

## 유효충돌빈도를 고려한 암모니아 생성 증대기법 연구

김세진<sup>1</sup> · 최용석<sup>2</sup> · 박현철<sup>3,†</sup><sup>1</sup>한국항공대 항공우주 및 기계공학부 <sup>2</sup>고려대학교 화공생명공학과 <sup>3</sup>동서울대학교 항공기계과

## Study on Enhancement of Ammonia Generation for Effective Collision Frequency

Sejin Kim<sup>1</sup>, Yongseok Choi<sup>2</sup> and Hyunchul Park<sup>3,†</sup><sup>1</sup>School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University<sup>2</sup>Dept. of Chemical and Biological Engineering, Korea University<sup>3</sup>Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Dong Seoul University

## Abstract

Research, such as developing alternative energy in the transportation field, including aviation, is being actively conducted to solve the issue of current climate change. Interest in ammonia fuel as a carbon free energy (CFE) source is increasing due to the ease of liquefaction and transportation and similarity in energy density to that of methanol. However, explosiveness and toxicity of ammonia make it difficult to handle. Therefore, in this study, stable ammonia production was attempted using relatively easy-to-handle urea water solution (UWS). High temperature steam was used to promote the hydrolysis of ammonia. In order to determine the causes for ammonia production below the theoretical equivalent ratio, it was suggested that there were not enough collisions to promote the hydrolysis based on the kinetic theory of gases. The hydrolysis of unreacted isocyanic acid (HNCO) was tested according to the change in water supply. As a result, an increased amount of ammonia produced was confirmed. The increased amount of ammonia produced in a certain section was dependent on the steam temperature and the flow rate of water supplied.

## 초 록

기후변화 대응을 위하여, 항공 분야를 포함한 운송 분야에서 국제온실가스 감축제도 도입 추진 및 대체 에너지 개발 등 환경문제에 대한 연구개발이 활발하다. 그 중 무탄소 에너지원으로 주목받는 암모니아 연료에 대한 관심이 증대되고 있다. 암모니아는 액화 및 운반이 용이하며, 메탄올과 비슷한 에너지 밀도 등의 장점이 있다. 그러나 폭발성 및 독성으로 취급성이 어렵다. 본 연구에서는 암모니아에 비해 취급이 용이한 요소수에 고온의 수분으로 열분해와 가수분해 반응을 유도하여 안정적인 암모니아 발생을 시도하고자 하였다. 암모니아 가수분해 촉진을 위해 고온의 증기를 이용하였고 이론 당량비 미만의 암모니아 발생원인 규명을 하고자 했다. 기체분자운동론에 기인하여 가수분해 촉진을 위한 충분한 충돌빈도가 이루어지지 않았다는 가설을 수립했다. 수분 공급량 변화를 통해 미반응 이소시아산의 가수분해 여부를 실험하였고 암모니아 발생량이 증가함을 확인하였다. 일정 구간동안 암모니아 발생량 증가는 증기 온도, 수분공급유량에 종속됨을 알 수 있었다.

**Key Words** : Carbon-free(무탄소), Selective Catalytic Reduction(선택적 촉매 환원법), Collision Frequency(충돌빈도), Hydrolysis(가수분해), isocyanic acid(이소시아산)

## 1. 서 론

이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메틸렌(CH<sub>2</sub>) 및 이산화질소(N<sub>2</sub>O) 등은 온실가스 증대의 주요 원인이다. 이에 따라 항공을 포함한 전 운송 및 산업 분야에서 국제온실가스 감축 제도 도입을 추진하고 있다. Table 1에서는 국내 항공 온실가스 할당량 및 배출량을 보여주고 있다[1].

Received: Jul. 24, 2023 Revised: Nov. 20, 2023 Accepted: Nov. 22, 2023

† Corresponding Author

Tel: +82-31-720-2047, E-mail: park@du.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

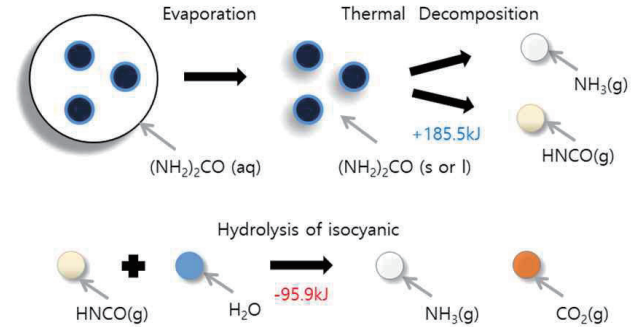
이에 차세대 무탄소 에너지원으로 암모니아가 주목받고 있다. 암모니아는 액화 및 운반이 용이하고 공정에 따른 비용적 측면에서 화석연료와 비교하여 경쟁력이 있다. 국내에서는 암모니아의 느린 연소속도를 보상하기 위해 가솔린 및 수소 혼소성능 특성에 대한 연구가 진행되고 있다[2-8]. 그러나 암모니아는 부식성과 독성 및 폭발성으로 인하여 취급에 주의를 요해야 한다는 단점이 있다[9]. 이에 따라 본 연구는 암모니아에 비해 저장성이 우수한 요소수를 통해 안정적으로 암모니아를 추출 해내는 과정을 구현하였다. 암모니아 가수분해 촉진을 위해 고온의 증기를 이용하였고 이론당량비 미만의 암모니아 발생원인 규명을 하고자 했다. 기체분자운동론에 기인하여 가수분해 촉진을 위한 충분한 충돌 빈도가 이루어지지 않았다는 가설을 수립했다. 수분 공급량 변화를 통해 충돌 빈도를 상승하여 미반응 이소시아나산의 가수분해 여부를 실험하였고 암모니아 발생량이 증가함을 확인하였다. 일정 구간 동안 암모니아 발생량 증가는 증기 온도, 수분공급 유량에 종속됨을 알 수 있었다.

**Table 1** Emission Control of Domestic Airlines

(단위:MAU)

구분	할당량(상)/ 배출량(하)					
	1차 계획기간			2차 계획기간		
	'15	'16	'17	'18	'19	'20
총계	1,282	1,653	1,549	2,056	1,994	1,994
	1,465	1,879	1,887	1,838	1,857	-
이스타 항공	112	111	109	139	139	139
	111	136	151	142	145	-
대한 항공	532	598	518	753	756	756
	652	675	658	604	593	-
아시 아나 항공	311	330	308	387	387	387
	344	351	367	376	373	-
에어 부산	133	130	130	216	151	151
	160	178	194	205	209	-
제주 항공	191	187	187	218	219	219
	194	218	210	217	228	-
진에어	-	154	153	209	209	209
	-	193	175	164	173	-
티웨이	-	140	140	130	130	130
	-	126	130	127	134	-

## 2. 요소수 분해 특성



**Fig. 1** Urea Decomposition Process

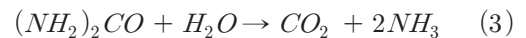
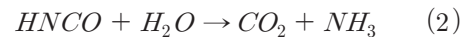
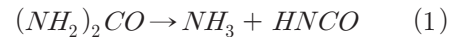


Figure 1은 요소수 용액의 분해 계략도이다. 요소수 용액은 180°C 이상의 고온의 온도로 인해 증발 점이 상대적으로 낮은 물부터 증발한다. 이후 남아있는 요소는 열분해 과정을 통해 암모니아와 이소시아나산으로 분해되고 185.5 kJ 흡열반응을 한다. 해당 반응식은 Eq. 1과 같다. 또한, Eq. 2과 같이 이소시아나산은 가수분해 반응을 통해 95.9 kJ 발열반응을 하며 암모니아로 전환된다. Eq. 3과 같이 최종적으로 반응물은 2몰의 암모니아와 1몰의 이산화탄소가 생성된다.

그러나 Fig. 2 와 같이 실제 열분해 시 이소시아나산은 높은 반응성 때문에 300 °C 도 부근에 시아누르산(Cyanuric acid), 뷰렛(Biuret) 등 고형화 생성물이 생성되고, 뷰렛과 시아누르산이 이소시아나산이 반응하여 더 안정적인 아멜라이드(Ammelide), 트리뷰렛(Triuret)이 생성된다. 이와 같은 대부분의 고형화 물질은 대부분 수분에 의해 분해되며 오직 Polymeric melamine만 625 °C 이상에서 열 분해 된다. 이와 같은 고형화 물질들이 서로 반응하여 요소수의 열분해시 당량 양론 전환 대비 실제 전환율이 감소한다. 이에 따라 이소시아나산의 부반응을 통한 고형물을 억제하기 위해서는 열분해 과정에서 높고 빠른 열을 수반하여야 하며, Eq. 2의 반응속도를 빠르게 높여주어 암모

니아로 전환되는 농도를 증가 시켜줘야 한다 [10].

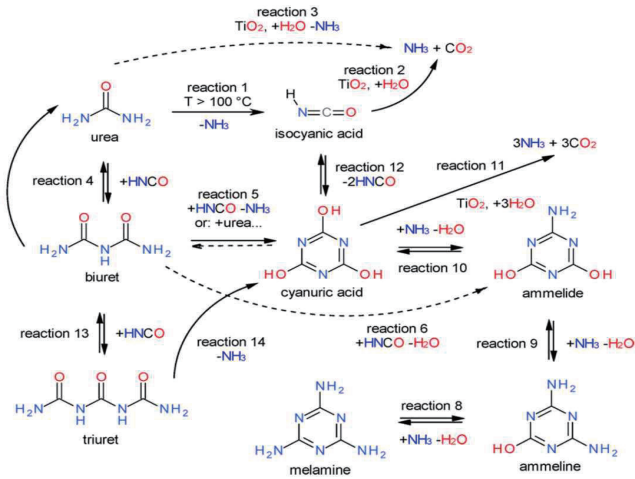


Fig. 2 Reaction of urea decomposition with byproduct formation[10]

### 3. 1D Modeling Mechanism 과 Factor Optimization

본 장에서는 충돌 빈도수(Frequency Factor)와 활성화 에너지(Activation Energy)의 상관관계를 알기 위해 AVL 사의 상용프로그램인 Boost를 사용하였다. 충돌 빈도와 활성화 에너지는 일반적으로 반응속도와 관련되어 있으며, 충돌 빈도가 증가할수록 반응속도도 증가하는 경향이 있다. 그러나 활성화 에너지가 높으면 반응속도가 저하된다. 이는 화학종에 따라 값이 달라 확인하는 것이 중요하다. Boost는 엔진 사이클 및 가스변환 시뮬레이션 소프트웨어로 Selective Catalytic Reduction(SCR) 선택적 환원 촉매법을 통한 요소수 분해 메커니즘이 포함되어 있다. 그러나 이소시안산과 물 분자 합성 과정은 생략 되어있다. 대부분의 요소수는 실제 공기 중에 열분해 되는 것이 아니라 촉매에서 열분해 되어 암모니아로 전환된다[10]. 이에 따라 이번 장에서는 프로그램 변수 초기값을 얻기 위해 DeNOx용 Vanadia 촉매로 AVL Boost 환경조건과 유사하게 모사하여 리그테스트 실험을 진행하였다.

#### 3.1 화학반응 속도론 과 아레니우스 방정식

Boost는 화학 반응 속도론을 바탕으로 속도 법칙과

아레니우스 방정식을 이용하여 반응속도를 계산한다. 속도 법칙은 반응속도와 농도 사이의 관계를 정량적으로 나타낸 식으로, 반응속도가 반응물 농도에 어떻게 의존하는지를 보여준다. 속도 법칙은 다음 Eq. 4과 같다.

$$V = k[A]^m[B]^n \quad (4)$$

속도상수 k는 각각의 온도에 따른 실험을 통해 도출해야 하는 값으로 많은 한계가 있다. 따라서 반응속도의 온도 의존도를 나타내는 아레니우스 방정식으로 도출할 필요가 있다. 아레니우스 방정식은 다음 Eq. 5와 같다.

$$k = Ae^{(-E/RT)} \quad (5)$$

이때, k는 속도상수이고, A는 화학반응에 대한 상수인자 요인이다. 충돌 이론에 따르면 정확한 방향으로 충돌하는 빈도수이다. E는 활성화 에너지, R은 기체상수, T는 온도이다 [11].

#### 3.2 Eley-Rideal 반응과 SCR Mechanism

Figure 3은 Langmuir model 과 Eley-Rideal 반응 메커니즘을 비교한 것이다.

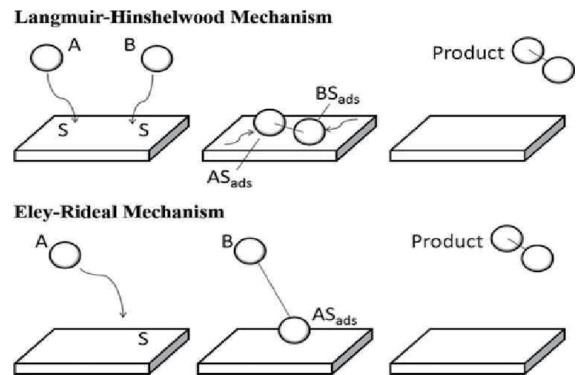


Fig. 3 Comparison for Eley-Rideal and Langmuir-Hinshelwood Mechanism

Boost는 Fig. 3와 같이 Eley-Rideal 반응은 촉매 표면 반응모델로 Langmuir model과 달리 반응물 모두가 촉매에 흡착되지 않아도 촉매반응을 진행하는 메커니즘이다[12]. Eley-Rideal Mechanism의 반응속도 식은 다음 Eq. 6과 같다.

$$r = k_{NO}C_{NO}A_{NIB}, A_{NIB} = \frac{k_{NIB}C_{NIB}}{1 + k_{NIB}C_{NIB}} \quad (6)$$

이때,  $r$ 은 제거된 일산화질소의 몰농도 이고,  $C_{NO}$ ,  $C_{NH_3}$ 는 각 일산화질소와 암모니아의 농도이다[12].

### 3.3 SCR Mechanism

Boost는 위의 Eley-rideal Mechanism 반응속도 식인 아레니우스 방정식에 대해서 풀면 다음 Eq. 7와 같다 [13].

$$r = A_{NO}^{(-E_{NO}/RT)} C_{NO} \frac{A_{NH_3}^{(E_{NH_3}/RT)} C_{NH_3}}{1 + A_{NH_3}^{(E_{NH_3}/RT)} C_{NH_3}} \quad (7)$$

### 3.4 배기가스 조성 모델링 및 RigTest 결과

최적화는 DeNOx용 Vanadia 촉매의 리그테스트 실험 결과를 기반으로 하였다. 촉매의 길이는 200 mm 이고, Cell 밀도는 100 CPSI(Cell per square inches), Linear Velocity(LV)는 1.0 m/s, 입구 유량은 14,192 cc/min Space Velocity(SV)는 18,000 h<sup>-1</sup>이다. 배기가스 분석기는 화학발광분석 Chemiluminescence detection (CLD) 방식을 사용하였다. 배기가스 조성은 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>이다. 배기가스 농도 조성은 다음 Table 2와 같다.

Table 2 Exhaust Gas Composition

구분	농도	구분	농도
O <sub>2</sub>	11 %	NO	400 ppm
CO <sub>2</sub>	6 %	SO <sub>2</sub>	0 ppm
CO	100 ppm	H <sub>2</sub> O	5 %
NH <sub>3</sub>	280 ppm	NSR 0.7	
	320ppm	NSR 0.8	
	360 ppm	NSR 0.9	
	400 ppm	NSR 1.0	

실험은 총 당량비 별 각 3회씩 측정하였다. 촉매 전단 온도를 90 - 450°C 범위에서 실험을 진행하였고, 분당 5°C 속도로 승온하였다. 89 - 150 °C 구간은 NH<sub>3</sub>가 촉매에 흡착된 것을 탈착시키기 위해 N<sub>2</sub> 가스로 약 10분 퍼지 작업을 하였다. 촉매 전단 온도 200, 250, 300, 350, 400, 450 °C 별 Vanadia 촉매의 DeNOx 효율을 확인하는 것을 목표로 실험을 진행하였다. 실험 결과는 다음 Table 3과 같다.

Table 3 Experiment result (DeNOx efficiency)

온도 당량비	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C	450 °C
0.7	66%	65%	64%	64%	64%	61%
0.8	74%	75%	74%	74%	73%	69%
0.9	83%	84%	83%	84%	82%	76%
1.0	89%	95%	95%	94%	92%	85%

### 3.5 시뮬레이션 구간별 설정 및 최적화

모델은 Fig. 4에서와 같이 입구, 촉매 반응기, 출구로 구성하였다.

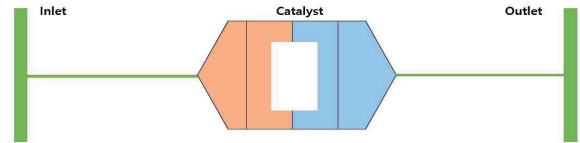
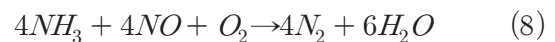


Fig. 4 Components Modeling for 1D analysis

입구에서는 유량, 온도, 배기가스 조성 및 경계조건을 입력하였다. 촉매 영역은 촉매 길이, CPSI, Wash coat 두께를 활용하여 설정하였으며 촉매 물성치는 AVL사에서 제공하는 바나듐 촉매 라이브러리 값을 사용하였다. 출구 영역은 역압 조건과 출구 압력을 경계조건으로 설정하였다[14].

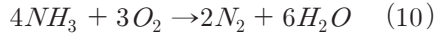
촉매 영역에서는 SCR 촉매반응의 주된 반응인 Standard Reaction과 NH<sub>3</sub> Oxidation 조건을 이용하였다. Standard Reaction의 화학반응식과 수식은 Eq. 8와 9과 같다.



$$r = K_1 \cdot \exp\left(\frac{-E_1}{T_s}\right) \cdot \frac{K_2 \cdot \exp\left(\frac{-E_2}{T_s}\right) \cdot C_{NH_3}^L}{1 + K_2 \cdot \exp\left(\frac{-E_2}{T_s}\right) \cdot C_{NH_3}^L} \quad (9)$$

Equation 9의 초기값은 K<sub>1</sub>는 3618.9686 m/s, K<sub>2</sub>는 1e-14 m<sup>3</sup>/kmol, E<sub>1</sub>는 6355.9763 °C E<sub>2</sub>는 -341 23.15 °C 이다. 이는 리그테스트 실험을 기반으로 확

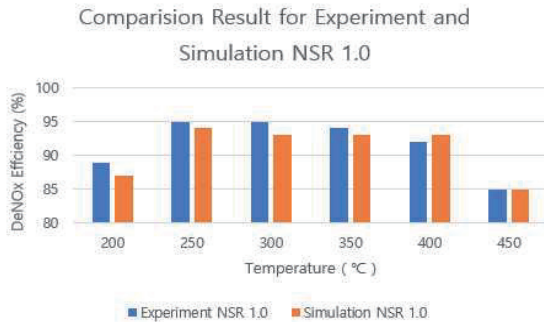
특한 초기값이다. NH<sub>3</sub> Oxidation의 화학반응식과 수식은 Eq. 10과 11과 같다.



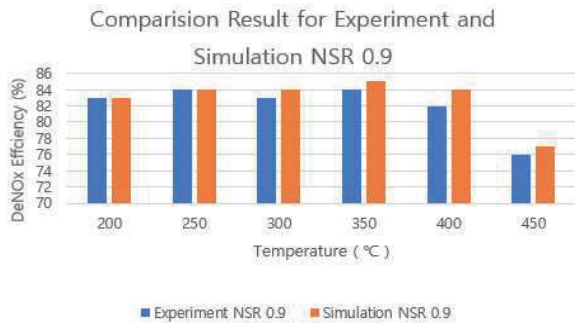
$$\dot{r} = K \cdot \exp\left(\frac{-E}{T_s}\right) \cdot C^{L_{NH_3}} \quad (11)$$

Equation 10의 초기값 K는 4513.2964 m/s, E값은 7812.9257 °C 이다. Boost에서는 각 조건별 반응 계수에 의해 DeNox 특성을 나타내게 된다. 각 조건별 Frequency Factor와 Activation Temperature 변수의 최적화는 실험계획법을 이용하였다. 특히 대상시스템의 반응값인 특성치 및 인자는 Eq. 9에서 얻은 초기값 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>를 기반으로 최적화하였다. 온도와 암모니아 농도에 따른 K값 반응속도 값은 AVL Boost에 Vibe Combustion 최적화 모델을 사용하여 계산하였다.

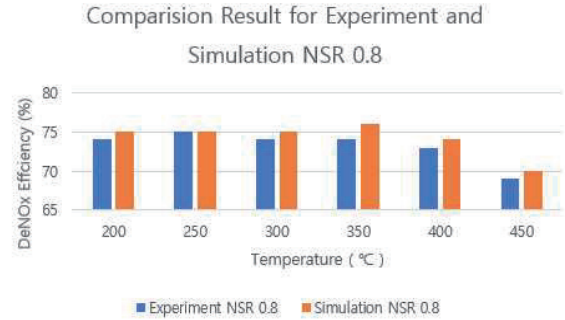
### 3.6 최적화 결과



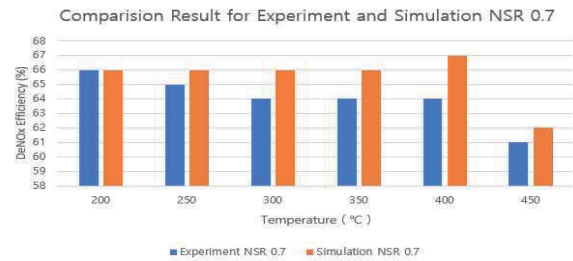
(A) Result for Experiment and Simulation NSR 1.0



(B) Result for Experiment and Simulation NSR 0.9



(C) Result for Experiment and Simulation NSR 0.8



(D) Result for Experiment and Simulation NSR 0.7  
**Fig. 5 Comparison Result Between Experiment and Simulations**

**Table 4** Optimized k-Factors in accordance with Various NSR Cases

	k <sub>NH3</sub>	E <sub>NH3</sub>
NSR 0.7	2201.48 m/s	6750.32 degC
NSR 0.8	2505.82 m/s	
NSR 0.9	3175.53 m/s	
NSR 1.0	3718.98 m/s	

최적화 결과 Rig Test값과 시뮬레이션 값 비교 시 최대 오차 1-2% 상당히 비슷한 성능을 보여주었다. 이때, 표준 당량비(NSR)가 증가할 때, NH<sub>3</sub>의 반응속도 상수 k<sub>NH3</sub> 값이 변동한다는 것을 확인하였다. Table 4와 같이 농도가 높아질수록 충돌 빈도가 높아질수록 반응물 생성은 증가한다.

## 4. 요소수 암모니아 농도 계산 및 유효충돌빈도수 고찰

#### 4.1 요소수용액의 암모니아 농도 계산

요소수용액은 32.5%의 농도를 사용하였다. 32.5%는 요소수 농도 중 어느점이 가장 낮아 차량용으로 사용된다. 또한 ISO 22241에 규정에 따라 품질 표준화가 잘 되어있고 구하기 쉬운 장점이 있다. 실험 조건에 맞추어 0.5 ml의 요소수의 전환된 암모니아 농도를 계산하였다. 당량양론 전환 농도와 실제 전환 농도를 계산하였으며, 이소시아산의 고형화 물질 전환율은 문헌을 참고하였다[15]. 요소수용액의 당량 양론 전환 농도와 실제 전환 농도는 각각의 Table 5과 6에 정리하였다.

**Table 5** Stoichiometric Ammonia Conversion Concentration (ppm)

	mol weight	Stoichiometric Thermolysis only	Stoichiometric Thermo hydrolysis
NH <sub>3</sub>	17	124,656	249,312
HNCO	43	172,000	-
CO <sub>2</sub>	44	-	322,639
H <sub>2</sub> O	18	703,344	428,049

**Table 6** Actual Ammonia Conversion Concentration (ppm)

	mol weight	Actual Thermolysis only	Actual Thermo hydrolysis
NH <sub>3</sub>	17	124,656	211,915
HNCO	43	120,400	-
CO <sub>2</sub>	44	-	322,639
H <sub>2</sub> O	18	703,344	428,049

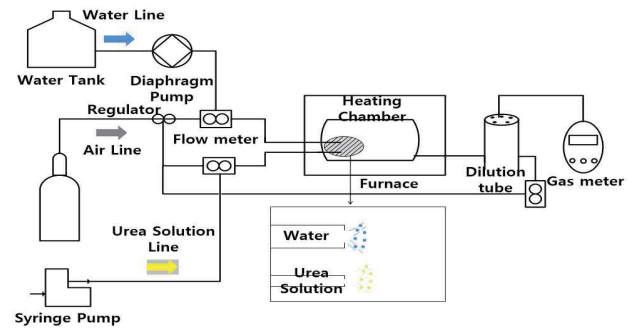
#### 4.2 반응물 간의 유효충돌빈도 고찰

요소수 분해가 완전히 일어나지 못하는 이유는 이소시아산의 높은 반응성에 의해 고형화 생성물이 생겼고 이는 배기가스 내에서 가수분해가 충분히 이루어지지 않은 것이고 기체분자 운동론에 기반한 각 분자들 간의 충돌 확률이 낮아지기 때문인 것으로 가설을 수립하였다. 이에 Eq. 5와 같은 아레니우스 식을 통해 해당 반응 특성을 고찰하였다. 화학반응에서 반응속도(k)와 온도(T)에 대한 반응식이며, 이 때 A는 충돌 빈도수이다.

$$k = Ae^{\left(-\frac{E}{RT}\right)}, \quad A = Z_{AB} = n_A n_B d_{AB}^2 \sqrt{\frac{8\pi k_B T}{\mu_{AB}}} \quad (5)$$

아레니우스 식은 반응물끼리 충분한 에너지를 가지고 있을 경우, 서로 부딪히는 유효 충돌 빈도수는 온도와 농도에 비례한다. 이에 따라 실험 변수를 유효충돌수, 농도 및 온도의 변화에 따른 암모니아 발생량을 측정하였다.

## 5. 실험



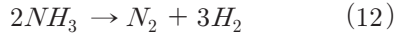
**Fig. 6** Schematic diagram of water mist experimental apparatus

실험은 Syringe Pump를 통해 0.5 ml/min의 요소수용액과 5 L/min의 공기를 혼합하여 고형화 생성물이 생기는 온도인 300-550 °C 챔버에 분사하였다. 이때, 수증기 특성에 따른 영향을 분석하기 위해 Chamber 온도에 영향을 거의 끼치지 않는 5 - 20 ml/min 유량의 수분을 분사하여 반응이 포화상태 시점에서의 암모니아 생성량을 측정하였다. 실험구성은 Fig. 6와 같다.

## 6. 실험 결과

시뮬레이션 최적화 및 리그테스트 결과 당량비 1.0과 0.7실제 농도 200ppm 차이의 DeNox 효율이 20% 떨어진 결과 값을 얻었다. 200ppm은 자연상태에서는 미약한 변화지만 20%의 효율이 난다는 것은 요소수 가수분해 반응이 이론 당량비 만큼 발생하지 않는 이유에 해당한다는 가설을 수립하였다. 이에 따라 실험을 통해 가설이 유효충돌빈도와 관련이 있음을 검증할 수 있었다. 이는 수분을 추가 공급함으로써 챔버 내부에 고형화 생성물이 물과 반응하여 이소시아산

환원 반응, 추가적으로 환원된 이소시안산이 수분과 반응하여 가수분해 반응이 활발해져 암모니아 농도가 증가하였음을 확인하였다.



Equation 12는 온도 550 °C 이상의 고온의 암모니아 열 분해 반응이다. Fig. 7 Chamber 온도 550 °C 실험의 경우 열분해 과정 시 암모니아의 농도는 0으로 측정되었다. 이는 Eq. 12와 같이 대부분의 암모니아가 질소와 수소로 완전 분해 되었다는 것을 알 수 있다. 그러나 추가적인 수분 공급 시 반응 수율과 암모니아에 대한 선택도가 증가된 것으로 판단하였다.

또한, Fig. 8에서와 같이 유량이 증가함에 따라 암모니아의 생성의 반응속도가 종속되는 것을 알 수 있다. 실험결과 20 ml/min 유량은 10 ml/min 보다 1.65배 빠르게 반응한다.

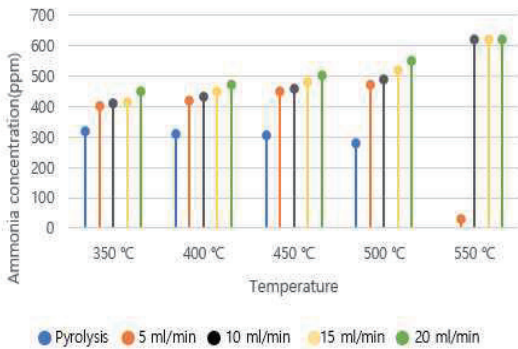


Fig. 7 Ammonia Concentration in Different Water Flow rate

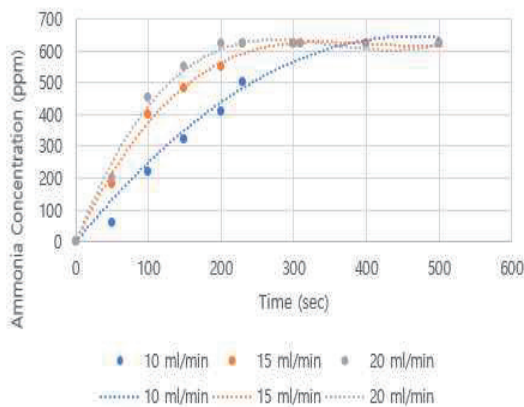


Fig. 8 Result of Reaction Rate in accordance with Water Flow Rate

## 7. 결론 및 고찰

실험 결과, 수분 공급량이 증가하면 반응속도 및 암모니아 생성량이 증가하였다. 그러나 챔버 온도 550 °C의 경우 암모니아 발생량이 상대적으로 적게 나타났다. 이는 실제 요소수 분해 시 암모니아의 선택도보다 암모니아 산화의 선택도가 높았기 때문이다. 그러나 추가적인 수분 공급으로 인하여 반응 수율과 암모니아에 대한 순간 선택도가 증가된 것으로 판단된다. 이를 통해 특정 반응온도에서의 적정 수분 공급이 미활성 가수분해 반응을 촉진할 수 있으며 이로써 최상의 암모니아 생성을 유도할 수 있음을 확인하였다. 향후 무탄소 에너지와 관련하여 다량의 암모니아를 발생시킬 수 있는 메커니즘에 대한 추가 연구를 확대 추진하고자 한다. 특히 과산화수소를 이용한 가스발생기를 통해 단열분해 반응에서 생성되는 열과 수분을 공급하고 이를 조절함으로써 정교한 암모니아 발생 메커니즘을 연구할 계획이다.

## 후 기

이 논문은 2022년 동서울대학교 산학협력단 부설 연구지원센터의 지원에 의하여 연구되었음.

## References

- [1] S. J. Ku, "International aviation greenhouse gas reduction management task", *National Assembly Research Service*, 2020 Rept, no.156, July 2020.
- [2] H. K. Lee, Y. M. Woo and M. J. Lee "The Needs for R&D of Ammonia Combustion Technology for Carbon Neutrality -Part I Background and Economic Feasibility of Expanding the Supply of Fuel Ammonia", *J.Korean Soc. Combust.* vol. 26, no. 1, pp. 59-83, 2021.
- [3] H. K. Lee, Y. M. Woo and M. J. Lee "The Needs for R&D of Ammonia Combustion Technology for Carbon Neutrality -Part II R&D Trends and Technical Feasibility Analysis", *J.Korean Soc.*

- Combust.* vol. 26, no. 1, pp. 84-106, 2021
- [4] S. I. Kim, H.G. Kwak and Y. Won, "Process Simulation of the Effect of Ammonia Co-firing on the Supercritical Boiler System for Reduction of Greenhouse Gas", *J.Korea Soc. combust.* vol. 26, no. 4, pp. 1-12, 2021
- [5] A. Hayakawa, Y. Arakawa, R. Mimoto, K. Somarathne, T. Kudo and H. Kobayashi, "Experimental investigation of stabilization and emission characteristics of ammonia/air premixed flames in a swirl combustor", *Int J. Hydrogen Energ.* vol 42, pp. 14010-14018, 2017
- [6] X. Hua, V.M. Augstin and J.B Philip, "Study on premixed combustion characteristics of co-firing ammonia/methane fuels", *Energy.* vol 140, pp. 125-135, Dec 2017.
- [7] J. W. Zhang, T.M. Ito, H.K. Ishill, S.K. Ishihara and T.S. Fujimori "Numerical investigation on ammonia co-firing in a pulverized coal combustion facility: Effect of ammonia co-firing ratio", *Fuel.* vol. 267, pp. 117~166, May 2020.
- [8] S. H. Lee, Y. Choi, C.W. Park, H.S. Kim and Y.D. Lee, "A Study on Ammonia Reforming Catalyst and Reactor Design for 10 kW Class Ammonia-Hydrogen Dual-Fuel Engine", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, vol 31, no. 4, pp. 372-379, 2020.
- [9] E. J. Heo "Ammonia Fuel Ship Report", *Korea Register*, 2021 Rept, no. 2021-ETC-01, Jan 2021.
- [10] M. B Andrias "Catalytic urea decomposition, side-reactions and urea evaporation in the selective catalytic reduction of NOx", *Ph.D. Dissertation*, ETH Zurich, Switzerland, Thesis 20813, 2012
- [11] Arrhenius Equation, <https://chem.libretexts.org>
- [12] W. H. Weinberg, "Eley-Rideal Surface Chemistry: Direct Reactivity of Gas Phase Atomic Hydrogen with Adsorbed Species", *Acc. Chem, Res.* vol. 29, no. 10, 1996
- [13] G. Schaub, D. Unruh, J. Wang and T. Turek "Kinetic analysis of selective catalytic NOx reduction (SCR) in a catalytic filter", *Chemical Engineering and Processing*, vol. 42, pp 365-371, 2003
- [14] P. D. Desai, "Thermodynamic Properties of Vanadium", *International Journal of Thermophysics*, vol. 7, no. 1, 1986
- [15] K. W. Ku, J.G. Hong, C.W. Park, K.Y. Chung and S.H. Sohn, "Effects of Various Factors on the Conversion Efficiency of Urea Solution in a Urea Selective Catalytic Reduction System", *Energy Fuel*, Vol. 28, no. 9, pp. 5959-5967, Aug 2014.