

석탄가스화 연료의 정적 예혼합 연소특성

김 태 권 · 장 준 영
계명대학교 기계자동차공학부
(2006년 2월 2일 접수; 2006년 6월 7일 채택)

Premixed Combustion Characteristics of Coal Gasification Fuel in Constant Volume Combustion Chamber

Tae-Kwon Kim, Jun-Young Jang

School of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea
(Manuscript received 2 February, 2006; accepted 7 June, 2006)

The coal gasification fuel is important to replace petroleum fuel. Also they have many benefits for reducing the air pollution. Measurements on the combustion characteristics of synthetic gas from coal gasification have been conducted as compared with LPG in constant volume combustion chamber. The fuel is low caloric synthetic gas containing carbon monoxide 30%, hydrogen 20%, carbon dioxide 5%, and nitrogen 45%. To elucidate the combustion characteristics of the coal gasification fuel, the combustion pressures, combustion durations, and pollutants(NO_x , CO_2 , CO) are measured with equivalence ratios(ϕ), and initial pressures of fuel-air mixture in constant volume chamber. In the case of the coal gasification fuel, maximum combustion pressure and NO_x concentration are lower rather than LPG fuel. However CO and CO_2 emission concentration are similar to that of LPG fuel.

Key Words : Synthetic Gas, Coal Gasification, Combustion Pressure, Emission Concentration

1. 서 론

석탄가스화 연료는 기존의 석탄을 고체에서 기체로 연료상태를 바꾸어서 연소시킴으로써 유해배기 성분이 훨씬 저감되어 대기공해를 방지할 뿐만 아니라 석유보다 훨씬 저렴하며 에너지원의 다변화 정책 및 대체연료로서의 활용측면에서도 유리하다. 석탄가스화 시스템은 미분탄을 산소 및 질소와 함께 가스화로에 공급하여 석탄 내의 탄소 및 수소 성분을 가연성 가스인 일산화탄소와 수소 가스로 전환하며, 석탄내의 회분을 용융시켜 슬래크로 처리된다. 여기서 발생된 가스의 조성은 일산화탄소, 이산화탄소, 수소, 질소 등으로 구성된다. 이와 같은 가스화기술을 활용하여 엔진 및 각종 연소기의 연료로 사용할 수 있도록 개발하는 것은 대체에너지 개발, 에너지 수입대체 및 고정정 환경친화, 에너지 고

효율측면에서 필수적이라 할 수 있다^{1~5)}.

석탄가스화 연료를 실용화 단계에 적용하기 위해서는 연료의 연소속도, 연소기간, 유해생성물 농도, 회박연소한계 등 연소특성에 대한 파악이 필수적이다. 연료공기 혼합특성, 화염특성, 유해배출물 발생 기구 등의 연소상황에 맞는 현상의 검증을 위해 실제 엔진 및 연소기에서의 사용이 필요하다⁶⁾. 따라서 본 연구는 석탄가스화 연료의 연소특성을 규명하기 위해 연소실과 실험변수를 단순화시킨 정적연소실에서 LPG와 석탄가스화 연료의 혼합기 당량비 및 초기압력에 따라 연소압력, 유해배출물을 측정하여 비교 검토한다. 이를 토대로 가스엔진의 연료로서의 적용 가능성을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 정적연소실 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 정적연소실장치의 구성도를 나타낸 것이다. 실험장치는 정적연소실, 연료-공기 예혼합탱크, 점화장치, 압력측정장치, 배기

Corresponding Author : Tae-Kwon Kim, School of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea
Phone: +82-53-580-5551
E-mail: tkkim@kmu.ac.kr

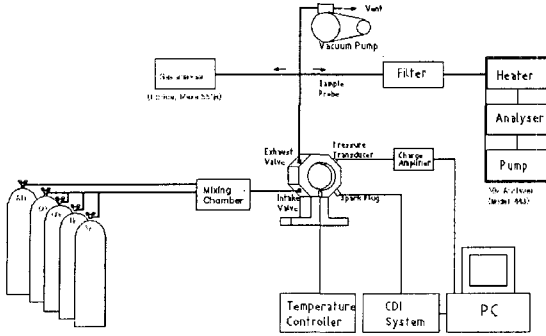


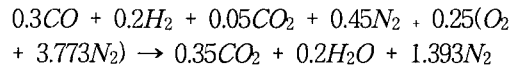
Fig. 1. Schematic of constant volume combustion chamber.

가스 계측장치 등으로 구성된다. 정적연소실은 내경 55mm, 폭 45mm, 체적 107cm³이다. 정적연소실 외형은 각종 주변장치의 부착이 용이하도록 원통형 8각형모양이며 재질은 내식성과 강도 및 가공성을 고려하여 두랄루민으로 사용하였다. 연소실의 전후면에는 가시화 및 연소 라디칼의 계측을 위해 직경 99mm, 두께 20mm의 FS(fused silica)창을 설치하였고, FS창과 연소실 사이에 기밀유지를 위해 석면을 삽입하였다. 정적연소실의 외측에는 점화플러그, 압력변환기, 흡배기 포트, 카트리지 히터, 열전대를 설치하였다. 점화플러그는 연소실 내에서 점화가 이루어지도록 하였으며 사용한 점화플러그는 시판되는 자동차용 점화플러그를 사용하였다. 압력 측정을 위하여 압전형 압력변환기(Kistler, 6061B)를 설치하였으며 압력변환기의 출력은 증폭기(Kistler, 5011)로 증폭되어 A/D 변환기를 통하여 데이터 처리장치에 기록된다. 본 실험에서는 압력 데이터를 1ms당 1개씩 측정하였다. 흡기포트는 연소실 벽에 접선방향으로 설치하여 유입시 혼합기의 스웰유동을 유도하였다. 연소기내의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 100W 용량의 카트리지 히터 3개를 연소기 외측에 설치하였고 연소실의 온도는 연소기 내벽면으로부터 5mm 떨어진 위치에 K-type 열전대(φ=1.6mm)를 삽입하여 자동온도조절장치를 이용하여 일정하게 유지시켰다. 점화장치는 연소실 내의 압축된 혼합가스를 전기불꽃으로 점화, 연소시키는 장치로서 축전기에 충전되는 충전전압을 변화시켜 점화에너지의 크기변화가 가능하도록 CDI(capacitance discharge ignition)형태로 하였다. 4μF용량의 축전기에 전압이 230V로 충전된 후 게이트펄스(gate pulse)가 가해지면 점화코일의 1차코일을 통해 방전이 이루어지도록 제작하였다. 정적연소실에서 발생하는 연소배기 가스를 측정하기 위하여 배기포트에 샘플링 프로브(sampling probe)를 설치하였고 이 샘플링 프로브는 NOx분석기(Rotork Analysis, model 443)와

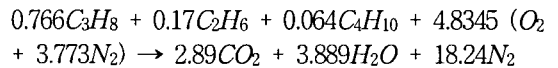
Gas-Analyser(Horiba, MAXA 554jk)에 연결되었다.

2.2. 실험방법

본 실험에 사용한 석탄가스화 연료로는 석탄가스화에 의해 발생한 연료성분과 같은 가스 성분(CO 30%, H₂ 20%, CO₂ 5%, N₂ 45%)을 혼합하여 사용하였으며 LPG연료와 비교하였다. 산화제로는 질소 79% 산소 21%로 혼합되어진 고순도 공기(순도 99.99%)를 사용하였다. 연료와 공기는 각각의 압력조정기(regulator)를 거쳐 각 기체의 분압을 기초로 하여 결정되어진 당량비(φ)로 예혼합탱크에 충전되었다. 당량비 설정을 위해 실험에 사용된 석탄가스화 연료와 LPG연료의 이론 완전연소방정식은 다음과 같다.



$$\left(\frac{Air}{Fuel}\right)_{stoich} = 1.458 \quad (1)$$



$$\left(\frac{Air}{Fuel}\right)_{stoich} = 15.65 \quad (2)$$

이론 완전연소방정식을 통해 두 연료가 완전연소하기 위해서는 완전히 서로 다른 공기연료비를 가짐을 확인할 수 있다.

정적연소실의 잔류가스를 진공펌프로 완전히 제거한 후 초기압력(initial pressure of mixture)과 당량비(equivalence ratio)조건에 의해 전압압력조정기를 거쳐 흡기포트를 통해 정적연소실로 주입된다. 정적연소실에 공급되는 혼합기의 초기압력은 0.1~0.8MPa 까지 0.1MPa 간격으로 변화시켰고 연료 공기혼합기의 당량비를 φ=0.6~1.4까지 0.1 간격으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 농도 및 압력측정은 동일 조건에서 5회 이상 실험을 행하고 평균치로 나타내었다. NOx분석기에서 NOx의 농도는 화학발광법(chemiluminescent detector)에 의해, Gas-Analyser에서 CO, CO₂의 농도는 비분산적외선법(non-dispersive infrared analysis)에 의해 측정되었다.

3. 결과 및 토의

Fig. 2는 정적연소기에서 연료-공기 혼합기의 초기압력(0.1~0.8MPa)을 변수로 하여 당량비 φ = 0.6~1.4에 대한 연소최고압력을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)의 석탄가스화 연료의 경우, 연소최고압력이 희박혼합기인 φ = 0.6에서 가장 낮게 나타내고 있으며 당량비 증가에 따라 증가하고 있으며 φ = 1에서 최

대값을 가지며 점차 감소되어지고 있다. 한편 초기 혼합기의 압력이 증가할수록 연소 최고압력이 증가하고 있다. Fig. 2(b)의 LPG 연료의 경우, 당량비 $\phi = 0.6$ 에서는 점화에 의한 연소가 이루어지지 않았다. 희박혼합기인 $\phi = 0.7$ 에서 당량비 증가에 따라 증가하고 있으며 $\phi = 1.1$ 부근에서 최대값을 가진다. 석탄가스화 연료와 LPG 연료를 같은 조건의 당량비와 비교하면 LPG 연료가 발열량이 더 높기 때문에 연소최고압력이 더 높게 나타난다.

Fig. 3은 연료-공기 혼합기의 초기압력(0.1~0.8MPa)을 변수로 하여 당량비 $\phi = 0.6 \sim 1.4$ 에 대한 연소시간을 나타낸 것이다. 연소시간은 점화시작부터 최고압력 발생시간까지의 시간으로 나타내었다. 연소시간은 희박혼합기에서 가장 길게 나타나고 있으며 당량비 증가에 따라 줄어들다가 이론당량비 부근에서 최소를 나타낸 후 증가하고 있다. 또한 혼합기의 초기압력분포에 따라서는 초기압력이 높을수록 연소시간이 증가됨을 볼 수 있다. 혼합기의 초기압력이 높을수록 연소실내의 높은 밀도에 의해

화염전파속도가 저감되어 연소시간이 증가되는 것으로 생각된다. 당량비에 따른 석탄가스화 연료와 LPG연료의 연소시간은 서로 비슷함을 볼 수 있다.

Fig. 4는 연료-공기 혼합기의 초기압력(0.1~0.8MPa)을 변수로 하여 당량비 $\phi = 0.6 \sim 1.4$ 에 대한 질소산화물 발생농도를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)의 석탄가스화 연료의 경우, NOx 발생농도가 희박당량비인 $\phi = 0.7$ 에서 꾸준히 증가하여 $\phi = 0.9$ 에서 최대를 가지며 이론당량비를 지나면서 급격히 감소하고 있다. Fig. 4(b)의 LPG연료의 경우, NOx 발생농도는 $\phi = 0.85 \sim 0.9$ 부근에서 최대를 가진 후 감소하고 있다. 이는 NOx 발생기구의 주요한 요인이 화염온도와 산소이며⁷⁾ 화염온도가 최고인 이론당량비 부근에서는 연소과정에 산소를 소비하고 거의 없으므로 NOx 농도가 최고가 되지 못한다. 결국 NOx 발생이 고온과 더불어 산소의 농도에도 비례하므로 이론당량비보다 약간 희박한 당량비에서 NOx 발생이 최대가 되는 것으로 생각된다. 석탄가스화 연료가 LPG 연료보다 NOx 발생농도가 매우 낮다. 이는

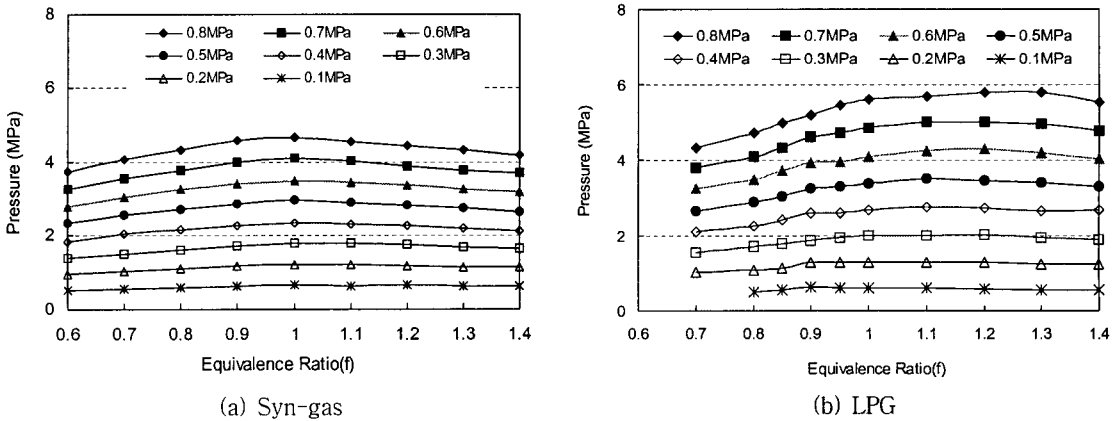


Fig. 2. Maximum combustion pressure.

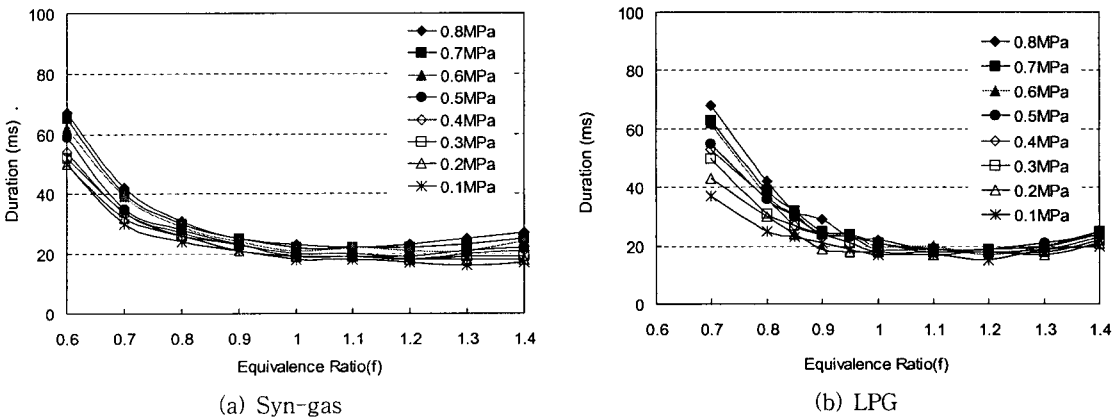


Fig. 3. Combustion period.

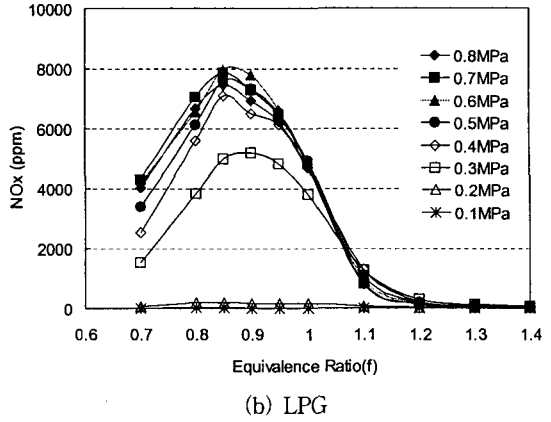
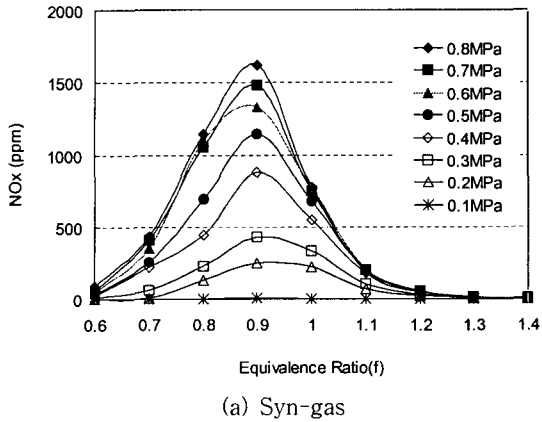


Fig. 4. NOx concentration.

발열량이 매우 낮아 화염온도가 낮아져 질소산화물의 발생이 줄어든 것으로 생각된다.

Fig. 5와 6은 연료-공기 혼합기의 초기압력(0.1~0.8MPa)을 변수로 하여 당량비 $\phi = 0.6 \sim 1.4$ 에 대한

CO, CO₂ 발생농도를 나타낸 것이다. CO의 발생농도는 희박당량비 영역에서는 거의 생성이 이루어지지 않고 있으며 이론당량비인 $\phi = 1.0$ 에서부터 급격히 증가하고 있다. 이는 희박혼합기에서는 충분한

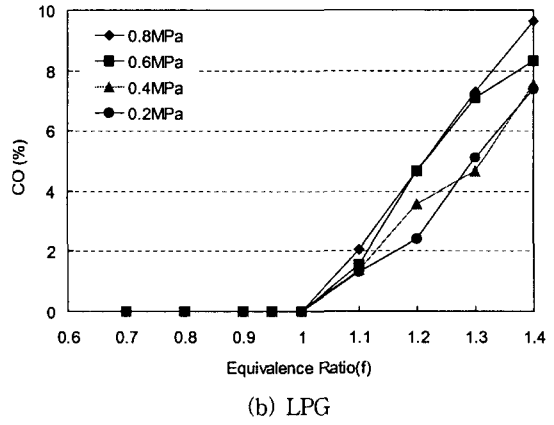
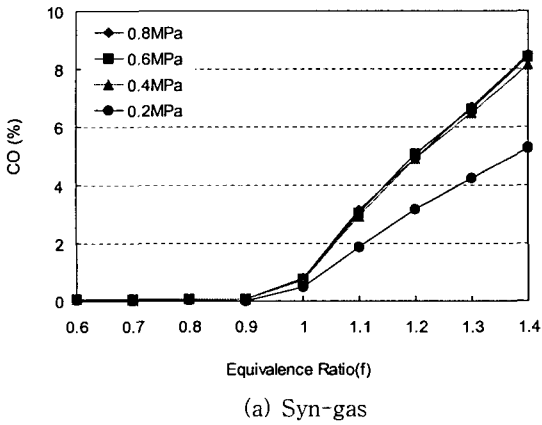


Fig. 5. CO concentration.

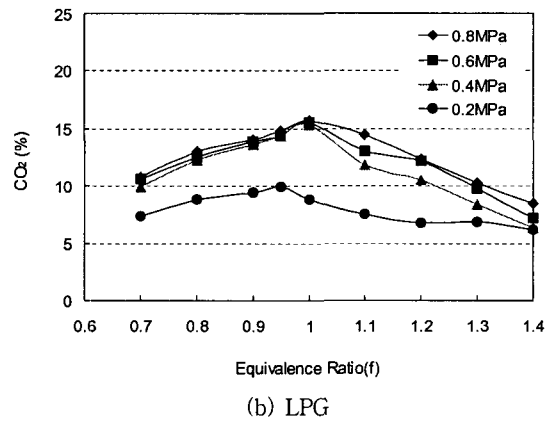
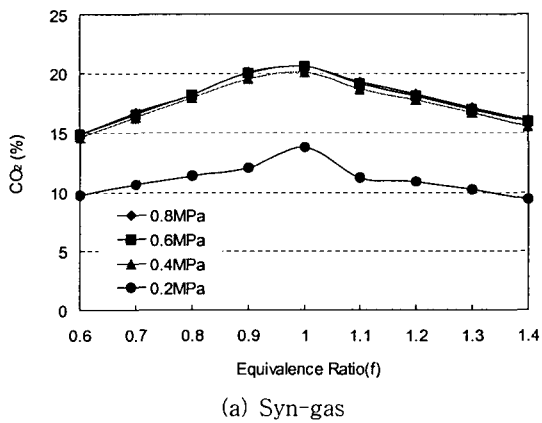


Fig. 6. CO₂ concentration.

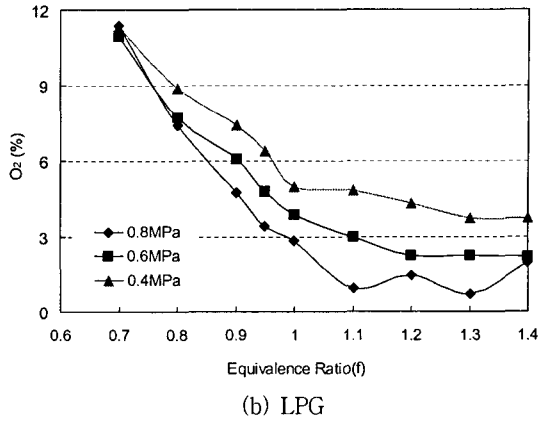
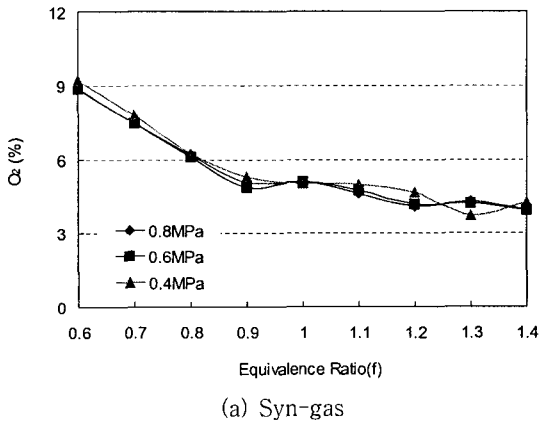


Fig. 7. O₂ concentration.

산소로 인해 CO의 발생농도가 감소하며 농후당량 비로 갈수록 산소의 부족으로 증가된다. 석탄가스화 연료는 연료성분중 약 30%의 CO를 함유하고 있어 불완전 연소할 경우 많은 양의 CO를 배출할 것으로 예측되었으나 석탄가스화 연료와 LPG연료를 정적 연소실에서 비교한 결과를 보면 발생농도는 거의 비슷하다. CO₂의 발생농도가 희박당량비인 $\phi = 0.6$ 에서 서서히 증가하여 이론당량비 부근인 $\phi = 1.0$ 에서 최대를 가진다. 이는 이론당량비 $\phi \approx 1.0$ 부근에서 완전연소가 일어나고 있음을 보여주고 있다. 석탄가스화 연료가 LPG연료보다 연료내에 포함된 CO₂로 인해 발생농도가 높은 것으로 생각된다.

Fig. 7은 연료-공기 혼합기의 초기압력(0.2~0.8MPa)을 변수로 하여 당량비 $\phi = 0.6 \sim 1.4$ 에 대한 O₂ 발생농도를 나타낸 것이다. O₂의 발생농도는 희박당량비인 $\phi = 0.6$ 에서 최대를 가지며 당량비가 증가할수록 감소되어진다.

이상의 결과에서 석탄가스화연료와 LPG연료를 비교하면 연소압력면에서는 석탄가스화연료가 저발열량가스로서 연소압력이 낮지만 연소기간과 당량비 변화에 따른 배출가스의 농도변화는 매우 비슷한 유형을 보이고 있다. 따라서 석탄가스화 연료를 가스엔진의 연료로 적용할 경우, 약간의 출력의 감소가 예상되지만 배기가스농도는 전체적으로 비슷하여 엔진을 구동하여 동력을 얻을 수 있을 것으로 생각되며 대체연료로서의 가능성은 충분히 높다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 발열량 1400kcal/Nm³의 석탄가스화 연료의 연소특성을 규명하기위해 연소실과 실험

변수를 단순화시킨 정적연소실에서 석탄가스화 연료혼합기와 LPG연료 혼합기의 당량비 및 초기압력에 따라 연소압력, 유해배출물을 측정하여 비교 검토하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 정적연소에서 석탄가스화연료와 LPG연료의 예혼합기의 당량비와 초기압력을 변화시키면서 연소압력을 비교한 결과를 보면, 연소압력면에서는 석탄가스화연료가 저발열량가스로서 연소압력이 낮지만 연소기간은 LPG연료의 경우와 매우 비슷한 유형을 보이고 있다.

2) 석탄가스화 연료가 LPG연료보다 NO_x 발생농도가 매우 낮았으며 이는 발열량이 매우 낮아 화염온도가 낮아져 질소산화물의 발생이 줄어든 것으로 생각된다.

3) CO, CO₂의 배기가스농도는 전체적으로 비슷하여 엔진을 구동하여 동력을 얻을 수 있을 것으로 생각되며 대체연료로서의 가능성은 충분히 높다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) 김태권, 1997, 합성고분자류 폐기물의 발생가스를 이용한 가스엔진 시스템 개발, 한국기계연구원 보고서, pp.1-37.
- 2) 박태인, 김태권, 이장희, 홍순철, 1994, 가스엔진 연소시스템개발 및 성능실험연구, 한국기계연구원 연구보고서, pp.1-20.
- 3) 정동수, 김석준, 방효선, 김명남, 김옥중, 심성훈, 1991, 냉난방을 위한 가스엔진 구동 열펌프 기술 개발, 한국기계연구소 연구보고서, pp.1-146.
- 4) 고창조, 1991, CNG·디젤 듀얼퓨얼 엔진의 개발 연구, 한국에너지기술연구소 연구보고서, pp.1-30.

- 5) 김현규, 우석근, 전충환, 장영준, 2000, 발전용 가스엔진의 개발 및 연소특성에 관한 연구, 한국박용기관학회지, 24, pp.800-810.
- 6) 김태권, 김성훈, 장준영, 2000, 정적연소실에서 메탄-공기 예혼합화염의 CO, CO₂ 및 NO_x 배출 특성, 한국자동차공학회 논문집, 2(8), pp.19-26.
- 7) Stephen, R. T., 1996, An Introduction to Combustion; Concepts and Applications, McGraw Hill Inc., pp.480-488.