



LP가스 폭발로부터 화재로의 천이에 관한 연구

A Study on the Explosion to Fire Transition Phenomena of Liquidfied Petroleum Gas

오 규 형* · 이 춘 하**
Kyu-Hyung Oh · Chun-Ha Lee

ABSTRACT

Small rectangular explosion chamber of its size 25cm×25cm×32cm with a circular bursting diaphragm at the top was used to study the mechanism of gas explosion to fire transition phenomena, the process of ignition of solid combustibles during a gas explosion. To visualize the explosion to fire transition phenomena, transparent acryl window and high speed camera system were used.

The test piece of solid combustible in this experiments was a 5cm×5cm square sheet of newspaper which was placed in the explosion chamber filled with a LPG-air mixture. The mixture was ignited by an electric spark at the center of the chamber. Explosion to fire transition phenomena and the behavior of out flow and in flow of gas through the opening yielded by bursting the diaphragm was visualized with shlieren system and without shlieren system.

Diameter of a bursting diaphragm at the top of the explosion chamber was varied 5cm, 10cm, and 15cm, and the position of test piece were varied with 6 point.

Explosion pressure was measured with strain type pressure transducer, and the weight difference of the test piece before and after each experimental run was measured.

By comparing the weight difference of solid combustibles before and after the experiment and the behavior of out flow and inflow of gas after explosion, it was found that the possibility of ignition was depends on the LPG-air mixture concentration and the exposure period of test piece to the burnt gas.

Test result of this experiments it was found that the main factor of this phenomena are that heat transfer to the test piece, and thd pyrolysis reaction of test piece. Based on the results, the mechanism of the explosion to fire transition phenomena were inferred; gas explosion-; heat transfer to solid combustibles; pyrolysis reaction of solid combustibles; air inflow; mixing of the pyroly gas with air; ignition.

* 한국기계연구소 충격동력실

** 해사기술연구소

1. 서 론

LNG 및 LPG를 가정과 산업용 연료로 사용하기 시작한 것은 이미 오래전의 일이며 최근들어 지구 환경 보존을 위한 화석연료의 사용을 점차 규제하기 시작하면서 가스연료의 사용량이 급증하고 있으며 이와함께 이들의 취급부주의에 따른 폭발 및 화재사고의 빈도수도 증가하고 있다¹⁾²⁾.

특히 가정이나 사업장 등에서 가스누설에 의한 가연성 혼합기체의 폭발후에는 폭발에 의한 화재가 발생하고 이 화재로 인해서 인명 및 재산의 피해가 더욱 확대된다. 따라서 가스폭발에 의한 피해방지 대책을 세울때에는 화재에 의한 피해의 확대도 동시에 고려해야 한다. 이러한 가스폭발에 의한 화재로의 발전상황에 대처하기 위해서는 폭발로부터 화재로의 천이조건에 대한 연구가 필수적으로 수반되어야 하나 이에대한 연구결과가 적어 천이조건이나 기구가 확실히 규명되지 못하고 있으며 일부 연구자에 의하여 메탄가스 폭발로부터 화재로의 천이에 대한 모형실험을 통하여 폭발로부터 화재로의 천이 기구를 밝히고자 하였다³⁾.

본 연구에서는 가정용 연료로 많이 사용되고 공기보다 비중이 큰 LPG와 공기와의 혼합가스 폭발을 이용하여 실내에서 폭발에 의한 화재의 양상을 만들어 가스폭발시 공기의 흐름과 화염에 의한 고체가연물의 착화현상을 고찰하므로써 가스폭발로부터 화재로의 천이기구를 해석하고자 한다.

2. 실험

2.1 시 료

가연성 가스로는 가정이나 사업장에서 연료로 많이 사용될뿐 아니라 공기보다 비중이 커 대기중에 누출되면 바닥면에 체류하여 폭발사고를 일으키기 쉬운 LPG를 사용하였으며 고체가연물로는 신문용지를 5cm×5cm로 잘라 사용하였다. 고체가연물을 신문용지에 택한 이유는 예비실험을 통하여 숨이나 천 등은 폭발용기 내부에 고정시키는 방법이 어렵고 무게에 대한 부피의 조절등 실험의 재현성에 문제가 있었으며³⁾, 두꺼운 종이의 경우는 폭발통의 크기가 적어 폭발화염과의 접촉으로 연소현상이 일어나지 않기 때문에 시료의 균일성과 폭발화염에

의한 고체 가연물의 착화현상을 가시화하고 정량화 하는데 좋은 신문용지를 택하였다.

2.2 실험장치

가스폭발 실험용기는 가로 25cm×세로 25cm×높이 32cm 크기의 폭발통으로 내용적이 20l이며 화염전파현상 및 가연물의 착화현상을 고찰하기 위해 투명 아크릴 창을 만들었으며 용기의 윗면에는 직경이 15cm되는 개구부를 만들고 격막을 설치하여 폭발시에 격막이 파괴되어 폭발에 의해 생성된 연소가스의 배출과 외부공기의 유입이 잘되도록 하였는데 이는 건물내부에서 가스폭발이 일어날때 유리창 등의 약한 부분이 파괴되면서 외부에서 공기가 유입되는 현상과 유사한 현상을 갖도록 하였다³⁾. 투명 아크릴창 외의 다른 두면에는 용기내를 진공으로 하기위한 진공밸브와 가연성 혼합기체를 공급하는 밸브를 두었으며, 혼합가스의 점화를 위한 전극은 폭발통의 중앙부에 위치하도록 하였고 폭발시 압력측정을 위해 압력변화기를 측면에 부착하였으며 실험장치 구성도는 Fig. 1과 같다. 화염전파현상 및 고체가연물의 착화현상을 가시화하기 위해 고속카메라를 사용하였으며 폭발후 통 내부공기의 유출과 외부공기의 유입현상을 가시화하기 위해서는 shlieren system을 이용하였다²⁾.

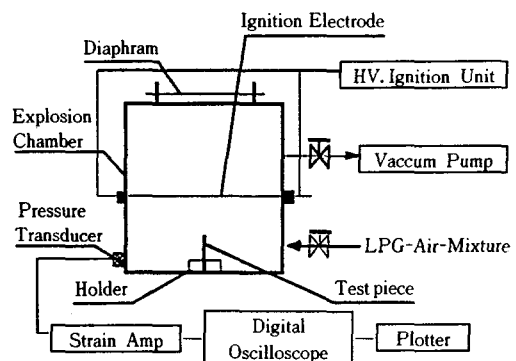


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.3 실험방법

LPG는 그 성분의 98% 이상이 프로판이므로 LPG의 폭발 한계농도는 프로판의 폭발 한계농도

범위와 비슷하여 본 실험에서 LPG의 농도는 3.5%, 4%, 5%, 6%, 7% 5종류를 선택하였으며, 격막의 직경은 15cm로 하였다.

고체가연물인 신문용지는 두개의 막대자석을 홀더로 사용하여 필요한 위치에 고정시켰다. 실험은 각각의농도에서 고체가연물을 폭발통의 아랫면 중심부분에 설치하고 점화하여 각 농도별 화염전파속도와 고체가연물의 열분해 및 착화에 의한 무게감소비와 점화 지연시간을 측정하였다. 무게감소비는 실험전후의 고체가연물의 무게를 측정하여 계산하였으며, 점화지연시간은 고속촬영장치를 이용한 가시화된 화면을 통해 측정하고 이때의 각 농도에서 화염이 전파되는 속도도 측정하였다⁴⁾⁵⁾.

가연물의 위치에 따른 점화지연시간을 측정하기 위하여 LPG의 농도 5%에서 Fig. 2와 같이 가연물의 위치를 아랫면 중앙, 아랫면 1/4위치, 아랫면 구석, 측면중심, 윗면구석, 윗면 중심부 등 6곳으로 변화시키면서 실험하였다.

또 각각의 농도에서 점화위치에 따른 점화확률을 측정하기 위해 위와 같이 6개의 위치에 폭발통 아랫면 모서리부분을 추가로 실험하여 점화확률을 측정하였다. 폭발통 윗면의 격막의 크기에 따라 폭발 후 가스의 유출과 외부공기의 유입이 고체가연물의 착화에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 LPG의 농도는 2.5%와 3%를 추가하고 격막의 크기를 5cm, 10cm로 줄여가면서 이때의 농도별 및 배출구의 크기에 따른 시료의 착화성과 외부공기 유입시간 등을 측정하였다. 가연물의 착화현상 및 점화지연시간 등은 shlieren system을 사용하지 않고 고속촬영하여 착화확률 및 시간을 측정하였으며, 폭발 후 가스의 유출과 외부공기의 유입현상

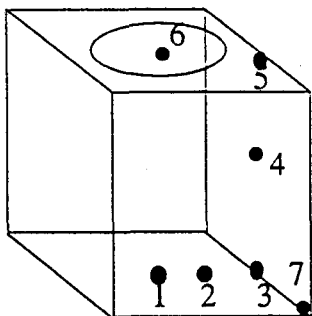


Fig. 2 The position of test piece

등은 shlieren system을 이용하여 고속촬영하므로서 기체의 유동현상과 폭발로부터 고체가연물 시료의 착화과정을 확인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염전파속도 및 가연물의 열분해

LPG의 농도를 3.5%에서 7%까지 변화시키면서 가연물을 폭발통 아랫면 중앙에 고정시키고 LPG-공기 혼합가스 폭발시의 화염전파속도와 실험 전후의 고체가연물 시료의 무게를 측정하여 농도별 무게감소비를 측정하였다.

화염전파속도는 Fig. 3과 같이 4%와 5%사이에서 최대가 되며 농도의 증가와 감소에 따라 화염전파속도가 감소하는데 이는 프로판이 최대 폭발압력을 나타내는 4.3%의 농도에서와 비슷한 값을 갖는 것을 알 수 있었다²⁾.

농도에 따른 고체가연물 시료의 무게감소비는 Fig. 4에서 보여주고 있는 것과 같이 화염전파속도와 반대되는 양상을 보여주고 있다. 즉 화염전파속도가 빠른 LPG농도 4%에서 가장 적고 농도가 4%보다 크거나 작아지면 무게감소량이 커지는 것을 알 수 있다. 여기서 고체가연물의 무게감소는 폭발화염과 시료와의 접촉에 의해 열분해되어 감소된 것으로 판단되며 이러한 결과를 통해 폭발화염과 고체가연물과의 접촉시간이 길수록 열분해되는 양이 증가됨을 알 수 있었다.

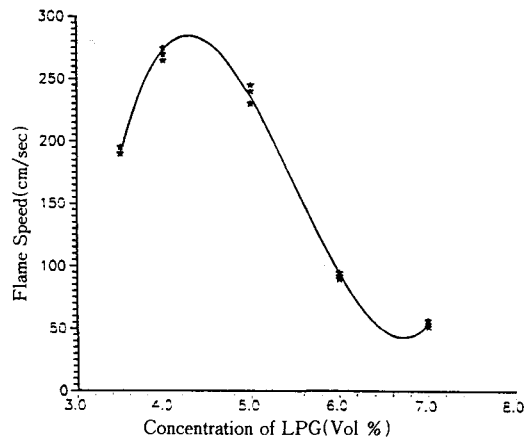


Fig. 3 Explosion flame speed of LPG-air mixtures

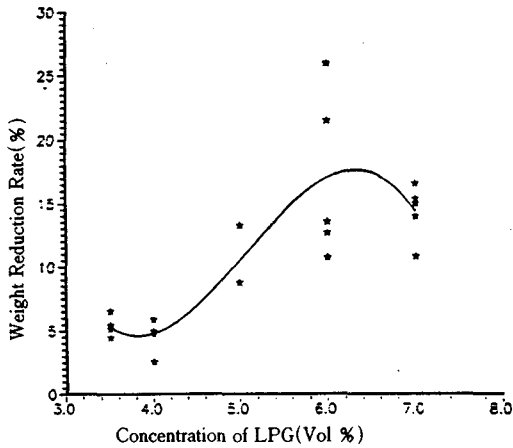


Fig. 4 Weight reduction rate with the variation of LPG concentration.

한편, LPG의 농도가 7%일때의 화염전파속도가 6%일때 보다 느리지만 무게감소비율이 적은것은 본 실험에 사용한 폭발통은 격막을 상부에 설치하

였고, LPG농도 7%에서는 폭발범위의 상한계에 가깝고 당량농도보다 훨씬 높아서 폭발후 화염이 폭발통의 상부에 오래 머물러 있어서 고온의 화염면과 고체가연물과의 접촉이 나쁘기 때문에 열분해가 잘되지 않는 것으로 판단된다^(6,7).

3.2 점화지연시간

shlieren-고속카메라 system을 이용한 LPG 공기 혼합가스의 폭발로부터 고체가연물 화재로의 천이 현상에 대한 가시화 결과는 Fig. 5와 같으며 각 농도에서의 가연물로의 점화지연시간을 살펴보았다. 각 농도에서 측정된 점화지연시간은 Fig. 6과 같으며 화염전파속도가 가장 빠른 4%농도에서 점화지연시간이 가장 짧고 농도의 증가와 감소에 따라 점화지연시간이 점점 길어지는 것을 볼 수 있는데 이는 당량농도에 가까운 4%에서 화염전파속도가 빠르고 폭발압력도 크기 때문에 고온의 폭발화염과 고체가연물과의 접촉시간이 빠르고 또 폭발압력에 의한 폭발통 상부의 격막파열에 의한 외부공기의

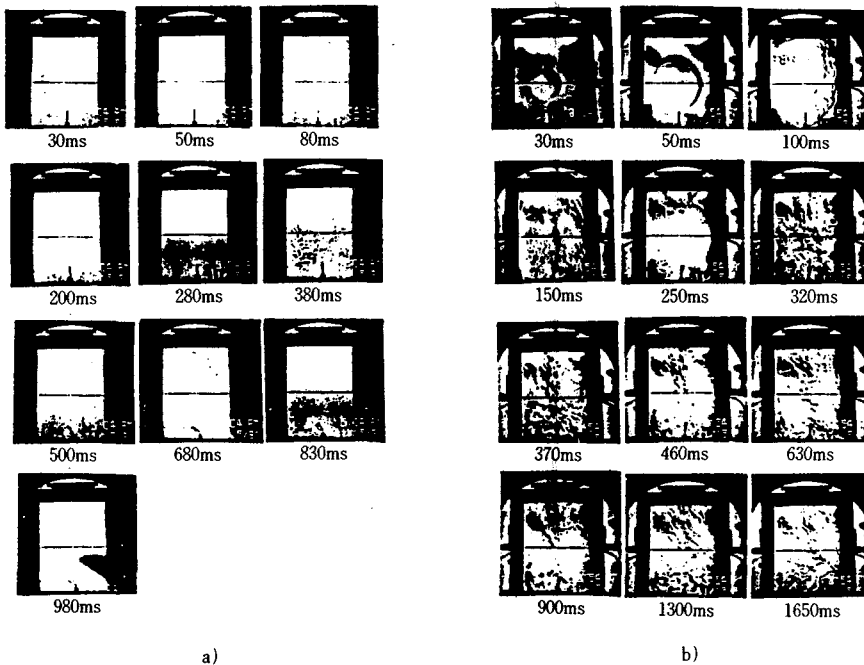


Fig. 5 Visualized schlieren photograph of explosion to fire transition phenomena.
a) LPG 4%, b) LPG 5%(60f_{ps})

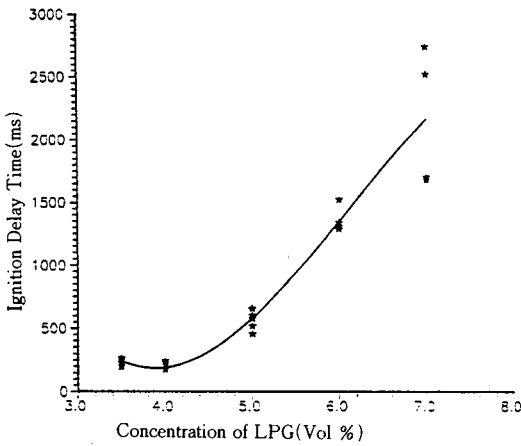


Fig. 6 Ignition delay time of test piece with the variation of LPG concentration.

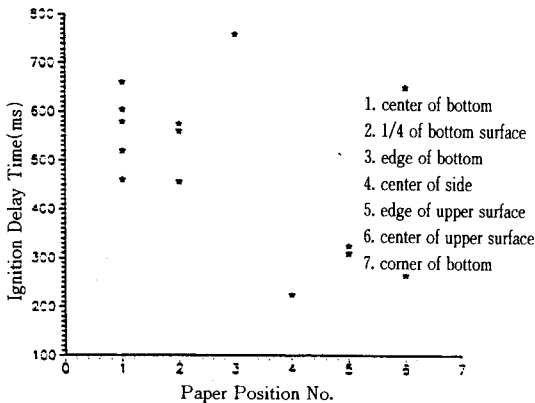


Fig. 7 Ignition delay time with the variation of test piece position

유입시간이 짧기 때문에 점화지연시간이 짧고 농도가 3.5%인 경우는 폭발화염면과 고체시료와의 접촉으로 고체가연물이 열분해되고 LPG의 농도가 당량농도보다 낮기 때문에 가스폭발후 미연소된 산소와 열분해 가스의 혼합가스가 외부공기의 유입이 없어도 점화가 가능하기 때문에 점화지연시간이 짧으며 5% 이상의 농도에서는 폭발화염과 고체가연물과의 접촉에 의한 열분해가 일어나도 LPG의 농도가 당량농도보다 높아서 폭발순간에 산소가 이미 연소되어 폭발압력에 의해 격막이 파열되고 외부공

기가 유입될때 까지의 시간이 필요하기 때문에 농도의 증가와 함께 점화지연시간이 길어지게 된다.

한편, 가연물의 위치에 따른 점화지연시간을 살펴보기 위하여 LPG의 농도를 5%로 하고 고체가연물의 시료를 Fig. 2와 같이 6곳으로 나누어 실험하였다.

실험결과 각 위치에서의 점화지연시간은 Fig. 7과 같으며 4번 위치의 측면 중앙부분에서 점화지연시간이 가장 짧고 3번의 아랫면 구석부분이 가장 느린 것을 알 수 있었는데 이는 폭발화염과의 접촉시간 및 외부공기의 유입과 밀접한 관계가 있음을 보여주는 결과로서 가스폭발로부터 고체가연물로의 착화기구가 폭발화염의 열전달과 열전달에 의한 고체가연물의 열분해 및 열분해된 가연성가스와 외부공기와의 혼합이 중요한 요인인 것을 나타낸다.

Table 1 Ignition possibility according to the sample position and LPG concentration. (%) (Diameter of diaphragm is 15Cm, Upright)

Sample position LPG Concentration	1	2	3	4	5	6	7
3.5%	50<	10-40	10>	50<	10>	100	X
4%	10>	10>	X	"	"	"	X
5%	100	100	10>	100	"	"	X
6%	50<	10>	X	"	"	"	X
7%	10>	"	X	X	"	"	X

또 가연물의 위치에 따른 점화확률을 살펴보기 위하여 가연물의 위치를 위와 같이 6곳과 아랫면 모서리를 추가하여 각각의 농도에서 실험한 결과 Table 1. 과 같은 결과를 얻었으며 실험결과 재현성이 좋지 않아 편차가 크지만 이러한 실험을 통해서도 가스폭발로부터 화재로의 천이는 폭발화염과 가연물과의 접촉시간과 외부공기의 유입에 따른 열분해된 물질과 공기와의 혼합이 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

3.3 외부공기의 유입에 따른 착화특성

폭발통 상부에 있는 격막이 폭발압력에 의해 파열되면서 폭발통 내부의 연소가스가 방출되고 순간적으로 통의 내부는 부압이 되어 외부의 공기가 폭발통 내부로 유입되게 되는데 이러한 기체의 흐름이 고체가연물의 착화에 미치는 영향을 알아보기

위하여 격막의 직경을 10cm와 5cm로 변경시키면서 이때의 외부공기가 폭발통 바닥까지의 도달시간과 점화지연시간을 측정하였다. LPG의 농도는 2.5%와 3%를 추가하여 실험하였으며, 격막의 크기를 5cm로 하였을 때 폭발통의 용적에 비하여 방출구의 면적이 작아서 관망창으로 사용한 아크릴이 파손되었기 때문에 격막직경 5cm에서의 점화확률 측정실험은 하지 못하였다.

외부공기 유입시간을 측정한 결과 Fig. 8과 같이 격막의 직경이 작은 경우 유입시간이 짧아지는 데 이는 폭발압력이 좁은 격막부를 통해 외부로 방출될 때 격막이 큰 경우보다 상대적으로 빠른 속도로 밖으로 배출되고 이에 따라 외부의 공기도 빠른 속도로 유입되기 때문이다.

한편, 농도가 2.5%나 6% 이상에서는 LPG의 농도가 당량농도에 비해 너무 낮거나 높기 때문에 폭발압력이 작아서 압력에 의한 연소가스의 방출속도가 늦기 때문에 외부공기의 유입속도도 늦어지는 것으로 볼 수 있다.

또 Fig. 9는 격막의 크기에 따른 시료의 착화성을 실험한 결과로 격막의 크기가 적고 외부공기의 유입속도가 빠를수록 고체가연물의 착화성이 높은 경향을 보여 주고 있다.

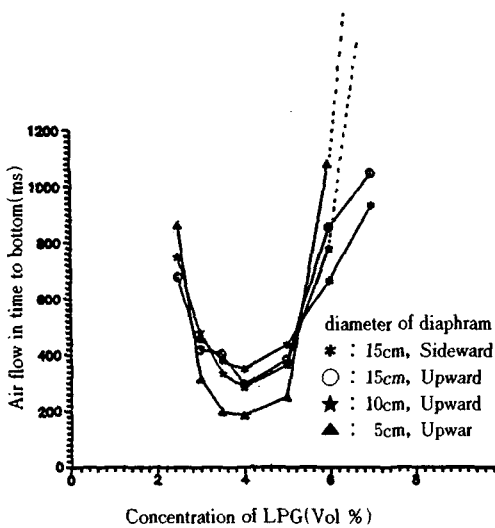


Fig. 8 Inflow time of outer air into the explosion chamber bottom after explosion with the variation of LPG concentration and diaphragm diameter

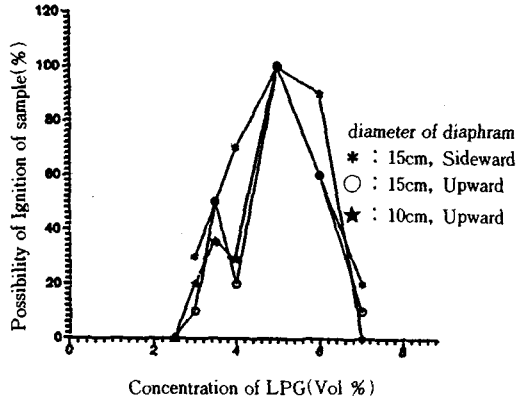


Fig. 9 Ignition possibility of test piece with the variation of LPG concentration and diaphragm diameter at the center position of bottom

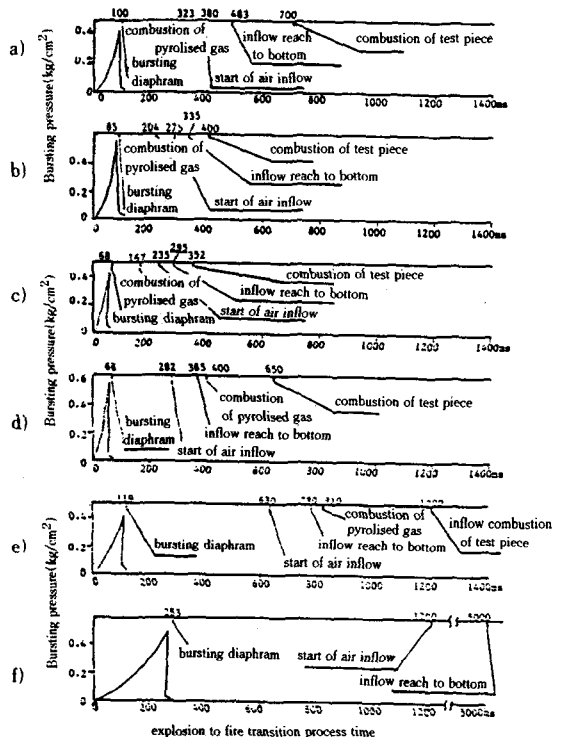


Fig. 10 The process of explosion to fire transition with the variation of LPG concentration. (diaphragm diameter is 10cm)
a) 3%, b) 3.5%, c) 4%, d) 5%, e) 6%, f) 7%

Fig. 6의 점화지연시간과 Fig. 8과 Fig. 9의 결과를 통해서 알 수 있는 것은 외부공기의 유입에 따른 열분해 생성물과의 혼합이 고체가연물의 착화에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

다음 Fig. 10은 LPG의 농도별로 가스폭발에 의한 고체가연물질의 착화가 진행되는 현상을 가시화한 결과를 종합적으로 분석하여 진행시간별로 정리한 것이다. 이 그림을 통해 알 수 있는 것은 LPG 농도가 4% 이하일때와 5% 이상에서의 연소현상이 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 4% 이하에서는 1차 연소가 외부공기의 유입없이 일어나지만 5% 이상의 농도에서는 외부공기가 유입된 후에 1차 연소가 일어남을 알 수 있었다. 여기서 1차 연소라 하는 것은 고체가연물이 폭발화염과 접촉하여 열분해된 가연성가스의 연소를 의미하여 2차 연소는 고체가연물이 연소되는 것을 말한다.

폭발통 상부의 격막은 폭발압력이 최대점이 되는 곳에서 파열되어 폭발연소된 기체가 밖으로 방출되고 외부공기가 폭발통 내부로 유입되는데 앞에서 설명한 것처럼 화염전파속도가 빠를수록 폭발후 가스의 방출속도가 빠르고 따라서 외부공기의 유입속도도 빨라지는 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

이상과 같은 실험결과를 통해 가스폭발로부터 화재로의 천이현상에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 가연성가스의 폭발에 의한 고체가연물의 연소는 열분해가스의 1차 연소와 열분해된 고체가연물이 연소하는 2차 연소로 나눌 수 있다.
- 2) 가스폭발에 의한 고체가연물로의 착화는 고온의 폭발화염 및 연소가스와의 접촉시간이 길수록

용이하다.

- 3) 가스폭발로부터 고체가연물이 연소되는 기구는 먼저 가연성 혼합가스의 폭발에서 발생하는 고온의 열에 의해 고체가연물이 열분해되고 열분해된 가스가 통 내부의 미연소된 산소나 또는 외부에서 유입된 공기와 혼합하여 고체가연물 주위의 열분해 물질의 기상발화가 일어나고 여기서 생성된 화염의 열 및 가스폭발시 생성된 열에 의해 고체시료가 연소되는 것으로 생각된다.
- 4) 따라서 가스폭발에 의한 고체가연물의 착화현상은 대류와 복사에 의한 열전달, 외부공기의 유입 및 열분해된 가연성물질과 공기와의 혼합가스의 착화가 가스폭발로부터 화재로의 천이현상을 지배하는 것으로 볼 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) 김영대 역, "가스폭발 예방기술", 도서출판 세화.
- 2) 오규형 외, "가연성가스의 폭발특성에 관한 연구", 한국산업안전학회지 Vol.7 No.3, 1992.
- 3) T.Hirano외, "An Experimental Study of Gas Explosion-Fire Transition Phenomena Using Small Scale Model", Bulletin of Japan Association for Fire Sci. and Eng. Vol.36 No.1.2, 1987.
- 4) 安全工學協會, "爆發", 海文堂, 1983.
- 5) 綜合安全工學研究所, "火災 爆發 危險性的 測定法", 日刊工業 新聞社, 1982.
- 6) J.J. Ohlemiller외, "13th Symp. on Comb., p1087, 1970, The Comb. Inst.
- 7) 安全工學 協會, "火災", 海文堂, 1983.