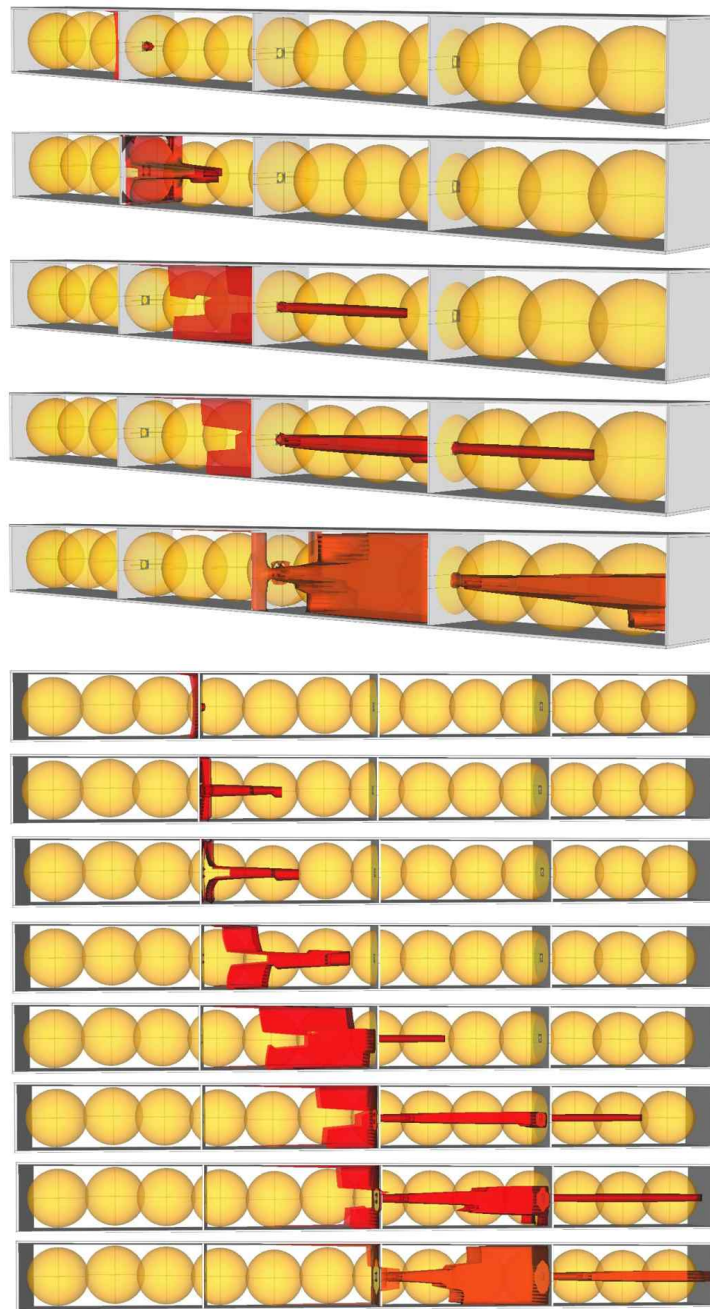
4. 폭발계산 결과 및 분석

폭발용기 내의 장애물에 따른 화염전파 거동을 평가하기 위하여 메탄 10 vol%에서의 장애율이 0.98 조건의 가상 폭발공간을 [그림 32]에 나타냈으며, 이 조건에서의 메탄 화염의 전파 거동 결과를 [그림 33]에 제시하였다. 수직 장벽의 개구부가 10 mm로서 장애율이 매우 큰 조건에서의 화염전파이기 때문에 개구부를 통한 메탄 혼합기 내의 화염전파가 매우 빠른 것을 알 수 있다. 개구부를 화염이 먼저 선행하여 통과한 다음에 일정 지연 시간 후에 각각의 격벽 공간 전체로 확대되고 있는 것을 볼 수 있다. 동일 조건에서의 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하기 위하여 [그림 34]에 함께 나타냈으며 시뮬레이션 결과는 실험결과와 유사한 것을 확인할 수 있다. 메탄 10 vol%에서의 장애율이 0.83 조건에서의 계산 메쉬 설정 및 시뮬레이션 결과를 [그림 35]~[그림 36]에 나타냈으며, 또한 동일한 방법으로 동일 메탄 농도와 장애율 0.52에서 메쉬 설정 및 계산 결과를 [그림 37]~[그림 38]에 제시하였다. [그림 26]~[그림 27]에 제시한 바와 같이 화염전파 속도가 장애율의 증가에 따라 증가하는 실험 결과와 유사하게 동일 가스농도 조

건에서 장애율이 감소하는 경우의 시뮬레이션에서도 같은 결과가 얻어졌다. 장애율이 감소할수록 개구부를 통과한 화염이 장애물 격벽 사이의 공간 내를 화염이 확대 전파한 후에 다음 장애물 개구부를 통과하는 것을 볼 수가 있다.



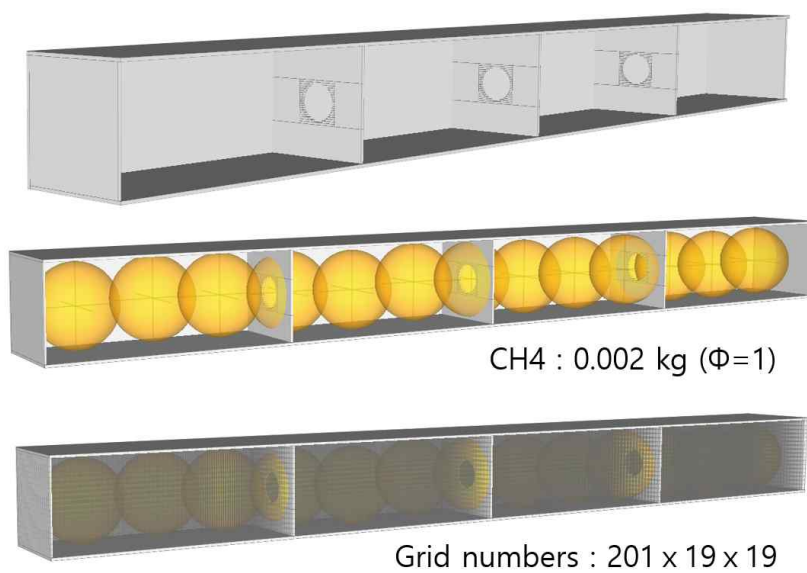
[그림 32] 메탄 10 vol% 및 장애율 0.98의 폭발계산 격자



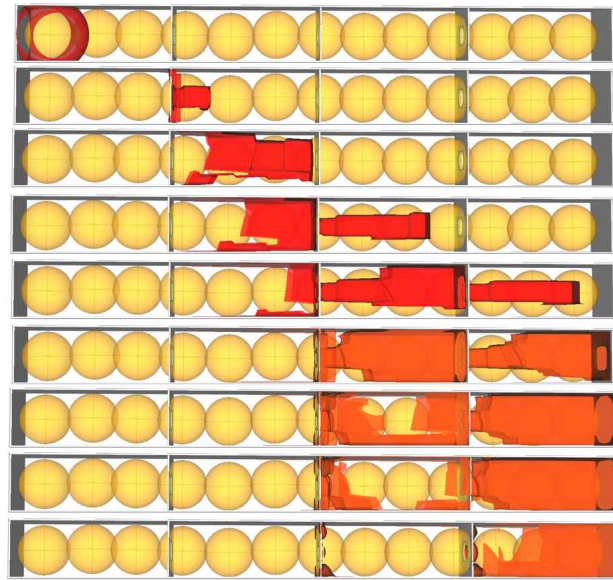
[그림 33] 메탄 10 vol% 및 장애율 0.98의 폭발계산 결과



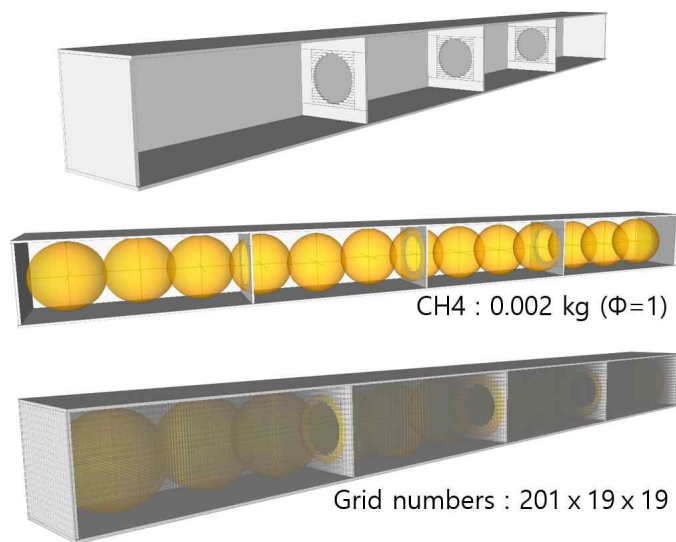
[그림 34] 메탄 10 vol%와 장애율 0.98의 실험 및 계산 결과 비교



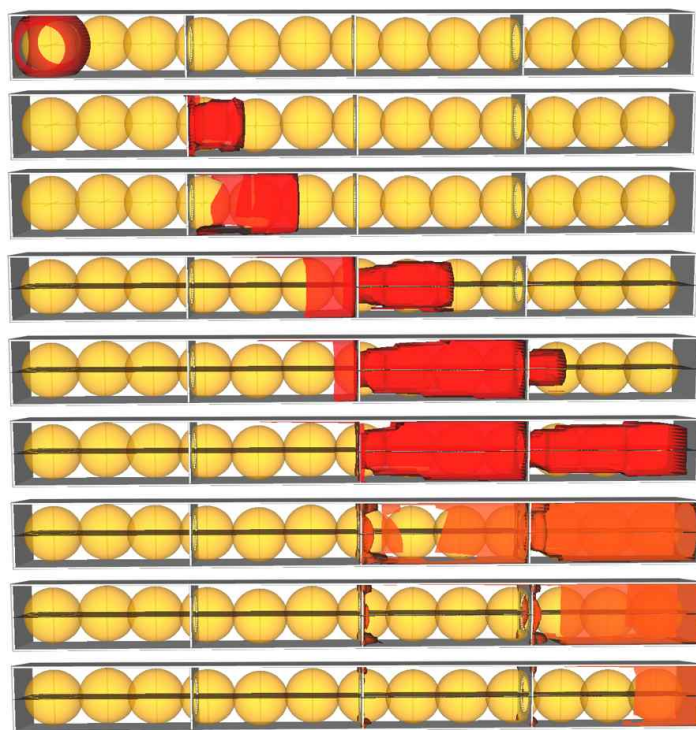
[그림 35] 메탄 10 vol%와 장애율 0.83의 폭발계산 격자



[그림 36] 메탄 10 vol%와 장애율 0.83의 폭발계산 결과



[그림 37] 메탄 10 vol%와 장애율 0.52의 폭발계산 격자



[그림 38] 메탄 10 vol%와 장애율 0.52의 폭발계산 결과

VI. 결 론

1. 조사 및 분석 결과

본 연구에서는 폭발사고조사 및 예방대책에 활용하기 위해서 폭발피해 평가모델을 조사, 분석하였으며 또한 폭발공간에 존재하는 장애물이 폭발특성에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하였다. 이러한 연구목적을 달성하기 위해서 국내외에서 제시되는 폭발계산 모델을 조사하여 실제 폭발사고의 피해결과를 이러한 모델계산에 의한 추정값과 비교하여 정확성과 활용성을 검토하였다. 또한 폭발공간에 존재하는 장애물이 폭발 피해평가에 영향을 주기 때문에 이를 규명하기 위해서 폭발 공간에 놓여진 장애물 조건이 폭발특성에 어떠한 영향을 주는가에 대하여 실험적으로 조사를 실시하였으며 이하의 결과를 얻었다.

- (1) 화재폭발 피해 평가를 위해 파열에너지 및 폭풍압에 대한 평가모델을 검토하였으며 실제 사고피해의 결과와 비교, 검토한 결과 Brode model을 적용한 폭발과압 환산거리가 가장 오차가 작았다.
- (2) 폭풍압 계산을 위한 파열에너지 계산모델로서 Kinney model은 실제 사고 결과보다 과대평가된 값을 나타내며 Baker model은 과소평가의 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다.
- (3) 밀폐용기에서 메탄-공기 불균일 혼합기의 농도 차이가 0.05 %가 되는 조건으로서 용기 길이가 2배가 되면 소요 시간은 약 4배가 늘어났다.

- (4) 11종의 연소가스를 고려한 화학반응식을 적용하여 메탄의 농도변화에 따른 폭발압력을 계산한 결과, 계산값은 모든 농도에 있어서 실험값보다 컸지만 농도에 따른 폭발압력의 증감 경향을 설명할 수 있었다.
- (5) 폭발공간에서 폭발압력 및 화염전파속도에 미치는 영향을 일반화하고자 장애물 파라메타를 도입하였으며, 실험 결과를 통하여 장애물의 개수에 관계 없이 장애율이 증가하면 폭발압력이 증가하였다.
- (6) 10 %의 메탄 농도에서 장애물이 없는 조건(장애율이 0)에서 화염전파속도는 3.46 m/s이지만 장애율 0.98에서 24.2 m/s 높아져 약 8배로 증가하였다.
- (7) 동일한 장애율 조건에서는 장애물의 개수가 많을수록 폭발압력 및 화염전파속도가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.
- (8) 밀폐공간에서의 장애율 효과에 대한 실험결과와 동일한 조건으로 시뮬레이션을 통해 검토한 결과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

2. 연구결과 활용방안

TNT등가 모델(TNT Equivalent method)은 계산조건이 단순하여 적용이 쉽기 때문에 국내외의 많은 규격에서 사용되고 있으므로 TNT 등가 모델을 사용하여 피해 영향도를 활용하는 것이 효율적이다. 용기의 파열을 통해 유출되는 가스의 폭발피해평가를 위해서는 본 연구 결과에서 확인한 바와 같이 폭풍압 계산을 위한 파열에너지 계산모델로서 Brode model을 활용하는 것이 효과적이다. 반면에 방출에너지의 계산 값에 있어서 Kinney model 및 Crowl model에 의한 예측값은 실제 사고결과보다 큰 평가결과를 나타내므로 적용상의 주의가 필요하다. 특히

AICHE의 가이드라인에서도 Kinney model은 과대평가 경향이 있다고 지적하고 있다. 또한 model식을 이용하여 방출 에너지와 TNT 당량을 계산하기 위해서는 저장탱크가 과열 할 때의 용기 내부압력을 추정할 필요가 있으므로 대규모 설비의 위험성평가에 적용하는 경우에 보다 정확한 계산을 위해서는 탱크 압력에 대한 정확한 정보가 필요하다는 점에 유의할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- AICHE : Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases (2000).
- Berg van den A.C., "The Multi-Energy Method. A Framework for Vapour Cloud Explosion Blast Prediction", J. Hazard. Mater. 12:1-10, (1985).
- Clancey, V. J., Diagnostic Features of Explosion Damage, 6th International Meeting on Forensic Sciences, Edinburgh, Scotland (1972).
- CCPS AICHE : Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards Second Edition, 253-257 (2010).
- CCPS AICHE : Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis(2000).
- Cleaver, R.P., Robinson, C.G. , An analysis of the mechanisms of over-pressure generation in vapour cloud explosions, J. Hazard. Mater. 45: 27 - 44 (1996).
- Eggen, J.B.M.M., Development of Guidance for the Application of the Multi-energy Method, TNO Prins Maurits Laboratory, Rijswijk, 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).
- 三井化學岩國大竹工場, レゾルシン製造施設爆発・火災にかかわる報告書 (2012).

Abstract

Study on analysis model and effect factors in fire and explosion accidents

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 : We investigated the explosion models to estimate the effect of explosion pressure caused by leaked gas due to damage of storage tanks and piping. Also, experimental study was conducted to examine the influence of explosion pressure and propagation velocity due to the obstacles placed in the explosion space.

Methods : The damage results of actual gas explosions with the empirical explosion model were investigated in order to identify the accuracy and usability of existing models. And we compared the behaviors of flame propagation of methane-air mixtures using with the 3D explosion simulation code (VEXDAM).

Results : We have conducted the explosion damage evaluation using the models of explosion pressure and rupture energy in actual gas explosion accident. As the result, it was found that Brode model was most accurate for the calculation of overpressure conversion distance. We used the parameter named barrier ratio in order to generalize the effect of explosion pressure and

flame propagation velocity in the closed explosion space with obstacles. From experimental observations, the explosion pressure regardless of the number of obstacles increased with barrier ratio. In the same concentration of 10% methane, the flame propagation velocity without obstacle (barrier ratio = 0) was 3.46 m/s but 24.2 m/s (increase about 8 times) with barrier ratio of 0.98. In the same barrier ratio, explosion pressure and flame propagation velocity increased sharply with increasing of the number of obstacles. We have conducted the 3D explosion simulation (VEXDAM) using the same experimental condition and obtained the similar results for the effect of barrier ratio.

Key Words : Methane, Gas explosion, Explosion pressure, Flame propagation velocity, Explosion simulation

<<연 구 진>>

연 구 기 관 : 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

연구책임자 : 한우섭 (부 장, 화학물질독성연구실)

연 구 원 : 이정석 (연 구 원, 화학물질독성연구실)

박상용 (연 구 원, 화학물질독성연구실)

최이락 (연 구 원, 화학물질독성연구실)

<<연 구 기 간>>

2016. 1. 1 ~ 2016. 11. 30

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

산업안전보건연구원장

화재폭발 영향도 및 사고 해석모델 연구(I)

(2016-연구원-1254)

발 행 일 : 2016년 11월

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 김장호

연구책임자 : 화학물질독성연구실 부장 한우섭

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소 : (44429) 울산광역시 중구 중가로 400

전 화 : (042) 869-0331

F A X : (042) 863-9002

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