

요소용액을 이용한 배연가스내의 질소산화물 제거 연구

임영일 · 유경선 · 정상문 · 김상돈[†] · 이정빈* · 최병선*

한국과학기술원 화학공학과
*전력연구원 수화력발전연구실
(1996년 2월 16일 접수, 1996년 9월 6일 채택)

A Study on NO_x Removal from Flue Gas by Using Urea Solution

Young Il Lim, Kyung Seun Yoo, Sang Mun Jeong, Sang Done Kim[†], Jung Bin Lee* and Byung Sun Choi*

Department of Chemical Engineering, KAIST, Taejeon 305-701, Korea

*Power Generation Research Lab., Korea Electric Power Research Institute, Taejeon 305-600, Korea

(Received 16 February 1996; accepted 6 September 1996)

요 약

Pilot scale 연소로에서 반응 온도, NSR(Normalized Stoichiometric Ratio), 기상 첨가제, 액상 첨가제, SO₂ 가스의 존재 유무가 요소용액에 의한 NO_x 환원 반응에 미치는 영향을 고찰하였다. 요소용액과 암모니아에 의한 최대 NO_x 환원율은 각각 970 °C 와 950 °C에서 나타났다. NSR이 증가할수록 NO_x 전환율은 증가하였으며 NSR 2.0 이상에서 일정한 전환율을 유지하였다. 알콜 첨가제의 농도가 증가할수록 최적 온도와 최대 NO_x 저감률은 감소하였다. 기상 첨가제(C₂H₆, CO)의 농도 증가에 따라 NO_x 저감이 나타나는 온도영역(temperature window)은 넓어지고, 최적 반응 온도는 감소하였다. 배가스내의 SO₂ 가스는 NO_x 저감률에는 큰 영향을 주지 않았으나 요소용액과 반응하여 760 °C 부근에서는 SO₂ 농도가 저감됨을 관찰하였다.

Abstract—The effects of reaction temperature, NSR(Normalized Stoichiometric Ratio), gas additives, liquid additives, and the presence of SO₂ gas on the reduction of NO_x with urea solution have been determined in a pilot scale combustor. The maximum reduction conversions of NO_x by urea and ammonia exhibit at 970 °C and 950 °C, respectively and NO_x reduction increases with increasing NSR up to 2.0. The optimum temperature and maximum conversion of NO_x reduction decrease with increasing the concentration of the alcohol additives. Temperature window for the range of NO_x reduction is widened and the optimum temperature decreases with an increase in the concentration of gas additives. The presence of SO₂ gases in flue gas slightly reduces the NO_x reduction and ammonium salt is formed from the reaction between SO₂ and ammonia from the decomposition of urea.

Key words: NO_x Reduction, Urea, SNCR, Additive

1. 서 론

질소산화물(NO_x)은 NO, NO₂, NO₃, N₂O, N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅ 등이 있고, 대기 중에는 N₂O(Nitrous Oxide), NO(Nitric Oxide), NO₂(Nitrogen Dioxide) 등이 존재한다. 질소산화물에 의한 환경 오염은 주로 산업 활동에 의한 좁은 영역의 높은 농도에 의하여 발생되며 인간에게는 호흡기 질환을 유발하고, 산성비의 원인이 되어 식물의 성장 속도를 늦추며 고사를 발생하게 한다.

NO_x는 1300 °C 이상의 고온에서 연소용 공기로 주입되는 N₂와 O₂의 반응에 의하여 생성되는 thermal NO_x, 연료 중의 질소에 의해 발생되는 fuel NO_x, 그리고 화염반응 영역에서 탄화수소의 중계에 의해 생성되는 prompt NO_x로 분류된다. 이러한 고정 오염원으로부터의 NO_x 배출 방지 대책은 저질소 연료를 사용하는 방법, 연소 기술

개선에 의한 NO_x 발생 억제 방법 그리고 배연 탈질 기술 등이 있다 [1, 2]. 저질소 함유 연료를 사용할 경우 NO_x 저감 효과가 크지 않으므로 NO_x 저감법으로는 크게 고려되지 않고 있다. 연소 기술 개선에 의한 NO_x 저감 방법은 저과잉공기 연소, 고온 체류시간 단축, 연소 온도 저하, 배가스 재순환, 다단 연소 등 많은 연구가 진행되었고 비교적 적은 비용으로 NO_x를 저감할 수는 있으나 제한된 NO_x 저감률로 인하여 향후 강화되는 NO_x 규제에 대한 능동적인 대처로서는 부적절한 것으로 알려져 있다. 배연 탈질 기술로는 선택적 촉매 환원법(SCR)이 널리 알려져 있으나 높은 장치비와 유지비로 인하여 최근 선택적 무촉매 환원법(SNCR)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

선택적 무촉매 환원법은 로내에 암모니아나 요소용액을 직접 분사하여 NO_x를 질소와 수증기로 전환시켜 제거하는 방법이다[3-6]. NO_x 저감률은 930-980 °C 영역의 좁은 온도 범위에서 60-80 % 수준

으로 선택적 촉매 환원법보다는 비교적 낮지만 설치비와 유지비가 적고, 설치 기간이 매우 짧으며, 기존 설비의 변경이 크게 요구되지 않으므로 노후된 연소 설비에서 발생하는 NO_x 저감에 보다 효과적이다. 반응 온도 영역과 저감률은 첨가제의 종류와 배가스 조성에 따라서 변화하는 것으로 알려져 있다[1, 7, 8].

본 연구에서는 50 kW_{th} LPG 가스 버너 연소로에서 조업 온도, 주입되는 요소용액의 NO_x 에 대한 양론비(NSR), 배가스 조성, 그리고 요소용액에 혼합된 기/액상 첨가제가 NO_x 환원 반응 특성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험장치

Fig. 1은 요소 환원제 분사 노즐이 장착된 pilot scale 연소로이다. 하단은 가스 버너로서 LPG를 연료로 사용하였으며, 상온기준으로 50-100 Nm³/hr 유량에 35-75 kW_{th}의 용량을 갖는다. 상단의 재질은 부식성에 강한 stainless steel 304이며, 직경 0.20 m, 높이 3.6 m로서 요소용액 분사가 가능하도록 분사각도 70°인 이류체 광각 분사노즐(Setup No. 26B, Spray System Korea)이 장착되었다. 연소로 외벽은 Fiberflex를 사용하여 0.2 m 두께로 단열하였다. 연소로의 온도는 가스 버너에 장착된 PID 온도 조절기에 의한 연료량 제어로 조절되었다. 요소용액은 압력 조절계가 장착된 가압 용기에 담겨져 노즐로 주입되었으며 주입되는 요소의 양은 액체 유량계를 이용하여 측정하였다. 반응기내에서 유입되는 배가스와 노즐분사 유체와의 혼합이 용이하도록 노즐은 로내에 연직 하방으로 설치하였으며 공기를 동시에 주입하는 이류체 노즐을 사용하였다. 반응 영역의 온도와 NO 농도를 측정하기 위하여 축방향과 반경방향으로 K-type의 thermocouple과 sampling probe를 설치하였다.

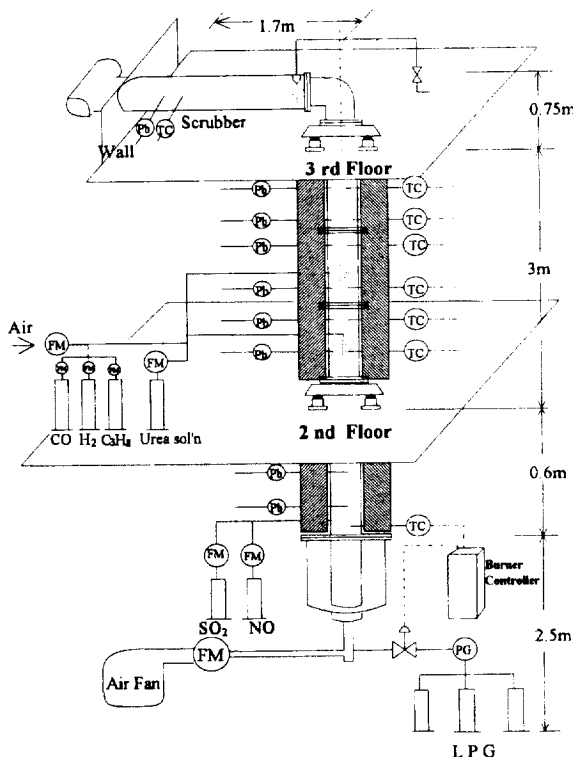


Fig. 1. Schematic diagram of apparatus.

FM: Flowmeter, PG: Pressure gage, Pb: Probe, TC: Thermocouple, ▨: Insulator

2-2. 실험방법

가스 버너를 이용하여 원하는 반응 온도에서 연소로가 정상 상태에 이르면 Stack Gas Analyzer(정 엔지니어링)를 이용하여 로내에서 발생하는 thermal NO_x 의 농도를 측정하고 원하는 NO_x 농도가 되도록 20 vol%의 NO/N_2 혼합 가스를 주입한다. NO_x 농도가 정상 상태에 이르면 이류체 분사 노즐을 이용하여 요소용액과 공기를 함께 분사하고 축방향, 반경방향 NO_x 농도를 측정한다. 액상 첨가제로는 methanol, ethanol을 사용하였고 기상 첨가제로는 일산화탄소, 프로판을 사용하였다. 기상 첨가제는 노즐에서 분사되는 공기와 혼합하여 주입하였으며 액상 첨가제는 요소용액에 혼합하였다.

배연가스내의 NO 농도는 water cooler를 이용하여 배가스내의 수분을 제거한 후 분석기내의 NO cell에서 정전위 전해법으로 측정된다. NO 의 농도는 컴퓨터 모니터와 분석기에 내장된 프린터로 출력된다.

2-3. 반응기 특성

요소용액 주입에 의한 배가스의 NO_x 의 저감실험을 위하여 제작된 pilot-scale 흐름 반응기는 축방향과 반경방향의 온도분포와 속도분포를 갖게 된다. 이러한 반응기내의 온도와 속도 분포는 반응기 크기가 클수록 커지며 반응기 효율에 보다 큰 영향을 주는 인자가 된다. 그러므로 이러한 온도와 속도변화에 대한 정보는 반응특성을 해석하는데 중요한 자료가 된다.

Fig. 2는 상온 15 °C에서 air velocity meter(Model441, Kurz Instruments Inc.)를 이용하여 측정한 선속도를 950 °C로 환산하여 나타낸 것이다. 이 흐름의 평균 유속은 3.2 m/s이며 레이놀즈수가 4500으로 난류흐름 영역에 놓이게 된다. 유체흐름곡선은 거의 fully developed flow pattern을 유지하고 있다. 또한 backmixing이 거의 없는 흐름이고 요소용액 환원제의 분사시 배연가스와 혼합특성이 반응성에 큰 영향을 미친다.

Fig. 3은 요소용액 분사시 축방향, 반경방향 온도 분포이다. 분사점은 독립 분사노즐의 팁에서 10 cm 하단으로 정하고 이 위치에서 half of center의 thermocouple에서 측정된 온도를 주입온도(injection point temperature)로 설정하였다. 산소 존재하의 NO 제거반응은 높은 온도에서 매우 빠른 반응으로 950 °C에서 반응시간 \approx 0.04 s.[9]이며 반응에 필요한 라디칼은 대부분 주입온도에서 순간적으로 생기기 때문에 주입온도를 반응온도로 볼 수 있다. 하지만 낮은 온도에서는 좀더 긴 체류시간(0.2 sec at 750 °C)이 필요하고 따라서 주입온도와 반응

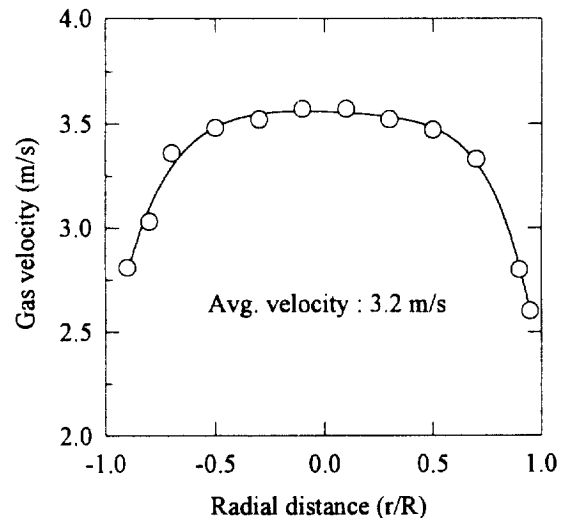


Fig. 2. Radial gas velocity profile.

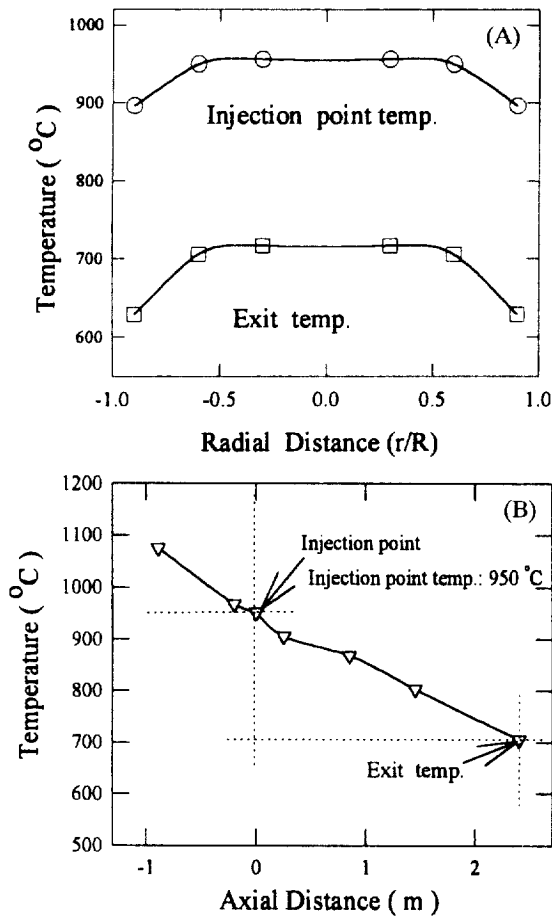


Fig. 3. (A) Radial temperature profile at nozzle injection point and reactor exit. (B) Axial temperature profile in flow reactor.

온도는 다소 차이가 있으리라 생각된다. 실제 공정이나 pilot-scale의 반응기는 축방향 온도 기울기를 갖게 되는데 본 반응기도 100 °C/m (or 200 °C/sec)의 평균냉각속도로 온도가 하락된다. 이러한 냉각속도는 유속이 빨라지면서 작아지고 주입온도가 높을 때 커진다.

분사온도가 950 °C일 때 2.5 m 상단의 출구온도는 700 °C로 하강하고, 요소용액 주입점에서는 온도냉각속도가 120 °C/m로서 평균냉각속도보다 크다. 이는 요소용액 분사에 의한 순간적 온도하강에 따른 것으로 0.5 m 상단부터는 평균냉각속도를 되찾는다. 반경방향의 온도분포는 속도분포와 유사하며 평균농도는 half of center 지점에서 보여주고 있다.

Fig. 4는 요소용액을 분사하지 않고 상온에서 송풍기를 통해 공기만 보내면서 NO를 주입하였을 때 분산관 상단의 NO_x 농도를 보여준다. 분산관 상단의 농도가 축방향으로 거의 변화가 없으며 반경방향으로도 큰 차이점을 보이지 않으므로 요소용액 분사점에서 NO_x는 일정하게 유입됨을 알 수 있다. 분산관전체의 높은 NO_x 농도를 보여주는 것은 NO_x 주입관이 sampling probe와 매우 근접해 있기 때문이다.

Fig. 5는 초기 NO_x 농도가 200 ppm이고, 온도 950 °C이며, NSR=2.0으로 요소용액을 공기와 질소로 각각 분사하였을 때, 반경방향으로 NO_x 농도를 측정된 것이다. 중앙부분이 다소 높은 농도를 보이는 이유는 노즐분사팁이 중앙에 위치하여 높은 액적밀도를 갖게 되고, 원뿔형태로 분사되는 액적속의 요소분자가 충분히 분해되지 못한 상태에서 상승하기 때문이다. 반응기벽에서 다시 NO_x 농도가 증가하는 이유는 요소분자가 충분히 분해되어 상승하지만 낮은 요소분자 농도로 인한 것이다. 따라서 액적의 밀도도 적당하고 충분한 분해가

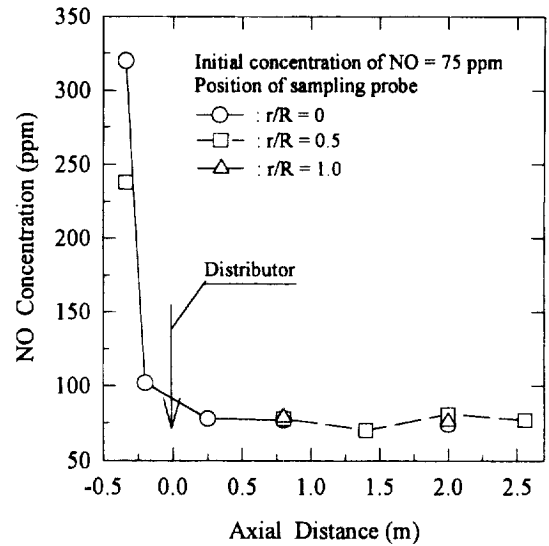


Fig. 4. Axial concentration profile of NO.

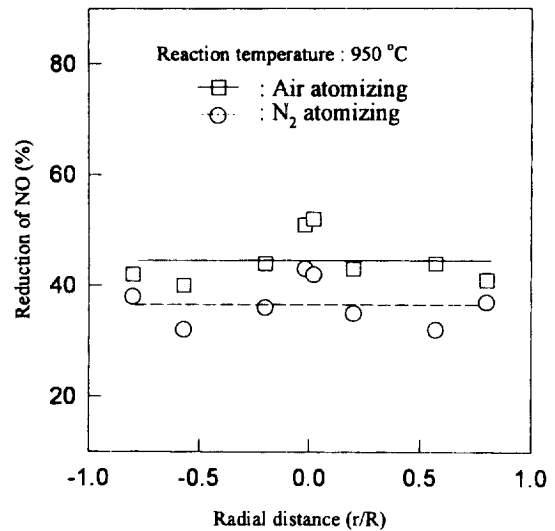


Fig. 5. Radial concentration profile of NO.

가능한 half of center에서 가장 낮은 NO_x 농도를 보여준다. 연직하방향의 노즐은 단일노즐로서는 본 반응기의 fully developed flow와 분사액적간의 혼합특성을 향상시키고 혼합사각지대를 최소화하는 노즐배열임을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 요소용액에 의한 NO_x 저감 반응

Fig. 6은 반응온도에 따른 암모니아와 요소용액에 의한 NO_x 저감률을 나타내었다. 요소용액의 경우 반응 온도 970 °C 영역까지 반응 온도가 증가할수록 NO_x 저감률은 증가하였으며, 970 °C 이상에서는 다시 감소하였다. 암모니아를 사용한 경우에도 반응 온도에 따른 NO_x 저감률 변화는 거의 유사하였으며 최대값을 보이는 온도만이 950 °C 영역으로 감소하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 암모니아와 요소용액을 1:1 혼합하여 환원제의 총 NSR이 2.0인 경우는 순수한 두 환원제의 중간값을 유지하였다. 모든 환원제에서 최대값을 보이는 이유는 NO_x 저감반응에 참여하던 환원제가 고온 영역으로 가면서 산화반응이 촉진되어 NO의 생성을 증가시키기 때문이다. 또한

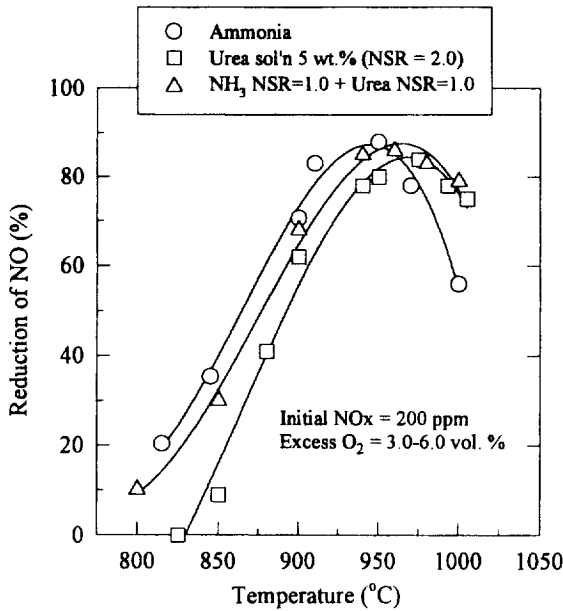


Fig. 6. Effect of temperature on the reduction of NO with a variation of NH₃/urea mole ratio at the same normalized stoichiometric ratio(NSR) of 2.0.

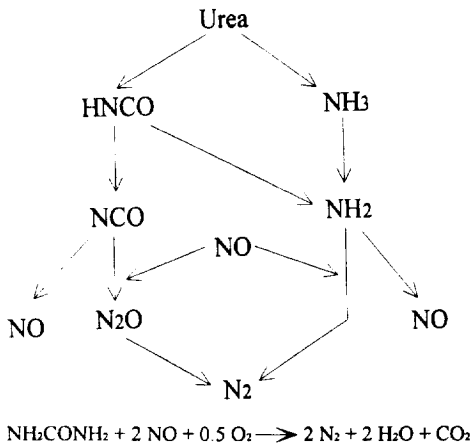


Fig. 7. Reaction scheme of NO reduction by urea reductant.

최적 환원 반응 온도의 차이는 두 환원제의 반응 경로가 다르기 때문에 나타나는 것으로 이해되고 있다. 본 연구에서는 반응 후 생성되는 N₂O에 대해서는 고려하지 않았다. 그러나 Jodal 등[7]은 초기 NO 농도가 400-500 ppm일 때 반응기 출구로 나오는 N₂O의 농도는 NH₃가 환원제로 사용된 경우 최대 20 ppm, 요소가 환원제로 사용된 경우는 최대 80 ppm이라고 발표하였다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 암모니아는 NH₃ 라디칼로 분해되어 반응하지만 요소의 경우는 NH₃와 HNCO로 분해되어 복잡한 환원 반응 경로를 갖으며 진행된다 [9]. 요소의 분해에 의하여 생성된 HNCO는 반응 온도 영역이 NH₃보다 높기 때문에 요소용액을 환원제로 사용하는 경우 암모니아보다 높은 온도에서 최대값을 보이게 된다.

Fig. 8은 반응 온도 변화가 NO와 NH₃ 전환율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에 표시된 암모니아는 주입된 요소에 포함된 NH₃기를 모두 암모니아로 환산하여 계산한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 암모니아는 반응 온도 증가에 따라서 전환율이 증가되고 1000°C 이상에서는 미반응 암모니아(slip-NH₃)가 거의 나타나지 않았다. Jodal 등[10]의 결과도 본 실험결과와 유사한 경향을 보이고 있으며

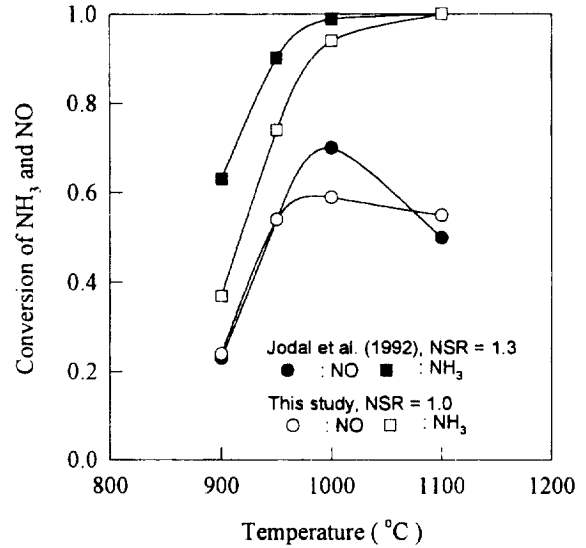


Fig. 8. Effect of reaction temperature on the conversion of NH₃ and NO at urea normalized stoichiometric ratio(NSR) of 1.0.

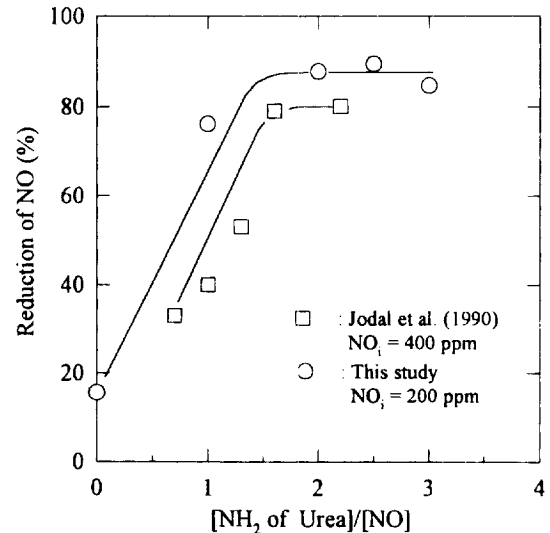


Fig. 9. Effect of normalized stoichiometric ratio(NSR) on the reduction of NO at 950 °C at 4 vol% O₂.

NH₃와 NO 전환율의 차이는 연소로의 크기와 연소 조건(배가스 조성 및 과잉 공기율, 온도분포 등)의 차이 때문이라고 생각된다. NO의 전환율은 Fig. 2의 결과와 유사하여 NH₃의 전환율이 증가함에 따라 증가하고 NH₃ 전환율이 1.0에 이르면 NO 전환율은 다시 감소한다. 이러한 사실은 1000°C 이상에서는 분해된 암모니아가 NO의 환원반응에 참여하지 못하고, 자신의 산화를 통한 NO 생성이 이루어짐을 보여주고 있다.

Fig. 9는 반응 온도 950°C에서 요소용액의 NSR의 변화가 NO, 저감률에 미치는 영향을 나타낸 것이다. NSR 2.0까지 NO, 제거율이 급격히 증가하다가 2.0 이상에서는 일정해지는 것을 보여주고 있으며, Jodal 등[5]의 결과와 거의 일치하고 있다. 요소 분자 1몰은 2몰의 NO를 N₂로 환원시킬 수 있으므로 양론비로는 NSR=1.0일 때 100%의 NO, 제거율을 기대할 수 있다. 그러나 요소용액과 배연가스의 반응은 30여개의 화학종에 의한 100가지 이상의 부반응이 진행되고[11], 배출가스내 NO_x 농도가 희박하여 환원제와의 충분한 충돌 빈수를 위해서는 NSR=1.0 이상의 요소용액이 필요하리라 생

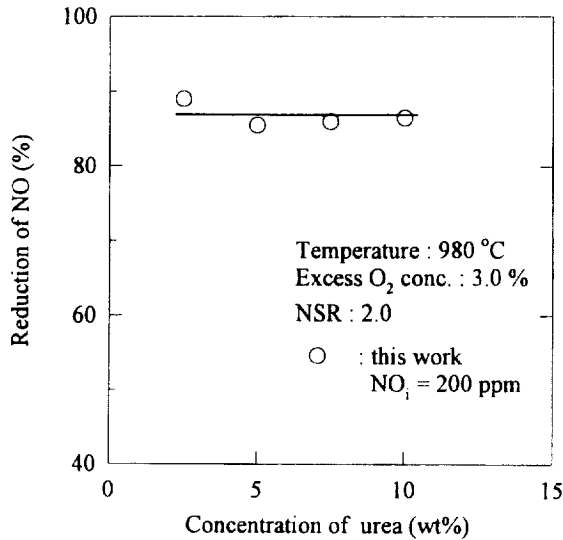


Fig. 10. Effect of urea concentration on the reduction of NO at 980 °C.

각된다.

Fig. 10은 반응 온도 980 °C, NSR=2.0에서 요소용액의 농도 변화가 NO, 저감률에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 동일한 NSR값은 요소용액의 주입량을 조절함으로써 유지하였고 분사 공기의 양은 일정하게 유지(35 l/min: 전체유량의 3.76%)시켰다. 그러므로 2.5 wt% 요소용액을 사용하는 경우 10 wt% 요소용액보다 물의 양이 4배 증가하여 상대적으로 액적수와 액적 크기가 증가될 것으로 예상된다. 그러나 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 2.5-10% 요소용액 농도 변화에 따른 NO, 저감률의 변화는 크게 나타나지 않았으며, 30 wt%의 요소용액을 이용한 Jodal 등[7]의 결과와도 잘 일치하였다. 하지만 특정한 크기의 반응기에 알맞는 요소용액 농도는 존재하며, 혼합효과를 최대화하기 위한 최적 농도의 선택은 중요한 문제이다.

3-2. 액상 첨가제의 영향

Fig. 11은 [alcohol]/[NO] 변화에 NO, 저감률의 변화를 반응온도 변화에 따라 나타낸 것이다. 반응 온도 850 °C에서는 알코올의 농도가 증가할수록 NO, 저감률이 지속적으로 증가하지만, 950 °C에서는 알코올의 농도 증가에 따라서 감소한다. 알코올 농도에 따른 NO, 저감률의 변화는 에탄올이 메탄올보다 큰 이유는 에탄올의 탄소수가 2배 많으므로 CH_3 radical의 생성 또한 두 배로 증가하기 때문이다. 낮은 반응 온도에서 알코올 첨가에 의하여 NO, 저감률이 증가하는 것은 알코올의 분해에 의하여 생성되는 OH 라디칼이 요소의 분해에 의하여 생성되는 HNCO를 쉽게 NCO로 전환하고 NCO의 산화에 의하여 생성되는 NO_x 를 감소시키기 때문이라고 생각된다. 그러나 고온에서는 주입된 알코올에 의하여 생성된 CH_3 라디칼에 의하여 HCN의 생성이 증가하고 그에 따른 prompt NO, 생성이 증가하기 때문에 NO, 저감률은 감소하게 된다. 따라서 메탄올이나 에탄올 같은 알코올류는 반응 온도가 높은 영역에서는 효과적인 첨가제가 되지 못한다.

3-3. 기상첨가제의 영향

Fig. 12는 반응 온도 변화에 따른 NO, 저감률의 변화를 분사 공기에 포함된 CO 농도 변화에 따라서 도시한 것이다. CO 농도를 증가 시킴에 따라서 최적의 전환율을 보이는 반응 온도가 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 반응기내의 CO 주입은 wet CO oxidation mechanism인 반응식 (1)-(3)을 통하여 OH와 H 라디칼의 증가를 가져오게 된다.

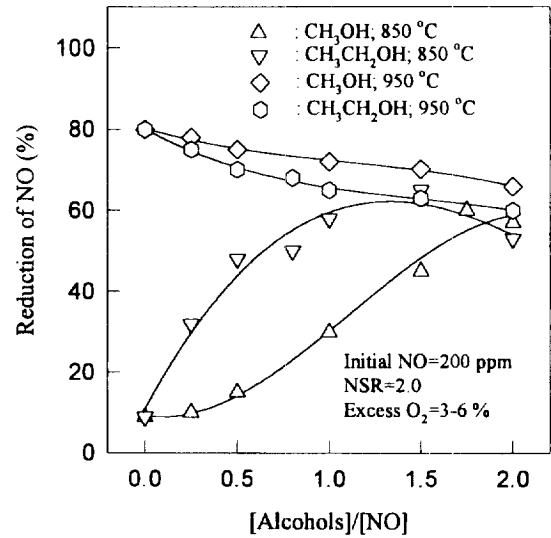


Fig. 11. Effect of [alcohols]/[NO] on the reduction of NO with a variation of reaction temperature.

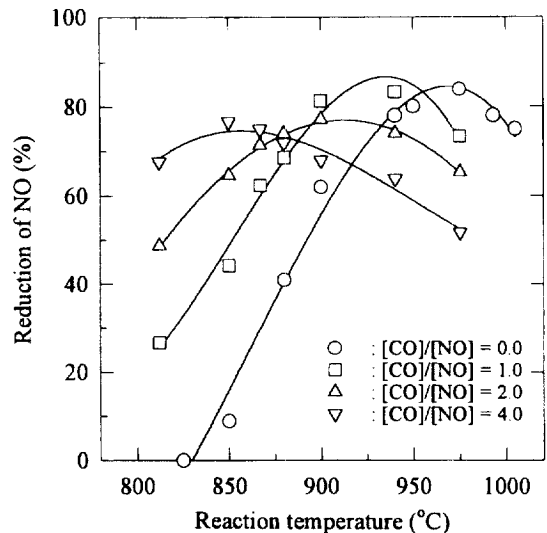


Fig. 12. Effect of reaction temperature on the reduction of NO with a variation of [CO]/[NO].



증가된 OH와 H 라디칼은 반응식 (4)와 (5)를 통하여 NO 제거 물질인 NCO 혹은 NH_2 라디칼을 생성하여 보다 저온에서 NO를 저감하게 된다.



그러므로 일산화탄소가 다량 존재하는 공정에서 요소용액을 사용하는 경우, 보다 넓은 온도 영역에서도 50% 이상의 NO 저감률을 얻을 수 있다[12].

Fig. 13은 반응 온도 변화에 따른 NO, 저감률의 변화를 분사 공기내의 프로판(C_3H_8)의 존재 유무에 따라 도시한 것이다. 요소용액 없이 프로판만을 이용하는 경우 NO, 저감률은 750 °C에서 30%를 나

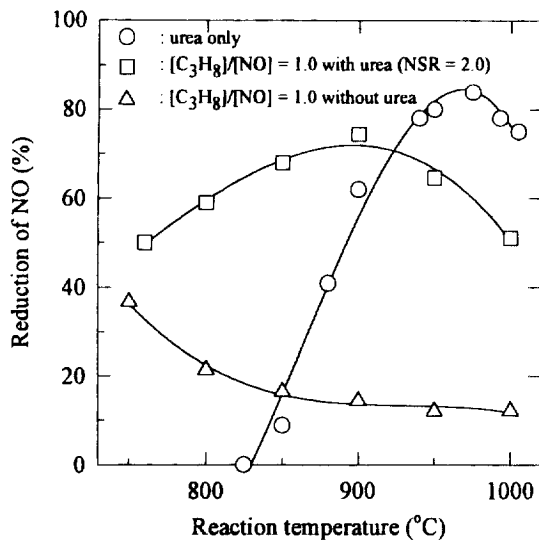


Fig. 13. Effect of reaction temperature on the reduction of NO with a variation of $[C_3H_8]/[NO]$ at urea NSR=2.0.

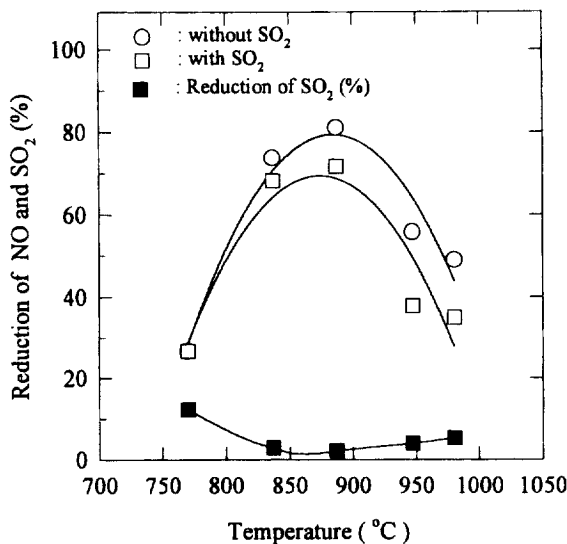
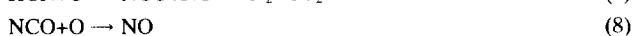
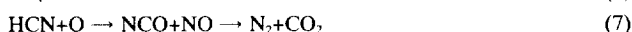
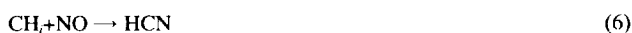


Fig. 14. Effect of reaction temperature on the reduction of NO and SO_2 with the reductants $[CO]/[NO]=1.0$ and $[CH_3OH]/[NO]=0.25$ at NSR=2.0, $SO_2=478$ ppm and $NO=200$ ppm.

타내고 900 °C에서는 15 %로 감소하였으며, 900 °C 이상에서는 공기만을 이용한 경우보다 낮은 저감률을 나타내었다. 이것은 주입된 프로판에 의하여 생성된 CH_3 라디칼이 반응식 (6)과 (7)에 의한 NO 저감 경로에서 온도가 증가할수록 반응식 (8)과 같은 NO 생성 경로로 이동하기 때문이다.



요소용액과 프로판 가스($[C_3H_8]/[NO]=1.0$)를 동시에 주입한 경우 최대의 NO 저감률을 보이는 온도가 970 °C에서 900 °C까지 감소하였으며 반응 온도 변화에 따른 NO 저감률의 변화는 완만하게 되었다. 최적 온도의 감소는 Duo 등[4]이 언급한 바와 같이 순수한 요소의 분해 반응이 프로판에 의하여 보다 낮은 온도에서 쉽게 라디칼이 형성되기 때문이다. 그러나 프로판의 존재는 고온 영역에 따라 NO,

의 생성을 촉진시키고, 요소용액 또한 반응 온도 증가에 따라 산화 반응이 증가하므로 900 °C 이상에서는 NO 저감률이 감소하게 된다.

3-4. SO_2 가스가 NO 저감률에 미치는 영향

Fig. 14는 SO_2 가스의 존재가 반응 온도에 따른 NO 저감률의 변화에 미치는 영향을 보여주고 있다. 낮은 온도 영역에서는 NO 저감률에 대한 SO_2 가스의 영향이 거의 없었고, 주입된 SO_2 의 농도가 감소하였으며, 고온에서는 NO 저감률이 다소 감소하였다. 낮은 온도 범위에서는 주입된 요소 환원제의 일부만이 NO와 반응하여 CO_2 와 N_2 로 전환되고 대부분이 암모니아 형태로 전환되어 방출된다. 이때 생성된 암모니아는 수분의 존재하에 SO_2 와 반응하여 NH_4HSO_4 또는 $(NH_4)_2SO_4$ 를 형성하게 되고 SO_2 의 농도 감소가 나타나게 되는 것으로 생각된다[13].

4. 결 론

- (1) 요소의 NSR 2.0까지 NO 저감률은 급격히 증가하고 2.5 이상에서는 일정하게 되었다.
- (2) 요소용액을 환원제로 사용하는 경우 반응 온도 970 °C 영역에서 최대값을 보이고 암모니아의 경우 최대값을 보이는 온도가 20 °C 감소하였다.
- (3) 알코올(CH_3OH , C_2H_5OH)를 첨가제로 사용하는 경우 알코올의 농도가 증가할수록 최적 온도와 최대 전환율은 감소하였다.
- (4) 노즐 분사 기체로 환원제없이 공기와 LPG 연료를 동시에 주입하였을 때, 750 °C에서 30 % NO 저감률을 보이고 반응 온도 증가에 따라 NO 저감률은 지속적으로 감소하였다.
- (5) 기상 첨가제(C_3H_8 , CO)의 농도를 증가시키에 따라 최적 반응 온도는 감소하고 NO 저감이 나타나는 temperature window는 넓어졌다.
- (6) 배가스내에 존재하는 SO_2 는 NO 저감에는 큰 영향을 주지 않았고 요소분해에 의하여 방출되는 암모니아와 반응하여 ammonium salt를 형성한다.

참고문헌

1. Azuhata, S., Akimoto, H. and Hishinuma Y.: *AIChE J.*, **28**, 7 (1982).
2. Smith, D.J.: *Power Engineering International*, **April**, 21(1994).
3. Caton, J. A. and Siebers, D. L.: *Combust. Sci. and Tech.*, **65**, 277 (1989).
4. Duo, W., Dam-Jonhson, K. and Ostergaard, K.: *Can. J. of Chem. Eng.*, **70**, 1014(1992).
5. Lyon, R. K.: *Int. J. Chem. Kinet.*, **8**, 315(1976).
6. Lyon, R. K. and Hardy, J. E.: *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **25**, 19 (1986).
7. Jodal, M., Nielsen, C., Hulgaard, T. and Dam-Johnson, K.: 23rd Symposium(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, 237 (1990).
8. Leckner, B., Karlsson, M., Dam-Johansen, K., Weinell, C. E., Kilpinen, P. and Hupa, M.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **30**, 2396(1991).
9. Lee, J. B., Choi, B. S., Lim, Y. I. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. Japan*, **29**, 620(1996).
10. Pachaly, R., Hofmann, J. E. and Sun, W. H.: Air and Waste Management Association Annual Meeting, Vancouver, B.C. Canada, June, 16(1991).

11. Jodal, M., Lauridson, T.L. and Dam-Johansen, K.: *Environmental Progress*, **11**, 296(1992).
12. Miller, J. A. and Bowman, C. T.: *Prog. Energy Combust. Sci.*, **15**, 287(1989).
13. Suhlmann, J. and Rotzoll, G.: *Fuel*, **72**, 175(1993).
14. Lyon, R. K.: Hydrocarbon Processing, Environmental Management, October(1979).