



## 수소 생성을 위한 플라즈마 개질기에서의 LPG 연료의 개질 특성

박윤환 · 이대훈 · †김창업 · 강건용

한국기계연구원

(2013년 7월 24일 접수, 2013년 12월 2일 수정, 2013년 12월 2일 채택)

### Characteristics of LPG fuel Reforming in Plasma Reformer for Hydrogen Production

Yunhwan Park · Deahoon Lee · †Changup Kim · Kemyong Kang

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

(Received July 24, 2013; Revised December 2, 2013; Accepted December 2, 2013)

#### 요약

본 연구에서는 LPG자동차용으로 적용키 위한 플라즈마 개질기에서 개질기 형상변화가 개질 특성에 미치는 영향에 대해 실험을 하였다. 수소 수율을 향상시키기 위해, 2차 개질기는 1차 개질기에 비해서 개질기 후단부의 부피를 증가시켜 플라즈마를 통과하는 개질가스의 반응시간을 증가시켰다. 각 개질기의 비교를 위하여 O<sub>2</sub>/C 비를 부분산화 조건에서부터 완전산화 조건까지, 총 유량은 20, 30, 40, 50 lpm으로 증가시키며 실험을 하였다.

각 개질기의 특성을 비교해본 결과, O<sub>2</sub>/C 비가 부분산화 조건에서 완전산화 조건으로 갈수록 LPG 전환율은 증가하였고, 수소 선택도는 감소하였으며, 수소 수율은 증가하다 감소하는 최적조건이 존재하였다. 개질기는 4.5배 부피가 큰 2차 개질기가 1차 개질기에 비해 동일 유량에서 수소 수율이 4~14% 증가한 결과를 얻을 수 있었다.

**Abstract** - In this study, characteristics of the geometric design changes of plasma reformer for LPG fuelled vehicles were studied. To improve the yield of hydrogen, reformer 1st, and 2nd were designed. Secondary reformer compared to the primary reformer to increase the volume of the rear part of reformed gas having passed through the plasma and increased reaction time. To compare reforming results of two reformers, various experimental conditions such as, from partial oxidation to total oxidation conditions O<sub>2</sub>/C ratios, and total flow rate of 20, 30, 40, 50 lpm conditions, were varied.

Results showed that with increasing O<sub>2</sub>/C ratios, LPG conversion rate increased, decreased hydrogen selectivity and hydrogen yield optimal point existed and secondary reformer 4.5 times larger than the primary reformer at the same flow rate to 4~14% increase in the yield of hydrogen.

**Key words** : LPG, reforming, plasma, hydrogen

#### 1. 서론

전 세계적으로 늘어가는 차량으로 인해 환경오염과 화석연료의 고갈 문제가 심각해지고 있으며, 이

에 따라 전체 차량에 대한 배출가스 규제가 엄격해지고 있다[1]. LPG 차량의 경우 규제에 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]. 또한 최근에는 LPG 직접분사식 시스템(LPDi) 기술이 개발되어 곧 보급되어질 전망이다.

†Corresponding author: cukim@kimm.re.kr

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

한편, 최근 수소 경제시대를 맞아 수소와 기존연료에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는데, 여러 연구를 통해 수소를 기존연료에 첨가함으로써 연소 성능을 향상시키고 배기성능을 개선할 수 있음이 밝혀졌다[4,5]. 천연가스 연료에 수소를 첨가하는 HCNG와 액화석유가스(LPG) 연료에 수소를 첨가하는 HPLPG에 대한 연구 등이 그것인데, 천연가스의 경우 CNG의 형태로 연료탱크 내에 기상으로 존재하기 때문에 수소와 직접 혼합하여 저장 및 사용이 가능한 특징이 있다. LPG 연료의 경우, 연료자체의 특성상 기상과 액상이 같이 존재하기 때문에 수소를 첨가하기 위해서 별도의 연료시스템이 필요하게 된다.

수소를 공급하기 위한 연료 시스템은 크게 수소소스테이션을 이용하는 충전소(on-site) 방식과 차량 내에서 기존 연료를 개질하여 합성가스를 생산하는 차량(on-board) 방식으로 나뉜다. On-site 방식의 경우, 차량에 추가적인 수소 저장 및 공급할 수 있는 연료시스템이 요구되기 때문에 장소와 장치의 복잡성 면에서 on-board 방식이 유리한 측면이 있다. 그러나 on-board 방식의 경우도 개질장치의 복잡함, 개질연료의 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 사용이 가능한 빠른 개질 시동시간, 응답성 및 개질량의 확보가 필요하며, 차량 내 설치 문제로 인한 반응기의 소형화와 단순화 등이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 여러 가지 연료의 개질방식 중 개질반응에 반응물로 물이 첨가되지 않는, 부분산화반응을 이용하고자 한다. 또한 촉매를 사용한 개질시 발생할 수 있는 탄소침적문제 및 촉매 활성화 시간 문제와 파괴 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 플라즈마 개질방식을 적용하였다. 즉, LPG 차량에 바로 적용 가능한 플라즈마 부분산화개질 반응의 특성을 알아보았다.

## II. 실험장치 및 실험방법

### 2.1. 실험장치

실험장치는 가스 공급부와 전원 공급부, 가스 분석부, 플라즈마 개질기로 구성되어있으며, Fig. 1에 전체적인 구성을 나타내었다.

플라즈마 개질기를 이용한 부분산화반응에서 개질기로 공급되는 유량, 전력 등에 의해 성능변화가 나타나므로 유량 및 전력을 공급함에 있어 주의가 요구된다. MFC(mass flow controller)를 통해서 공기와 LPG의 유량을 정밀하게 공급하였고, 오실로스코프를

사용해 공급 전력을 실시간으로 계측하였다.

실험에 사용된 전원 공급장치는 1 kW 출력의 AC 전원장치를 사용하였고, 10 kV까지 공급할 수 있는 고전압 트랜스를 이용하였다. 개질이 끝난 가스는 개질기 후단부의 샘플링 포트를 통해 포집하여 GC (Agilent, 6890N)로 성분을 분석하였다.

실험에 사용된 플라즈마 개질기는 원추형의 전극을 둘러싸고 있는 원통형의 집지 전극으로 이루어져 있고, 반응물이 공급될 때 회전유동을 가지도록 설계되었다. 원추형 전극 하부와 원통형 집지 사이에서 아크가 발생하고 반응물의 회전유동에 의해 후단으로 진행되게 된다[6].

플라즈마 발생부 후단의 형상에 따른 개질 특성 변화를 알아보기 위해서 2가지 형태의 개질기(R-1, R-2)를 제작하여 실험을 진행하였다. 열손실이 중요한 설계파라미터이기 때문에 이에 대한 비교를 위하여 각 개질기는 SUS 3t로 동일하게 제작되었으며, 개질기의 형상변화에 따른 열손실만 존재하도록 하였다. 각각의 개질기의 개략도 및 제원은 Fig. 2와 Table 1.에 나타내었다.

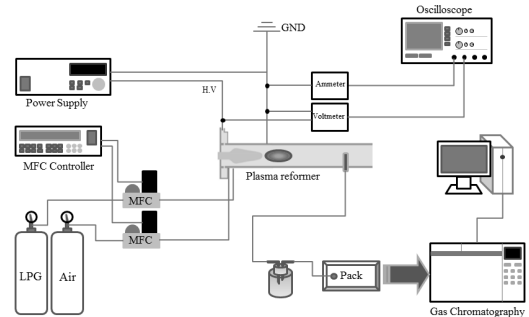


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

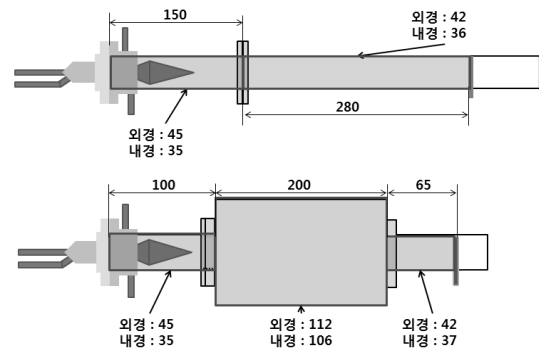


Fig. 2. Schematic of plasma reformer.

**Table 1.** Specification of plasma reformer

|                           | R-1(reformer 1) | R-2(reformer 2) |
|---------------------------|-----------------|-----------------|
| 길이 (mm)                   | 430             | 365             |
| 내경 (φ)                    | 35 / 36         | 35 / 106 / 37   |
| 외경 (φ)                    | 45 / 42         | 45 / 112 / 42   |
| 내부 표면적 (cm <sup>2</sup> ) | 501.7           | 1027.7          |
| 내부 부피 (cm <sup>3</sup> )  | 429.1           | 1930.4          |

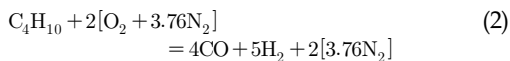
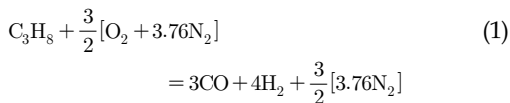
**2.2. 실험방법**

플라즈마를 이용한 부분산화반응의 경우 반응물의 산소와 LPG의 상대적인 양인 O<sub>2</sub>/C 비에 따라 개질시 성능 변화가 나타나게 된다. 따라서 본 연구에서는 개질시 높은 수소 수율 및 수소 선택도를 만족시키는 O<sub>2</sub>/C 비를 찾기 위해, 부분산화의 이론적 O<sub>2</sub>/C 비인 0.5 조건부터 완전산화 O<sub>2</sub>/C 비인 1.625 까지 변화시켜가며 실험을 진행하였다. 실험결과를 여러 번의 반복실험을 통하여 재현성을 확인하였으며, 약 1~2%의 실험오차를 수반하고 있다.

또한, 반응물로 공급되는 전력이 따른 단위 유량당 공급전력값(SED : specific energy density)에 따라서도 성능 변화가 나타나기 때문에, 모든 실험에서 개질기로 공급되는 전력은 200 W로 고정하고, 반응물의 유량을 20, 30, 40, 50 lpm으로 증가시켰다.

실험 조건은 R-1과 R-2 동일 조건으로 진행되었으며, 개질기의 상태는 대기압, 실온 약 23℃에서 실험이 이루어졌다. 개질실험에 사용된 LPG는 GC분석 결과, 35%의 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>과 65%의 C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>으로 이루어져 있으며, 각각의 부분산화 개질반응의 양론식은 수식 (1), (2)와 같다.

개질의 성능과 특성은 공급된 LPG의 전환율(수식 (3)), 개질된 LPG 중 발생한 수소의 상대적인 양을 나타내는 수소 선택도(수식 (4)), 공급된 LPG 중 발생한 수소의 발생량인 수소 수율(수식 (5))로써 평가하였다.



$$C_4H_{10} \text{ Conversion (\%)} \quad (3)$$

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

$$H_2 \text{ Selectivity (\%)} \quad (4)$$

$$= \frac{1}{5} \times \frac{\text{mole(Produced } H_2)}{\text{mole(Converted } C_4H_{10})} \times 100$$

$$H_2 \text{ Yield (\%)} \quad (5)$$

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

**III. 결과 및 고찰**

본 연구에서는 플라즈마 개질기를 이용한 LPG 연료의 개질시 O<sub>2</sub>/C 비와 단위 유량당 공급전력 변화에 따른 개질 특성과 각각의 역할에 대해 분석하고, 개질기 후단부의 형상에 따른 개질 특성을 비교, 분석하였다.

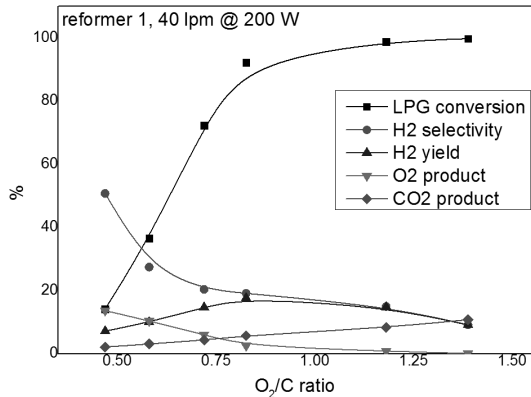
**3.1. O<sub>2</sub>/C 비와 SED에 따른 개질 특성**

전술한 바와 같이 플라즈마를 이용한 부분산화반응에선 공급되는 반응물의 O<sub>2</sub>/C 비와 SED 값에 따라 개질 성능 차이가 발생하게 된다[7]. 부분산화반응의 경우, 이론적 부분산화 양론비인 O<sub>2</sub>/C 비 0.5 조건에서 LPG의 주 성분인 C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>이 모두 반응하여 화학평형을 이루었을 때, 발생하는 수소는 생성물의 약 30% 정도이다. 그리고 O<sub>2</sub>/C 비가 0.5를 넘어가면서 전체반응에서 차지하는 완전산화의 비중이 증가하게 되고 수소가 산화하면서 생성량이 감소한다. 하지만 실제 반응에서는 주위로의 열손실 및 짧은 반응시간 등의 이유로 차이가 나게 된다. 따라서 O<sub>2</sub>/C 비를 0.5에서 1.625(완전산화 O<sub>2</sub>/C 비)까지 증가시켜가며 실험을 진행하였다.

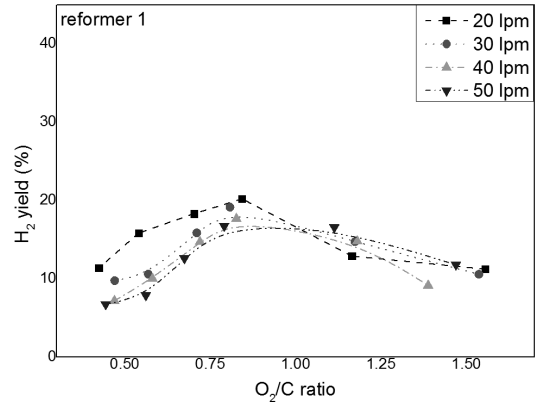
Fig. 3의 (a) 그래프는 앞서 진행된 R-1의 개질 특성 결과이며, 공급되는 반응물의 총 유량은 40 lpm이다. O<sub>2</sub>/C 비가 완전산화 조건으로 증가할수록 LPG 연료의 전환율은 증가하여 100%에 다다르고, 수소 선택도는 점차 감소하였으며, 수소 수율은 증가하다 일정 O<sub>2</sub>/C 비 조건부터 감소하기 시작한다. 이러한 경향은 O<sub>2</sub>/C 비가 증가하면서 완전산화의 비중이 커지기 때문이며, 완전산화의 비중이 증가하는 증거는 완전산화시 생성되는 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>의 증가로 설명할 수 있다. 그래프를 통해 CO<sub>2</sub>가 증가하는 것을 알 수 있고, H<sub>2</sub>O는 LPG 전환율이 증가하여 반응하는 LPG의 양은 증가하지만 H<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub>의 발생량이 감소하는 것을 통해 산화하여 H<sub>2</sub>O로 전환되었음을 간접적으로 알 수 있다.

Fig. 3의 (b) 그래프는 반응물의 총 유량이 40 lpm 이고 공급 전력이 200 W로 동일한 조건의 결과 그래프이다. O<sub>2</sub>/C 비가 증가함에 따라 R-1과 동일한 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

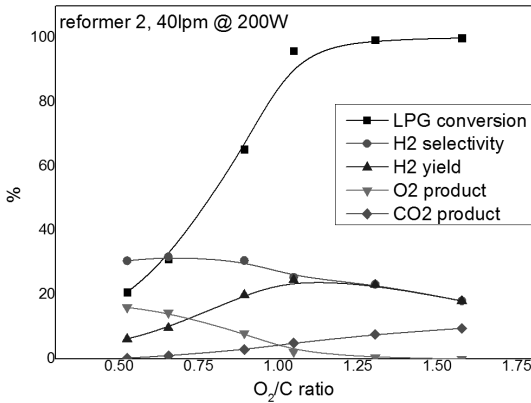
수소 생성을 위한 플라즈마 개질기에서의 LPG 연료의 개질 특성



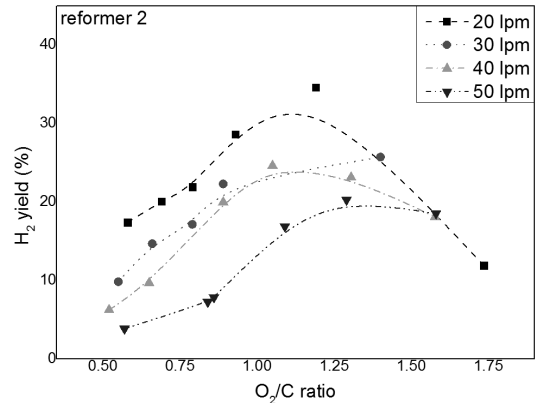
(a) Reformer 1



(a) Reformer 1



(b) Reformer 2



(b) Reformer 2

Fig. 3. Reforming results with various O<sub>2</sub>/C ratios (40 lpm, 200 W).

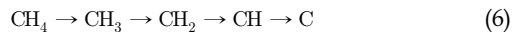
Fig. 4. Comparison of H<sub>2</sub> yield with total flow and O<sub>2</sub>/C ratios

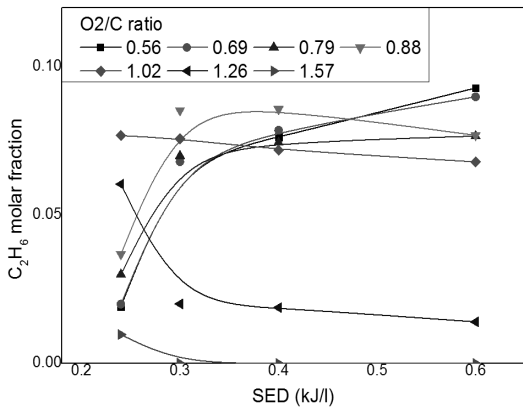
Fig. 4의 (a)와 (b)는 각각 총 유량이 20, 30, 40, 50 lpm으로 증가 할 때 R-1과 R-2의 수소 수율 그래프이다. R-1의 경우 20~50 lpm으로 유량이 증가함에 따라 최대 수소 수율은 20%(O<sub>2</sub>/C 비:0.84), 19%(O<sub>2</sub>/C 비:0.80), 17%(O<sub>2</sub>/C 비:0.82), 16%(O<sub>2</sub>/C 비:0.79)로 감소하였으며, R-2는 34.6%(O<sub>2</sub>/C 비:1.19)%, 25.7%(O<sub>2</sub>/C 비:1.4), 24.6%(O<sub>2</sub>/C 비:1.05), 20.3%(O<sub>2</sub>/C 비:1.29)로 감소하였다. 공급전력이 고정된 상태에서 유량이 증가할 수록 SED 값이 감소하기 때문에 유량이 적을수록 상대적으로 높은 수소 수율이 나타났다. 이는 SED 값이 높을수록 열적인 활성도가 증가하여 산화반응을 촉진시키는 역할을 하기 때문이다.

### 3.2. O<sub>2</sub>/C 비와 SED의 역할

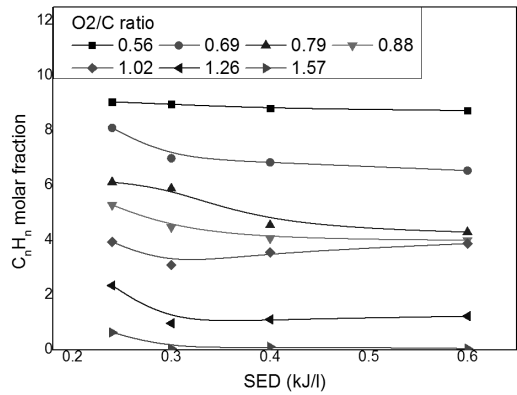
플라즈마 개질기를 이용한 LPG 연료의 부분산화 개질에서 O<sub>2</sub>/C 비와 SED 값 변화에 따라 개질 반응 특

성이 달라진다. 일반적으로 탄화수소계 연료의 플라즈마 분해 및 개질은 O<sub>2</sub>/C 비 효과로 대변되는 열화학반응과 SED 효과로 대변되는 플라즈마 화학반응에 의해 이루어진다. 각각의 반응은 서로 다른 경로를 가지고 있으며, 개질 반응시 동시에 나타난다. 열화학반응에 메탄은 탈수소화 과정을 거치며 수식 (6)과 같은 경로로 분해된다. 플라즈마 화학반응은 수식 (7)~(10)과 같이 높은 에너지를 가진 전자와 충돌해 분해되는 직접분해반응이 이루어진다.

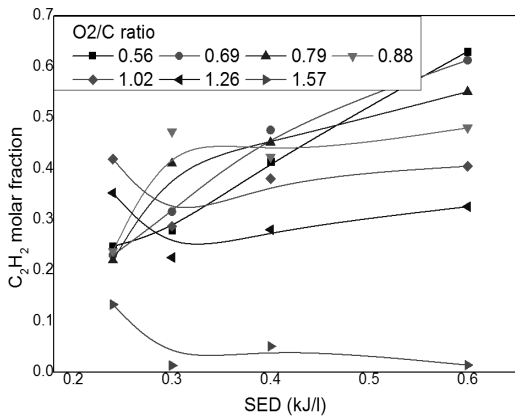




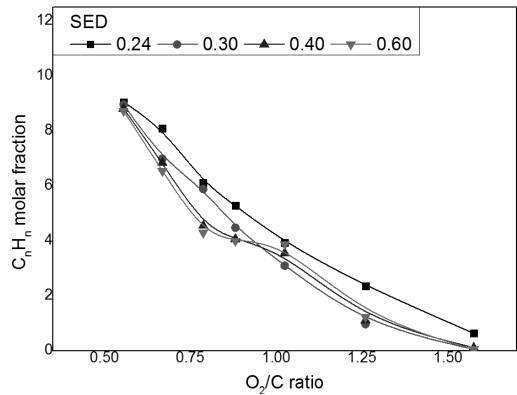
(a) C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>



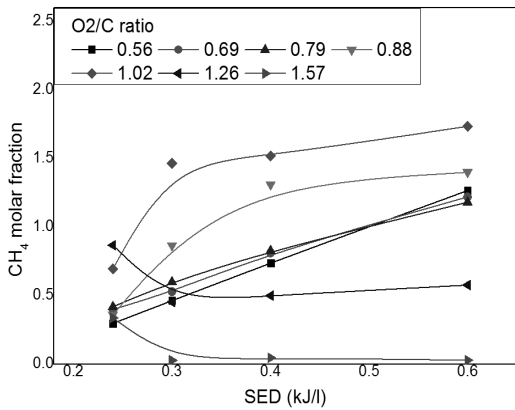
(a) SED



(b) C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>



(b) O<sub>2</sub>/C ratio



(c) CH<sub>4</sub>

Fig. 5. Comparison of HC molar fractions with SED values and O<sub>2</sub>/C ratios of reformer 2.

Fig. 6. Comparison of C<sub>n</sub>H<sub>n</sub> molar fractions with various SEDs and O<sub>2</sub>/C ratios of reformer 2



플라즈마 개질에서는 두 경로가 동시에 진행되며, 전체 반응에서 각각의 경로가 차지하는 정도에 따라서 최종적으로 생성되는 가스의 선택도가 달라진다[8].

LPG 연료의 주 성분인 C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>은 분해되는 과정에서 탄소수가 줄어들게 되고 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> 과정에 도달하게 된다. 이 때 충분한 열적 환경이 없으면 CH<sub>4</sub>나 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>와 같이 비교적 안정한 화합물 단계에서 반응이 종료된다. C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>는 C<sub>2</sub>화합물 중 비교적 높지 않은 열적

환경에서 생성되어  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ 로 진행되므로, 반응시 열적 환경에 대해 다른 화학종보다 예민하게 반응한다. 따라서  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_nH_n$ 의 분석을 통해 SED 값과  $O_2/C$  비 역할을 구분할 수 있다.

Fig. 5의 (a)~(c) 그래프는 R-2의 개질 결과로서, SED 값 변화에 따른  $C_2H_6$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ 의 생성량을  $O_2/C$  비 변화에 의한 결과와 함께 분석한 그래프이다. 세 화학종 중  $C_2H_6$ ,  $C_2H_2$ 는  $O_2/C$  비 0.88 조건 이하,  $CH_4$ 의 경우 1.02 이하의 조건에선 SED 증가에 따라 생성량이 증가하지만, 그 이상의 조건에서는 감소하는 경향이 나타났다.

이러한 이유는, 부분산화 조건의  $O_2/C$  비 보다 조금 높은 조건에서는 반응시 발생하는 반응열로 인해 반응이 촉진되지만 일정  $O_2/C$  비 조건 이상이 되면 산화되기 때문이다. 또한  $CH_4$ 의 생성량이 감소하는  $O_2/C$  비가 더 높은 이유는 다른 화학종에 비해 더 안정한 화합물 단계이기 때문에 더 높은 열적환경이 형성되는  $O_2/C$  비 1.26 조건에서 산화하기 때문이다.  $O_2/C$  비 1.02이하에서 SED 변화에 따른 각각의 화학종들의 생성량 변화가 큰 것을 통해 SED는  $O_2/C$  비가 상대적으로 낮은  $O_2/C$ 비 1.02이하에서 반응에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 또한 앞서 진행된 R-1의 경우  $O_2/C$  비 0.9이하로 나타났다.

Fig. 6의 (a)와 (b)는  $C_nH_n$ 의 생성량을 각각 SED 값과  $O_2/C$  비에 따른 결과 그래프이다. (a)에서 나타나듯이 동일  $O_2/C$  비 조건에서 SED 값에 의한  $C_nH_n$ 의 생성량 차이는 크지 않았다. 반면, (b) 그래프를 통해  $O_2/C$  비 증가에 따라  $C_nH_n$ 의 생성량은 크게 감소하는 것을 확인할 수 있고,  $O_2/C$  비에 의한 효과가 SED 값에 의한 효과보다 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

### 3.3. 개질기 후단부 형상에 의한 효과

R-1의 경우 20 lpm으로 비교적 유량이 적어 반응에 유리한 조건임에도 수소 수율은 20% 정도로 낮았다. 이러한 요인이 내경이 35 mm 정도이며, 체적이 작기 때문에 플라즈마를 지난 가스가 반응할 수 있는 시간이 부족한 것으로 보인다. 즉, 개질기로 유입된 반응물은 플라즈마를 지나면서 반응하여 열이 발생하기 때문에, 플라즈마를 지난 후에도 반응이 지속될 수 있지만 R-1의 경우 체적이 작아 형상적으로 한계가 있는 것으로 보였다. R-2는 이러한 형상적인 한계를 극복하기 위해 개질기의 후단부 체적을 증가시킨 경우이다.

Fig. 7은 R-1과 R-2의 최고 수소 수율을 나타낸 그래프이다. 동일한 유량 조건에서 R-2의 수소 수율이 R-1에 비해 20 lpm 조건에서 14%, 30 lpm 조건에선

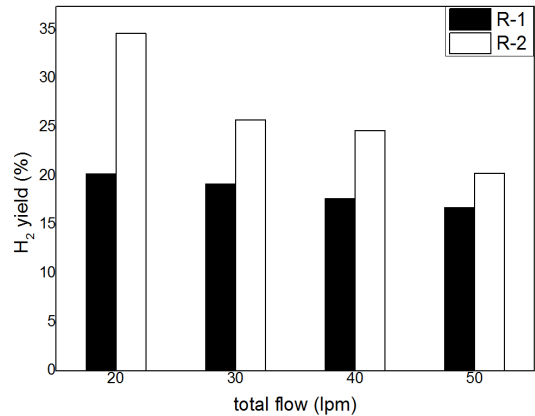


Fig. 7. Comparison of H<sub>2</sub> yields with reformer 1 and reformer 2

7%, 40 lpm 조건은 7%, 50 lpm 조건에서 4% 더 높게 나타났으며, 유량이 클수록 증가폭은 감소하였다.

R-2의 수율이 R-1에 비해서 증가한 이유는 플라즈마 후단부 반응기의 체적이 R-2가 R-1에 비해서 5배 정도 크며, 이로 인해 개질반응시간이 더 길게 된다. 이를 통해서 플라즈마를 통과한 개질 가스의 반응시간을 증가 시켜주는 것이 높은 수소수율을 얻는데 유리한 것으로 판단되었다. 또한 R-1에 비해서 R-2의 유량증가에 따른 수율 감소율이 큰 이유는 약 2배 이상 되는 표면적으로 인한 열손실 증가효과 때문인 것으로 보인다. 따라서 사용되는 유량대비 체적비를 최적화하는 연구가 필요할 것이다.

## V. 결론

본 연구에서는 LPG 연료에 대한 플라즈마 개질에서의 개질 특성을 알아보기 위해  $O_2/C$  비와 SED 값, 개질기 형상을 변화시켜 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 개질기 형상과 관계없이 부분산화( $O_2/C$  비 : 0.5)에서 완전산화( $O_2/C$  비 : 1.625)까지의  $O_2/C$  비가 증가함에 따라 LPG 전환율이 증가하고, 수소 선택도는 감소하며, 수소 수율은 증가하다 감소하는 최적의 조건이 존재하였다.

(2) R-2에서 유량을 20~50 lpm으로 변화시켜 실험한 결과, 현재 실험 조건의  $O_2/C$  비에서 각 유량에서 최대 수소 수율이 나타나는 조건은 20 lpm의 경우 1.19(수소 선택도 : 34.9, 수소 수율 : 34.6), 30 lpm은 1.4(수소 선택도 : 25.79, 수소 수율 : 25.74), 40

lpm은 1.05(수소 선택도 : 25.48, 수소 수율 : 24.64), 50 lpm 조건에선 1.29(수소 선택도 : 25.3, 수소 수율 : 20.3)로 나타났다.

(3) 개질 반응시 SED 값이 높을수록 열적 활성도를 증가시켜 산화반응을 촉진시키기 때문에 상대적으로 SED 값이 낮은 조건보다 높은 수소 수율을 얻을 수 있었다.

(4) O<sub>2</sub>/C 비가 SED 값에 비해 개질에 미치는 영향이 크게 나타났으며, SED 값은 O<sub>2</sub>/C 비가 상대적으로 낮은 조건, R-1은 O<sub>2</sub>/C 비 0.9 이하, R-2는 O<sub>2</sub>/C 비 1.02 이하 조건에서 반응에 미치는 영향이 크게 나타났다.

(5) 개질기 후단부의 형상 변화를 통한 개질가스의 반응시간 증가는 수소 수율 측면에서 유리하였으며, R-1에 비해 20 lpm 조건에서 14%, 30 lpm 조건에선 7%, 40 lpm 조건은 7%, 50 lpm 조건에서 4% 증가하였다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부가 지원하는 “수소-LPG 혼소 엔진 및 개질장치 원천기술 개발” 사업의 지원 아래 이루어졌으며, 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

## 사용기호

SED : specific energy density [kJ/l]

## 참고문헌

- [1] Park, J.H., Lee, J.T., Kim, S.M., Kim, J.S., Kang, D.I., Lim, Y.S., and Han, B.Y., "Estimation on the Emission Reduction of SULEV LPG Vehicles", *J. KOSAE* Vol. 28, NO.1, 66~76, (2012)
- [2] Kang, K.Y., Lee, D.Y., Oh, S.M., and Kim, C.U., "Performance of an Liquid Pase LPG Injection Engine for Heavy Duty Vehicles," *SAE* 2001-02-1958, (2001)
- [3] Kim, C.U., Lee, D.Y., Oh, S.M., Kang, K.Y., Choi, H.Y., and Min, K.D., "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] Lee, D.H., Kim, K.T., Cha, M.S., Song, Y.H., "Effect of excess oxygen in plasma reforming of diesel fuel," *Int.J. Hydrogen Energy*, Vol. 35, 4668-4675, (2010)
- [7] Park, Y.H., Lee, D.H., Kim, C.U., Kang, K.Y., Cho Y.S., "Characteristics of LPG fuel reforming utilizing plasma reformer" *J. KIGAS*, Vol. 16, No. 6, 17-22, (2012)
- [8] Kado, S., Urasaki, K., Sekine, Y., Fujimoto, K., Nozaki, T., Okazaki, K., " Reaction mechanism of methane activation using non-equilibrium pulsed discharge at room temperature," *Fuel*, Vol. 82, No 18, 2291-2297, (2003)