

## 디젤의 저온 플라즈마 개질반응 및 개질가스의 디젤엔진 첨가에 관한 연구

조용훈, 최현규, 김성수, 나정걸, 정수현\*, 김진걸<sup>1</sup>  
 한국에너지기술연구원, 순천향대학교 신소재화학공학부<sup>1</sup>  
 (chung@kier.re.kr\*)

### A Study on the Nonthermal Plasma-assisted Diesel Reforming and Injection of Reformed Gas into a Diesel Engine

Yong-Hoon Cho, Hyun-Kyu Choi, Seong-Soo Kim, Jeong-Geol Na,  
 Soo-Hyun Chung\*, Jin-Gul Kim<sup>1</sup>  
 Korea Institute of Energy Research, Soonchunhyang University<sup>1</sup>  
 (chung@kier.re.kr\*)

#### 서론

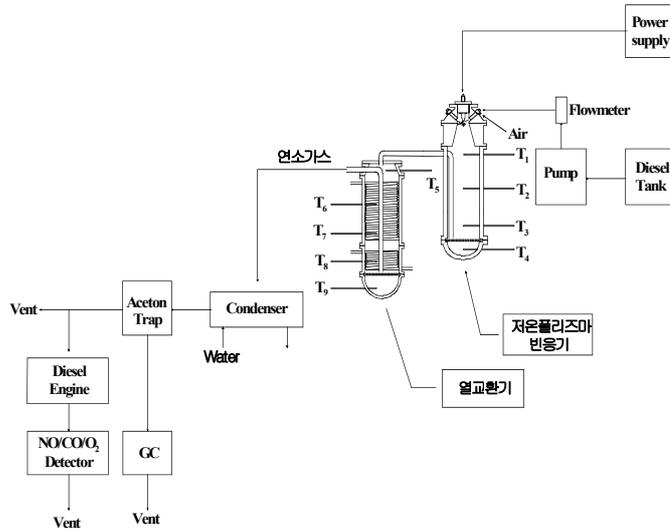
본 연구의 목적은 자동차 또는 선박용 디젤엔진에 적용하기 위한 디젤의 청정연소기술로써 디젤엔진으로 공급되는 디젤의 일부를 저온 플라즈마 연료개질 장치에서 부분산화시켜 수소농후 개질가스를 생성하고 이 개질가스를 연소용 공기와 같이 디젤엔진에 주입하여 배기가스중의 NO<sub>x</sub>와 매연을 동시에 저감하는 기술의 타당성을 조사하기 위한 것이었다.

고전압 저전류를 이용하는 저온 플라즈마 연료개질 장치의 연구는 2000년경부터 Bromberg 등[1, 2], Prieto 등[3]에 의하여 수행되어 왔다. 특히 Bromberg 등[1, 2]의 연구결과는 상당히 진전되어 이미 상용화 단계에 근접한 것으로 알려져 있으나 저온 플라즈마 연료개질장치의 제원 및 상세한 실험조건은 아직 공개되지 않은 상태이다. 가솔린 엔진 또는 디젤엔진에 수소 또는 수소농후 개질가스를 첨가하여 NO<sub>x</sub> 및 매연과 같은 대기오염물질의 생성을 저감하는 기술은 이미 1970년대부터 많은 연구가 수행되어 왔다 [4, 5]. 소량의 수소를 디젤엔진에 첨가제로 주입하면 수소의 빠른 화염전파속도에 의하여 더욱 희박한 상태로 연소를 가능하게 하며 국부적인 Hot Spot를 감소시켜 매연과 NO<sub>x</sub>의 배출이 저감되는 것으로 알려져 있다.

#### 실험

[그림 1]은 본 연구에서 사용된 저온 플라즈마 연료개질 장치와 디젤엔진으로 구성된 실험용 시스템을 보여준다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 이 시스템은 디젤 이송장치, 디젤 주입장치, 저온 플라즈마 연료개질 반응기, 전력공급장치, 개질가스 및 배기가스 성분 분석장치로 구성되어 있다. 3~10 g의 디젤이 정량펌프와 유량계를 사용하고 1/4" SUS 관을 통하여 저온 플라즈마 연료개질 반응기의 상부에 위치한 점화실(저온 플라즈마 발생장치)로 공급되었고 특별히 제작된 이유체 노즐을 사용하여 미세한 액적 상태로 주입되었다. 주입되는 디젤의 점화가 용이하도록 1/4" SUS 관을 Heating Tape로 감아 이송되는 디젤을 약 200°C로 예열하였다. 부분산화반응에 필요한 충분한 공기를 공급하기 위하여 20 Nℓ/분의 보조공기가 별도의 1/4" 관 2개를 사용하여 저온 플라즈마 발생장치의 이유체노즐 상부로 주입되었다. 점화실 하부에는 반응실이 위치하였는데 개질가스의 체류시간을 충분히 크게 하여 점화실에서 시작된 부분산화반응을 완료하기 위한 것이었다. 반응용기 내부에는 420 cc의 직경 7 mm 세라믹 볼을 넣어 기화되지 않은 디젤액적이 가열된 세라믹 볼과 접촉하여 반응기로부터 배출되기 전에 충분히 기화되어 반응하도록

하였다. 반응기로부터 배출된 개질가스는 응축기와 아세톤 트랩을 거치며 수분과 유분을



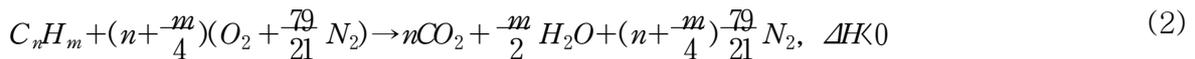
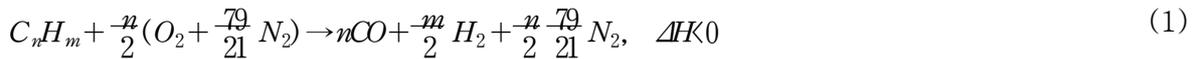
[그림 1] 실험장치

제거후 TCD가 장착된 HP 6890 GC를 사용하여 On-line으로 H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> 성분이 분석되었다. 저온 플라즈마 연료 개질 반응기의 성능은 개질가스 중의 H<sub>2</sub>농도(%)와 H<sub>2</sub> 수율에 의하여 평가되었다. 성분이 분석된 개질가스는 디젤엔진의 연소공기 공급관으로 이송되어 연소공기와 섞여 디젤엔진 연소시 첨가되었다. 디젤엔진은 10 마력 규모 Direct Injection식 엔진과 4.6 마력 규모 예혼합식 엔진을 사용하였다. 두 엔진은 모두 단기통 4행정 엔진이었다. 배기가스의 NO, CO, O<sub>2</sub> 성분은 NDIR 방식 분석기를 사용하여 측정하였고

고 매연농도는 여과지 광반사식 매연측정장치를 사용하여 측정하였다.

**결과 및 논의**

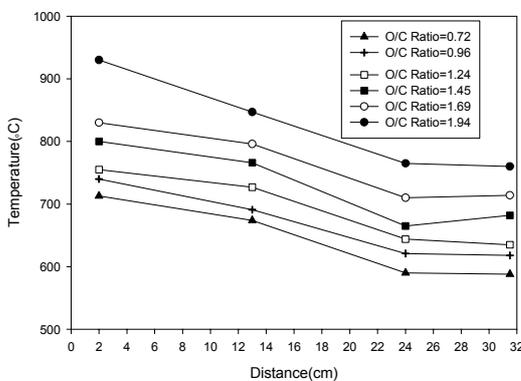
저온 플라즈마 연료개질 반응기에서 일어나는 반응은 이상적으로는 개질가스를 생성하는 아래의 부분산화반응 (1)만 일어나야 하나 이 반응의 발열량이 작으므로 O<sub>2</sub>를 부분산화반응에 필요이상으로 공급하여 발열량이 큰 완전산화반응 (2)도 동시에 일어나도록 함으로써 반응온도를 고온으로 유지하게 된다.



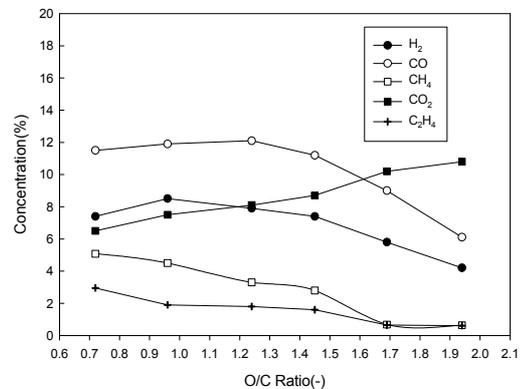
반응 (1)과 (2)의 시작은 저온 플라즈마 방전에 의하여 좌우되지만 발생하는 반응열에 의하여 반응기내 온도가 점차로 상승하여 평형 반응온도에 도달한다. 따라서 저온 플라즈마 연료개질 반응기에서 발생하는 개질가스의 조성은 플라즈마 방전시의 전압, 주파수, 전력소모량 보다는 반응 (1)과 (2)의 상대적인 비율을 결정하는 O/C 비에 의하여 결정된다. 따라서, 전력소모량을 일정하게 유지하는 경우 전압과 주파수는 개질반응의 점화 용이성에 영향을 주지 않았으며 전력소모량이 개질반응의 점화 용이성에 영향을 주었을 뿐이다. 전력소모량이 증가할수록 개질반응의 점화가 용이하였는데, 이러한 현상은 저온 플라즈마 방전시 생성되는 각 전자의 에너지는 같은 것이 아니고 분포를 가지며 충분히 큰 에너지를 갖은 전자만이 분자를 활성화시켜 반응성 화학종이 생성되도록 하는데 전력소모량이 증가되면 충분한 에너지를 가진 전자의 밀도가 증가하여 탄화수소와 산소의 라디칼 또는 이온화가 더욱 용이하여지기 때문이다[6].

[그림 2]와 [그림 3]은 35 w(200 Hz)의 전력을 사용하여 실험하였을때 각각 O/C 비가 반응기 내부 온도분포와 개질가스 조성에 미치는 영향을 보여준다. [그림 2]에서 볼 수 있듯이, 각 O/C비가 증가함에 따라 부분산화반응 (1)에 대한 산화반응 (2)의 비율이 증가함에 따라 반응기 내부에서의 온도는 계속적으로 증가하였으며 반응기 상부와 하부 사이의 온도차이는 약 100~200°C 정도였다. [그림 3]에서 O/C 비가 0.72~1.94 사이에

서  $H_2$  농도는 4.2~8.5%였고  $CO$  농도는 6.1~12.1%였는데  $CO$  농도가  $H_2$  농도보다 항상 높은 현상은 주목할만하다. 이외  $CO_2$  농도는 6.5~10.8%,  $CH_4$ 와  $C_2H_4$  농도는 훨씬 낮아 각각 0.64~5.08%와 0.61~2.95%에 불과하였다. O/C 비가 증가함에 따라  $H_2$ 와  $CO$  농도는 O/C비가 0.72와 0.94사이에서 약간 증가한 이후 계속적으로 감소하였고 반면에  $CO_2$  농도는 계속 증가하였으며,  $CH_4$ 와  $C_2H_4$  농도는 계속 감소하였다. O/C 비의 증가에 따른  $CO_2$  농도의 증가와  $CH_4$ ,  $C_2H_4$  농도의 감소는 O/C 비가 증가함에 따라 부분산화반응 (1)에 대한 산화반응 (2)의 비율이 점차로 증가하였기 때문으로 보인다. O/C비 0.72~0.94 사이에서 O/C비가 증가함에 따라  $H_2$ 와  $CO$  농도가 약간 증가한 결과는 O/C 비가 0.72일때 반응온도가 지나치게 낮았기 때문으로 보인다.  $H_2$  수율은 O/C비가 1.2~1.5 사이에서 약 33.4%의 최고값을 가졌으며 개질가스의 고위발열량을 기준으로 계산한 에너지 수율은 47~66%였고 O/C가 증가함에 따라  $H_2$  수율이 최고였던 O/C 비 1.2~1.5 사이에서 최고값인 66%를 가졌다.



[그림 2] 반응실내 온도분포



[그림 3] 개질가스 조성변화

[그림 4]는 10 마력 규모 Direct Injection식 디젤엔진에 개질가스 유량을 점차 증가시키며 연소용 공기와 같이 주입하였을때 NO제거효율의 변화를 보여주고 있다. 이 그림의 x축에서 Gas Fuel은 개질가스 생성을 위하여 사용된 디젤의 양을 나타내며 Total Fuel은 Gas Fuel과 디젤의 합을 나타낸다. 개질가스는 O/C비 1.4에서 6g의 디젤을 사용하여 생성되었으며 조성은  $H_2$  7.0%,  $CO$  8.1%,  $CH_4$  2.2%,  $CO_2$  9.6%였다. 이 그림은 개질가스/총연료 무게비가 0~18.2%까지 증가할 때 NO제거효율이 68.9%까지 증가함을 보여주고 있다.

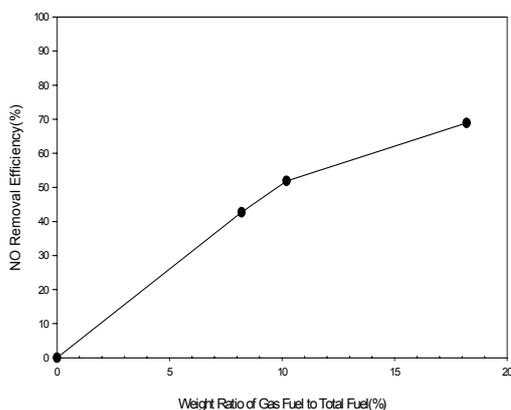
개질가스의 주입이 디젤엔진 배기가스중의 매연제거효율에 미치는 영향을 조사하기 위하여 비교적 매연이 많이 발생하는 4.6 마력 규모 예혼합식 디젤엔진을 사용하여 실험을 수행하였으며 [그림 5]는 그 결과를 보여준다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 이 그림에서 볼 수 있듯이, 개질가스/총연료 무게비가 0~23.5%까지 증가할 때 매연제거효율은 55.5%까지 증가하였다. NO 초기농도가 14%에 불과한 관계로 NO제거효율은 100%까지 가능하였다.

## 요약

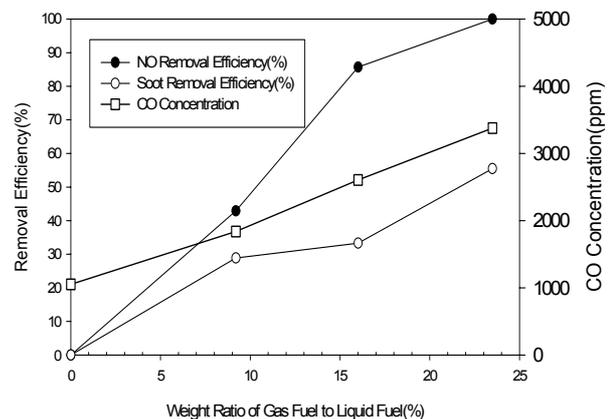
저온 플라즈마 연료개질 장치를 개발하여 여러 운전인자가 그 성능에 미치는 영향을 조사하였고 생성된 개질가스를 무부하(Idle) 상태의 디젤엔진에 연소용 공기와 같이 주입하여 배출가스중의  $NO_x$ 와 매연 제거효율의 변화를 조사하였다. 본 실험의 결과는 무부하

상태에서의 개질가스의 디젤엔진 주입이 매연과 NO<sub>x</sub> 저감에 효과적임을 나타내지만, 연소실 온도가 높은 부하상태에서도 높은 저감효율이 가능한지 확인하기 위한 추가실험이 필요한 것으로 보인다. 본 연구에서의 주요 실험결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. H<sub>2</sub>농도 및 수율과 같은 저온 플라즈마 반응기의 성능은 플라즈마 발생장치에 인가되는 전압이나 주파수에 영향을 받지 않았으며 부분산화반응의 점화 용이성이 전력소모량에 의하여 영향을 받았을 뿐이다. 그 이유는 부분산화반응의 효율이 O/C비 즉 반응 온도에 의해서만 영향을 받기 때문이다.
2. 저온 플라즈마 연료개질 반응기에서 O/C 비의 영향을 조사한 결과 O/C 비가 증가할 때 H<sub>2</sub> 수율은 O/C 비 1.2~1.5에서 약 33.4%의 최고값을 가졌으며 이러한 현상은 부분산화반응이 효과적으로 일어나도록 필요한 열을 공급하기 위하여 O/C비를 1.0이상으로 유지하여 산화반응이 충분히 일어나야 하기 때문으로 보인다.
3. Idle 상태의 10 마력 규모 Direct Injection식 엔진에서 개질가스/총연료 무게비가 18.2%까지 증가할 때 NO제거효율이 68.9%까지 증가하였다.
4. Idle 상태의 4.6 마력 규모 예혼합식 엔진에서 개질가스/총연료 무게비가 23.5%까지 증가할 때 Soot제거효율은 55.5%까지 증가하였다.



[그림 4] 배기가스의 NO 제거효율 (Direct Injection, 10마력)



[그림 5] 배기가스의 NO, 매연 제거효율 (예혼합식, 4.6마력)

## 참고문헌

1. Bromberg, L., Cohn, D. R., Ravinovich, A., Heywood, J., International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 26, 1115, 2001.
2. Green J. B., Jr., etc., SAE Technical Paper Series 2000-01-2206.
3. G. Prieto, M. Okumoto, K. Shimano, K. Takashima, S. Katsura, A. Mizuno, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.25, No. 5, 1484, 2001.
4. Shrestha, S. O. B., LeBlanc, G., Balan, G., De Souza, M., SAE Technical Paper, 2000-01-2971, 2000.
5. A. Tsolakis, A. Megartis, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 29, 1409, 2004.
6. Supat, K., Chavadej, S., Lobban, L. L., Mallinson, R. G., Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 42, 1654, 2003.