

벤트 형상 및 크기에 따른 가스폭발 특성에 관한 실증적 연구

채수현 · 정수일 · 이영순^{*†}

인하대학교 산업공학과 · 서울산업대학교 안전공학과
(2006. 3. 16. 접수 / 2006. 6. 14. 채택)

A Experimental Study on the Characteristics of Gas Explosion due to Vent Shape and Size

Soo-Hyun Chae · Soo-Il Jung · Young-Soon Lee^{**}

Department of Industrial Engineering, In-ha University

^{*}Department of Safety Engineering, Seoul National University of Technology

(Received March 16, 2006 / Accepted June 14, 2006)

Abstract : The majority of both small and large-scale experiments on gas explosion have been carried out in the explosion instruments with cylindrical tubes of a high length/diameter ratio and vessels of a high height/length ratio, focusing on investigating the interaction between propagating flame and obstacles inside the tubes or vessels. The results revealed that there is a strong interaction between the propagating flame and turbulence formed after the flame passes the obstacle. However this paper focuses on analyzing the pressure impact or profile outside the vent in vented gas explosion in a partially confined chamber by performing gas explosion experiments in a reduced-scale experimental assembly properly constructed. This study has considered eight different cases in gas explosion based on variation of three kinds of parameters such as height of vessel, shape of the vent and vent size, and reveals that the large vessel with big size circle vent is more danger to the target than others because the overpressure is spread out faraway horizontally and vertically.

Key Words : gas explosion, the ratio of open area, explosion pressures, explosion behaviors

1. 서 론

급속한 경제발전과 산업 기술발달은 국내의 고압 가스 관련 산업을 비약적으로 발전시켰고, 이로써 가스 연료가 본격적으로 사용되었다.

가스의 사용은 편리하고 효율성, 경제성 등이 뛰어나기 뿐만 아니라 청정 연료라는 점에서 많이 선호되고 있고, 다양한 산업 분야에서 그 사용량이 증가되고 있다.

현재 가장 많이 사용하고 있는 석유의 경우 가체 연수가 40여년으로 추정되며, 각종 오염물질 배출로 환경과피의 원인제공 및 불안정한 공급가격으로 우리나라 경제에 큰 영향을 미치고 있는 실정이다.

이제 가스는 국민생활과 산업 활동에 없어서는 안

될 가장 중요한 요소로 작용하고 있다. 이러한 가스 연료의 사용증가는 가스누출 및 폭발사고의 증가를 야기하고 있다.

가스는 사용이 편리하고 공해가 없는 청정연료라는 장점으로 인하여 LPG의 경우 30년, 도시가스는 15년이라는 짧은 사용기간에도 불구하고 전 국민에게 급속도로 보급되었다. 그러나 가연성과 폭발성이라는 위험특성에 대처할 가스 안전기술 및 안전기기의 발전은 가스 보급 속도에 미치지 못하였다. 이에 따라 매년 크고 작은 가스사고가 발생하여 수많은 인명과 재산피해가 발생하고 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 벤트가 있는 공간에서 가스가 폭발할 때, 폭발에 따른 피해를 최소로 줄이기 위해, 가스가 들어 있는 용기의 체적에 따른 벤트의 형상 및 개방율을 정량적으로 도출하고, 이에 따른 폭발 과압이 외부에 어떠한 영향을 미치는가를 실험적으

[†] To whom correspondence should be addressed.
lysoon@snut.ac.kr

로 평가하는데 있다. 실험은 가스 사용시설을 축소하여 만든 공간 모델을 제작하여 실시하였으며 이의 신뢰성을 높이기 위하여 실험값을 통계적으로 검증하였다. 이렇게 하여 얻은 자료는 부분공간에서 가스가 폭발할 때 있을 수 있는 피해예측 실시방안과 피해 예방에 활용할 수 있는 가스시설안전자료로 제시하였다.

2. 폭발 실험

2.1. 실험 장치

Fig. 1은 본 실험에 이용한 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 실험 장치는 크게 실험 용기와 관측기기 및 부속기기로 구성된다. 실험 용기는 축소 모형(폭발 반응실)과 점화 기기이며, 관측 기기는 압력 센서와 AMP, A/D Board, 고속카메라이다. 부속기기로는 Gas Analyser와 Gas Mixing System으로 구성된다.

실험 용기는 체적크기1(높이 20cm, 면적 70cm×70cm, 부피 98L, 현재 실제로 사용하고 있는 가스 정압실의 축소 모델), 체적크기2(높이 40cm, 면적 70cm×70cm, 부피 196L, 체적크기 1과 동일 조건에서 높이만 2배로 크게 한 모델)의 사각 아크릴(제품명 : 케미그라스)용기로 제작하였다.

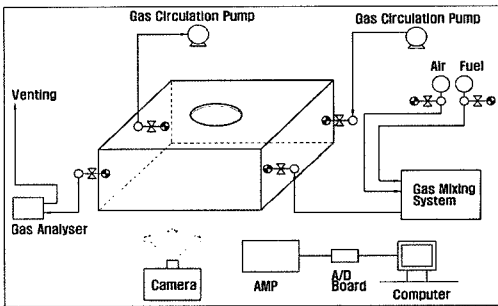


Fig. 1. Schematic diagram of experiment assembly.

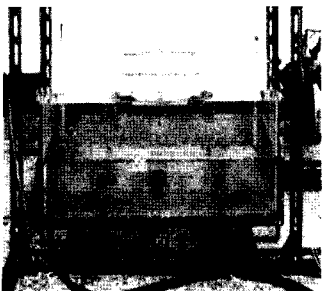


Fig. 2. Experiment vessel #1 with 20cm height.

센서는 벤트로부터 수평으로 33cm(P1), 44cm(P2), 55cm(P3), 66cm(P4), 77cm(P5)간격으로 설치하였으며, 벤트로부터의 압력을 수직으로 감지하도록 각도기를 이용하여 각도를 조정하였다. 수직거리는 벤트로부터 20cm, 40cm, 60cm, 80cm, 100cm, 120cm, 140cm 간격으로 이동시켜 값을 측정하였다.

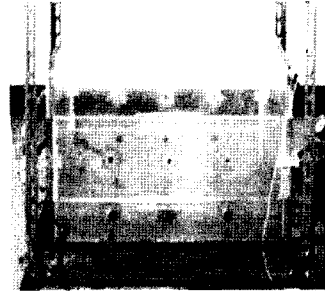


Fig. 3. Experiment vessel #2 with 40cm height.

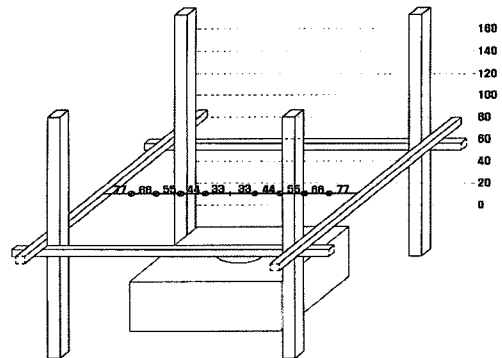


Fig. 4. Drawing of pressure sensor position.

2.2. 실험방법

실험은 다음과 같은 방법으로 수행되었다.

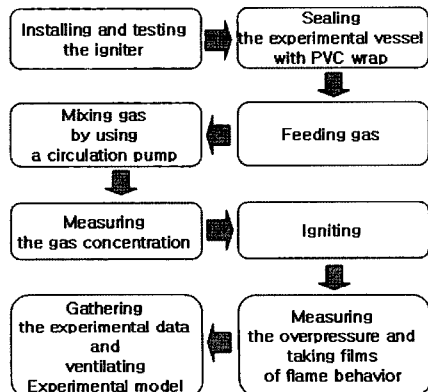


Fig. 5. Experiment procedure.

실험 방법은 Fig. 5와 같이 먼저 점화기(출력전압 15.5kV)를 실험조건에 맞추어 적합한 위치에 설치하고 정상작동여부를 확인한 후, 가연성 혼합가스가 실험모델에서 이탈하는 것을 방지하기 위해 개구부는 램(삼영선램, 염화비닐수지)으로 밀폐하였다. 가스는 축소 모델의 밸브를 통해 주입하고 공기-메탄 가스의 농도를 균일하게 하기 위해 순환펌프(GAST Pressure/ vacuum Pump)를 이용하여 혼합한 후 가스 농도(LMSx Gas Analyser)를 측정하였다. 압력측정 시스템(KISTLER Type 5019 (3ch) 16 bit A/D board (DT521)을 구동시킨 후 점화하여 압력측정시스템으로부터 각 압력센서(KISTLER Type 701A)의 압력 변동 data를 수집하고, 고속 카메라(SR-ULTRA-C KODAK Motion Corder Analyzer)로 가스 폭발 장면을 촬영하였다. 압력측정시스템에 수집된 자료와 고속 카메라에 촬영된 data를 저장하고, 실험실을 개방하여 실험 장치 및 실험실 내부를 환기 시켰다¹⁾.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 삼원배치분산분석(체적, 벤트 형상, 개방율)

본 연구에서는 반복이 있는 삼원배치의 실험[2가지 체적(196L, 98L), 2가지 형상의 벤트(원형, 정사각형), 2가지의 개방율(12.76%, 4.60%), 4회 반복 실험]을 실시하였다. 이를 다음과 같이 기호화하였다.

- ▶ 체적의 크기(L) : $A_1 = 196, A_2 = 98$
- ▶ 벤트의 형상 : $B_1 = \text{원형}, B_2 = \text{정사각형}$
- ▶ 개방율(%) : $C_1 = 12.76, C_2 = 4.60$
- ▶ 반복 : 4회

3.1.1. 분산분석

Table 1은 효과의 유무를 검정하기 위한 “F검정” 결과를 나타낸 것이다. 체적, 벤트 형상, 개방율의 요인인 A, B, C는 유의확률(가설 검정에서 기각 여부를 결정하는 기준이 되는 통계량의 값을 확률로 표현한 값)값이 각각 0.043, 0.016, 0.041로 유의수준 0.05보다 작아 매우 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 각 요인별 교호작용(두 요인의 상호 시너지 또는 간섭 작용)의 경우 각각 A×B, A×C, B×C, A×B×C의 유의확률 값이 0.915, 0.642, 0.115, 0.166으로 나타나 유의하지 않은 것으로 나타났다. 즉 상호 교호작용은 없는 것을 알 수 있다.

Table 2는 유의하지 않은 A×B, A×C, B×C, A×B×C 요인을 오차항에 풀링시켜 작성된 분산 분석표이다.

Table 1. ANOVA table

요 인	S^*	ϕ^*	V^*	F_0^*	P^*
A	24.700	1	24.700	4.556**	0.043
B	36.129	1	36.129	6.664**	0.016
C	25.404	1	25.404	4.686**	0.041
A×B	0.062	1	0.062	0.012	0.915
A×C	1.201	1	1.201	0.222	0.642
B×C	14.562	1	14.562	2.679	0.115
A×B×C	11.050	1	11.050	2.038	0.166
E	130.118	24	5.422		
T	247.032	31			

S^* : Sum of Square, ϕ^* : Degree of Freedom, V^* : Sum of Square of Average, F_0^* : Distribution Value, P^* : Significant Probability

Table 2. Pooling of ANOVA table

요 인	S	ϕ	V	F_0	P
A	24.700	1	24.700	4.406**	0.045
B	36.129	1	36.129	6.445**	0.017
C	25.404	1	25.404	4.532**	0.042
E	156.957	28	5.606		
T	247.032	31			

풀링된 값의 의한 분산분석에서도 A, B, C 요인의 유의확률 값이 0.045, 0.017, 0.042로 나타나 매우 유의한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

3.2. 8가지 모델의 가스폭발에 따른 외부영향 비교 분석

3.2.1. 8가지 모델의 정의

용기의 체적, 벤트 형상, 개방율의 3개의 모수인자와 각각 2개의 수준수를 정하여 Table 3과 같이 총 8가지 모델을 설정하였다. 이는 실존 가스 정압실을 축소하여 만든 실험 모델을 이용하여 모델의 크기, 벤트의 형상, 벤트의 크기 등이 폭발의 거동에 미치는 영향을 파악하고 이들 인자의 교호작용을 알아보기 위하여 용기 높이는 20cm와 40cm로, 벤트의 형상은 사각형과 원형, 크고 작은 두 모델의 범접인 개방률이 되도록 벤트의 크기를 만들어 이들을 조합한 것이다.

모델명은 체적의 크기(196L: Large, 98L: Small)와 벤트의 형상(원형: Circle, 정사각형: Square), 개방율(12.76%: Wide, 4.60%: Narrow)의 각 앞 글자를 조합하여 약자로 표기하였다. 실험용기 체적이 크고 벤트가 큰 크기의 원형일 경우, 모델명은 LCW가 되며, Table 3에서 #1 모델에 해당한다.

Table 3. 8 Models by volumes & vent shape & vent ratio

model NO	volume(L)	vent shape	vent ratio(%)	Models
1	196	circle vent	12.76	LCW
2	196	circle vent	4.60	LCN
3	196	square vent	12.76	LRW
4	196	square vent	4.60	LRN
5	98	circle vent	12.76	SCW
6	98	circle vent	4.60	SCN
7	98	square vent	12.76	SRW
8	98	square vent	4.60	SRN

3.3.2. 8가지 모델에 대한 수직·수평거리별 가스폭발압력 비교 분석

수직거리와 수평거리에 따라 영역을 쉽게 구분하기 위하여 8가지 모델별 압력의 크기에 따라 다음과 같이 5가지 영역으로 구분하였다.

I영역 : 0~3mbar	II영역 : 3~9mbar
III영역 : 9~12mbar	IV영역 : 12~15mbar
V영역 : 15~35mbar	

제 I 영역이 가장 낮은 압력 값을 갖는 영역이며, 제 II 영역, 제 III, IV, V영역 순으로 압력 값이 높아지고 위험한 영역이 된다.

폭발압력영향세기각도는 폭발압력이 외부에 영향을 줄 수 있는 높이의 척도로 폭발 후, 압력으로 만들어진 등압선 타원형의 단축반경과 벤트수평면과의 각도의 탄젠트 값을 이용하여 구하였다.

- 1) LCW모델(체적: 196L, 벤트 형상: 원형, 개방율: 12.76%)

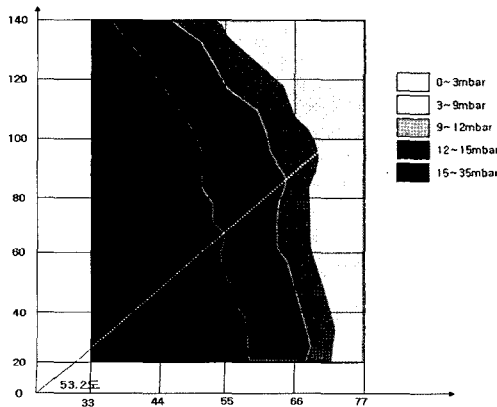


Fig. 6. Contour of overpressure: 283mm circle vent in 200mm height vessel.

큰 체적과 원형 벤트, 큰 개방율을 가진 LCW모델에서의 수평거리와 수직거리에 따른 폭발압력 분석 결과 체적의 차이만 있는 SCW의 폭발압력에 비해 매우 높은 압력이 횡(橫)부와 상(上)부로 확산되는 것을 볼 수 있다.

LCW모델은 8가지 모델 중 가장 넓은 지역으로 높은 폭발압력이 발생되는 것으로 나타났다.

탄젠트 값을 이용한 폭발압력영향세기각도는 Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 53.2°로 추산되었다.

- 2) LCN모델(체적: 196L, 벤트 형상: 원형, 개방율: 4.60%)

큰 체적과 원형 벤트, 작은 개방율을 가진 LCN모델에서의 수평거리와 수직거리에 따른 폭발압력 분석에 의하면 개방율의 차이만 있는 LCW모델의 폭발압력에 비해 제 II 영역의 넓이가 훨씬 넓게 나타났다. 개방율이 낮은 벤트의 특성은 압력이 수직으로 발산하고 있음을 알 수 있다.

탄젠트 값을 이용한 폭발압력영향세기각도는 Fig. 7에서 알 수 있는바와 같이 61.5°로 추산되었다.

- 3) LRW모델(체적: 196L, 벤트 형상: 정사각형, 개방율: 12.76%)

큰 체적과 정사각형벤트, 큰 개방율을 가진 LRW모델에서의 수평거리와 수직거리에 따른 폭발압력 분석에서 벤트의 형상만 차이가 있는 LCW와 비교해 보면 수직거리가 낮은 곳에서 높은 압력이 넓게 분포하였고, 수직거리가 높으면 폭발압력이 떨어지는 것을 알 수 있었다(Fig. 8).

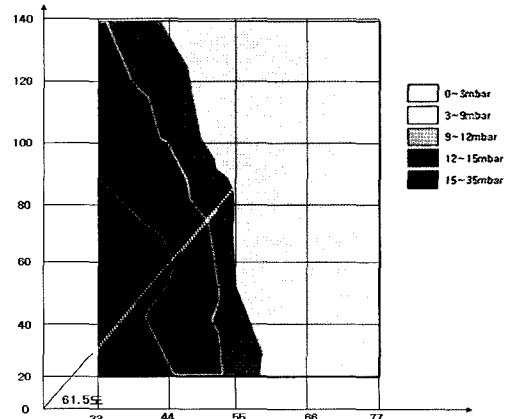


Fig. 7. Contour of overpressure: 169mm circle vent in 200mm height vessel.

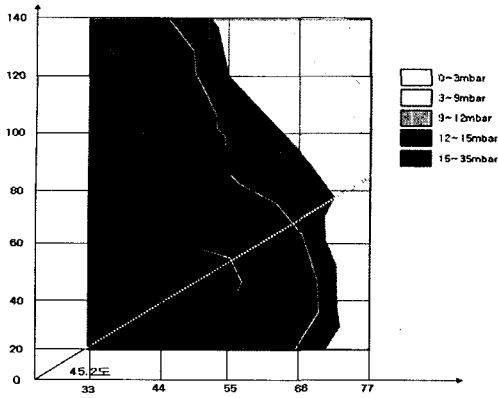


Fig. 8. Contour of overpressure: 250mm square vent in 200 mm height vessel.

탄젠트 값을 이용한 폭발압력영향세기각도는 45.2°로 추산되었다.

4) LRN모델(체적: 196L, 벤트 형상: 정사각형, 개방율: 4.60%)

큰 체적과 정사각형벤트, 작은 개방율을 가진 LRN 모델에서의 수평거리와 수직거리에 따른 폭발압력 분석에서 개방율만 차이가 있는 LRW모델에 비해 폭발압력이 낮았고, 벤트 형상의 차이만 있는 LCN과는 비슷하게 나타났다(Fig. 9).

탄젠트 값을 이용한 폭발압력영향세기각도는 64.5°로 추산되었다.

5) SCW모델(체적: 98L, 벤트 형상: 원형, 개방율: 12.76%)

작은 체적과 원형 벤트, 개방율이 큰 SCW모델에서 수평거리와 수직거리에 따른 폭발압력을 분석

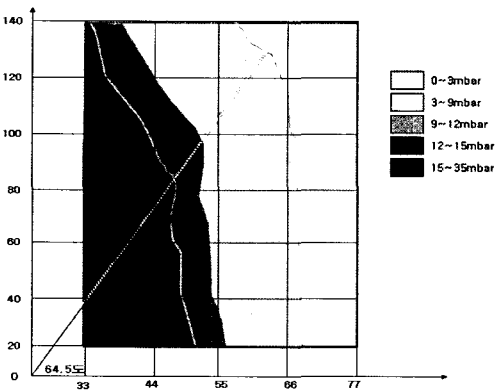


Fig. 9. Contour of overpressure: 150mm square vent in 200 mm height vessel.

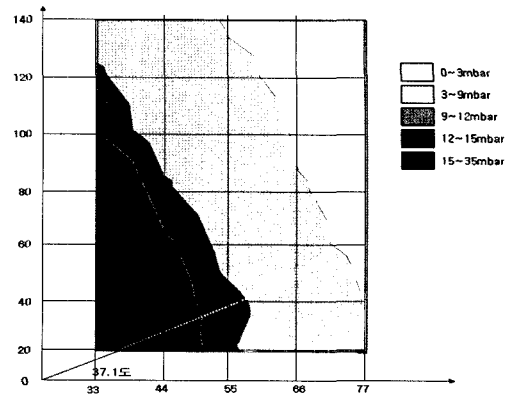


Fig. 10. Contour of overpressure: 283mm circle vent in 400 mm height vessel.

해보면, 벤트 형상이 원형이며 개방율이 크기 때문에 외부로 압력이 많이 확산되는 것을 알 수 있다(Fig. 10).

탄젠트 값을 이용한 폭발압력영향세기각도는 37.1°로 추산되었다.

6) SCN모델(체적: 98L, 벤트 형상: 원형, 개방율: 4.60%)

작은 체적과 원형 벤트, 작은 개방율을 가진 SCN 모델에서의 수평거리와 수직거리에 따른 폭발압력 분석에서 체적과 벤트의 형상은 SCW와 같지만 개방율이 작아 좌·우로 압력이 발산되는 정도가 매우 낮은 것으로 나타났다.

이는 개방율이 작은 벤트에서 가스폭발 시 폭발압력이 빠른 시간에 수직으로 상부를 통해 분출되기 때문에 횡(橫)으로 확산되는 압력이 개방율이 큰 벤트에 비해 낮은 것으로 판단된다(Fig. 11).

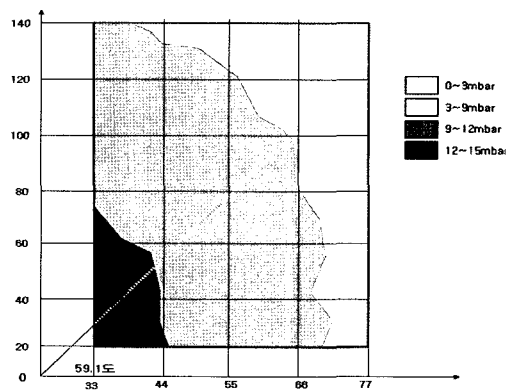


Fig. 11. Contour of overpressure: 169mm circle vent in 400 mm height vessel.

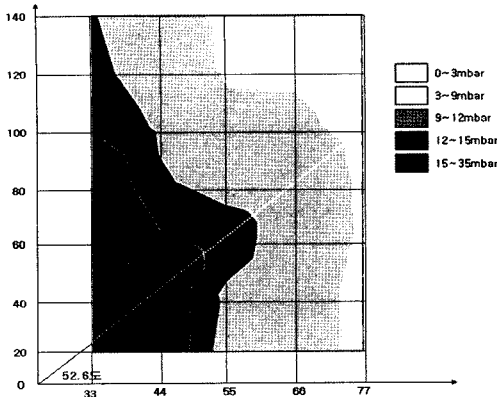


Fig. 12. Contour of overpressure: 250mm square vent in 400 mm height vessel.

탄젠트 값을 이용한 폭발압력영향세기각도는 59.1°로 추산되었다.

7) SRW모델(체적: 98L, 벤트 형상: 정사각형, 개방율: 12.76%)

작은 체적과 정사각형벤트, 큰 개방율을 가진 SRW 모델에서의 수평거리와 수직거리에 따른 폭발압력 분석에서 벤트 형상만 다른 SCW와 비슷한 폭발압력 영역을 나타내고 있으나 SCW가 외부에 미치는 압력분포가 일정한 반면 정사각형 벤트로 인해 특정각(약 52.6°)에서의 폭발압력이 넓게 확산되는 것을 알 수 있었다(Fig. 12).

8) SRN모델(체적: 98L, 벤트 형상: 정사각형, 개방율: 4.60%)

작은 체적과 정사각형벤트, 작은 개방율을 가진 SRN 모델에서의 수평거리와 수직거리에 따른 폭발압력

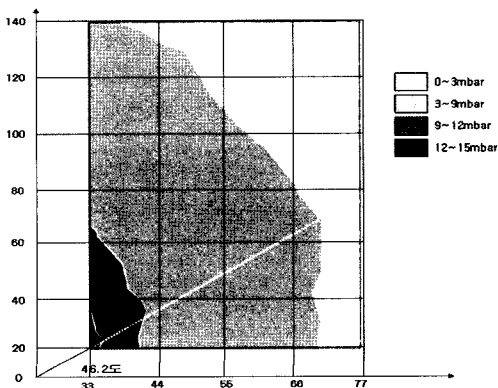


Fig. 13. Contour of overpressure: 150mm square vent in 400 mm height vessel.

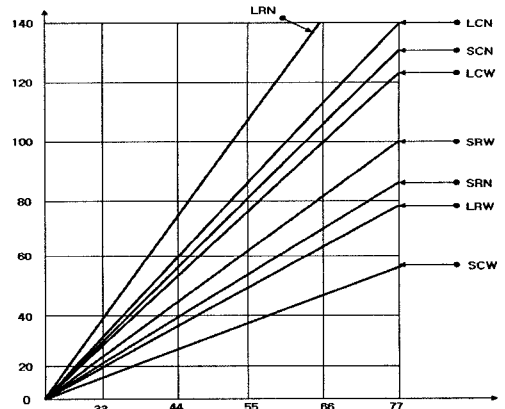


Fig. 14. Comparison with the effect-spread angel of 8 models.

분석에서 개방율의 차이만 있는 SRW와 폭발압력을 비교해 보면, 폭발압력이 좁게 퍼지는 것을 볼 수 있다.

이는 개방율이 작은 벤트에서 폭발은 SCN에서의 설명과 같다. 벤트 형상만 다른 SCN모델과의 비교에서도 벤트 형상의 차이로 제 I 영역은 비슷하나 수평거리가 작은 33cm에서의 III, IV영역이 더 좁게 나타났다. 탄젠트 값을 이용한 폭발압력영향세기각도는 46.2°로 추산되었다(Fig.13).

4. 8가지 모델의 폭발압력영향세기각도에 대한 분석

Table 3에 나타난 바와 같이 용기의 크기, 벤트의 형태, 개방율을 조합하여 만들어진 8가지 모델에 대한 폭발압력영향세기각도를 비교해 보면, SCW와 SCN의 경우 개방율이 큰 SCW가 더 낮은 각도로 압력이 전파되는 것으로 나타났다. 이는 벤트의 형상이 원형이며, 개방율이 크기 때문에 폭발 시 주변으로 압력이 넓게 확산됨을 보여주는 것이다. LCN이나 SCN 등은 벤트의 형상이 원형임에도 불구하고 폭발 시 각도가 높아 주변으로 폭발압력이 비교적 적게 확산되는 것을 알 수 있다.

이로써 벤트의 형상보다는 개방율의 크기가 폭발 시 폭발압력 확산방향을 결정하는데 더 중요한 요인임을 알 수 있다.

5. 결론

천연가스 정압실과 같은 부분개방공간에서 가스 가 폭발할 때 체적크기, 벤트의 형상 및 개방율의

변화에 따른 폭발압력이 외부에 어떠한 영향을 미치는가를 실제 가스 정압실을 일정 비율로 축소하여 제작된 실험모델로 실험하였다.

실험에서 얻어진 결과를 이용하여 체적의 크기, 벤트의 형상, 개방율에 따라 외부로 발산하는 폭발압력의 영향을 정량적으로 분석하기 위해 반복이 있는 삼원배치분산분석을 실시하였고 영역을 5가지로 나누어 각 모델의 영역에 따른 안전성을 도출해 내었으며, 이러한 분석결과를 이용하여 가스폭발 사고 시 안전한 수평거리의 계산 및 구조물의 피해를 최소화하기 위한 방화벽 설치 등 재해를 예방하기 위한 기초 자료를 제시하였다.

반복이 있는 삼원배치분산분석결과 체적과 벤트 형상과의 교호작용, 체적과 개방율과의 교호작용, 벤트 형상과 개방율과의 교호작용, 체적, 벤트 형상 및 개방율의 교호작용이 모두 없는 것으로 나타났다.

8가지 모델에 대한 수직·수평거리별 가스폭발압력 비교 분석에서는 영역도표에서 알 수 있듯이 체적이 큰 벤트에서의 폭발압력이 체적이 작은 벤트

에서의 폭발압력보다 높았으며 원형 벤트와 개방율이 클수록 폭발압력이 주변으로 분산되어 인근에 미치는 영향은 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1) 朴相鉉, “부분밀폐공간에서의 천연가스폭발에 대한 실험적 연구”, 서울산업대학교 산업대학원 석사학위 논문, 2003.
- 2) 申昌燮, “防暴工學”, 도서출판 동화기술, 1992.
- 3) 정국삼, “안전공학개론”, 동화기술, 2002.
- 4) Crowl 등 저, 이영순 등 역, “화학공정안전”, 대영사, 2000.
- 5) 田口 昇, “箱形進じん機に對する応用について”, 労働省産業安全研究所, 2000.
- 6) Bakke, Jan Roar & Bjorn H. Hjertager, “The effect of explosion venting in empty vessels, Int. J. for Numerical Methods in Engineering”, Vol. 18, No. 1, 1979.