

# 부분 개방 공간에서의 가스 폭발의 외부압력 특성

안성준\*\* · 채수현\* · 이영순 · 이태성

서울산업대학교 안전공학과 · \*대한산업안전협회 · \*\*서울산업대학교 에너지환경대학원

## 1. 서 론

밀폐 공간 및 개방 공간에서의 화재 및 폭발에 대한 연구는 컴퓨터의 발달에 힘입어 가상 시나리오에 따른 시뮬레이션이 가능한 단계까지 와 있으며 실제로 외국의 경우 화재 및 폭발 사고를 방지하고 피해를 최소한으로 하기 위해 피해예측 평가 모델과 프로그램이 개발되어 활용되어지고 있다. 하지만 가상의 시나리오를 가지고 시뮬레이션을 하게 될 때 프로그램에 따라 상이한 결과를 도출하는 등 현실에서의 응용에는 아직 이른 감이 없지 않다. 또한 많은 연구가 용기의 지름에 비하여 용기의 높이가 큰 용기에 대한 실험연구가 주종을 이루었고, 용기의 지름에 대한 높이의 비가 적은 실제적인 용기에 대한 연구는 많지 않다. 따라서 본 논문에서는 실제로 사용되고 있는 가스관리소를 실험 모델로 상정하고, 이를 축소한 실험 모델에서 가스 폭발 실험을 통하여 그 특성을 연구하고자 하였다. 특히 개구부로부터의 거리와 위치, 개구부의 형태와 크기에 따른 가스 폭발 압력의 등압선을 연구하였다.

## 2. 연구방법

부분개방 공간에서의 가스 폭발의 개구부 외부압력 측정 실험을 하기 위해서 가스 공급 관리소의 정압실을 1: 30으로 축소하여 실험 모델을 제작하였다.

실험 모델은 높이 200mm, 면적 700 × 700 mm<sup>2</sup>, 부피 98L의 정사각형의 아크릴 용기로 만들었다. 아크릴의 두께는 20mm이고, 상부에는 사각벤트(150\*150mm, 250\*250mm)와 원형 벤트(지름이 각각 169mm, 283mm)의 개구부를 만들었으며, 각각의 상응하는 벤트의 면적은 동일하게 제작했다. 또한, 개구부 외부로부터 거리, 위치에 따른 압력을 측정하기 위해 센서 설치대를 제작하였다. 이 때 폭발압력에 의한 센서의 미세한 흔들림을 방지하기 위해 앵글과 건설용 비계를 사용하여 제작하였다. 그리고 센서 고정대는 거리, 위치에 따른 영향을 측정하기 위해 상하좌우로 움직여 각도에 변화를 줄 수 있도록 설치하였다.

가연성 혼합물은 99.95%의 메탄을 축소모델에 일정시간 주입하여 메탄의 농도를 10%로 맞추어 폭발연료로 사용하였다. 용기내의 정확한 농도(vol %)를 측정하기 위하여 메탄용 가스 분석기(LMSxi, 독일)를 사용하였다. 그리고 용기 내에서의 메탄과 공기의 고른 분포를 위하여 순환펌프로 일정 시간 순환하여 균일한 농도를 유지하도록

하였다.

또한, 개구부 외부에 미치는 폭발 압력을 측정하기 위하여 0-2.5 bar의 측정 범위를 갖는 압력센서(KISTLER 701A)를 사용하였다. 이 센서로 0.5ms 간격으로 4초 동안 8000개의 폭발 압력 수치를 측정하였다.

그리고 개구부 외부로부터 수평·수직으로 각각 11cm, 20cm씩 센서를 이동시켜 개구부면으로부터 높이 160cm까지의 거리와 수평거리에 따른 폭발압력의 변화를 비교 분석하였다. 개구부로부터의 거리에 따라 각각 5~8회 반복실험을 하였고, 그 중 신뢰성이 있는 4개의 값을 취하여 분석하였다.

### 3. 실험결과

실험 초기에 폭발의 중심에서 높이에 따라 측정을 실시했으나 화염의 높은 온도가 센서에 영향을 미쳐 정확한 측정이 불가능했다. 그러나 폭발지점으로부터 위로 치솟는 화염은 현실적으로 사고가 발생했을 때, 주위 시설에 영향을 미친다고 보기 힘들므로 이 실험에서는 폭발중심으로부터 33cm 떨어진 거리(P1지점)부터 측정하였다.

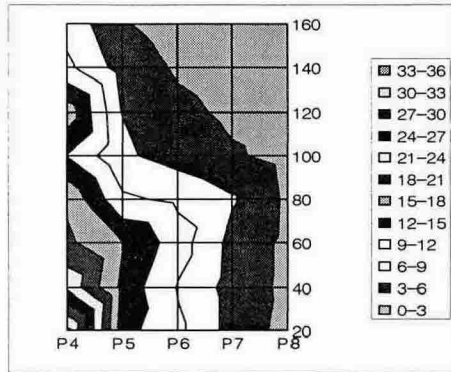
#### 3.1. 높이가 200mm인 용기에서 폭발압력 측정

- 1) 지름 283mm인 원형 벤트

<표 3-1 >283mm 원형벤트 압력값 (200mm 높이용기)

(단위: mbar)

	P4	P5	P6	P7	P8
20cm	33.662	13.213	9.65	4.88	2.032
40cm	23.224	14.161	8.771	4.758	2.324
60cm	18.500	15.163	10.415	5.006	2.300
80cm	17.593	9.552	8.394	6.358	2.441
100cm	11.840	6.490	4.856	3.384	2.045
120cm	16.723	5.932	3.723	2.398	1.775
140cm	9.615	4.707	2.645	1.721	1.097
160cm	8.066	3.280	1.684	1.586	1.020



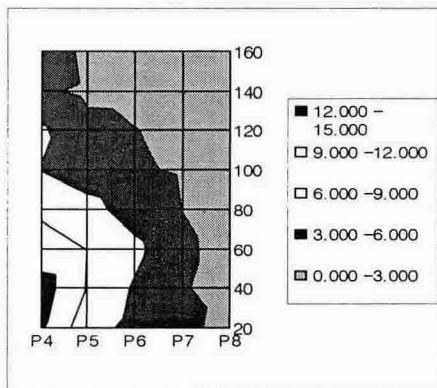
<그림 3-1> 283mm 원형벤트의 폭발압력 등압선 (200mm 높이 용기)

2) 지름 169mm인 원형 벤트

<표 3-2 > 169mm 원형벤트 압력값 (200mm 높이용기)

(단위: mbar)

	P4	P5	P6	P7	P8
20cm	12.500	7.283	5.190	3.960	1.882
40cm	13.523	8.799	5.709	3.206	2.076
60cm	9.733	8.963	6.775	3.514	1.989
80cm	8.691	7.151	4.559	2.942	1.851
100cm	5.919	4.374	3.269	2.752	1.556
120cm	6.422	3.892	3.054	2.451	1.152
140cm	3.530	2.401	2.236	2.080	0.792
160cm	5.605	2.048	1.528	1.310	0.800

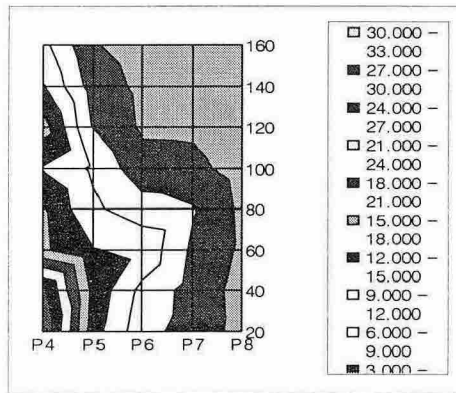


<그림 3-2> 169mm 원형벤트의 폭발압력 등압선 (200mm 높이 용기)

3) 폭 250mm인 사각형 벤트

<표 3-3 >250mm 사각형 벤트 압력값 (200mm 높이용기)  
(단위: mbar)

	P4	P5	P6	P7	P8
20cm	30.340	13.350	7.200	4.608	2.149
40cm	27.861	14.161	8.207	4.878	2.010
60cm	15.542	12.163	11.383	5.544	2.550
80cm	15.294	9.552	7.391	6.290	2.422
100cm	11.732	8.490	4.086	3.852	1.748
120cm	16.295	5.932	2.548	2.451	0.885
140cm	12.150	4.707	2.299	2.080	0.912
160cm	9.884	3.280	1.526	1.310	0.840

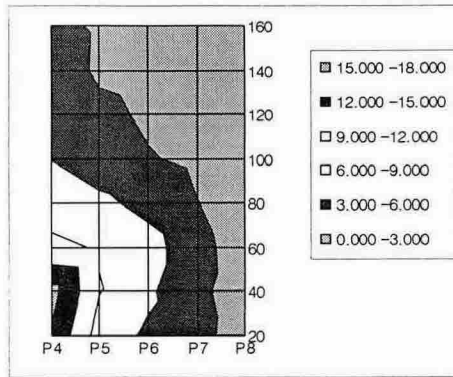


<그림 3-3> 250mm 사각형 벤트의 폭발압력 등압선 (200mm 높이 용기)

4) 폭 150mm인 사각형 벤트

<표 3-3 >250mm 사각형 벤트 압력값 (200mm 높이용기)  
(단위: mbar)

	P4	P5	P6	P7	P8
20cm	14.600	7.791	5.500	3.960	1.404
40cm	16.080	9.107	6.553	3.597	1.647
60cm	9.417	8.873	7.420	3.517	2.210
80cm	8.201	6.775	4.941	3.041	1.908
100cm	5.918	4.093	3.206	2.448	1.543
120cm	4.911	3.718	2.556	1.704	1.219
140cm	4.665	2.562	2.067	1.452	1.175
160cm	3.727	2.648	1.990	1.087	0.867



<그림 3-4> 150mm 사각형 벤트의 폭발압력 등압선 (200mm 높이 용기)

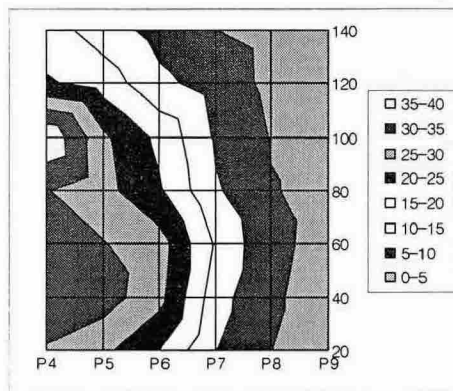
### 3.2. 높이가 400mm인 용기에서 폭발압력 측정

#### 1) 지름 283mm인 원형 벤트

<표 3-5> 283mm 원형 벤트 압력값 (400mm 높이용기)

(단위: mbar)

	P4	P5	P6	P7	P8	P9
20cm	29.346	26.38	20.010	10.140	5.029	2.887
40cm	34.988	32.295	26.641	12.057	5.609	3.084
60cm	32.740	30.274	27.222	14.282	6.107	3.460
80cm	30.279	26.724	20.675	10.574	5.284	3.487
100cm	39.424	26.027	18.678	9.322	4.712	3.625
120cm	20.646	17.772	11.233	7.676	3.783	3.415
140cm	17.288	12.642	8.195	5.031	3.583	2.630



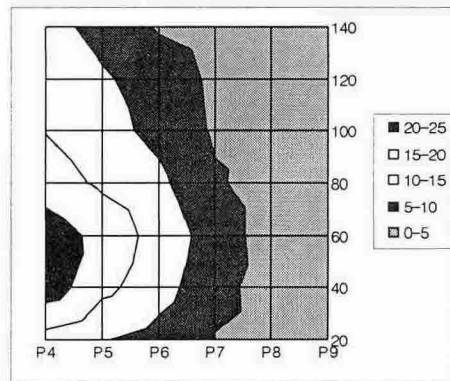
<그림 3-5> 283mm 원형 벤트의 폭발압력 등압선 (400mm 높이 용기)

2) 지름 169mm인 원형 벤트

<표 3-6 > 169mm 원형 벤트 압력값 (400mm 높이용기)

(단위: mbar)

	P4	P5	P6	P7	P8	P9
20cm	13.154	10.317	8.190	4.700	3.001	1.890
40cm	22.836	16.339	12.110	6.656	2.876	2.123
60cm	22.660	18.512	12.941	7.903	2.498	2.368
80cm	17.657	14.072	11.101	5.647	2.554	2.909
100cm	14.848	11.492	8.800	4.326	2.965	2.710
120cm	12.774	10.485	8.239	3.934	2.767	2.442
140cm	11.474	8.572	4.415	2.496	2.357	1.980



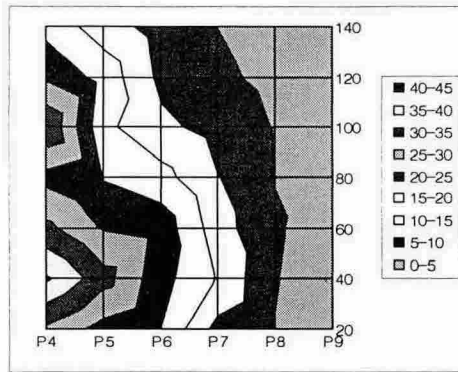
<그림 3-6> 169mm 원형 벤트의 폭발압력 등압선 (400mm 높이 용기)

3) 폭 250mm인 사각형 벤트

<표 3-7 > 250mm 사각형 벤트 압력값 (400mm 높이용기)

(단위: mbar)

	P4	P5	P6	P7	P8	P9
20cm	29.062	22.999	19.910	8.330	4.882	2.225
40cm	40.730	31.966	21.960	14.501	5.236	2.481
60cm	31.274	24.511	23.148	12.246	5.499	2.523
80cm	23.368	19.581	16.773	10.188	4.860	3.123
100cm	34.734	16.316	11.124	8.278	4.757	3.021
120cm	24.206	18.150	8.922	6.081	3.609	2.642
140cm	18.313	12.495	7.833	4.940	2.635	2.130



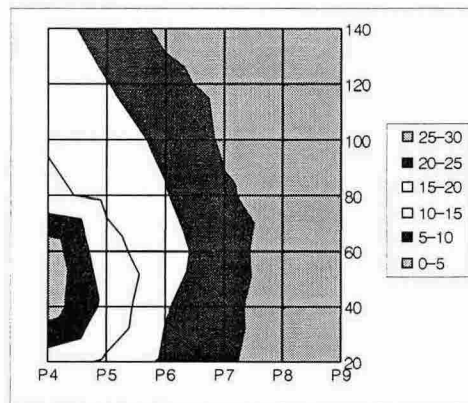
<그림 3-7> 250mm 사각형 벤트의 폭발압력 등압선 (400mm 높이 용기)

4) 폭 150mm인 사각형 벤트

<표 3-8 > 150mm 사각형 벤트 압력값 (400mm 높이용기)

(단위: mbar)

	P4	P5	P6	P7	P8	P9
20cm	17.342	14.342	9.210	5.750	2.884	1.876
40cm	27.778	18.873	10.414	6.301	2.639	2.195
60cm	28.323	16.716	12.175	7.082	2.500	2.600
80cm	15.925	13.922	10.429	5.571	3.050	2.625
100cm	14.622	12.508	8.876	4.331	2.775	2.400
120cm	13.008	10.216	6.179	3.717	2.714	2.223
140cm	12.364	7.647	4.094	2.589	2.022	1.800



<그림 3-8> 150mm 사각형 벤트의 폭발압력 등압선 (400mm 높이 용기)

## 4. 결 론

실험 결과(그림3-1~8)를 통해 알 수 있듯이, 화염의 압력은 거리와 높이에 따라 화염에 가까울수록 높고 멀어질수록 낮아지는 것으로 나타났으며 화염의 형태는 초기 폭발시 화염의 순간적인 방출로 인해 밑 부분이 더 볼록하며 위로 갈수록 화염의 폭이 좁아지는 형태로 대체적으로 포물선의 형상임을 알수 있었다. 특히 높이가 다른 두 용기를 비교하면, 개구부로부터 폭발화염이 방출될 때, 사각형 개구부의 초기 폭발압력이 더 높게 나타났으나, 원형 개구부의 폭발영향 범위가 더 넓어 위험할 것으로 예상된다. 또한, 영향범위가 가장 넓게 퍼지는 선을 연결하여 각도를 계산했을 때 20용기 그래프로부터 개구부가 큰 것과 작은 것이 각각, 원형 52.5° / 46°, 사각형 40.5° / 44° 이었으며, 40용기에서는 원형 44° / 40.5°, 사각형 42° / 38.5°로 나타났다. 이 때 어떤 물체가 보통 45도의 각도의 포물선에서 가장 멀리 날아감 같이, 작은 개구부를 설치했다고 가정했을 때, 원형의 폭발영향범위가 그만큼 더 넓다고 볼 수 있다. 따라서 가스 정압실의 건물높이가 낮을수록 즉, 건물 체적 대비 개구부의 비율이 클수록 사고가 발생했을 때 폭발화염이 주위 시설에 더 많은 피해를 줄 것으로 보인다.

또한, 개구부의 크기가 작을수록 폭발화염이 외부에 미치는 영향범위가 확연히 줄어 든다는 것을 알 수 있고, 모델의 높이가 200mm일 때와 400mm일 때 모두 원형 개구부가 조금 더 위험한 것으로 나타났다.

결론적으로 가스 정압실은 지붕을 적절히 높게 하여 폭발 사고 시 화염전파를 최대한 줄이고 개구부의 형태는 사각형이면서 폭발화염이 적정시간 내에 빠져 나갈 수 있는 한계 내에서, 가능한 작은 면적이 되도록 설계해야 하겠다.

## 참고문헌

- [1] Crowl 외(저), 이영순 외(역) : “화학공정안전”, 대영사
- [2] Bjerketvedt, D., Bakke, J.R. & Van wingerden, K., “Gas Explosion Handbook”, J. Hazardous Materials, Vol. 52, pp. 1-150 (1997).
- [3] CCPS, “Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapour Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs”, Centre for Chemical Process Safety, AIChE, New York, USA (1994).
- [4] Wiekema, B.J., “Vapour cloud explosion model”, J. of Hazardous Materials, Vol. 3, pp. 221-232 (1980).
- [5] Van den Berg, A.C., “The Multi-Energy Method: a framework for vapour cloud explosion blast prediction”, J. of Hazardous Materials, Vol. 12, pp. 1-10 (1985).
- [6] Baker, Q.A., Tang, M.J., Scheier, E.A., and Silva, G.J., “Vapour Cloud Explosion Analysis”, 28th Loss Prev. Symp., AIChE, April, 1994.
- [7] Cates, A. and Samuels, B., “A simple assessment methodology for vented explosions”, J. of Loss Prev. in the Process Ind., Vol. 4, pp. 287-296 (1991).