

장애물에 의한 폭발화염의 거동 연구

오규형, 김종복, 이성은
호서대학교 안전공학과

1. 서 론

산업의 발달과 함께 대량의 가연성 가스가 가정용 및 산업용 연료로 사용되고 있으며 이 가스 연료의 사용량 증가와 함께 가스와 관련된 사고들이 크게 증가하고 있다. 특히 가연성 가스에 의한 화재 및 폭발사고가 사고건수의 절반정도를 차지하고 있으며 사고 액수로는 약80% 정도를 차지하고 있다.

특히 가스폭발사고의 경우 타재해에 비해 인명 및 재산의 손실이 15~30배정도 크기 때문에 폭발방지를 위한 기술개발과 노력이 필요하다. 국내에서 사용되는 가연성가스는 크게 LPG와 LNG로 나눌 수 있으며 LPG는 프로판이 주성분인 가정용 LPG와 부탄이 주성분인 차량용 LPG로 나눌 수 있다. 그동안 가스 폭발 사고는 프로판이 주성분인 가정용 LPG를 취급하는 과정에서 많이 발생하였다.

가스폭발에 대한 기본적인 메카니즘들은 이미 잘 알려져 있으며 밀폐공간 내에서의 혼합가스의 폭발특성 및 폭발에 의해 발생하는 폭풍압 등에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다.

특히 폭발공간 내에 장애물이 있는 경우 장애물 후면에서 난류의 발생에 의하여 화염이 가속화되는 것에 많은 관심을 가지고 연구하여 왔다.

현재까지 많은 연구자들이 화염전파속도의 가속이 되는 현상을 화염전파속도의 측정을 통해서 이해하였으며 폭발화염의 가시화를 통해 화염가속의 메카니즘을 규명하려고 노력하였다.

본 연구에서는 여러 가지의 장애물을 이용하여 화염전파와 장애물과의 상호관계를 설명함으로써 장애물에 의한 화염전파속도의 가속화 메카니즘을 규명하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

장애물에 의한 폭발화염의 거동을 실험하기 위하여 단면적이 20cm×20cm이고, 길이가 90cm인 폭발통을 사용하였다. 폭발화염의 전파현상을 관찰하기 위하여 전면과 후면은 투명한 폴리카보네이트 판을 부착하였으며, 기타 다른 부분은 실험에 필요한 계측기와 주입 등을 위하여 두께 10mm의 철판으로 제작하였다. 가스 폭발을 위한 점화원은 10kv의 전기스파크를 사용하였다. 폭발통 내에 장애물은 점화원에서 약 36cm 거리에 설치하였으며, 장애물의 크기와 형태는 다음 Table 1과 같이 하였다.

관상 장애물은 바닥면에 고정시키기도 하였고, 가운데 부분에 고정시키기도 하였으며, 나머지 다른 장애물들은 폭발용기 중앙에 오도록 설치하였다.

폭발화염 전파현상은 고속카메라로 가시화 하였으며 500~1000fps로 촬영하였다.

Table 1. Obstruction

구분	크기	봉쇄율	기호	비고
Type	Dimension(cm)	Blockage ratio	Symbol	
plate	without obstacle	0	Pb ₀	Fixed at bottom
	5×20	25	Pb ₁	
	10×20	50	Pb ₂	
	15×20	75	Pb ₃	

폭발압력은 strain type 압력센서를 사용하였으며 오실로스코프로 계측하였다. LPG-공기 혼합가스의 농도는 폭발용기를 진공으로 만든 후 용기 부피에 대한 일정농도에 해당하는 LPG를 먼저 넣고 나머지를 공기로 채우는 방법을 이용하였다. LPG의 농도는 각각 4%, 5%, 6% 로 하였다. 가스 폭발시 압력에 의해 폴리카보네이트 창이 깨지는 것을 방지하기 위해 점화원의 반대측면에 개구부를 두었으며 용기내부에 혼합가스를 만든 후 폴리에스테르 필름으로 교환하여 폭발시 파열되도록 하였다. 실험에 사용된 폭발통은 Fig. 1과 같으며 각 구간별 화염전파속도를 살펴보기 위하여 8개의 구간으로 나누었다.

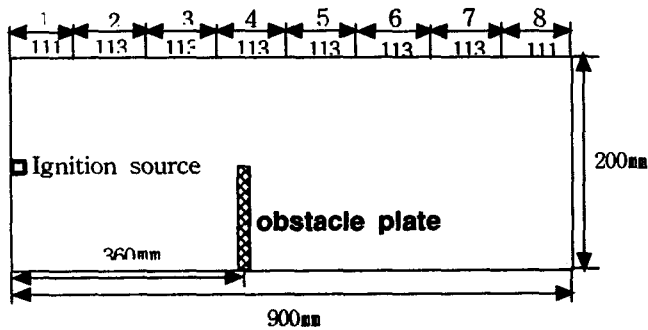


Fig. 1. Explosion chamber of 36 ℓ volume section

3. 결과 및 고찰

다음 Fig. 2는 LPG 5%-공기 혼합기의 폭발화염전파 사진으로 a)는 장애물이 없는 경우이고, b)는 Pb₁의 장애물이 설치된 경우이고 c)는 Pb₂의 장애물이 설치된 경우의 화염전파현상이다. 각 frame의 시간 간격은 2ms이다. Fig. 2에서 보여주고 있는 것처럼

장애물 통과 전까지는 화염전파속도가 거의 비슷해 보이나 장애물에 화염이 접근할 때 부터 장애물의 크기에 따라 화염전파속도가 영향을 받게 됨을 알 수 있었다.

장애물의 크기가 클수록 폭발통 단면적에 대한 봉쇄율이 클수록 장애물 전면에서 생성된 연소가스의 통로가 좁아지게 되어 장애물 부근에서 화염속도가 빨라지며 이 속도에 의해 장애물 바로 뒤에서는 소용돌이(eddy)가 크게 형성됨을 나타내고 있다. 따라서 장애물 통과시 증가했던 화염속도는 이 소용돌이에 의해 순간적으로 속도증가가 둔화된다.

장애물 뒷면에 형성되었던 eddy가 벽면에 부딪히고 또 자체의 momentum에 의해 깨지면서 화염면 면적의 급속한 증가와 열 확산의 증기에 의해 화염전파속도는 다시 증가하는 결과를 보여주고 있다.

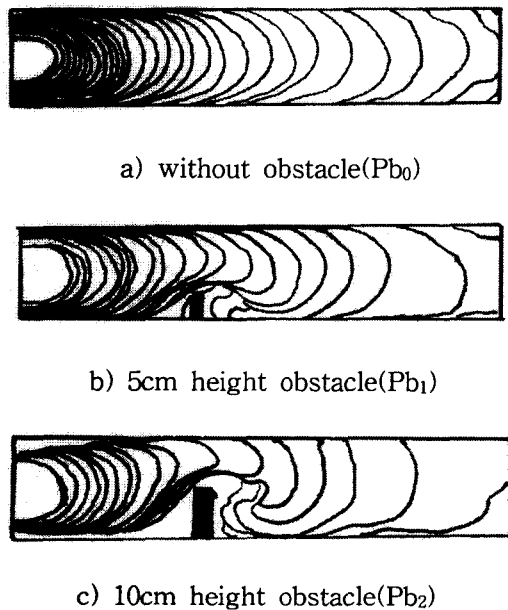


Fig. 2. Explosion flame propagation phenomena
(between the contour line is 2ms period, LPG 5%)

Fig. 3은 LPG 농도가 4%인 경우 장애물 유무에 따른 각 구간별 화염전파속도를 보여주고 있다. 장애물이 설치된 4구간에서 장애물 전에 속도가 증가한 것은 앞에서 설명한 것처럼 폭발에 의해 팽창된 연소가스가 장애물을 통과할 때 빠른 속도로 증가한 것이며 장애물 후의 속도 감소는 장애물에 의해 형성된 eddy의 momentum에 의해 잠시 느려진 것이다.

Fig. 4는 LPG농도가 4.5%인 경우이고 Fig. 5는 LPG농도가 5%인 경우이다. Fig. 6은 LPG농도가 6%인 경우로 가연성가스의 농도가 높기 때문에 장애물에 의해 느려진 화염전파속도가 회복되는데 시간이 더 걸린 것으로 보인다.

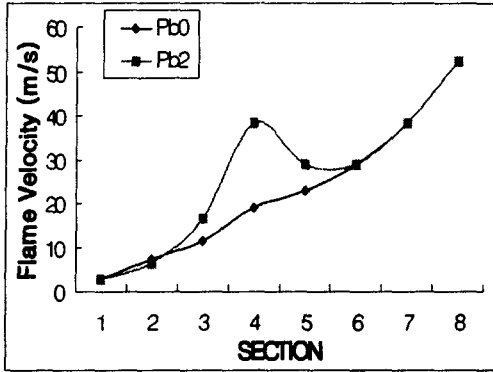


Fig. 3. Flame propagation velocity of each section in 36 l vessel (LPG 4%)

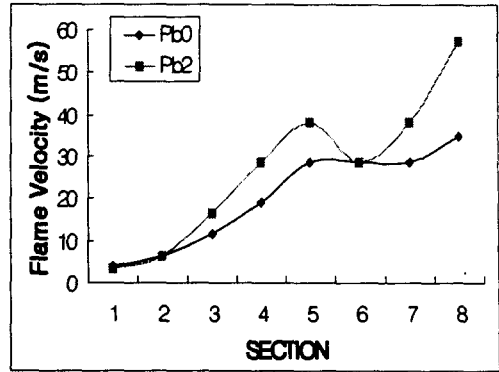


Fig. 4. Flame propagation velocity of each section in 36 l vessel (LPG 4.5%)

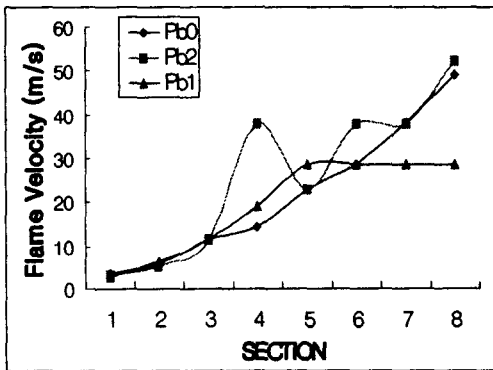


Fig. 5. Flame propagation velocity of each section in 36 l vessel (LPG 5%)

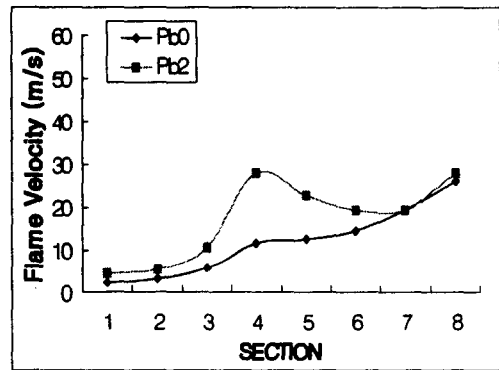


Fig. 6. Flame propagation velocity of each section in 36 l vessel (LPG 6%)

Fig. 7은 장애물 전후의 폭발압력을 비교한 것으로 장애물 전의 폭발압력이 장애물 통과 후의 폭발압력보다 높음을 알 수 있는데 그 이유는 장애물 전의 경우 장애물에 의한 연소가스의 순간적인 봉쇄가 일어나기 때문이다.

Fig. 8은 LPG농도가 5%인 경우 장애물 크기에 따른 폭발압력을 비교한 것으로 장애물 크기가 큰 경우일수록 폭발압력은 더 높아짐($Pb_3 > Pb_2 > Pb_1$)을 알 수 있는데 그 이유는 위에서 설명한 것처럼 폭발통 단면적에 대한 봉쇄율이 클수록 장애물 전면에서 생성된 연소가스의 통로가 좁아지게 되어 장애물 부근에서 화염속도가 빨라지며 이 속도에 의해 장애물 바로 뒤에서는 소용돌이(eddy)가 크게 형성됨으로서 폭발압력 또한 증가되기 때문이다.

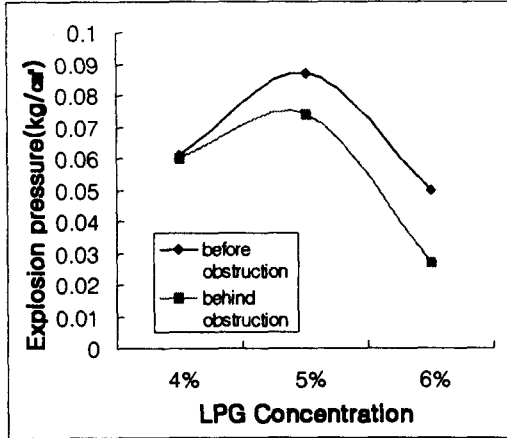


Fig. 7. Explosion pressure before and behind obstruction in vented gas explosion(obstruction : Pb₂)

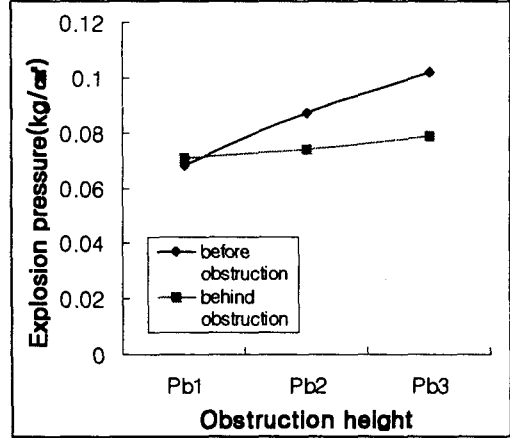


Fig. 8. Explosion pressure according to the height of obstruction (LPG 5%)

4. 결 론

폭발에 의해 개구부가 발생하는 폭발용기 내에 여러 가지 장애물을 설치하고 폭발화염의 전파현상을 관찰하였다. 이 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 장애물에 의한 봉쇄율이 증가할수록 폭발화염전파속도가 증가하였다.
2. 장애물 바로 후면에서는 eddy에 의해 화염전파속도가 둔화되는 경향을 나타내었다.
3. 가연성 가스의 농도가 높은 경우 장애물에 의한 화염의 가속현상은 둔화되었다.
4. 장애물 전후의 폭발압력은 장애물의 봉쇄율과 용기의 개구부에 따라 영향을 받게 되며 봉쇄율이 크거나 개구부가 작을수록 압력은 증가한다.

참고문헌

1. I.O.MOEN, "Turbulent Flame Propagation and Transition to Detonation in Large Fuel-air Clouds", Symposium on Combustion 21, pp.1617-1627, 1986
2. Roger A. Strehlow, "Combustion Fundamentals", pp.419-434, 1985
3. Kyu-hyung Oh, "A Study on the Damage Estimation of Indoor Gas Explosion" 1998
4. W. E. Baker, P.A. Cox., P.S. Westine., J.J. Kulesz., R.A. Strehlow., "Explosion hazards and evaluation", Elsevier Science, 1983
5. T. Hirano, "가스폭발 豫防技術", 海文堂, 1983
6. Dag Bjerkedvedt., Jan Roar., Kees van Wingerden "Gas explosion handbook", Elsevier Science, 1997