

부분 개방 공간에서의 가스 폭발에 대한 실험적 연구

이영순 · 김용수 · 오신규* · 이재학* · 박달재** · 박상현 · 박남영

서울산업대학교 생산정보공학부 안전공학과 · *한국 가스 공사 연구개발원

**UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES

1. 서론

가스 폭발 사고의 경우 그 피해가 다른 재해에 비해 10~15배 이상의 피해가 발생된다. 또한 피해 영향은 발생 설비, 공정에만 국한되지 않고 인근지역의 설비나 인명에까지 영향을 미칠 수 있다. 그렇기 때문에 평소에 각별한 주의 및 안전관리가 필요하다. 오늘 날 가스의 사용은 증가하는 추세에 있어 그에 따른 사회적 위험부담도 커지고 있는 실정이다.

가스 폭발 사고로 발전 할 수 있는 위험을 사전에 찾아내고, 피해를 최소화시키기 위해 현재 여러 안전 기법 및 조치들이 이용되고 있다. 이를 바탕으로 실내에 가연성 가스 누출로 인한 폭발의 위험성이 있는 경우에 폭발압력 방출구를 두거나, 폭발 압력 방출벽을 설치하는 등의 조치를 취하고 있다. 이는 가스 폭발 압력 성장을 일정 수준으로 낮추어 공정의 피해를 최소화 시키는 조치들이다. 하지만 폭발 방출구를 설치한 경우에도 폭발 방출구를 통한 폭발압의 방출로 인해 인근에 피해가 우려된다.

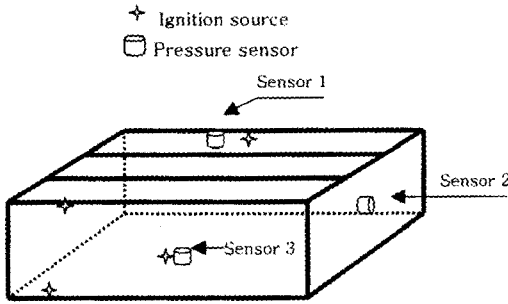
가스 폭발 연구는 크게 가연성 가스 농도에 대한 연구와 특정 장애물에서의 화염 및 폭발 압력 거동에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러나 아직까지 실제적인 모델에 대한 연구는 이루어지고 있지 못한 실정이며, 사고 조사를 통한 연구 및 이상적인 모델에서의 실험적 연구, 시뮬레이션을 통한 연구가 주를 이루고 있다.

본 논문에서는 실제적인 모델을 실험 모델로 상정하고, 이를 축소된 실험 모델에서 가스 폭발 실험을 통하여 가스 폭발 특성을 연구하였다. 특히 부분 개방 공간에서 가스 폭발 시 개구부의 형상에 따른 폭발 압력 방출 특성과 실내 점화원 위치에 따른 가스 폭발 압력 거동을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

부분개방 공간에서의 가스 폭발 특성을 연구하기 위해 아크릴를 이용해 실험 모델(가로, 세로, 높이 100cm×95cm×23.5cm)을 제작하였다. 실험 모델은 실제 가스 설비를 취급하는 건축물을 참조하였으며, 상부에는 폭발 압력 방출구(100cm×32cm)를 설치하였다.

점화원은 출력전압이 15.5kV인 점화 플러그를 사용하였으며, 실험 모델 내에 가연성 혼합 가스는 약 1.9mJ의 에너지에 의하여 점화된다. 점화원은 천장, 바닥 중앙·바닥 구석, 측면에 각 1개씩, 총 4개소에 설치하였다.



<그림 1> 압력센서, 점화원 위치

폭발 압력을 측정하기 위하여 키슬러사의 701A Type의 센서 3개를 사용하였다. 센서는 0~250 bar 까지 측정 가능한 차압센서이다. 압력센서는 <그림 1>과 같이 실험 모델의 천장, 측면, 바닥에 3개 설치하였다.

Data Acquisition System은 16bit로 구성하였으며, 압력 센서를 통해 4초간 약 8000건의 데이터를 수집하였다.

폭발 시 화염 거동을 관측하기 위하여 고속 카메라(SR-ULTRA-C)를 사용하였으며, 1초간 1000프레임을 촬영하였다.

가연성 가스는 99.95% 순도에 메탄가스를 공기와 혼합하여 사용하였다.

실험 모델 내에 가연성 가스를 일정량 주입하여 실험 농도를 맞추었다. 이 때 가연성 가스를 실험 모델 내에 구속하기 위하여 랩을 이용해 밀폐시켰다. 가연성 혼합 가스의 농도는 적외선 가스 분석기를 이용하여 측정하였다. 점화는 실험 모델 내에 가연성 혼합 가스가 안정화 되었을 때 점화하였다. 점화와 동시에 압력센서에서 압력 변화를 측정하였으며, 고속카메라를 통하여 화염거동을 관측하였다.

가연성 가스 혼합 농도 실험에서는 가연성 가스의 혼합 농도를 8%, 9.5%, 10%로 설정하여 실험하였다. 이 때 폭발 압력 방출구(100cm×32cm, 형태: 직사각형)는 34%의 개방율을 가지며, 점화는 바닥 중앙에서 이루어 졌다. 또한 모델 내에는 장애물 51%를 가지는 판형 장애물을 설치하였다.

점화원의 위치 변화에 따른 가스 폭발 실험에서는 실험 모델 내에 <그림 1>과 같이 4곳을 선정하여 실험 하였다. 이 때 가연성 가스의 혼합 농도는 10%로 하였으며, 폭발 압력 방출구는 34%의 개방율을 가진다.

폭발 압력 방출구의 형태에 따른 폭발 거동 관측 실험에서는 방출구의 형태를 원형과 직사각형으로 구분하여 각각 34%, 51% 개방율을 가지도록 제작하여 사용하였다. 각 실험에서 가연성 혼합농도는 10%로 실험하였다. 점화는 바닥 중앙에서 점화하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

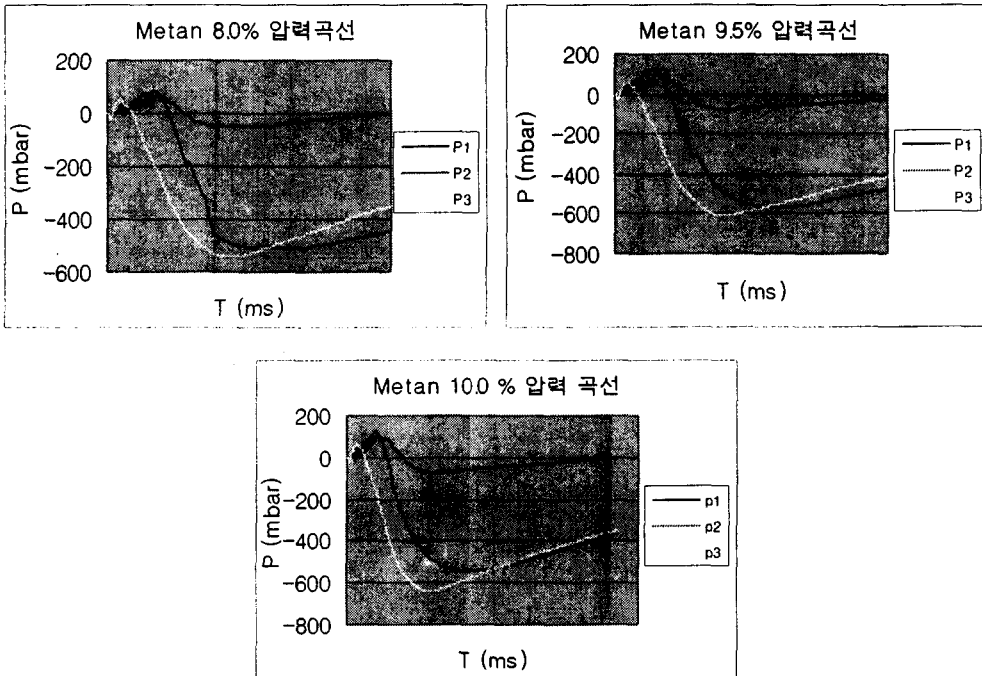
<표 1>은 가연성 가스 혼합 농도에 따른 가스 폭발 실험 시 측정된 피크압과 점화 후 피크압 측정시간을 표로 나타낸 것이다. 각 실험별로 5회 실험을 진행하여 평균값으로 나타내었다. <표 1>을 보면 측정 된 피크압이 클수록 측정 된 시간이 짧아지는 것을 볼 수가 있었다.

<그림 2>의 가연성 가스 혼합 농도에 따른 압력 변화 그래프에서도 메탄-공기의 혼합 농도가 8%, 9.5%, 10% 순으로 피크압까지 폭선의 기울기가 큼을 볼 수가 있었다.

고속 카메라로 촬영한 사진을 분석한 결과, 8.0% 메탄-공기 혼합농도 실험에서는 점화 후 120ms에서는 장애물에 의한 난류가 형성되어 2차 화염을 발생하고, 9.5%의 메탄-공기 혼합농도 실험에서는 점화 후 80ms에서 2차 난류화염이 시작되는 것이 관측되었다.

<표 1> 가연성 가스 농도에 따른 최대 폭발 평균 압력과 측정 평균 시간

메탄 농도	P1(mbar)	T(ms)	P2(mbar)	T(ms)	P3(mbar)	T(ms)
8%	87.63	393.8	85.59	366	52.86	109.6
9.5%	92.84	341.2	123.02	281.2	62.70	107.2
10%	105.38	311	122.38	290.7	65.41	105.2



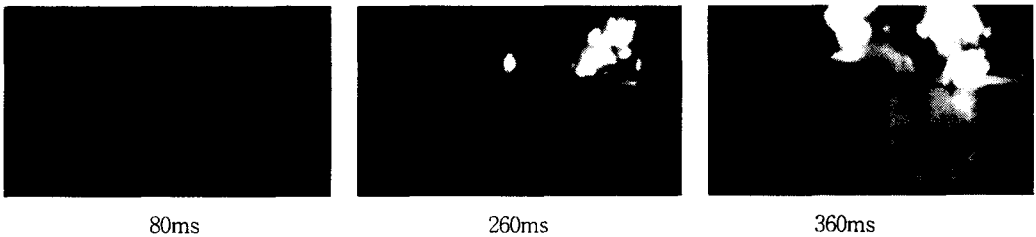
<그림 2> 가연성 가스 혼합 농도에 따른 압력 변화 그래프

가스 폭발 압력 방출구 측과 바닥에 설치된 센서에서는 메탄-공기의 양론농도 9.47% 보다 농도가 진한 10%일 때 피크압이 더 크게 측정되었다. 측면에 설치된 P2센서에서는 비슷한 수준의 피크압이 측정되었다. 이를 볼 때 양론 농도에서 보다 더 진한 농도일 경우 최대 폭발 압력이 더 크게 발생함을 알 수 있었다. 기존 실험 결과에 따르면 양론 혼합농도보다 조금 더 진할 때 더 큰 피크압과 더 빠른 화염전파를 나타낸다고 보고되었으며, 본 실험 결과와 일치하였다.

<표 2> 점화원 위치에 따른 평균 피크압과 평균 측정 시간

점화 위치	P1(mbar)	T(ms)	P2(mbar)	T(ms)	P3(mbar)	T(ms)
천정	93.61	215.50	118.68	477.60	28.40	207.70
바닥 구석	90.02	253.30	117.49	527.90	19.31	193.10
바닥 중앙	131.18	315.80	164.92	336.40	30.26	95.60
측면 중앙	47.13	303.90	45.37	420.50	40.83	231.10

<표 2>는 점화위치에 따른 가스폭발 실험으로 각 점화원 위치별로 5회씩 실험하여 측정된 피크압과 측정 시간의 평균이다. <표 2>를 보면 P1센서(천정)에서는 바닥 중앙에서 점화 시에 평균적으로 높은 피크압이 기록된 반면에 측면에서 점화 시에 낮은 피크압을 기록하였다. 측면에 부착된 P2센서에서는 바닥 중앙에서 점화 시에 높은 피크압이 관측되었고, 측면 점화 시에는 낮은 피크압이 측정되었다. P3센서(바닥 중앙)에서는 측면 점화 시에 높은 피크압이 검출된 반면에 바닥 구석 점화 시에는 낮은 피크압이 검출되었다. 전체적으로 P2센서에서 피크압이 크고, 피크압까지 도달 시간이 긴 것을 볼 수 있었다. 이는 대기의 압축-단열-폭발의 일련에 과정이 측면 부근에서 용이하기 때문인 것으로 판단된다.

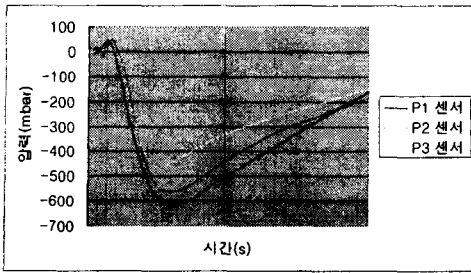


<그림 3> 측면 중앙에서 점화 시에 시간에 따른 화염 거동 사진

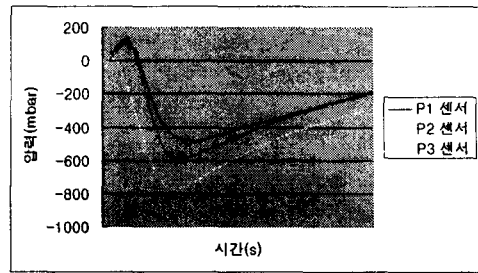
<그림 3>은 측면 중앙에서 점화 시 시간에 따른 화염 거동을 촬영한 사진이다. 각 실험별 화염 거동을 살펴보면 점화 후 개구부 부근에서 2차 화염이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 1차 폭발 후 실험 모델 내 대기에서 난류의 발생과 가속화 현상이 발생하여 2차 폭발 시에 보다 큰 폭발 압력을 발생시킨 것으로 추정된다.

<그림 4>, <그림 5>, <그림 6>, <그림 7>은 점화원의 위치에 따른 가스 폭발 시에 폭발 압력의 변화를 측정된 그래프이다. 그림들을 살펴보면 특징적으로 점화원의 위치와 관계없이 음압의 크기가 양압보다 더 크게 측정되었다.

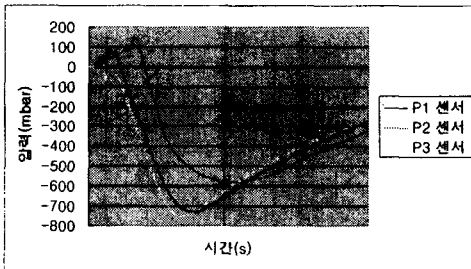
<표 3>은 폭발 압력 방출구의 크기 및 형상을 변화시켜 가스 폭발 시 피크압과 점화 후 피크압 측정 시간을 개구부 부근에 설치된 P1센서에서 측정한 것이다. 이를 볼 때 폭발 압력 방출구의 개방율이 작을수록 폭발 압력은 커지며, 형태가 원형일 경우에 폭발 압력은 작아지는 것을 볼 수 있었다.



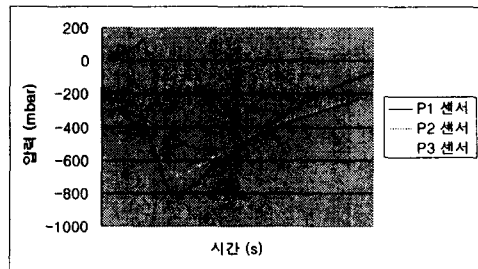
<그림 4> 측면 중앙 점화 시 압력 변화



<그림 5> 바닥 중앙 점화 시 압력 변화



<그림 6> 바닥 구석 점화 시 압력 변화



<그림 7> 천정 점화 시 압력 변화

<표 3> 개구부 형상에 따른 가스 폭발 피크압과 측정 시간

	34% 사각형 개방구		34% 원형 개방구		51% 사각형 개방구		51% 원형 개방구	
	압력 (mbar)	시간 (ms)	압력 (mbar)	시간 (ms)	압력 (mbar)	시간 (ms)	압력 (mbar)	시간 (ms)
1회 실험	115.1	337.5	101.1	426.5	105.99	367	20.77	143
2회 실험	133.9	310.5	112.3	411.5	98.16	354.5	21.64	156.5
3회 실험	139.	301	105	460	106.7	392	28.47	150
4회 실험	133.1	314	92.37	388.5	102.4	338.5	52.7	427
5회 실험	134.8	316	84.8	365.0	106.2	344.5	31.03	356
평균	잘못된 계산식	잘못된 계산식	잘못된 계산식	잘못된 계산식	잘못된 계산식	잘못된 계산식	잘못된 계산식	잘못된 계산식

같은 개방율을 가지는 폭발 압력 방출구의 경우, 피크압은 30mbar~70mbar의 차이를 보였다. 51%의 개방율을 가지는 원형의 폭발 압력 방출구 실험에서는 피크압의 측정 시간이 짧게 측정되었다. 34% 개방율을 가지는 폭발 압력 방출구 실험에서 원형 개구부가 사각형 형태의 개구부에 비해 피크압 측정시간이 길게 측정된 것과는 상반된 결과이다. 이는 51%의 원형 개구부에서는 2차 폭발의 영향이 1차 폭발의 영향에 비하여 적기 때문에 1차 폭발 시에 최대압력이 측정된 것으로 사료된다. 실제 51%의 개방율을 가지는 원형 개구부 실험에서는 4회와 5회의 피크압 측정 시간이 1~3회 피크압 측정 시간과 비교할 경우 2배 이상 늦게 측정되었음을 볼 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 부분 개방 공간에서의 가스 폭발 실험을 통하여 가스 폭발에 영향을 미치는 요소인 가연성 혼합 가스 농도와, 점화원의 위치, 폭발 압력 방출구에 따른 가스 폭발 특성을 연구하였다. 본 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 가연성 가스의 혼합농도는 이론적인 양론농도보다 더 진한 농도에서 최대 폭발 압력이 발생하며, 메탄의 경우 양론 농도인 9.47%보다 진한 10%에서 최대 폭발 압력이 더 크게 발생한다.
2. 부분 개방 공간에서의 바닥 중앙 점화 시에 가장 큰 폭발 압력이 발생하며, 점화원 위치와는 관계없이 측면에서 폭발 압력을 가장 크게 받는다.
3. 폭발 압력 방출구의 경우에는 개방율이 높을수록 최대 폭발 압력은 작아지며, 개구부의 모형이 사각형인 경우보다 원형인 경우에 더 작은 최대 폭발 압력이 발생한다.
4. 부분 개방 공간에서의 가스 폭발 시에는 양압보다 큰 음압이 발생한다.

가스 설비를 취급하는 설비의 경우 폭발 압력 방출구의 개방율의 크기를 크게 하고, 원형으로 설치하는 경우에 가스 폭발에 의한 피해를 최소화 할 수 있을 것으로 사료된다. 건축물의 경우 측면이 폭발 압력을 더 크게 받고, 음압이 양압보다 더 크게 발생하므로 이러한 현상을 고려한 설계 및 시공이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Crowl 외(저), 이영순 외(역) : "화학공정안전", 대영사
2. Dag Bjerketvedt, Jan Roar Bakke, Kees van Wingerden : "Gas Explosion Handbook", Journal of Hazardous Materials, 1997
3. B. H. HJERTAGER, K. FUHRE, M. BJQRKHAUG : "Concentration Effects on Flame Acceleration by Obstacles in Large-Scale Methane-Air and Propane-Air Vented Explosions", Combust. Sci. and Tech. vol. 62 1988
4. A.R. Masri, S.S Ibrahim : "The effects of obstructions on overpressure resulting from premixed flame deflagration", Journal of Loss Prevention ind. 14, 2001
5. R.Philip Cleaver, Clive G. Robinson : "An analysis of the mechanisms of overpressure generation in vapour cloud explosions", Journal of Hazardous Materials 45, 1996
6. A. Alexiou, G. E. Andrews and H. Phylaktou : "Side-vented gas explosions in a long vessel: the effect of vent position", Journal of Loss Prevention ind. vol.9. NO 5, 1996
7. 김영대, 정용준 : "가스폭발예방기술", 세화출판사, 1985
8. A.R. Masri, S.S Ibrahim, N. Nehzat, A.R. Green : "Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions", Experimental Thermal and Fluid Science 21, 2000
9. H.PHYLAKTOU, G.E.ANDREWS : "Gas Explosions in Long Closed Vessels", Combust, Sci. and Tech. vol. 77. 1991