

K-Mn/Fe₂O₃ 촉매 상 H₂O₂ 분해에 의한 건식산화제 생성 및 모사 배가스 유량에 따른 NO 산화공정

최희영 · 신우진 · 장정희 · 한기보[†]

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터
대한민국 경기도 용인시 처인구 백암면 고안로 51번길 175-28, 449-863
(2017년 5월 29일 접수: 2017년 6월 11일 수정: 2017년 6월 28일 채택)

A study on production of dry oxidant by decomposition of H₂O₂ on K-Mn/Fe₂O₃ catalyst and NO oxidation process according to simulated flue gas flow

Hee Young Choi · Woo Jin Shin · Jung Hee Jang · Gi Bo Han[†]

*Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering, 175-28, Goan-ro 51beon-gil,
Baegam-myon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 449-863, Republic of Korea
(Received May 29, 2017; Revised June 11, 2017; Accepted June 28, 2017)*

요약 : 본 연구에서는 배가스 내 존재하는 오염물질인 NO의 처리효율을 증대시키기 위하여 NO 산화 공정을 연구하였으며, 강력한 산화력의 건식산화제를 제조하는 방법으로 H₂O₂ 촉매분해가 도입되었다. H₂O₂ 분해공정 상에서 적용 가능한 K-Mn/Fe₂O₃ 불균일계 촉매가 제조되었으며, 이들이 가지는 물리화학적 특성이 H₂O₂ 분해반응에 미치는 영향이 조사되었다. 제조된 건식산화제는 NO가 포함된 모사 배가스를 처리하기 위한 NO 산화공정에 적용되었으며, 다양한 모사 배가스의 유량(5, 10, 20 L/min)에서 약 100% 가까운 NO 전환율을 확인 하였다.

주제어 : H₂O₂, 촉매전환, NO 산화, 건식산화제, 운전조건

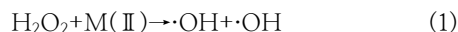
Abstract : In this study, NO oxidation process was studied to increase the NO treatment efficiency of pollutant present in exhaust gas. H₂O₂ catalytic cracking was introduced as a method of producing dry oxidizing agents with strong oxidizing power. The K-Mn / Fe₂O₃ heterogeneous catalysts applicable to the H₂O₂ decomposition process were prepared and their physico-chemical properties were investigated. The prepared dry oxidant was applied to the NO oxidation process to treat the simulated exhaust gas containing NO, NO conversion rates close to 100% were confirmed at various flow rates (5, 10, 20 L/min) of the simulated flue gas.

Keywords : H₂O₂, catalytic conversion, NO oxidation, dry oxidant

[†]Corresponding author
(E-mail: gbhan@iae.re.kr)

1. 서론

NO_x는 대표적인 대기오염물질로서 석탄, 석유 등과 같은 화석연료의 연소과정을 통해 생성 후 대기 중으로 배출된다[1]. 기존 많은 연구자들이 NO_x를 효율적으로 제거하기 위한 다양한 연구가 수행 되었으며, 비교적 널리 적용되고 있는 기술로서 선택적 촉매환원법(selective catalytic reduction, SCR)이 있다. 그러나 선택적 촉매환원공정은 촉매가 적용된 가운데, 공정효율을 증대시키기 위하여 높은 온도가 필요하며, 이로 인해 높은 설치 및 운전비용이 소요되어 경제성이 낮다[2]. 선택적 촉매환원법이 적용된 공정에서는 높은 온도가 필요한 이유로서 비교적 전환이 어려운 NO가 존재하기 때문이며, 이를 비교적 용이하게 처리하기 위하여 NO를 NO₂ 등으로 산화시켜주는 공정이 추가로 요구된다. 본 연구에서는 NO를 NO₂ 전환하기 위한 산화공정에 이용 가능한 건식산화제를 제조할 수 있는 H₂O₂ 촉매분해에 대한 연구가 수행되었다. 최근 다양한 연구결과에서 전이금속인 Fe 및 Zr 등을 주요성분으로 포함하는 불균일계 촉매 상 H₂O₂ 분해반응을 통하여 건식산화제를 제조할 수 있다는 연구결과가 다수 보고된 바 있다[3-8]. 또한, H₂O₂ 촉매분해반응은 비교적 낮은 온도에서 진행됨으로써 운전온도가 낮아지며, 제조된 건식산화제는 산화공정에 적용될 경우, 낮은 온도에서 높은 산화효율을 얻을 수 있는 것으로 기존 문헌을 통하여 확인 하였다[3-5]. 간단한 설비로 저온에서 고효율로 운전 가능한 공정을 구현 가능하며, 이를 통하여 기존 선택적 촉매환원법이 적용된 NO 처리공정이 가지는 단점을 보완할 수 있을 것으로 사료된다[9-10]. 본 연구에서는 기존 공정으로 처리가 어려운 배가스 내 NO를 전환시키기 위하여 NO 산화공정의 도입과 동시에 이에 활용 가능한 건식산화제를 생성시키기 위하여 H₂O₂ 촉매분해 공정이 적용되었다. 따라서 H₂O₂ 촉매분해공정 상 K-Mn/Fe₂O₃ 촉매를 제조 후 적용함으로써 이들이 지니는 물리화학적 특성이 H₂O₂ 촉매분해에 미치는 영향이 조사되었으며, 동시에 제조된 건식산화제를 5, 10, 20 L/min 모사 배가스의 유량별 NO 산화공정에 주입함에 따라 얻어진 NO 전환특성이 조사 되었다. 촉매를 이용한 H₂O₂ 분해를 통한 건식산화제 생산 반응식은 식 (1)에 나타내었으며, 이를 통한 NO 산화 반응식을 (2)~(5)에 나타내었다[11-13].



2. 실험방법

2.1. K-Mn/Fe₂O₃ 촉매 제조

Fig. 1은 Fe₂O₃를 지지체로 사용된 가운데 K-Mn계 활성물질이 담지된 촉매에 대한 제조과정을 나타낸 것이다. 우선 지지체인 Fe₂O₃를 제조하기 위하여 전구체인 Fe₂SO₄·7H₂O를 적당량으로 조절하여 교반과 동시에 증류수에 용해시킨 후 침전제인 NH₄OH 수용액을 pH 값이 약 9-10에 도달할 때까지 주입시킴으로써 침전과정을 수행하였다[14]. 이 때 얻어진 침전물을 상온에서 4 hr 동안 숙성시킨 후 110 °C에서 12 hr 건조시켜 고체 생성물을 회수하였으며, 4 hr 동안 700 °C에서 소성시켰다. 얻어진 Fe₂O₃ 지지체는 증류수에 혼합하여 슬러리 상태로 만든 후 활성물질의 전구체인 MnC₂H₂O와 첨가제 전구체인 KOH 수용액을 적당량으로 동시에 투입하였다. 이 때 NH₄OH 수용액을 전구체+담체 수용액에 투입함으로써 pH 값이 9-10 범위에 도달하게 하였다. 이후 생성된 침전물은 밤새 110 °C에서 건조시킨 후 약 4 hr 동안 700 °C에서 소성시킴으로써 K-Mn/Fe₂O₃ 촉매가 제조되었다.

2.2. K-Mn/Fe₂O₃ 촉매 특성 분석

제조된 K-Mn/Fe₂O₃ 촉매가 가진 물리화학적 특성들이 H₂O₂ 분해반응에 미치는 영향을 조사하기 위해 다음과 같은 다양한 기법에 의해 조사되었다. 제조된 K-Mn/Fe₂O₃ 촉매의 결정구조 및 성상을 조사하기 위하여 XRD(X-ray powder diffraction) 분석이 수행되었으며, 시료표면의 정성/정량분석 및 구성하는 원소들의 화학적 결합 상태를 조사하기 위하여 XPS(X-ray photoelectron spectroscopy, thermo electron사, K-Alpha 모델)가 이용되었다. 추가로 제조된 불균일계 촉매인 K-Mn/Fe₂O₃의 산점 특성을 조사하기 위하여 NH₃ 기체를 이용한 승온탈착(temperature programmed desorption, TPD) 실험이 다음과 같이 수행되었다. 약 10 vol.%의 농도를 지니는 NH₃ 기체가 고정층 방식으로 충전

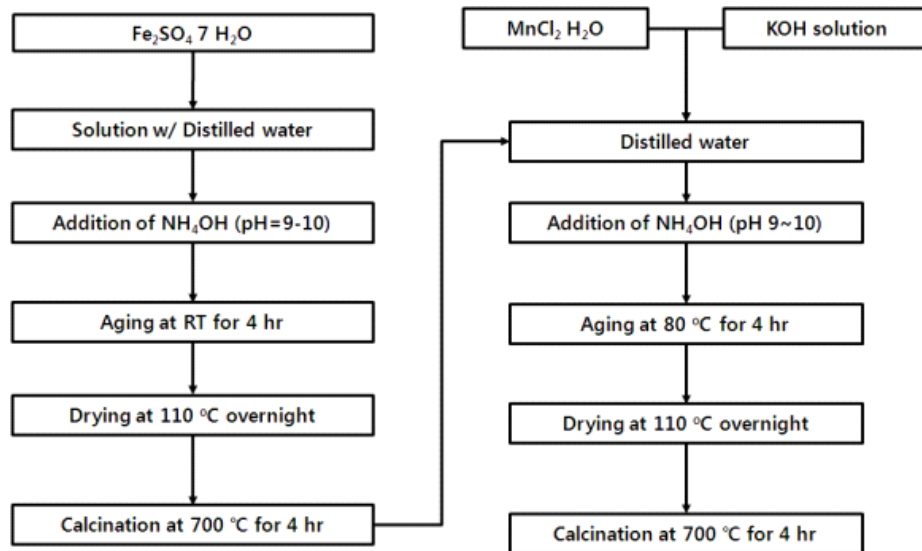


Fig. 1. Preparation of the Catalyst for the Catalytic H₂O₂ Conversion.

된 촉매층을 6 hr 동안 통과됨으로써 흡착과정이 진행된 이후 N₂ 기체를 흘려주면서 상온에서 800 °C까지 5 °C/min의 속도로 승온하여 탈착되는 NH₃을 열전도성검출기(thermal conductivity detector, TCD)로 정량분석함으로써 산점특성이 분석되었다. 제조된 촉매의 비표면적을 측정하기 위하여 Brunauer-Emmett-Teller식을 이용한 surface area analysis을 수행하였다. 이용된 장비는 Quantachrome Co.의 질소흡착장치를 이용해 액체 질소 온도에서 측정되었다. 전처리된 진공분위기(약 10⁻⁴torr)에서 4 시간 동안 약 200 °C로 수행되었다. 질소 흡착량의 변화를 통해 BET 식에 적용함으로써 비표면적을 구할 수 있었다. 제조된 촉매의 H₂O₂ 촉매분해 특성을 조사하기 위하여 55 g의 H₂O₂과 0.1 g의 제조된 촉매를 저울 위에서 반응시켰으며, 이때 시간에 따른 H₂O₂의 무게변화를 2초 단위로 기록하여 분해량을 비교 평가 하였다.

2.3. H₂O₂ 촉매분해에 의한 건식산화제 제조 및 NO 산화공정

NO 포함 배가스 처리용 H₂O₂ 촉매분해에 의한 건식산화제 제조 및 산화공정이 Fig. 2와 같이 구축되었다. 약 500 ml/min에 해당하는 H₂O₂가 공급될 수 있는 정량펌프와 이를 증기상태로 전환할 수 있는 증발기(vaporizer)가 설치되었다.

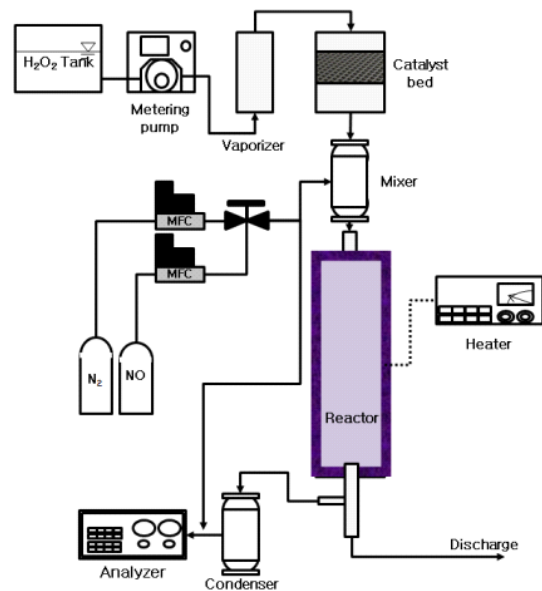


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup for the catalytic H₂O₂ conversion and NO oxidation.

H₂O₂ 공급을 위하여 병렬로 설치된 증발기는 상온에서 약 400 °C에 이르는 온도범위에서 운전될 수 있도록 높이가 약 50 cm에 이르며, 직경이 약 2 inch로서 약 내부용적이 약 1 L인 가운데,

H_2O_2 가 정량펌프를 통해 하단으로 주입된 후 증기상태로 전환된 후 상부로 분출될 수 있도록 제작되었다. 후단에는 직경이 약 10 cm인 스테인리스 재질의 관형 반응기 내부에 적당량의 촉매가 고정층으로 충전 가능하며 건식산화제가 생성될 수 있는 H_2O_2 분해반응시스템이 위치하였다. 이후 생성된 건식산화제와 주 대상 반응기체인 NO 기체가 동시에 주입될 수 있는 챔버형태의 혼합기가 위치하며, 이와 연계하여 세라믹 재질의 구슬형 충전제가 고정층으로 충전될 수 있는 직경이 약 10 cm이며 재질이 스테인리스인 관형산화반응시스템이 설치되었다. H_2O_2 분해시스템, 산화시스템 및 기체들이 이동하는 이동관에는 전기로 및 테이프 형태의 가열테이프가 장착됨과 동시에 각 부분의 온도는 설치되어 있는 열전도대(thermo-couple, K-type)을 필요한 지점에 위치시킨 후 자동온도제어기를 이용하여 제어하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. K-Mn/Fe₂O₃ 물리화학적 특성 분석

Fig. 3은 K-Mn/Fe₂O₃, Fe₂O₃ 촉매에 대한 XRD 분석결과를 나타낸 것이다. Fe₂O₃ 촉매의 경우에는 Rhombohedrol 구조의 결정성을 지니는 것으로 언어졌으며, 이를 지지체로 사용하여 제조된 K-Mn/Fe₂O₃ 촉매 상에서는 Rhombohedrol 구조의 Fe₂O₃가 존재하며, 동시에 K_{1.33}Mn₈O₁₆ 화합물 형태와 α -MnO₂ 화합물 형태가 공존하는 것으로 나타났다. Fig. 4는 지지체인 Fe₂O₃에 K와 Mn 성분이 담지된 K-Mn/Fe₂O₃ 촉매에 대하여 구성된 원소들의 결합상태를 확인하기 위한 원소 성분들에 대한 각각의 결합에너지를 측정된 결과로서 XPS 분석결과이다. Mn 성분이 가지는 결합에너지의 피크는 다양하게 언어졌으나, 약 642.2 eV에 해당하는 결합에너지 위치에서 나타났으며, 이러한 결합에너지 위치에 해당하는 Mn 성분이 포함된 화합물의 형태는 KMnO₄인 것으로 나타났다. 또한 이를 뒷받침하는 근거로서 K 성분에 대한 결합에너지를 측정된 결과, 나타난 피크의 위치가 292.6 eV에 해당하는 위치로서 K 성분 또한 KMnO₄ 형태의 화합물에 포함된 결합구조를 나타낸 것으로 확인되었다. Fe 성분에 대한 결합에너지는 약 710.1 eV에 해당하는 피크가 관찰되었으며, 이러

한 결합에너지는 Fe₂O₃ 화합물에 포함된 Fe 성분의 결합에너지로 판명되었다. 따라서 K-Mn/Fe₂O₃ 촉매의 성상은 지지체인 Fe₂O₃에 KMnO₄ 성분이 대부분으로 포함된 성상으로 이루어져 있는 것으로 사료된다. 제조된 K-Mn/Fe₂O₃ 촉매와 지지체인 Fe₂O₃의 표면적 및 세공구조를 Table 1.에 나타내었다. Fig. 5 (a)는 제조된 K-Mn/Fe₂O₃ 촉매에 대한 산점특성을 조사하기 위하여 수행된 NH₃-TPD 실험결과를 나타낸 것이다. K-Mn/Fe₂O₃ 촉매에 대하여 NH₃ 기체를 흡착시킨 후 상온으로부터 약 800 °C까지 5 °C/min의 속도로 승온시킴으로써 탈착된 NH₃량을 TCD 검출기를 이용하여 정량화함으로써 Fig. 5와 같이 흡착세기에 해당하는 각 온도 및 TCD 검출세기에 해당하는 NH₃ 기체의 흡착량 등의 결과를 얻었다. 그 결과, 전체 NH₃ 흡착량에 대응하는 산점의 양은 온도에 따라 변화하는 NH₃ 탈착량에 해당하는 선형그래프에 대한 적분값으로 판단할 수 있으며, 이에 대한 산점의 총량은 K-Mn/Fe₂O₃이 Fe₂O₃ 보다 높게 나타났다.

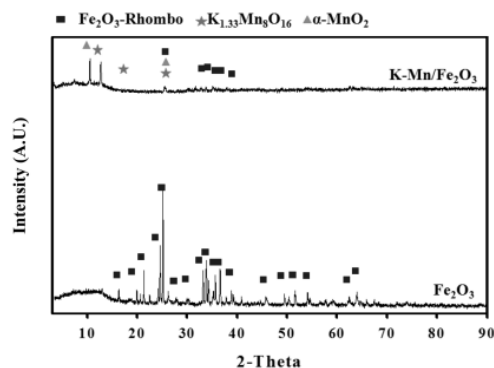


Fig. 3. XRD results of K-Mn/Fe₂O₃ and Fe₂O₃ catalysts.

산점의 총량과 더불어 산점의 세기와 분포 등을 Fig. 5 (b)로 나타낼 수 있다. 비교적 많은 산점을 지니는 K-Mn/Fe₂O₃ 촉매는 약 217, 297, 355, 399, 452, 689, 762 °C에 해당하는 다양한 세기의 산점을 지니고 있어 그 분포가 다양하게 존재하며, 산점의 양 또한 0.066에서 1.337 mmol/g으로 비교적 다양한 세기의 산점을 고르게 지니고 있음을 알 수 있다.

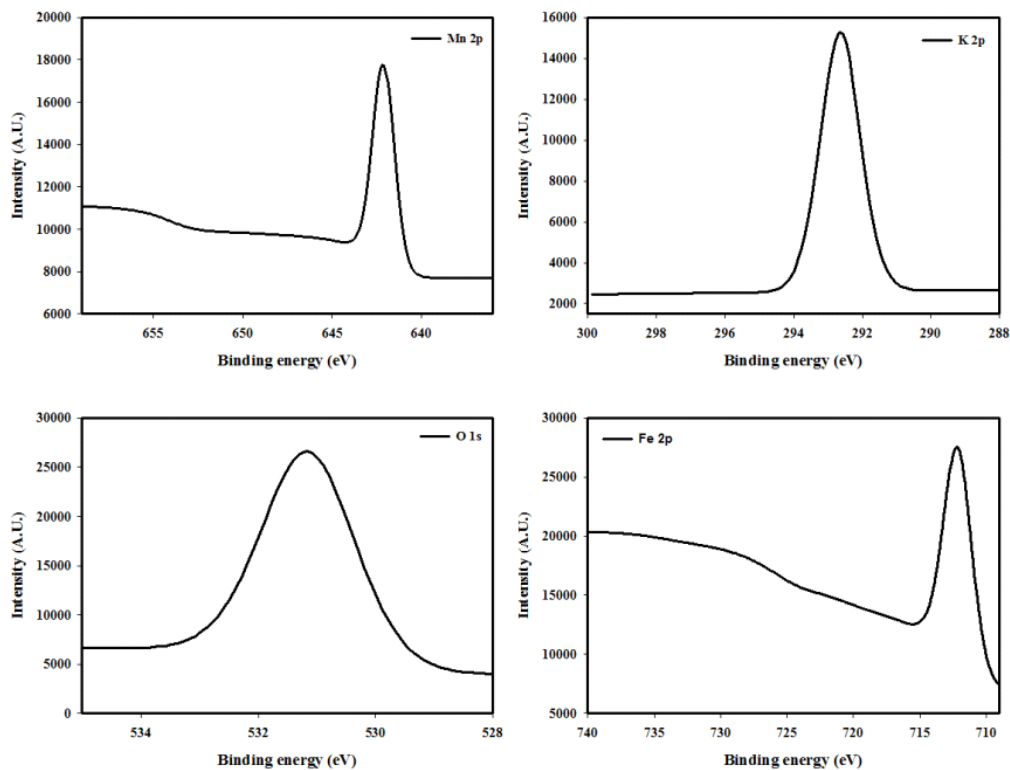


Fig. 4. XPS results of K-Mn/Fe₂O₃ catalysts.

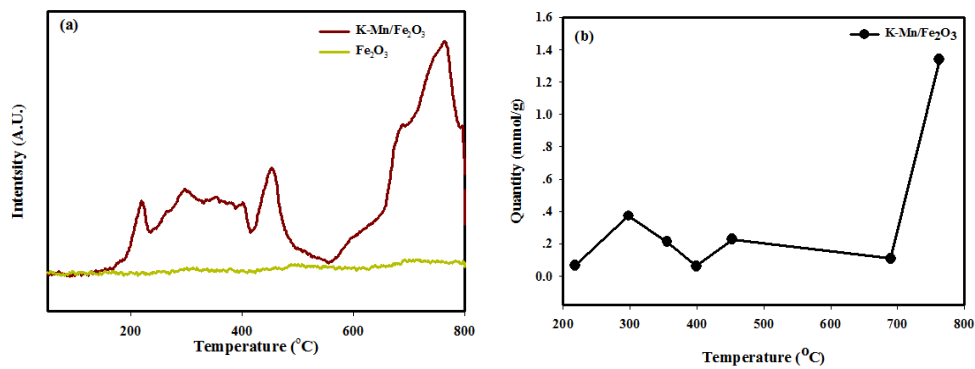


Fig. 5. NH₃-TPD results of K-Mn/Fe₂O₃ catalysts.

Table 1. Property of the Catalyst for the Catalytic H₂O₂ Conversion

	Surface area (m ² /g)	Total pore volume (cm ³ /g)	Average pore diameter (nm)
K-Mn/Fe ₂ O ₃	3.1647	0.015089	19.072
Fe ₂ O ₃	3.1	0.15	196.9

3.2. K-Mn/Fe₂O₃ 촉매 상 H₂O₂ 분해 효율

Fig. 6 (a)은 건식산화제 제조를 위하여 K-Mn/Fe₂O₃ 촉매에 따른 H₂O₂ 분해효율로서 전환율을 나타낸 것이다. 분해를 위한 H₂O₂ 주입량은 약 0.3 g/min이었으며, 촉매량은 1 g이었으며, 유량은 약 300 ml/min이었다. 사용된 촉매는 K-Mn/Fe₂O₃와 Fe₂O₃이었으며, H₂O₂ 분해반응온도는 150 °C였다. H₂O₂ 분해효율이 높았던 촉매는 K-Mn/Fe₂O₃으로 나타났다. 이러한 결과는 제조된 촉매들이 지니는 물리화학적 특성 중에서 특히 H₂O₂ 분해반응이 지니는 특성과 가장 연관성이 높은 흡착점에 해당하는 촉매의 산점 분포에 따라 좌우된다고 볼 수 있다. H₂O₂ 분해반응 특성 상 전자의 이동성에 의한 산화-환원반응에 기인하여 반응 여부 또는 반응성이 달라지며, 이러한 반응특성이 곧 고체 촉매의 루이스 산점과 연관 지어지기 때문이다. 또한 산점들 중에서 반응 대상물인 H₂O₂의 특성 상 약산점의 분포 및 양에 따라 반응성 크기가 좌우되는 것으로 사료된다. Fig. 6 (b)는 건식산화제 제조를 위하여 수행된 촉매에 따른 H₂O₂ 분해량을 나타낸 것이다. 그 결과, 시간이 증가함에 따라 H₂O₂ 분해효율이 점차 증가함을 알 수 있으며, K-Mn/Fe₂O₃ 촉매에 의해 H₂O₂ 촉매분해효율이 안정될 때까지 걸리는 시간은 140초이며, 즉 반응속도를 나타낸다.

3.3. H₂O₂ 분해공정을 통해 얻어진 건식산화제 의한 처리규모별 NO산화공정

Fig. 7은 상기 촉매종류에 따라 수행된 H₂O₂ 분해반응 후 얻어진 건식산화제를 NO 산화공정에 모사 배가스와 동시에 주입함으로써 NO 전환효율을 조사한 것이다. 반응온도를 150 °C로 제

어한 가운데, H₂O₂ 분해공정 상에서 H₂O₂ 주입량, 촉매 충전량이 각각 0.3 g/min, 0.5 g이었다. 산화공정 또한 반응온도를 40 - 150 °C로 변화시킨 가운데 주입된 모사 배가스의 유량과 이에 포함된 NO 농도는 각각 300 ml/min, 1,000 ppm이었다. 산화공정의 반응온도에 따라 NO가 전환되는 효율이 다르게 나타났으며, 반응온도가 상승할수록 반응성인 NO 전환율이 높아지는 가운데, 약 150 °C에서 약 NO 전환율이 약 100%에 도달하였다. Fig. 8(a)는 산화공정으로 주입되는 모사 배가스의 농도와 유량이 각각 약 1,000 ppm 및 5 L/min으로 유지된 가운데 건식산화제 제조/공급용 H₂O₂ 분해공정에 주입되는 약 28% 농도로 증류수로 희석된 H₂O₂ 주입량을 변화시켜 산화공정의 효율에 미치는 영향을 살펴본 것이다. H₂O₂ 촉매분해반응시스템에서의 반응온도가 약 150 °C였으며, 이러한 H₂O₂ 분해과정에서 생성된 건식산화제를 이용한 NO 산화공정에서도 약 150 °C를 반응온도로 설정하여 유지하였다. 이러한 과정을 통해 H₂O₂ 주입량에 따른 처리대상기체인 NO의 전환율과 산화반응에서 주로 생성될 수 있는 NO₂의 선택도를 확인하고자 하였다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 H₂O₂ 주입량이 1.6에서 약 20 ml/min으로 증가할수록 주 전환대상물인 NO의 농도가 점차 감소함과 동시에 주 생성물인 NO₂의 농도는 점차 증가함을 알 수 있다. 이는 H₂O₂ 주입량이 증가됨에 따라 NO 전환율이 증가함과 동시에 NO₂ 선택도 또한 증가하는 추세를 나타내었으며, 이러한 경향은 H₂O₂ 주입량이 증가할수록 H₂O₂ 분해반응시스템에서 생성되는 건식산화제의 양이 증가함과 동시에 산화공정에서 NO를 산화시킬 수 있는 효율

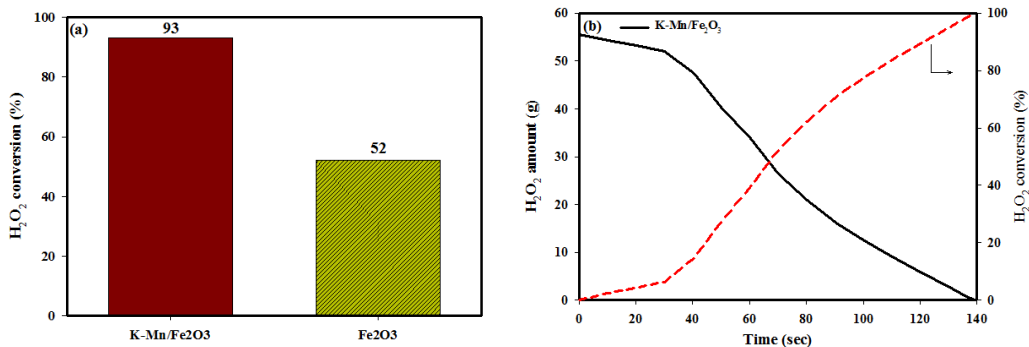


Fig. 6. Effect of the oxidation temperature on the NO oxidation.

도 증가되었기 때문이라 할 수 있다. Fig. 8(b)은 산화공정으로 주입되는 모사 배가스의 농도와 유량이 각각 약 1,000 ppm 및 10 L/min으로 유지된 가운데 건식산화제 제조/공급용 H₂O₂ 분해공정에 주입되는 약 28% 농도로 증류수로 희석된 H₂O₂ 주입량을 변화시켜 산화공정의 효율에 미치는 영향을 살펴본 것이다. 동일한 운전조건에서 수행된 5 L/min 처리 규모에서 얻어진 실험결과에 비해 10 L/min의 경우에는 산화공정에 공급되는 모사 배가스의 처리 용량이 증가함에 따라 H₂O₂ 변화량에 민감할 뿐만 아니라 10 ml/min 이하의 H₂O₂ 주입량의 범위에서 주입량이 상승됨에 따라 NO₂ 전환율의 증가율이 더욱 커짐을 알 수 있다. Fig. 8(c)는 산화공정으로 주입되는 모사 배가스의 농도와 유량이 각각 약 1,000 ppm 및 20 L/min으로 유지된 가운데 건식산화제 제조/공급용 H₂O₂ 분해공정에 주입되는 약 28% 농도로 증류수로 희석된 H₂O₂ 주입량을 변화시켜 산화공정의 효율에 미치는 영향을 살펴본 것이다. 동일한 운전조건에서 수행된 5-10 L/min 처리 규모에서 얻어진 실험결과에 비해 20 L/min의 경우에는 산화공정에 공급되는 모사 배가스의 처리 용량이 증가함에 따라 H₂O₂ 변화량에 더욱 더 민감할 뿐만 아니라 10 ml/min 이하의 H₂O₂ 주입량의 범위에서 주입량이 상승됨에 따라 NO₂ 전환율의 증가율이 더욱 커짐을 알 수 있다. 그러나 10에서 20 L/min로 처리용량이 커짐에 따른 증가율이 5에서 10 L/min으로 상승됨에 따른 증가율보다는 다소 덜 민감하였으므로 향후 H₂O₂ 촉매분해 및 산화공정 연계 구축에 따른 스케일-업 과정에서 반영되어야 할 것으로 사료된다.

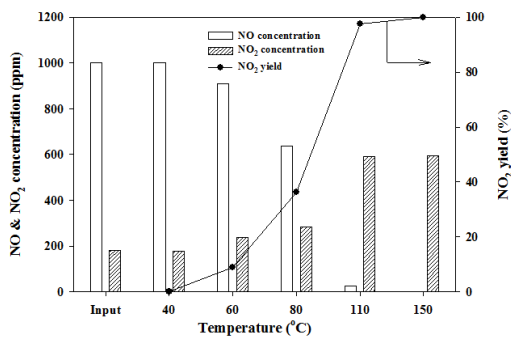
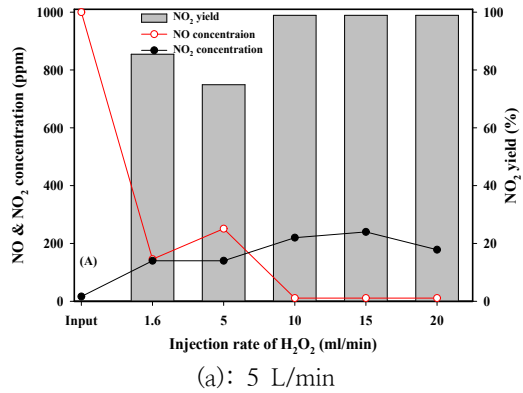
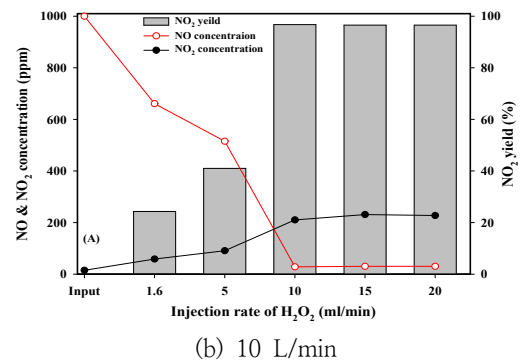


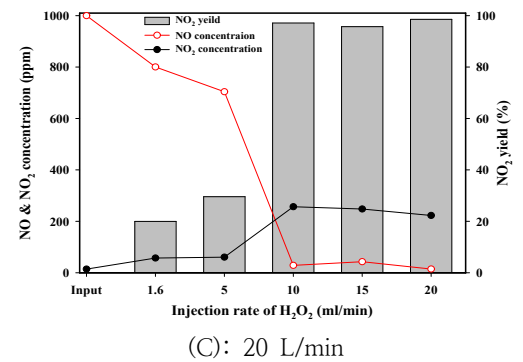
Fig. 7. Effect of the oxidation temperature on the NO oxidation.



(a): 5 L/min



(b) 10 L/min



(c): 20 L/min

Fig. 8. Effect of the gas flow rate on the NO oxidation.(flow rate :5, 10, 20 L/min)

4. 결론

본 연구에서는 K-Mn/Fe₂O₃ 불균일계 촉매상 H₂O₂ 분해에 의한 건식산화제 생성과 동시에 NO 산화공정에 주입하여 NO 전환율을 조사하였다.

1. Fe₂O₃를 지지체로 사용한 가운데 K성분이 첨가된 Mn기반 K-Mn/Fe₂O₃ 촉매의 물리화학적 특성 분석 및 H₂O₂ 분해반응 결과, 촉매가 지니는 산점특성이 H₂O₂ 분해효율에 가장 큰 영향을 미치는 것이 확인되었다.
2. H₂O₂ 촉매분해를 통하여 생성된 건식산화제를 NO 산화공정에 주입하였을 때, 약 100%에 가까운 전환율을 얻을 수 있었다. 이때 반응온도가 높아짐에 따라 전환효율은 증가 하였다. 배가스 유량별 NO산화 공정에서는 H₂O₂ 주입량이 증가할수록 NO 전환효율이 상승되었고 약 100% 가까운 전환율에 도달하였다.
3. 이러한 결과를 바탕으로, 향후 H₂O₂ 촉매분해 및 NO 산화공정 연계 구축에 따른 스케일-업 된 통합공정시스템을 설계할 수 있을 것으로 사료된다.
4. Wang, X. and Gui, K., Fe₂O₃ particles as superior catalysts for low temperature selective catalytic reduction of NO with NH₃, *Journal of Environmental Sciences*, 25,12, 2469-2475 (2013).
5. Lin, S. S. & Gurol, M. D., Catalytic Decomposition of Hydrogen Peroxide on Iron Oxide: Kinetics Mechanism and Implications., *Environ. Sci. Technol.*, 32, 10, 1417-1423 (1998).
6. Hu, H., Zha, K., Li, H., Shi, L., Zhang, D. In situ DRIFTS investigation of the reaction mechanism over MnO_x-MO_y/Ce_{0.75}Zr_{0.25}O₂ (M = Fe, Co, Ni, Cu) for the selective catalytic reduction of NO_x with NH₃, *Applied Surface Science*, 387, 30, 921-928 (2016).
7. Lousada, C. M. & Jonsson, M., Kinetics Mechanism and Activation Energy of H₂O₂ Decomposition on the Surface of ZrO₂., *J. Phys. Chem. C.*, 114, 25, 11202-11208 (2010).
8. Pham, A. L.-T., Lee, C., Doyle, F. M. & Sedlak, D. L. A., Silica-Supported Iron Oxide Catalyst Capable of Activating Hydrogen Peroxide at Neutral pH Values., *Environ. Sci. Technol.*, 43, 8930-8935 (2009).
9. Adewuyi, Y. G. & Owusu, S. O., Ultrasound-Induced Aqueous Removal of Nitric Oxide from Flue Gases: Effects of Sulfur Dioxide, Chloride, and Chemical Oxidant, *J. Phys. Chem. A.*, 110, 38, 11098-11107 (2006).
10. Ding, J., Zhong, Q., Zhang, S., Song, F., & Bu, Y., Simultaneous Removal of NO_x and SO₂ from Coal-Fired Flue Gas by Catalytic Oxidation-Removal Process with H₂O₂., *Chem. Eng. J.*, 243, 176-182 (2014).
11. Mauldin, R.L., Kosciucha, E., Henry, B., Eisele, F.L., & Shetter, R., Measurements of OH, HO₂ + RO₂, H₂SO₄, and MSA at the south pole during ISCA 2000., *Atmos. Environ.*, 38, 5423-5437 (2004).

감사의 글

본 연구는 환경부의 환경산업선진화기술개발사업에서 지원받았습니다.

References

1. Qi and R. T. Yang, Low-temperature selective catalytic reduction of NO with NH₃ over iron and manganese oxides supported on titania, *Appl. Catal.*, B, 44, 217-225 (2003).
2. Jang, J. H., Choi, H. Y. & Han, G. B., Production of Dry Oxidant through Catalytic H₂O₂ Decomposition over Mn-based Catalysts for NO Oxidation., *Clean Technology*, 21, 2, 130-139 (2015).
3. Wang, X., Wu, S., Zou, W., Yu S., Gui K., Dong L., Fe-Mn/Al₂O₃ catalysts for low temperature selective catalytic reduction of NO with NH₃, *Chinese Journal of Catalysis*, 37,8, 1314-1323 (2016).

12. Thomas, D., & Vanderschuren, J., Modeling of NO_x Absorption into Nitric Acid Solutions Containing Hydrogen Peroxide., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36, 3315-3322 (1997).
13. Park, S.Y., Deshwal, B.R., & Moon, S. H., NO_x Removal from The Flue Gas of Oil-Fired Boiler using a Multistage Plasma-Catalyst Hybrid System., *Fuel Process. Technol.*, 89, 540-548 (2008).
14. Jang, H,H and Han, G,B., A study on the NO oxidation using dry oxidant produced by the catalytic conversion of H₂O₂, *J. of Korean Oil Chemists' Soc.*, Vol. 33, No.1., 100-109 (2016).