

질소산화물 제거를 위한 최적 토양 바이오 필터 혼합비 도출에 관한 연구

조 기 철 · 이 내 현*
동남보건대학 환경생명과학과, *(주) 전략엔지니어링
(2007년 8월 8일 접수; 2007년 10월 8일 채택)

A Study of Optimal Mixture Fraction of Soil Bio-Filter for Removing NO_x

Ki-Chul Cho and Nae-Hyun Lee*

Department of Environmental Life Science, Dongnam Health college, Gyeonggi 440-714, Korea
*Strategy Engineering Co., Ltd.

(Manuscript received 8 August, 2007; accepted 8 October, 2007)

Soil biofiltration is an environmentally-sound technology for elimination of VOCs, odorous and NO_x compounds from a low concentration, high volume waste gas streams because of its simplicity and cost-effectiveness. This study investigated the optimal mixture fraction of briquet ash, compost, soil and loess for NO_x degradation. Extreme vertices design was used to examine the role of four components on NO_x degradation. Under our experimental conditions, 74.5% of NO_x degradation was observed, using a model mixture(25% briquet ash, 10% compost, 30% soil and 40% loess) containing 100 ppb of NO. It was shown that experimental design analysis could allow selecting optimal conditions in such biodegradation processes in this study.

Key Words : Soil biofilter, Extreme vertices design, Briquet ash, Compost, Loess

1. 서 론

대기 중에 배출되는 중요한 대기오염물질의 하나로 인식되고 있는 질소산화물(NO_x)은 화력발전소, 제철소, 자동차 등 다양한 오염원에서 발생하고 있으며 산성비나 광화학 스모그와 같은 환경문제를 일으키는 것으로 알려져 있다. 이런 NO_x 물질을 처리하기 위한 연구들이 10여 년간 활발히 진행되어 왔으며, 그 중 저온 플라즈마 기술^{1~4}, 플라즈마-촉매 복합 공정에 의해 NO_x 제거공정^{5~6}, NO_x 제거를 위한 촉매 공정한 선택적 촉매환원법(selective catalytic reduction, SCR)^{7~8} 등 다양한 방법들이 소개되었다. 그러나 이들 공정은 매우 높은 설치비, 유지비, 고농도 시 효율저하 및 촉매교체 등의 단점

을 가지고 있으므로 자연친화적인 여재를 사용하여 오염물질의 지속적처리가 가능한 기술 개발은 매우 중요한 의미를 가지게 되었다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 바이오필터를 활용하는 방안이 대두되고 있는 실정이다. 악취처리를 목적으로 하여 발전되어 오기 시작한 바이오필터 기술⁹은 오늘날 매립지가스, 각종 산업공정에서 발생하는 악취 및 휘발성 유기화합물, 그리고 오염토양의 가스추출처리 시 발생하는 배가스 등의 처리에까지 폭넓게 이용되고 있다. 또한 토양 미생물을 이용하여 악취나 휘발성 유기화합물을 처리하는 기술은 물리·화학적 처리 방법에 비해 경제성이 뛰어나고 효과적인 것으로 알려져 있다¹⁰. 바이오필터법은 오염된 가스를 토양이나 퇴비와 같은 생물학적 활동성이 높은 물질에 통과시키는 기술로써 이미 산업지역이나 공공장소에서 발생하는 휘발성유기 화합물과 악취 등의 제거에 효과적인 것으로 판명되었다^{11~15}. 1960년 초 Carlson과 Leiser⁹에 의해 황화수소의 생물 분해에

Corresponding Author : Ki-Chul Cho, Dept. of Environmental Life Science, Dongnam Health college, Gyeonggi 440-714, Korea
Phone: +82-31-249-6474
E-mail: ckc@dongnam.ac.kr

관한 조직적인 연구가 처음으로 수행되었으며 1980년대 접어들면서 바이오필터법은 독일에서 휘발성 유기화합물과 대기 독성 물질 처리에 이용되었다¹⁶⁾.

이후 산업화와 자동차 증가 등으로 인해 대기 중의 질소산화물의 심각성이 대두되면서 대기 중의 질소산화물을 바이오필터법을 이용하여 처리하였다. 바이오필터법은 대기온도가 15~30℃에서도 운전 가능할 뿐만 아니라 부산물에 의해 독성 발생이 없으며 탈취 효율이 우수하고 조작이 간편하며 가스의 부하 변동에 강하고 유지 관리비가 적게 든다는 장점을 가지고 있으며, 일본의 경우 터널과 도로주변에 특수 혼합 토양을 이용한 EAP system을 도입하여 터널, 도로주변 등에서 배출되는 대기오염물질을 정화하는 기술이 도입되었다.

국내에서는 바이오필터를 이용한 질소산화물 처리에 관한 연구는 매우 미비하며, 휘발성 유기화합물 및 악취를 대상으로 활발히 진행되고 있는 실정이다. 또한 실질적인 제거 메커니즘과 기초 설계인자 및 운전인자에 관한 연구 또한 극히 미미한 수준에 있다. 특히 실내 공기오염물질 처리를 위한 자연 친화적 토양 바이오필터를 이용한 시스템은 전무한 상태이다.

본 연구에서는 자동차 배출가스 및 가정 내 연소기구 등에서 발생하는 질소산화물(NOx)을 비롯하여 이와 유사한 성질의 조건을 갖는 질소산화물을 효율적으로 제거하기 위하여 식물식재가 가능한 토

양 바이오필터를 여재로 사용하였다. 생물 여재내에서 질소산화물 분해에 미치는 변수는 매우 다양하며 본 연구에서는 이러한 다양한 변수 중 유입 질소산화물 농도와 산화를 위한 유입 오존의 농도 및 유입유량 등을 일정하게 유지시킨 후 토양 바이오필터를 구성하는 각종 토양, 식물의 영양분 및 미생물의 서식에 필요한 퇴비, 토양내 공기의 흐름을 원활하게 하는 팽화재로서 연탄재를 이용하여 이들 성분의 혼합비에 따른 질소산화물 제거 특성을 규명하고, 이를 통해 질소산화물 제거를 위한 특수 혼합여재의 최적 혼합비율의 도출을 목적으로 본 연구를 시행하였다. 이러한 연구는 현장에서 쉽게 구할 수 있는 토양 및 기타 바이오필터를 오염물질의 배출 특성에 따라 최적의 토양 바이오필터의 혼합비를 선정하여 현장에서 처리할 수 있는 기술 개발에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치의 구성

본 실험에 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었으며, Fig. 1과 같이 실험장치는 가스공급부, 오존산화조, 혼합부(Mixer tank), 반응부, 배출가스측정부로 구성되었다. 본 연구에 사용된 NO제거용 토양 바이오필터 반응기는 내경 50 mm, 높이 100 mm로 제작되었다.

가스공급부인 경우 NO가스 및 희석용 air 주입이

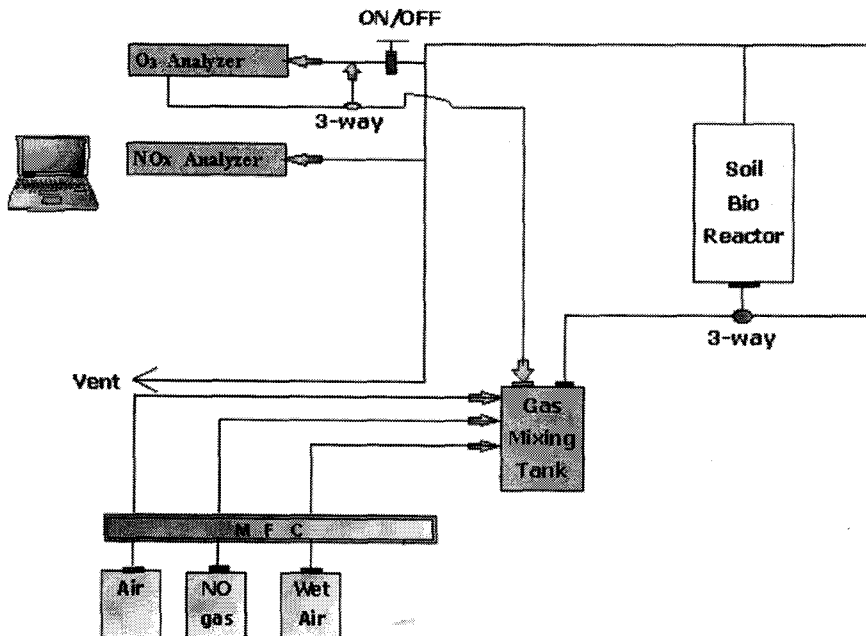


Fig. 1. The schematic diagram of experimental apparatus.

가능하도록 장치를 구성하였다. 혼합가스는 상향류의 흐름을 갖도록 여재층의 하단으로 유입되도록 설치하였다. 오존 산화조에서는 Ozone Generator를 사용하여 유입된 표준가스 중 NO를 NO₂로 산화하는 역할을 하며, 혼합장치 내에서 표준가스와 함께 혼합되어 바이오필터 장치로 유입되게 된다. 바이오필터에 의한 오염공기(NO, NO₂)의 제거능을 살펴보기 위하여 Nitrogen Oxides Analyzer를 사용하였고 유입되는 O₃ 및 반응 후 유출되는 O₃농도를 측정하기 위하여 O₃ Analyzer를 사용하였으며, 이들 분석장치는 자동연속분석 장치로 매 5초당 분석 데이터를 전송함으로써 바이오필터 내 질소 산화물들의 거동을 모니터링 할 수 있다.

2.2. 실험조건 및 방법

Table 1에 본 연구에서 사용된 실험장치 내의 초기 O₃와 NO농도, 유량, 상대습도에 대한 실험조건을 나타내었다. 초기 유입 NO의 농도는 약 100 ppb 전후로 유지하였으며, NO가스의 산화를 위해 유입되는 초기 O₃의 농도는 650~800 ppb로 고정하고 이때 유입되는 O₃의 유량은 1,000 mL/min로 하였다. 반응기에 충전된 토양 바이오필터의 초기 수분함량은 60%로 조절하였으며, 또한 유입되는 혼합가스의 상대습도도 60%로 유지하여 반응기에 유입시켰다.

총부피 196 cm³의 반응기에 토양 바이오필터를 충전한 후, 초기 유입되는 NO의 농도를 순수한 공기를 이용해 100 ppb로 유지하는 동안 별도의 라인으로 O₃ 유입농도를 650~800 ppb로 맞추어 혼합기에 유입시켜 NO와 반응하도록 한 후 반응기에 혼합가스(Air+NO gas+O₃ gas)를 유입시켜 유출되는 NO, NO₂ 및 O₃의 출구농도를 측정하여 제거효율을 계산하였다.

2.3. 분석방법

주요 분석 장비는 오존 발생 및 분석 장치로 Ozone Analyzer(Model: ML 9811, Ecotech사, Australia)를 사용하였고, NO 및 NO₂의 발생량 및 제거량을 측정하기 위해 Nitrogen Oxides Analyzer(Model: EC 9841, Ecotech사, Australia)를 사용하였다. 이들 분석장치는 자동연속분석 장치로 매 5초당 분석 데이

터를 전송할 수 있으며, 측정원리로는 NO 및 NO₂는 화학발광법을 O₃는 자외선광도법을 적용하고 있다.

3. 혼합물 분석법

본 연구에서는 질소산화물 제거를 위한 최적의 바이오 필터 혼합비율을 도출하기 위해 혼합물 분석법을 사용하였다. 혼합물 분석법은 반응표면분석법의 특별한 경우로 연구 대상인 물질이 여러 성분들로 구성되어 있는 경우 실시하는 실험으로. 이 분석의 목적은 성분과 반응변수간의 적합한 모형을 적절한 실험계획에 의해 추정하고, 반응을 최대 혹은 최소화하는 최적 혼합비율을 도출하는데 있다. 성분수를 q 라고 하면, 혼합물실험에서는 성분 x_i ($i=1,2,\dots,q$)의 비율의 합이 1이 되어야 하므로 다음과 같은 제약을 갖는다.

$$\textcircled{1} 0 \leq x_i \leq 1, i=1,2,\dots,q$$

$$\textcircled{2} \sum_{i=1}^q x_i = 1$$

반응표면식을 위한 일반적인 2차 모형은 다음과 같이 표현된다.

$$E(y) = r_0 + \sum_{i=1}^q r_i x_i + \sum_{i=1}^q r_i x_i^2 + \sum_{i < j}^q r_{ij} x_i x_j$$

혼합물 실험에서는

$$x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1, x_i^2 = x_i \left(1 - \sum_{j=1, i \neq j}^q x_j\right)$$

이므로 2차 모형식은 다음과 같이 표현된다.

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j}^q \beta_{ij} x_i x_j$$

여기서 $E(y)$ 는 예측된 반응값을 나타내며 β_i 는 직선효과, β_{ij} 는 상호효과를 나타낸다.

본 연구에서는 실험변수로 연탄재(x_1), 퇴비(x_2), 토양(x_3), 황토(x_4)를 사용하였으며, 예측 반응값 $E(y)$ 와 반응변수와의 관계는 2차모형으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1. Design and operation parameters

Parameters	Condition of experiment
Initial concentration of NO (ppb)	100 ± 2
Initial concentration of O ₃ (ppb)	650~800
O ₃ gas flow rate (mL/min)	1,000
Total flow rate[Air+NO+O ₃] (mL/min)	2,000
Moisture content of packing material (%)	55~65
Size of used mixture reactor (Φ×H)	5 0mm×100 mm

$$E(y) = \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{14}x_1x_4 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{24}x_2x_4 + \beta_{34}x_3x_4$$

Table 2에 본 연구에서 실시된 혼합물 성분의 한계를 나타내었다. 본 실험에서는 혼합물 총량이 1이기 때문에 양과 비율을 동일하게 생각할 수 있으며, 제약조건 때문에 유사성분으로 경계를 나타내었다. 본 연구에서는 Table 2와 같이 각 성분에 대하여 상한과 하한의 제약을 가정하여 혼합물 분석법의 꼭지점 설계(extreme vertices design)를 이용하여 아래 Fig. 2와 같은 실험 디자인을 결정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 토양 바이오필터에 의한 질소산화물 제거 특성
 질소산화물 제거를 위한 본 연구에서 사용된 4가지 성분들에 대한 최적 혼합 비율을 도출하기 위해

반응기내 온도를 상온으로 하고 혼합물의 수분함량을 약 60%로 고정 하였으며, NO의 초기 유입농도를 약 100±2 ppb로 설정하였다. NO가스의 산화를 위해 유입되는 초기 O₃의 농도는 650~800 ppb로 유지하였으며, 이때 유입되는 O₃의 유량은 1,000 mL/min로 하여 총 O₃와 NO의 유입유량은 2,000 mL/min로 하였다. Fig. 3에 본 실험에서의 시간에 따른 각 성분의 전형적인 제거율 특성을 나타내었다. 본 실험은 총 2단계로 나뉘어 실험이 행해졌으며, 1단계에서는 공기와 NO의 혼합가스(NO = 100 ppb)를 토양 바이오 필터에 유입되기 전에 주입되는 O₃와 NO의 제거율과 O₃ 산화에 의해 생성되는 NO₂의 농도를 측정하였다. 이러한 1단계 반응은 약 30분간 행해졌으며, O₃은 약 65%가 제거되며, NO는 약 90%정도가 제거되는 것으로 나타났다. 이때

Table 2. The limits of variables chosen for the trials

Components	Fraction(weight basis)		Fraction		Pseudocomponents	
	Lower limit	Upper limit	Lower limit	Upper limit	Lower limit	Upper limit
Briquet ash (x_1)	0.2	0.3	0.2	0.3	0.0	1.0
Compost (x_2)	0.1	0.2	0.1	0.2	0.0	1.0
Soil (x_3)	0.3	0.4	0.3	0.4	0.0	1.0
Loess (x_4)	0.3	0.4	0.3	0.4	0.0	1.0

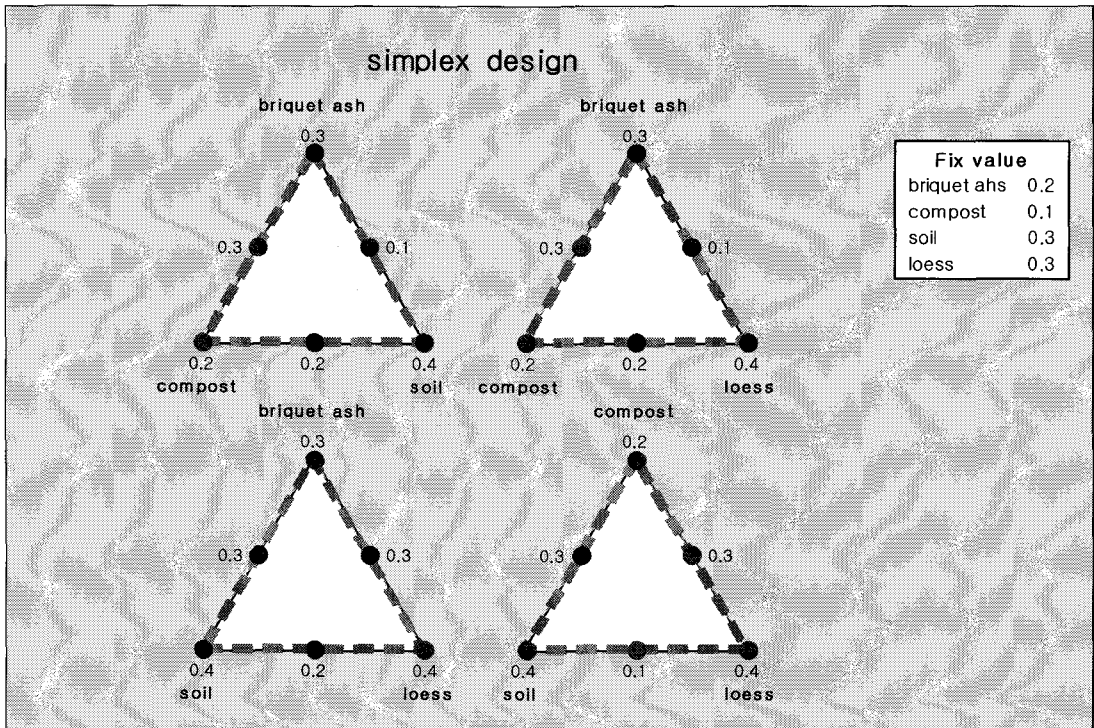


Fig. 2. Simplex design in the pseudocomponents.

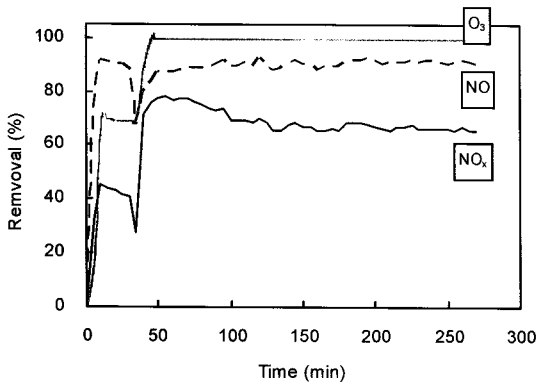


Fig. 3. A typical removal rate of O₃, NO, and NO_x using O₃ oxidation(1 stage) and soil bio-reactor (2 stage).

NO_x 제거율은 O₃ 산화에 의해 생성된 NO₂의 영향으로 약 40%정도의 제거율을 나타내었다. 이러한 1단계의 경향은 본 실험에서 행해진 모든 실험에서 유사하게 나타났다. 2단계에서는 1단계에서 안정된 제거율을 나타낸 혼합가스 및 O₃을 토양 바이오 필터로 유입시켜서 유출되는 O₃, NO 및 NO_x의 출구 농도를 측정하여 제거효율을 계산하였다. Fig. 3과 같이 유입되는 O₃은 모든 실험 조건에서 100% 제거되는 것으로 나타났으며, NO와 NO_x의 제거율은 토양 바이오 필터로 사용된 성분들의 혼합비에 따라 다르게 나타났다.

본 연구에서는 혼합물 분석에 따른 실험계획법을 통하여 4가지 성분에 대해 총 15가지의 혼합물을 구성하여 실험하였으며 실험 계획 및 결과를 Table 3에 나타내었다. 여기서 모든 성분들의 혼합비율은 무계비율로 하였으며, 본 실험 영역 내에서 질소산화물의 제거율은 41.9%에서 75.2%의 범위로 다양하게 나타났다. Table 3의 결과를 토대로 본 연구에서는 혼합물 분석법의 하나인 꼭지점 설계를 사용하여 모델 적용의 타당성과, 본 연구 영역내에서의 최고의 반응 값(NO_x 제거율)을 도출하기 위한 4가지 성분들의 최적 혼합비를 산출하였다.

4.2. 모형의 추정 및 적합성 검토

토양 바이오 필터를 이용한 NO제거에 있어서 성분 간의 최적 혼합비율의 산출을 위해 먼저 제거율 대 각 성분들의 혼합물에 대한 회귀분석을 실시한 결과를 Table 4에 나타내었다. 혼합물 분석에서는 성분 간의 선형적인 관계가 존재해서는 안 되는데, 이러한 성분 간의 선형적인 상관관계가 존재하는지를 판단하기 위해 분산팽창요인(Variation Inflation Factor, VIF)의 값을 사용하게 되는데 이 VIF의 값이 보통 10보다 크면 선형적인 관계가 존재한다고 말하며, 본 분석 결과 VIF값이 1에 가까워 선형적인 관계가 존재하지 않으며 본 혼합물 모델이 안정하다는 것을 알 수 있었다.

분산분석 결과 연탄재와 토양(P=0.844), 연탄재와 황토(P=0.462)는 P 값으로 유의하지 않기 때문에 단계적 회귀(stepwise regression)를 사용하여 모델에

Table 3. Experimental units matrix according to the extreme vertices design and results

Mixture	Compositions ^(a)				Removal rate E(y)
	f _b ^(b)	f _c ^(b)	f _s ^(b)	f _l ^(b)	
1	0.2500	0.1000	0.3000	0.3500	65.9
2	0.2125	0.1625	0.3125	0.3125	58.3
3	0.2500	0.1500	0.3000	0.3000	56.8
4	0.2000	0.1500	0.3500	0.3000	62.6
5	0.2500	0.1000	0.3500	0.3000	63.3
6	0.2125	0.1125	0.3625	0.3125	59.0
7	0.2000	0.2000	0.3000	0.3000	66.4
8	0.2000	0.1000	0.3000	0.4000	75.2
9	0.3000	0.1000	0.3000	0.3000	59.7
10	0.2000	0.1000	0.4000	0.3000	68.5
11	0.2625	0.1125	0.3125	0.3125	56.4
12	0.2000	0.1000	0.3500	0.3500	41.9
13	0.2125	0.1125	0.3125	0.3625	58.2
14	0.2000	0.1500	0.3000	0.3500	62.9
15	0.2250	0.1250	0.3250	0.3250	56.0

(a) Weight fraction.

(b) f_b ; briquet ash fraction, f_c ; compost fraction, f_s ; soil fraction, f_l ; loess fraction.

Fig. 5에 각 성분의 NO 제거율에 대한 반응 궤적을 나타내었으며, 이러한 반응 궤적도는 각 성분이 반응 값에 상대적으로 미치는 영향을 나타내는 것으로 한 성분의 양을 증가시키거나 감소시키면 다른 성분들도 비례해서 변화하게 된다. 본 연구 결과에 대한 반응궤적도의 특성을 Table 5에 정리하였다. 퇴비 성분의 경우 추적 결과 비선형 혼합효과가 없기 때문에 거의 직선으로 나타났다.

4.3. 최적 혼합비 도출 및 재현성 평가

본 연구에서는 4가지 성분들을 가지고 총 15가지의 혼합비에 대해 실험한 결과치에 대해 반응최적화(response optimizer)를 이용하여 질소산화물 제거를 위한 본 실험 영역내에서의 최적 혼합 조건을

도출한 결과를 Table 6에 나타내었다. 본 실험 영역 내에서는 연탄재의 비율을 20%, 퇴비의 비율을 10%, 토양의 비율을 30%, 황토의 비율을 40%로 혼합하면 약 74.5%의 NO_x의 제거율을 기대할 수 있는 것으로 나타났으며, 이때 모델 값의 만족도는 98%로 나타났다.

반응최적화 도구를 사용하여 계산된 4가지 성분의 최적 혼합비율의 타당성 검토를 위해 연탄재 비율 20%, 퇴비 비율 10%, 토양 비율 30%, 황토 비율 40%로 혼합비율을 결정하여 동일 조건하에서 재현성 실험을 행한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 나타난 바와 같이 본 수학적 모델 결과치와 유사하게 질소산화물의 제거율이 74.4%로 나타와 본

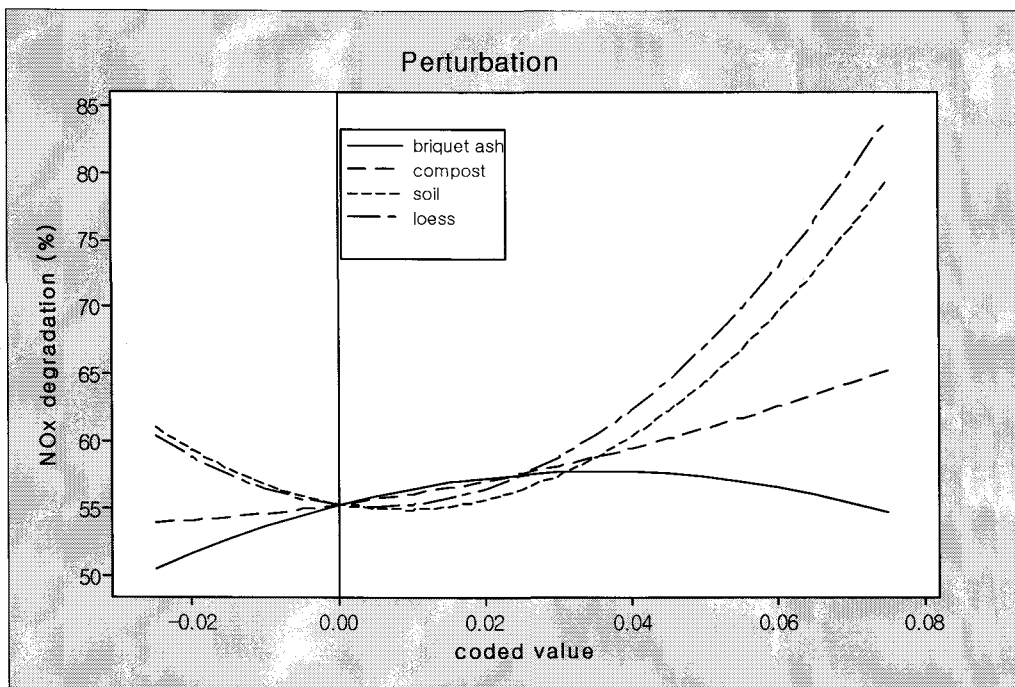


Fig. 5. Factorial plot representing the individual variables effect on NO_x degradation.

Table 5. Individual effect of components on NO_x degradation

Components	Fraction	NO _x degradation
Briquet ash	Increase	Decrease after gradual increase Decrease
	Decrease	
Compost	Increase	Increase Decrease
	Decrease	
Soil	Increase	Increase after gradual decrease Increase
	Decrease	
Loess	Increase	Increase after gradual decrease Increase
	Decrease	

Table 6. Response optimization of NO_x degradation vs. mixture components

	briquet ash	compost	soil	loess
Hi	0.30	0.20	0.40	0.40
Cur	[0.20]	[0.10]	[0.30]	[0.40]
Lo	0.20	0.10	0.30	0.30

removal rate
 $E(y) = 74.5297$
 $d = 0.98119$

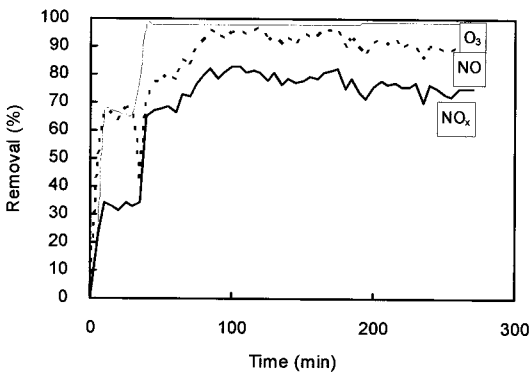


Fig. 6. Replication test plot of O₃, NO, NO_x degradation using the response optimization.

실험 영역내에서 사용된 수학적 모형으로 잘 설명할 수 있었다.

차후 본 연구결과를 토대로 질소산화물 제거를 위한 최적의 혼합비율의 산정과 동시에 토양 바이오 필터와의 반응시간의 최단기화(유입유량의 최대화), NO 산화를 위해 유입되는 O₃농도와 유량의 최소화, 최적의 습도 등을 기반으로 NO_x 제거율의 최대화를 위한 최적 조건을 도출할 예정이다. 또한 토양 미생물에 의한 생물학적 제거 등 제거기작에 대한 규명과 동시에 물질수지를 체계적으로 연구할 필요가 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구는 우리나라 대기오염과 실내오염의 주범이 되고 있는 자동차 배기가스 및 가정 내 연소기구 등에서 발생하는 질소산화물 제거를 위해 자연친화적인 토양바이오필터(연탄재, 퇴비, 토양, 황토)를 사용하였으며, 질소산화물 제거를 위한 최적의 토양 바이오필터 혼합비를 도출하는데 목적을 두었다. 또한 실험의 시행착오를 줄이기 위해 실험계획법을

이용하여 실험계획을 설정하여 실험을 실시하였으며 이를 통한 수학적 모형을 제시하였다.

본 실험 영역내에서 혼합물 분석법의 꼭지점 설계를 이용하여 질소산화물 제거를 위한 4가지 성분의 최적 혼합비율은 연탄재 20%, 퇴비 10%, 토양 30%, 황토 40%로 결정되었으며, 이때 기대되는 NO_x의 제거율은 74.5로 나타났다. 본 수학적 모형의 타당성 평가를 위해 동일 실험조건하에서 수학적 모형결과 나온 최적 혼합비율로 반복실험을 행한 결과 NO_x 제거율이 74.4%로 나타나 본 연구 영역내에서 최적 혼합비율 도출을 위한 수학적 모형이 타당하다는 것을 알 수 있었다.

차후 본 연구결과를 토대로 질소산화물 제거를 위한 최적의 혼합비율의 산정과 동시에 토양 바이오 필터와의 반응시간의 최단기화(유입유량의 최대화), NO 산화를 위해 유입되는 O₃농도와 유량의 최소화, 최적의 습도 등을 기반으로 NO_x 제거율의 최대화를 위한 최적 조건을 도출할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 동남보건대학 연구지원으로 수행됨을 감사드립니다

참고 문헌

- 1) Civitano L., 1993, Industrial application of pulsed corona processing to flue gas, non-thermal plasma techniques for pollution control, NATO ASI Series, 34, Part B, springer-verlag, berline, germany, 103-130.
- 2) Sathiamoorthy G., Shimizu K., Charkrabarti A., Dascalescu L., Furutu S., 1999, Chemical reaction kinetics and reactor modeling of NO_x removal in a Pulsed streamer corona discharge reactor, Ind. Eng. Chem., Res., 38, 1844-1855.

- 3) Mok Y. S., Nam I., 1999, Removal of nitric oxide in a Pulsed corona discharge reactor, *Chem. Eng, Technol.*, 22(6), 527-532.
- 4) Song Y., Choi Y., Kim H., Shin W., Keel S., Chung S., Choi K., Choi H., Kim S., Chang K., 1996, An experimental study of power saving technique in non-thermal plasma DeSO₂/DeNO_x process, *J. Korea Air Pollut. Res. Assoc.*, 12, 487-494.
- 5) Broer S., Hammer T., 2000, Selective catalytic reduction of nitrogen oxides by combining a Nitrogen oxides by combining a Non-Thermal Plasma and a V₂O₅-WO₃/TiO₂ catalyst, *Appl. Catal. B: Environ.*, 28, 101-111.
- 6) Penetrante B. M., Brusasco R. M., Merritt B. T., Vogtlin G. E., 1999, Environmental Applications of low temperature plasmas, *Pure Appl. Chem.*, 71(10), 1829-1835.
- 7) Rajanikanth B. S., Ravi V., 2001, Removal of NO_x from diesel engine exhaust using pulsed electric discharge coupled with a catalytic reactor, 12th Int, Symp. High Voltage Eng., Bangalore, India, 1283-1286.
- 8) Mok Y. S., Nam I., 1999, Positive Pulsed corona discharge process for simultaneous removal of SO₂ and NO_x from Iron-Ore sintering Flue Gas, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 27(4), 1188-1196.
- 9) Carlson D. A., Leiser C. P., 1996, Soil beds for the control of sewage odors, *Journal of the Water Pollution Control Association*, 38(5), 829-840.
- 10) Joseph S. D., Marc A. D., Todd S. W., 1999, *Biofiltration for air pollution control*, 1st ed., Lewis Publishers, New York, 12-17.
- 11) Leson G, Winer A. M., 1991, *Biofiltration An innovative air pollution control technology for VOC emissions*, AWMA, 41.
- 12) Ergas S. J., Schroeder E. D., Chang D. P. Y., Morton R., 1992, Control of volatile organic compound emissions from a POTW using a compost biofilter, Presentation at the 85th annual Meeting & Exhibition of AWMA, Kansas City, Missouri, USA, 92-116.
- 13) Utgikar V. P., 1993, Fundamental studies on the biodegradation of volatile organic chemicals in a biofilter, PH. D. Dissertation, University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio, USA.
- 14) Speiel Jr. G. E., McLay D. S., 1993, Biofilm reactors for treatment of gas streams containing chlorinated solvents, *J. of Environmental Engineering*, 119(4), 658-678.
- 15) Kim J. O., 1997, Gaseous TCE and PCE removal by an activated carbon biofilter, *Bio-process Engineering*, 16(6), 331-338.
- 16) Senior E., Kasali G. B., 1990, *Landfill Gas in Microbiology of Landfill Sites* edited by Senior E. CRC Press Inc., 113-158.