

고온 불활성 기체 분위기에서 아산화질소 열분해 및 반응속도에 관한 연구

이한민* · 윤재근* · 홍정구†

A Study of Nitrous Oxide Thermal Decomposition and Reaction Rate in High Temperature Inert Gas

Han Min Lee, Jae Geun Yun and Jung Goo Hong

Key Words: N₂O(아산화질소), NO_x(질소산화물), Argon ambient(알곤 분위기), Thermal decomposition(열분해), Residence time(체류시간), Rate of progress(반응진행율)

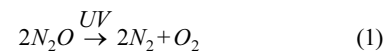
Abstract

N₂O is hazardous atmosphere pollution matter which can damage the ozone layer and cause green house effect. There are many other nitrogen oxide emission control but N₂O has no its particular method. Preventing further environmental pollution and global warming, it is essential to control N₂O emission from industrial machines. In this study, the thermal decomposition experiment of N₂O gas mixture is conducted by using cylindrical reactor to figure out N₂O reduction and NO formation. And CHEMKIN calculation is conducted to figure out reaction rate and mechanism. Residence time of the N₂O gas in the reactor is set as experimental variable to imitate real SNCR system. As a result, most of the nitrogen components are converted into N₂. Reaction rate of the N₂O gas decreases with N₂O emitted concentration. At 800°C and 900°C, N₂O reduction variance and NO concentration are increased with residence time and temperature. However, at 1000°C, N₂O reduction variance and NO concentration are decreased in 40s due to forward reaction rate diminished and reverse reaction rate appeared.

1. 서 론

아산화질소(Nitrous oxide, N₂O)는 질소 원자(N) 두 개와 산소 원자(O) 한 개로 구성되는 질소산화물(Nitrogen oxide, NO_x)로써 산업용 고정 연소 장치, 아디프산 및 질산 등의 화학 공정, 반도체 및 디스플레이 제조 공정에서 주로 배출된다⁽¹⁾. 아산화질소는 화학적으로 매우

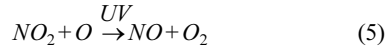
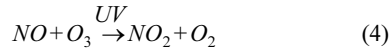
안정하여 대류권에서 거의 분해되지 않고 대기 중에 약 150년 정도 체류 할 수 있다⁽²⁾. 아산화질소가 성층권에 도달하여 자외선을 받으면 식 (1)에 의해 분해된다.



오존층(Ozone layer)에서 오존(O₃)은 자외선으로 인해 식 (2)의 과정을 반복한다. 아산화질소가 오존층에 유입 되면 오존은 산소 원자와 산소 분자(O₂)로 분해되어 식 (3)~(5)의 오존 파괴 반응이 진행된다.



(Received: 18 Aug 2020, Received in revised form: 3 Sep 2020, Accepted: 4 Sep 2020)
*경북대학교 기계공학과
†책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학과
E-mail : jghong70@knu.ac.kr
TEL : (053)950-6570 FAX : (053)950-6550



소량의 아산화질소도 연쇄적인 오존 분해 효과로 인해 이산화탄소(CO₂)의 310배에 해당하는 온실효과(Greenhouse Effect)를 가진다⁽³⁾.

이러한 대기환경문제를 해결하기 위해 유럽 연합(EU)에서는 유럽 배출가스 기준(European Emission Standards)을 1992년부터 시행하고 있다⁽⁴⁾. 국제 해사 기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 해양 오염 방지 협약(Marine Pollution, MARPOL)을 시행 중이다⁽⁵⁾. 국내의 경우, 대기환경보전법 시행규칙 제 15조, 제 71조, 제 124조에서 고정형 시설, 차량, 선박의 질소산화물 배출량을 규제하고 있다. 하지만 아산화질소 그 자체만을 제한하는 규제는 아직 존재하지 않아 그 위험성이 낮게 평가되고 있다.

아산화질소 생성에 관한 연구로 Kim⁽⁶⁾은 선택적 비촉매 환원법(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR) 공정에서 요소수(Urea solution) 환원제 분사 시, 아산화질소가 최대로 발생하는 온도범위는 990°C ~ 1030°C이며, 산소 농도가 낮을수록 아산화질소 생성이 낮다고 보고하였다. Jung⁽⁷⁾은 선택적 비촉매 환원법 공정에서 산소 및 수산화 라디칼(OH Radical)은 아산화질소 생성을 증가시킨다고 보고하였다. Yoo⁽⁸⁾는 디젤엔진에서 연료 중 황(S) 성분의 증가는 아산화질소 생성을 증가시킨다고 하였다.

아산화질소 저감에 관한 연구로 Ling 등⁽⁹⁾은 혼합기의 체류시간이 증가는 아산화질소 분해 및 질소산화물 생성의 최적온도를 감소시킨다고 하였다. Yoo 등⁽¹⁰⁾은 선택적 비촉매 환원법 공정에서 수산화나트륨(NaOH)을 첨가제로 투입 시, 아산화질소 생성이 억제되는 것을 확인하였다. Loffler 등⁽¹¹⁾은 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 물(H₂O)의 혼합은 연쇄반응을 발생시켜 아산화질소 저감에 중요한 역할을 한다고 보고하였다. Lee 등⁽¹²⁾은 유동층 소각(Fluidized Bed Combustion) 공정에서 제올라이트(Zeolite) 계열 촉매가 850°C의 온도에서도 안정적인 활성을 보여 유동매체로서 적용가능성이 높다고 보고하였다.

앞선 선행연구에서는 질소산화물의 반응 과정 등에 대한 분석 연구가 대부분이며, 상대적으로 아산화질소의 생성 및 분해 메커니즘(Mechanism)에 대한 기초 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실험실 구

모의 선택적 비촉매 환원 공정 반응기를 구성하여 실제 산업용 연소기에서 배출되는 아산화질소의 열분해 반응을 관찰하고자 한다. 선택적 비촉매 환원 장치의 크기와 연소 운전조건(유속, 온도)은 배기가스의 조성에 영향을 미친다. 이에 배기가스 조성에 영향을 미치는 체류시간과 온도를 실험 변수로 설정하고자 한다. 이후 실험적 결과와 CHEMKIN-PRO에서 계산한 반응식 및 반응속도를 비교하여 아산화질소 저감 및 질소산화물 생성 메커니즘에 대해 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

Figure 1은 아산화질소 열분해 특성을 확인하기 위한 실험장치 개략도이다. 실험 장치는 크게 기체 공급부, 반응기, 측정부 및 배기부로 나뉘어진다. 아산화질소 및 다른 실험기체는 질량 유량 조절계(Mass Flow Controller, MFC)를 이용하여 반응기로 유입된다. 반응기는 내경 140 mm, 길이 1000 mm의 원통형 구조이며, 1000°C까지 승온 가능한 전기로(Furnace)이다. 반응기 내부의 4개의 열선 코일(Heating Coil)로 반응기를 가열하며, 온도는 각 코일 중심부에 R-type 열전대(Thermocouple)를 설치하여 측정하였다. 반응 후 배기가스는 열교환기(Heat Exchanger)를 거친 후, Non-Dispersive Infrared (NDIR) 방식의 가스 측정기(IR-1, Sensonic. 아산화질소 측정용)와 가스 분석기(MK 6000+, Ecom GmbH, 질소산화물 및 산소 측정용)를 이용하여 측정하였다. NDIR 가스 측정기의 오차는 ±3 ppm or 3%이고 센서(Sensor)는 전기화학(Electrochemical) 센서이다. 가스 분석기의 일산화질소 및 이산화질소 측정 오차는 ±5 ppm or 2%이고 센서는 전기화학 센서이다.

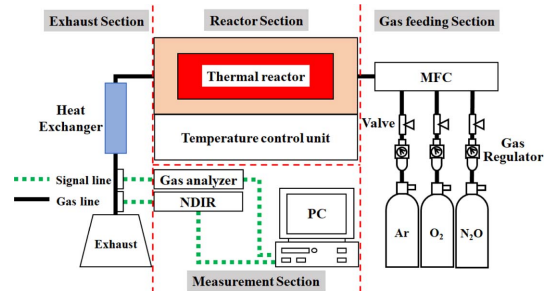


Fig. 1 Experimental setup

Table 1. Test gas conditions

Residence time (sec)	Gas composition
10	Ar 93% + O ₂ 5% + N ₂ O 400 ppm
20	
40	

2.2 실험 기체 및 조건

Table 1은 실험에 사용된 기체 혼합기의 가스 조성 데이터이다. 혼합기는 선택적 비촉매 환원법 공정에서 실제 배기가스를 모사하기 위해 알곤(Ar) 93%, 산소 5% 및 아산화질소 400 ppm으로 구성되었다. 실제 연소 배기가스 조성은 질소(N₂)와 이산화탄소 분위기이나, 본 실험에서 질소와 이산화탄소가 아닌 알곤을 사용한 이유는 아산화질소가 열분해 되어 생성되는 질소 이외의 반응로 내의 질소 간섭을 최소화하기 위함이다. 선택적 비촉매 환원 시스템의 배기가스 조성은 운전조건에 영향을 받는다. 질소산화물과 아산화질소는 체류시간과 온도에 따라 화학반응시간이 결정되므로, 혼합기의 반응기 내 체류시간(Residence Time)을 실험변수로 선정했다. 체류시간에 따른 아산화질소 열분해 실험은 혼합기 조성을 고정하고 체류시간을 10, 20, 40초로 변경하면서 실험을 진행하였다. 각 체류시간에 대응하는 혼합기 유량은 반응기 체적과 체류시간의 식 (6)로 계산하였다.

$$Q = \frac{\pi \times (D/2)^2 \times L}{t} \quad (6)$$

Q 는 혼합기 유량, D 는 반응기 내경, L 은 반응기 길이, t 는 체류시간이다.

Table 2는 실험 조건이다. 실험온도는 선택적 비촉매 환원법 공정의 일반적인 운전온도인 800°C부터 1000°C까지 20°C씩 승온시키면서 진행하였다. 각 온도구간마다 투입되는 기체 혼합기의 유량을 조절하여 체류시간을 일정하게 유지하기 위해 샤를의 법칙(Charles's law)을 이용해 유량을 계산하였다.

Table 2 Experimental conditions

Condition	Value
Temperature (°C)	800 ~ 1000
Flowrate (L/min)	25.81 ~ 5.44
Ambient Temperature (°C)	25
Ambient Pressure (atm)	1

Table 3 GRI3.0 Mechanism

Reactions	(k = AT ^b exp(-E/RT))		
	A	b	E
N+NO <=> N ₂ +O	2.7E+13	0	355
N+O ₂ <=> NO+O	9E+09	1	6500
N ₂ O+O <=> N ₂ +O ₂	1.4E+12	0	10810
N ₂ O+O <=> 2NO	2.9E+13	0	23150
N ₂ O(+M) <=> N ₂ +O(+M)	7.91E+10	0	56020

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \quad (7)$$

Q_1 은 투입유량, T_1 은 투입온도, Q_2 는 각 체류시간별 유량, T_2 는 반응기 온도이다. 유량 투입 10분후에 1분마다 기체 농도를 측정하였고 총 5분 측정하였다. 최종 데이터는 총 5분 측정값들의 평균값이다. 실험 분위기 조건은 25°C, 1 atm으로 유지한 채 실험을 진행하였다.

2.3 CHEMKIN 계산 조건

CHEMKIN-PRO⁽¹³⁾를 이용하여 실험에 사용된 반응로를 모사하여 계산을 진행하였다. 계산에서 사용된 모델은 1차원 반응구조 해석 Plug Flow Reactor이다. Plug Flow Reactor는 원통형의 반응기 모델로서 투입된 기체의 완벽한 혼합을 가정하며 반응기 내부의 연속적인 화학반응을 관찰 할 수 있다. 실제 실험조건과 동일한 내경 140 mm, 길이 1000 mm의 반응기를 구성하였으며, 반응기의 온도는 800°C부터 1000°C까지 50개의 온도구간으로 나누었다(Populate). 혼합기의 체류시간은 10, 20, 40초로 실험조건과 동일하게 계산하였다.

Table 3의 GRI 3.0⁽¹⁴⁾에 포함된 아산화질소 화학반응식으로 계산을 수행하였으며 반응경로분석기(Reaction Path Analyzer)로 화학 반응 경로를 확인하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 온도에 따른 아산화질소 열분해 및 질소산화물 생성

Figure 2는 온도증가에 따른 아산화질소 및 질소산화물 농도를 나타낸 그래프이다. 체류시간은 20초, 산소농도 5% 조건에서 실험을 진행하였다. 아산화질소는 초기 온도 800°C에서 318 ppm으로 측정되었으며, 온도 증가

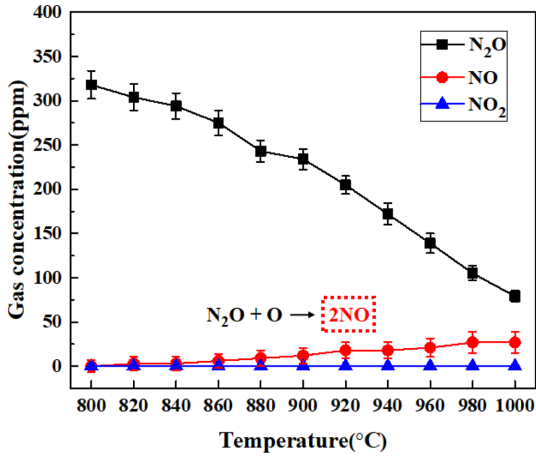


Fig. 2 Experimental gas concentration according to temperature

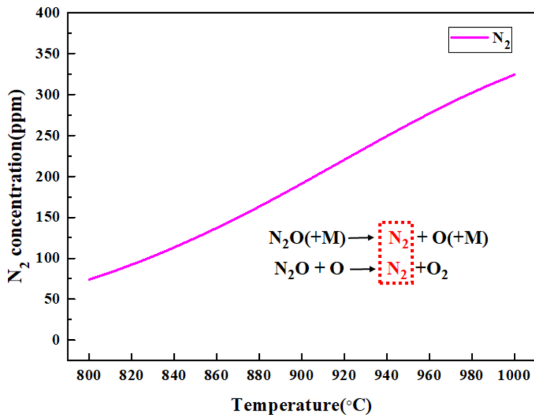


Fig. 3 Calculated N₂ concentration according to temperature

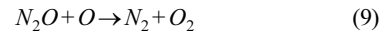
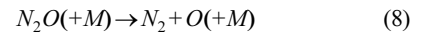
에 따라 감소되어 1000°C에서 79 ppm에 도달하였다. 일산화질소는 800°C에서 측정되지 않았지만, 온도 증가에 따라 점차 증가하여 1000°C에서 9 ppm으로 측정되었다. 이산화질소는 모든 실험 온도범위에서 0 ppm으로 측정되었다. 이는 식 (8) 및 (9)에 의해 반응로 내부 온도 증가에 따라 저감된 아산화질소가 질소로 전환되고, 식 (10)으로 인해 아산화질소가 산소원자와 반응하여 일산화질소가 생성되기 때문이다.

Figure 3은 Fig. 2의 실험과 동일한 조건으로 계산한 질소 농도를 나타낸다. Fig. 2의 실험에서 저감된 아산화질소의 질소성분이 질소로 전환되어, 온도 증가에 따라 질소 농도가 상승한 것이라 판단된다. Fig. 3 계산 결과에서는 1000°C에서 아산화질소가 분해되어 생성된 질소의 양이 약 324 ppm임을 확인했다.



Fig. 4 Absolute rate of production of N₂(M/s)

Figure 4는 아산화질소가 분해되어 생성되는 질소의 절대생성율(또는 절대반응속도, Absolute rate of production)을 나타내며, 단위는 초당 몰(Mol) 질량이다. 아산화질소가 분해되어 질소를 생성하는 반응인 식 (8) 및 (9)의 절대생성율은 일산화질소 생성반응식 (10)보다 10 배 이상 큰 것으로 나타났다. 따라서 Fig. 2, 3에서의 결과인 저감된 아산화질소 대부분이 질소로 전환되고 일산화질소는 상대적으로 미량 생성된 결과와 일치함을 확인할 수 있다.



3.2 체류시간에 따른 아산화질소 열분해 및 일산화질소 생성

Figure 5는 반응기 온도 및 혼합기 체류시간 변화에 따른 아산화질소 저감율을 나타낸 그래프이다. 아산화질소 저감율은 투입된 아산화질소 농도 400 ppm과 반응 후 저감된 아산화질소 농도의 비로 나타내어 표현하였으며, 식은 아래와 같다.

$$N_2O\text{reduction}(\%) = \frac{\text{Reduced } N_2O \text{ concentration}}{\text{Inlet } N_2O \text{ concentration}} \times 100 \quad (11)$$

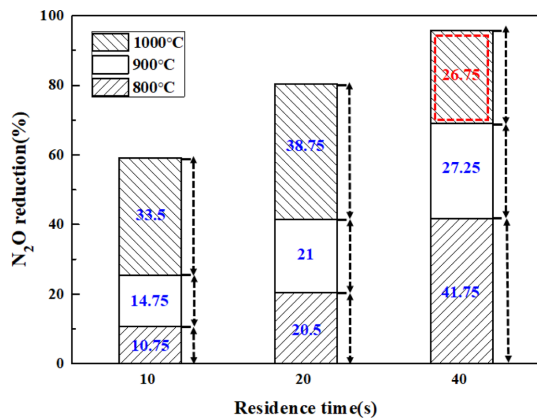


Fig. 5 N₂O reduction according to residence time

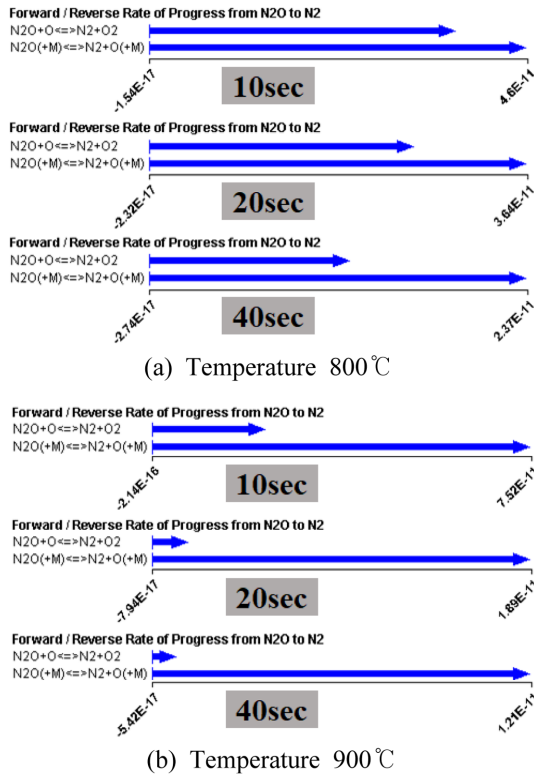


Fig. 6 Rate of progress between N₂O and N₂(M/s) according to residence time

혼합기의 산소 농도를 5%로 고정한 조건에서 체류시간을 10, 20, 40초로 변화시키며, 실험을 진행하였다. 온도 상승에 따른 전체적인 아산화질소 저감율은 증가되었지만 각 온도구간별 변화량은 다르게 나타났다. 반응기의 온도를 800°C에서 900°C까지 승온시킨 조건에서 아산화질소 저감율 변화량은 체류시간에 따라 더 증가되는 경향을 보였다. 반면 반응기 온도를 900°C에서 1000°C까지 승온시킨 조건에서는 체류시간 40초에서 10, 20초의 체류시간 조건보다 더 낮은 아산화질소 저감율 변화량을 확인하였다.

Figure 6은 800°C 및 900°C 온도조건에서 체류시간에 따른 아산화질소와 질소의 반응진행율(또는 반응진행속도, Rate of progress)을 CHEMKIN-PRO의 반응경로분석기로 계산한 그래프이며 Table 4로 구체적인 반응진행율 수치를 확인할 수 있다. 체류시간이 증가할수록 아산화질소 분해반응인 식 (8)과 식 (9)의 반응진행율이 감소하며, 이는 화학반응속도가 반응물의 농도에 영향을 받기 때문이다. 실험에 투입된 아산화질소는 체류시

Table 4 Rate of progress between N₂O and N₂

°C \ s	10	20	40
800	Forward : 4.6E-11 Reverse : -1.54E-17	Forward : 3.64E-11 Reverse : -2.32E-17	Forward : 2.37E-11 Reverse : -2.74E-17
900	Forward : 7.52E-11 Reverse : -2.14E-16	Forward : 1.89E-11 Reverse : -7.94E-17	Forward : 1.21E-11 Reverse : -5.42E-17
1000	Forward : 6.62E-13 Reverse : -4.1E-17	Forward : 1.49E-15 Reverse : -3.63E-17	Forward : 5.29E-17 Reverse : -3.63E-17

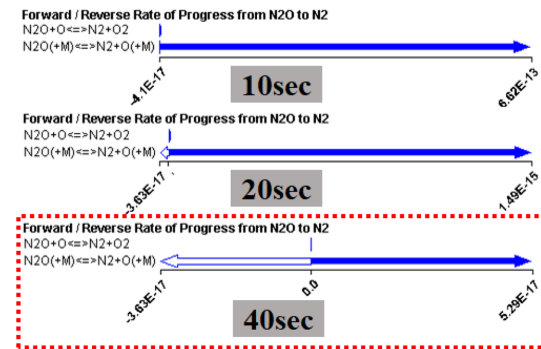


Fig. 7 Rate of progress between N₂O and N₂(M/s) according to residence time at 1000°C

간 증가에 따라 반응시간이 길어지므로 반응기 후단에서 배출되는 아산화질소 농도는 감소된다. 아산화질소 농도가 감소함에 따라 단위 부피당 분자 수가 적어져 분자간의 충돌이 감소되고 이에 따라 화학반응이 감소되어 반응속도가 감소하게 된다.

따라서 Fig. 5의 800°C 및 900°C 온도조건에서 체류시간 증가에 따라 아산화질소 농도는 감소하기 때문에 아산화질소 저감율은 증가된다고 판단된다.

Figure 7은 1000°C 온도조건에서 체류시간에 따른 아산화질소와 질소의 반응진행율을 계산한 그래프이며 Table 4로 구체적인 반응진행율 수치를 확인할 수 있다. 체류시간 증가에 따라 아산화질소의 농도는 감소되어 분해반응 식 (8)의 반응진행율이 감소된다. 또한 역반응인 식 (12)의 반응진행율은 큰 차이가 없는 것을 확인하였다. 이로 인해 1000°C 온도조건에서는 체류시간이 증가할수록 아산화질소 생성반응 식 (12)이 우세하게 되어, 체류시간 40초에서 아산화질소 저감율 변화량이 감

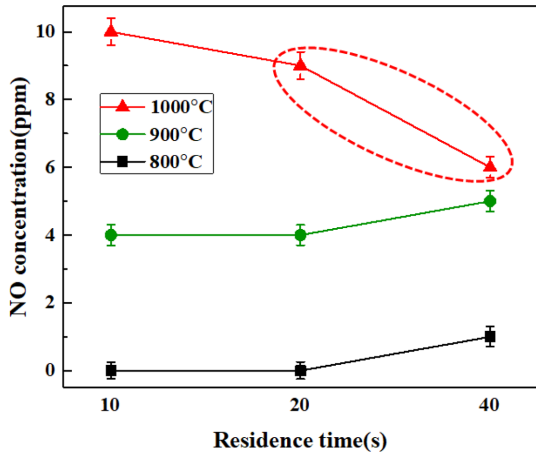


Fig. 8 NO concentration according to residence time

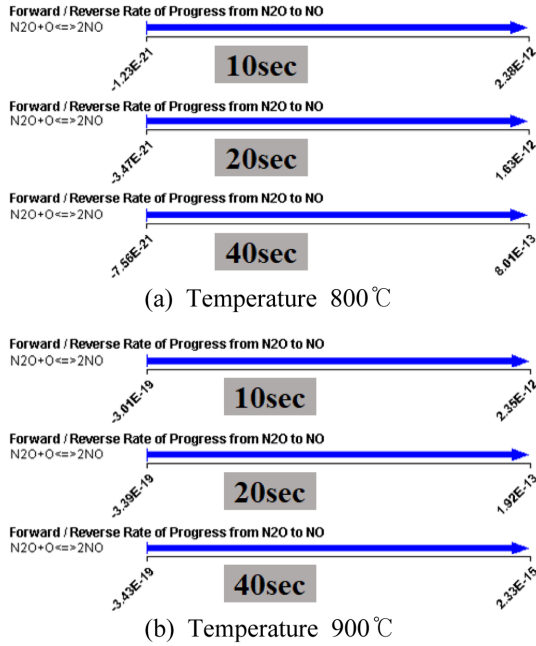


Fig. 9 Rate of progress between N₂O and NO(M/s) according to residence time

소된다고 판단된다.

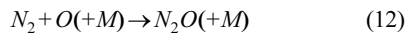


Figure 8은 반응기 온도 및 혼합기 체류시간 변화에 따른 일산화질소 농도를 나타낸 그래프이다. 동일 체류시간에서 온도증가에 따라 일산화질소 생성량이 커지는 것을 확인했다. 반응기 온도 800°C에서는 일산화질소가 거의 측정되지 않았으며, 반응기 온도 900°C 및 체류시

Table 5 Rate of progress between N₂O and NO

°C \ s	10	20	40
800	Forward : 2.38E-12 Reverse : -1.23E-21	Forward : 1.63E-12 Reverse : -3.47E-21	Forward : 8.01E-13 Reverse : -7.56E-21
900	Forward : 2.35E-12 Reverse : -3.01E-19	Forward : 1.92E-13 Reverse : -3.39E-19	Forward : 2.33E-15 Reverse : -3.43E-19
1000	Forward : 7.45E-16 Reverse : -4.98E-18	Forward : 1.48E-18 Reverse : -4.98E-18	Forward : 5.27E-20 Reverse : -4.98E-18

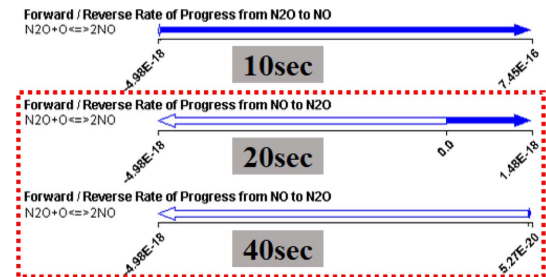


Fig. 10 Rate of progress between N₂O and NO(M/s) according to residence time at 1000°C

간 10, 20초에서는 일산화질소 농도가 동일하다가 체류시간 40초에서 증가되었다. 하지만 반응기 온도 1000°C에서는 체류시간 증가에 따라 일산화질소 농도가 감소하였다.

Figure 9는 반응기 온도 800°C 및 900°C 조건에서 체류시간에 따른 아산화질소와 일산화질소의 반응진행율을 계산한 그래프이며, Table 5로 구체적인 반응진행율 수치를 확인할 수 있다. 체류시간 10초 및 20초에서는 식 (10)의 반응진행율 차이가 크지 않으나, 40초에서는 크게 감소되는 것을 확인하였다. 또한 900°C 온도조건이 800°C 온도조건에 비해 식 (10)의 반응진행율이 낮다. 따라서 아산화질소의 일산화질소 전환이 증가되었다. 이는 Fig. 8의 일산화질소 농도 변화의 경향과 일치하는 것을 확인하였다.

Figure 10은 반응기 온도 1000°C 조건에서 체류시간에 따른 아산화질소와 일산화질소의 반응진행율 그래프이다. Table 5로 구체적인 반응진행율 수치를 확인할

수 있다. 반응기 온도 1000°C 조건에서 800°C 및 900°C의 온도조건보다 아산화질소 열분해 식 (10)의 반응진행율이 더욱 감소되어 더 높은 일산화질소 농도가 측정되었다. 반응기 내 체류시간이 증가될수록 식 (10)의 반응은 감소되지만, 식 (10)의 역반응인 식 (13)의 반응진행율은 변화가 없음을 확인했다. 따라서 반응기 온도 1000°C에서 체류시간이 증가됨에 따라 식 (10)의 반응보다 식 (13)의 반응이 우세하게 되어 일산화질소 농도는 감소된다고 판단된다.



4. 결 론

본 연구는 고온 반응기 열분해 실험을 통하여 아산화질소 저감 및 질소산화물 생성을 관찰하였으며, 계산결과로 획득한 반응식 및 반응속도와 비교하여 체류시간 및 온도에 따른 화학반응의 진행과정을 확인하였다.

(1) 실험결과에서 열분해된 아산화질소는 계산결과를 통해 대부분 질소로 전환된다는 것을 확인하였으며, 반응속도분석기를 이용하여 아산화질소의 질소 전환 반응식 및 반응속도를 확인하였다.

(2) 800°C 및 900°C의 온도조건에서 실험결과, 체류시간에 따라 아산화질소 저감율과 일산화질소 농도가 증가되는 것을 확인하였다. 이는 계산결과에서 아산화질소 저감 반응진행율이 감소하여 아산화질소의 배출농도가 감소되기 때문으로 판단된다.

(3) 1000°C의 온도조건에서는 실험결과, 체류시간이 증가할수록 아산화질소 저감을 변화량과 일산화질소 농도가 감소되는 것을 확인하였다. 이는 계산결과에서 아산화질소 저감의 역반응이 우세하게 되는 결과로 확인하였다.

후 기

이 논문은 2015년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회 융합연구단 사업의 지원(No. CRC-15-07-KIER)과 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-기후변화대응기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019M1A2A2103991).

참고문헌

- (1) 전상구, “N₂O 저감 기술 및 촉매 연구 개발 동향”, 공업화학 전망 제19권 5호, 2016, pp. 33~44.
- (2) 장길상, “온실가스 아산화질소(N₂O) 저감기술 및 CDM 사업의 현황과 전망”, 공업화학 제19권 1호, 2008, pp. 17~26.
- (3) 최상현, 고재철, “고형연료 소각시설의 N₂O 배출특성 및 배출계수 조사”, 대한환경공학회지 제41권 2호, 2019, pp. 82~88.
- (4) R. O'Driscoll, H. M. ApSimon, T. Oxley, N. Molden, M. E. J. Stettler, and A. Thiyagarajah, “A Portable Emissions Measurement System (PEMS) study of NO_x and primary NO₂ emissions from Euro 6 diesel passenger cars and comparison with COPERT emission factors”, Atmospheric Environment, Vol. 145, 2016, pp. 81~91.
- (5) 두현욱, “MARPOL73/78 부속서 VI 개정”, 한국마린엔지니어링학회지 제31권 5호, 2007, pp. 486~493.
- (6) 김종민, 동종인, “Urea-SNCR 공정에서 NO_x 및 N₂O 생성 메커니즘 연구”, 서울시립대학교 대학원, 2012.
- (7) 정문식, 동종인, “첨가제를 이용한 Urea-SNCR 공정에서 N₂O 생성특성 연구”, 서울시립대학교 대학원, 2011.
- (8) 유동훈, “디젤엔진에 있어서 연료의 성분이 아산화질소 배출에 미치는 영향”, 한국마린엔지니어링학회지 제38권 9호, 2014, pp. 1045~1050.
- (9) L. Liang, S. Hui, S. Pan, T. Shang, C. Liu, and D. Wang, “Influence of mixing, oxygen and residence time on the SNCR process”, Fuel, Vol. 120, 2014, pp. 38~45.
- (10) 유경선, 박성우, “환원제로 우레아를 사용하는 SNCR 공정에서 첨가제 적용에 따른 탈질효율 향상 연구”, 한국산학기술학회논문지 제18권 10호, 2017, pp. 663~668.
- (11) G. Loffler, V. J. Wargadalam, F. Winter, and H. Hofbauer, “Decomposition of Nitrous Oxide at Medium Temperatures”, Combustion and flame, Vol. 120, 2000, pp. 427~438.
- (12) 이승재, “N₂O 발생을 억제하기 위한 유동매체 및 유동층 소각공정 개발”, 한국에너지기술연구원, 2014.
- (13) CHEMKIN-PRO, Reaction Design Inc, San Diego, CA 92121, USA, <https://www.ansys.com/>.
- (14) G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach, N. W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C. T. Bowman, R. K. Hanson, S. Song, W. C. Gardiner, Jr., V. V. Lissianski, and Z. Qin, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.