

C3 및 C4 LPG의 폭발특성에 관한 연구

이진영 · 오규형* · 박승일 · 나선중 · 이광원**

호서대학교 대학원 · *호서대학교 소방학과 · **호서대학교 안전시스템공학과

1. 서 론

석유화학공업의 발달로 국내에서 생산되는 원유 및 납사 등의 물량이 크게 증가하였으며 이와 함께 석유화학산업의 부산물의 발생량도 크게 증가하였다. 프로판과 부탄 역시 석유화학산업의 부산물로 생성되는 품목들로 이것들에 대한 용도개발과 부가가치를 높이기 위한 연구가 필요하다. 국내에서의 LPG시장도 휘발유가격의 상승 및 환경문제 등으로 기존의 휘발유에서 LPG로의 전환과 함께 사용량이 급격히 증가하고 있다. 그동안 LPG는 주로 정유산업에 의해 생산되었으며 자동차의 특수성으로 인해 정유사 생산제품이나 수입제품을 사용하도록 되어왔다. 국내 생산량으로는 수요를 충족하지 못해 수요량의 절반가량을 수입하는 현 실정을 감안할 때 석유화학 산업의 부산물로도 생산되는 프로판과 부탄 등 LPG를 자동차 연료로 사용하는 것은 기업의 부가가치 창출은 물론 국가적으로도 에너지의 수입 대체효과를 가져올 수 있는 아주 적절한 방안이라 하겠다.

그러나 자동차 연료로서의 특수성을 고려하여 기존 사용되던 LPG와의 호환성 및 적합성들을 고려하여 연료의 연소특성과 기존 자동차에 적응성 등을 연구하여 소비자들이 만족할 수 있는 양질의 에너지공급을 위해서는 프로판과 프로필렌 및 부탄에 대한 물리화학적인 특성과 자동차 부품에 미치는 영향 및 실제 적용들에 대한 연구가 필요하다.

자동차에 사용되는 부탄의 경우 겨울철 증기압의 낮아짐으로 시동성을 향상시키기 위해 프로판을 15~30% 범위로 첨가하여왔다. 석유화학 산업에서 부산물로 생산되는 LPG중에는 프로필렌도 있어서 증기압 상승을 위한 혼합연료로 프로필렌의 사용도 고려해볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 프로판 대신 프로필렌을 부탄에 혼합할 경우 자동차 연료로서의 적합성 등을 고찰하기 위하여 이들 LPG의 각각의 폭발특성과 부탄과 프로판 및 부탄과 프로필렌의 혼합비를 변화시켰을 때의 폭발 특성과 각각의 경우에 화염전파속도 등을 측정 비교하였다.

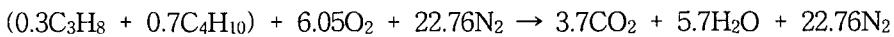
2. 실험

2.1. 시 료

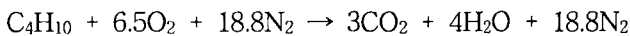
실험에 사용된 시료는 S사에서 생산한 C₄-LPG를 비롯하여, 프로판 및 프로필렌을

사용하였다. S사의 C₄-LPG는 iso-butane 함량이 높아 55% 이상으로 기존 타 회사들의 LPG 보다 월등히 높아 자동차의 출력 및 겨울철 시동성이 양호한 것으로 알려져 있다. 기존에 차량에 사용되는 LPG중 C₄-LPG와 C₃-LPG가 7:3으로 혼합된 시료의 연소반응, C₃-LPG의 연소반응, C₄-LPG의 연소반응, 프로필렌 및 프로필렌과 C₄-LPG의 공기중 완전연소 반응은 각각 다음 식들과 같다.

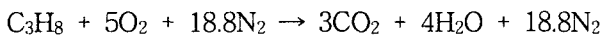
① C₄-LPG 70% : C₃-LPG 30% 혼합시료



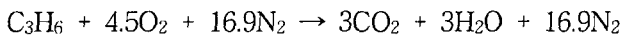
② C₄-LPG



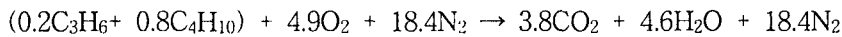
③ C₃-LPG



④ 프로필렌



⑤ C₄-LPG 80% : 프로필렌 20%



위 반응식에서 각 연료들의 공기 중 완전연소농도($\phi=1$) 혼합비는 C₃와 C₄가 3:7인 시료는 3.35%, C₄-LPG는 3.12%, C₃-LPG는 4.03% 프로판에 프로필렌 20%혼합한 연료는 4.1%이고 프로필렌은 4.46%이다. 혼합 연료는 프로판과 부탄 혼합비가 2:8 과 1:9인 것과 프로필렌과 부탄의 혼합비가 3:7과 1:9인 것도 사용하였다. 다음 표 1은 프로판과 프로필렌의 물성 비교 값이다

표 1 프로판과 프로필렌의 물성비교

물 성	프로판	프로필렌	물 성	프로판	프로필렌
연소열(KJ/mol)	2219	2058	비점(°C)	-42.1	-47.7
연소열(MJ/kg)	50.33	48.91	최소점화에너지(mJ)	0.38	0.31
이론공기량(m ³ /m ³)	23.82	21.44	증발잠열(kcal/mol)	4.487	4.4
연소범위(Vol%)	2.2~9.5	2~11.1	기액팽창비	253.8	272.6
연소범위(ϕ)	0.51~2.51	0.44~2.67	최대연소속도(cm/s)	43	43.8
최저발화온도(°C)	450	460	(at Vol%)	(4.56)	(5.04)

2.2. 실험장치 및 실험방법

2.2.1. 화염전파속도 측정

각 가스들의 공기와의 혼합기에 대한 폭발화염전파속도는 가로와 세로가 4.16cm × 4.16cm 이고 길이가 80cm인 폭발화염 전파속도 측정용 실험관을 사용하였다.

실험관의 전면과 후면은 투명한 아크릴로 제작되어 화염전파현상을 육안으로 관찰할 수 있으며 필요한 경우 고속카메라로 가시화 할 수 있게 하였다. 화염전파속도는 두 개의 광센서를 이용하여 측정하였으며 광센서는 점화원으로부터 약 30cm 와 63cm 떨어진 곳에 설치하였다.

시험은 먼저 실험관 내부를 진공으로 만든 후 미리 준비한 혼합가스를 주입하고 점화원 반대 끝면을 폭발 시 파열 될 수 있는 막으로 밀폐한 후 10kV의 전기불꽃으로 점화시킨다. 폭발화염의 전파속도는 시험관에 설치된 광센서에 의해 발생하는 두 개의 전압발생 신호의 시간 차이를 오실로스코프를 이용하여 측정한다. 다음 그림 1은 화염전파속도 측정장치의 개략도이고 광센서 사이의 시간차이 Δt 로 두 지점의 거리를 나눈 값이 화염전파속도이다.

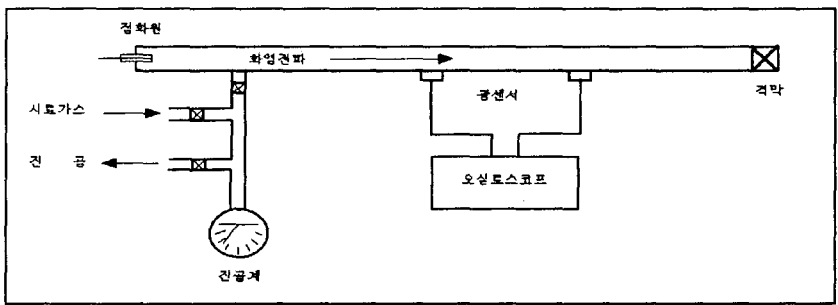


그림 1 화염전파속도 측정장치 개략도

2.2.2. 폭발압력 측정

실험에 사용된 시료가스들을 대상으로 폭발특성은 폭발압력과 압력상승속도를 측정하였으며, 폭발실험 용기는 직경이 20cm, 높이가 20cm로 부피가 약 6.3ℓ 인 원통형 용기를 사용하였다.

실험방법은 화염전파속도 측정의 경우와 비슷한 방법으로 진공펌프를 이용하여 용기내부를 진공으로 만든 후 일정농도로 혼합된 시료가스를 용기에 넣고 10kV의 고압전기불꽃으로 점화하였고 Strain형 압력센서를 이용하여 폭발압력을 측정하였다. 다음 그림 3은 폭발 압력측정실험장치의 개략적 구성도 이고 폭발특성은 오실로그래프에서 피크의 높이가 최대폭발압력이고, 압력상승 부분 중 기울기가 가장 큰 곳에서 최대폭발 압력상승속도를 계산하게 되며, 평균폭발 압력 상승속도는 폭발압력이 상승하기 시작하는 지점부터 피크의 최대점이 될 때까지의 시간으로 최대폭발압력을 나눈 값이 된다.

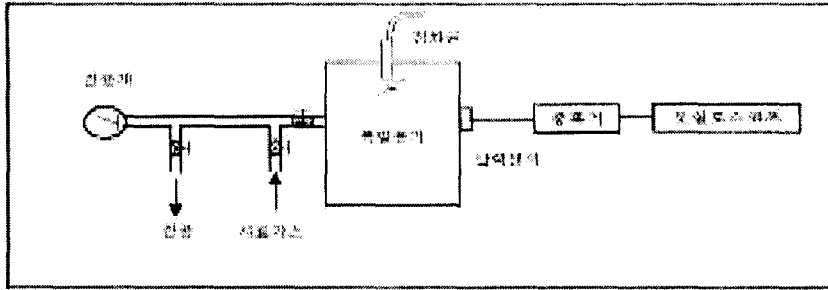


그림 2 폭발압력 측정장치 개략도

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 폭발 특성

제공된 시료 LPG에 대하여서는 완전연소 혼합비($\phi=1$)를 중심으로 3%에서 6%까지 0.5% 단위로 농도를 변화시키며 각각 화염전파속도와 폭발압력을 측정하였다. 실험결과는 다음 그림4에서 부터 그림 6에서 보여주는 바와 같이 프로필렌의 폭발압력이 다른 시료보다 높은 값을 보여주고 있으며, 부탄에 프로판을 혼합한 경우에 비하여 프로필렌을 혼합한 경우가 폭발특성이 우수한 것을 보여주고 있다. 또한 부탄과 프로필렌의 혼합비에서 20%의 경우가 가장 높은 폭발압력을 보여주고 있어서 부탄에 프로필렌을 blending 할 경우 10%정도에서 자동차의 출력이 가장 크게 될 것을 예측할 수 있다.

그림4에서 보여주는 것처럼 C₃-LPG와 C₄-LPG의 최대 폭발압력은 2% 범위 내에서 비슷한 값을 갖고 있으며 각각 당량농도 보다 약 10% 높은 농도에서 최대값을 나타내고 있어 일반적인 탄화수소 폭발특성과 일치하고 있음을 나타내었다. 한편 C₃-LPG와 C₄-LPG가 농도가 높아질수록 폭발압력이 빠르게 감소하는데 비해 프로필렌의 경우는 넓은 범위에 걸쳐 폭발 압력이 높게 나타났음을 보여주고 있다.

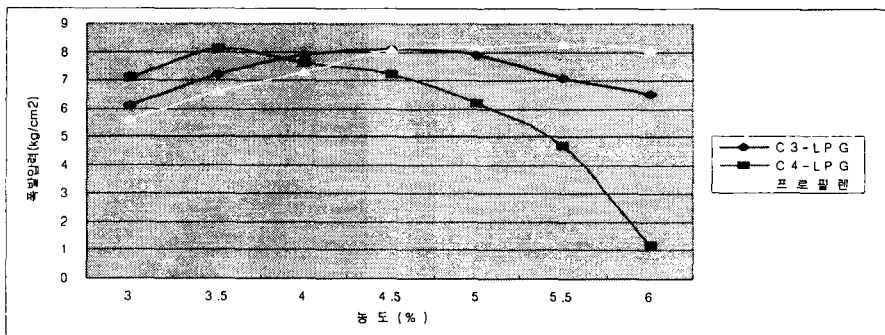


그림 3 부탄, 프로판 및 프로필렌의 폭발압력

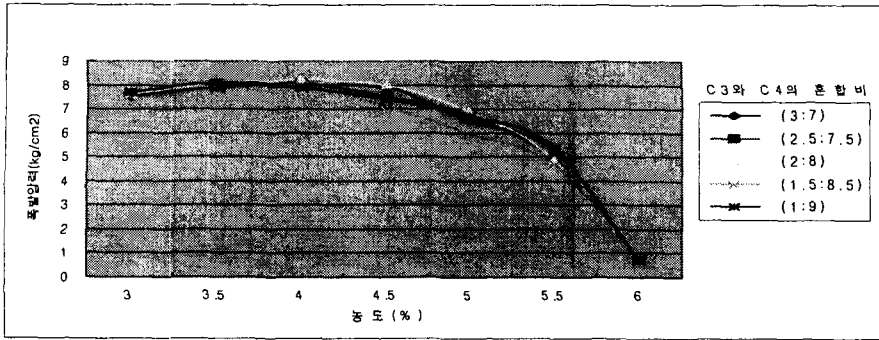


그림 4 부탄-프로판 혼합비에 따른 폭발압력

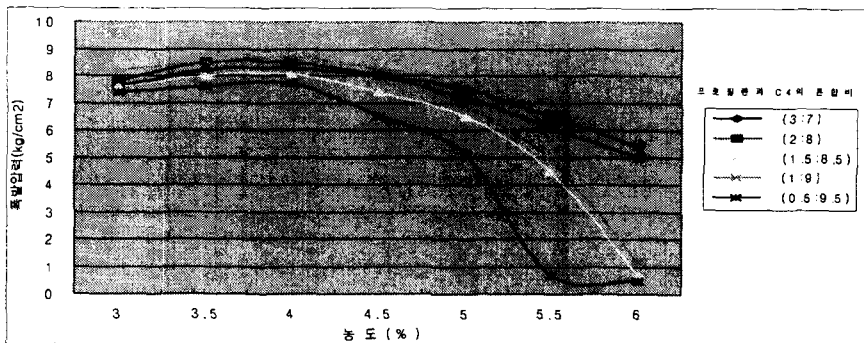


그림 5 부탄-프로필렌 혼합비에 따른 폭발압력

3.2 화염전파 속도

그림7의 폭발화염전파 속도 측정결과에서 나타남과 같이 당량농도 부근을 중심으로 프로필렌의 화염전파속도가 가장 빠르게 나타났으며 그림 8과 그림9의 부탄-프로판 및 부탄-프로필렌의 혼합비에 따른 화염전파속도 측정결과에서는 부탄-프로필렌의 혼합연료 중 프로필렌 30%의 경우가 최대값을 나타내었으며 프로판을 혼합하는 경우에 비하여 전반적으로 큰 값을 나타내었다. 따라서 부탄의 증기압을 위해 Blending할 경우는 프로판보다는 프로필렌을 선택하는 것이 자동차의 출력을 위해서는 우수한 연료가 될 것으로 보인다

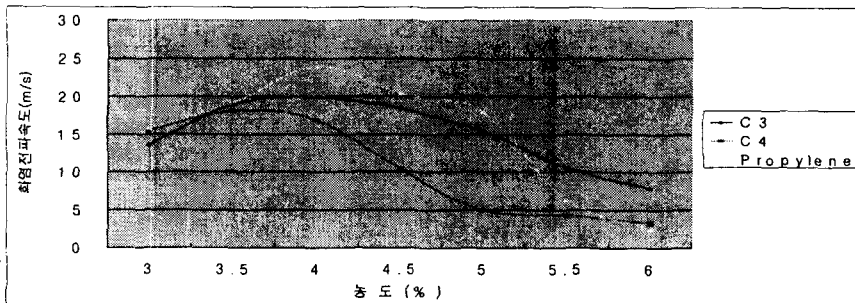


그림 6 부탄, 프로판 및 프로필렌의 화염전파속도

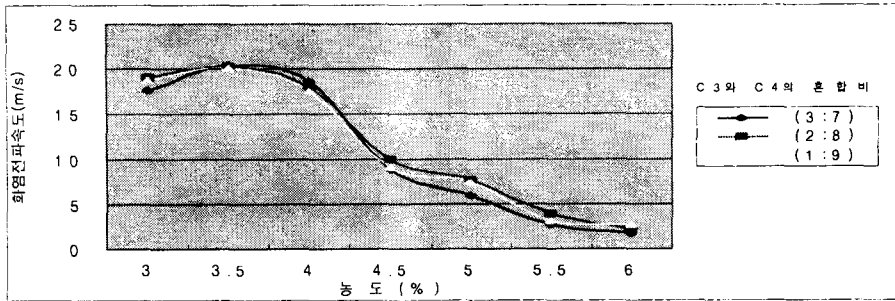


그림 7 부탄- 프로판 혼합비에 따른 화염전파속도

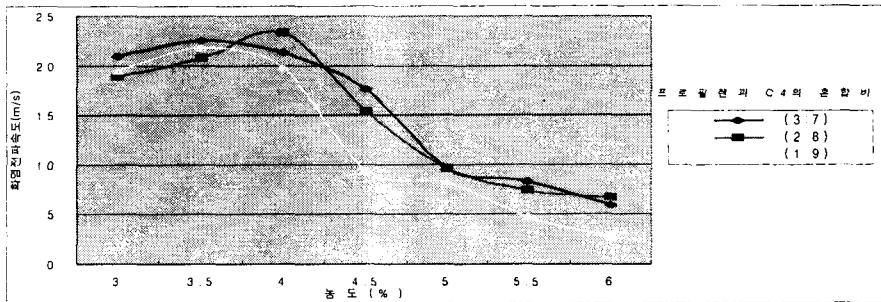


그림9 부탄- 프로필렌 혼합비에 따른 화염전파속도

4. 결론

그동안 자동차 연료로 사용하던 C4-LPG 부탄의 겨울철 시동성 향상을 위해 프로판을 일정 비율 혼합하여 사용해왔으며 아직까지 프로필렌을 혼합하는 시도는 없었다. 일반적으로 알칸계 탄화수소에 비해 불포화 탄화수소인 알켄계 탄화수소가 반응성이 커서 폭발화염전파속도나 폭발압력이 높은 것으로 알려져 있으며 점화에너지는 낮다. 본 연구에서 실험한 결과 이러한 특성들을 확인 할 수 있었으며 이러한 결과들을 바탕으로 가격 경쟁력이나 배관 상의 문제가 없는 한 프로판 보다는 프로필렌을 부탄에 blending 하는 것이 자동차 연료로서의 특성에 더 적합한 것을 알 수 있었으며 석유화학 공정에서 생산되는 프로필렌의 활용도를 넓힐 수 있어 부가가치를 향상시킬 수 있다.