

디젤엔진의 후처리장치로서 PCD 플라즈마 시스템에 관한 연구

유 경 현*

군산대학교 기계자동차공학부

A Study on the PCD Plasma System as an After Treatment Apparatus in Diesel Engine

Kyunghyun Ryu*

School of Mechanical & Automotive Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk 573-701, Korea

(Received 26 April 2011 / Revised 5 August 2011 / Accepted 9 September 2011)

Abstract : The selective catalytic reduction(SCR) system used to reduce NOx in diesel engines requires an NO/NO₂ ratio of about 1 in exhaust emissions to realize the fast SCR mode at temperatures lower than 300°C. This study investigated the characteristics of a plasma system as a pre-active apparatus for the fast SCR reaction mode of an SCR system. Plasma was generated by the pulse corona discharge(PCD) method with a four-channel wire-cylinder reactor. This study showed that plasma was easily generated in the exhaust gas by the PCD system, and the peak voltage of the normal state condition for plasma generation was generally 12 kV. The PCD system easily converted NO into NO₂ at lower temperatures and the NO/NO₂ conversion ratio increased with the discharge current for plasma generation. But the PCD system could not convert NO into NO₂ at higher engine speeds and higher engine loads due to the lack of oxygen in exhaust gas. The PCD system also activated the diesel oxidation catalysts(DOC) system to reduce CO emissions.

Key words : Diesel engine(디젤기관), Plasma(플라즈마), Pulse corona discharge(펄스코로나방전), SCR(선택적 환원촉매), NOx(질소산화물)

Nomenclature

PM : particulate matters
LNT : lean NOx traps
LNC : lean NOx catalyst
SCR : selective catalyst reduction
PCD : pulse corona discharge
DOC : diesel oxidation catalyst
lpm : liter per minute

1. 서론

최근 강화되는 디젤자동차의 배출가스 규제를 만족시키기 위해서 엔진 연소기술을 비롯하여 후처리 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, Euro 6 기준을 만족시키기 위해서는 유해배출물 중 NOx를 크게 저감시켜야만 하는 현실에 놓여 있다. NOx를 저감시키기 위한 방법으로는 주로 LNT (Lean NOx Traps), LNC(Lean NOx Catalyst), SCR (Selective Catalytic Reduction) 등의 후처리시스템들이 연구되고 있으며¹⁾ 현재 요소와 암모니아(NH₃)를 이용한 SCR 방법이 널리 상용화되고 있는 실정이다.²⁻⁴⁾

*Corresponding author, E-mail: khryu@kunsan.ac.kr

SCR 시스템의 경우, 기본적으로 디젤 배기의 질소산화물 중 약 90% 이상으로 이루어져 있는 NO를 같은 양의 암모니아와 반응하여 질소(N₂)로 변환시키는 “standard SCR” 반응에 의해서 NO_x를 저감시키는데, 이 반응은 300°C 이상의 온도에서만 저감효과가 크다는 단점을 갖고 있다. 한편, NO와 NO₂가 암모니아와 반응하는 “fast SCR” 반응은 “standard SCR” 반응보다 매우 빠르고 특히 300°C 이하의 저온에서도 NO_x 저감효과가 큰 것으로 알려져 있어 많은 연구자들이 “fast SCR” 반응을 이용하여 NO_x를 저감시키고자 노력하고 있다.^{5,6)}

그러나 “fast SCR” 반응을 위해서는 배출가스 중에 NO/NO₂의 비가 1에 가까울수록 효과적이기 때문에 일정한 정도 NO₂가 존재하여야 하나 디젤엔진의 배출물중 NO_x의 대부분이 NO로 배출되기 때문에 NO를 NO₂로 전환시켜야 주어야 하는 문제점을 갖고 있다. 이를 위해서 일부에서는 DOC(Diesel Oxidation Catalyst)를 SCR 선단에 설치하여 NO₂를 생성시키고 있는 실정이다.⁷⁾

본 연구에서는 디젤엔진의 배기배출물 중 NO_x를 저감시키기 위한 방법으로 “fast SCR” 반응을 효과적으로 구현시킬 수 있는 선-원통형 펄스 코로나 방전(Pulse Corona Discharge, PCD)방식의 플라즈마 시스템의 적용성을 고찰하였다. PCD 방식의 플라즈마 방전 특성을 파악하고, PCD 플라즈마 시스템이

배출가스에 미치는 영향을 고찰하여 디젤엔진 후처리시스템으로서의 플라즈마 시스템에 대한 가능성을 파악하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 방법 및 조건

본 연구에 사용된 디젤엔진은 수냉식, 4기통, 4행정 간접분사식 디젤기관이며, 시동모터에 의해서 시동이 되고 기관부하와 기관 회전속도가 eddy current type 엔진 동력계(W-130, SCHENCK)에 의해 임의로 조정할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 엔진의 주요 사양을 Table 1에 나타내었다.

엔진 냉각수 온도는 80±2°C 로 일정하게 제어하였으며, 엔진 회전수를 1,200rpm부터 300rpm 간격으로 2,400rpm까지 변화시키면서 실험을 수행하였

Table 1 Specifications of test engine

Item	Specification
Engine model	HD D4BB
Number of cylinder	4
Bore × stroke (mm)	91.1 × 100
Displacement (cm ³)	2607
Compression ratio	22
Combustion chamber	Pre-combustion chamber
Coolant temperature (°C)	80±2
Injection type	In-direct injection
Injection pressure (bar)	140

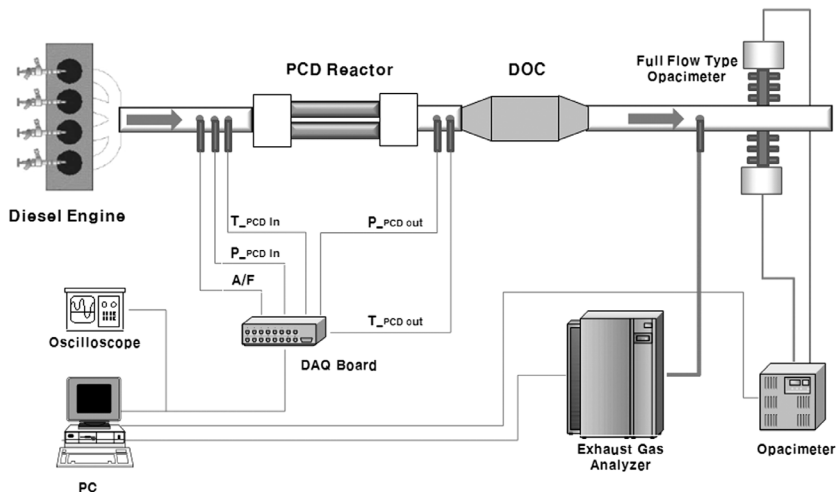


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2 Test conditions

Item	Test condition
Engine speed (rpm)	1200, 1500, 1800, 2100, 2400
Engine load (%)	0, 25, 50, 75, 90, 100
PCD condition	Without plasma, Plasma 500W, Plasma 600W
DOC condition	DOC, PCD+DOC

으며, 각 엔진회전수에서 엔진 부하를 0, 25, 50, 75, 90, 100%까지 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다.

PCD(Pulse Corona Discharge) 시스템의 장착 유무에 따른 성능을 평가하기 위하여 엔진동력계에 장착된 실험용 엔진의 배기다기관으로부터 후방 2m 위치에 PCD 시스템을, PCD 후단에 DOC를 장착하였고, PCD 시스템으로부터 3m 위치에 배기가스 분석기(Vario Plus, MRU)와 Opacimeter(OP-120, EplusT)를 설치하여 배기가스를 채취하여 분석하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

2.2 플라즈마 발생장치

Photo 1은 본 연구에 사용된 플라즈마 발생장치를 나타낸 것으로, 플라즈마 반응기는 반응기 내부 중심에 와이어를 고정하고 양단에 펄스 고전압을 가진하여 플라즈마가 생성되도록 하는 선-원통형 펄스코로나 방전방식의 시스템을 사용하였다. 실험에 사용된 플라즈마 반응기는 120mm 길이를 갖는 4개의 원통 가스채널로 구성되어 있으며, 구조 및 시스템의 각 특성을 분석하기 위해 원통의 직경이 25mm인 경우와 30mm인 경우, 각 원통 중심에 설치된 와이어의 직경을 0.3mm인 경우와 0.25mm인 경우, 그리고, 각각의 경우 텅스텐 와이어를 사용한 경우와 몰리브덴 와이어를 사용한 경우로 변화시켜가며 실험을 진행하였다. Table 3은 실험시 사용된 PCD 반응기의 특성들을 나타낸 것이다.

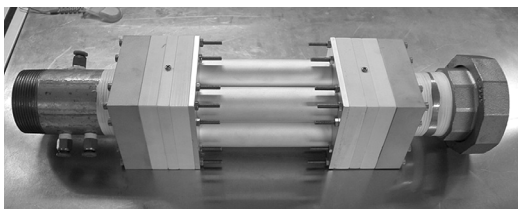


Photo. 1 Plasma reactor system

Table 3 Specifications of PCD reactor used in this test

RPM	Cylinder		Wire		
	Diameter (mm)	Structure	Material	Diameter (mm)	Supporting method
1200	25	Quad 1	Tungsten	0.3	Fixed by compression spring
1500	30	Quad 2	Tungsten	0.3	
1800	30	Quad 2	Tungsten	0.3	
2100	25	Quad 2	Tungsten	0.3	
2400	30	Quad 2	Molybdenum	0.25	Fixed by bolt

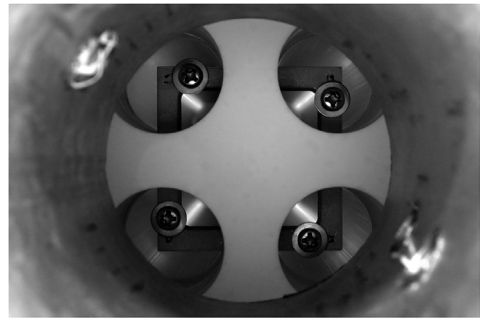


Photo. 2 Image of Plasma in the 25mm Quad cylinder reactor

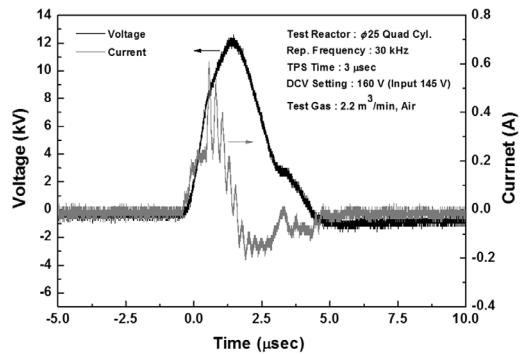


Fig. 2 Voltage and current for the Plasma generation

Photo 2는 2200rpm의 공기가 유동할 경우에 반응기내에 생성된 플라즈마를 촬영한 것으로 안정된 상태로 플라즈마가 생성되는 것을 알 수 있었다. Fig. 2는 Photo 2의 플라즈마 생성을 위해 가진된 전압과 전류를 나타낸 것으로, 플라즈마를 생성하기 위해서는 피크전압이 12kV, 펄스주파수 30kHz, 펄스폭이 5µs가 소요됨을 알 수 있었다. 한편, 배기관에 설치된 PCD 반응기에서의 플라즈마 생성 유무는 산화 래디칼의 생성 및 반응에 큰 영향을 주기 때문에 PCD 반응기에서 플라즈마가 생성되었는지 과

악하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 Fig. 2의 파형을 근거로 배기가스의 유동시 플라즈마 생성 유무를 파악하는 자료로 활용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 PCD 시스템의 플라즈마 방전 특성

Fig. 3은 다양한 엔진 회전속도조건에서 엔진 부하별 배출가스내의 산소 농도를 나타낸 것이다. 배출가스 내의 산소농도는 산화성 래디칼 생성 및 반응에 영향을 미친다. 엔진부하와 엔진 회전속도가 증가할수록 산소농도는 감소하는 경향을 보이고 있어 저회전·저부하에서 반응 래디칼이 많이 생성될 수 있음을 알 수 있다. Fig. 4는 Fig. 3의 조건에서 PCD 플라즈마 시스템의 전단에서 측정된 온도를 나타낸 것이다. 엔진부하와 회전속도가 증가함에 따라 배출가스의 온도는 상승함을 알 수 있었으나, 저회전속도(1,200rpm과 1,500rpm)에서는 엔진부하 75%이상, 1,800rpm 이상의 속도에서는 50~60%이상의 엔진부하시에 배출가스 온도가 300°C 이상으로 됨을 알 수 있어 NO의 존재 하에 “standard SCR” 반응이 가능한 영역이 됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 엔진 부하 및 회전속도에 따른 PCD 반응기에서의 플라즈마 생성을 위한 가용 전력의 피크치 특성을 나타낸 것으로, (a)는 반응기가 열적부하를 받지 않은 상태에서, (b)는 반응기가 열적 부하를 받은 후 시험 평가한 것이다. 열적부하를 받지 않은 상태에서는 반응기의 직경이 작은 경우에 플라즈마 생성 폭이 적기 때문에 전력 피크치가 작았으며, 반

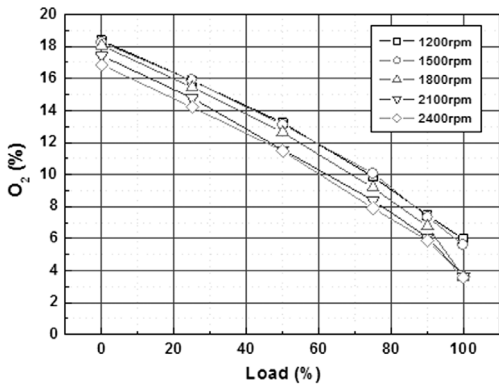


Fig. 3 Oxygen concentration of exhaust emissions

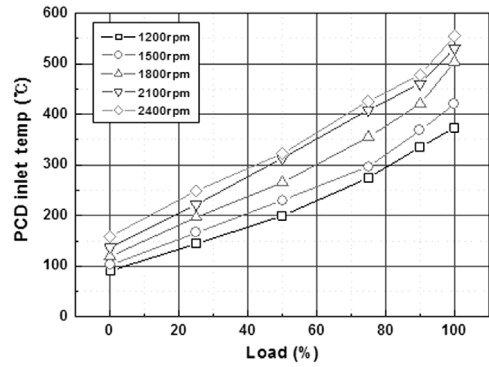


Fig. 4 PCD inlet temperature in exhaust pipe

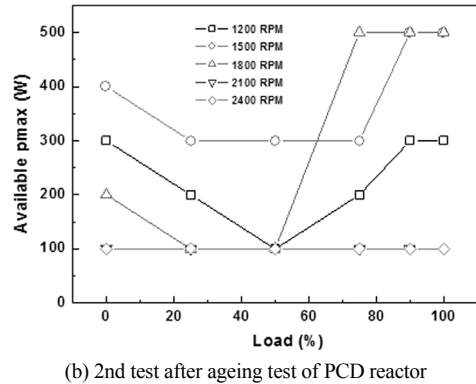
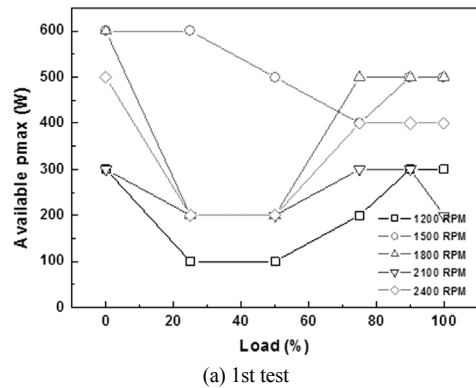


Fig. 5 Ageing test result of PCD reactor

응기의 직경이 큰 경우에 전력 피크치가 높게 나타나는 특성을 보임을 알 수 있었다. 한편, 반응기가 열적 부하를 받은 후에는 반응기와 와이어의 재질이 다름에 따라 열적팽창계수가 달라서 열적 부하를 받은 후 반응기가 팽창하고 냉각이 된 후에는 원래의 상태로 환원되었으나 몰리브덴 와이어의 경우

에는 열적부하를 받은 후 팽창하였다가 냉각시에 다시 원래의 상태로 환원되지 않는 문제점이 있음을 알 수 있었다. 이는 열적 부하를 받은 후에는 정상적인 플라즈마가 생성되지 않고 전기적 스파크를 발생하는 문제를 야기시키는 원인이 됨을 알 수 있어 PCD 반응기 설계시 열적부하에 따른 팽창을 고려할 필요가 있음을 알게 되었다.

3.2 PCD 시스템이 배출가스에 미치는 영향

Fig. 6과 7은 엔진 회전속도 1,500rpm과 무부하 상태에서 플라즈마를 생성하였을 경우 PCD 시스템후단에서의 NO와 NO₂의 배출 특성을 각각 나타낸 것이다. 플라즈마가 없을 경우에는 NO의 농도가 평균적으로 약 35ppm 생성하고 NO₂의 농도는 17ppm 생성하였으나, 배출가스 온도가 100°C 이하의 저온분위기일지라도 플라즈마를 생성하였을 경우에는 플라즈마가 없을 때보다 NO의 배출량은 감소하고

NO₂의 배출량은 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 플라즈마 영역에서 O와 O₃ 등의 고활성 산화라디칼이 생성되어 NO를 NO₂로 전환시켰기 때문으로 분석된다. 이러한 특성은 플라즈마 방전량이 증가할수록 NO에서 NO₂로의 전환율이 커짐을 알 수 있었다.

Fig. 8은 중속 및 고속 고부하조건에서의 PCD 시스템의 특성을 파악하기 위해 1800rpm과 2400rpm의 엔진 회전속도와 90%의 엔진 부하조건에서의 NO의 배출 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전체적으로 280~290ppm의 NO를 배출하였으며, PCD 시스템을 사용하여도 NO는 특별하게 증가거나 감소하지 않았다. 더군다나, NO₂는 Fig. 8과 동일한 조건에서 전혀 배출되지 않아 중속 및 고속 고부하조건에서는 NO만이 배출되는 전형적인 특성이 나타났다. 이는 NO만이 배출되는 중속 및 고속 고부하 조건에서는 배기가스 유량은 높아

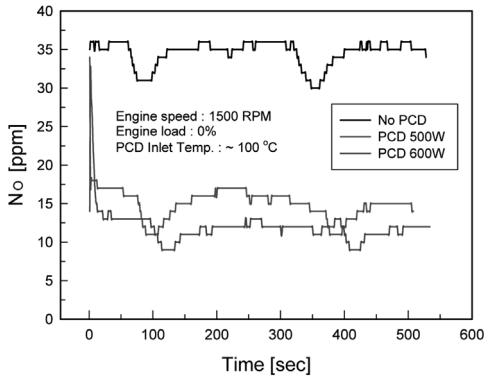


Fig. 6 Effect of PCD reactor on NO emission without DOC

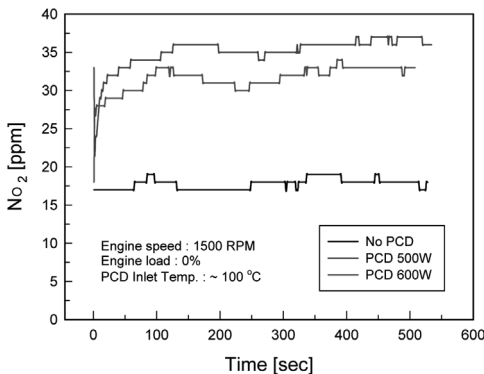
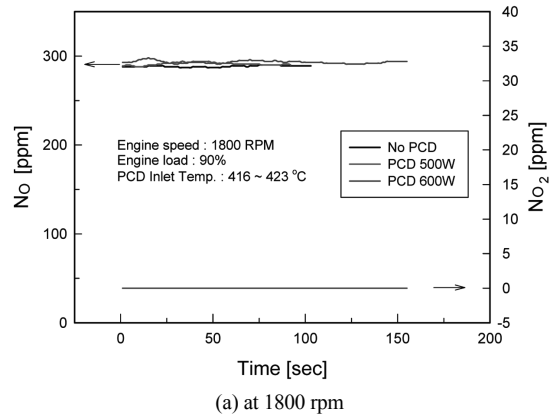
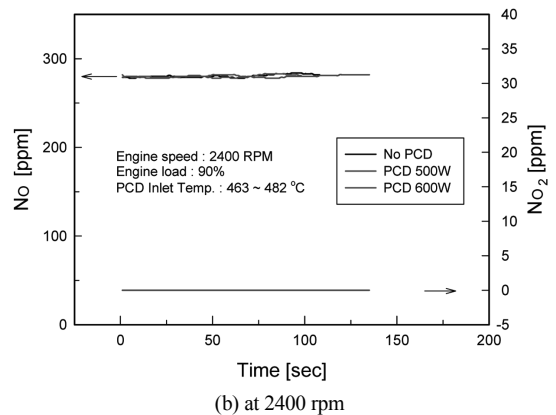


Fig. 7 Effect of PCD reactor on NO₂ emission without DOC



(a) at 1800 rpm



(b) at 2400 rpm

Fig. 8 Effect of PCD reactor on NO and NO₂ emissions at higher engine loads and engine speeds

지는데도 불구하고 Fig. 3에서 살펴본 것처럼 산소의 농도가 감소하게 되어 플라즈마의 반응속도가 뒤따르지 못해 NO를 NO₂로 전환시키지 못한 것으로 분석된다. 결과적으로, SCR 효율개선을 위한 효과적인 PCD시스템이 되기 위해서는 NO가 많이 발생하는 중·고속 고부하에서의 플라즈마 반응속도가 충분한 NO/NO₂를 확보할 수 있도록 추가적인 기술 개발이 필요함을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고, 플라즈마 반응에 의한 NO₂ 비율 증가가 중·저부하 영역에서의 SCR 효율 개선에 효과적이라고 판단된다.

한편, Fig. 9와 10은 1,500rpm의 엔진 회전속도와 75%의 엔진 부하에서 각각 PCD 시스템 후단에 DOC를 장착하지 않은 경우와 장착한 경우에 플라즈마가 CO의 배출 특성에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 CO의 경우에는 플라즈마가 있는 경우나 없는 경우에 특별한 차이를 보이지 않고 있어 플라즈마가 직접적으로 CO의 저감에 관여하지 않는 것으로 판단되나, DOC를

장착한 경우에는 Fig. 10에서 알 수 있듯이 DOC만 장착한 경우보다 PCD 시스템을 DOC 전단에 장착한 경우에 CO를 크게 저감시킴을 알 수 있어 플라즈마가 DOC의 반응 활성화를 촉진시키는 데는 영향을 미치는 것으로 사료된다.

Fig. 11은 다양한 엔진 회전속도에서 엔진부하 변화에 따른 NO₂의 배출특성을 나타낸 것이다. 모든 엔진 회전속도에서 배출가스 온도가 높은 75%이상

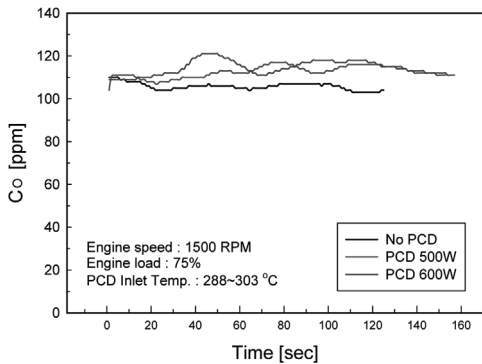


Fig. 9 Effect of PCD reactor on CO emission without DOC

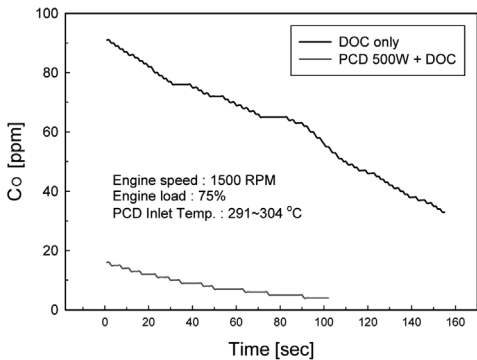
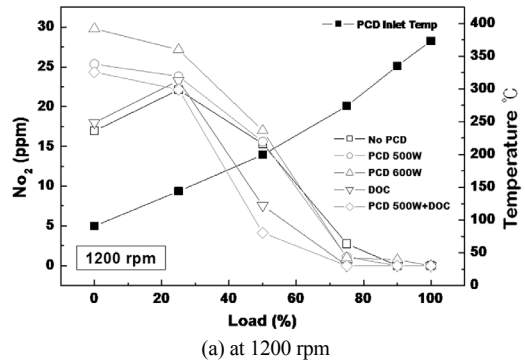
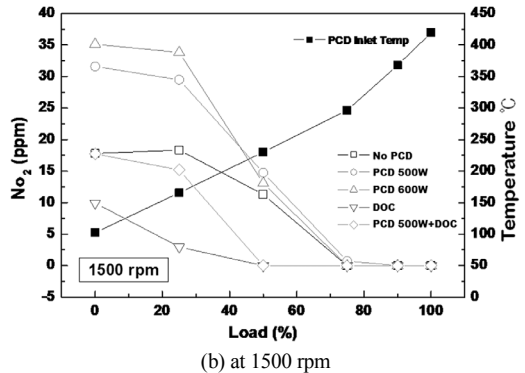


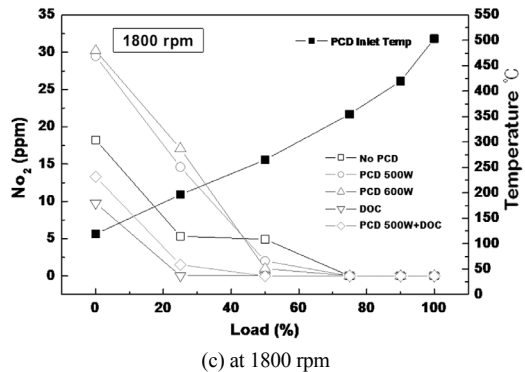
Fig. 10 Effect of PCD reactor on CO emission with DOC



(a) at 1200 rpm

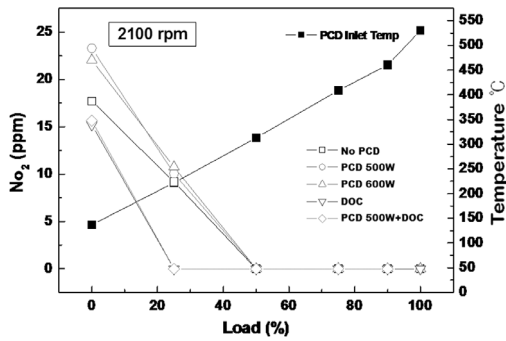


(b) at 1500 rpm

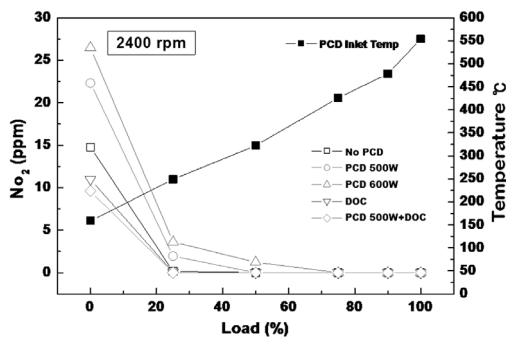


(c) at 1800 rpm

Fig. 11 Effect of PCD reactor on NO₂ emission versus engine load at various engine speeds



(d) at 2100 rpm



(e) at 2400 rpm

Fig. 11 Effect of PCD reactor on NO₂ emission versus engine load at various engine speeds (continued)

의 고부하에서는 NO₂의 배출이 없는 것을 알 수 있으며, 관심의 대상이 되고 있는 저부하 영역에서는 Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이 PCD 시스템을 장착하지 않은 경우보다 PCD 시스템을 장착한 경우가 NO₂를 더 높게 배출하는 것을 알 수 있다. 이는 PCD 시스템을 장착한 경우 생성된 플라즈마가 NO를 NO₂로 전환하였기 때문으로 생각된다. 이를 종합하여 볼 때 디젤엔진에서 NO_x를 저감시키기 위해 SCR을 사용하는 경우 상대적으로 온도가 낮은 조건하에서 작동하는 “fast SCR” 반응을 촉진시키기 위하여 NO/NO₂의 비율을 조절하기 위한 시스템으로 PCD 플라즈마 시스템이 효과적으로 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 한편 DOC를 장착한 경우에는 전체적으로 PCD만 사용한 경우보다 NO₂를 저감시킬 수 있었는데, 이는 본 연구에 사용한 DOC 촉매의 특성으로 인해 NO₂를 저감시킨 것으로 사료된다.

4. 결론

디젤엔진의 배기배출물 중 NO_x를 저감시키기 위한 방법으로 “fast SCR” 반응을 효과적으로 구현시킬 수 있는 플라즈마 시스템의 적용성을 고찰해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 디젤 배출가스관 내에서 선-원통형 펄스 코로나 방전 방식(Pulse Corona Discharge, PCD)의 플라즈마 생성시스템을 사용하여 플라즈마를 효과적으로 생성할 수 있었다.
- 2) PCD 플라즈마 시스템을 이용하여 배출가스 온도가 상대적으로 낮은 저부하 영역에서 배출가스 내의 NO를 NO₂로 효과적으로 전환시킬 수 있음을 알 수 있었다.
- 3) PCD 시스템이 CO의 저감에 직접적인 영향을 미치지 못하였지만, DOC의 활성화를 촉진하여 DOC 후단에서의 CO를 저감시킬 수 있었다.
- 4) 상대적으로 배출가스 유량이 많은 고속 고부하 조건에서는 PCD 시스템이 NO를 NO₂로 전환시키지 못함을 알 수 있었다.

결과적으로 본 연구를 통하여 PCD 플라즈마 시스템이 “fast SCR” 반응을 구현하기 위한 촉진시스템으로 사용 가능함을 알 수 있었으나, 효과적으로 상용화하기 위해서는 PCD 플라즈마 반응기의 특성 분석 및 설계변수 등에 대한 다양한 추가적인 연구 및 검토가 필요하다고 사료된다. 후속 논문을 통해 PCD 플라즈마 반응기의 특성 및 설계변수, 즉 반응기의 재질 및 직경, 그리고 유입가스의 온도 변화가 배출가스에 미치는 영향 등에 대해 고찰하고자 한다.

후 기

본 논문은 국가핵융합연구소 플라즈마응용기술팀의 지원에 의해 이루어진 것으로 관계기관에 감사드립니다.

References

- 1) <http://www.dieselnet.com>
- 2) J. G. Nam, “Static Characteristics of a Urea-SCR System for NO_x Reduction in Diesel

- Engines," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.9, No.3, pp.283-288, 2007.
- 3) H. Kim, Y. Jeong, M. Song and S. Lee, "Influential Factors for NO_x Reduction Performance of Urea-SCR System for and In-use Medium Duty Diesel Engine," *Transactions of KSAE*, Vol.17, No.1, pp.154-161, 2009.
 - 4) Y. Ham, S. Lee, H. Jung and D. Shin, "Experimental Study on DeNO_x Characteristics of Urea-SCR System," *Transactions of KSAE*, Vol.17, No.2, pp.180-186, 2009.
 - 5) M. Koebel, M. Elsener and G. Madia, "Reduction Pathways in the Selective Catalytic Reduction Process with NO and NO₂ at Low Temperatures," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.40, pp.52-59, 2001.
 - 6) G. Madia, N. Koebel, M. Elsener and A. Wokaun, "The Effect of and Oxidation Precatalyst on the NO_x Reduction by Ammonia SCR," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.41, pp.3512-3517, 2002.
 - 7) S. Jung and W. Yoon, "The Effect of an Oxidation Precatalyst on the NO_x Reduction by NH₃-SCR Process in Diesel Exhaust," *Transactions of KSAE*, Vol.16, No.5, pp.68-76, 2008.
 - 8) K. Ryu, J. Park, K. Choi, D. Seok and B. Lee, "An Experimental Study on the Plasma System as an After Treatment Apparatus in Diesel Engine," *Annual Conference Proceedings, KSAE*, pp.838-843, 2009.