

## 질소산화물 제거를 위한 펄스코로나 방전공정의 에너지 소모 저감에 관한 연구

### Study of the Reduction of Energy Consumption in the Pulsed Corona Discharge Process for NOx Removal

정재우 · 손병학 · 조무현 · 목영선<sup>1)</sup> · 남궁원  
포항공과대학교 환경공학부  
<sup>1)</sup>포항산업과학원 대기환경팀  
(1999년 5월 12일 접수, 1999년 6월 10일 채택)

Jae-Woo Chung, Byung-Hak Son, Moo-Hyun Cho,  
Young-Sun Mok<sup>1)</sup> and Won Namkung  
*School of Environmental Engineering, POSTECH*  
*<sup>1)</sup>Research Institute of Industrial Science and Technology*  
(Received 12 May 1999; accepted 10 June 1999)

#### Abstract

A lab-scale test was carried out to study the reduction of electrical energy consumption in the pulsed corona discharge process for nitrogen oxides removal. The experiment was mainly focused on 1) the activation of pollution removal reactions by chemical additives and 2) the optimization of electrical circuit for the efficient energy transfer from the power supply to the corona reactor. Hydrocarbon chemical additives used in the experiment are thought to be responsible for the enhancement of the NO conversion through the chain reactions of free radicals such as R, RCO, and RO. Electrical energy consumption per converted NO molecule has a minimum value of 17 eV when pentanol is injected. When ethylene and propylene are injected, 30 eV and 22 eV of electrical energy consumption is required for the conversion of NO molecule respectively. The ratio of the pulse forming capacitance ( $C_p$ ) to the reactor capacitance ( $C_R$ ) plays an important role in the energy transfer efficiency to the reactor. Maximum energy transfer efficiency of approximately 72% could be obtained by using the pulse forming capacitance which is 3.4 times larger than the reactor capacitance, and also the maximum NO conversion efficiency was observed with the same condition.

**Key words** : pulse corona discharge, electrical energy, chemical additive, electrical circuit

#### 1. 서 론

각종 산업공정에서 배출되는 배가스의 탈황/탈질

을 위한 펄스 코로나 방전공정에 관한 연구는 재래적인 습식탈황공정과 촉매를 사용하는 선택적 촉매 환원법이나 파일릿 규모 실험을 거쳐 부분적으로 상용화 단계에 이르고 있는 전자빔 공정에 비해 훨

선 늦게 시작되었다. 그럼에도 불구하고 기존의 공정들을 능가하는 여러 가지 장점들을 지니고 있어 활발한 연구가 진행되고 있는 공정이다. 전기방전을 이용하는 탈황, 탈질 기술은 기존의 공정에 비해 유해한 대기오염물질을 동시에 제거할 수 있다는 점, 건식공정이므로 2차적인 폐수처리 문제가 없다는 점, 에너지 비용 저감 가능성, 소요 부지면적 축소 등의 장점이 있는 것으로 알려져 있다(조무현 등, 1998).

탈황/탈질 분야에 대한 전기방전의 적용은 Masuda 등(1986)과 Mizuno 등(1986)에 의한 실험실 규모 실험으로부터 각각 질소산화물 및 황산화물의 제거가능성이 입증된 이후 많은 연구들이 이루어져 왔다. Civitano 등(1992)은 1986년부터 1992년에 걸쳐 전기방전에 의한 탈황/탈질연구를 실험실 및 파일럿 규모로 진행하였으며, 실험의 처리목표가 석탄화력 발전소의 배가스였으므로, 탈황/탈질 설비가 아직 갖추어지지 못한 발전소를 지닌 세계 각국의 관심을 불러 일으켰으며, 수많은 연구의 계기가 되었다.

탈황/탈질을 위한 코로나 방전은 급격하게 상승하는 좁은 폭을 지닌 고전압의 펄스를 두 개의 전극사이에 인가함으로써 얻어질 수 있다. 짧은 펄스 지속시간으로 인해 상대적으로 큰 질량을 지닌 이온들은 효과적으로 가속되지 않는 상태에서 높은 전압에 의한 전기장의 생성으로 인해 전자들은 대기압 조건하에서도 높은 에너지 상태로 가속될 수 있다. 그러므로 높은 전자온도와 낮은 이온 및 분자온도의 특성을 가진 비평형 플라즈마가 효과적으로 만들어질 수 있다(Chang *et al.*, 1991).

현재까지의 연구들로부터 얻어진 결과들은 전기방전에 의해 오염물질을 처리시, 처리를 위해서 소모되는 전력이 기존의 공정들에 비해 높다는 단점들을 나타내고 있다(Civitano, 1993; Masuda and Nakao, 1990). Masuda와 Nakao(1990)에 의해, 배가스 유량이  $10^6 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ 인 300 MWe급 발전용량의 석탄화력 발전소로부터 배출되는 NO의 코로나 방전에 의한 산화에만 78.1 MW(발전용량의 약 26%)의 소요전력이 요구되는 것으로 알려져 있다. 한편, Penetrante(1993)에 의해, 이상적인 저온 플라즈마 공정내에서 배가스내의 NO를  $\text{N}_2$ 와  $\text{O}_2$ 로 환원시키기 위해 필요한 소모 전력이 동력의 2.8%로 계산되

고 있으나 이는 NO 분자와 전자의 충돌에 의한 분해만을 가정한 계산으로, 아주 작은 농도의 NO를 포함하며, 산소, 수분등 산화성 물질들을 함유한 산업공정의 배가스 처리에 적용시키기에는 부적절하다.

펄스 코로나 방전공정의 실기적용을 위해서는 오염물질 제거를 위한 소요전력의 저감은 필수적이며, 이를 위한 접근법은 화학반응 활성화를 위한 첨가제의 투입 방안과 전기회로 구성의 최적화 방안으로 구분할 수 있다.

Civitano 등(1992)에 의하면, 펄스 코로나 방전공정을 화력발전소에 적용하기 위해 발전 전력의 5~6%의 에너지 소모로 운전될 수 있어야 하며, 알모니아 및 과산화수소를 첨가제로 사용함으로써 그러한 요구조건을 충족시킬 수 있었다. 그 외에도, 소요 전력 최소화를 위한 탄화수소 계열 첨가제의 주입에 관한 연구들(목영선 등, 1998; 송영훈 등, 1996; Mizuno *et al.*, 1995; Vogtlin and Penetrante, 1993)도 강도높게 연구되고 있는 상황이다.

전기회로 구성의 최적화 방안은 외부회로로부터 반응기로 에너지 전달효율을 최대화시킴으로써 요구되는 탈황/탈질 반응의 전기 효율을 높이는 방법이다. 코로나 방전에 의해 반응기로 전달되는 에너지는 화학반응을 촉진시키는데 동일한 역할을 수행할 수 없으며, 따라서 에너지 전달 및 이용 효율의 개념들이 도입되어야 한다. 이러한 에너지 전달효율은 방전극의 형상과 펄스 형성회로의 최적화에 의해 향상될 수 있는 것으로 알려져 있다.

일반적인 임피던스 매칭(impedance matching) 개념으로부터 펄스 형성회로로부터 반응기로의 효율적인 에너지의 전달은 펄스형성 콘덴서의 정전용량과 반응기의 초기 정전용량이 동일한 조건에서 이루어질 수 있다고 알려져 왔다(Uhm and Lee, 1997). Rea와 Yan(1995)에 의하면, 오염물질 제거를 위한 화학반응은 펄스 코로나 스트리머 강도에 의존하게 되며, 이러한 스트리머의 강도는 전체 전압, 펄스 전압 상승속도, 펄스 형성 콘덴서의 정전용량, 그리고 방전극의 형상에 의존하며, 높은 스트리머 강도를 얻기 위해서 펄스형성 콘덴서의 정전용량이 반응기가 가지는 정전용량의 적어도 100배 이상이 되어야 한다. Uhm과 Lee(1997)에 의해 수행된 코로나 방전 플라즈마의 분석적 이론에 따르면, 에너지 전달

효율은 펄스형성 콘덴서의 정전용량, 반응기의 정전 용량, 코로나 방전극 및 접지전극의 반경, 정규화된 플라즈마 이동도(normalized plasma mobility)에 의해 결정되며,  $R_p/R_c=0.02$ ,  $\zeta=0.2$  인 조건에서 100%의 에너지 전달을 위한  $C_R/C_c$ 는 0.32인 것으로 계산되었다.

본 연구의 목표는 탈황/탈질을 위한 펄스 코로나 방전공정의 소모전력 저감을 위한 두가지 접근방법의 타당성을 검증하며, 적정 첨가제를 제안하고 전기이용효율의 향상을 위한 방안을 제안하는 것이다. 일반적으로 탈황/탈질을 위한 코로나 방전공정에서의 소모전력저감을 위한 실험들이 NO의 전환에 대해 수행되고 있는데, 이는 SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub>는 알칼리 물질의 투입에 의해 비교적 적은 소모에너지로 제거할 수 있으며, NO의 전환은 전기방전에 의한 화학반응에 의존하기 때문이다. 따라서 본 연구에서도 NO의 전환에 소모되는 전기에너지 측면에서 실험을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실험장치는 그림 1에 나타낸

바와 같이 전원공급장치, 펄스 발생장치, 반응기 및 분석장치로 구성되어 있다. 전원공급장치는 최대 20 kV, 20 mA의 직류전압을 공급할수 있는 고전압 전원장치(Glassman High Voltage Inc.)를 사용하였으며, 스파크 갭 스위치(SGS)를 이용하는 펄스형성회로를 구성하였다. 코로나 반응기는 wire-plate 형태를 사용하였으며, wire 및 plate의 재질은 스테인레스를 사용하여 제작하였다. 9(W)×81(L)cm의 plate와 직경 0.8 mm, 길이 9 cm의 매끈한 표면을 가진 wire로 반응기를 구성하였다. plate 사이의 간격은 3 cm이며, wire는 plate 사이에 1.5 cm의 간격으로 평행하게 설치하였다. 반응기의 단면적은 27 cm<sup>2</sup>이며, 체적은 약 2,187 cm<sup>3</sup>이다. 반응기내의 온도는 수분의 응축을 방지하기 위해 heating band를 설치하여 50°C로 유지하였다.

### 2.1 화학첨가제 첨가실험

실험에서 사용된 첨가제의 종류를 표 1에 나타내었다. 과산화수소와 5가지의 알콜류(메탄올, 에탄올, 프로판올, 부탄올, 펜탄올), 4가지의 지방족 탄화수소류(펜탄, 헥산, 헵탄, 옥탄), 그리고 2종류의 기체상 알칸류(에틸렌, 프로필렌)를 첨가제로 사용하였다

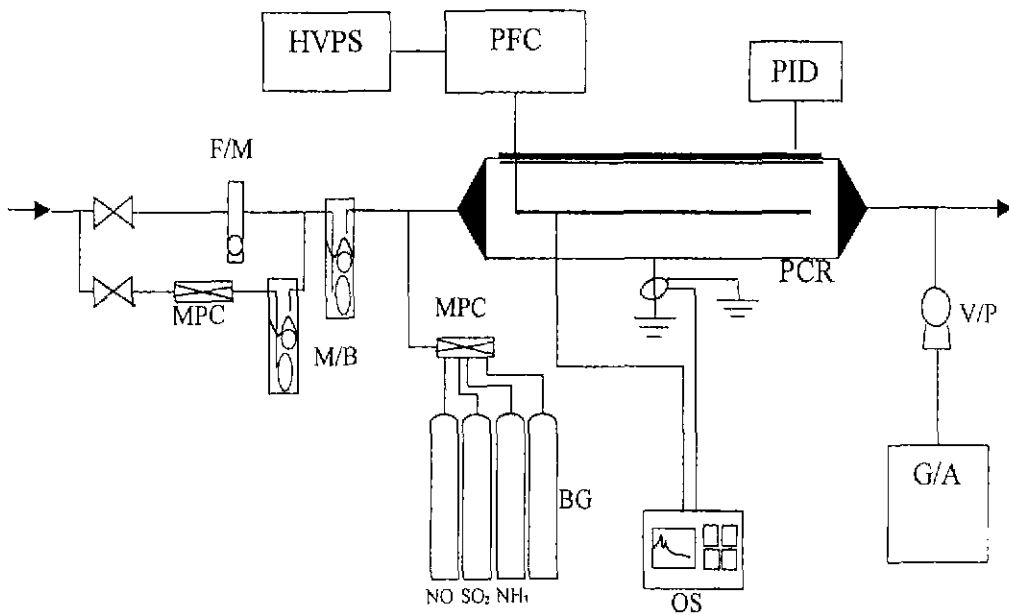


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

Table 1. Chemical additives tested in the experiment.

Chemical additives	Chemical formula	Vapor pressure at 25°C [kPa]
Hydrogen peroxide	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	17.0
Methyl alcohol	CH <sub>3</sub> OH	17.0
Ethyl alcohol	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	7.9
1-propanol	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHOH	28.0
Butyl alcohol	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	0.86
Pentane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	69.0
Hexane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CH <sub>3</sub>	20.0
Heptane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	6.1
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	gas phase
Propylene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	gas phase

기체상 알켄류를 제외한 첨가제는 상온에서 액체상으로 존재하므로 반응기의 전단부에 설치된 흡수병에 채워서 반응기로 유입되는 유입공기를 포화시켜 주입하였으며 주입량은 각 첨가제의 증기압에 따라 흡수병의 온도를 변화시킴으로써 조절하였다. 모든 첨가제의 주입량은 유입되는 NO 농도를 기준으로 정규화된 양(NSR: normalized stoichiometric ratio, v/v)으로 조절하여 주입하였다.

2.2 전기회로 구성 최적화 실험

본 연구에서 펄스전압을 형성하기 위한 펄스형성 회로구성의 최적화 가능성을 평가하기 위해 실험된 주요 파라미터는 펄스형성 콘덴서의 정전용량이다. 그림 2는 실험장치의 등가회로를 나타내고 있다. 반응기는 회로상에서, 코로나 개시전후에 각각 시간에 따라 정전용량 및 저항이 변화하는 콘덴서 및 저항의 특성을 나타내게 된다. 따라서, 그림 2의 회로도에서와 같이 가변 콘덴서(C(t))와 가변 저항(R(t))로 나타낼 수 있다.

반응기의 초기정전용량은 126 pF으로 측정되었으며, 펄스형성 콘덴서의 정전용량을 각각 0.23, 0.25, 0.44, 0.73, 2.29, 3.02, 5.02와 11.06 nF으로 변화시키면서 반응기로의 에너지 전달 효율 및 NO 전환에 미치는 펄스형성 콘덴서가 지닌 정전용량의 영향에 대해 실험하였다.

장치의 전기적 특성은 반응기의 양단에 나타나는 전압 및 전류의 파형을 측정하였다. 전압측정을 위해 1000:1 고전압 probe(Tektronix P6015)를 digital oscilloscope(LeCroy 9361)와 함께 사용하였고, 전류측정을 위해 current transformer(Tektronix CT-4).

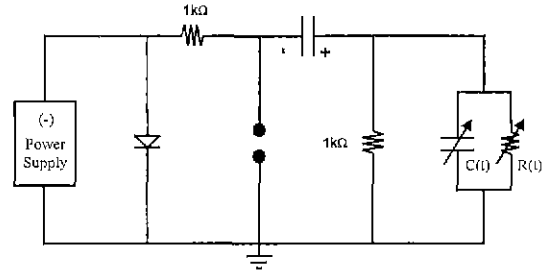


Fig. 2. Circuit diagram of experimental setup.

Table 2. Typical experimental condition.

Variable	Typical value
Gas flow rate	166.7 cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Concentration of NO	300 ppm
Humidity	3.5% (v/v)
Capacitance	0.23, 0.25, 0.44, 0.73, 2.29, 3.02, 5.02, 11.06 nF
Pulse frequency	0 ~ 50 Hz

current probe(Tektronix A6302)와 current amplifier(Tektronix AM503B)를 사용하였다. NOx는 chemiluminescence NO-NO<sub>2</sub>-NOx analyzer(Model 42H, Thermo Environmental Instrument Inc.)를 사용하여 측정하였다. 표 2에는 본 실험의 전형적인 실험조건을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

본 실험에서 얻어진 전형적인 전류 및 전압파형을 그림 3에 나타내었다. 약 20 ns의 상승시간, 250 ns의 펄스폭(FWHM; Full Width at Half Maximum), 그리고 22.5 kV의 첨두치를 지닌 전압 및 첨두치가 약 110 A인 전류 특성을 나타내고 있다. 반응기로 전달되는 펄스당 에너지는 약 188 mJ로 계산되었다.

그림 4는 첨가제가 없는 조건하에서 전력투입량에 따른 NO의 제거경향을 나타내고 있다. 방전에 의해 NO의 NO<sub>2</sub>로의 산화현상이 관찰되었으며, 전력투입량이 증가함에 따라 NO 전환율이 증가하였으며, 8.2 Wh/m<sup>3</sup>의 전력투입량에서 약 57%의 전환율을 얻을수 있었다. 이를 환산하면 NO 한분자당 요구되는 에너지는 약 46 eV로 계산된다.

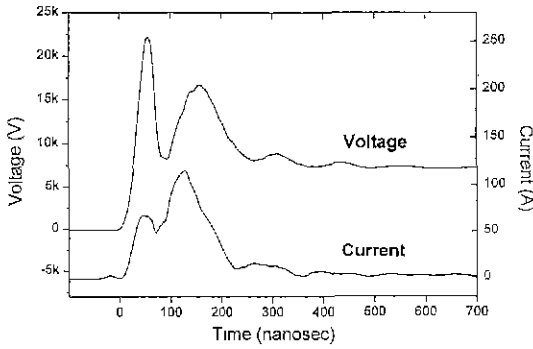


Fig. 3. Typical waveforms of voltage and current.

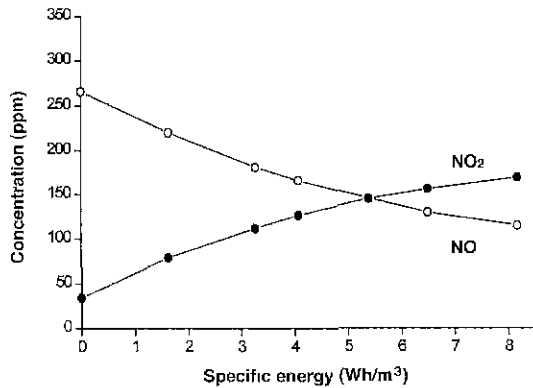


Fig. 4. Effect of power input density on NO conversion.

### 3.1 화학첨가제 첨가실험

그림 5에는 NO 전환율에 미치는 과산화수소 첨가의 영향을 나타내었다. 과산화수소는 방전하에서 주요한 OH 라디칼의 발생원으로 작용하나 주입되는 양론비의 변화에 의한 NO 전환율의 변화는 거의 나타나지 않았다. 이러한 현상은 NO의 전환에 미치는 OH 라디칼의 기여는 거의 없는 것으로 해석된다.

그림 6은 액체상 탄화수소 첨가제의 주입이 NO의 전환율에 미치는 영향을 나타내고 있다. 가로축의 아라비아 숫자는 첨가제가 지닌 탄소의 숫자를 나타낸다 알콜류 첨가제의 탄소수가 증가될수록(분자사슬이 길어질수록) 첨가제의 주입으로 인해 높은 NO 전환율이 얻어졌으며, 알칸류의 경우는 탄소수의 증가에 따른 NO 전환율의 뚜렷한 증가현상을

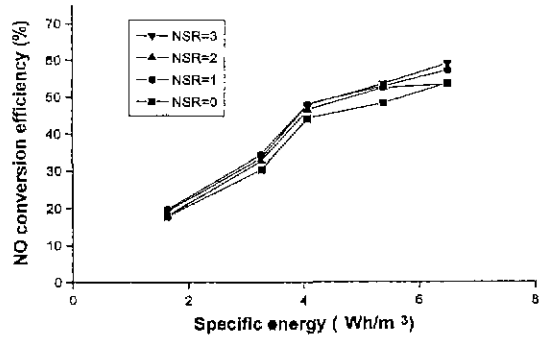


Fig. 5. Effect of hydrogen peroxide addition on NO conversion.

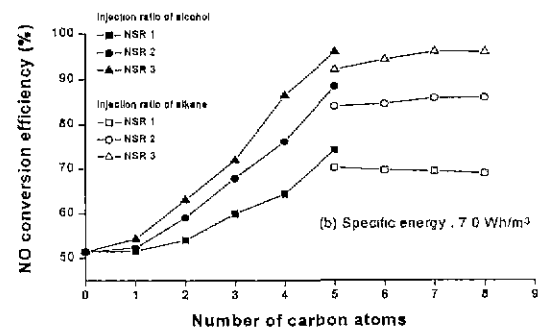
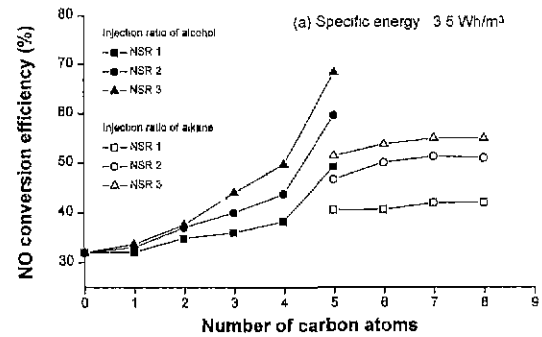


Fig. 6. Effect of liquid hydrocarbon additives on NO conversion at a) 3.5 Wh/m<sup>3</sup> and b) 7.0 Wh/m<sup>3</sup> of specific energy.

나타내지 않았다. 실험된 모든 액체상 탄화수소의 첨가량이 증가함에 따라 NO 전환이 높아지는 결과가 얻어졌다. 7 Wh/m<sup>3</sup>의 비에너지밀도를 기준으로 NO를 전환시키는데 소요되는 최소 전력소모량은 펜탄올을 NO 초기농도의 3배로 주입했을 때 얻을

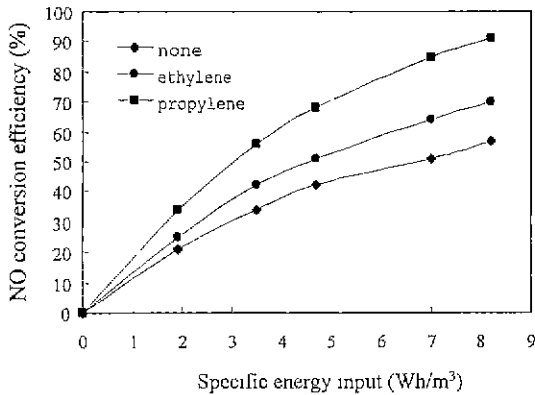


Fig. 7. Effect of gaseous hydrocarbon additives on NO conversion.

수 있었으며 이때의 소모전력량은 17 eV/NO 인 것으로 계산된다. 알칸류 첨가제의 경우 NO 농도의 1, 2, 3배로 주입함에 따라 한분자의 NO를 제거하기 위해 대략 30, 25, 20 eV 정도의 전력이 필요한 것으로 나타났다.

그림 7은 NO 전환율에 미치는 기체상 탄화수소 첨가제의 영향을 나타내고 있다. 현재까지 에틸렌을 첨가제로 사용한 연구들이 많이 수행되어왔으며 그 효율성이 검증된 상태에 있다 (송영훈 등, 1996; Mizuno *et al.* 1995). 그러나 프로필렌을 사용한 연구는 아직 발표되지 않고 있는 상태이다. 그림에서 보는 바와 같이 프로필렌은 에틸렌에 비해 높은 NO의 전환을 유도하는 것으로 나타났다. 에틸렌 및 프로필렌을 첨가제로 사용시, 한분자의 NO를 전환시키는데 소요되는 전력량은 7 Wh/m³의 비에너지 밀도를 기준으로 각각 30 eV와 22 eV로 계산되었다.

이상에서 살펴본 바와 같이 실험에 사용된 모든 종류의 탄화수소 첨가제는 NO 전환율을 상승시키는 것으로 나타났으며, 전반적으로 첨가제가 지닌 탄소의 수가 많을수록 전환율의 상승을 향상시키는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과들로부터 첨가제가 NO 전환에 미치는 메커니즘의 규명에 대한 접근을 수행하였다.

펄스 코로나 방전에 의한 탈질 반응의 메커니즘에 관한 속도론적 연구에 따르면, 탈질반응은 그림 8과 같은 경로를 따라 이루어지는 것으로 발표되었

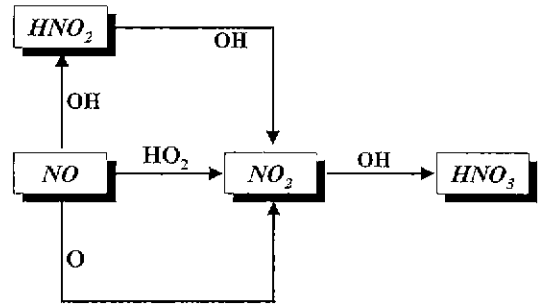


Fig. 8. NO conversion mechanism in the corona discharge reactor.

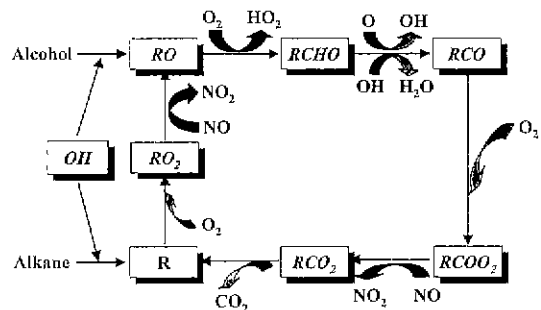


Fig. 9. Reaction mechanism of hydrocarbon additives on NO conversion.

다 (정재우 등, 1998). NO의 전환에 영향을 미치는 산화성 라디칼은 O, OH, HO₂이며, 이들 라디칼과 NO의 반응속도상수를 보면, NO의 전환에 미치는 O나 OH의 역할은 HO₂의 그것에 비해 무시할만하게 작음을 알 수 있다.

알콜류 및 알칸류의 탄화수소는 방전에 의해 생성된 OH 라디칼과 반응하여 각각 알콕시(alkoxy) 라디칼과 알킬(alkyl) 라디칼을 생성시킨다 (J.H. Seinfeld, 1975). Mass Spectral Data를 살펴보면, 알킬 및 알콕시 라디칼은 전자와 탄화수소의 직접 충돌 분해에 의해서도 생성될 수 있음을 알 수 있다 (F.W. McLafferty, 1989). 이렇게 생성된 라디칼들은 배가스중의 산소성분 및 방전에 의해 생성된 O, OH 라디칼들과 반응하여 그림 9와 같은 연쇄반응을 거치면서 NO를 직접적으로 산화시키거나 NO의 산화에 기여하는 HO₂ 라디칼을 생성하게 된다.

3.2 전기회로 구성 최적화 실험

펄스형성 콘덴서의 정전용량의 변화에 따른 전류-전압 그래프를 그림 10에 나타내었다. 11.06 nF의 경우에는 반응기내의 아킹현상으로 인해 실험이 불가능하였다. 그림에서 나타난 바와 같이, 정전용량의 증가에 따라 높은 피크 전압 및 전류가 얻어졌다. 이는 정전용량의 증가에 따라 많은 양의 전하를 축적시켜 반응기로 전달하기 때문이다. 그림 11은 정전용량의 증가에 따른 NO 제거량을 나타내며, 정전용량의 증가에 따른 제거량의 증가현상을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 정전용량이 증가함에 따라 반응기로 전달되는 에너지의 절대량이 증가하기 때문이다.

그러나 그림 10과 11에 의해서는 반응기로 전달되는 에너지의 효율에 대한 특성을 알 수 없다. 따라서, 펄스형성 콘덴서에 축적되는 에너지에 대한 반응기로 유입되는 에너지의 비율 그림 12에 나타

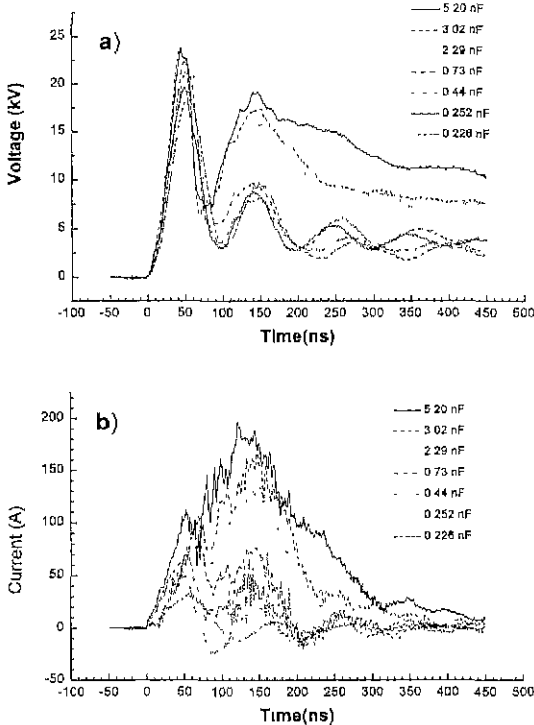


Fig. 10. Voltage and current waveforms according to pulse forming capacitance.

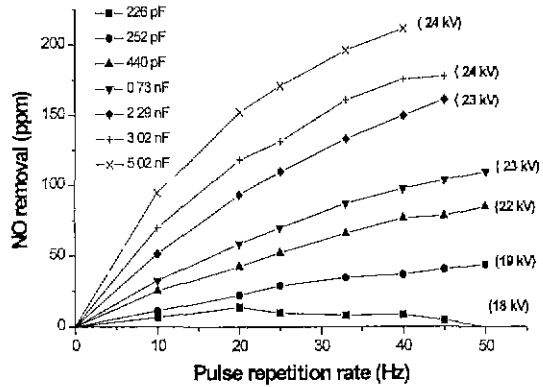


Fig. 11. Effect of pulse forming capacitance on NO conversion.

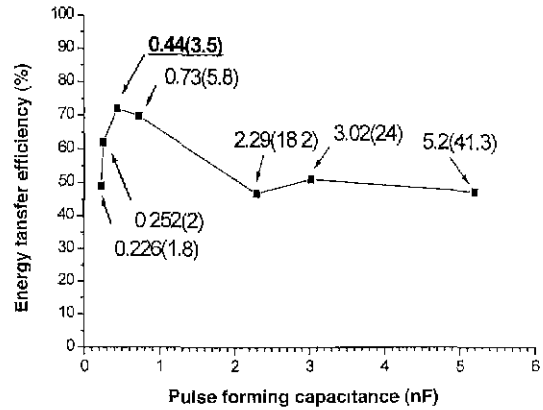


Fig. 12. Energy transfer efficiency according to pulse forming capacitance.

내었다. 펄스형성 콘덴서에 축적되는 에너지는  $E = 1/2CV^2$ 으로 계산되었으며, 반응기로 유입되는 에너지는 전류-전압 곱형을 시간에 따라 적분하여 얻었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 펄스형성 콘덴서의 정전용량이 반응기 초기 정전용량의 약 3.4배가 되는 0.44 nF에서 72%의 최대 에너지 전달 효율을 얻을 수 있었다.

그림 13에는 전환되는 NO의 농도에 미치는 펄스형성 콘덴서가 지닌 정전용량의 영향을 나타내고 있다. 가로축은 반응기에서 얻어진 전류-전압 곱형으로부터 얻어진 에너지 밀도를 나타내고 있다. 이 결과는 반응기로 같은 에너지가 전달되더라도 펄스

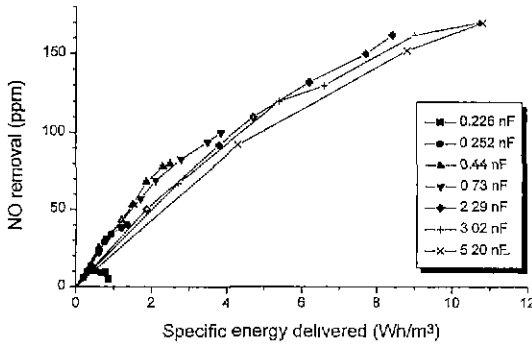


Fig. 13. Effect of specific energy and pulse forming capacitance on NO removal.

형성 콘덴서의 정전용량에 따라 제거되는 NO의 농도가 달라지는 현상을 나타내고 있다. 즉 같은 양의 NO를 전환시키는데 필요한 에너지는 펄스형성 콘덴서의 정전용량에 따라 다르게 나타나고 있으며, 0.44 nF의 정전용량의 콘덴서를 사용할 때 가장 높은 NO 전환 효율을 얻을 수 있었다.

이상에서 살펴본 바와같이 펄스전압을 생성시키기 위한 펄스형성 회로의 최적화를 통한 에너지전달 및 이용효율의 향상이 가능한 것으로 나타났다. 비록 본 연구를 통해 전체적인 펄스형성 회로의 최적화 방안은 도출되지 않았지만 펄스형성 콘덴서의 정전용량을 조절함으로써 반응기로 전달되는 에너지 전달 효율 및 탈질을 위한 에너지 이용 효율의 상승을 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 탈황/탈질을 위한 펄스 코로나 방전공정의 소요전력 저감을 위해 첨가제의 주입방안 및 전기회로 구성의 최적화 방안에 관해 연구하였다.

다양한 첨가제의 주입실험을 통해 실험에 사용된 모든 종류의 탄화수소류 첨가제가 NO 전환율을 상승시키는 것으로 나타났으며, 이러한 첨가제의 사용은 코로나 방전상태에서 일련의 R, RCO, RO 등의 라디칼 연쇄반응을 통해 직접적으로 NO를 전환시키거나 NO의 전환을 이끄는 산화성 라디칼을 생성시키는 것으로 나타났다. 실험된 첨가제중 펜탄올을 초기 NO 농도의 3배로 주입하였을 경우 한분자의

NO의 전환에 17 eV의 에너지가 필요한 것으로 나타났다. 또한 에틸렌과 프로필렌을 NO 농도와 같은 양으로 주입하였을 경우, 각각 30 eV와 22 eV의 에너지가 소요되는 것으로 나타났다.

본 실험에서 반응기의 초기 정전용량의 약 3.4 배인 0.44 nF의 정전용량을 지닌 펄스형성 콘덴서를 사용함으로써 72%의 에너지 전달효율을 얻을 수 있었다. 또한 반응기로 전달되는 에너지가 같은 경우에도 NO 전환율은  $C_p/C_r$ 에 영향을 받음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 회로구성 및 설계에 있어서 전압의 피크치보다는 에너지 효율에 기준을 두어 펄스 형성 축전부를 선정하고 높은 주파수를 적용함으로써 에너지 효율의 최적화가 이루어 질 수 있음을 나타낸다.

#### 감사의 글

본 연구는 포스코, 학술진흥재단의 신진연구인력 연구장려금, 그리고 기초전력공학공동연구소의 부분적인 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

송영훈, 최연석, 김학석, 신완호, 길상인, 정상현, 최갑석, 최현구, 김석준, 장길홍(1996) 저온 플라즈마 탈황 탈질 공정의 운전전력 절감을 위한 실험연구, 한국대기보전학회지, 12(4), 487-494

정재우, 손명학, 목영선, 조무현, 남인식(1998) 스트리머 코로나 방전에 의한 황산화물 및 질소산화물 저감특성, 대한환경공학회지, 20(6), 791-799.

조무현, 정재우, 손명학(1998) 플라즈마 배연가스 처리 공정을 위한 펄스전원 시스템, 배연탈황·탈질 동시처리기술 워크샵, 전력연구원, 109-124

Chang, J.S., P A Lawless, and T Yamamoto (1991) Corona discharge processes, IEEE Trans. Plasma Sci., 19, 1152-1166

Civitano, L. (1993) Industrial application of pulsed corona processing to flue gas, NATO ASI Series, G 34 Part B, 103-130

Dinelli, G., L. Civitano, and M. Rea (1990) Industrial experiments on pulse corona simultaneous removal of NOx and SO<sub>2</sub> from flue gas, IEEE Trans. Ind. Applcat., 26(3), 535-541

Masuda, S, and H Nakao (1990) Control of NOx by positive



- and negative pulsed corona discharges. *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, 26(2), 374-383
- Mizuno, A., J.S. Clements, and R.H. Davis (1986) A method for the removal of sulfur dioxide from exhaust gas utilizing pulsed streamer corona for electron energization. *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, IA-22(3), 516-522.
- Mizuno, A., K. Shimizu, A. Chakrabarti, L. Dascalescu, and S. Furuta (1995) NOx removal process using pulsed discharge plasma, *IEEE Trans Ind Applicat.*, 31, 957-963
- McLafferty, F.W. and D.B. Sauffer (1989), *NBS registry of mass spectral data*, 1, Wiley, U.S.A.
- Mok, Y.S., I.S. Nam, R.W. Chang, S.W. Ham, C.H. Kim, and Y.M. Jo (1998) Application of positive pulsed corona discharge to removal of SO<sub>2</sub> and NOx, *Proc ICESP VII*, 270-277
- Penetrante, B.M. (1993) Plasma chemistry and power consumption in non-thermal DeNOx, *NATO ASI Series, G 34, Part A*, 65-89.
- Rea, M. and K. Yan (1995) Evaluation of pulse voltage generators. *IEEE Trans Ind Applicat*, 31(3), 507-512.
- Seinfeld, J.H. (1975) *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley & Sons, Inc., U.S.A., 155pp.
- Uhm, H.S. and W.M. Lee (1997) An analytical theory of corona discharge plasmas. *Phys. Plasmas*, 4(9), 3117-3128.
- Vogtlin, G.E. and B.M. Penetrante (1993) Pulsed corona discharge for removal of NOx from flue gas. *NATO ASI Series, G 34, Part B*, 187-198.