

# Radical을 이용한 디젤 엔진의 NOx 제거 특성

전제형, 최승환\*, 전충환, 장영준\*\*, 이광학\*\*\*

## NOx Removal Characteristics Using Radical In A Diesel Engine

J.H. Jeon, S.H. Choi, C.H. Jeon, Y.J. Chang, K.H. Lee

**Key Words:** Radical(라디칼), Radical activation(라디칼 활성화), NOx(질소산화물), Exhaust emissions removal(배기가스 저감), Diesel engine(디젤 엔진)

### Abstract

It is reported that we are facing the serious environment pollution difficulties such as acid rain, green house effects, etc. The gaseous matter CO, NOx, SOx, VOCs which are regarded as main factors for these current pollutions are mainly emitted from power plants and vehicles. Therefore several leading countries are regulating the related laws strictly, especially exhaust emissions from a Diesel engine without an aftertreatment device. The Objective of this study is to find out NOx removal characteristics focused on emissions of a Diesel engine using radical at each engine speed and load. It is generated from outer air and put into a mixing chamber in the end of exhaust line. In addition, the optimum temperature condition to activate reaction by radical is experimentally carried out. Concentration of exhaust emissions is analyzed from the gas analyzer(KaneMay) and FTIR to estimate by-products.

### 1. 서론

지구촌에는 현재 산성비, 지구온난화 그리고 오존층 파괴등 심각한 환경 공해 문제에 직면해 있다. 이러한 환경공해의 주된 원인이 되고 있는 CO, NOx, SOx, VOCs 등은 발전소 및 자동차 배기가스로부터 주로 발생되고 있다. 따라서 선진 각국은 이에 대한 엄격한 규제를 실시하고 있으며 특히 후처리 장치가 부착되지 않은 디젤 엔진용 차량에 대한 배기가스 허용 규제를 강화하고 있다.<sup>(1)</sup>

그러나 디젤 엔진은 가솔린 엔진보다 연소 효율이 높을 뿐만 아니라 지구 온난화의 주요인인 CO<sub>2</sub> 발생량도 20%이상 적고 우리나라 자동차의

약 25 %를 차지하고 있으며 시장성은 계속 증가하고 있는 실정이다.

디젤엔진에서 배출되는 오염 물질 중 CO와 HC는 공기가 충분한 조건에서 연소되므로 배출량은 많지 않고 SOx는 연료의 황 함유량에 절대적으로 영향을 받으므로 문제시되지 않는다.

따라서 연료 액적의 불완전한 연소에 의해 발생하는 입자상 물질은 연소실의 온도를 높이는 것이 효과적이나 이러한 급격한 연소로 인한 내부 온도의 상승은 NOx의 생성을 증가시켜 서로 상반되는 관계에 있다.

지난 몇 해 동안 발표된 일련의 연구에 따르면, 이러한 입자상 물질은 대부분 도시 대기 오염의 주요한 원인으로써 작용을 해 왔고, HEI(Health Effects Institute)는 1995년에 디젤 배출물의 발암 물질을 평가해서 디젤 배출물에 노출되는 것과 폐암 사이의 관계의 일치성을 밝혔다.<sup>(2)</sup>

특히 질소산화물은 인체의 호흡기관과 신경계에 큰 장애를 주는 유동가스로 알려져 있다.<sup>(3)</sup>

\* 부산대학교 기계공학과 대학원  
\*\* 정회원, 부산대학교 기계공학부  
\*\*\* 울산대학교 재료금속공학부

EURO V(2008년) 기준에 따르면 대형 디젤엔진에 대하여 NO<sub>x</sub> 규제를 3.5 g/kWh에서 2.0 g/kWh로 대폭 강화하였다.

본 연구에서는 외부 공기를 이용하여 만든 radical을 혼합기에 주입하여 NO<sub>x</sub> 제거 특성을 실험적으로 검토하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 시험 기관은 1톤 트럭용 4기통 간접분사식 디젤 기관으로 제원은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1은 본 실험에 적용한 동력계를 비롯한 실험 개략도를 나타낸 것이다.

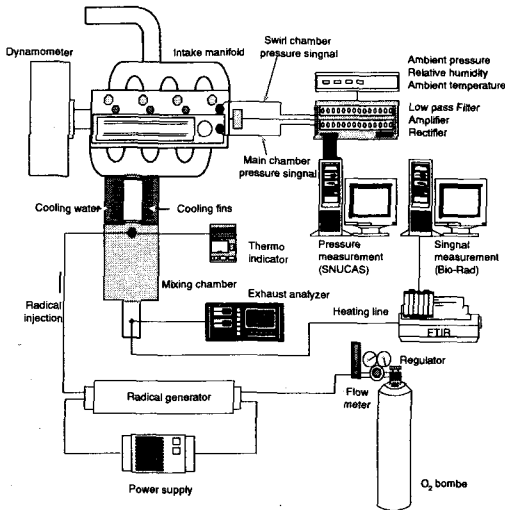


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

실험장치는 Dynamometer, radical 발생기, IDI 디젤엔진, 전원 공급장치, 혼합기, 배기가스 분석장치 등으로 구성되어 있다. 처리가스는 엔진 회전수(1000, 1500 및 2000 rpm)과 부하(0, 50, 100%)의 변화에 따른 실제 배기가스를 적용하였으며, radical은 고전압 발생장치(9 kV, 1 kHz)를 혼합조에 인가하여 적정량을 공급할 수 있게 조절하였다.

혼합조는 직사각형의 축소, 확대판으로 연결된 200×200×400 mm인 사각 챔버로 윗면에 배기

가스의 유입방향으로 외부에서 만들어진 radical을 투입하였다. radical 투입구에 K-type의 열전대를 이용하여 radical의 주입시 배기 가스 온도를 함께 측정하였다.

Table 1 Engine specifications

엔진형식		VN형 엔진	
항 목		VN형 엔진	
종 류		디젤, 4 사이클	
연소실 형식		와류실식	
밸브기구		OHV	
총배기량 cc		2662	
내경×행정 mm		93.0×98.0	
압축비		21.5	
압축압력 kg/cm <sup>2</sup> ·rpm		30/200	
최고출력 PS/rpm		80/4000	
최대토크 kg·m/rpm		17.5/2000	
밸브 시기	흡 기	open	BTDC 19°
		close	ABDC 52°
	배 기	open	BBDC 47°
		close	ATDC 14°

### 2.2 실험 방법

기관의 운전조건은 각각의 속도(1000, 1500, 2000 rpm)에서 최대 부하의 0, 50, 100 % 부하하에 운전하였다. 혼합조를 통과한 배기 가스 성분 중의 NO<sub>x</sub> 제거율을 radical 주입 전과 후의 농도를 각각 측정하여 그 제거율을 확인하였다.

혼합조 안의 배기가스 최고 온도는 약 400 °C 이고 주입되는 radical의 초기 전체 유속은 25 LPM으로 고정하여 사용하였다.

또한 온도에 따른 radical의 잔존을 및 반응성을 확인하기 위해 냉각핀을 설치한 배기관에 냉각수를 공급하여 배기가스 온도를 낮추어 NO<sub>x</sub> 제거율을 확인하였다.

NO, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub> 가스의 측정은 가스 분석기 (Gas analyzer, Kane-May, QuinTox KM-9106)을 사용하였으며 출력가스의 정성 분석 및 부산물(by-products)를 확인하기 위하여 FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer; Galaxy Series FTIR7000)을 사용하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 Radical의 첨가가 NOx 제거율에 미치는 영향

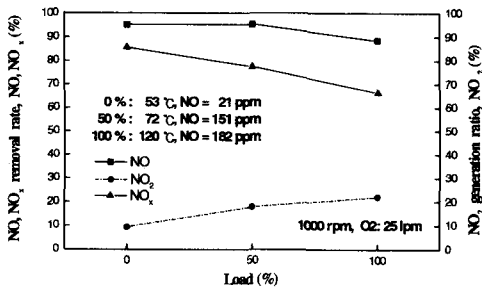


Fig. 2 Characteristics of NO, NOx removal and NO<sub>2</sub> generation at 1000rpm and each load before cooling exhaust gas temperature

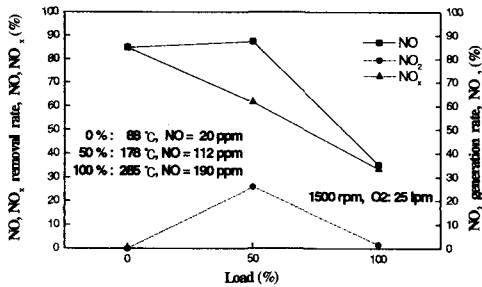


Fig. 3 Characteristics of NO, NOx removal and NO<sub>2</sub> generation at 1500rpm and each load before cooling exhaust gas temperature

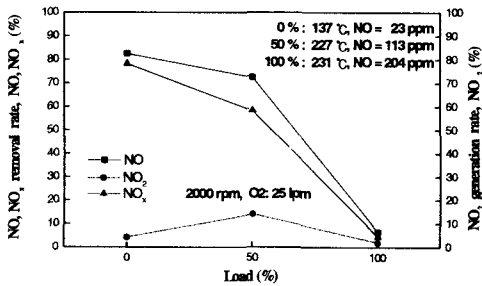


Fig. 4 Characteristics of NO, NOx removal and NO<sub>2</sub> generation at 2000rpm and each load before cooling exhaust gas temperature

Fig. 1, 2 및 3은 NO가 radical과 반응하여 NO<sub>2</sub>로 전환되고 전체적으로 HC 등에 의해 환원

되어 NO<sub>x</sub>가 제거되는 특성을 나타낸 그래프이다. 전체적으로는 회전수가 증가하고 부하가 커질수록 NO<sub>x</sub>의 제거율은 급격히 감소함을 볼 수 있다. 각각 회전수별로 살펴보면 부하 0%일 때는 80% ~ 85%의 NO<sub>x</sub> 제거율을 보인다. 이는 radical을 넣지 않았을 때의 NO 배출량이 20 ppm 정도로 작기 때문에 radical에 의한 전환된 NO<sub>2</sub>가 거의 다 환원되어 NO<sub>x</sub>의 제거율이 높게 나타난다.

부하 50%일 때는 NO 제거율은 각 회전수별 부하 0%일 때와 비슷한 값을 가지는데 비해 100 ppm이상 발생된 경우 NO가 radical에 의해 산화가 일어나 상대적으로 NO<sub>2</sub>의 생성율이 증가하여 전체 NO<sub>x</sub> 제거율은 무부하보다는 감소한다.

부하가 100%인 경우, Fig. 1에서 NO의 제거율과 NO<sub>2</sub>의 생성률이 유지되면서 NO<sub>x</sub> 제거율이 66.5%로 비교적 높게 나타났다. 하지만 NO<sub>2</sub>의 생성량의 감소가 나타나는 Fig. 2와 Fig. 3의 경우는 그 제거율이 각각 33.7%, 4.4%까지 급격히 저하되는 것을 알 수 있다.

이 때의 NO 배출량은 약 200 ppm정도로 부하 50%보다 많이 배출됨에도 불구하고 NO<sub>2</sub>로의 전환이 되지 않는다. 이는 혼합조에 들어오는 배기 가스의 온도의 영향으로써 Fig. 2에서 배기 가스 온도가 120 °C인 경우 NO<sub>x</sub> 제거율이 약 70%정도이며 Fig. 4의 부하 100%일 때는 그 제거율이 거의 없어진다.

이것으로부터 radical의 활성화에 관계된 인자는 혼합조에 투입될 때의 배기 가스 온도에 의존함을 알 수 있다.

### 3.2 Radical의 주입시 배기가스 냉각이 NOx 제거율에 미치는 영향

radical의 온도에 대한 영향을 알아보기 위하여 혼합조에서의 배기가스 온도가 150 °C이상인 조건에서만 냉각핀이 장착된 배기관에 수냉각시켜 각각의 회전수별, 부하에 대하여 NO<sub>x</sub> 제거 특성을 평가하였다. 이에 해당하는 조건은 1500 및 2000 rpm에 대해 부하 50 과 100%일 때이다.

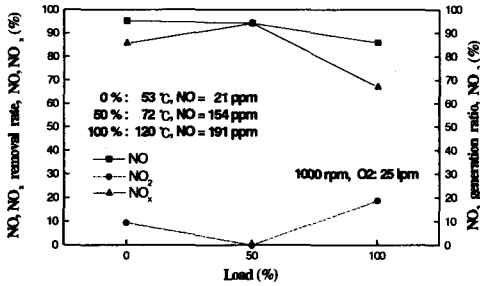


Fig. 5 Characteristics of NO, NO<sub>x</sub> removal and NO<sub>2</sub> generation at 1000rpm and each load after cooling exhaust gas temperature

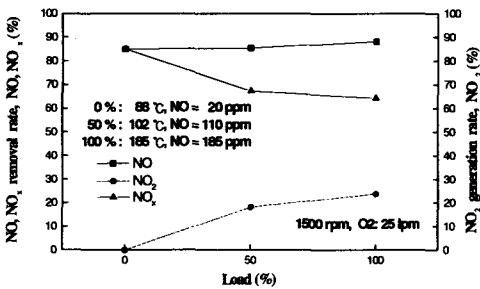


Fig. 6 Characteristics of NO, NO<sub>x</sub> removal and NO<sub>2</sub> generation at 1500rpm and each load after cooling exhaust gas temperature

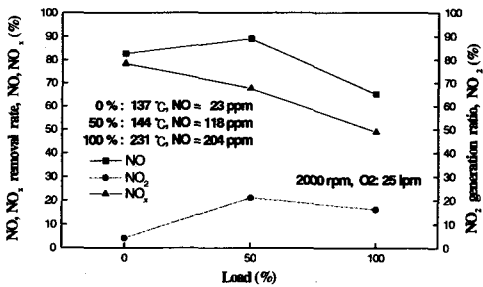


Fig. 7 Characteristics of NO, NO<sub>x</sub> removal and NO<sub>2</sub> generation at 2000rpm and each load after cooling exhaust gas temperature

Fig. 4, 5 및 6의 1000 rpm의 전영역의 부하대와 1500, 2000 rpm 때의 부하 0 %일 때는 3.1절의 실험과 같은 NO<sub>x</sub> 제거율을 나타내었다. 이 때의 배기가스 온도는 최고 137 °C로써 냉각을

하지 않아도 NO<sub>x</sub> 제거율은 67 ~ 86 %까지 나타났다.

배기가스 온도가 높은 고부하 영역에서 냉각에 의한 NO<sub>x</sub> 제거 효과는 크게 나타났다. radical은 냉각에 의해 활성도가 유지되면서 NO를 산화시켜 NO<sub>2</sub>로의 전환이 부하가 증가해도 계속되는 것을 볼 수 있고 Fig. 6과 Fig. 7에서 NO<sub>x</sub>의 제거율은 각각 64.3 % 및 49 %로써 Fig. 3과 Fig. 4를 비교 보면 각각 48 %, 91 %의 높은 제거 향상을 보여준다.

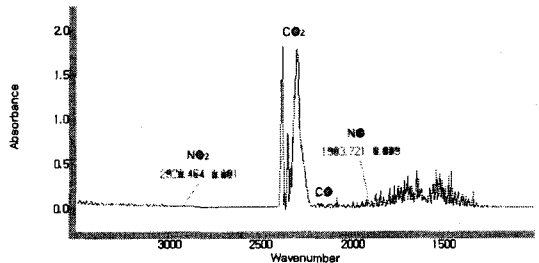


그림 8 FTIR spectra without Radical

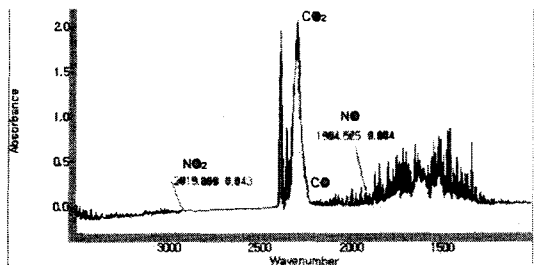


그림 9 FTIR spectra with Radical

Fig. 8과 9는 배기관에 Radical을 25 LPM을 주입하고 1500rpm, 부하 50 %인 조건하에서 혼합조 전후의 출구에서 처리된 가스의 FTIR 스펙트럼을 나타낸 것이다. NO는 Radical에 의해 급격히 감소하였으며 일부는 NO<sub>2</sub>로 전환된 것을 확인시켜준다. 이상의 결과는 외부에서 생성된 radical의 주입으로 NO의 산화제거특성을 나타내고 있다.

## 결론

소형 디젤 기관에서 배출되는 질소산화물 저감

을 위해 배기관 끝에 혼합조를 설치하고 radical 의 첨가에 의한 NO, NO<sub>x</sub>의 제거와 NO<sub>2</sub>의 생성을 radical 투입량과 투입시 혼합 온도에 대한 영향을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 도심 정체시 주로 나타나는 차량의 운전 조건인 1000 rpm, 부하 0 %일 때, radical 주입 후의 NO<sub>x</sub> 제거율은 85.7 %를 보였다.

2. NO<sub>x</sub> 제거율은 radical 혼합시 배기가스 온도에 의존한다. 2000 rpm, 부하 100 % 조건에서는 NO<sub>x</sub> 제거율이 4.4 % 정도로 낮았으나 혼합조 투입전 배기 가스의 온도를 40 %로 낮추었을 때 NO<sub>x</sub> 제거율은 49 %로 나타났다.

3. 배기 온도가 올라갈수록 고온연소에 의한 NO의 발생량은 증가되고 고온 배기가스 영역에서 radical의 활성화는 급격히 감소하여 NO<sub>x</sub> 저감 효과는 기대할 수 없게 된다. 이 때 radical 첨가에 의한 NO<sub>x</sub> 제거율을 50 %이상 확보하기 위해서는 radical과 혼합되는 배기가스 온도는 200 ℃이하로 유지하여야 할 것으로 보여진다.

4. radical의 배기가스 온도의 영향 뿐만 아니라 radical의 농도에 대한 영향도 고려되어야 한다.

5. FTIR 스펙트럼으로 NO의 산화제거 특성을 확인할 수 있었다.

현재 디젤차량에서 radical의 첨가시 배기가스의 냉각장치를 추가한다면 점차 강화되고 있는 디젤 자동차의 배기가스 규제를 만족시키는데 많은 영향을 미칠 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 (주)세원테크의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) "Global Trends In Diesel Emissions Control - A 1998 Update", Michael P. Walsh, SAE 980186, 1998

(2) "Characterization of Fuel and Aftertreatment Device Effects on Diesel Emissions", Bagley, Baumgard, Gratz, Johnson and Lebby, HEI Research Report Number 76, September 1996

(3) 자동차 오염물질 배출실태, 환경부, 1997년

(4) 방전선가열과 균일 수직자계가 인가된 비열방전 플라즈마반응장치의 유해가스 제거 특성

(5) "Control of NO<sub>x</sub> by Positive and Negative Pulsed Corona Discharges", Senichi Masuda and Hideyuki N<sub>마</sub>매, IEEE Transactions on industry applications, vol.26, No.2, March/April 1990