

## LP 가스 폭발 후 화재 전이 현상 및 전이 방지에 관한 연구 A Study on the Transition of Explosion to Fire of LPG and Its' Prevention

오규형<sup>†</sup> · 이성은

Kyu-Hyung Oh<sup>†</sup> · Sung-Eun Lee

호서대학교 소방학과

(2004. 3. 2. 접수/2004. 6. 8. 채택)

### 요 약

본 논문은 가스폭발로부터 화재로의 전이현상 및 전이 방지 연구를 위해 가로 세로 높이가 각각 100 cm×60 cm×45 cm인 폭발용기를 사용하여 폭발 후 화재로의 전이현상을 고속 비디오로 가시화하고 가시화된 영상을 분석하여 그 기구들을 확인하였다. 고체 가연물로는 신문용지를 가로 세로가 30 cm×20 cm 크기로 절단하여 사용하였고 LPG-공기 혼합 가스는 10 KV 전기 스파크를 사용하여 점화시켰다. 실험 변수로는 혼합가스의 농도, 개구부의 크기 및 가연물의 위치 등이었으며, 파열면의 크기는 10 cm×9 cm, 13 cm×10 cm, 27 cm×20 cm, 40 cm×27 cm로 하였고 가연물의 설치 위치는 4종류로 하였다. 폭발 후 전이 방지 기구의 고찰은 가스 소화약제인 이산화탄소를 이용하여 실험하였다. 실험 결과 가스 폭발로부터 화재로의 전이 현상은 혼합가스의 농도와 고온의 화염 및 연소가스에 노출되는 시간에 많은 영향을 받으며 폭발 후 분위기의 냉각이나 불활성화를 통해 화재로의 전이를 방지할 수 있음을 알 수 있었다.

### ABSTRACTS

The purpose of this study is to investigate the transition mechanism and prevention mechanism of gas explosion to fire. Transition phenomena of explosion to fire of LPG in the explosion vessel of its size of 100 cm × 60 cm × 45 cm was visualized using the high speed video camera and the mechanism was analysed from the videograph. Newspaper size of 30 cm × 20 cm was used for combustible sample in this experiments and LPG-air mixture was ignited by 10 KV electric spark. Experimental parameter was gas concentration, size of vent area and position of combustible solid. Size of vent area were varied as 10 cm × 9 cm, 13 cm × 10 cm, 27 cm × 20 cm, and 40 cm × 27 cm, and the position of combustible was varied in 4 point. Carbon dioxide was used to study the prevention mechanism of explosion to fire transition of LPG. Based on this experiment we can find that transition possibility of explosion to fire on solid combustible from explosion is depends on concentration of LPG-air mixture and the exposure time of solid combustibles in high temperature atmosphere of flame and burnt gas. And cooling or inerting of the atmosphere after explosion can be prevent the transition of explosion to fire on solid combustibles from gas explosion.

**Keywords :** Gas explosion, Fire transition, Fire prevention

### 1. 서 론

석유파동 이후 천연가스 및 액화석유가스는 에너지 원으로서의 그 사용량이 증가하기 시작했으며, 산업발전

과 함께 편리한 문화생활 및 지구환경의 오염을 줄이기 위한 하나의 대책으로 가스의 사용량이 계속 증가하고 있다. 그러나 이들 가연성 가스의 사용량이 증가할수록 이에 따른 가스사고 피해가 증가하여 왔다. 1994년 이후 가스 안전에 대한 교육과 홍보 및 가스관련 기기의 품질향상을 위한 검사 강화와 판매방법의 변화

<sup>†</sup>E-mail: khoh@office.hoseo.ac.kr

등으로 사고 건수는 감소하고 있으나 대형 사고들이 발생하여 피해규모는 크게 줄어들지 않고 있다. 연료로 사용되는 가연성 가스 중 LPG는 공기보다 무거워 전체 가스 사고건수의 75% 정도를 차지할 정도로 높은 잠재 위험성을 갖고 있다. 또한 이 사고는 폭발 및 화재사고로 이어지고 있어 대규모의 인명 및 재산의 손실을 초래하고 있다.<sup>1-5)</sup>

가스폭발사고가 발생하는 경우 주위에 있는 가연물의 특성에 따라 폭발 후 화재로 전이되는 경우가 많았다. 특히 LPG의 경우 가스가 누출되면 공기보다 비중이 크기 때문에 누출된 곳에 장시간 체류하게 되고 결국 실내의 농도가 폭발범위에 도달하게 되며 이 동안에 점화원이 존재하면 폭발사고로 이어진다. 또한 LPG는 천연가스(LNG)에 비하여 발열량이 높고, 복사열의 강도가 크기 때문에 폭발 후 화재로 전이되는 경우가 많았다.<sup>2)</sup>

따라서 본 연구에서는 LPG와 공기와의 혼합가스 폭발을 이용하여 실내에서 폭발에 의한 화재 전이현상을 만들어 가스 폭발로부터 화재로의 전이에 대한 메커니즘을 고찰하고, 가스폭발에 의해 화재로 전이되는 것을 방지하기 위한 소화시스템에 대하여 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 장치

실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같으며 실험에 사용된 폭발용기의 크기는 가로, 세로, 높이가 각각 100 cm, 60 cm, 45 cm로 부피는 270ℓ이다. 폭발용기의 전면은 폭발화염과 화재로의 전이 과정을 가시화하기 위하여

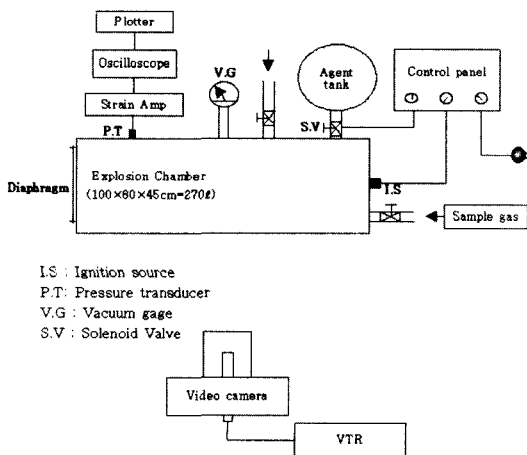


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

투명한 폴리카보네이트로 하였으며, 점화원 반대면은 폭발 후 파열되는 격막을 설치하였으며 격막의 크기는 폭발용기 부피에 대한 개구부의 비가 1/3000 cm<sup>-1</sup>/250 cm까지 5종류가 되도록 하였다. 폭발 압력은 strain형 압력센서를 이용하여 디지털 오실로스코프로 측정하였으며 폭발화염 가시화는 30 fps의 속도가 되도록 촬영하여 분석하였고 혼합 가스의 점화원은 10 KV전기 방전불꽃을 사용하였다.<sup>5)</sup>

또한, 화재 전이를 방지하기 위한 소화시스템으로 폭발용기 상단부에 소화약제 tank를 장착하고 이를 조절할 수 있는 control panel을 설치한다. 이 control panel에는 3개의 timer가 있는데 첫번째 timer는 점화원 즉 방전불꽃의 지속 시간을 조절하는 것이고, 두번째 timer는 점화 방전불꽃이 발생한 후 solenoid valve를 개방하여 소화약제를 분사하는데 까지 기다리는 시간을 조절하는 것이며, 마지막 timer는 소화약제를 얼마의 시간동안 분사하는지 방출시간을 조절하는 것이다.

소화약제 용기는 직경 20 cm에 높이 22.5 cm의 부피 7ℓ 용기를 사용하였다.

### 2.2 실험 방법

실험방법은 고체 가연물인 신문 용지를 용기 내부 일정 위치에 설치하고 다른 가스폭발 실험의 경우와 마찬가지로 용기 내부를 진공으로 만든 다음 일정량의 시료 가스를 주입하고 밸브를 열어 나머지 부피는 공기가 채워져 용기내부가 균일한 농도가 되게 하였다. 가스를 혼합한 후 점화원 반대쪽을 중이로 된 diaphragm으로 대체하여 폭발압력에 의해 diaphragm이 파열되므로 전면의 관측창이 파괴되는 것을 방지하였다. 혼합 가스는 10 KV의 전기 방전불꽃을 이용하여 점화하였다.

시료로 사용되는 가스는 일반적으로 가정용 연료로 사용되는 LPG로 propane이 약 96% 이상으로 공기와 혼합시 완전연소혼합비인 당량농도는 약 4.1%가 된다.

본 실험에서는 LPG의 농도를 3%, 3.5%, 4%, 4.5%, 5%, 6%로 하였다. 가연물로는 신문용지, 골판지, 순수 목면 및 폴리에스테르가 60% 섞인 혼방 천을 준비하였으나 예비실험을 통해 화재 전이 현상의 실험에는 신문용지가 적합한 것을 확인하였고, 가연물의 크기는 가로, 세로가 각각 30 cm×20 cm로 하였다.

가연물 시료의 위치는 개구부 파열면으로부터 약 30 cm, 50 cm, 70 cm씩 각각 떨어진 위치에 고정시키면서 실험하여 외부공기의 유입에 의한 가연물 착화의 영향을 살펴보도록 하였고, 앞에서 설명한 것처럼 개구부의 크기를 변경해 가면서 실험하므로써 폭발 후 연소가스의 방출 및 외부 공기의 유입 거동이 가스폭

**Table 1.** Symbol and position of solid combustibles

부호	방향 및 위치
LA	화염의 수직 방향 개구부로부터 30 cm 떨어진 곳에 위치
LB	화염의 수직 방향 개구부로부터 50 cm 떨어진 곳에 위치
LC	화염의 수직 방향 개구부로부터 70 cm 떨어진 곳에 위치
W	화염의 진행 방향 용기 중앙

발 후 화재로의 전이에 어떻게 영향을 미치는지를 관찰하였다. 또한 시료의 설치방향을 화염진행 방향과 수직으로 고정시켜 고체 가연물 시료의 착화 과정을 관찰하므로써 화염과 가연물과의 접촉 및 열전달에 의한 화재로의 전이 현상을 규명하고자 하였다. 가스 폭발 후 화재로의 전이를 방지하기 위해서는 폭발 공간 내에 열기류의 온도를 낮추거나 불활성 기체에 의한 질식으로 소화를 시켜야 하는데 본 연구에서는 이산화탄소를 이용한 질식소화 방법을 이용하였고 폭발 후 화재로 전이되는 현상을 가시화한 결과를 분석하여 폭발용기내 초기 가스의 농도에 따라 착화 후 소화약제가 방출되는 시간을 결정하였으며 약제 탱크에는 CO<sub>2</sub>를 약 6 kg/cm<sup>2</sup>으로 충전하여 CO<sub>2</sub>의 방출시간은 약 0.2 초 이내가 되도록 하였다.

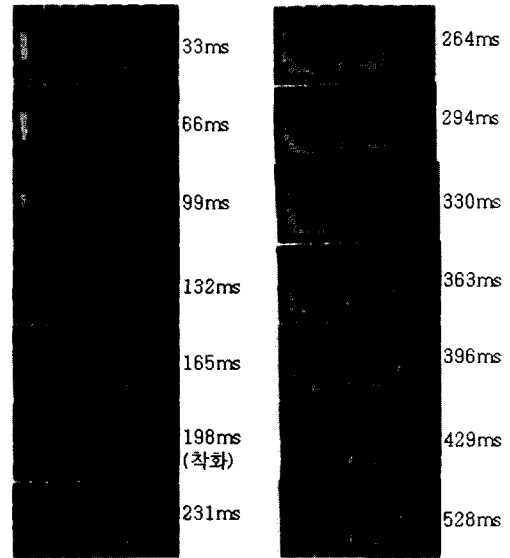
고체 가연물 시료의 방향 및 위치는 Table 1과 같다.

### 3. 실험결과 및 고찰

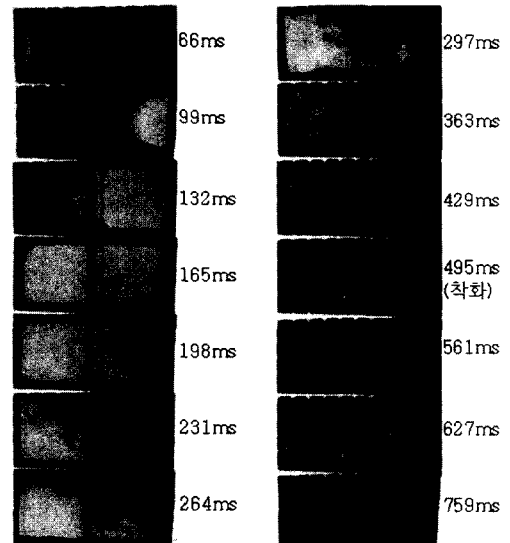
#### 3.1 가스 폭발 후 화재 전이 기구

Fig. 2는 폭발용기내에 고체 가연물 시료로 신문용지를 넣었을 때 당량비 φ가 1보다 작은 LPG농도 3%에서 가스 폭발로부터 화재로의 전이현상을 촬영한 사진으로 가스 폭발화염이 통과한 후 약 198 ms쯤에 시료 가연물에 착화된 화염이 발생하는 현상을 보여주고 있다.

Fig. 3은 폭발용기내에 LPG농도가 4.5%일 경우로 이론적으로는 완전연소 혼합비보다 약 10%정도 높은 농도이지만 실제로는 폭발압력이 가장 높고, 완전연소에 가장 가까운 농도로서, 가스 폭발로부터 시료인 신문지에 화재로 전이되는 현상을 촬영한 사진이다. 가스 폭발화염 및 연소가스가 개구부를 통하여 방출되므로 부압에 의해 공기가 유입된 후인 495 ms에 신문용지에 착화된 화염이 발생하는 현상을 보여주고 있다.



**Fig. 2.** Photograph of explosion to fire transition phenomena (vent size : 27\*20, LPG 3%, newspaper).



**Fig. 3.** Photograph of explosion to fire transition phenomena (vent size : 27\*20, LPG 4.5%, newspaper).

Fig. 4는 폭발용기내에 신문용지를 넣고 LPG농도가 6%일 때의 가스 폭발로부터 화재로의 전이현상을 촬영한 사진으로 가스 폭발화염 및 연소가스가 3%와 4.5% 농도보다 느리게 외부로 방출되었다가 다시 공기가 유입되면서 신문용지에 착화된 화염이 발생하는 현상을 보여주고 있다. 위의 3가지 경우는 가스의 농도

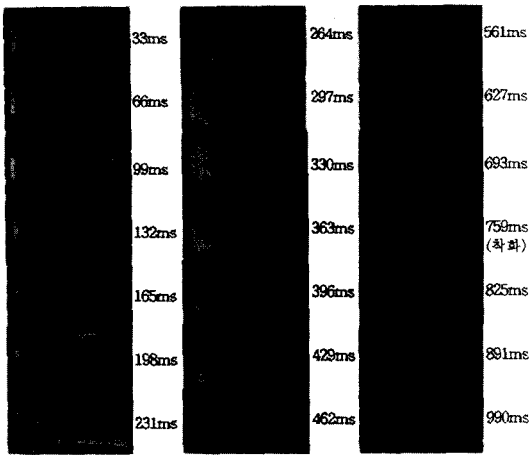


Fig. 4. Photograph explosion flame propagation phenomena (vent size : 27\*20, LPG 6%, newspaper).

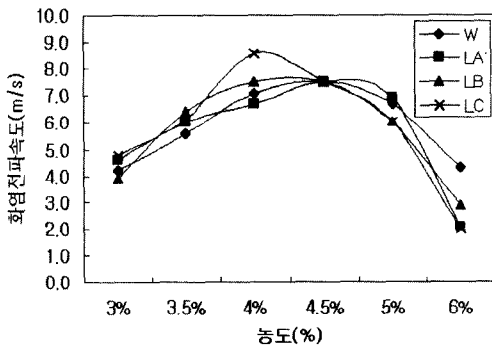


Fig. 5. Explosion flame propagation speed of LPG-air mixtures with the variation of solid combustibles position.

가 당량혼합비보다 낮은 경우, 거의 같은 경우, 높은 경우에 대하여 측정된 결과로 가스 폭발 후 전이 과정이 각각 다르게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 5는 폭발용기의 개구부가 가로 27 cm, 세로 20 cm 인 경우 용기내의 시료의 위치에 따른 폭발화염의 전파속도로서 용기 내부에 설치된 가연물의 위치나 방향에 의해 화염전파속도가 영향을 받지 않으며, 일반적인 폭발특성과 마찬가지로 농도에 의해 영향을 받아서 당량농도 보다 10% 가량 높은 4.5%에서 가장 빠르고 당량혼합비보다 높아지거나 낮아질수록 점점 느려지는 것을 볼 수 있다.

또 Fig. 6은 폭발통의 개구부가 파열되는 vented explosion이 일어나는 현상에서 용기내부의 압력을 측정된 것으로 내부의 압력은 파열면에 부착된 diaphragm의 강도에 의해서 절대적인 압력은 영향을 받게 되며,

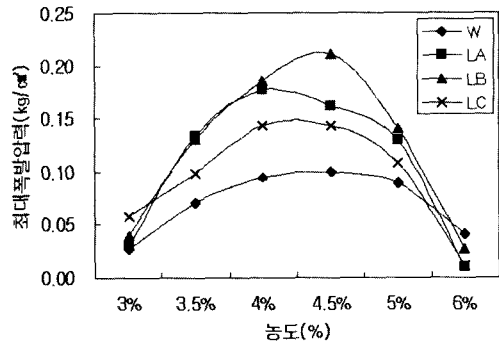


Fig. 6. Explosion pressure with the variation of LPG concentration and position of combustibles.

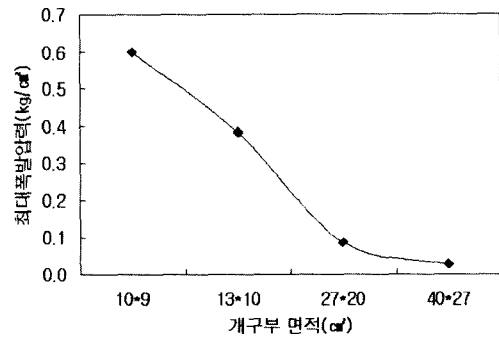


Fig. 7. Explosion pressure with the variation of vent size.

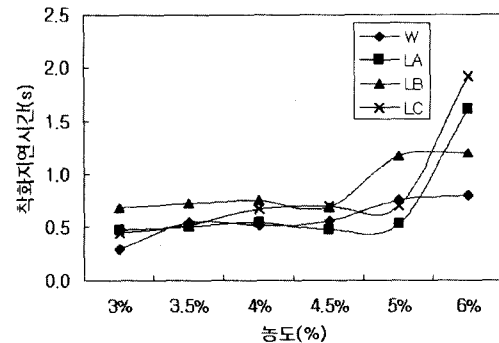


Fig. 8. Ignition delay time of solid combustibles with the variation of LPG concentration.

시료의 위치나 방향보다는 가스의 농도에 의해 영향을 받게 됨을 나타냈으며 화염전파속도와 같이 당량혼합비보다 10% 정도 높은 4.5%에서 최대값을 나타내고 당량혼합비보다 높아지거나 낮아질수록 폭발압력이 감소하고 있어 폭발압력 역시 농도에 따라 큰 영향을 받게 됨을 알 수 있었다.

또한 Fig. 7은 LPG 농도 4.5%일 때 개구부의 크기

(파열면의 크기)에 따른 용기내부의 폭발 압력으로 개구부가 작을수록 용기내부의 폭발압력은 증가하는 경향을 볼 수 있었다.

Fig. 8은 개구부 크기가 27 cm×20 cm인 경우 가스의 농도에 따른 용기내 고체 가연물 시료의 착화지연 시간을 보여주고 있다. 착화지연시간은 혼합가스의 착화에서부터 폭발용기내 가연물 시료의 착화까지의 시간을 의미하는 것으로 가스폭발 후 가연물 시료의 착화과정을 가시화하여 분석하였다. 분석결과 농도가 낮은 경우가 높은 경우보다 짧게 나타나고 있는데 이는 농도가 당량비( $\phi=1$ )보다 낮은 경우는 용기 내부의 가연성 가스가 완전히 연소하여도 완전히 소모되지 않은 산소가 남아 있기 때문에 폭발화염에 의해 생성된 가연물의 열분해 가스가 열분해와 동시에 착화되는 것이며, 농도가 당량비( $\phi=1$ ) 보다 높은 경우는 용기 내에 이미 연료의 농도가 높기 때문에 혼합 가스 폭발 시 용기 내 산소가 완전히 소모되어 폭발 화염 및 열에 의해 열분해 된 가스가 점화되지 못하고 폭발가스가 용기 밖으로 방출된 후 부압에 의해 외부공기가 다시 용기 내부로 들어올 때 산소의 공급과 더불어 연소가 시작되기 때문임을 알 수 있었다. 따라서 폭발 공간내의 가연성가스의 농도에 따라 가스폭발 후 화재로의 전이 과정이 달라짐을 알 수 있었다.

Fig. 9는 개구부의 크기에 따른 착화지연시간으로 개구부의 크기를 변화시키며 폭발 후 화재전이현상을 가시화하여 분석한 것으로 개구부의 크기에 따라 다른 경향을 나타내고 있는데 이는 Fig. 7과 관련하여 볼 때 개구부가 작을수록 내부압력이 크기 때문에 연소가스의 방출 속도가 빠르고 착화지연시간이 짧아질 것으로 예측하였으나, 개구부가 작은 경우 압력이 높아 개구부에서의 방출 유속은 크지만 전체가 빠져나가는 데는 시간이 많이 소요되기 때문에 외부공기의 유입시간도

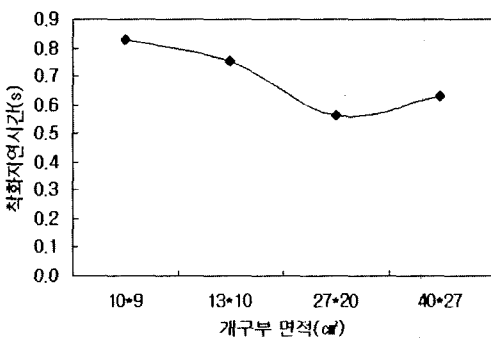


Fig. 9. Ignition delay time of newspaper with the variation of vent area.

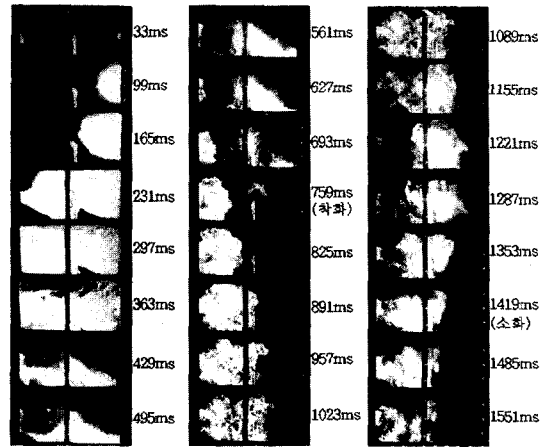


Fig. 10. Extinguishment of explosion to fire transitioned flame on solid combustibles by CO<sub>2</sub> injection (LPG 6%).

늦어져 착화지연시간이 길어졌으며, 개구부의 크기가 큰 40 cm×27 cm의 경우는 용기내부의 압력이 낮기 때문에 개구부에서의 방출 유속이 낮아서 연소가스의 방출에 많은 시간이 소요되어 외부공기의 유입 시간이 늦어져 착화지연시간이 길어진 것으로 나타났다. 가장 긴 지연시간과 짧은 경우 약 0.3초의 차이로 큰 의미가 없어 보이지만 개구부의 크기에 따른 폭발 후 연소가스의 방출과 외부공기의 유입이 화재 전이에 영향을 미치는 현상을 확인할 수 있었다.

### 3.2 가스 폭발 후 화재 전이 방지 기구

Fig. 10은 LPG 농도가 6%이고 점화원에 의해 가스 폭발 후 화재로 전이되는 것을 방지하기 위해 폭발용기내 가연성 혼합가스를 점화시키고 약 1200 ms 후에 CO<sub>2</sub>를 폭발통내에 방출시켜 소염의 유무를 실험한 결과를 가시화 한 것으로 759 ms에 시료인 신문용지에 착화가 되었으나 가스폭발 후 1287 ms에 CO<sub>2</sub>가 방사되면서 가연물시료에 착화된 화염이 소멸되는 것을 확인할 수 있다.

이때 방사된 CO<sub>2</sub>의 부피는 약 42 l이었으며 CO<sub>2</sub>가 방출되는데 걸리는 시간은 약 150 ms가 소요되었다. 폭발용기의 부피에 대한 CO<sub>2</sub>의 부피비로는 약 16%였으며, 용기 내에 공기로 채워진 상태에서 CO<sub>2</sub>가 방출되었다면 용기중의 산소농도는 약 17.6% 정도가 되었을 것이다.

일반적으로 CO<sub>2</sub>의 소화약제로서의 최소설계농도가 34vol%인데 비해 본 연구에서 방사된 CO<sub>2</sub>의 양은 설계농도의 절반에 해당되는 양이며, 일반적으로 A급화

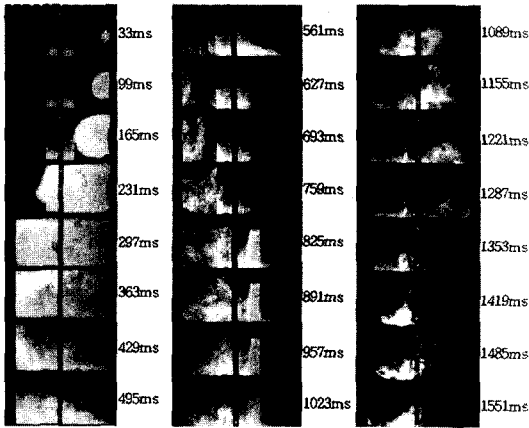


Fig. 11. Reignition of solid combustibles by air injection after transition of explosion to fire (LPG 6%).

재의 가연물의 한계 산소농도가 14~16%인 점을 고려하면 본 연구에서 소량의 CO<sub>2</sub> 방출에 의해 화재로의 전이가 방지되는 것은 이미 용기내부에 폭발에 의해 산소가 소모된 상태에서 방출되었기 때문인 것으로 판단된다. LPG 농도가 4.5%이고 가스 폭발 후 화재로 전이되는 현상을 방지하기 위해 점화원에 의해 용기내 혼합가스가 폭발한 후 600 ms에 CO<sub>2</sub>가 방사되도록 설정하여 실험한 결과 시료인 신문용지에 363 ms에 착화가 되었으나 가스폭발 후 627 ms CO<sub>2</sub>가 방사되면서 소멸되는 것을 확인할 수 있었다.

한편 CO<sub>2</sub>의 질식효과 보다는 CO<sub>2</sub>의 방출 압력에 의한 영향으로 소멸될 수 있다는 문제점이 제기되어 CO<sub>2</sub> 대신 공기를 충전하여 Fig. 10과 같은 조건으로 실험하였으며 그 결과는 Fig. 11의 사진에 나타내었다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 가스폭발 후 759 ms에 시료에 착화되었고 폭발 후 825 ms에 공기가 방출되었으나 고체 시료에 착화된 화염이 소멸되지 않고 더욱 화염이 확산되는 것을 볼 수 있었다. 따라서 약제의 방출압력 보다는 CO<sub>2</sub>의 질식효과에 의해 화염이 소멸되는 것을 확인할 수 있었다.

본 실험을 통해서 가스 폭발 후 화재로의 전이를 방지하기 위해서는 가스폭발에 의해 연소가스가 밖으로 방출되고 외부공기가 내부로 유입되는 시점에 맞추어 소화약제가 방출될 경우 가스폭발에 의한 화재로의 전이를 방지할 수 있음을 알 수 있으며 폭발 공간의 크기에 따라 폭발화염의 방출과 외부공기의 유입시간이 다르기는 하지만 적어도 1초 이내에 소화약제를 방출할 수 있는 시스템이 갖추어지면 가스 폭발 후 화재로의 전이는 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

LPG를 이용하여 가연성 가스의 폭발에 따른 가연물로의 화재 전이현상을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 가스 폭발 후 화재로의 전이 현상은 혼합가스의 농도에 따라 다른 양상을 볼 수 있는데 당량비 보다 낮은 경우는 폭발화염에 의한 열분해와 함께 착화되었으며 당량비보다 높은 경우는 산소의 부족으로 폭발화염과 연소가스 분출 후 재 유입되는 공기의 공급과 함께 착화하였다.

2. 당량비보다 높은 농도의 혼합가스 폭발인 경우 착화지연시간은 연소가스의 방출 후 용기내부로 외부공기가 유입되는 시간과 관계가 있으며 외부공기의 유입이 빠를수록 착화지연시간이 짧아짐을 알 수 있었다.

3. 개구부의 크기가 작을수록 용기내의 폭발압력은 증가하여 개구부에서의 연소가스 방출속도는 빠르나 방출유량이 작아 전체적으로 유출되는 시간이 많이 소요되므로 착화지연시간이 길어졌으며, 개구부가 클 경우는 용기내부압력이 낮기 때문에 연소가스 방출속도가 느려 결국 외부공기 유입속도가 늦어져 점화지연시간이 증가하였다.

4. 가스폭발 후 화재로의 전이에 영향을 미치는 주요 인자는 혼합가스의 농도, 개구부에 따른 공기 유동 및 폭발화염의 복사열임을 알 수 있다.

5. 가스 폭발 후 화재로의 전이를 방지하기 위한 소화약제의 방출시간은 폭발화염의 열 및 외부공기의 유입을 고려하여 설정하여야 하며 적어도 1초 이내에 감지하여 약제를 방출시키는 시스템이 유효할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. K. H. Oh, A study on the Damage Estimation of Indoor Gas Explosion. Report KGS 98-006, Korea Gas Safety Coporation, 1998.
2. K. H. Oh, A study on the Explosion Characteristics and Leakage of Gas at Indoor. Report KGS 99-007, Korea Gas Safety Corporation, 1999.
3. K. H. Oh, A study on the LPG Explosion Characteristics of Non-uniform Concentration. Transactions of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 17, No. 4(2003).
4. K. H. Oh, A study on the Explosion to Fire Transition Phenomena of Liquefied Petroleum Gas. J. of KJls., Vol. 8, No. 4.

5. S. E. Lee, A study on the Explosion to Fire Transition and Fire Prevention. Hoseo Univ. Master thesis (2000).
6. T. Hirano, 가스爆發豫防技術. 海文堂, Japan(1984).
7. James, G. Quintiere. Principles of Fire Behavior. Delmar Publishers(1998).
8. Turumi, H. and T. Hayashi, "The Effect of Vessel Size on Gas Phase Explosion Pressure in Closed Vessels", Research Report RIIS-RR-18-3, Research Institute of Industrial Safety(1969).