



가연성 가스의 혼합비에 따른 연소 및 폭발특성에 관한 연구

†오 규 형

호서대학교 소방학과

(2005년 9월 2일 접수, 2005년 12월 20일 채택)

A Study on the Combustion and Explosion Characteristics According to Mixing Ratio of Gas

†Kyu-hyung Oh

Department of Fire Protection Eng., Hoseo University

(Received 2 September 2005, Accepted 20 December 2005)

요 약

LPG는 가정용 및 자동차용 연료로 우리 생활 주변에 많이 사용되고 있는 가연성 기체이다. LPG의 생산 공정의 개선 등을 조정하고 연료로서의 특성을 개선하기 위한 LPG 성분 조정에 대한 연구들이 일부 진행되고 있다. 이러한 특성을 개선하기 위한 방법의 하나로 LPG의 가스들을 혼합하는 방법이 고려되고 있다. LPG는 가정용으로 주로 사용되는 프로판과 자동차용으로 사용되는 부탄이 대부분이지만 프로필렌과 부틸렌도 LPG의 한 종류이다. 본 연구에서는 프로판과 부탄에 프로필렌을 혼합할 경우 폭발특성과 연소 배기가스의 성분변화 등을 측정하여 프로판과 부탄에 프로필렌이 혼합될 경우 특성치의 변화를 살펴보고자 하였다. 실험결과 불포화 탄화수소인 프로필렌이 혼합될 경우 폭발압력 및 압력상승속도가 증가할 수 있고 프로필렌 혼합비가 클 경우 연소가스 중에 CO 가스의 발생량이 증가할 가능성이 있음을 알 수 있었다.

Abstract – Liquefied Petroleum Gas(LPG) is combustible gas which used for fuel for domestic and automobiles. A research for adjust a component of LPG to improve the fuel characteristics and control the manufacturing process of that is carrying in petrochemical industry. Some kinds of LPG blending is considered as a adjusting method to control component of LPG. LPG is mainly propane for domestic use and butane for automobile use but propylene and butylene also a kind of LPG. Change of explosion characteristic and combustion gas component by mixing of propylene in propane and butane was measured and analysed in this research. Based on the result of experiment, it was found that explosion pressure and pressure rise rate was slightly increased with mixing rate of propylene and it was considered the possibility of increasing the CO concentration in combustion gas with increase the mixing rate of propylene.

Key words : Gas explosion, LPG blending, Combustion gas

I. 서 론

액화 석유 가스는 가정용 연료로 주로 사용되는 프로판과 자동차 연료로 사용되는 부탄을 통칭하는 것으로 알려져 있으나 프로필렌이나 부틸렌 등도 액화 석유가스(LPG)이다. 프로필렌과 부틸렌은 연료로 사용되는 것보다는 석유화학공업의 원료로 대부분 사용되고 있으나 석유화학 산업에서 과잉 생산이 될 때는 프로필렌이나 부틸렌을 기준에 연료로 사용하는 프로판이

나 부탄에 일정 비율로 혼합하여 사용하므로써 액화석유 가스의 수요에 대한 공급을 조절할 수 있고 석유화학 제품의 수급을 조절할 수 있는 방법이 될 수도 있다. 그러나 이런 문제를 해결하기 위해서는 액화석유가스 사업법 등의 제도적인 문제와 혼합비에 따른 연료로서의 품질과 성능에 대한 실증적 연구가 필요하다. 가스폭발특성에 대한 일반적인 연구는 Coward와 Jones 등의 폭발 한계 측정에 관한 연구와[1] 혼합가스의 폭발 범위 측정을 위한 柳生昭三 등의 연구가[2] 있었으며 가정용 연료로 사용되는 프로판 주성분의 액화 석유 가스와 자동차 연료로 사용되는 부탄 주성분의 액

†주저자: khoh@office.hoseo.ac.kr

화석유 가스에 대하여는 폭발특성에 대한 연구가 많이 이루어져 왔으며 각각의 용도에 따라 장단점과 연소특성 등이 연구되어졌다[3-6]. 본 연구에서는 앞에서 설명한 것처럼 프로필렌을 연료로서 사용하기 위해 기존의 프로판과 부탄에 혼합할 때 폭발 특성 및 연소특성에 어떤 영향을 미치는지에 대한 실험적 연구를 통해 향후 실용화에 대비할 수 있는 기초 자료를 도출하고자 하였다. 실험의 내용은 크게 두 가지로 그 하나는 기존에 연구하던 폭발 실험 장치를 통해 각 단일 가스들에 대한 폭발특성과 프로필렌의 혼합비에 따른 폭발 특성들을 연구하였으며 다른 하나는 연소기에서의 연소 시 발생하는 일산화탄소와 soot의 생성에 대한 상대적 비교를 통해 혼합가스의 폭발 및 연소특성을 고찰하고자 하였다.

II. 실험

2.1. 시료

시료 가스는 가정용 또는 자동차 연료로 사용되는 프로판, 프로필렌 및 부탄에 대하여 순수가스 및 프로판과 부탄에 프로필렌을 혼합하였을 경우의 폭발 특성과 연소실험을 실시하여 연료로

사용될 때의 특성과 문제점들을 예측하고자 하였으며 시료 가스들의 기본적인 특성들은 Table 1과 같다[7,8].

Table 1. Properties of sample gas.

Gas	Propane	Propylene	Butane
Combustible range (Vol. %)	2.2~9.5	2~11	1.6~ 8.4
Combustion velocity (cm)	43	44	38
Combustion heat (kJ/mol)	2043	2657	1926
Combustion heat (MJ/kg)	46.34	45.78	45.71
M.I.E. (mJ)	0.38	0.31	0.38

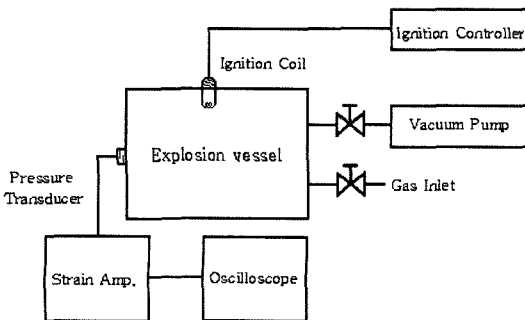


Fig. 1. Schematic diagram of explosion experiment.

2.2. 실험장치 및 방법

혼합가스 폭발특성 실험을 위한 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 폭발용기는 20.5 l의 장방형 용기를 사용하였고 압력센서는 Strain type을 이용하여 압력을 측정하였으며 점화장치는 기존의 고전압 변압기의 노이즈를 피하기 위해 발파기용 점화장치를 이용하였다[9].

실험방법은 통상적인 가스 폭발 특성 실험과 같이 용기를 진공으로 만든 후 시료가스를 일정량 주입시키고 밸브를 열어 유입되는 공기의 흐름에 의한 난류로 자유롭게 혼합되도록 하고 용기 내부 압력이 대기압 상태가 되도록 하였다. 가스혼합 후 약 1분간의 안정시간을 갖고 착화시키고 폭발압력 등의 폭발특성을 디지털 오실로스코프를 이용하여 데이터를 측정하였다[4]. Fig. 2는 버너 연소 시 연소가스의 성분을 측정하기 위한 실험장치의 구성 개략도이다. 연소장치로는 유량계에 의한 가스의 유량을 조절하면서 연소시킬 수 있도록 야외용 버너를 개조하여 사용하였다. 가스의 유량은 버너 노즐에서 화염이 부상하지 않는 범위에서 최대 유량이 되도록 전자유량계를 사용하여 1.4 l/min로 조절하였으며 이 유량은 통상적으로 사용되는 버너의 최대 연소시의 유량보다 훨씬 높은 악조건의 실험이 되었다. 가스유량이 크기 때문에 공기 중에서는 기화량이 부족하여 가스가 충분히 기화될 수 있도록 비커 속에 용기를 넣고 물을 넣어 증탕식으로 가열하여 시료가스의 양이 일정하게 공급되도록 하였으며 연소시간은 배기가스의 농도가 안정되는 시간으로 약 6분 정도로 하였다. 연소 후 가스의 조성은 Fig. 2의 사진과 같이 연소가스가 후드의 덕트를 따라 배출되게 하였으며 연소가스 분석기의 가스흡입관을 덕트 내에 삽입하여 연소배기가스의 조성을 측정하였다.

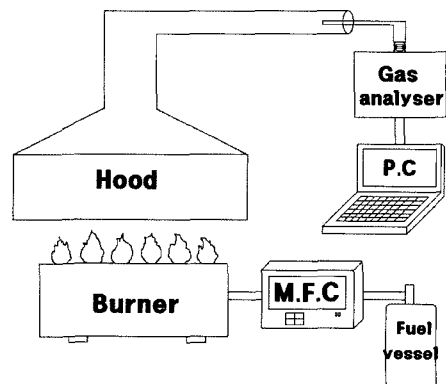


Fig. 2. Schematic diagram of combustion experimental set up.

III. 결과 및 고찰

3.1. 각 순수가스의 폭발특성비교

가) 폭발 압력 비교 실험 결과

Fig. 3는 각 가스의 공기와의 혼합비에 따른 폭발특성을 나타내었고 Fig. 4는 각 가스들의 당량비에 따른 폭발특성을 나타낸 것이다. Fig. 3와 Fig. 4에서 보여주는 것처럼 최대폭발압력은 프로필렌이 가장 높고 다음으로 부탄이 프로판 보다 약간 높게 나타남을 볼 수 있는데 이는 예상했던 것처럼 올레핀계인 프로필렌의 반응성이 크고 연소열이 크기 때문인 것으로 생각되며 프로판과 부탄은 약간의 압력차이가 있지만 미소한 차이로 연료로서의 특성에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. Fig. 4에서 당량비에 따른 폭발특성비교에서는 연료혼합비가 당량비로 1.2 정도에서 최대값을 나타내어 폭발 사고가 발생할 경우에는 위험성이 가장 클 것으로 예상되며, 당량비 1.0에서 1.4 범위에서의 폭발압력 측정결과 값의 차이가 미소하여 이 혼합비 범위에서 폭발이 될 경우 위험성이 크기 때문에 이 농도

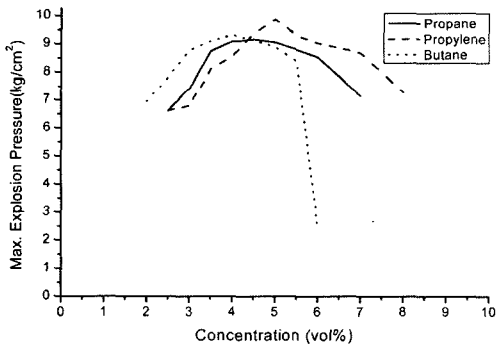


Fig. 3. Maximum explosion pressure according to concentration.

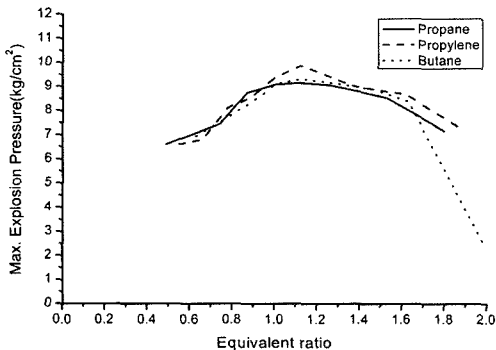


Fig. 4. Maximum explosion pressure according to stoichiometric ratio.

범위에서의 폭발분위기가 생성되지 않도록 하는 것이 안전을 위해서는 중요하다. 그러나 폭발에너지를 이용하는 경우는 당량비로 1.0에서 1.4 사이에서 연소시키는 것이 바람직하며 경제적 운전과 배기가스를 고려할 경우는 당량비 1.1의 혼합비가 최적 혼합비가 될 것으로 예상할 수 있었다.

나) 폭발 압력 평균 상승 속도

Fig. 5와 Fig. 6은 최대폭발압력을 착화의 시작부터 끝날 때까지의 시간으로 나눈 값으로 폭발압력평균상승속도이다. 폭발압력과 마찬가지로 프로필렌이 가장 크며, 부탄에 비해 프로판이 높아진 것을 볼 수 있는데 이는 부탄보다 프로판의 연소속도가 빠르기 때문인 것으로 생각된다. 당량비에 따른 폭발압력 평균상승속도 역시 당량비가 1.2부근에서 가장 큰 것을 나타내고 있다. 이러한 폭발압력 상승속도 역시 그 값이 클수록 사고시에는 피해가 클 것으로 예상되며 폭발방호나 방지 조치를 위해서는 더욱 짧은 시간이 요구된다. 그러

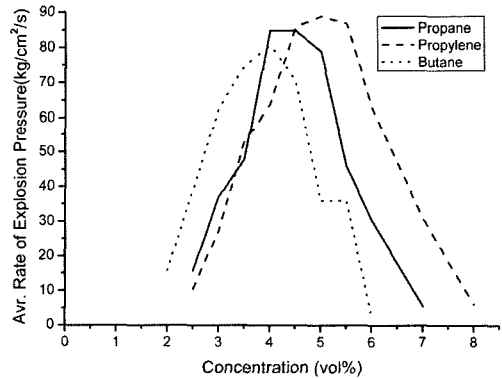


Fig. 5. Explosion pressure rise rate according to concentration.

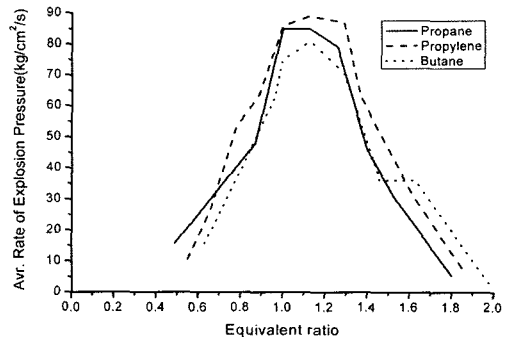


Fig. 6. Explosion pressure rise rate according to stoichiometric ratio.

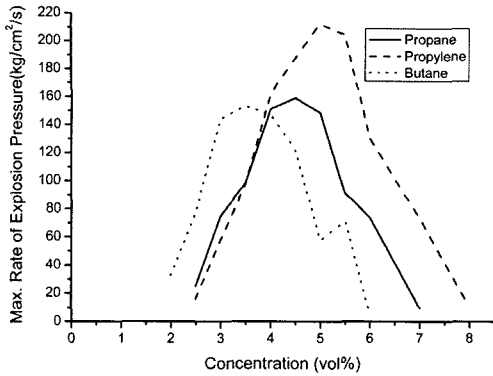


Fig. 7. Maximum explosion pressure rise rate according to concentration.

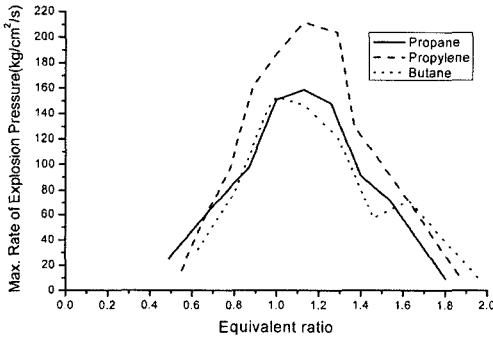


Fig. 8. Maximum explosion pressure rise rate according to stoichiometric ratio.

나 LPG가 연료로 사용되는 경우를 생각하면 단위시간당 에너지 밀도가 높아져 폭발압력상승속도가 큰 것이 특별한 용도에는 유리할 것으로 판단된다.

다) 폭발압력 최대상승속도

Fig. 7과 Fig. 8에서 보여주고 있는 폭발압력 최대 상승속도는 폭발압력 측정 시 오실로그래프의 상승 곡선에서 기울기가 가장 큰 변곡점 부분의 순간 압력 상승속도를 나타내는 것으로 그 의미는 각 가스의 순간적인 반응 속도라고 해석할 수 있다. Fig. 7에서 보여주고 있는 것처럼 점화에너지가 낮고 반응성이 큰 프로필렌이 가장 빠르고 프로판과 부탄이 비슷한 것을 알 수 있으며 폭발압력 평균상승속도의 약 2배가 됨을 알 수 있다.

3.2. 프로필렌 혼합비에 따른 폭발특성 비교

Fig. 9에서 Fig. 15는 프로판과 부탄에 프로필렌을 2%에서 20%까지 혼합한 것을 공기와 혼합비를 당량비

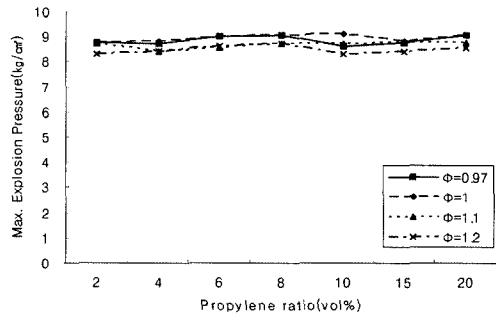


Fig. 9. Maximum explosion pressure according to propylene mixing ratio in propane.

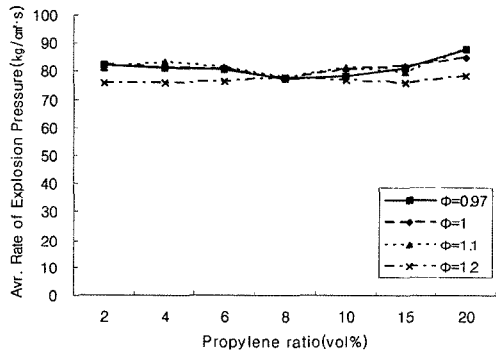


Fig. 10. Average explosion pressure rise rate according to propylene mixing ratio in propane.

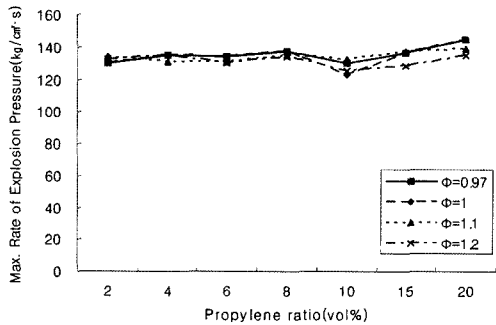


Fig. 11. Maximum explosion pressure rise rate according to propylene mixing ratio in propane.

로 0.97, 1, 1.1, 1.2 네 종류로 변화시키면서 각각의 폭발특성을 측정하였다.

Fig. 9에서 Fig. 11에 나타난 바와 같이 폭발압력과 압력상승속도가 프로필렌 혼합비가 10% 이하인 경우는 큰 변화를 보이지 않고 있으나 15% 이상에서는 프로필렌의 농도증가에 따라 약간의 상승 경향이 나타나

기 시작하는 것을 볼 수 있다. 이는 앞의 순수가스의 폭발특성 실험결과에서 나타난 바와 같이 프로필렌의 비율이 증가할수록 폭발압력 및 압력상승속도의 증가를 예측할 수 있었으며 10% 미만에서는 그 영향이 크지 않음을 보여주었다.

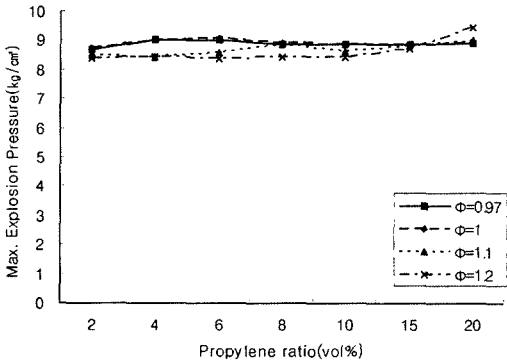


Fig. 12. Maximum explosion pressure according to propylene mixing ratio in butane.

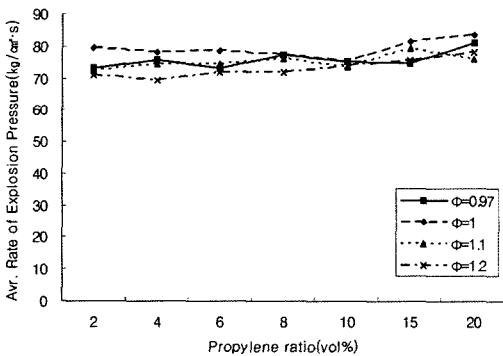


Fig. 13. Average explosion pressure rise rate according to propylene mixing ratio in butane.

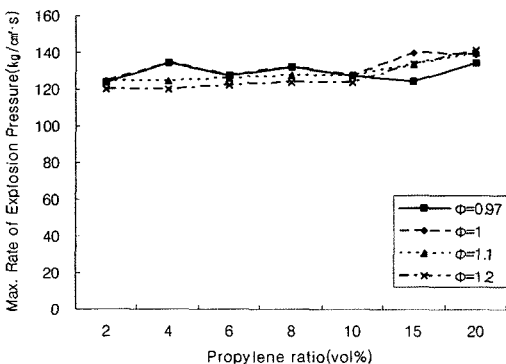


Fig. 14. Maximum explosion pressure rise rate according to propylene mixing ratio in butane.

3.3. 연소 특성 측정

가) 연소가스 조성 측정

현재 가정용 연료로 사용하고 있는 프로판에 프로필렌을 첨가하였을 때 연소배기가스의 조성 변화가 어떻게 변화되는지를 살펴보기 위하여 프로판에 프로필렌을 2%, 5%, 7%, 10%, 15%, 20%로 변화시키면서 연소가스의 조성을 측정하였다. 연소가스의 성분 중 가정에서 질식 사고의 원인이 될 수 있는 일산화탄소와 이산화탄소의 조성만을 결과에 설명하였다.

LPG중 프로판의 공기 중에서 연소에 의한 이산화탄소의 농도는 완전연소 반응을 가정하면 다음반응식과 같이 11.6%로 계산할 수 있고 혼합 가스들의 경우에도 화학 양론적으로 계산이 가능하나 일산화탄소의 발생량은 이론적 계산으로는 예측하기 곤란하였다.

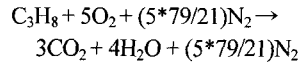


Fig. 15는 프로필렌의 혼합비에 따른 CO₂의 농도로 혼합비에 따라 CO₂ 농도가 약간씩 변화하였으나 변화의 추이가 혼합비의 차이에 따른 일정한 경향을 나타내지는 않았으며 1.8 ± 0.2% 이내에서 안정적이었다. Fig. 16의 CO의 농도는 프로필렌의 혼합비가 큰 15%와 20%에서 약간 높은 값을 나타내었으며 나머지 조성에서는 혼합비의 조성에 관계없이 약 20 ± 5 ppm에서 안정적으로 발생되는 것을 알 수 있었다. 따라서 프로판에 프로필렌이 혼합될 경우 CO의 발생농도가 약간 증가하는 경향을 보인 15%보다는 낮게 하는 것이 가정에서의 연료로 사용하는데 문제가 없을 것으로 판단된다. 한편 실험에서 측정된 농도가 이론적 계산 값보다 낮은 것은 연소 실험장치의 덕트 내에 외부공기의 유입과 함께 측정된 값들로서 완전한 연소가스의 조

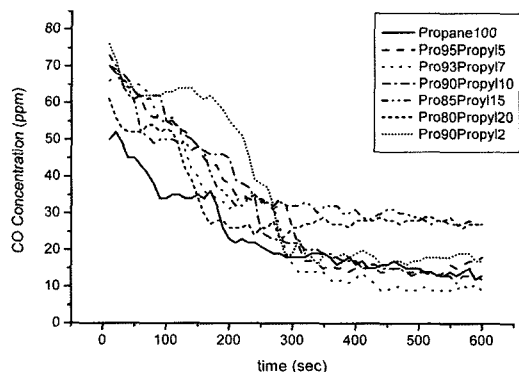


Fig. 15. CO concentration in combustion of propane-propylene mixture according to propylene ratio.

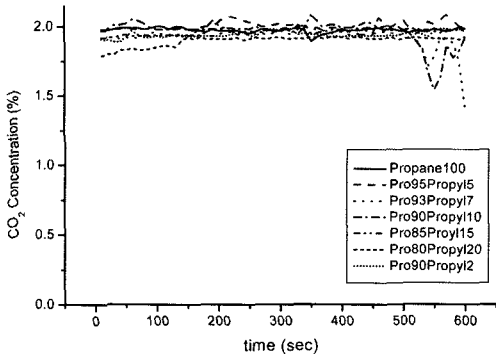


Fig. 16. CO₂ concentration in combustion of propane-propylene mixture according to propylene ratio.

성능도만이 아니며 가스혼합비에 따른 연소가스의 조성을 상대적으로 비교한 결과들이기 때문이다.

나) Soot 발생 관찰

현재 가정용 연료로 사용하고 있는 프로판에 프로필렌을 첨가하였을 때 soot의 발생현상을 살펴보기 위하여 프로판에 프로필렌 혼합비를 부피비로 5%, 10%, 15%, 20% 4가지로 변화시키면서 연소실험을 하였다. 실험방법은 가정에서 요리하는 경우를 가정하여 스테인리스강으로 만든 용기에 물을 넣고 개조한 야외용 버너로 가열하여 바닥면에 soot가 부착되는지를 관찰하였다. 가스의 연소는 두개의 유량계를 사용하여 프로필렌의 혼합비를 조절하면서 각각의 혼합비에서 1시간씩 연소시켰다. Fig. 17은 soot의 발생을 관찰하기 위한 실험장치 사진이다. 실험 후의 가열면을 육안으로 관찰하여 soot의 발생이 나타나지 않아 백상지로 바닥 면을 닦아보아도 전혀 묻는 것이 없었다. 이는 실험에 사용된 연소기나 가정용 연소기의 경우 분젠식으로 연료와

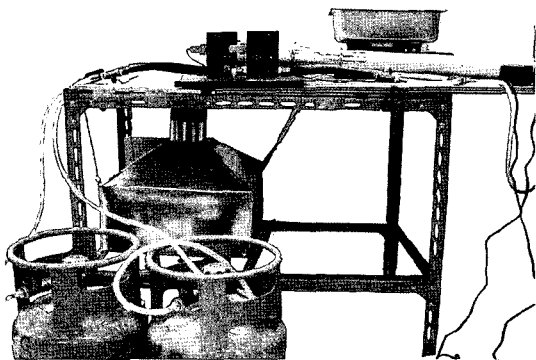


Fig. 17. Photograph of soot generation experiment during Propane-Propylene mixture combustion.

공기가 연소 직전에 대부분 미리 혼합되어 연소되는 예 혼합 연소 형식으로 거의 완전연소 되기 때문에 soot의 발생은 없는 것으로 보이며 10% 미만으로 프로필렌이 혼합될 경우 가정용 연료로서 soot의 발생이 문제되지 않을 것으로 판단되었다.

IV. 결 론

연료로 사용되고 있는 가연성 가스의 연료 특성을 개선하고 향후 연료의 수요와 공급에 따른 문제들을 사전에 분석하기 위하여 수행한 연구 결과 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1. 순수 가스들의 폭발 특성 실험 결과 불포화 탄화수소인 프로필렌이 폭발압력 및 압력 상승 속도가 프로판과 부탄보다 높았다.
2. 최대폭발 압력 상승 속도는 평균 폭발 압력 상승 속도의 약 1.8~2.2배의 값을 나타내었으며 프로판과 부탄에 비해 프로필렌의 경우가 더 높은 값을 나타내었다.
3. 포화 탄화수소인 프로판과 부탄에 프로필렌을 혼합할 경우 프로필렌의 혼합비가 10% 이하에서는 폭발 특성에 미치는 영향이 적으나 그 이상 증가할 경우 프로필렌의 영향에 의한 폭발 압력 및 압력상승 속도 등이 증가하는 경향을 보였다.
4. 프로필렌을 10% 이상 혼합할 경우 연소가스 중 일산화탄소의 발생량이 약간 증가하는 경향이 있어 기존의 프로판 연료 및 부탄 연료에 프로필렌 혼합 시는 10% 미만을 첨가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 호서대학교 특별연구비 지원으로 수행되었으며 지원을 감사드립니다.

참고문헌

[1] Coeard, H.F. and G.W. Jones, "Limits of Flammability Limits of Gases and Vapors", U.S Bureau of Mines, Bulletin No. 503 (1952)
 [2] 柳生昭三, "混合가스의 爆發範圍", 安全工學, 2(1) 26-36, (1963)
 [3] 오규형, "내압방폭을 위한 safe Gap의 측정에 관한 연구", 한국가스학회지, 1(1), 1-6, (1997)
 [4] 오규형, "가스혼합물의 폭발압력과 연소열의 상관관계연구", 한국가스학회지, 1(1), 49-55, (1997)
 [5] 오규형, "실내 LPG 누출시 폭발특성에 관한 연구",

오규형

- 한국가스학회지, 3(3), 51-57, (1999. 12)
- [6] 오규형, “불균일 농도 LPG의 폭발 특성에 관한 연구”, 한국 화재.소방학회지 17(4), -111-117, (2003)
- [7] 김 홍, 신창섭, 김영수, 추병길, 인세진, 방폭공학, 동화기술, 2001
- [8] 오규형, 김홍, 인세진, 황갑성, 연소학, 동화기술, 1997
- [9] 오규형, 이광원, 이성은, “수소의 폭발 특성에 관한 연구”, 한국 수소 및 신에너지학회지, 15(3), 228-234, (2004)