

합성고분자류 폐기물의 화염열분해 가스화에 의한 발생가스의 연소특성 및 가스엔진시스템에의 적용연구

김태권* · 장준영* · 심성훈** · 김정배*** · 김병하****

*계명대학교 자동차공학과

**한국기계연구원

***계명대학교 환경과학과

****경일대학교 기계공학과

Combustion Characteristics of Synthetic Gas from Flame Pyrolysis Gasification of Polymetric Wastes and their Applicability to Gas Engine System

Tae Kwon Kim*, Jun Young Jang*, Sung Hoon Shim**, Jeung Bea Kim***, and Byung
Ha Kim****

*Department of Automotive Engineering, Keimyung University

**Korea Institute of Machinery & Metals

***Department of Environmental Science and Engineering, Keimyung University

****Department of Mechanical Engineering, Kyungil University

Abstract

Combustion characteristics of synthetic gas from flame pyrolysis gasification of polymetric wastes are reported and the applicability of synthetic gas from flame pyrolysis gasification to a gas engine system is presented. Engine power is easily predicted by the volume percentage of the synthetic gas. Measurements have been

made to obtain the range of flame existence in the function of volume percentage of CO and H₂ gases in the synthetic gas. In order to clarify the emission of the flames, NO_x measurements by chemiluminescent analyser are taken in flames with different equivalent ratios. From the results of the engine performance data we also have demonstrated that the output of the gas engine modified from a LPG engine is about 5 ps at normal rating. We conclude that synthetic gas from flame pyrolysis gasification of polymeric wastes is applicable to a gas engine system.

1. 서 론

오늘날까지 엔진은 가솔린과 경유(디젤유)로 대별되는 석유계 연료에 의존하고 있는 것이 사실이며, 이들은 2000년대 초반까지는 여전히 원동기의 연료로서의 중요한 역할을 유지하게 될 것이다. 그러나 최근 관심이 고조되고 있는 지구온난화, 산성비, 오존층 파괴 등과 같은 지구환경문제에 영향을 주는 오염물질의 대부분이 에너지 사용기에 의해 발생하고 있다는 관점에서 저공해 대체연료의 개발 및 활용이 시급한 시점에 와있는 것이다. 이러한 측면에서 가스연료를 사용한 엔진에 관한 관심이 증대되고 있다. 천연가스, 수소, 일산화탄소, 메탄, 프로판, 부탄, LPG 등의 다양한 가스연료가 있으며 기존의 엔진 연료에 비해 열효율도 어느 정도 유지할 수 있으며, 특히 유해배기가스에 의한 대기환경 오염문제 해결에 유리한 면을 갖고 있다. 또한 한정된 석유계 연료에 비하면 양적인 면에서 비교적 장기적으로 활용 가능하여 유망한 저공해 대체연료로서의 역할을 담당하게 될 것이다. 이러한 가스엔진에는 가스의 종류에 따라 현재 LPG, 천연가스, 수소가스, 바이오가스

엔진 등이 있으며, 연료 사용방식에 따라 전소시스템 (dedicated system), 혼소시스템 (dual-fuel system), 이중연료시스템 (bi-fuel system)으로 구분되어지며, 연료 주입방식에 따라 mixer type, injector type으로 분류할 수 있다. 최근에는 가스연료만을 사용하는 가스전소시스템 (dedicated system)의 채택이 전반적인 추세로 되어 있다^{1,2)}. 그러나 본 연구의 경우는 합성고분자 폐기물의 화염 열분해에 의해 발생한 가스를 활용하는 것으로서 발생된 가스 중 가연가스는 일산화탄소(CO), 수소(H₂), 메탄(CH₄) 등으로 구성되어 있어³⁾ 연료의 발열량, 연소특성 및 연료공급조건 등을 감안할 때 전소시스템의 적용은 본 연구의 경우 불리한 면이 존재하고 있다. 한편 가스엔진 시스템 중 이중연료시스템 (bi-fuel system)은 두가지 연료를 각각 사용할 수 있는 시스템으로서, 가스연료 탱크 및 기존 연료장치 등을 각각 설치해서 상황에 따라 어느 한가지 연료만으로 작동 가능케 한 시스템이다. 이러한 측면에서 본 연구의 경우와 같은 연료특성과 연료공급조건에서는 기계적인 가스믹서를 사용한 엔진과 기존 연료장치 시스템 등을 활용한 이중연료시스템 (bi-fuel system)이 본 연구에 적합한 것으로 생각되어 본 시스템에 적용하였다. 대상폐기물이 안정되고 효율 높은 가

스화가 이루어져서 가스엔진으로의 가스공급조건 및 가스조성이 안정되어진다면 본 연구에 적용가능한 가스엔진 시스템의 폭이 넓어지게 될 것이다.

결국 본 연구는 폐합성수지류와 같은 고분자류의 가스화에 의해 발생된 가스를 활용하여 최근 점차 연구가 활발한 동력발생장치인 가스엔진 시스템을 구동하고 이의 동력을 이용하는 시스템을 개발하는 것으로서, 합성고분자 폐기물의 처리는 물론 대체에너지 개발 및 실용화에 필수적이라 할 수 있다.

따라서 본 연구는 합성고분자 폐기물의 화염 열분해에 의해 발생한 가연성분의 가스를 활용하여 저공해 동력발생장치로 인식되고 있는 가스엔진 시스템을 개조·제작함에 있어 화염열분해 가스화에 의한 가스연료의 연소특성 및 배출가스특성을 검토하였다. 또한 개발된 가스엔진에 적용하여 그 성능을 확인함으로써 고분자 폐기물 화염열분해 발생가스의 활용 가능성의 하나를 제시하고자 한다.

2. 발생가스 조성에 의한 엔진 예상출력 및 연소특성

2.1 발열량 및 엔진 예상출력

본 연구에서는 A사의 LPG엔진(CD800L)을 기초로 하여 가스엔진시스템을 설계·구성하고 있다. 폐합성수지류와 같은 고분자 폐기물의 화염열분해에 의한 발생가스를 이용하여 가스엔진을 구동하기 전에 먼저 기존연료인 LPG에 의한 엔진의 예상특성을

검토하였다. 대상엔진의 배기량은 796cc, 상용출력은 38ps / 5200rpm으로서 4400rpm에서 최대토크를 발생시키고 있는 엔진을 모델로 하였다.

Table 1은 모터링 (motoring)운전의 경우에 엔진회전수에 따른 엔진 배기량(공기량)을 보여주고 있다.

Table 1. Engine displacement volume with engine revolution at motoring operation

Revolution(rpm)	1000	1400	1800	2200	2600	3000	3300
Displacement volume(LPM)	286	400	496	610	743	876	953

Table 2는 LPG의 성분이 프로판(C₃H₈) 60%, 부탄(C₄H₁₀) 40%로 구성되었다고 가정하여 얻은 LPG의 진발열량과 이론공기량을 보여주고 있다.

Table 2. Heating value and theoretical air

Constituent	Percent by volume	Heating value (kcal/Nm ³)	Theoretical air (Nm ³)
Propane(C ₃ H ₈)	60	13,410	14.29
Butane(C ₄ H ₁₀)	40	11,844	12.38
Total	100	25,254	26.67

LPG연료에 의한 엔진의 예상출력 산정을 위하여^{4,5)} 엔진이 3000rpm 으로 구동되고 있을 때를 기준으로 하였다. 4행정엔진이 N rpm일때의 공기량 (V)는

$$\begin{aligned}
 V(\text{m}^3/\text{min}) &= (796 \times 10^{-6} (\text{m}^3) \times N (\text{Rev}/\text{min})) / 2 (\text{Rev}) \\
 &= (796 \times 10^{-6} (\text{m}^3) \times 3000 (\text{Rev}/\text{min})) / 2 (\text{Rev}) \\
 &= 1.194 (\text{m}^3/\text{min}).
 \end{aligned}$$

LPG의 이론공기비는 Table 2에서 보는 바와같이 체적비로 약 27로서, 연료량 $V_f = 1.194/27 = 0.0442\text{m}^3/\text{min}$ 이다. 출력을 구하기 위해 발열량을 Q 라 하면 이론공기량에 의한 출력은

$$Q \cdot V_f = 25,254(\text{kcal}/\text{m}^3) \cdot 0.0442(\text{m}^3/\text{min}) \cdot (\text{min}/60\text{s}) = 18.6\text{kcal}/\text{sec}$$

LPG의 경우에 대한 공기과잉률을 적용하면 실제 출력은 $4.65\text{kcal}/\text{sec}$ 으로서 마력으로 환산하면 마력 $H = Q \cdot V_f = 4.65/0.1764(\text{ps}) = 26.4(\text{ps})$ 이다. 본 엔진의 최대출력 회전수 5200rpm 에서의 예상출력은 앞에서 언급한 절차에 의해 예측해 보면 약 44ps 가 됨을 알 수 있다. 이것은 A사의 실험치⁶⁾ 38ps 보다 약 15.7% 초과 예측되고 있음을 알 수 있다.

Table 3. Constituent from flaming pyrolysis gasification

Constituent	Percentage by volume	Heating value (kcal/Nm ³)	Theoretical air (Nm ³)
Nitrogen (N ₂)	63.79	-	-
Oxygen (O ₂)	4.96	-	-
Carbon monoxide (CO)	5.29	160.6	0.125
Hydrogen (H ₂)	2.8	72.0	0.067
Methane (CH ₄)	1.68	144.0	0.160
Ethylene (C ₂ H ₄)	1.26	180.4	0.180
Ethane (C ₂ H ₆)	0.32	49.2	0.053
Acetylene (C ₂ H ₂)	0.09	12.2	0.011
Propane (C ₃ H ₈)	0.74	165.4	0.176
Butane (C ₄ H ₁₀)	0.007	2.1	0.002
Total	80.94	785.9	0.774

Table 3은 본 연구에서 생성된 가스의 조성, 발열량, 이론공기량 자료를 제시하고 있다⁷⁾. 진발열량이 $785.9\text{kcal}/\text{Nm}^3$, 이론공기량이 0.774Nm^3 이나 생성된 가스중에는 산소가 함유되어 있으므로 이량을 제외하면 이론공기량은 0.724Nm^3 이며, 앞에서와 같은 방법으로 출력을 예측하여 마력으로 환산하면 20ps 이다⁷⁾. 이것은 LPG연료를 사용하는 경우의 예상출력보다 약 25% 이상의 출력감소를 예견하고 있다. 본 연구의 마지막 절에서 실험결과와 비교되어 질 것이다.

2.2 연소특성 실험 및 토의

합성고분자 폐기물의 화염열분해에 의해 발생한 가스를 엔진에 적용하기에 앞서 가스연료의 연소특성 파악을 위한 기초실험을 수행하였다. 사용한 가스연료는 참고문헌⁸⁾의 조성을 기준하여 CO 23.98%, H₂ 15.47%, CH₄ 1.77%, CO₂ 9.06%, N₂ 49.72%의 조성으로 하였다. 개략적인 화염특성을 파악하기 위하여 당량비에 따른 화염길이를 관찰하고, CO 및 H₂ 조성에 따른 화염의 존재영역을 조사하였으며, 또한 CO만을 연료로 사용하였을 때 당량비에 따른 질소산화물의 농도를 측정하였다. 실험에 사용된 연소실은 Kim et al.⁹⁾의 시스템을 활용하였다. 연소실은 경우에 따라서 정적연소실험과 버너연소실험을 각각 수행할 수 있게 하였다. 또한 화염길이 및 NO_x의 계측을 위하여 연소장치를 아크릴로 제작된 용기내에 설치하였고, 용기 내의 압력은 대기압 상태를 유지하였다. 연료분출노즐은 3개의 동심 스테인레스 관으로 구성되어 있으며, 내경 4.6mm 의 가운데 관에서는 연료와 공기를

혼합하여 분출시키고 있다. 가운데 관을 제외한 주위 관 (tube)들은 소결금속 (sintered metal), 유리구슬 (glass beads), 하니콤 (hastelloy honeycomb) 등으로 내부가 채워져 있다. 또한 가운데 관은 예혼합 연료를 흘려 주게 되어 실험조건의 변화에 따라 간혹 발생하는 화염의 역화를 방지하기 위하여 flame arrester를 연료분출관 하단에 설치하였다. 가운데 관에서는 공기와 연료를 혼합하여 실험에 적당한 당량비를 유지하고 있다. 가운데 관 주위는 외경이 1인치의 관으로 산소와 질소의 혼합기(희석비 : 3.76)인 공기를 흘려주어 전체적인 당량비 (overall equivalence ratio)를 실험조건에 따라 조절하였다. 유량조절에 사용된 유량계 (matheson 601, 602 rotameter)들은 버블미터 (bubble meter)에 의해 검증되었다. 또한 NO_x 샘플링을 위하여 배출관 후류쪽 95 mm위쪽에 6 mm직경의 샘플링 프로우브를 설치하였다. 배출관의 직경은 44.5 mm이다. NO_x 계측에는 Signal Instrument Company Model 443 Chemiluminescence NO_x Analyser를 사용하였다. 그리고 NO_x 배출가스의 농도는 emission index(g-NO_x/kg-Fuel)로 나타내었다⁹⁾. LPG 엔진에 연료를 공급하기 위해 N₂, CO, CO₂, H₂가스는 각각의 전용조정기(regulator)와 유량계를 거쳐 혼합된다. 엔진을 구동할 때는 연료노즐을 이용한 실험에 비해 상대적으로 많은 유량을 사용함에 따라 대용량의 Dywer 유량계를 사용하였으며, 혼합가스의 유량은 각각의 성분가스의 유량계수로 보정하여 사용하였다.

Fig. 1은 가스연료(CO 23.98%, H₂

15.47%, CH₄ 1.77%, CO₂ 9.06%, N₂ 49.72%)에 대해서 당량비 변화에 따른 화염의 모습을 개괄적으로 보여주고 있다. 당량비 증가에 따라 화염길이가 증가하고 있음을 알 수 있다. 당량비 4 이상에서는 화염길이의 변화가 근소하게 나타나고 있다. 또한 전체연료량을 400cc/min에서 500cc/min로 증가시키면 전체적으로 화염길이의 증가 성향이 나타나게 된다. 또한 점차 공기량을 증가시켜 당량비를 줄여가면 화염길이가 감소하다가 당량비 1 근방에서 화염이 부상하는 영역이 나타나기 시작하고, 그 이상의 공기를 증가시키면 당량비 0.9에서 화염이 사라지게 된다. 연료량을 약간씩 증가시켜 가면 화염이 존재하는 당량비가 약간씩 증가함을 볼 수 있다.

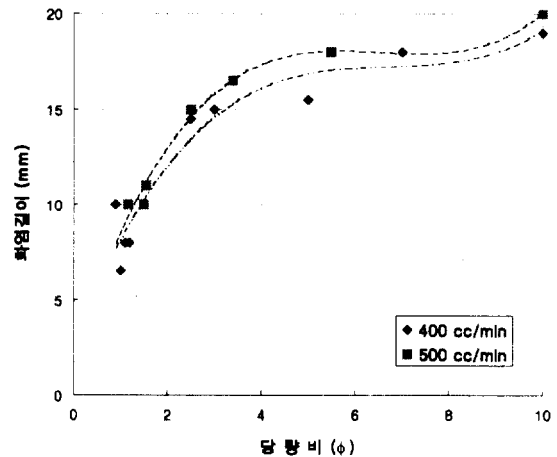


Fig. 1. Flame length with equivalence ratio

Fig. 2와 Fig. 3은 CO 및 H₂ 조성에 따른 화염의 존재영역을 보여주고 있다. Fig. 1의 가스조성을 기준으로 하여 CO 및 H₂ 조성을 줄여가며 화염길이를 관찰하였다. CO 및 H₂ 모두 화염길이가 축소되어지고 있음을 알 수 있고 H₂에 비해서 CO의 경우가 화염길이의 축소 폭이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 당량비 4에서 시작하여 CO 및 H₂ 유량을 각각 줄여보면 CO는 3.1, H₂는 3.6 부근에서 화염이 사라지고 있으며 이는 이들 연료의 연소특성과 연료노즐에서의 혼합기의 유체역학적 특성이 서로 연관되어져 있는 것으로 생각된다. 결국 연소한계의 관찰을 위해서는 정적연소기에 의한 실험으로 보완되어야 할 것으로 생각된다. 스파크플러그엔진에서의 점화과정은 점화에너지의 상호관계, 관련 국소혼합기핵의 초기반응, 스파크플러그의 전극간의 열교환, 국소 난류강도 등 여러 가지 인자에 따라 아주 복잡하게 연계되어져 있으며, 특히 연소과정, 연료형태 및 공연비 범위가 점화에 영향을 미치는 주요인자가 되고 있다. 또한 본 실험에서 사용되어지고 있는 CO와 H₂는 가솔린, LPG, 천연가스에 비해서 연료와 공기의 혼합기 폭발범위가 상대적으로 넓은 영역을 갖고 있어 생각보다는 연료와 공기유량특성의 조정이 용이하다. 한편 본 연구는 기존의 LPG엔진을 기준으로 하여 새로운 가스연료를 사용하고 있어 최적의 연소효율과 안정된 운전속도를 얻기 위해서는 연료에 따른 연소속도를 검토함으로써 적절한 점화시기의 조절이 필수적이다.

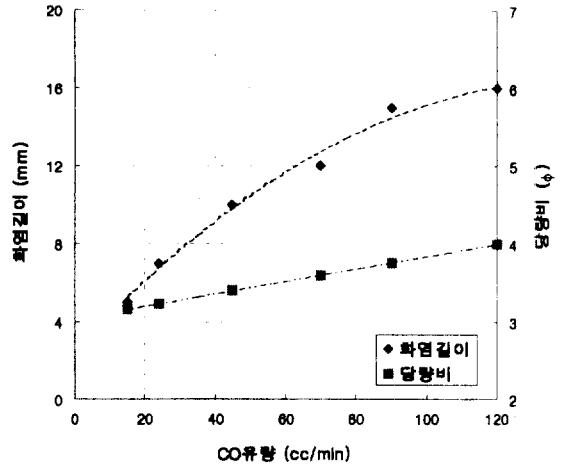


Fig. 2. Flame length and equivalence ratio with CO flowrate

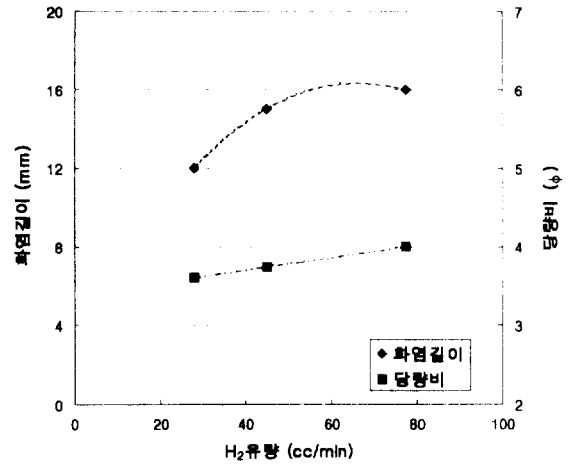


Fig. 3. Flame length and equivalence ratio with H₂ flowrate

배출가스의 특성 파악을 위해 Fig. 4에 100% CO만을 연료로 사용하였을 때 당량비에 따른 질소산화물의 농도를 emission index로 나타내었다. NO_x의 경우 당량비

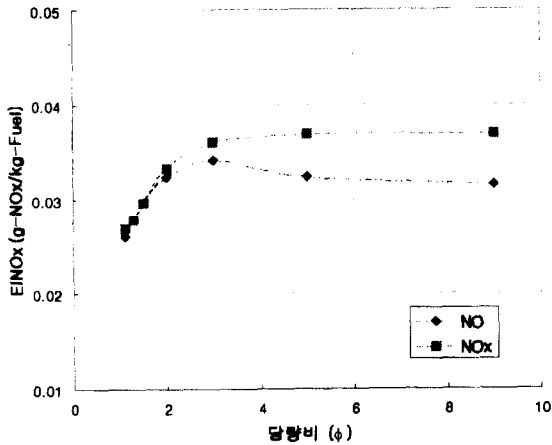


Fig. 4. NOx emission with equivalence ratio

3 이상에서는 거의 변동이 없으나, NO의 경우는 당량비 3을 경계로 하여 완만한 감소 특성을 보이고 있다. 물론 발생되고 있는 질소산화물의 절대량이 상대적으로 적은 량이지만 최근에 연구되고 있는 탄화수소계 연료의 질소산화물 발생특성과 정성적으로 유사한 모습을 나타내고 있어 주목되고 있다. Kim et al.⁹⁾의 연구에서 당량비 1.0~10범위에서 NOx 및 NO의 emission index의 결과를 살펴보면, NOx EI 및 NO EI값은 당량비 1.0에서 1.3으로 증가함에 따라 급격히 증가한 후 다시 급격히 감소하여 당량비 2.2에서 최소값을 가지게 된다. 그 후 다시 점차 증가하게 된다. NOx EI는 최대값을 갖는 당량비 1.3화염에 비해 최소값을 가지는 당량비 2.2 화염이 약 21~25% 정도 감소하고 있다. 당량비 2.2화염은 당량비 1.7이하의 화염 (kinetically-controlled)과 당량비 3.3이상의 화염 (diffusion-controlled)에 비해

NOx의 배출이 적게 나타나고 있다. 낮은 당량비(1.7이하)에서는 높은 온도로 인해 NOx가 증가하고, 높은 당량비(3.3이상)에서는 residence time이 증가해서 NOx 발생이 쉽게 증가하게 되므로 당량비 1.7과 3.3사이에서 NOx 배출의 최소가 존재하고 있음을 제시하였다. 본 연구의 NO발생특성과 연계하여 정성적으로 일치하고 있으며, 따라서 NOx저감을 위한 운전영역이 존재하고 있음을 알 수 있다.

3. 가스엔진시스템에의 적용

3.1 연료공급시스템

연료공급 방식에 따라서 mixer type과 injector type으로 대별되고 있다. 본 연구에서는 연료의 조성과 개조작업의 용이성 등을 감안하여 mixer type으로 선정하였다. Fig. 5는 LPG 연료 계통과 가스연료계통을 동시에 표시한 것으로, LPG 연료시스템에서는 LPG 탱크에서 기상/액상 솔레노이드 밸브를 거쳐 베이퍼라이즈, 믹서를 통해 흡기구로 들어간다. 가스연료시스템에서는 가스화공정에서 만들어진 가스가 완충탱크 (surge tank)에 충전된 후 연료유량계를 통해서 가스베이퍼라이즈, 믹서 어답터 (mixer adapter)를 통해 흡기구 안으로 들어간다. 전체 연료공급시스템은 상단의 완충탱크가 가스연료용이며 하단의 것이 LPG용이다. 각각은 베이퍼라이저를 통해 엔진으로 공급된다. LPG봄베는 LPG를 충전하기 위한 고압용기이며 기상밸브(황색), 액상밸브(적색), 충전밸브(녹색)등 3가지 기본밸브와

용적표시계가 부착되어 있다. LPG의 경우는 자동차의 엔진의 온도가 낮을 때에는 착화성이 좋은 기상의 LPG를 쓰는 것이 시동성이 좋다. 그리고 장시간 차를 주행시키기 위해서는 액상연료가 필요하다. 즉 수온이 15℃ 이하에서는 기상을, 15℃ 이상일 때는 액상으로 LPG를 사용한다. 기상과 액상의 LPG를 사용하기 위해서는 수온 스위치로 신호를 받아 2개의 솔레노이드 밸브에 의해 기체 혹은 액체의 차단 및 공급을 하는 역할을 한다. 본 실험에서는 액상·기상 전환 스위치를 수동으로 작동시킬 수 있도록 제작하였다.

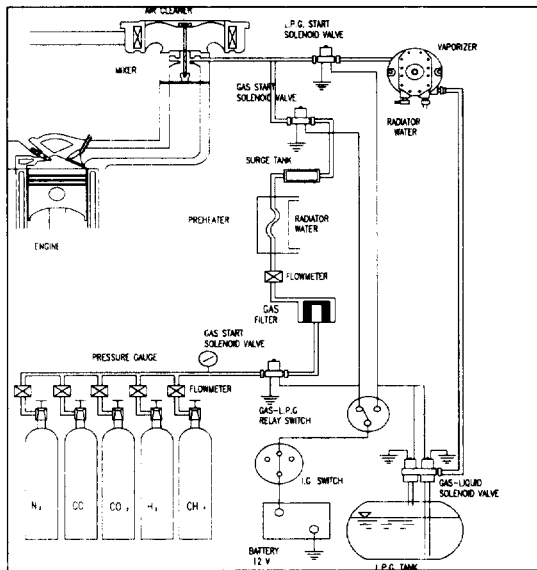


Fig. 5. Fuel supplying system

3.2 연료/공기 시스템의 Debugging

LPG엔진을 본 연구의 가스조성에 적합한 시스템으로 개조하기 위해서는 앞 절에서

언급한 각종 연료시스템의 장치를 부분적으로 개조하였다. 특히 연소상태와 엔진출력에 직접적으로 연관되어지는 연료량과 공기량의 조절이 가장 중요한 부분이다. 본 실험에서는 연료유량을 결정하기 위한 MAS(main adjust screw)와 공기유량 결정을 위한 AAS(air adjust screw)를 적절히 조정하였으며 특히, 연료량과 공기량을 직접 시행착오법에 의해 조정함으로써 본 연구의 연료에 적합한 엔진 운전상태를 최적화하였다. 따라서 본 연구에서는 별도의 가스연료 공급노즐을 제작하였다. 노즐의 측면에 등간격으로 12개의 구멍을 배열하였으며, 구멍의 종류는 직경 1.0, 1.5, 2.0 mm 크기로서 적절히 구성하여 연료유량을 조정하였다. 베이퍼라이저를 거친 연료가 이 노즐을 거쳐 흡기관으로 들어가게 하였다. 이 연료공급노즐은 믹서와 흡기매니홀드 사이에 어댑터를 제작하여 장착하였다.

한편 공기량의 조절을 위하여 유량조절 오리피스를 제작하여 본 연구에서 사용되어지는 가스연료 시동시에 정확한 아이들상태와 공연비를 조정하였다. 직경 1mm에서 20mm 까지 제작하여 사용하였다. 최대 크기를 20mm로 제한한 것은 본 연구 엔진의 공기흡입구의 크기가 제한되어 있기 때문이다. 이와같은 시행착오방법으로 본 연구의 엔진 연료시스템을 debugging함으로써 연료공기 혼합비를 적절히 맞추었다.

3.3 성능실험장치

Fig. 5에서 보는바와 같이 엔진설치 및 종합성능 계측장치를 구성하였다. 각 가스분배에서 나온 연료는 필요한 연료조성에 따라

혼합되어져서 혼합탱크에 $3\sim 5\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도의 압력으로 저장되어 진다. 한편 이들 연료는 해당 가스로 검증되어진 유량계에 의해 유량계측이 가능하게 하였다. LPG와 본 연구의 가스연료 중 어느 쪽이나 솔레노이드 밸브를 통해 사용가능하도록 이중연료시스템(bi-fuel system)을 구성하였다. 또한 엔진회전수, 냉각수 온도, 흡기온도, 부압, 오일 압력, 배기온도를 측정할 수 있도록 센서를 설치하였으며, 이들의 상태를 관찰가능하게 각종 인디케이터를 엔진 설치대 앞부분에 나타내었다. 실험실에서 손쉽게 엔진에서 발생하는 동력을 측정하기 위해 프론트 브레이크(prony brake)를 제작하여 엔진의 동력을 측정하였다. 냉각수의 온도는 엔진에서 나오는 출구측에 열전대를 설치하여 냉각수의 온도를 측정하였다. 흡입공기의 온도는 믹서 뒤의 가스 어댑터 뒤쪽에 설치하여 흡입공기의 온도를 측정하였고 엔진의 정상적인 상태를 측정하기 위해 진공호스에 진공계이저를 설치하여 진공 발생여부를 확인하였다. 엔진 냉각을 위한 냉각수 순환은 엔진 자체에 부착되어 있는 물펌프와 별도의 물탱크를 설치·사용하였다.

3.4 엔진의 성능결과 및 토의

본 연구의 대상엔진은 A사의 T-LPG엔진으로서 LPG연료를 사용하는 경우와 고분자 폐기물의 가스화에 의해 발생된 연료를 사용하는 경우를 구분해서 성능을 검토하였다. 먼저 LPG연료에 대한 성능결과를 얻은 후 LPG연료 라인을 솔레노이드 밸브에 의해 차단하고 가스화에 의해 발생된 연료라인 솔레노이드밸브를 열어서 연료공급라인을

변경한다. 물론 LPG 연료와 가스화에 의해 발생된 연료 사이에는 발열량, 조성, 이론공기량 등의 차이가 현격하기 때문에 가스라인의 변경과 아울러 앞에서 언급한 방법으로 연료·공기량을 조정하는 등 엔진을 최적화 한 후 성능실험을 수행하였다. 엔진회전수의 변화에 따라 엔진출력, 배기온도, 냉각수 온도, 흡기온도, 부압, 오일압력 등의 성능데이터를 취득하였다.

Fig. 6은 엔진회전수에 따른 출력곡선을 나타내고 있다. LPG 연료와 가스화에 의해 발생된 연료에 대한 엔진의 출력특성을 보여주고 있으며, 실측치와 계산에 의한 예측치를 동시에 비교하고 있다. LPG데이터는 1200, 1600, 2000, 3200, 4000, 4400rpm에서, 가스연료데이터는 900, 1500, 2200, 2700rpm에서 성능실험이 수행되었다. LPG를 사용하는 경우에 예측출력에 비해 전반적으로 약 17% 가량 감소하는 성향을 보이고 있다. 고분자폐기물의 가스화에 의해 발생된 연료를 사용하는 경우는 3000rpm을 기준하여 볼 때 실측치는 예측치보다 약 43%의 출력 감소를 보이고 있다. 특히 가스화에 의해 발생된 연료에 의한 엔진 출력은 LPG연료에 의한 출력 보다 상당히 출력의 감소를 나타내고 있다. 이는 연료의 특성 차이 뿐만 아니라 엔진의 연소조건 및 운전조건이 부적절하여 나타난 결과가 포함되어 있는 것으로 생각된다. 엔진의 경우 모든 조건이 정상상태로 유지되기 위해서 일정시간 동안 시운전후에 성능결과를 얻어야 한다. 본 연구의 경우는 연료탱크의 저장능력의 한계성으로 인해 제한된 성능실험을 수행하였다.

Fig. 7은 엔진회전수에 따른 배기온도를 보

여주고 있다. 3기통엔진의 각 기통별로 측정된 결과를 1번 실린더의 경우에 대해서 나타내었다.

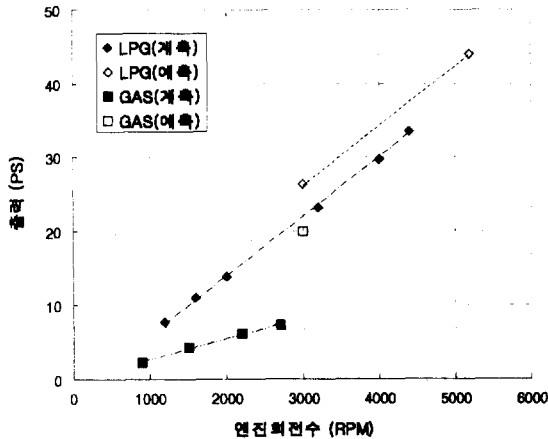


Fig. 6. Power output with engine revolution

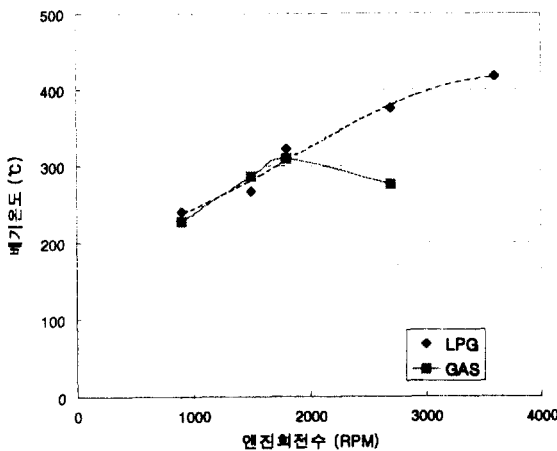


Fig. 7. Exhaust gas temperature with engine revolution

LPG의 경우도 비교적 낮은 배기온도를 유지하고 있으며, 가스의 경우 1800rpm을 지나면서 오히려 배기온도의 감소를 가져오고 있다. 이는 연료의 특성에 따른 점화시기 등의 변경이 필요한 것으로 예측된다.

한편, 본 연구의 열분해에서 얻은 가스의 경우는 발열량이 낮아서 가스엔진의 출력이 적게 나오는 실정이지만 대상폐기물이 안정되고 효율 높은 가스화가 이루어져서 가스엔진으로의 가스공급조건 및 가스조성이 안정되어진다면 Fig. 6에서 보여주는 바와같이 5마력급의 소형발전기는 충분히 구동할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 소량의 LPG를 첨가함으로써 시동성 및 출력특성 면에서 더욱 개선되었다.

4. 결론

본 연구는 합성고분자 폐기물의 화염 열분해에 의해 발생한 가스를 활용하여 국내 최초로 가스엔진을 구동하여 일정한 출력을 얻을 수 있음을 확인하였다. 5마력급의 소형발전기는 충분히 구동할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 열분해 발생가스 중에서 가연가스성분이 일정수준 이상의 경우는 양호한 엔진성능을 보이고 있으나 가스엔진의 출력이 적게 나오는 것은 연소 및 점화계통의 개선에 의해 향상되어질 수 있다. 특히 소량의 LPG를 첨가함으로써 시동성 및 출력특성이 상당히 개선되고 있다. 따라서 대상폐기물이 안정되고 효율 높은 가스화가 이루어져서 가스엔진으로의 가스공급조건 및 가스조성이 안정되어진다면 적용가능한 가스

엔진 시스템의 폭이 훨씬 넓어지게 되어 보다 안정화된 발전시스템을 구동할 수 있을 것으로 생각된다.

열분해 발생가스 중에서 본 연구와 같은 가연가스의 성분의 경우는 연료의 발열량, 연소특성 및 연료공급조건 등을 감안할 때 전소엔진시스템의 적용은 불리한 면이 존재하고 있다. 이러한 측면에서 본 연구의 경우와 같은 연료특성과 연료공급조건에서는 기계적인 가스믹서를 사용한 엔진과 기존 연료장치 시스템 등을 활용한 이중연료시스템(bi-fuel system)이 적합한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구는 합성고분자 폐기물의 화염 열분해에 의해 발생한 가연성분의 가스를 활용하여 저공해 동력발생장치로 인식되고 있는 가스엔진 시스템을 개조·제작하여 운전하였으며, 이를 활용하여 폐기물 가스화에 의한 동력활용의 가능성을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 대체에너지기술개발사업으로 수행된 연구결과와의 일부임을 알려드리며 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 박태인, 김태권, 이장희, 홍순철 : 가스엔진 연소시스템개발 및 성능실험연구, 한국

기계연구원 연구보고서, BSG019-136M (1994).

2. 정동수 외 : 냉난방을 위한 가스엔진 구동 열펌프 기술개발, 한국기계연구소 연구보고서, D-GU-006-89079112, 한국가스공사 (1991).
3. 심성훈, 김석준, 길상인, 윤진한, 김태권 : 합성폐기물의 화염 열분해 가스화와 가스엔진에의 이용, 대한기계학회 열공학부문 춘계학술대회 논문집, pp. 178-187 (1999).
4. C. F. Taylor : The Internal Combustion Engine in Theory and Practice : Volume 2, MIT Press (1980).
5. 設樂正雄, 燃焼の理論と計算法, オーム社 (昭和49年).
6. Private Communication : 아시아자동차 (1999).
7. 김태권, 장준영, 정주영, 임용국 : 합성고분자류 폐기물의 발생가스를 이용한 가스엔진 시스템 개발, pp. 3-7 (1997).
8. Private Communication : Guarantee Fuel, Inc., (Independence, Kansas)사의 직경 3/19 인치 (1.59 mm) sawdust pellets 가스화 자료 (1997).
9. T. K. Kim, B. J. Alder, N. M. Laurendeau, and J. P. Gore : Exhaust and *In-situ* Measurements of Nitric Oxide for Laminar Partially Premixed C₂H₆-Air Flames : Effect of Premixing Level at Constant Fuel Flowrate, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 110-111, pp. 361-378 (1995).