

부분 밀폐 공간에서의 L/D비 변화에 따른 가스 폭발의 실험적 연구

이영순[†] · 박달재^{*} · 안정진^{**} · 안성준^{**} · 오신규^{***}

서울산업대학교 안전공학과 · ^{*}호주 New South Wales 대학교 대학원

^{**}서울산업대학교 산업대학원 · ^{***}한국가스공사 연구개발원

(2005. 10. 17. 접수 / 2006. 3. 20. 채택)

A Experimental Study on Gas Explosions by Variations L/D ratio in a Partially Confined Geometry

Young Soon Lee[†] · Dal Jae Park^{*} · Jeong Jin Ahan^{**} · Sung Joon Ahan^{**} · Shin Kyu Oh^{***}

Department of Safety Engineering Seoul National University of Technology

^{*}Graduate School The University of New South Wales, Australia

^{**}Graduate School Seoul National University of Technology

^{***}R&D Division Korea Gas Corporation

(Received October 17, 2005 / Accepted March 20, 2006)

Abstract : It is revealed that these are correlated with the height of chamber deciding the turbulence extent. In the first experiment, It was examined about the effects of different multiple obstacles such as circular, triangular and square things with the rig that the dimension of original experimental rig was $700 \times 700 \times 200 \text{ mm}^3$. Then the heights of chamber were increased from 200 to 1000mm. The dimensions of each obstacle were $70 \times 70 \text{ mm}^2$ and rectangular vent area were $210 \times 700 \text{ mm}^2$. In the second one, we performed to see the effects of locations of different multiple obstacles in 200, 500 and 800mm height from the bottom.

The results are : The multiple triangular obstacles caused the highest overpressure while the lowest one was the multiple circle bars. Then, the triangular bars caused the highest flame acceleration while the circular obstacles was lowest too. The results showed that the critical height was 800mm due to the formation of turbulence. And the lesser $A_v / V^{2/3}$ were small, the more pressure and pressure acceleration rate were increased.

Key Words : explosion pressure, flame acceleration, obstacles, L/D ratio

1. 서 론

가스 정압실의 구조를 축소(1:30)하여 폭발장치를 만든 후, 폭발용기의 높이(Length)와 장애물 형상을 변화시키며 용기 내에서 가스가 폭발할 때 개구부 주위에 발생하는 폭발압력 특성을 측정하였다. 또 일정한 크기의 용기에서 장애물의 위치에 따른 폭발압력의 영향을 측정하여 가스시설의 안전한 설계 및 정확한 피해예측도구를 개발하는데 도움을 줄 수 있는 자료를 제시하고자 하였다.

L(Length)/D(Diameter)비가 큰 용기 내에서의 가스

폭발 관련 선행 연구 결과에 의하면 장애물의 형태에 따른 폭발압력의 크기는 사각형>삼각형>원형의 순으로 나타났으나 L/D비가 작은 용기에서 실시된 폭발실험에서는 다른 양상을 보였다^{2,3)}. 따라서 폭발장치의 구조에 따른, 즉 밀면의 길이(Diameter)는 일정하게 고정 시키고 용기의 높이를 증가시키어 (L/D비의 크기를 증가시킴) 이로 인한 특성 차이 및 그 원인을 규명하고자 하였다.

2. 이론적 배경

Fig. 1은 관내에서 장애물에 의해서 어떻게 난류가 형성되는 지를 보여준다. 화염이 미연소 가스를

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

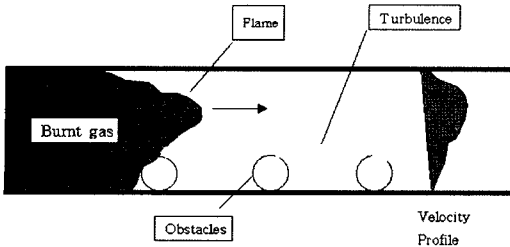


Fig. 1. Turbulence generation in a channel due to repeated obstacles in an explosion.

연소시킬 때, 증기는 확산된다. 이러한 확산이 일어나면 부피는 처음보다 7-8배까지 증가될 수 있다. 미연소 가스는 발생한 화염과 난류 흐름에 의해서 앞으로 밀리게 된다. 난류흐름 영역에서는 연소속도가 가속화된다. 이러한 연소속도의 증가는 계속해서 화염 이후의 난류흐름과 화염속도를 증가시키며 증가된 화염속도는 폭발 압력을 상승시킨다. 되풀이되는 장애물들에 의한 화염 가속 메커니즘은 강한 양성적 피드백 루프를 구성한다^{1,3,4}.

이 메커니즘은 Fig. 2와 같다. 폭연은 장애물이 있는 부분에서 가속 되고, 장애물이 없는 부분에서는 일반적으로 화염속도가 줄어든다⁵⁻⁸.

폭연은 밀폐된 공간에서 부분적으로 생성된 증기운의 연소에 의해서 발생한 압력에 의해서 다음의 2가지 메커니즘으로 설명될 수 있다.

- ① 화염 가속화 메커니즘: 장애물을 통과할 때 생성된 난류에 의한 폭발증가
- ② 압력 방출 혹은 Feedback 메커니즘의 압력 완화 효과

난류에 의한 화염가속화는 누출 압력이 줄어드는 동안에도 폭발 압력에 영향을 준다. 압력을 증가시키는 2가지 요소는 누출압력과 폭발 압력으로 이들의 밸런스에 의해 조절이 이루어진다.

폭발압력을 측정하는 대부분의 간단한 모델은 위와 같이 설명한 메커니즘을 사용하지 않는다. 그래

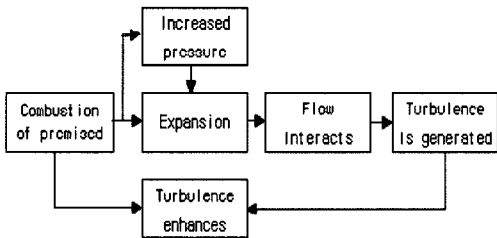


Fig. 2. Positive feedback loop causing flame acceleration due to turbulence.

서 이러한 타입의 간단한 모델은 장애물들이 존재하는 환경 하에서 과압을 측정하는 것이 적절하지 않으며, 단계별로 잘못 측정된 과압 측정치가 산정되어 질 수 있다.

Venting과 설비 지역의 폭발 과압 인자의 측정 결과는 fluid dynamic 계산식에 의한 CFD모델을 통해서도 설명될 수 있다. 개구가 존재하는 공간에서의 압력변화는 외부로 기체가 유출되는 것을 고려하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다⁹.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{r_u P \left[\int_{A_f} S(\rho_u/\rho_b) dA - \int_{A_f} S dA \right] - r_u U_e A_e P(\rho_e/\rho_u)}{V[1 + (V_b/V)(r_u/r_b - 1)]}$$

p : 압력, ρ_u : 미연소혼합기의 밀도, ρ_b : 연소가스의 밀도, A : 면적, t : 시간, U_e : 개구부에서의 흐름속도, A_e : 개구부 면적, V : 공간부피, S : 연소속도, r_b : 연소가스의 평균 비열비, ρ_e : 개구부에서의 밀도, R : 기체상수 A_f : 화염넓이, r_u : 미연소 혼합기의 평균 비열비, V_b : 연소부분의 부피, T : 공간 내 온도

여기서 P_e 를 외부압력이라고 하면 $1 > \frac{P_e}{P} \geq \left(\frac{2}{r+1}\right)^{r/(r-1)}$ 과 같으며, 개구부에서의 흐름속도 U_e 는 다음과 같이 된다.

$$U_e = \left(\frac{2r_e RT}{r-1}\right)^{0.5} \left[1 - \left(\frac{P_e}{P}\right)^{(r-1)/r}\right]^{0.5}$$

만약 $\frac{P_e}{P} < \left(\frac{2}{r+1}\right)^{r/(r-1)}$ 이면, U_e 는 다음과 같이 된다.

$$U_e = \left(\frac{2}{r+1}\right)^{0.5} (rRT)^{0.5}$$

$P_e/P \approx 1$ 의 경우에는 $U_e = \left[\frac{2(P-P_e)}{P_e}\right]^{0.5}$ 로 비슷해진다.

3. 가스 폭발압력 실험

Fig. 3은 실험 장치 개략 도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 실험장치는 크게 폭발 반응부와 관측부 그리고 부속 기기로 나누어진다. 폭발 반응부는 폭발모델과 점화 기기로 구성되어 있으며, 관측부는 Sensor와 AMP, A/D Board, 고속 카메라로 구성되었다. 부속기기로는 Gas Analyzer와 Gas Mixing System이 사용되었다.

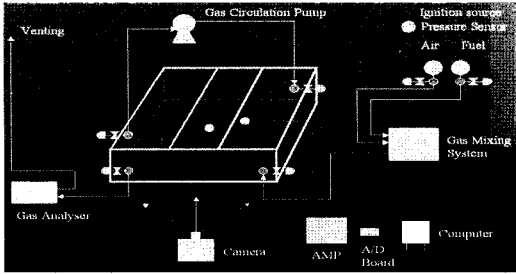


Fig. 3. The schematic diagram for the experimental apparatus.

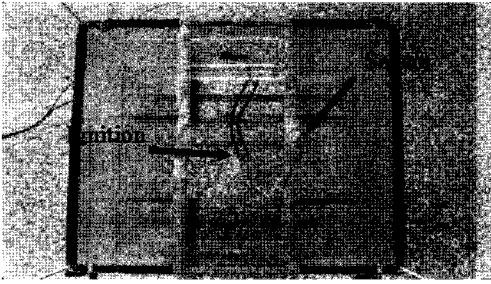


Fig. 4. The location of ignition source.

Fig. 4에서 보이는 정 중앙의 화살표는 용기 바다에 설치한 점화원의 위치를 나타낸 것이다. 상부 벤트 가장자리 중앙의 화살표는 설치한 압력측정센서(KISTLER 701A)를 나타낸다.

본 연구를 위한 실험 장치는 실제로 운용되고 있는 가스 정압기지 설비를 축소하여 기본 모델로 이용하였으며 이는 실제 설비와 유사한 공간에서 가스 폭발 특성을 관찰하고, 현재 적용되고 있는 피해 완화 조치들을 검토하고자 하는데 목적을 두었다.

기본 모델은 가로 700mm, 세로 700mm, 높이 200mm의 사각 케미글라스 용기로 구성되었으며 200mm 씩 높이를 일정하게 증가시켰다. 벤트 사이즈는 전체 적 대비 30%가 되도록 가로 210mm, 세로 700mm의 직사각형 형태로 개방되도록 하였다. 케미글라스의 두께는 20mm이고, 메탄-공기 혼합가스를 연료로 사용하였으며, 가스의 주입은 메탄 레귤레이터를 사용하여 일정한 압력으로 일정 시간 주입한 후 용기내 혼합가스의 농도를 가스분석기(LMSxi)로 측정하여 그 농도를 10%가 유지되도록 하였다. 실험 모델 내에 가연성 혼합 가스가 대기 중으로 날아가는 것을 방지하기 위하여 랩을 이용하여 밀폐 시켰다. 메탄-공기 혼합가스의 층 분리 현상을 방지하기 위해 Gast 다이어프램식 Pressure/ Vacuum 펌프 2대를 양방향에서 약 2분 동안 순환시키고 랩의 부풀림을 방지하며 균일한 농도를 유지하도록 하였다.

점화원으로는 점화플러그(Ignitor)를 사용하였으며, 이는 일반 AA건전지 하나인 1.5V의 전압을 공급하게 되며, 점화기를 통한 출력전압은 15.51kV가 되도록 하였다. 이는 오실로스코프를 통하여 측정하였으며, 11.9~2mJ의 점화에너지를 출력하였다.

압력측정은 0-250bar 측정의 범위를 갖는 압력센서(KISTLER 701A)를 상부 벤트 옆에 설치하여 측정하였다. 측정범위는 세 단계로(0~2.5, 0~25, 0~250) 정할 수 있으며 본 실험에서는 0~2.5bar의 측정범위를 갖게 설정하였다. 센서로부터 출력되는 전하량은 앰프(Amplifier)를 통하여 증폭되어지고, 이는 A/D Board를 통하여 컴퓨터 내 프로그램으로 읽히게 세팅하였다. 프로그램은 시작버튼을 누른 후 4초 동안 8000개의 데이터를 0.5ms 간격으로 받아들여진다. 그리고 실험 형태의 변화에 따른 폭발의 변화를 보고 화염거동을 관측 및 분석하기 위하여 고속카메라(KODAK Model SR-ULTRA-C)를 이용하여 촬영하였다. 이는 초당 최대 3000 프레임까지 촬영되어지나, 화질의 문제점으로 인하여 가장 적절한 초당 250프레임으로 촬영하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

센서의 위치를 바꿔가며 폭발압력을 측정하였는 바, 실험 결과 폭발압력이 가장 높은 지점의 데이터들을 다음과 같은 네 가지 변수에 의하여 영향을 받았다.

1) L/D비

Fig. 5~8은 실험 모델 용기(700×700×200mm³)를 200mm 단위로 높이를 증가시켜 사각형, 삼각형, 원형, 장애물이 없을 때의 시간에 따른 압력의 변화를 나타낸 그래프이다. 초기 Peak압은 화염이 랩을 통과할 때 나타나며, 대체로 높이가 증가할수록 압력은 증가하였으며, 장애물이 있는 경우 피크압까지

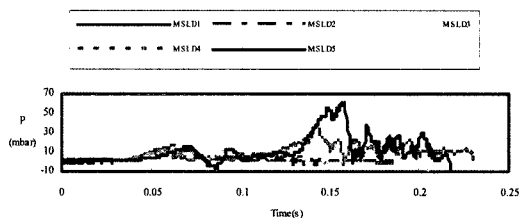


Fig. 5. Explosion pressure curve with L/D ratio in a vessel with rectangular obstacle.

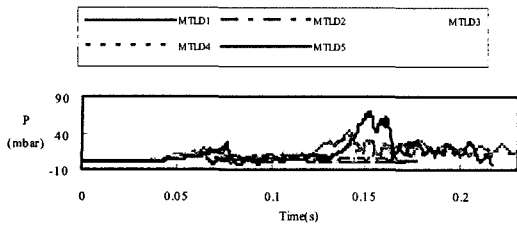


Fig. 6. Explosion pressure curve with L/D ratio in a vessel with triangular obstacle.

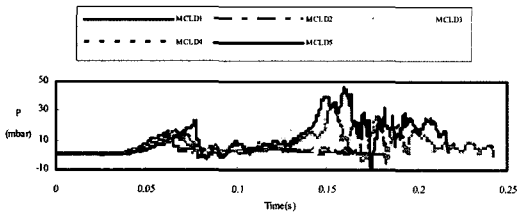


Fig. 7. Explosion pressure curve with L/D ratio in a vessel with circular obstacle.

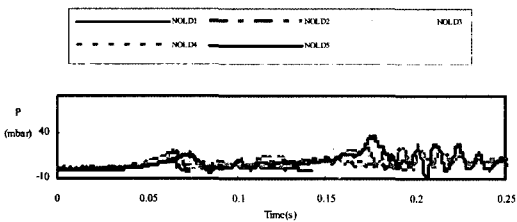


Fig. 8. Explosion pressure curve with L/D ratio in a vessel without any obstacles.

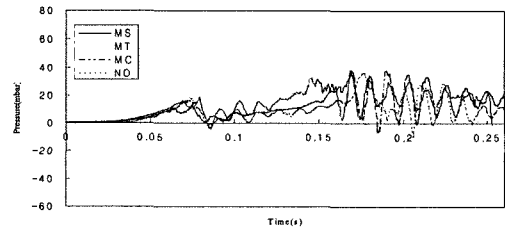


Fig. 9. Explosion pressure curve with time in a vessel with 200mm-height obstacle.

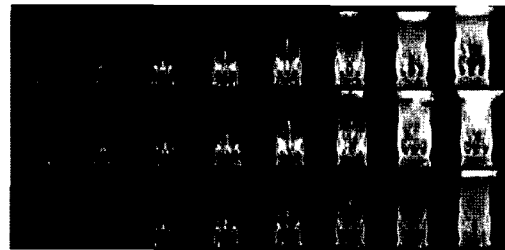


Fig. 10. Flame behavior in a vessel with 200mm-height obstacle.

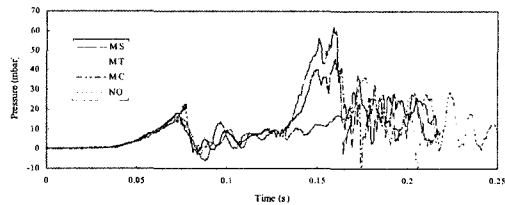


Fig. 11. Explosion pressure curve with time in a vessel with 500mm-height obstacle.

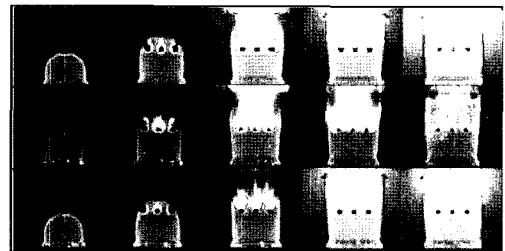


Fig. 12. Flame behavior in a vessel with 500mm-height obstacle.

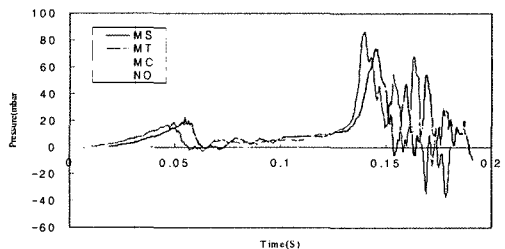


Fig. 13. Explosion pressure curve with time in a vessel with 800mm-height obstacle.

도달하는 시간이 빠르며 높은 압력을 나타내었다. 삼각형 장애물의 경우 폭발압력이 가장 높게 나타났다.

2) 장애물 위치

Fig. 9, 11, 13은 일정높이(1000mm)에서 장애물 위치에 따른 압력변화를 나타낸 것이다. 장애물의 높이가 낮을 때에는 점화원으로부터 장애물까지의 간격이 좁아서 난류의 형성이 용이하지 않으므로 압력이 작게 나타나며, 화염이 전파되는 속도도 매우 느리다. 그러나 장애물의 위치가 높을수록 난류로 인한 화염이 가속화 될 수 있는 공간이 충분하여 더 높은 압력과 더 빠른 화염 속도를 가진다. Fig. 10, 12, 14는 20ms 단위로 각각의 장애물 위치에 따른 화염의 거동을 나타낸 것이다.

3) $A_v/V^{2/3}$ (용기체적에 대한 벤트 면적)과 피크 압과의 관계

Fig. 15는 용기체적에 대한 벤트 면적의 영향을

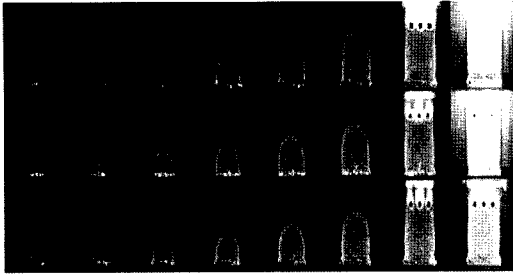


Fig. 14. Flame behavior in a vessel with 800mm-height obstacle.

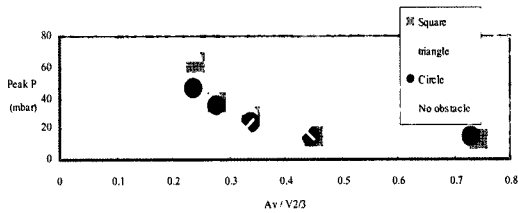


Fig. 15. Effects of vent area on the volume of a vessel.

장애물의 형상에 따라 비교한 그래프이다. $A_v / V^{2/3}$ 의 값이 작을수록 장애물에 따른 압력이 크게 나타났고 압력 상승 속도도 증가되었다.

4) 용기 높이 및 장애물 위치에 따른 최대 압력 상승속도

Fig. 16은 일정한 용기 높이 1000mm에서 장애물의 높이를 200mm, 500mm, 800mm으로 변화시켰을 때의 압력 상승속도를 나타낸 것이다. 비교적 삼각형 장애물이 압력상승 속도가 크게 나타났으며, 특히 800mm 높이에서 현저하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 17은 용기 높이에 따른 장애물 형태별 압력상승속도를 나타낸 것이다. 압력상승속도의 크기는 삼각형>사각형>원형>비장애물 순이며 용기 높이가 800mm인 용기 이후에서는 압력이 급격히 상승하였다.

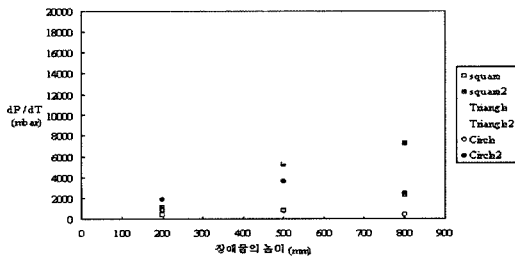


Fig. 16. Pressure rates vs. the vessel height for the obstacle type.

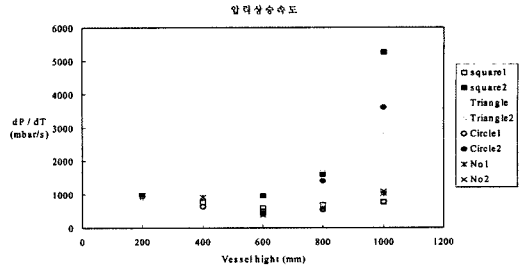


Fig. 17. Pressure rates vs. the location of obstacle for the obstacle type.

5. 결론

실험 결과, 삼각형 장애물이 설치된 용기에서 가스가 폭발할 때 다른 장애물이 설치된 경우보다 높은 압력 값과 빠른 피크 타임을 가졌다. 이는 삼각형 장애물이 장애물 상부 가스의 흐름을 다른 장애물에 비하여 크게 가속화시키기 때문인 것으로 보인다.

L/D비가 1.3이상일 때는 장애물의 형태에 따라 압력 값이 크게 달랐으며, 장애물이 없을 때가 압력 값이 가장 작았다. 이는 가연성 가스의 양뿐만 아니라 용기의 형상에 따라서도 폭발압력의 크기가 다르다는 것을 보여준 것이다. 그리고 장애물의 형상의 변화에 따라 발생된 난류의 크기도 달랐다.

용기 높이가 일정하다면 벤트 사이즈는 폭발특성에 크게 영향을 미친다. 처음 200mm 높이에서는 장애물의 형상에 따른 압력 값이 크게 달랐으며, 체적에 대한 벤트의 면적비가 작을수록 압력 값은 크게 증가하였다.

일정 높이의 용기에서 장애물의 위치는 벤트에 가까울수록 폭발 압력과 압력상승 속도에 큰 영향을 미쳤다. 이는 연소속도의 가속화를 용이하게 하고, 화염 가속에 의한 것으로 보인다.

가스를 취급하는 시설의 경우, L/D비에 따라 설비 내 장애물의 영향이 다르기 때문에 장애물이 될 수 있는 설비의 형상과 위치는 폭발이 발생할 때 그 피해를 최소화 할 수 있도록 하는 구조로 설치되어야 하겠다.

감사의 글 : 본 연구는 한국가스공사 연구개발원의 연구비 지원으로 이루어진 것으로써 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Crowl 외(지), 이영순 외(역) : “화학공정안전”, 동

- 화기술, 2004.
- 2) Green, A.R., Park, D.J. & Naser, N., "Experimental Studies of Flame Propagation and Pressure Rise in a 1:54 Scale Coal Mine Model Using Different Wall Roughness", 5th Asia-Oceania Symp. on Fire Sci. and Tech. in University of Newcastle, Australia, 3-6 Dec26, 2001.
 - 3) Bjerketvedt, D., Bakke, J.R. & Van wingerden, K., "Gas Explosion Handbook", J. Hazardous Materials, Vol. 52, pp. 1~150, 1997.
 - 4) CCPS, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapour Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs", Centre for Chemical Process Safety, AIChE, New York, USA, 1994.
 - 5) Wiekema, B.J., "Vapour cloud explosion model", J. of Hazardous Materials, Vol. 3, pp. 221~232, 1980.
 - 6) 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.
 - 7) Baker, Q. A., Tang, M. J., Scheier, E. A., and Silva, G. J., "Vapour Cloud Explosion Analysis", 28th Loss Prev. Symp., AIChE, April, 1994.
 - 8) 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.
 - 9) 김영대, 정용준 : "가스폭발 예방기술", 세화출판사, 1985.