

# 유전체장벽방전을 이용한 촉매공정의 질소산화물 저감성능 향상 Improvement in Catalytic NO<sub>x</sub> Reduction by Using Dielectric Barrier Discharge

목영선\*, 남창모\*\*  
Young Sun Mok\*, Chang-Mo Nam\*\*

## <Abstract>

The ozone produced by a dielectric barrier discharge device was injected into the exhaust gas to oxidize a part of NO to NO<sub>2</sub>, and then the exhaust gas containing the mixture of NO and NO<sub>2</sub> was further treated in a catalytic reactor where both NO and NO<sub>2</sub> were reduced to N<sub>2</sub> in the presence of ammonia as the reducing agent. The NO<sub>2</sub> content in the mixture of NO and NO<sub>2</sub> was changed by the amount of ozone added to the exhaust gas. The experiments were primarily concerned with the effect of reaction temperature on the catalytic NO<sub>x</sub> reduction at various NO<sub>2</sub> contents. The increase in the NO<sub>2</sub> content by the ozone injection remarkably improved the performance of the catalytic NO<sub>x</sub> reduction, especially at low temperatures.

**Key Words:** dielectric barrier discharge, catalytic reduction, nitrogen oxides, ozone

## 1. 서 론

배기가스의 질소산화물 (NO<sub>x</sub>) 저감 방법으로 가장 널리 채택되고 있는 선택적 촉매 환원 공정 (selective catalytic reduction, SCR)은 암모니아 (NH<sub>3</sub>)나 탄화수소를 환원제로 사용하여 촉매 상에서 NO<sub>x</sub>를 N<sub>2</sub>로 환원시키는 방법이다<sup>1-5</sup>). 일반적으로 SCR 공정은 반응온도 250-450°C 범위에서 높은 NO<sub>x</sub> 저감효율을 나타내고 있으나, 배기가스 온도가 이 보다 낮을 경우 NO<sub>x</sub>

저감 효율이 저하되는 문제점이 있다.

대부분의 배기가스의 경우 NO<sub>x</sub>의 대부분은 NO이며 NO<sub>2</sub> 함량은 매우 작다. 배기가스의 온도가 충분히 높지 않은 때에는 배기가스에 포함되어 있는 NO의 일부를 NO<sub>2</sub>로 산화시켜 NO<sub>x</sub> 제거효율을 증가시킬 수 있는 방법이 제안되어 있다<sup>2,6</sup>). 최근 여러 문헌에 보고되어 있듯이 NO와 NO<sub>2</sub> 혼합물은 촉매에서 NO가 주성분인 경우보다 더 빠르게 환원된다. 최근 보고되고 있는 저온 플라즈마·촉매 복합공정은 이런 원리를 이용한 NO<sub>x</sub> 제거효율 향상 방

\* 정회원, 제주대학교 청정화학공학과, 조교수, 工博  
smokie@cheju.ac.kr  
690-756 제주도 제주시 아라1동 1번지

\*\* 정회원, 영남이공대학 보건과학계열, 조교수, 工博

\* Assistant Prof., Dept. of Chemical Engineering,  
Cheju National University/ smokie@cheju.ac.kr  
(corresponding author)

\*\* Assistant Prof., Div. of Health and Science,  
Yeungnam College of Science & Technology

법으로서 펄스 코로나 방전 (pulsed corona discharge)이나 유전체 장벽 방전 (dielectric barrier discharge, DBD)이 저온 플라즈마 기술로 사용되고 있다<sup>6-12)</sup>. 저온 플라즈마 반응기에서의 NO 산화반응은 상온 근처에서는 비교적 쉽게 일어나지만, 배기가스 온도가 증가할수록 산화반응 속도가 크게 떨어져 효과적인 NO 산화반응을 위해서는 탄화수소 첨가제가 필요한 것으로 보고되고 있다<sup>12)</sup>. 탄화수소는 저온 플라즈마 반응기에서 여러 과정을 거쳐 포름알데히드, 일산화탄소 등의 유해 부산물을 발생시키기도 하는데, 이러한 유해부산물의 배출은 저온 플라즈마·촉매 복합공정의 문제점으로 지적되고 있다.

배기가스의 NO를 NO<sub>2</sub>로 산화시킬 수 있는 또 다른 방법은 오존 발생장치를 사용하는 것이다. 일반적으로 오존은 유전체 장벽 방전에 의해 발생 된다<sup>13)</sup>. 오존이 NO 산화반응에 사용되었을 때 에틸렌이나 프로필렌과 같은 탄화수소 반응첨가제가 필요하지 않으며, 탄화수소에서 발생할 수 있는 유해 부산물인 일산화탄소나 포름알데히드가 근원적으로 방지될 수 있다. 그밖에 오존에 의한 NO 산화가 저온 플라즈마에 의한 산화반응보다 더 빠르는데, 그 이유는 오존을 사용하는 경우 NO가 NO<sub>2</sub>로 산화될 뿐 생성된 NO<sub>2</sub>가 거꾸로 NO로 환원되는 반응이 일어나지 않기 때문이다. 반면 저온 플라즈마를 사용하는 경우에는 생성된 NO<sub>2</sub>가 플라즈마 방전 중에 NO로 환원되기도 하여 NO 산화반응 속도를 감소시키는 효과가 된다.

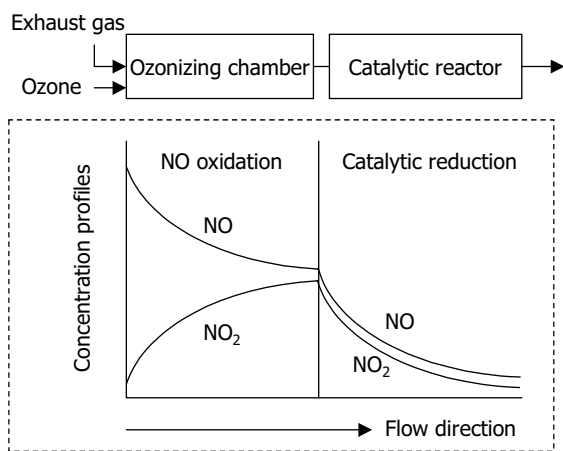


Fig. 1. Description of the catalytic process enhanced by the ozone injection.

본 연구에서는 저온 플라즈마를 이용하여 오존을 발생시키고, 생성된 오존을 배기가스에 주입하는 방식으로 촉매 공정의 성능을 향상시킬 수 있는 방법에 대해 살펴보았다. 본 연구의 오존·촉매 복합공정에서는 Fig. 1과 같이 배기가스가 오존화실 (ozonizing chamber)을 거치면서 NO가 NO<sub>2</sub>로 산화되고, 이때 생성된 NO와 NO<sub>2</sub> 혼합물이 촉매에서 빠르게 제거된다. 본 연구에 사용된 오존발생기는 유전체 장벽 방전 반응기였다.

## 2. 실험장치 및 방법

유전체 장벽 방전을 이용하는 오존발생기, 배기가스와 오존을 혼합하기 위한 오존화실, 그리고 촉매반응기로 구성된 실험장치의 개략도가 Fig. 2에 제시되어 있다. 부피가 245 cm<sup>3</sup>인 실린더 형 유리관이 오존화실로 사용되었다. 오존화실에서 1차 처리된 배기가스는 상용 촉매 (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>, 20 channels per square inches)가 놓여진 촉매 반응기로 유입되었다. 촉매의 겉보기 부피는 30 cm<sup>3</sup>였다. 본 연구에 사용된 촉매의 바나듐과 텅스텐 함량은 각각 1.6과 7.3 wt.%였으며, 촉매의 BET 표면적은 60 m<sup>2</sup>/g였다. 반응온도를 원하는 조건으로 조절하기 위하여 오존화실과 촉매반응기는 오븐 (oven) 내에 설치되었다.

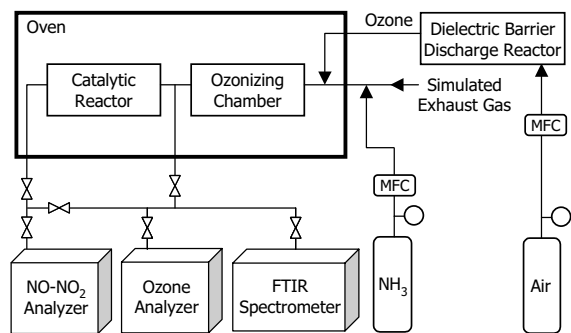


Fig. 2. Schematic of the experimental apparatus.

오존발생기로 사용된 유전체 장벽 방전 반응기 (DBD 반응기)에 대한 상세한 설명은 선행 연구 논문에 잘 기술되어 있다<sup>14)</sup>. 발생하는 오존의 농도를 변화시키기 위하여 DBD 반응기에 인가되는 교류 고전압 (60 Hz)을 12-17

kV (피크치) 범위로 가변시켰다. 오존발생기는 실온에서 가동되었다.

본 연구에 사용된 모사 배기가스의 주요 성분은 공기였으며, 오존발생기의 산소공급원으로도 공기를 사용하였다. 공기의 유량은 질량유량조절기 (MFC Model 1179A, MKS Instruments, Inc.)에 의해 조절되었다. NO (5.0%(v/v), 질소밸런스)와 NH<sub>3</sub> (5.0%(v/v), 질소밸런스)의 유량도 질량유량조절기에 의해 조절되었으며, NO와 NH<sub>3</sub>를 유입되는 공기와 혼합시켰다. 모사 배기가스 제조를 위해 공기와 NO를 혼합시켰을 때 약 4%의 NO가 산소의 존재로 인해 NO<sub>2</sub>로 산화되었다. 오존화실 입구의 NO<sub>x</sub> (NO+NO<sub>2</sub>) 농도는 300 ppm이었으며, 초기 NO<sub>x</sub> 농도 대 암모니아의 주입비는 1.0으로 하였다. 위와 같은 방법으로 제조한 모사 배기가스의 총 유량은 상온 기준으로 5 L/min였다. 배기가스의 유량이 5 L/min인 경우 오존화실에서의 모사 배기가스 체류시간이 약 3초였다. 오존화실에서의 NO 산화반응 실험과 NO<sub>x</sub>의 촉매환원 실험은 90-230°C 범위의 온도에서 수행되었다. 한편, 본 연구에서 제안된 오존·촉매 복합공정의 실제 배기가스에 대한 적용성을 평가하기 위하여 디젤엔진 배기가스 처리실험도 수행하였다.

NO 및 NO<sub>2</sub> 농도는 배기가스분석기 (GreenLine MK2-9.007, Eurotron)와 퓨리에 변환 적외선분광기 (FTIR)를 이용하여 분석하였다. 오존 농도의 측정에는 휴대용 기체 분석기 (Porta Sens II, Analytical Technology, Inc.)가 사용되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 NO 산화반응

Fig. 3은 상온-230°C의 온도범위에서 배기가스에 첨가된 오존의 농도에 따른 NO와 NO<sub>2</sub>의 농도변화를 나타낸다. 배기가스가 오존과 혼합되면 NO는 오존과 반응하여 NO<sub>2</sub>로 산화된다. NO의 산화정도는 배기가스에 첨가된 오존의 양에 의해 결정되므로 NO 농도는 오존의 농도에 따라 감소하였다. NO의 산화반응은 반응온도에도 의존한다. 비록 반응 온도의 영향이 크지는 않았을지라도 높은 온도에서 NO의 산화 정도가 낮았다. 배기가스에 첨가된 오

존은 주로 NO와 반응하지만 동시에 열적으로 분해되기도 한다. 잘 알려진 바와 같이 오존의 분해속도는 온도에 비례하여 증가한다. 따라서 높은 온도에서 NO의 산화정도가 조금 낮았다. Fig. 3에는 문헌<sup>14)</sup>의 수식 모델에 의해 계산된 NO와 NO<sub>2</sub>의 농도도 함께 제시되어 있는데, 실험결과를 비교적 잘 예측하고 있다.

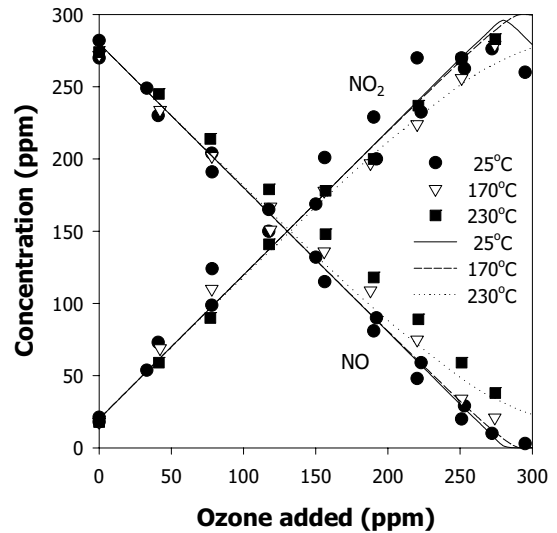


Fig. 3 NO oxidation in the ozonizing chamber.

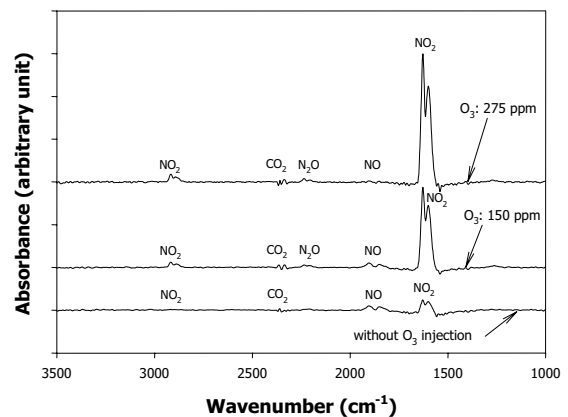


Fig. 4 FTIR spectra obtained at the outlet of the ozonizing chamber (temperature: 170°C).

오존 주입에 의해 생성된 NO<sub>2</sub>는 NO<sub>3</sub>로 더욱 산화될 수 있으나 이 반응은 매우 느리게 일어난다. 만일 NO<sub>3</sub>가 생성된다면, NO<sub>3</sub>는 NO<sub>2</sub>와 결합하여 N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>로 전환될 수도 있다. 그

러나  $N_2O_5$ 는 역반응에 의해 다시  $NO_3$ 와  $NO_2$ 로 빠르게 분해되는 것으로 알려져 있다. 결국 오존화실 출구에서의  $NO_3$  및  $N_2O_5$ 의 농도는 매우 낮을 수밖에 없다. 오존화실 출구에서의 배기가스 FTIR 스펙트럼이 Fig. 4에 제시되어 있다. 그림과 같이 오존이 첨가되어도 FTIR 스펙트럼에서  $NO_3$  ( $1275\text{ cm}^{-1}$ )나  $N_2O_5$  ( $1700\text{ cm}^{-1}$ )가 관찰되지 않았다. 그러나 미량의  $N_2O$ 가 관찰되었는데, 이  $N_2O$ 는 오존발생기에서  $N_2$ 와  $O_2$ 가 반응하여 생성된 것이다. 즉, 오존발생기의 산소공급원으로 공기대신 산소를 사용한다면  $N_2O$  발생 문제가 해결될 수 있다.

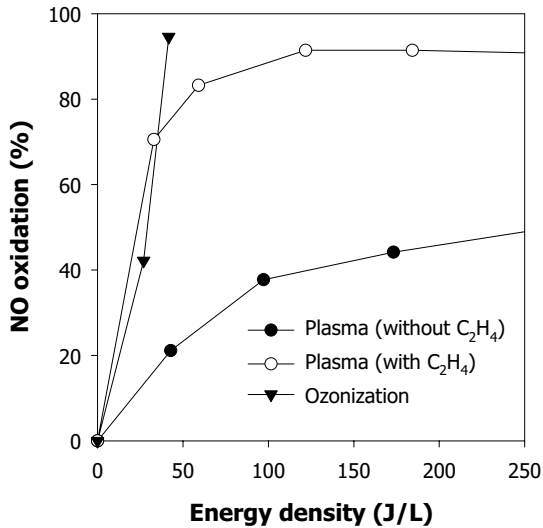


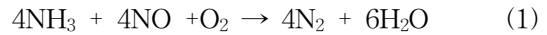
Fig. 5 Comparison of the present ozonizing method with typical nonthermal plasma process in terms of NO oxidation (temperature: 200°C).

Fig. 5는 본 연구의 오존처리에 의한 NO 산화방법과 일반적인 저온 플라즈마 기술의 NO 산화 방법에서 얻어진 결과들을 비교한 것이다. 두 경우를 같은 기준으로 비교하기 위하여 전력밀도에 대해 NO 농도를 도시하였다. 여기서 전력밀도는 방전전력을 배기가스 유량으로 나눈 값이다. 방전전력은 저온 플라즈마 반응기 혹은 오존발생기에서 소모된 전력이다. 저온 플라즈마 반응기의 경우는 탄화수소 첨가제가 없을 때 반응온도 200°C에서 NO 산화 반응 속도가 매우 느렸다. 첨가제로 에틸렌을 750 ppm 사용했을 때는 저온 플라즈마에 의한 NO 산화반응이 매우 촉진되었음을 알 수

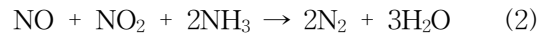
있으나, 에틸렌으로부터 생성되는 부산물이 문제점으로 고려되어야 한다<sup>12)</sup>. 반면에, 오존처리 방법은 탄화수소 첨가제 도움 없이도 NO를 쉽게 산화시킬 수 있었다. 이 결과는 오존처리 방법이 저온 플라즈마 방법보다 NO 산화반응에 있어서 유리하다는 것을 입증하는 것이다.

### 3.2 오존·촉매 복합공정

배기가스의  $NO_x$ 는 주로 NO로 이루어져 있으며, NO는 산소 존재하에서 다음과 같이 질소와 물로 환원된다:



반응 (1)은 일반적인 SCR 공정에서 일어나는 반응이다. 배기가스에 오존을 주입하면 NO의 일부가 산화되어  $NO_2$ 가 되며, NO와  $NO_2$ 가 공존할 때 다음과 같은 환원 반응이 동시에 일어난다:



반응 (2)는 반응 (1)보다 훨씬 빠르게 일어난다<sup>2)</sup> NO와  $NO_2$  비율을 인위적으로 조작하여  $NO_x$  제거효율을 증가시킬 수 있다.

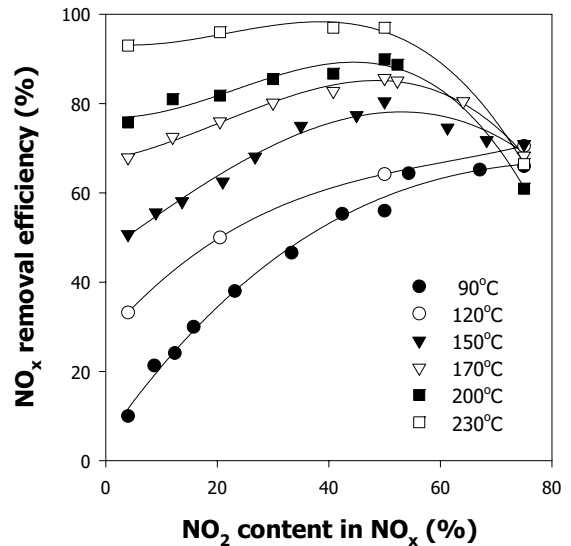


Fig. 6  $NO_x$  removal efficiency as function of  $NO_2$  content at different temperatures.

Fig. 6은 90-230°C의 온도범위에서  $NO_x$  함량에 따른  $NO_x$  제거효율을 나타낸 것이다. 그림과 같이  $NO_x$  제거효율은 온도가 증가할수록 증가하였으며, 150°C 이상의 온도에서는  $NO_2$  함량이 50%일 때 최대의  $NO_x$  제거효율

을 나타냈다. 150, 170, 200, 230°C의 온도에서 촉매만 사용했을 때에는 각각 51, 68, 76, 93%의 NO<sub>x</sub> 제거효율을 보였으나, 오존처리를 통해 NO<sub>2</sub> 함량을 50%로 증가시켰을 때에는 각각 80, 86, 90, 97%로 NO<sub>x</sub> 제거효율이 증가하였다. 본 연구에 사용된 촉매의 적정 반응온도는 250-400°C 범위지만, 오존을 이용함으로써 150°C의 낮은 온도에서도 80%의 NO<sub>x</sub> 제거효율을 얻을 수 있었다. 230°C의 비교적 높은 온도에서는 오존 주입에 의한 NO<sub>x</sub> 제거 향상 효과가 4%내외로 매우 작았으며, 온도가 낮아질수록 오존 주입에 의한 효과가 두드러졌다. 이 결과는 본 연구의 복합공정이 저온에서 더 효과적임을 의미하는 것이다. 한편, 반응온도 150°C 이상에서는 최대 NO<sub>x</sub> 저감을 나타내는 NO<sub>2</sub> 함량이 존재한 반면, 저온 영역, 즉 120°C 이하에서는 NO<sub>2</sub> 함량에 따라 NO<sub>x</sub> 제거효율이 증가하기만 하는 경향을 보여주었다. 90과 120°C의 온도에서 촉매만 사용했을 때의 NO<sub>x</sub> 제거효율은 각각 10%와 33%였으나, 오존에 의해 NO<sub>2</sub> 함량이 75%로 높아졌을 때는 NO<sub>x</sub> 제거효율이 각각 66%와 71%로 높아졌다. 그러나 선행 연구<sup>12)</sup>에서 살펴보았듯이 높은 NO<sub>2</sub> 함량에서는 질산암모늄이 생성될 수 있으므로, NO<sub>2</sub> 함량을 50% 이내로 제한해야 한다.

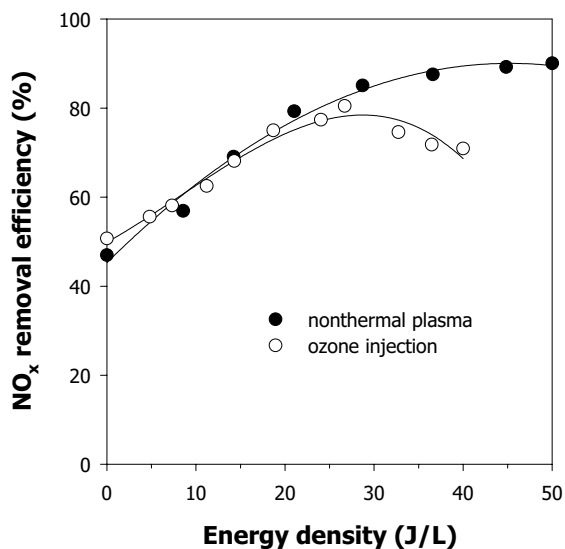


Fig. 7 Comparison of the NO<sub>x</sub> removal efficiency between the present process and the nonthermal plasma-catalysis hybrid process (reaction temperature: 150°C)

Fig. 7은 저온 플라즈마·촉매 복합공정<sup>12)</sup>과 본 연구의 오존·촉매 복합공정에서 얻어진 NO<sub>x</sub> 제거효율을 비교한 것이다. 두 경우를 같은 기준으로 비교하기 위해 NO<sub>x</sub> 제거효율을 전력밀도에 대해 도시하였다. 저온 플라즈마·촉매 복합공정의 경우 NO 산화반응이 느려 반응첨가제로 750 ppm의 에틸렌이 사용되었다. 그림과 같이 25 J/L 이하의 전력밀도에서는 본 연구에서 얻어진 NO<sub>x</sub> 제거효율과 저온 플라즈마·촉매 복합공정의 NO<sub>x</sub> 제거효율이 서로 유사하다. 그러나 더 높은 전력밀도에서는 저온 플라즈마·촉매 복합공정이 더 높은 NO<sub>x</sub> 제거효율을 나타내었는데, 이 결과는 NO<sub>x</sub>의 일부가 저온 플라즈마의 작용에 의해 다른 물질로 분해되었기 때문이다. 그러나 위에서도 언급한 바와 같이 저온 플라즈마 방전은 에틸렌과 같은 탄화수소 반응첨가제로부터 포름알데히드, 일산화탄소 등의 유해 부산물을 발생시킬 수 있으므로 본 연구의 오존 주입방법이 실용적인 측면에서 더 전망이 밝다.

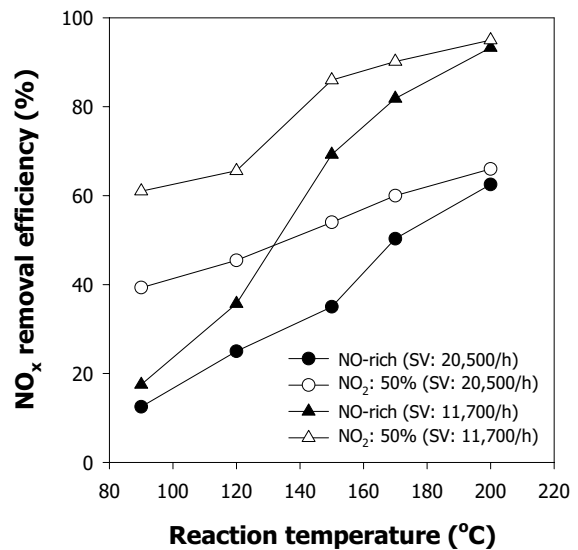


Fig. 8 Effect of temperature on the catalytic reduction of diesel NO<sub>x</sub> in the presence and in the absence of ozone injection.

본 연구에서 제안된 오존·촉매 복합공정의 실제 배기가스에 대한 적용성을 평가하기 위하여 디젤엔진 배기가스 처리 시험을 수행하였다. 디젤 엔진은 상용 트럭에서 분리되었

으며, 실험은 무부하 조건에서 수행되었다. 무부하 조건에서 디젤 배기가스의 전형적인 조성은 CO<sub>2</sub> 2.1%, H<sub>2</sub>O 3.4%, O<sub>2</sub> 14.2%, CO 245 ppm, NO<sub>x</sub> 180 ppm이었고, 나머지는 대부분 질소였다. 디젤 NO<sub>x</sub> 제거효율에 미치는 반응 온도의 영향이 Fig. 8에 주어져 있다. 이 그림에는 배기가스가 오존으로 처리되었을 때와 처리되지 않았을 때의 결과가 비교되어 있다. 오존을 주입하지 않았을 때는 NO<sub>x</sub>의 주성분이 NO이며, 이 경우에는 NO<sub>x</sub> 제거에 미치는 반응 온도의 영향이 매우 컸다. 오존이 배기가스에 첨가되지 않았을 때는 반응 (1)이 주요 NO<sub>x</sub> 제거 경로이다. 이 반응은 큰 활성화 에너지로 인해 온도의존성이 매우 높다<sup>15)</sup>. 결과적으로 반응 온도의 감소는 NO<sub>x</sub> 제거효율을 크게 감소시킨다. 이에 반해 배기가스에 오존을 주입하여 NO<sub>2</sub> 함량을 50%로 증가시켰을 때는 (NO : NO<sub>2</sub> = 1 : 1) NO<sub>x</sub> 제거효율의 온도의존성이 더 작아졌다. 위에 언급한 바와 같이 배기가스가 NO<sub>2</sub>를 포함하고 있으면 반응 (1) 뿐만 아니라 반응 (2)가 빠르게 일어나게 된다. Fig. 8에서 NO<sub>2</sub> 함량이 50%였을 때 NO<sub>x</sub> 제거효율이 작은 온도 의존성을 갖는다는 것은 반응 (2)의 활성화 에너지가 반응 (1)의 활성화 에너지보다 더 작다는 것을 의미한다. 문헌에 따르면<sup>15)</sup>, 반응 (1)과 반응 (2)의 활성화 에너지가 각각 37.4와 12.3 kJ/mol이다. 따라서 SCR 공정에 미치는 반응 (2)의 기여 정도는 온도가 감소함에 따라 더 커지게 되며, 이는 배기가스에 오존을 주입했을 때 NO<sub>x</sub> 제거효율이 온도에 덜 민감해지는 결과가 된다. 이상에서 살펴본 바와 같이 본 연구의 오존 주입 방법은 실제 디젤 배기가스의 촉매에 의한 NO<sub>x</sub> 제거 성능도 크게 향상시킬 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 저온에서 선택적촉매환원공정의 질소산화물 제거성능을 개선하기 위하여 유전체장벽방전장치에서 발생된 오존을 배기가스에 주입하여 NO<sub>x</sub>의 주성분인 NO가 NO<sub>2</sub>로 산화되도록 하였다. 이와 같은 방식으로 배기가스가 전처리되었을 때, 특히 NO/NO<sub>2</sub> 비율이 1/1 (NO<sub>2</sub> 함량: 50%)이었을 때, 질소산화물의 저감효율이 크게 향상되었다. 이 조건

에서 질소산화물 제거효율의 온도의존성이 NO가 주성분인 경우보다 훨씬 작았다. 그러나 NO를 과도하게 산화시키면 오히려 NO<sub>x</sub> 제거효율이 감소되므로 오존의 과잉주입은 피해야 한다. 배기가스에 질소산화물 초기농도가하로 오존을 주입했을 때 NO<sub>3</sub>나 N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>와 같은 부산물이 관찰되지 않았다. 본 연구의 오존 주입 방법을 실제 디젤 배기가스의 처리에 적용한 경우에도 저온에서 질소산화물을 효과적으로 제거시킬 수 있음을 확인하였다.

#### 사사

본 연구는 2004년도 한국학술진흥재단의 지원 (KRF-2004-041-D00183)에 의하여 연구되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 1) Pârvulescu, V. I., Grange, P. and Delmon, B.: Catalytic removal of NO. *Catal. Today*, **46**, pp.233-316, (1998)
- 2) Koebel, M., Elsener, M. and Madia, G.: Reaction pathways in the selective catalytic reduction process with NO and NO<sub>2</sub> at low temperatures. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**, pp.52-59, (2001)
- 3) Madia, G., Koebel, M., Elsener, M. and Wokaun, A.: Side reactions in the selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> with various NO<sub>2</sub> fractions. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**, pp.4008-4015, (2002)
- 4) Blanco, J., Avila, P., Suárez, S., Yates, M., Martin, J. A., Marzo, L. and Knapp, C.: CuO/NiO monolithic catalysts for NO<sub>x</sub> removal from nitric acid plant flue gas. *Chem. Eng. J.*, **97**, pp.1-9, (2004)
- 5) Baik, J. H., Yim, S. D., Nam, I.-S., Mok, Y. S., Lee, J.-H., Cho, B. K. and Oh, S. H.: Control of NO<sub>x</sub> emissions from diesel engine by selective catalytic reduction (SCR) with urea. *Topics in Catal.*, **30/31**, pp.37-41, (2004)
- 6) Bröer, S. and Hammer, T.: Selective

- catalytic reduction of nitrogen oxides by combining a non-thermal plasma and a  $V_2O_5-WO_3/TiO_2$  catalyst. *Appl. Catal. B: Environ.*, **28**, pp.101-111, (2000)
- 7) Khacef, A., Cormier, J. M. and Pouvesle, J. M.:  $NO_x$  remediation in oxygen-rich exhaust gas using atmospheric pressure non-thermal plasma generated by a pulsed nanosecond dielectric barrier discharge. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **35**, pp.1491-1498, (2002)
  - 8) Tonkyn, R. G., Barlow, S. E. and Hoard, J. W.: Reduction of  $NO_x$  in synthetic diesel exhaust via plasma-catalysis treatment. *Appl. Catal. B: Environ.*, **40**, pp.207-217, (2003)
  - 9) Kwak, J. H., Szanyi, J. and Peden, C. H. F.: Non-thermal plasma-assisted  $NO_x$  reduction over alkali and alkaline earth ion exchanged Y. FAU zeolites. *Catal. Today*, **89**, pp.135-141, (2004)
  - 10) Yoon, S., Panov, A. G., Tonkyn, R. G., Ebeling, A. C., Barlow, S. E. and Balmer, M. L.: An examination of the role of plasma treatment for lean  $NO_x$  reduction over sodium zeolite Y and gamma alumina part 1, plasma assisted  $NO_x$  reduction over NaY and  $Al_2O_3$ . *Catal. Today*, **72**, pp.243-250, (2002)
  - 11) Oda, T., Kato, T. Takahashi, T. and Shimizu, K.: Nitric oxide decomposition in air by using non-thermal plasma processing with additives and catalyst. *J. Electrostatics*, **42**, pp.151-157, (1997)
  - 12) Mok, Y. S., Dors, M. and Mizeraczyk, J.: Effect of reaction temperature on  $NO_x$  removal and formation of ammonium nitrate in non-thermal plasma process combined with selective catalytic reduction. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **32**, pp.799-807, (2004)
  - 13) Kogelschatz, U.: Dielectric barrier discharges: Their history, discharge Physics, and industrial applications. *Plasma Chem. Plasma Proc.*, **23**, pp.1-46, (2003)
  - 14) Mok, Y. S.: Oxidation of NO to  $NO_2$  using the ozonization method for the improvement of selective catalytic reduction. *J. Chem. Eng. Japan*, **37**, pp. 1337-1344, (2004).
  - 15) Mok, Y. S.: Catalytic reduction of nitrogen oxides enhanced by ozone injection using dielectric barrier discharge. *J. Ind. Eng. Chem.*, **11**, pp.425-431, (2005)

---

(2005년 6월 28일 접수, 2005년 12월 20일 채택)