

정전기 방전에너지에 따른 LPG/공기 혼합물의 폭발특성에 관한 실험적 연구

김남석 · 박달재^{*†}

서울과학기술대학교 산업대학원 안전공학과

^{*}서울과학기술대학교 안전공학과

(2011. 3. 31. 접수 / 2011. 11. 1. 채택)

Experimental Investigations on Explosion Characteristics of LPG/Air Mixture by Electrostatic Discharge Energies

Nam-Suk Kim · Dal-Jae Park^{*†}

Department of Safety Engineering, Graduate School of Industry,

Seoul National University of Science and Technology

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

(Received March 31, 2011 / Accepted November 1, 2011)

Abstract : Experimental investigations were performed to examine the effects of different electrostatic discharge ignition energies on LPG/air mixture explosions in an explosion chamber. The chamber consisted of 500 mm in length, with a $100 \times 100 \text{ mm}^2$ cross section. Three different ignition energies were used: 0.30 mJ, 46 mJ and 98 mJ. Flame propagations were recorded by a high speed video camera. The results of flame speed and pressure obtained from the different ignition energies were discussed. It was found that as the energy increased, different flame initiations occurred. This caused the time interval in both the flame and pressure developments. It was also found that the flame speed and the pressure were less sensitive to both 0.30 mJ and 46 mJ, except for the ignition energy of 98 mJ.

Key Words : LPG, flame propagation, explosion pressure, electrostatic discharge energy

1. 서론

가스 폭발로 인한 폭발의 심각성은 연료의 반응성, 점화원, 구조물 밀폐 정도, 장애물 밀집도 등 다양한 변수에 의해 좌우된다¹⁾. 이중 점화원은 폭발의 심각성을 결정짓는 중요한 요소이다.

과거 30년 이래 폭발 위험성 연구는 크게 2가지 분야, 첫 번째는 폭발이 일어난 후 폭발거동 특성을 규명하는 연구이고, 두 번째는 가연성 물질의 점화 위험성을 규명하는 연구이다. 전자의 경우 정전기 방전 에너지를 고려하지 않고, 대부분 단지 일정한 점화 에너지를 가지는 전기적 점화 플러그만 사용하여 폭발거동 특성을 규명하는 연구를 수행하고 있고, 후자는 폭발거동 특성을 고려하지 않고 단지 가연성 물질의 최소 점화에너지 연구에 집중하고 있다²⁾.

점화원에 따른 폭발거동 특성에 영향을 미치는 연구는 Hjertager 등³⁾, Phylaktou 및 Andrews⁴⁾, Moen 등⁵⁾, McKay 등⁶⁾에 의해 일부 수행되었다. 이들의 결과를 요약하면, Hjertager 등³⁾, Phylaktou 및 Andrews⁴⁾는 planar 형태의 점화원이 point 형태의 점화원보다 더 높은 폭발압력과 화염속도를 가짐을 밝혔고, Moen 등⁵⁾과 McKay 등⁶⁾은 제트화염 형태의 점화원이 아주 큰 폭발과압과 함께 폭풍으로의 전이를 일으킨다고 하였다. 그러나 이들의 연구는 단지 점화원 형태에 국한되어 있다.

전기 스파크 에너지에 따른 폭발거동 특성 관련 연구는 Bradley 등⁷⁾, Zhen 및 Leuckel⁸⁾에 의해 극히 일부 수행되었다. Bradley 등⁷⁾은 4.09 mJ~10.40 mJ의 점화에너지에 따른 메탄-공기 혼합물의 화염속도에 대한 수치해석적인 연구를 시도하였고, 그 결과 작은 범위의 점화에너지에서 화염속도는 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나, 매우 높은 점화에너지

[†]To whom correspondence should be addressed.
pdj70@seoultech.ac.kr

지를 발생시키는 pyrotechnic 점화기(1 J 이상)를 이용한 Zhen 및 Leuckel⁸⁾의 실험에서 메탄-공기 혼합물의 화염속도 및 폭발압력은 점화에너지의 크기에 따라 민감하게 영향을 받았다.

폭발거동 특성과 관련하여 점화에너지의 영향에 대한 연구가 있음에도 불구하고, 기존 연구들은 전기 스파크에 관한 것이 대부분이다. 실제로, LPG취급시설에서는 전기스파크 보다는 정전기(특히, 불꽃방전)로 인한 화재·폭발이 발생할 가능성이 더 크고, 이 때 발생 가능한 방전에너지는 수 mJ 정도인 것으로 보이나 환경에 따라 그 강도가 크게 변할 수 있어, 폭발거동 특성은 상이할 것으로 판단된다. 그러나 현재까지 정전기 방전에너지에 따른 LPG/공기 혼합물의 폭발거동 특성에 관한 실험적 연구는 시도된 바 없다.

이에 본 연구에서는 정전기 방전에너지의 크기에 따른 LPG 화염속도 및 폭발압력 등과 같은 기본적인 폭발거동 특성을 실험적으로 조사하여 보고하고자 하며, 연구결과는 향후 LPG 취급시설에 대하여 정전기 방전에너지로 인한 폭발 위험성을 평가하고자 전산유체역학(CFD) 도구를 적용할 때 CFD의 연소모델 및 점화원 모델을 검증하는데 유용한 기초자료로 활용되리라 판단된다.

2. 실험장치 구성

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸다. 폭발챔버는 polycarbonate 재질로 100 × 100

mm²의 단면적에 길이 500 mm, 두께 10 mm로 설계하여 제작하였다. 폭발챔버의 한 쪽 끝부분에 개구부를 설정하였으며, 폭발챔버 내부에 정사각형 장애물(30 × 30 mm²)을 점화원으로부터 250 mm 지점에 설치하였다.

연료는 LPG(C₄H₁₀ 96%, C₃H₈ 4% by vol)를 사용하였으며, 임의의 특정 농도에서 정전기 방전에너지에 따른 폭발거동을 조사하기 위하여 MFC(Mass flow controllers)로 LPG-공기 혼합물의 농도를 약 4%로 예혼합하여 폭발챔버에 주입하였다. 실험의 재현성을 위해 5회 반복하였으며, 그 결과를 평균하였다.

폭발압력을 측정하기 위하여 압력센서(Kistler 701 A)를 폭발 개구부 근방에 설치하였다. 압력센서로부터 출력되는 전하량은 Amplifier(Kistler 5019B)를 통해 증폭하여 A/D Board(DT521)를 통하여 센서에서 출력되는 전압 값을 압력 값으로 변환한 후 컴퓨터 내 프로그램에 전송하도록 하였다. 점화 후 폭발챔버내에서 화염전파 과정 및 화염속도를 측정하기 위하여 고속카메라(KODAK SR-ULTRA-C)를 이용하여 초당 500 프레임으로 촬영하였다.

정전기 방전энер지를 발생시키기 위해 점화장치(KIT101)를 사용하였다. 이 장치는 전압발생장치(K-HD1502PM형, 0~±15 kV), Condenser box(C=5 pF~1000 pF)로 구성된다. 점화에너지는 $E = 1/2 CV^2$ (여기서, E: 점화에너지, C: 정전용량, V: 전압)으로 계산하였으며, 본 실험에 사용된 값은 Table 1과 같다. 여기서, 점화에너지는 $E_1(=0.3 \text{ mJ})$, $E_2(=46 \text{ mJ})$,

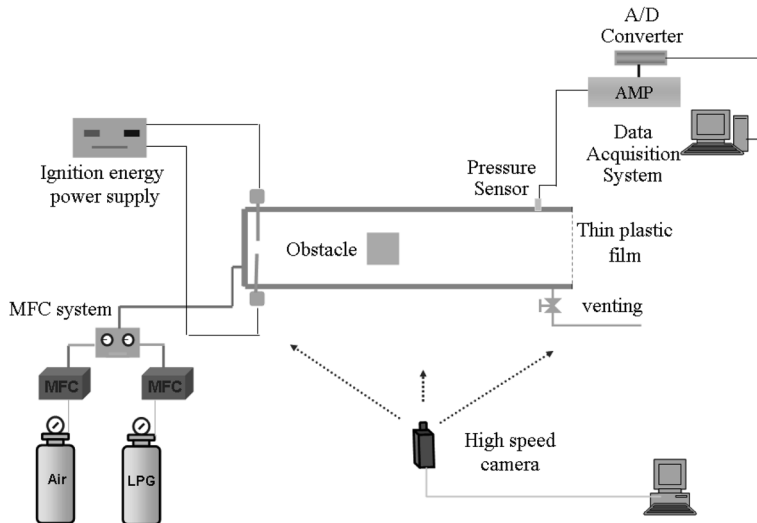


Fig. 1. Schematic of the experimental set-up.

Table 1. Three different energies used in the tests.

Symbol	E_1	E_2	E_3
Energy	0.30 mJ (=1.2 E_{min})	46 mJ (=184 E_{min})	98 mJ (=392 E_{min})

E_3 (= 98 mJ)이고, LPG 최소 점화에너지(E_{min} = 0.25 mJ)에 대해 $E_1 = 1.2 E_{min}$, $E_2 = 184 E_{min}$ 그리고 $E_3 = 392 E_{min}$ 의 관계를 갖는다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 화염전파거동 및 화염속도

Fig. 2는 점화에너지별(E_1 , E_2 및 E_3) 챔버내의 화염전파 과정을 점화 후 6 ms에서 30 ms의 시간까지 6 ms 간격으로 나타낸 것이고, Fig. 3은 점화에너지별 화염속도 변화를 나타낸 것이다. 여기서, 화염속도는 시간에 따라 전파되는 화염전면(flame front)의 팁(tips)을 고려하여 결정하였다. 화염은 점화 후 약 20 ms까지는 실린더형 형태를 가지고 장애물을 향하여 전파하며, 이 기간 동안의 화염은 약 5 m/s의 층류 화염속도를 가지는 것으로 나타났다. 장애물 방향으로 전파하는 화염전면이 장애물 표면(왼쪽) 중앙의 정체점(stagnation point)에 도달할 때, 화염전면의 중앙이 오목한(concave) 형태로 되기 시작하며, 화염중앙의 오목한 면은 장애물 모서리(edge) 바깥쪽으로 멀어질수록 더욱 오목해진다. 이러한 현상의 원인은 장애물 표면(왼쪽)에 존재하는 미연소가스가 장애물로 인해 화염전면의 중심방향으로 밀리기 때문이다. 이러한 concave가 발생하는 시간은 E_1 은 $t = 26$ ms, E_2 는 $t = 24$ ms, E_3 은 $t = 22$ ms로 점화에너지별로 2 ms의 시간차가 발생하였다. 이러한 시간차가 발생하는 원인은 점화에너지가 증가할 때 전극사이에서 발생된 초기 점화핵(ignition kernel) 찌그러짐(wrinkling)이 증가하여 초기화염의 전파속도에 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 박달재 등²⁾이 보고한 결과와 유사하였다.

화염전면이 장애물 중앙의 정체점을 지나 장애물의 모서리와 상호작용할 때 화염전파속도는 증가하게 되고, 화염이 장애물과 폭발챔버의 벽 사이의 좁

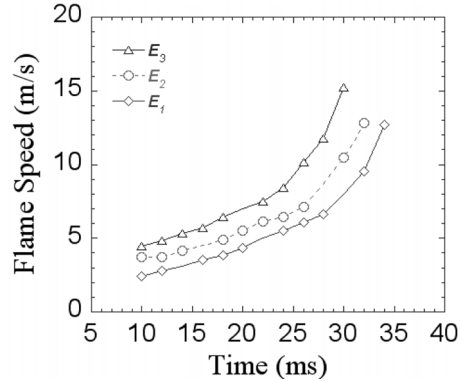


Fig. 3. Flame speeds versus times for three ignition energies: E_1 , E_2 and E_3 .

은 간격(약 35 mm)을 통과할 때 미연소가스의 유속이 빨라져 화염전면의 전파속도는 더욱 증가하게 된다. 이후 화염은 장애물 후류에 생성된 와류와 상호작용하게 되며, 이러한 상호작용 동안 화염은 난류화염으로 전환되면서 계속적으로 연소속도를 증가시켜 화염속도는 급격히 증가하게 된다. 이러한 상태에서 화염은 개구부를 통해 폭발챔버의 외부로 방출된다. 이때 화염이 외부로 방출된 시간은 E_1 은 점화 후 $t = 36$ ms, E_2 는 $t = 34$ ms, E_3 은 $t = 32$ ms로 나타났으며, 화염전면이 concave된 시간차와 마찬가지로 점화에너지별로 약 2 ms의 시간차가 있는 것으로 나타났다.

본 연구에 사용된 정전기 방전에너지 변화에 따라 화염변화속도는 증가하는 추세이나, Bradley 등⁶⁾이 적용한 최고 에너지보다 약 4배 큰 에너지인 46 mJ(E_2)와 0.30 (E_1)에서의 최대화염속도는 약 13 m/s로 거의 유사하였으며, 98 mJ(E_3)에서는 약 16 m/s로 E_1 과 E_2 의 경우 보다 약간 높게 나타났다. 최대화염속도에서 E_1 과 E_3 에서의 상대편차는 약 23%이었다.

3.2. 폭발압력 및 압력변화속도

Fig. 4는 점화에너지별 시간에 따른 폭발압력 거동을 나타낸 것으로 2개의 피크압(P_1 , P_2)이 형성되는 것을 알 수 있다. 첫 번째 피크압 P_1 은 화염이 장

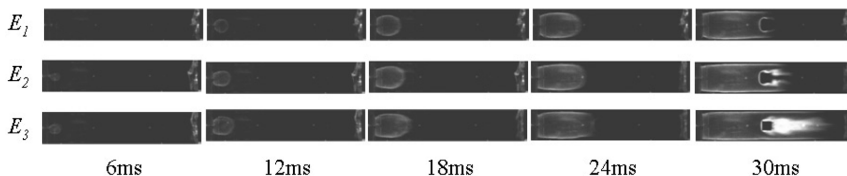


Fig. 2. Flame propagations images by three different ignition energies: E_1 , E_2 and E_3 .

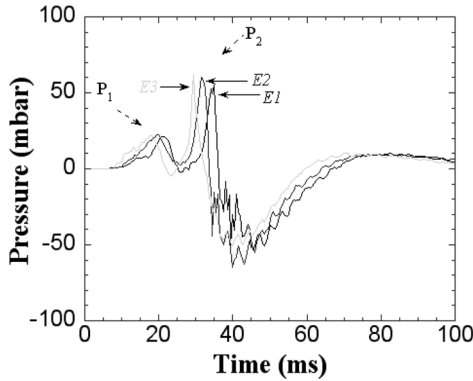


Fig. 4. Pressure-time histories for three ignition energies: E_1 , E_2 and E_3 .

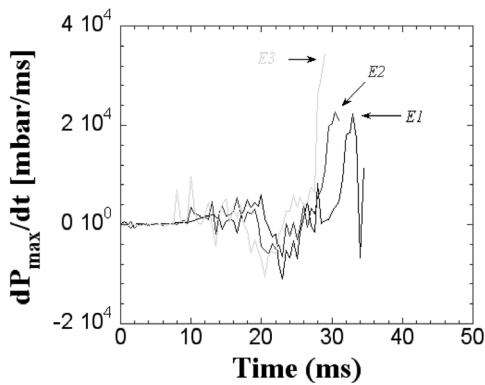


Fig. 5. Variations of pressure rise rates for three ignition energies: E_1 , E_2 and E_3 .

애물에 도달할 때 폭발챔버 개구부에 밀폐시킨 랩이 파열될 때 생기는 압력이다. 이 압력 후의 폭발 압력은 서서히 감소하기 시작하였다. 화염이 장애물 후류의 와류에 영향을 받으면서 압력은 다시 천천히 상승하다가 화염이 폭발챔버의 개구부에 도달하기 직전에 두 번째 피크압인 P_2 가 발생하였다. P_1 은 점화에너지의 크기에 상관없이 점화 후 약 20 ms일 때, 약 20 mbar로 측정되었으며, P_2 도 점화에너지의 크기에 상관없이 약 60 mbar로 최대압력이 비슷하였으나, 시간에 따른 폭발압력 전개과정은 점화에너지의 증가에 따라 빠른 경향으로 나타났으며, 그 결과 점화 후 피크압 도달시간은 E_3 인 경우 29.5 ms, E_2 는 31.5 ms 그리고 E_1 은 35 ms로 $E_3 > E_2 > E_1$ 순으로 나타났으며, 이는 앞에서 기술한 화염속도의 결과와 유사하다. Fig. 5는 점화에너지별 시간에 따른 압력변화 속도를 나타낸 것이다. 최대압력까지 시간에 따른 압력변화 속도의 경향을 보면, E_1 및 E_2 에서의 변화속도는 거의 유사하고, 점화에너지가 가장

높은 E_3 은 작은 점화에너지를 가지는 E_1 및 E_2 보다 높은 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 정전기 방전에너지 크기에 따른 LPG/공기 혼합물의 폭발거동 특성을 알아보기 위하여 폭발실험을 수행하였으며, 그 결과로 얻어진 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 점화 후 초기화염은 층류 화염속도로 전파하였으며, 장애물 표면 근처에 도달하면서 화염전면이 오목한 현상으로 되기 시작하였다. 점화에너지가 높을수록 초기화염이 빠르게 진행되기 때문에 점화에너지별로 화염전파 과정이 약 2 ms의 시간차를 유지하였다. 또한 화염이 폭발챔버의 개구부로 방출한 시간도 화염전면이 오목하게 된 시간차와 비슷하게 점화에너지에 따라 약 2 ms의 시간차를 유지하였다. 점화에너지의 크기가 E_1 과 E_2 인 경우에 화염속도는 약 13 m/s로 거의 유사하였으며, E_3 에서는 약 16 m/s로 E_1 과 E_2 의 경우 보다 높게 나타났다.

2) 점화에너지별 압력곡선 상에 2개의 피크압(P_1 , P_2)이 발생하였으며, P_1 은 벤트 파열압력, P_2 는 챔버내 생성된 최대 폭발압력과 관련된다. 점화에너지 크기에 상관없이, P_1 은 약 20 mbar, P_2 는 약 60 mbar로 나타났다. 그러나 최대 폭발압력에 도달시간은 E_3 , E_2 , E_1 순으로 진행되었다. 최대압력까지 시간에 따른 압력변화 속도의 경향은 E_1 및 E_2 에서는 거의 유사하였고, 점화에너지가 가장 높은 E_3 에서의 변화속도는 E_1 및 E_2 보다 높은 것으로 나타났다.

본 연구로 얻어진 연구결과는 향후 LPG 취급시설에 대하여 정전기 방전에너지로 인한 폭발 위험성을 평가하고자 전산유체역학(CFD) 도구를 적용할 때에 CFD의 연소모델 및 점화원 모델을 검증하는데 유용한 기초자료로 활용되리라 사료된다.

감사의 글 : 본 연구는 지식경제부 전력산업기반자금의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 오규형, 김한석, 이춘하, “가연성 가스의 폭발특성에 대한 연구”, 한국안전학회지, 제5권, 제1호, pp. 66-72, 1992.
- 2) 박달재, 이석환, 성재용, 이영순, “장애물이 있는 챔버 내부의 정전기 방전 에너지에 의한 가스 폭

- 발시 초기화염과 화염전파 특성에 대한 PIV 계측”, 대한기계학회논문집 B, 제33권, 제9호, pp. 682~687, 2009.
- 3) B. H. Hjertager, K. Fuhre, and M. Bjorkhaug, “Concentration effects on flame acceleration by obstacles in large-scale methane-air and propane-air vented explosions”, *Combustion Science and Technology*, Vol. 62, pp. 239~256, 1988.
 - 4) H. Phylaktou, G. E. Andrews, “Gas explosions in long closed vessels” *Combustion Science and Technology*, Vol. 77, pp. 27~39, 1991.
 - 5) I. O. Moen, D. Bjerketvedt, A. Jenssen, and P. A. Thibault, “Transition to detonation in a large fuel-air cloud”, *Combustion and Flame*, Vol. 61, pp. 285~291, 1985.
 - 6) D. J. McKay, S. B. Murray, I. O. Moen, and P. A. Thibault, “Flame-jet ignition of large fuel-air clouds”, *Twenty-Second on Combustion*, Pittsburgh, pp. 1339~1353, 1989.
 - 7) D. Bradley, P. H. Gaskell, and X. J. Gu, “Burning velocities, Markstein lengths, and flame quenching for spherical methane-air flames: A computational study”, *Combustion and Flame*, Vol. 104, pp. 176~198, 1996.
 - 8) G. Zhen, W. Leuckel, “Effects of ignitors and turbulence on dust explosions”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 10, pp. 317~324, 1997.