

장애물에 의한 폭발특성의 변화

오규형, 김종복*, 이성은*

호서대학교 소방학과, 호서대학교 대학원 안전공학과*

Obstacle Effect on Gas Explosion

Kyu-hyung Oh, Jong-bok Kim*, Sung-eun Lee*

Dept. of Fire Protection Eng. Hoseo Univ.

Graduate School of Hoseo Univ.*

1. 서론

가스폭발 사고가 발생하는 대부분의 공간에는 여러 가지의 도구들이 있으며 이 도구들에 의하여 폭발화염의 형태나 특성들이 달라지게 된다. 그동안 파이프나 튜브를 이용한 가스폭발 실험에서 점화원으로 부터 어느 정도 거리가 떨어진 곳에 장애물을 설치하고 이 장애물들이 화염전파 속도나 폭발파의 거동에 미치는 영향을 연구하여 왔다. 이러한 실험들에서 장애물들은 주로 Spiralring 형태의 것들을 사용하였으며 연구 결과 장애물에 의하여 화염전파 속도와 폭발파의 속도가 크게 증가하는 것으로 보고되어 왔다.¹⁾

본 연구에서는 폭연이 발생할 수 있는 공간에서 장애물에 의하여 폭발 특성에 미치는 영향들을 알아보기 위해 크기가 다른 2개의 직육면체형 폭발통을 이용하여 실험하였다. 폭발통 내에 설치되는 장애물들은 두께 10mm의 철판을 사용하였다. 장애물에 의한 폭발화염의 거동을 관찰하기 위하여 고속 비디오 카메라를 이용하였으며 폭발압력은 Strain형 압력센서를 사용하였다.

본 연구의 목적은 장애물에 의한 화염 전파현상을 가시화하여 분석함으로써 화염 전파속도의 가속되는 메카니즘을 밝히고 장애물에 의한 열유체의 흐름 특성과 화염 전파 현상의 관계를 설명하며, 장애물에 의한 폭발특성의 변화를 확인 하고자 하였다. 실험에 사용된 가스는 공기보다 무겁고 가정용 연료로 많이 사용되고 있으며 사고의 빈도가 많은 LPG를 이용하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도는 전에 실험한 장치와 같으며,²⁾ 실험에 사용된 2종류의 폭발통은 가로, 세로, 높이가 각각 100cm×60cm×45cm 인 부피 270 l 용기(A)와 다른 하나는 가로, 세로, 높이가 각각 90cm×20cm×20cm 인 부피 36 l 용기(B)이다. 화염전파현상을 가시화 하기 위하여 두 용기 모두 전면을 투명한 폴리카보네이트 창을 부착하였으며 A용기는 폭발 압력측정을 위해 관측창을 철판으로 교체할 수 있도록 하였다. 장애물은 각 용기마다 2종류로 A용기의 경우 두께 1cm의 철판을 가로 세로가 각각 60cm×30cm 인 것과 60cm×20cm 인 것을 사용하였고, B용기에 사용한 장애물은 동일한 두께에 가로 세로가 각각 20cm×10cm

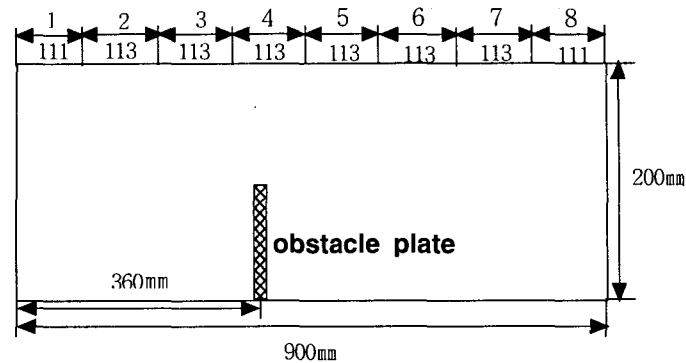


Fig. 1. Explosion chamber of 36 ℓ volume section

인 것과 20cm×5cm인 것을 사용하였다. 폭발화염 전파현상을 가시화하기 위하여 사용한 고속카메라는 Speedcam+로 500fps와 1000fps의 속도로 촬영하였다. 폭발화염의 전파현상은 고속카메라 모니터에 표시되었고 다시 VTR로 녹화하였다. 장애물에 의해 폭발압력이나 압력상승속도가 영향을 받는지를 알아보기 위해서는 Strain type의 압력센서를 이용하였고 디지털 오실로스코프를 사용하여 측정하였다.

용기 내에 혼합된 가연성 혼합가스는 10kV의 전기방전불꽃으로 점화하였다. 장애물에 의한 구간별 화염전파속도의 변화를 관찰하기 위하여 B의 폭발용기는 Fig.1와 같이 8개의 구간으로 나누었으며 점화원에서 가장 가까운 1번 구간과, 8번 구간은 111mm이고 2~7번째 구간은 각각 113mm이다.

B용기의 폭발통은 8cm씩 10개 구간으로 나누어서 각 구간별 화염 전파속도를 비교할 수 있도록 하였다.

2.2 실험 방법

장애물에 의한 혼합가스폭발압력과 압력 상승속도의 측정은 A용기를 이용하여 실시하였다. 용기 내에 장애물이 없을 경우 용기내 장애물 높이가 30cm 인 경우와 20cm 인 경우로 나누어 실험하였으며, 장애물의 위치는 점화원으로부터 약 37cm 떨어진 곳에 화염면의 진행방향에 수직이 되도록 용기 바닥면에 고정시켰다.

장애물이 설치된 후 용기를 완전히 밀폐시키고 진공펌프로 용기를 진공으로 만든 후 실험에 필요한 농도를 만들기 위해 정해진 부피의 밸브를 열어 공기를 주입하므로 내부에서 균일한 농도의 혼합기가 형성되도록 하였다.

폭발압력 측정을 위한 LPG의 농도는 3%, 4%, 4.5%, 5%, 6%로 하였다. 각각의 농도에서 3~5회씩 실험하여 평균값을 이용하도록 하였다. 화염전파 현상의 가시화를 위한 실험은 A와 B 두 개의 폭발통 모두를 사용하였다. A용기는 전면을 투명한 폴리카보네이트로 교체하였다. 실험은 역시 동일한 위치에 같은 장애물을 설치한 경우와 장애물이 없는 경우에 대하여 실시하였고 LPG의 농도는 4%, 5%, 6%에서 실시하였다. B용기의 경우에도 장애물의 위치를 점화원에서 약 36cm 떨어진 곳에 위치시켰으며 LPG의 농도는 4%, 4.5%, 5%, 6%로 하여 실험하였다. 가스의 농도를 조절하는 방법은 폭발압력 측정실험과 동일하게 하였으나 밀폐상태에서 폭발될 경우 화염 전파현상의 가시화를 위해 설치한 폴리카보네이트 창이 파괴되는 것을 방지하기 위해, 가스의 혼합이 완전히 이루어진 후 점화원의 반대측면을 diaphragm으로 교체하여 가스폭발시 파열되도록 함으로서 관측창의 파손을 방지하도록 하였다. 가스폭발 압력은 오실로 스코프를 이용하여 측정하였으며 폭발화염전파 현상은 Speedcam+를 이용하여 촬영하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 폭발화염 전파현상의 가시화 및 구간별 속도

다음 Fig. 2-a)는 농도5%의 LPG-공기 혼합가스를 폭발용기 B에 넣고 장애물이 없는 상태에서 점화 시켰을 때 폭발 화염이 전파되는 현상을 500fps로 가시화 한 것으로 Fig. 1의 용기에서 2구간부터 8구간까지의 화염면을 정리한 것이며 각 화염면 사이의 시간은 2ms이다.

Fig. 2-b)는 높이 10cm의 장애물은 점화원으로 부터 36cm 지점에 위치시키고 동일한 농도의 LPG-공기 혼합가스를 점화시킨 후 장애물에 의해 폭발화염이 영향을 받게되는 현상을 가시화 한 것이며, Fig. 2-c)는 동일조건에서 장애물의 높이를 5cm로 낮춘 경우 화염전파현상을 요약한 그림이다.

Fig. 2의 a)에서 장애물이 없는 경우 화염은 각 시간에 따라 거의 일정한 비율로 화염전파 속도가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 특히 점화 초기인 1구간에서는 화염이 약하여 화염면의 가시화가 잘 되지 않아서 2구간부터 화염면의 전파속도를 정리하였다.

Fig. 2의 b)에서 보여주는 것처럼 장애물을 통과하는 구간에서는 팽창된 연소가스의 통과 때문에 화염면의 전파속도가 증가하였으며, 전체적으로는 장애물이 있는 경우가 없는 경우에 비하여 화염 전파속도가 증가하였으나 장애물을 통과한 후 화염면은 소용돌이를 크게 일으키고 있으며 이 소용돌이의 운동에 의하여 짧은 순간 화염전파 속도가 늦어 졌으며, 이 과류가 용기 바닥면에 부딪쳐 깨지면서 난류의 확산이 증가되고 있으며, 난류가 심해지면서 화염전파속도는 다시 증가하는 현상을 볼 수 있었다.

다음 Fig. 3은 B용기에서 장애물이 없을 경우 LPG의 농도가 4%, 4.5%, 5%, 6%인 경우 각 구간별 화염전파 속도를 나타낸 것으로 점화원으로 부터 멀어질수록 화염 전파속도가 증가하는 현상을 보여 주고 있다.

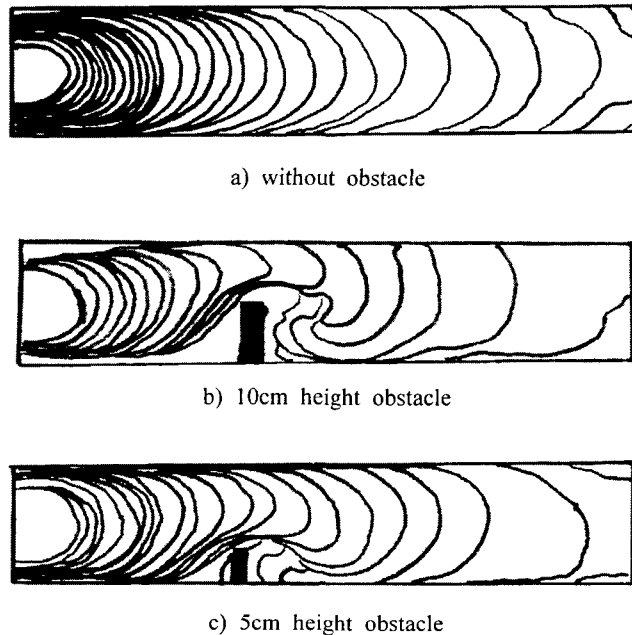


Fig. 2. Explosion flame propagation phenomena (between the line is 2ms period, LPG 5%)

Fig. 4은 위와 같은 농도로 점화원으로부터 36cm지점에 높이 10cm의 장애물을 설치하였을 경우 각 구간별 화염 전파속도를 측정하여 장애물을 통과하는 부분에서 화염 전파 속도가 증가하였으나 장애물 통과 후 4~5구간 사이에서 화염전파 속도가 감소하는 결과를 보이고 있는데 이는 위에서 설명한 것과 같이 장애물을 통과한 화염의 소용돌이에 의해 일시적으로 화염전파속도가 감소한 것을 나타내며, 그 후에 다시 화염전파 속도가 증가하는 것은 소용돌이의 화염면이 깨지면서 난류 확산이 크게 일어나 연소 속도의 증대를 가져오기 때문으로 해석된다.

3.2 장애물에 대한 폭발특성의 변화

앞에서 설명한 바와 같이 장애물의 유무에 따라 화염전파속도의 양상이 약간씩 달라지는 모습을 볼 수 있었다. 따라서 폭발 중간에서 장애물에 의해 폭발특성에도 영향을 미칠 것으로 예상하여 폭발용기 A를 이용하여 앞에서 설명한 대로 장애물 존재시와 장애물이 없을 경우에 각각 5가지의 LPG 농도에서 폭발압력과 압력상승속도를 측정하였다. 다음 Fig. 5는 폭발압력을 측정된 결과이고 Fig. 6은 폭발압력 상승속도를 측정된 결과이다. 두 그림에서 볼 수 있듯이 장애물의 유무에 따라 폭발특성의 변화가 크게 나타나지 않음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 개방공간이 아닌 밀폐된 경우에는 장애물에 의한 영향보다는 농도에 의한 영향이 더욱 크며 용기내부에 전체적인 폭발에너지의 양에 따라 폭발압력이 영향을 받게 됨을 알 수 있었다.

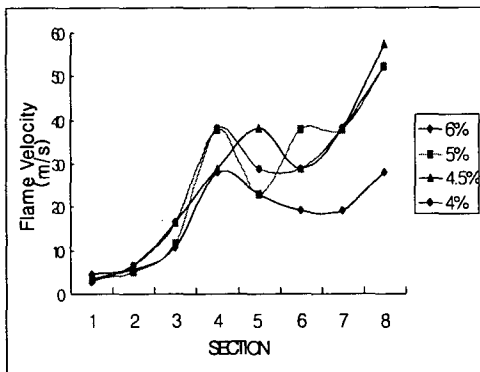


Fig. 3. Flame propagation velocity of each section in the vessel B without obstacle

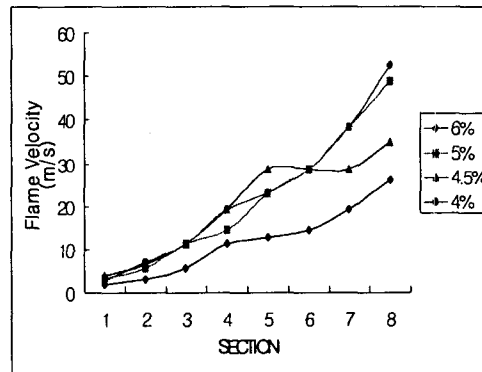


Fig. 4. Flame propagation velocity each section in the vessel B with obstacle

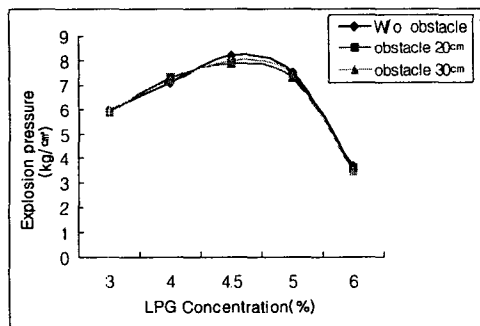


Fig. 5. Explosion pressure according to the obstacle height in the vessel A

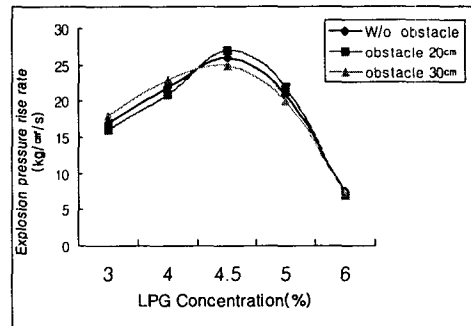


Fig. 6. Explosion pressure rise rate according to the obstacle height in the vessel A

4. 결론

폭연이 일어나는 공간에서의 장애물 유무에 따라 폭발화염 전파속도와 폭발압력 특성의 변화에 관한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째는 판상 장애물이 있는 경우 장애물 후면에서 발생하는 유체흐름의 와류 형성에 의하여 잠시동안 화염의 진행이 지체되는 현상이 있음을 알 수 있었다.

둘째로 장애물에 의한 화염의 가속은 장애물 뒤에 형성된 와류의 흐름이 깨지면서 난류확산의 증기와 함께 속도의 증기가 일어남을 알 수 있었으며 일반적으로 장애물에 의해 화염전파속도가 가속되는 기구가 화염면의 깨어짐에 의한 radical 확산에 의한 것임을 다시 확인할 수 있었다.

셋째로 밀폐공간에서는 장애물에 의해 폭발압력과 압력상승속도가 크게 영향을 받지 않으며 혼합가스의 농도에 따른 연소특성에 영향을 받게 됨을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 松井英憲, “氣體爆こう波の起爆と伝播の條件について”, J. of combustion society of Japan 56, 1981.
2. Kyu-hyung Oh, “A study on the Pressure Behavior of Vented Gas Explosion”, Journal of KIIS vol. 14, No. 5, December, 1999.
3. I.O.MOEN, “Turbulent Flame Propagation and Transition to Detonation in Large Fuel-air Clouds”, Symposium on Combustion 21, pp. 1617-1627, 1986.
4. Roger A. Strehlow, “Combustion Fundamentals”, pp. 419-434, 1985.