

LPG 인젝터형 플라즈마 개질기 적용연구

†김창업 · 이대훈

한국기계연구원

(2013년 11월 11일 접수, 2014년 2월 6일 수정 2014년 2월 6일 채택)

Application Research on LPG Injector type Plasma Reformer

†Changup Kim · Deahoon Lee

*Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu,
Daejeon 305-343, Korea*

(Received November 11, 2013; Revised February 6, 2014; Accepted February 6, 2014)

요약

본 연구에서는 LPG자동차용 LPG 액상분사 인젝터의 분사구 앞에 장착할 수 있는 플라즈마 개질기의 개발을 진행하였다. 이 개질기는 플라즈마 방전이 발생하는 영역에 공기와 LPG 연료를 분사시켜 고분자 탄소연료를 열해리시키고 추가로 수소를 발생시키기 위한 목적으로 개발되었다. 인젝터와 플라즈마 발생부와의 거리와 기하학적인 방전길이를 최적화하여 개질 반응이 일어나는 인젝터 개질기를 완성하였으며, 개질 결과 공급 전력 70 ~ 100 W 일 때 HC은 전체 개질가스의 약 0.7% 이며, 수소는 1.2 ~1.5% 발생하였다.

Abstract - In this study, plasma reformer technology with a LPG injector was investigated. It was developed with injection of LPG fuel and air in a region where the plasma discharge to make the thermal decomposition carbon fuel and to generate additional hydrogen. As a result of reforming test, when power is 70 ~ 100W supply, about HC 0.7% of the full reformed gas and hydrogen was generated from 1.2 to 1.5 %.

Key words : LPLi(Liquid Phase LPG injection), LPLi injector, Plasma reformer

1. 서론

전 세계적으로 늘어가는 차량으로 인해 환경오염과 화석연료의 고갈 문제가 심각해지고 있으며, 이에 따라 전체 차량에 대한 배출가스 규제가 엄격해지고 있다[1]. LPG 차량의 경우 규제가 대응하기 위한 일환으로 LPG 연료시스템의 개선을 위한 연구가 진행되고 있으며, 가솔린과 동등한 수준의 출력을 가지면서 유해물질 배출량을 크게 저감할 수 있는 LPG 분사시스템을 장착한 차량을 보급하고 있는 실정이다[2,3].

한편, 최근 수소 경제시대를 맞아 수소와 기존연료

에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는데, 여러 연구를 통해 수소를 기존연료에 첨가함으로써 연소성능을 향상시키고 배기성능을 개선할 수 있음이 밝혀졌다[4~6]. 천연가스 연료에 수소를 첨가하는 HCNG와 액화석유가스(LPG) 연료에 수소를 첨가하는 HLPG에 대한 연구 등이 그것인데, 천연가스의 경우 CNG의 형태가 연료탱크 내에 기상으로 존재하기 때문에 같은 기상인 수소와 직접 혼합하여 저장 및 사용이 가능한 특징이 있다. 하지만 LPG 연료의 경우, 연료 자체의 특성상 기상과 액상이 같이 존재하기 때문에 수소를 첨가하기 위해서 별도의 연료시스템이 필요하게 된다[7,8].

수소를 공급하기 위한 연료 시스템은 크게 수소소테이션을 이용하는 충전소(on-site) 방식과 차량 내에서 기존 연료를 개질하여 합성가스(syn. gas)를 생산

†Corresponding author:cukim@kimm.re.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

하는 차량(on-board) 방식으로 나뉜다. On-site 방식의 경우, 차량에 수소를 저장하고 공급하는 추가적인 연료시스템이 요구되기 때문에 장소와 장치의 복잡성 면에서 on-board 방식이 유리한 측면이 있다. On-board 방식의 경우는 개질된 수소의 양이 적음, 개질장치의 복잡함, 개질된 합성가스의 저장문제, 개질속도, 개질가스의 공급방법 등에서 아직 해결해야 할 점들이 많이 존재하고 있다.

따라서 on-board 방식을 효율적으로 적용하기 위해서 요구되는 사항은 개질연료의 저장 없이 바로 차량에서 사용이 가능한 빠른 개질 시동시간, 응답성 및 개질량의 확보가 필요하며, 차량 내 설치 문제로 인한 반응기의 소형화와 단순화 등이 고려되어야 한다.

그리고 On-board 개질기에 개질된 가스는 부분산화의 경우, 대략 수소 10%, CO 10%, CO₂ 7%, N₂ 73%의 성분을 가지게 되는데, 여기서 생기는 불활성 가스인 CO₂와 N₂가 엔진으로 공급되는 혼합기에 추가됨으로써 개질가스의 수소성분의 추가로 인한 연소성능 개선효과는 연소불안정이 커지게 되는 문제점을 해결할 필요도 있다.

본 연구에서는 자동차용 On-board 개질로서, 여러 가지 개질방식 중 개질반응에 반응물로 물이 첨가되지 않는, 플라즈마 방식의 부분산화반응을 이용하고자 한다. 촉매를 사용한 개질시 발생할 수 있는 탄소침적문제 및 촉매 활성화 시간 문제와 파괴 문

제로 촉매의 사용은 하지 않았다.

그리고 앞서 설명된 개질된 개질가스의 불활성화 가스의 추가로 인한 연소성능 악화 문제를 해결하기 위하여 기존의 On-board형 개질기와 달리, LPG 엔진에 적용되어 있는 연료 인젝터 부분에 설치 가능하도록 하여, 엔진으로 공급되는 공기의 일부를 이용함으로써 추가적인 불활성 가스공급을 매우 적게 유지하는 장점이 있다.

또한 개질장치의 위치상 개질기가 연료분사기와 접근되어 있어서 전기노이즈가 쉽게 발생하기 때문에 일반적인 개질보다는 낮은 전력을 공급해야 하였다.

따라서 본 연구에서는 이론적인 개질반응에 의한 수소생성이 주 목적이기 보다는 약간의 개질에 의한 미량의 수소생성과 C4의 고분자 LPG연료의 낮은 분자 HC으로의 변화, 혼합기의 온도상승 등의 부가적인 이점을 활용할 수 있는 인젝터형 개질기를 설계, 제작하였고, 이의 개질 반응 특성을 알아보았다.

II. 실험장치 및 실험방법

2.1. 실험장치

실험장치의 개략도는 Fig. 1.과 같다. 크게 인젝터 개질기와 개질기에 전원을 공급해 주는 전원 공급부, 인젝터의 분사량과 공기 유량을 제어하는 연료 공급부, 마지막으로 반응물의 성분을 분석하는 가스 분석부로 이루어져 있다.

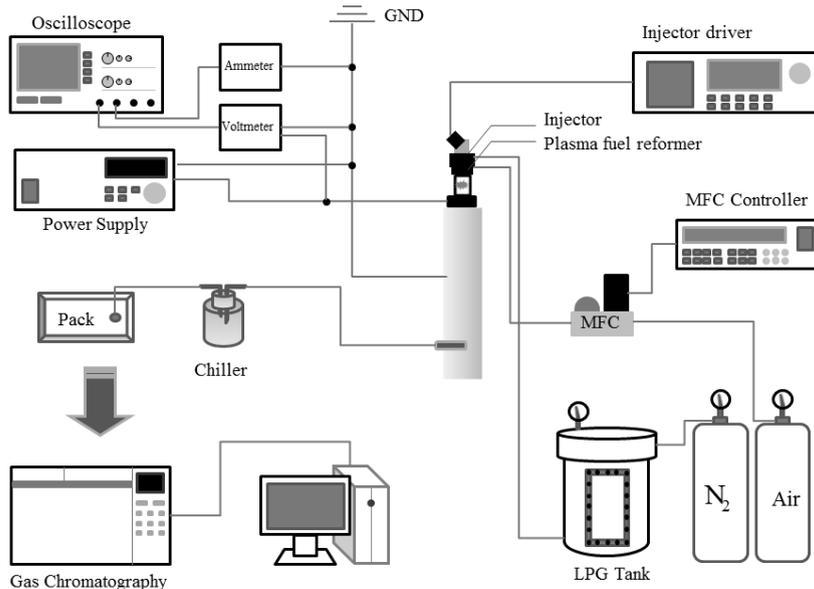


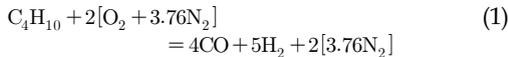
Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

전원 공급장치는 1 kW 출력에 10 kV까지 공급할 수 있는 고전압 트랜스를 사용하였으며, 오실로스코프를 사용해 공급 전력을 계측하였다.

인젝터의 경우 인젝터로 공급되는 연료의 압력에 따라 분사량이 변동되므로 일정한 압력으로 공급하기 위해 LPG탱크에 N₂ 가스로 가압하여 액상의 LPG 연료를 인젝터로 공급하였으며, 압력은 6 기압으로 유지하였다. LPG의 분사는 인젝터 드라이버를 통해 분사 주기 및 분사 기간을 제어하였으며, 분사된 연료의 양은 버블미터를 이용하여 검증하였다. 개질반응에 참가하는 공기는 MFC(mass flow controller)를 사용해 정밀하게 공급하였다. 반응이 끝난 가스는 개질기 하단에 위치한 샘플링 포트를 통해 포집하여 GC(Agilent, 6890N)로 성분을 분석하였다.

2.2. 실험방법

플라즈마를 이용한 개질반응에서는 반응기로 공급되는 산소와 LPG 연료의 탄소와의 상대적 비인 O₂/C 비에 따라서 반응이 틀려진다. LPG의 주 성분인 부탄(C₄H₁₀)연료의 부분산화의 이론적 O₂/C 비는 0.5이며, 완전산화는 1.625이다. 수식 (1)에 부분산화 반응식을 나타내었다.



일반적으로 부분산화에서 생성물의 30%가 수소이지만, 실제적인 수소수율이 50%가 안 되기 때문에 실질적으로는 약 10% 전후의 수소가 생성된다. 이때의 O₂/C 비는 2/4=0.5이다.

본 실험의 경우, O₂/C 비에 따른 반응의 안정성이 매우 중요하기 때문에 낮은 O₂/C 비 조건에서 실험을 실시하였다. 완전산화 쪽으로 갈수록 산화가 쉽게 이루어지므로, 개질이 아닌 연소가 일어날 확률이 높아지기 때문이다.

실험의 LPG 연료의 분사 조건은 자동차 엔진회전속도 700 rpm 기준으로 분사기간 3 ms, 분사주기 172 ms이며, O₂/C 비 계산을 위해 분사기간 3 ms의 1회 분사당 분사되는 LPG의 양을 측정하였다. 측정결과 1회 분사당 약 4.1 cc가 분사되고, 분사주기 172 ms를 기준으로 1분 동안 1.43 l가 분사되는 것을 확인하였다. 최대한 엔진 아이들링 운전조건으로 맞추었으나 벤치실험이기 때문에 실제 엔진상황과는 조금 차이가 발생할 것으로 보인다.

공급되는 공기가 10 lpm 일 때, O₂의 양은 21% 정도이고, 여기에 LPG연료 (C₄H₁₀)가 1.43 lpm으

로 공급되므로, O₂/C 비는 2.1/(1.43*4)=0.37이며, 적절한 O₂/C 비로 판단하고 실험조건을 설정하였다.

개질의 성능과 특성은 공급된 LPG의 전환율(수식 (2)), 공급된 LPG 중 발생한 수소의 발생량인 수소 수율(수식 (3))로써 평가하였다.

$$C_4H_{10} \text{ Conversion (\%)} = \frac{\text{mole (Converted } C_4H_{10})}{\text{mole (Input } C_4H_{10})} \times 100 \quad (2)$$

$$H_2 \text{ Yield (\%)} = \frac{1}{5} \times \frac{\text{mole (Produced } H_2)}{\text{mole (Input } C_4H_{10})} \times 100 \quad (3)$$

또한 개질 반응기로 공급되는 전력에 따라서도 개질 성능의 차이가 발생하기 때문에 전력변화에 대한 실험을 실시하였다. 일반적으로 개질이 충분하게 일어나기 위해서는 200W급 이상의 전력공급이 필요하지만, 전기 노이즈의 증가로 인젝터의 작동상 문제가 발생하여 공급 전력 또한 안정성 확보를 위한 절차로서 방전이 발생할 수 있는 최소 전력인 70W 부터 100W급까지 실시하였다.

그리고 플라즈마 방전 시 공기와 LPG를 동시에 공급할 경우 폭발의 위험이 있으므로 공기를 공급한 후 플라즈마를 방전시키고 LPG를 분사하는 순서로 실험을 진행하였다.

III. 실험결과

본 연구에서는 인젝터형 플라즈마 개질기를 이용한 LPG 연료의 개질시 O₂/C 비와 단위 유량당 공급전력 변화에 따른 개질 특성을 비교, 분석하였다.

3.1. 인젝터 개질기의 최적화

LPG 인젝터 개질기는 인젝터의 분사구 앞쪽에 설치할 수 있도록 제작되었다. Fig. 2는 개질기의 외형과 내부 개략도이며, 전력을 공급하면 H/V(High Voltage)에서 GND(Ground)로 방전이 일어나게 된다. Fig. 3에는 실제 연료 인젝터가 장착된 개질기의 모습이 나타나 있다. 개질기 후단에는 SUS재질의 샘플링 파이프가 연결되어 있다.

개질기에서의 플라즈마 발생 형태는 Fig. 4와 같이 구성이며, 고전압(HV, High Voltage)부분에서 그라운드 부분으로 플라즈마가 발생하며 분사된 연료의 일부분을 개질하게 된다. 벤치실험에서 플라즈마 발생 실험결과, 수직형 반응기에서는 플라즈마가 발생

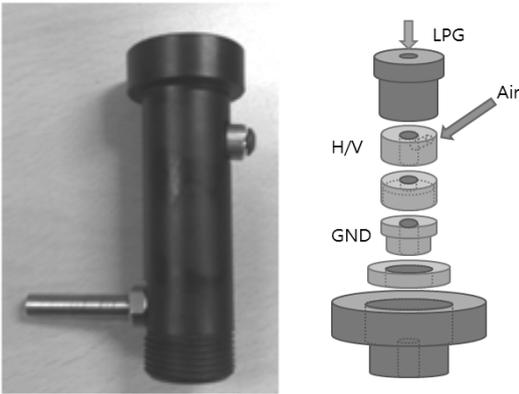


Fig. 2. Schematic diagram of injector reformer.

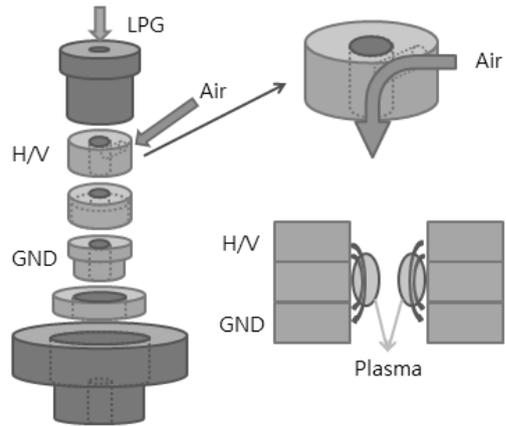


Fig. 4. Schematic diagram of inside structure of injector reformer.



Fig. 3. Installation of injector reformer.

하는 즉시 인젝터 드라이버가 다운되어 실험이 불가능하였다. 이는 플라즈마 반응 시 발생하는 전기 전도성이 있는 탄소침적에 의해 전도성 경로가 형성되면서 통전되기 때문이었다. 이에 탄소침적이 쉽게 발생하지 않도록 하기 위하여 플라즈마 발생부에 경사를 준 개질기를 설계하였고 Fig. 5.의 우측에 그 개략도를 나타내었다.

인젝터 개질기의 최적화 과정을 바탕으로 Fig.4

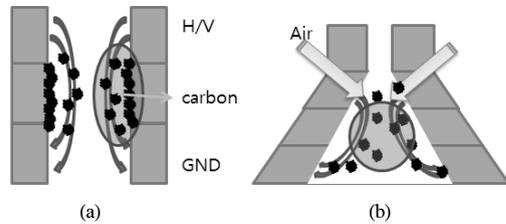


Fig. 5. Comparison of plasma generating section.

처럼 공기 유로는 중앙 유로로 공급하여 균등하게 공급되도록 하였으며, 인젝터와 플라즈마 발생부는 전기 노이즈 문제를 해결하기 위하여 5cm 정도의 일정 거리를 두도록 설계하였다.

실험결과, 플라즈마 반응 시 인젝터 드라이버는 정상 작동하였으며, 계속적으로 반응이 이루어지는 것을 통해 탄소침적을 어느 정도 감소시킨 것을 확인할 수 있었다. 2차 개질기의 최소 방전 전력인 70 W에서 실험을 실시한 후 공급전력을 80, 90, 100 W로 증가시키면서 실험을 진행하였다.

3.2. 인젝터 개질기의 O₂/C 비 변화

실험에서 사용된 LPG연료는 액상 연료 인젝터를 통해서 분사된 액상 LPG연료이기 때문에, 그 중 일부가 기화하여 개질반응에 참여하게 된다. 즉, LPG 인젝터를 통해 분사된 액상 LPG연료는 Fig.4에 나타난 바와 같이 수직으로 아래로 흐르게 되며, 이때 공기가 혼합되어 들어간다. 고전압 및 접지부분으로 이루어진 개질기 부분을 거치면서 반응이 일어나며,

개질된 가스, LPG연료 및 공기가 샘플링 부에서 채집되어 그 성분을 분석하게 된다. 이때 샘플링 라인에서는 가스상의 성분만을 채집하게 되며, 채집된 개질 전, 후의 가스성분을 GC로 분석하였다.

플라즈마 개질기의 전원을 키기 전 성분을 GC로 분석한 결과, 분사된 LPG의 양은 약 1.4 lpm 이었지만 기화되어 개질반응에 참여한 가스상의 LPG 양은 약 29%인 0.4 lpm이었다. 또한 나머지는 95%의 C₄H₁₀ 과 5%의 C₃H₈ 의 LPG 주요 성분으로 이루어져 있었다. 이로 인하여 O₂/C 비가 예상했던 0.37에서 1.4로 증가하게 되었다. 이는 액상의 LPG 연료가 기화되어 기화된 연료만이 개질반응에 참여하기 때문이며, 이런 경우의 특성파악을 우선적으로 진행하기 위하여 O₂/C 비 1.4에서 실험을 계속 진행하였다.

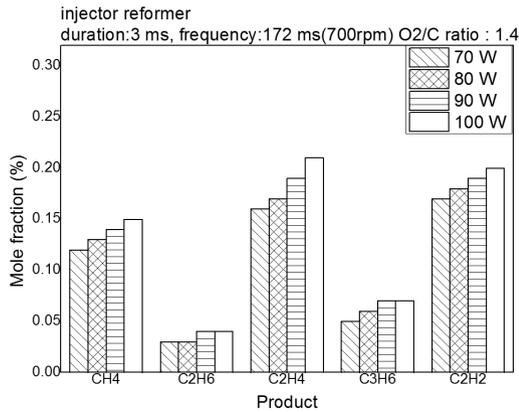
추후 이러한 액상 LPG연료의 특성을 이용하여 전

체적인 O₂/C 비에 대한 연구를 진행할 예정이다.

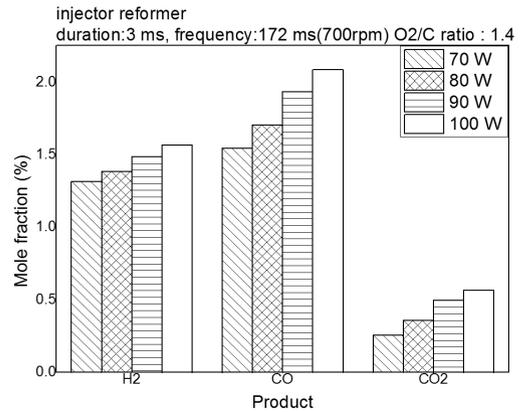
3.3. 인젝터 개질기의 개질특성

Fig. 6.의 (a)~(d) 그래프는 개질실험을 통한 개질 가스 성분을 분석한 결과로서, 공급 전력에 따른 개질결과를 나타낸 그래프이다.

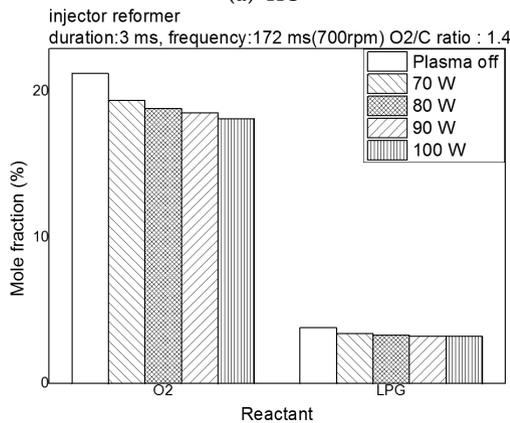
그래프 (a)는 개질반응에 의한 생성물 중 HC (hydrocarbon)의 발생량이며, 공급 전력의 증가에 따라 발생량이 증가하였다. 이 HC류는 반응 전에는 없던 성분으로, 플라즈마 개질기로 LPG연료의 주 성분인 C₄H₁₀ 성분이 낮은 탄소수의 카본으로 열 해리된다는 점을 확인 할 수 있었다. 이는 인젝터 개질기의 목적과 일치하는 결과이며, C₄H₁₀을 제외한 HC의 발생 정도는 전체 개질가스의 0.7% 정도로 낮기 때문에 이를 높이기 위한 추후 보완 연구를 진행할 예정이다.



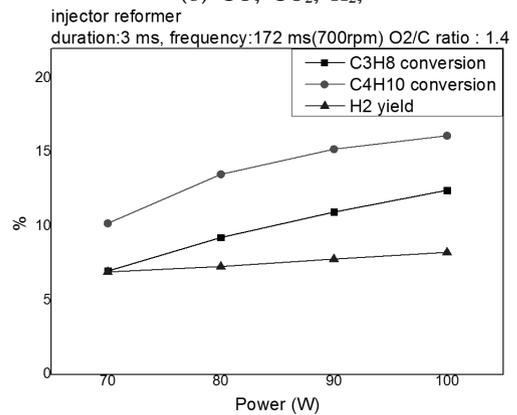
(a) HC



(b) CO, CO₂, H₂,



(c) O₂, LPG



(d) Conversion ratios and H₂ yielded

Fig. 6. Reforming product species with various power: (a) HC, (b) CO, CO₂, H₂, (c) O₂, LPG (d) LPG conversion, H₂ yield.

(b) 그래프는 공급 전력 증가에 따른 H₂, CO, CO₂의 발생량을 나타낸 그래프이다. CO 및 CO₂의 발생량은 개질가스의 2% 이하이며, 전력이 증가함에 따라 H₂, CO, CO₂의 발생량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 개질기로 공급되는 전력이 증가함에 따른 산화반응이 증가하기 때문이며, 산화반응의 생성물인 CO, CO₂의 증가와 그래프 (c)의 전체 반응물의 감소를 통해 산화반응이 증가한 것을 확인할 수 있다.

(d)는 공급 전력 증가에 따른 수소 수율과 LPG 연료의 전환율을 나타낸 그래프이다. 전력 증가에 따라 LPG 연료의 전환율이 증가하였고 수소 수율은 6.93, 7.30, 7.79, 8.25로 증가하였다. 이는 공급 전력 증가에 따른 산화반응의 증가 때문이다.

일반적인 탄화수소계 연료의 플라즈마 개질반응에서는 부분산화에서 완전산화로 진행되면서 H₂의 발생량이 증가하다 어느 수준에 다다르면 H₂가 산화하면서 발생량이 감소하게 된다. 따라서 본 연구에서도 이러한 파라미터가 존재할 것으로 예상되며, H₂의 발생량을 최적화하는 조건을 찾는 향후 연구가 필요할 것으로 보인다.

또한 일반적으로 부분산화된 개질가스를 자동차 연소개선에 이용하는 것은 연소에 필요한 수소연료를 얻는 이점보다는 N₂, CO₂ 가스와 같은 불활성 가스가 다량으로 존재하기 때문에 실제적인 개질기를 이용한 수소공급으로 인한 연소개선 효과가 미미한 편이다. 이는 일반적인 On board형 개질장치가 엔진으로 공급되는 공기와 다른 공기를 이용하며, 이를 엔진의 흡기매니폴드 부분에서 혼합하는 과정에서 다량의 불활성 가스가 추가로 공급되는 이유 때문이다.

이런 점에서 본 연구의 인젝터 개질기를 통한 연구는 엔진으로 들어가는 공기를 그대로 이용하기 때문에 불활성 가스 중 N₂의 증가는 없이, CO₂ 만이 0.5% 이하로 매우 미미하게 증가하며, 주요 연료성분인 부탄이나 프로판 성분을 연소에 유리한 낮은 탄소수의 연료성분으로 열 분해하고, 동시에 1.5% 정도의 수소 생성을 이끌어 낼 수 있기 때문에 연소에 도움이 될 수 있을 것으로 예상된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 LPG 액상분사식 인젝터 분사구 앞에 장착되는 플라즈마 개질기의 가능성에 대한 실험을 하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) LPG 액상분사식 인젝터용 개질기 개발을 위한 개질기의 설계 및 수정, 보안 실험을 통해 통전이 되지 않으며, 개질반응이 일어나는 최적의 인젝터 개질기를 설계, 제작할 수 있었다.

(2) 분사된 액상의 LPG연료가 일부 기화되어 개질반응에 참여하였고, 그 연료의 양은 약 29% 정도였으며, 이로 인하여 개질 O₂/C 비가 변경되었다.

(3) 인젝터 개질기의 공급 전력을 70, 80, 90, 100 W로 증가시킬 때 HC는 전체 개질가스의 0.53, 0.57, 0.62, 0.66% 발생하였고, 수소 수율은 6.93, 7.30, 7.79, 8.25%로 증가하였으며, 공급 전력이 개질 성능에 영향을 미치는 요인임을 확인하였다.

(4) 엔진으로 들어가는 공기를 일부 이용하는 인젝터 개질기의 특성상, 개질가스 중 N₂의 증가는 없으며, 0.5% 이하의 CO₂ 가스의 미미한 증가와 고분자 탄소연료의 분해효과 및 1.5% 정도의 수소 발생이 가능하였다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 “수소-LPG 혼소엔진 및 개질장치 원천기술 개발” 사업과 KIMM의 주요연구사업 “직접분사식 초회박 가스엔진 핵심기술 개발” 사업의 지원 아래 이루어졌으며, 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Junhong Park, Jongtae Lee, Sunmoon Kim, Jeongsoo Kim, Daeil Kang, Yunsung Lim and Boyoung Han, "Estimation on the Emission Reduction of SULEV LPG Vehicles," J. KOSAE Vol. 28, NO.1, pp.66-76, 2012.
- [2] Kernyong Kang, Daeyup Lee, Seungmook Oh and Changup Kim, "Performance of an Liquid Pase LPG Injection Engine for Heavy Duty Vehicles," SAE 2001-02-1958, 2001.
- [3] Changup Kim, Daeyup Lee, Seungmook Oh, Kernyong Kang, Hoimyung Choi and Kyoungdoug Min, "Enhancing Performance and Combustion of an LPG MPI Engine for Heavy Duty Vehicles," SAE 2002 International Congress and Exposition, 2002-01-0449, 2002.
- [4] Tunestål, P., Christensen, M., Einewall, P., Andersson, T. et al., "Hydrogen Addition For Improved Lean Burn Capability of Slow and Fast Burning Natural Gas Combustion Chambers,"

- SAE Technical Paper 2002-01-2686, 2002.
- [5] Miyamoto, T., Hasegawa, H., Yagenji, T., Seo, T. et al., "Effects of Hydrogen Addition to Intake Mixture on Cyclic Variation of Diesel Engine," SAE Technical Paper 2011-01-1964, 2011.
- [6] Dae Hoon Lee, Kwan-TAE Kim, Min Suk Cha, Young-Hoon Song, "Effect of excess oxygen in plasma reforming of diesel fuel," Int.J. Hydrogen Energy, Vol. 35, pp. 4668-4675, 2010.
- [7] Yunhwan Park, Deahoon Lee, Changup Kim, Kernyoung Kang, Yongseok Cho, "Characteristics of LPG fuel reforming utilizing plasma reformer" J. KIGAS, Vol. 16, No. 6, pp 17-22, 2012.
- [8] S. Kado, K. Okazaki, " Reaction mechanism of methane activation using non-equilibrium pulsed discharge at room temperature," Fuel, 82, 2003, pp.2291-2297.