

# 펄스방전을 사용한 이중베리어방전 반응기에 있어서 NO<sub>x</sub>제거에 관한 연구

김동욱 · 최충석 · 정영식\*

전기안전시험연구원 · \*인천대학교 전기공학과

## 1. 서 론

비열플라즈마를 이용한 방전기술(NTPD)은 배기가스로부터 발생하는 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>2</sub>의 제거에 있어서 최근 혁신적인 후처리 기술중의 하나다. NTPD는 전자빔과 전기적 방전을 사용하여 발생시킬 수 있는데, 두 방법 모두 동일한 기본적인 원리를 갖고 있다. 전기적 에너지의 대부분이 활동적인 전자들을 발생시키는데 이용되고 주위의 가스와 이온들에게는 거의 에너지가 전달되지 않아 효율적이다. 비록 이 전자들이 대기압 상태에서 짧은 시간동안 존재하고, 오염 분자들과는 거의 충돌하지 않지만, 배경가스 분자들과 충돌하여 전자 충돌에 의한 해리와 산화를 통해 활성종(radical)을 생성하게 되며, 이 활성종은 질소 분자들을 산화 또는 해리시켜 제거한다. 전기적 기체 방전을 이용한 기술은 전극의 구조 및 공급되는 전력에 따라 다양하며 이중에서도 펄스 스트리머 코로나 방전을 이용한 방법이 많은 주목을 받고 활발히 연구되고 있으며, 탈질을 위한 코로나 방전은 상승시간이 매우 짧은 좁은 폭을 지닌 고전압 펄스를 두 개이 전극 사이에 인가하여 얻을 수 있다. 전압 상승시간이 길어질수록, 공급된 에너지는 친화력이 강한 활성종등을 발생시키는데 필요한 전자에게만 공급되는 것이 아니라, 이온에게도 동시에 에너지가 공급되어 기체의 온도를 상승시키는데 전기 에너지가 소모된다. 코로나 방전은 대형 방전 장치를 구성하여 화력발전소 및 공장 등의 배연가스를 처리할 수 있으며, 장치의 소형화를 통한 자동차 배연가스의 처리에 활용할 수 있다<sup>1)</sup>.

본 연구는 디젤 자동차와 같은 이동 오염원에 적용이 가능하도록 화학적 첨가제나 촉매제를 사용하지 않고 적절한 전력 소모를 하면서 NO<sub>x</sub> 배출량을 줄일 수 있는 건식 반응기를 제안하며, 또한 장치의 효율성을 평가하기 위해 기존에 많이 연구된 cylinder-wire(CW) 반응기를 함께 사용하였다.

## 2. 실험

### A. 실험장치

실험장치의 개략도가 Fig. 1에 나타난다. 이것은 가스 공급부, 플라즈마 반응기, 전원, 그리고 가스 분석기로 구성되어 있다. 펄스 전원의 구성은 Fig. 2에서 나타난다. 로터리 스위치(rotating spark gap, RSG)는 D.C 고전압 발생기(Pulse electronic Engineering, 50kV)로부터 전압을 구형파의 펄스로 만드는데 사용되었고, 발생된 펄스는 Fig. 3에서 보여준다. 펄스반복비는 120~240[pulse/s]까지 변화된다. 전압과 전류 그리고 방전전력은 1000:1 고전압 프로브(Tektronix P6015A)와 전류 프로브(Tektronix A6312), 전류 증폭기(Tektronix AM 503B)와 함께 디지털 오실로스코프(Tektronix TDS 724A)를 사용하면서 측정하였다. 모의 가스는 N<sub>2</sub>를 밸런스 가스로 초기농도 1490[ppm]의 NO가스를 300, 700[ppm]로 N<sub>2</sub>가스로 희석하여 2[ℓ/min]로 고정하였다. 반응기에서 배출된 NO와 NO<sub>x</sub>가스는 NO<sub>x</sub> 분석기(Advanced Pollution Instrumentation model 200AU)로 측정하였다.

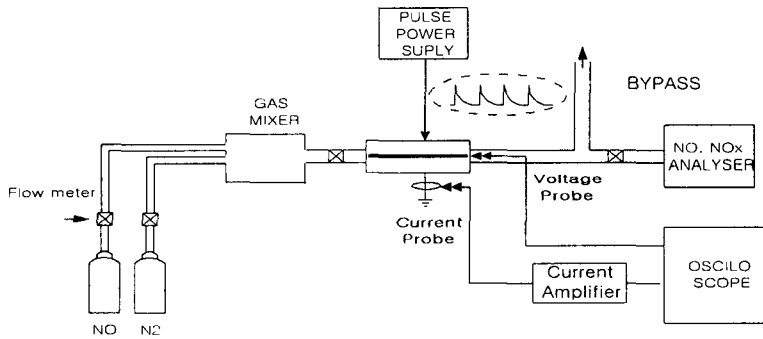


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

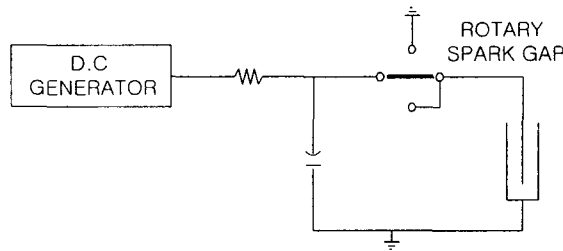


Fig. 2 Schematic diagram of pulse power supply apparatus

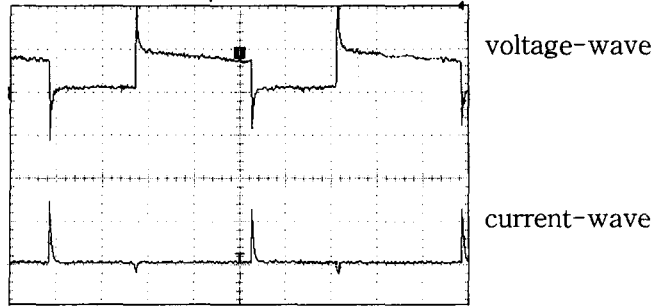


Fig. 3 DC pulse voltage-wave and current-wave

### B. 반응기

NTPD 반응기는 기하학적인 전극구조와 절연 파괴 메커니즘, 그리고 기체의 흐름과 전극사이에 유전적 물질등에 따라 다양한 방법으로 실험할 수 있었다. 본 연구에서는 이중방전(DDBD) 반응기와 cylinder-wire(CW)형 반응기가 사용되었다. DDBD 반응기는 Fig. 4(a)에서 보여주는 것처럼 두 개의 유리관 사이에 기체가 직접 통과하도록 구성되었다. 내부 유리관은 작은 금속구로 채워졌으며 내부유리관의 바깥쪽은 스테인레스 선을 감아서 전극으로 사용하였고 외부유리관은 알루미늄 포일로 감싸서 예로 들면 금속구를 중심전극(Central electrode, C), 헬리카형 선을 내부전극(Inner electrode, I), 그리고 알루미늄 포일을 외부전극(Outer electrode, O)하여 전극을 구성하였다.

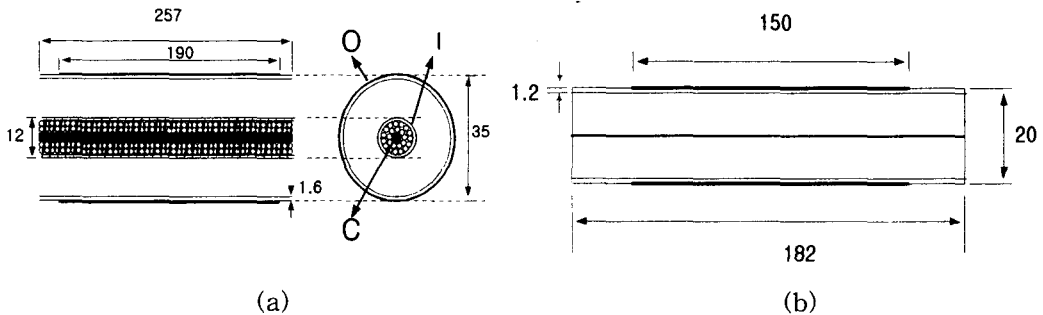


Fig. 4 Reactors (a) DDBD, (b) CW

CW 반응기는 DDBD반응기와 비교하기 위해 사용되었다. CW 반응기는 Fig. 4(b)에서 보여주는 것처럼 중심에 고정된 스테인레스 선을 방전전극으로 하고 유리관 표면을

감싼 알루미늄 포일을 접지전극으로 구성하여 사용되었다.

### C. 실험결과

Fig. 5와 Fig. 6은 인가 전압에 따른 NO와 NOx 제거율을 보여준다. 여기서 인가전압은 반응기에 투입된 피크전압을 지시하고 초기농도는 700[ppm]으로 고정하였다. 전압을 올릴수록 전기장은 식(1)과 같이 발생되기 때문에 두 개의 반응기에서 인가전압의 상승에 따라 NO와 NOx 분해율은 증가되었다. 여기서 r은 방전전극으로 사용된 선의 반경이며 D는 선과 실린더의 거리이다.

$$E = \frac{V}{r \log \frac{D}{r}} \quad (1)$$

DDBD 반응기에 만약 내부전극에 전압을 인가하고 중심전극과 외부전극을 접지하면, 이러한 구성으로 연면방전과 무성방전이 결합된 중첩방전(SPD)이 발생되고, 내부전극에 전압을 인가하고 외부전극을 접지하면 무성방전(SFD)이 발생되며, 내부전극에 전압을 인가하고 중심전극을 접지하면 연면방전이 발생한다. 그리고 중심전극에 전압을 인가하고 내부전극을 접지하면 부극성 연면방전(NSFD)이 발생된다. DDBD의 SLD와 CW는 NO와 NOx 분해율에 있어서 유사한 분해특성을 보여준다. NO와 NOx 제거에서 SPD는 20[kV]에서 각각 최고 약 75[%]와 70[%]의 분해율을 보이면서 가장 좋았다. NO와 NOx 분해율에서 SFD가 SLD가 좋은 이유는 SFD의 전극간 거리가 SLD의 전극거리보다 짧아서 식(1)에서와 같이 전기장이 강해지기 때문에 강한 코로나의 성장으로 NO와 NOx 분해율을 증가시키며, 그래서 SFD가 보다 높은 분해율을 보인다<sup>2)</sup>.

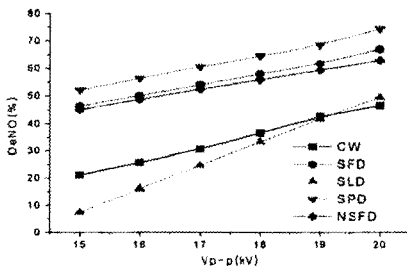


Fig. 5 NO removal rate a function of input voltage at 700[ppm] and 240[pulses/s]

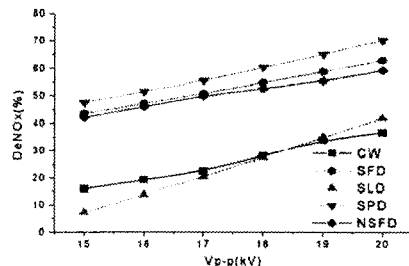


Fig. 6 NOx removal rate a function of input voltage at 700[ppm] and 240[pulses/s]

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 초기농도 700[ppm]과 300[ppm]에서 방전전력에 따른 NOx 분해율을 보여준다. 소비전력은 단지 반응기에서 사용된 값이며 3)에서와 같은 방법을 사용하면서 계산하였다. 같은 방전전력에서 DDBD와 CW는 NOx 분해율에서 저농도(300 [ppm])가 고농도(700[ppm])보다 높았으며 SPD가 700[ppm]에서 가장 효과적이었다. 그러나 300[ppm]에서 SPD, SFD 그리고 NSFD는 유사한 분해율을 보였고 SFD와 NSFD는 다른 극성을 사용하였지만 유사한 분해율을 보였다<sup>4)</sup>. 낮은 방전전력으로 SLD와 CW(무성방전)은 다른 것보다 유용했다.

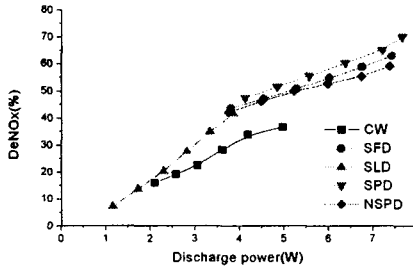


Fig. 7 NOx removal rate as a function of discharge power at 700[ppm] and 240[pulses/s]

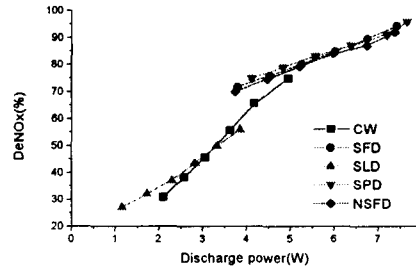


Fig. 8 NOx removal rate as a function of discharge power at 300[ppm] and 240[pulses/s]

Fig. 9는 700[ppm]에서 120[pulses/s]의 펄스반복비에서 NOx 분해율을 보여준다. Fig. 7과 Fig. 9에서 높은 펄스비는 보다 많은 펄스가 발생되기 때문에 낮은 펄스비보다 높은 분해율을 보여준다<sup>5)</sup>.

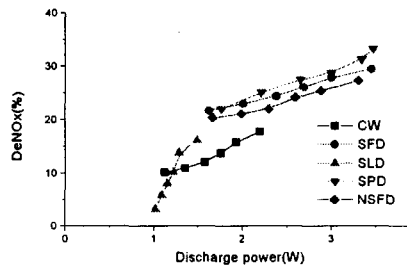


Fig. 9 NOx removal rate as a function of discharge power at 700[ppm] and 120[Hz]

Fig. 10과 Fig. 11은 각각 120[pulses/s]와 240 [pulses/s]에서 인가전압에 따른 방전 전력당 NOx분해율을 도시하였다. 두 개의 펄스반복비에서 SLD를 제외하고 15[kV]에서 가장 좋은 전력당 NOx 분해율을 보였다. SPD와 SFD 그리고 NSFD는 인가전압이 상승됨에 따라 서서히 감소하였다. 그러나 SLD는 증가하였다. 120[pulses/s]에서 전력당 분해효율은 240[pulses/s]보다 좋았고 CW는 두 개의 그림에서 상대적으로 덜 변화했다.

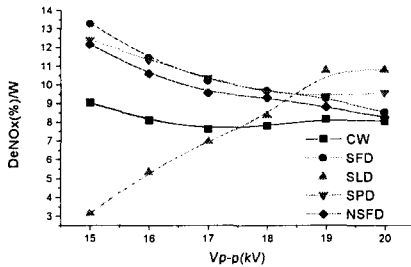


Fig. 10. NOx removal rate per discharge power at 120[pulse/s].

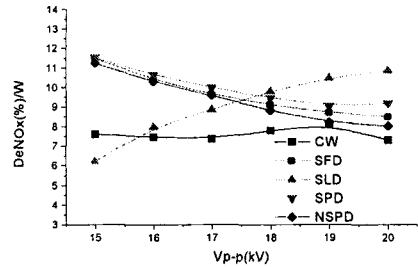


Fig. 11. NOx removal rate per discharge power at 240[pulses/s].

#### 4. 결론

DDBD 반응기에서 네 가지 전극의 조합(SPD, SFD, SLD, NSFD)에 따른 방전과 CW 반응기의 특성이 조사되었고 실험 결과를 보여주었다.

1. 연면방전에 무성방전이 결합된 DDBD 리액터의 SPD가 다른 것들 중에 가장 좋은 결과를 보였다. 두 가지 방전을 결합하면서 NOx 제거율이 SFD로부터 약 5~10[%]를 상승시켰지만 에너지 효율이 상대적으로 나빴다.
2. Peak Voltage나 펄스 주파수가 증가할수록 NO, NOx의 제거량이 증가하였다. 그러나 단위 소비전력당 NOx 제거량을 고려할 때, 에너지의 투입방법으로써 펄스 주파수를 증가시키는 것보다는 Peak Voltage를 증가시키는 것이 에너지 이용 면에서 효율적으로 나타났다.
3. NOx 제거율은 모든 반응기에서 인가전압을 증가시킴에 따라 증가했지만 증첩 베리어 방전인 SPD는 NOx를 제거하는데 가장 효과적이었다.

#### 참고문헌

- 1) B.M.Penetrante, et al., "Basic energy efficiency of plasma production in electrical discharge and electron beam reactors" Proceedings of NEDO Symposium on "Non-thermal Discharge Plasma Technology for Air pollution Control, pp 69~84, 1996.
- 2) S.Masuda, et al., "Novel plasma chemical technologies - PPCP and SPCP for control of gaseous pollutants and air toxics" Journal of electrostatics Vol.34, pp 415~438, 1995.
- 3) A.Mizuno, et al., "NOx removal process using pulsed discharge plasma," IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 31, No. 5, pp 957~963, 1995.
- 4) J.S.Chang, et al., "Corona Discharge Processes" IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.19 No.6, pp 1152~1165, 1991.
- 5) T.Oda, et al., "Non-thermal Plasma Processing for VOCs Decomposition and NOx Removal in Flue Gas" Proceedings of NEDO Symposium on Non-thermal Discharge Plasma Technology for Air pollution Control, pp 1~84, 1996.