



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2019년08월07일
(11) 등록번호 10-2009128
(24) 등록일자 2019년08월02일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F01N 3/20 (2006.01) F01N 9/00 (2006.01)
(52) CPC특허분류
F01N 3/2066 (2013.01)
F01N 9/005 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0014465
(22) 출원일자 2019년02월07일
심사청구일자 2019년02월07일
(56) 선행기술조사문헌
US20040098974 A1*
JP5837312 B2*
JP2011163164 A*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
서울대학교산학협력단
서울특별시 관악구 관악로 1 (신림동)
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
이종민
서울특별시 관악구 관악로 1 서울대학교 공과대학 302동 723호
김연수
서울특별시 관악구 관악로 1 서울대학교 공과대학 302동 713호
이관영
서울특별시 용산구 한강대로 26, 한강대우트럼프 월드 3차 101동 1807호
(74) 대리인
강문호

전체 청구항 수 : 총 8 항

심사관 : 지항재

(54) 발명의 명칭 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치 및 방법

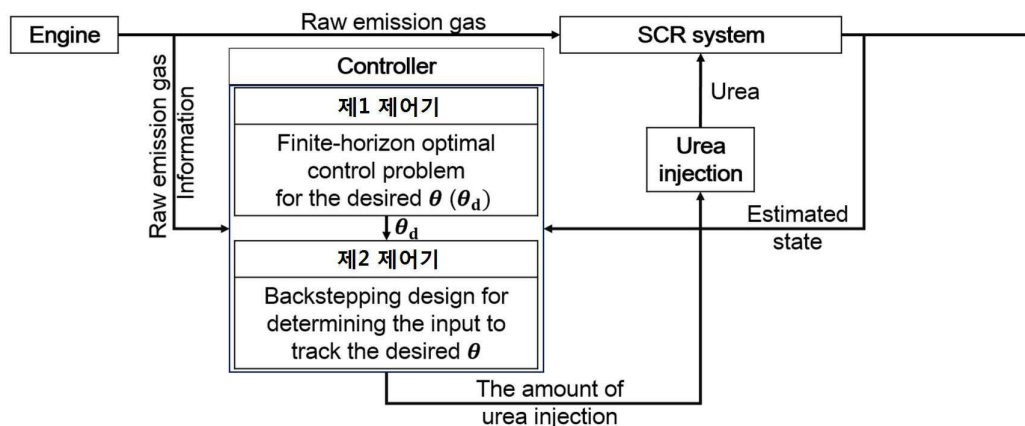
(57) 요약

선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치 및 방법이 제공된다.

상기 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치는, 선택적 촉매 환원 시스템을 제어하는 장치로서, 상기 선택적 촉매 환원 시스템의 촉매의 커버리지 분율의 설정값을 결정하는 제1 제어기 및 상기 커버리지 분율의 설정값을 달성하는 요소 주입량을 결정하는 제2 제어기를 포함한다.

상기 선택적 촉매 환원 시스템 제어 방법은, 선택적 촉매 환원 시스템을 제어하는 방법으로서, 상기 선택적 촉매 환원 시스템의 촉매의 커버리지 분율의 설정값을 결정하는 단계 및 상기 커버리지 분율의 설정값을 달성하는 요소 주입량을 결정하는 단계를 포함한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

F01N 2610/02 (2013.01)

F01N 2610/1453 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2016R1A5A1009592

부처명 과학기술정보통신부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 선도연구센터사업

연구과제명 초저에너지 자동차 초저배출 사업단

기 여 율 1/1

주관기관 고려대학교 산학협력단

연구기간 2019.01.01 ~ 2019.12.31

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

선택적 촉매 환원 시스템을 제어하는 장치로서,

상기 선택적 촉매 환원 시스템의 촉매의 커버리지 분율의 설정값을 결정하는 제1 제어기; 및

상기 커버리지 분율의 설정값을 달성하는 요소 주입량을 결정하는 제2 제어기를 포함하고,

상기 제1 제어기는 모델 예측 제어를 이용하여 상기 커버리지 분율의 설정값을 결정하고,

상기 제1 제어기는 유한 수평 최적 제어 문제를 해결하며,

상기 유한 수평 최적 제어 문제는 하기 식 17을 이용하는 것을 특징으로 하는 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치.

[식 17]

$$\begin{aligned} & \min_{\bar{\theta} \in S(T_s)} \int_{t_k}^{t_k+T_p} \left(\left\| \frac{\bar{C}_1(s)}{C_{1,in}} \right\|_{Q_1}^2 + \left\| \frac{\bar{C}_2(s)}{C_{2,in}} \right\|_{Q_2}^2 + \left\| \bar{\theta}(s) \right\|_{R_1}^2 \right) ds \\ & \text{subject to } \frac{d\bar{C}_1}{dt} = -d_4 \frac{\bar{C}_1}{L} + d_4 \frac{C_{1,in}}{L} \\ & \quad + \frac{1-\epsilon}{\epsilon} (-R_3 - 4R_4 - R_5) \\ & \quad \frac{d\bar{C}_2}{dt} = -d_4 \frac{\bar{C}_2}{L} + d_4 \frac{C_{2,in}}{L} \\ & \quad + \frac{1-\epsilon}{\epsilon} (R_3 - R_5 - 3R_6 - 2R_7) \\ & \quad \frac{d\bar{C}_3}{dt} = -d_4 \frac{\bar{C}_3}{L} + d_4 \frac{C_{3,in}}{L} \\ & \quad + \frac{1-\epsilon}{\epsilon} (-1.5R_2 - 0.5R_3 - R_4) \\ & \quad \bar{C}_1(t_k) = C_1(t_k), \bar{C}_2(t_k) = C_2(t_k), \bar{C}_3(t_k) = C_3(t_k) \\ & \quad C_{j,in} = C_{j,in}(t_k) \text{ for } j = 1, 2, 3 \\ & \quad d_4 = d_4(t_k), d_5 = d_5(t_k), \\ & \quad \theta(t_i) \in [0, 1], \quad i = k, k+1, \dots, k+n_p-1 \end{aligned}$$

(상기 식 17에서,

C는 가스의 농도로서 C₁, C₂ 및 C₃은 t_k에서의 값을 초기 조건으로 갖는 예측 상태를 나타내고,

S(T_s)는 간격 T_s를 갖는 구분되는 상수 함수의 집합을 나타내고,

T_p는 T_s의 배수인 예측 수평선을 나타내고,

$\bar{\theta}$ 는 시간 간격 T_s를 갖는 T_p 동안 0차-홀드 방식으로 가상 제어 θ 를 나타내며,

θ 는 커버리지 분율을 나타냄)

청구항 2

삭제

청구항 3

삭제

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 제1 제어기는 예측 수평 동안의 목적 함수 값을 최소화하는 제어 수평 동안의 최적의 커버리지 분율의 설정값을 생성하는 것을 특징으로 하는 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 제1 제어기는 비선형 시스템을 선형화하는 것을 특징으로 하는 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 제2 제어기는 백스테핑 제어를 이용하여 상기 요소 주입량을 결정하는 것을 특징으로 하는 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치.

청구항 7

선택적 촉매 환원 시스템을 제어하는 방법으로서,

상기 선택적 촉매 환원 시스템의 촉매의 커버리지 분율의 설정값을 결정하는 단계; 및

상기 커버리지 분율의 설정값을 달성하는 요소 주입량을 결정하는 단계를 포함하고,

상기 커버리지 분율의 설정값은 모델 예측 제어를 이용하여 결정되며,

상기 모델 예측 제어는 유한 수평 최적 제어 문제를 해결하는 것을 포함하고,

상기 유한 수평 최적 제어 문제는 하기 식 17을 이용하는 것을 특징으로 하는 선택적 촉매 환원 시스템 제어 방법.

[식 17]

$$\begin{aligned}
 & \min_{\bar{\theta} \in S(T_s)} \int_{t_k}^{t_k+T_p} \left(\left\| \frac{\bar{C}_1(s)}{C_{1,in}} \right\|_{Q_1}^2 + \left\| \frac{\bar{C}_2(s)}{C_{2,in}} \right\|_{Q_2}^2 + \|\bar{\theta}(s)\|_{R_1}^2 \right) ds \\
 & \text{subject to } \frac{d\bar{C}_1}{dt} = -d_4 \frac{\bar{C}_1}{L} + d_4 \frac{C_{1,in}}{L} \\
 & \quad + \frac{1-\epsilon}{\epsilon} (-R_3 - 4R_4 - R_5) \\
 & \quad \frac{d\bar{C}_2}{dt} = -d_4 \frac{\bar{C}_2}{L} + d_4 \frac{C_{2,in}}{L} \\
 & \quad + \frac{1-\epsilon}{\epsilon} (R_3 - R_5 - 3R_6 - 2R_7) \\
 & \quad \frac{d\bar{C}_3}{dt} = -d_4 \frac{\bar{C}_3}{L} + d_4 \frac{C_{3,in}}{L} \\
 & \quad + \frac{1-\epsilon}{\epsilon} (-1.5R_2 - 0.5R_3 - R_4) \\
 & \quad \bar{C}_1(t_k) = C_1(t_k), \bar{C}_2(t_k) = C_2(t_k), \bar{C}_3(t_k) = C_3(t_k) \\
 & \quad C_{j,in} = C_{j,in}(t_k) \text{ for } j = 1, 2, 3 \\
 & \quad d_4 = d_4(t_k), d_5 = d_5(t_k), \\
 & \quad \theta(t_i) \in [0, 1], \quad i = k, k+1, \dots, k+n_p-1
 \end{aligned}$$

(상기 식 17에서,

C는 가스의 농도로서 C₁, C₂ 및 C₃은 t_k에서의 값을 초기 조건으로 갖는 예측 상태를 나타내고,

S(T_s)는 간격 T_s를 갖는 구분되는 상수 함수의 집합을 나타내고,

T_p는 T_s의 배수인 예측 수평선을 나타내고,

$\bar{\theta}$ 는 시간 간격 T_s를 갖는 T_p 동안 0차-홀드 방식으로 가상 제어 θ 를 나타내며,
 θ 는 커버리지 분율을 나타냄)

청구항 8

삭제

청구항 9

삭제

청구항 10

제 7 항에 있어서,

상기 커버리지 분율의 설정값은 예측 수평 동안의 목적 함수 값을 최소화하는 제어 수평 동안의 최적의 값으로 생성되는 것을 특징으로 하는 선택적 촉매 환원 시스템 제어 방법.

청구항 11

제 7 항에 있어서,

상기 커버리지 분율의 설정값을 결정하는 단계는 비선형 시스템을 선형화하는 것을 포함하는 것을 특징으로 하는 선택적 촉매 환원 시스템 제어 방법.

청구항 12

제 7 항에 있어서,

상기 요소 주입량은 백스테핑 제어를 이용하여 결정되는 것을 특징으로 하는 선택적 촉매 환원 시스템 제어 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 디젤 엔진은 가솔린 엔진에 비해 효율이 높고 CO₂ 배출량이 적은 이점이 있다. 그러나 디젤 엔진은 인간의 건강에 해로운 NO_x 배출의 환경 문제를 야기한다. NO_x 배출량에 대한 규제를 위해 배출 기준을 강화한 실제 주행 시험이 채택되었다. NO_x 제거를 위한 다양한 후 처리 시스템이 제안되었는데, 그 중 요소-선택적 촉매 환원(urea-selective catalytic reduction)은 중대형 및 소형 차량 모두를 위한 유망한 후 처리 시스템이다.

[0003] 선택적 촉매 환원 시스템에서 NH₃는 NO_x 환원을 위한 환원제로 사용되며 선택적 촉매 환원의 고온 업스트림(upstream)에 요소를 주입하여 얻어진다. NH₃는 SCR 촉매에 저장되고 엔진 배출 가스에서 NO_x를 제거하는데 사용된다. 배기관 내 NH₃ 슬립(slip)은 SCR 시스템의 문제점이다. 따라서, 낮은 NH₃ 슬립 및 낮은 요소 사용으로 NO_x 배출 조절을 충족시키도록 요소 주입의 타이밍 및 양이 제어되어야 한다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 본 발명은 우수한 성능을 갖는 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치를 제공한다.

[0005] 본 발명은 선택적 촉매 환원 시스템을 효과적으로 제어할 수 있는 방법을 제공한다.

과제의 해결 수단

[0006] 본 발명의 실시예들에 따른 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치는, 선택적 촉매 환원 시스템을 제어하는 장치로서, 상기 선택적 촉매 환원 시스템의 촉매의 커버리지 분율의 설정값을 결정하는 제1 제어기 및 상기 커버리지 분율의 설정값을 달성하는 요소 주입량을 결정하는 제2 제어기를 포함한다.

[0007] 상기 제1 제어기는 모델 예측 제어를 이용하여 상기 커버리지 분율의 설정값을 결정할 수 있다. 상기 제1 제어기는 유한 수평 최적 제어 문제를 해결할 수 있다. 상기 제1 제어기는 예측 수평 동안의 목적 함수 값을 최소화하는 제어 수평 동안의 최적의 커버리지 분율의 설정값을 생성할 수 있다. 상기 제1 제어기는 비선형 시스템을 선형화할 수 있다.

[0008] 상기 제2 제어기는 백스테핑 제어를 이용하여 상기 요소 주입량을 결정할 수 있다.

[0009] 본 발명의 실시예들에 따른 선택적 촉매 환원 시스템 제어 방법은, 선택적 촉매 환원 시스템을 제어하는 방법으로서, 상기 선택적 촉매 환원 시스템의 촉매의 커버리지 분율의 설정값을 결정하는 단계 및 상기 커버리지 분율의 설정값을 달성하는 요소 주입량을 결정하는 단계를 포함한다.

[0010] 상기 커버리지 분율의 설정값은 모델 예측 제어를 이용하여 결정될 수 있다. 상기 모델 예측 제어는 유한 수평 최적 제어 문제를 해결할 수 있다. 상기 커버리지 분율의 설정값은 예측 수평 동안의 목적 함수 값을 최소화하는 제어 수평 동안의 최적의 값으로 생성될 수 있다. 상기 커버리지 분율의 설정값을 결정하는 단계는 비선형 시스템을 선형화하는 것을 포함할 수 있다.

[0011] 상기 요소 주입량은 백스테핑 제어를 이용하여 결정될 수 있다.

발명의 효과

[0012] 본 발명의 실시예들에 따른 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치는 우수한 성능을 가질 수 있다. 예를 들어, 상기 제어 장치는 선택적 촉매 환원 시스템의 요소 주입량을 빠르게 계산할 수 있다. 따라서 상기 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치는 자동차의 선택적 촉매 환원 시스템 후처리 제어에 적합하다. 상기 제어 장치는 높은 NH_3 사용 효율을 나타낸다. 또, 선택적 촉매 환원 시스템이 효과적으로 제어될 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0013] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치의 모식도이다.
도 2 내지 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 선택적 촉매 환원 제어 방법의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0014] 이하, 실시예들을 통하여 본 발명을 상세하게 설명한다. 본 발명의 목적, 특징, 장점은 이하의 실시예들을 통해 쉽게 이해될 것이다. 본 발명은 여기서 설명되는 실시예들에 한정되지 않고, 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 여기서 소개되는 실시예들은 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되는 것이다. 따라서, 이하의 실시예들에 의하여 본 발명이 제한되어서는 안 된다.

[0015] 본 명세서에서 제1, 제2 등의 용어가 다양한 요소들(elements)을 기술하기 위해서 사용되었지만, 상기 요소들이 이 같은 용어들에 의해서 한정되어서는 안 된다. 이러한 용어들은 단지 상기 요소들을 서로 구별시키기 위해서 사용되었을 뿐이다.

[가상 SCR 시스템]

[0019] 가상 SCR 시스템에서 1 차원 동적 모델의 가정과 지배 방정식은 다음과 같다.

가정

- [0022] - 균일한 단일 채널 및 채널 간 균일한 가스 분배
- [0023] - 플러그 흐름 및 압력 강하는 무시함
- [0024] - 비압축성 가스
- [0025] - 반응에 의한 엔탈피 변화만을 고려
- [0026] - 방사선 및 전도에 의한 열 전달은 무시함
- [0027] - 워시코트(washcoat) 기공 내의 가스 온도는 워시코트 온도와 동일함

지배 방정식

[0030] 벌크 가스의 농도(C_g)는 식 1로 표현될 수 있다.

[0031] [식 1]

$$\frac{\partial C_{g,j}}{\partial t} = -\frac{k_{m,j}G_a}{\varepsilon}(C_{g,j} - C_{wc,j}) - u_{flow}\frac{\partial C_{g,j}}{\partial z}$$

[0033] 워시코트 기공 내 가스의 농도(C_{wc})는 식 2로 표현될 수 있다.

[0034] [식 2]

$$\frac{dC_{wc,j}}{dt} = \frac{k_{m,j}G_a}{\varepsilon_{wc}(1 - \varepsilon)}(C_{g,j} - C_{wc,j}) + \frac{\sum_{i=1}^{Rxn} \nu_{j,i}R_i}{\varepsilon_{wc}}$$

[0036] 촉매의 커버리지 분율(θ)은 식 3으로 표현될 수 있다.

[0037] [식 3]

$$\frac{d\Theta_m}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^{Rxn} \nu_{m,i} R_i}{\Gamma}$$

[0038]

[0039] 벌크 가스의 온도(T_g)는 식 4로 표현될 수 있다.

[0040] [식 4]

$$\rho_g \tilde{c}_p \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{U_o G_a}{\varepsilon} (T_{wc} - T_g) - u_{flow} \rho_g \tilde{c}_p \frac{\partial T_g}{\partial z}$$

[0041]

[0042] 워시코트 기공 내 가스의 온도(T_{wc})는 식 5로 표현될 수 있다.

[0043] [식 5]

$$\left(\varepsilon_{wc} \rho_{wc} \tilde{c}_{p,wc} + \frac{\rho_s \tilde{c}_{p,s}}{\varepsilon_s} \right) \frac{dT_{wc}}{dt} = \frac{\alpha}{\varepsilon_s} (T_e - T_{wc}) + \frac{U_o G_a}{1 - \varepsilon} (T_g - T_{wc}) - \sum_{i=1}^{Rxn} R_i \Delta H_{Rxn,j,i}(T_{wc})$$

[0044]

[0045] 상기 식 1 내지 5에서,

[0046] R_i : i번째 반응의 반응 속도($\text{mol/m}^3 \text{s}$)

[0047] u_{flow} : 벌크 가스 속도(m/s)

[0048] α : 고상과 주위 간 전체 열 전달 계수(Overall heat transfer coefficient between solid phase and surroundings) ($\text{J/m}^2 \text{Ks}$)

[0049] ΔH_{Rxn} : 반응열(J/mol)

[0050] H, ε_{wc} : 양론 계수, 워시코트 기공도(Washcoat porosity)

[0051] Γ : 표면 사이트 밀도(mol/m^2)

[0052] $\rho_s \tilde{c}_{p,s}$: 고체 열 용량($\text{J/m}^3 \text{K}$)

[0053] ρ_{wc} : 워시코트 밀도(kg/m^3)

[0054] $\tilde{c}_{p,wc}$: 워시코트 비열 용량(J/kgK)

[0055] $\varepsilon, \varepsilon_{wc}$: 공극 분율, 워시코트의 공극 분율

[0056] d_{hyd} : 수력학적 직경(m)

[0057] G_a : 기하학적 표면적 대 촉매 부피 비(m^{-1})

[0058] $R_{\geq 0}^n$: n 차원 실제 공간(n-dimensional real space with nonnegative entries)

[0059] T_e : 주위 온도(K)

[0060] U_o : 벌크 gas와 표면 gas 간 전체 열 전달 계수(J/m^2Ks)

[0061] Rxn : 고려한 SCR 글로벌 반응(global reaction)의 수(본 발명의 실시예에서는 7에 해당함)

v : 반응 양론 계수

ϵ_s : 고체의 보이드 분율(void fraction)

[0062] 제어 중심 SCR 모델]

[0064] SCR에 대한 제어 중심 모델은 반응기가 연속 교반 탱크 반응기(CSTR)라고 가정하고 에너지 수지식을 무시하여 사용될 수 있다.

[0065] 벌크 gas의 농도(C_g)는 식 6으로 표현될 수 있다.

[0066] [식 6]

$$\frac{dC_{g,j}}{dt} = \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \sum_{i=1}^{Rxn} \nu_{j,i} R_i - u_{flow} \frac{C_{g,j} - C_{g,j,inlet}}{L}$$

[0067]

[0068] 촉매의 커버리지 분율(Θ)은 식 7로 표현될 수 있다.

[0069] 상기 식 6에서 J는 gas 내 각 성분, NO, NO₂, O₂, 및 NH₃를 나타내고, L은 SCR의 길이를 나타낸다.

[0070] [식 7]

$$\frac{d\Theta_m}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^{Rxn} \nu_{m,i} R_i}{\Gamma}$$

[0071]

[0073] SCR 반응]

[0075] SCR에서 반응의 종류에 따른 반응 속도는 표 1과 같다.

[0076] [표 1]

Reaction	Reaction kinetics
$NH_3 + S1 \leftrightarrow NH_3 - S1$	$R_1 = k_{1f} C_{NH_3} (1 - \theta) \Gamma - k_{1b} \theta \Gamma$
$2NH_3 - S1 + \frac{3}{2} O_2 \rightarrow N_2 + 3H_2O + 2S1$	$R_2 = k_2 C_{O_2} \theta \Gamma$
$NO + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow NO_2$	$R_3 = k_{3f} C_{O_2}^{0.5} C_{NO} - k_{3b} C_{NO_2}$
$4NH_3 - S1 + 4NO + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O + 4S1$	$R_4 = k_4 C_{NO} \theta \Gamma$
$2NH_3 - S1 + NO + NO_2 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O + 2S1$	$R_5 = k_5 C_{NO} C_{NO_2} \theta \Gamma$
$4NH_3 - S1 + 3NO_2 \rightarrow 3.5N_2 + 6H_2O + 4S1$	$R_6 = k_6 C_{NO_2} \theta \Gamma$
$2NH_3 - S1 + 2NO_2 \rightarrow N_2 + N_2O + 3H_2O + 2S1$	$R_7 = k_7 C_{NO_2} \theta \Gamma$

[0077]

[0079] z-서브시스템의 분석]

[0081] 이하에서 간략화를 위해 각 gas의 농도 [$C_{g,NO}$, $C_{g,NO2}$, $C_{g,O2}$, $C_{g,NH3}$]는 [C_1 , C_2 , C_3 , C_4]로 표시된다. 디스터번스 [$C_{g,NO,inlet}$, $C_{g,NO2,inlet}$, $C_{g,O2,inlet}$, u_{flow} , $T_{g,inlet}$]는 [$C_{1,in}$, $C_{2,in}$, $C_{3,in}$, d_4 , d_5]으로 표시되고, [$C_{1,in}$, $C_{2,in}$, $C_{3,in}$]은 단순히 C_{in} 으로 표시된다. 모든 디스터번스의 값은 ECU(Engine Control Unit) 계산이나 센서 측정을 통해 모든 샘플링 시간에 얻어질 수 있다. NO_x 농도만이 일반적으로 이용 가능하지만, NO₂ 성분은 대부분의 작동에서 엔진 배출 gas에서 NO_x의 10%라는 사실을 이용하여 NO 및 NO₂ 농도는 근사화된다.

[0083] 첫째, SCR 모델은 단순화된 표기법으로 그리고 반응 속도의 합계를 확장함으로써 다음과 같이 재작성된다. z는

$[C_1, C_2, C_3]^T$ 를 나타낸다.

[식 8]

$$\frac{dz}{dt} = f_0(z, C_{in}, d_4, d_5) + g_0(d_5)\theta$$

[식 9]

$$\frac{d\theta}{dt} = f_1(z, \theta, d_5) + g_1(z, \theta, d_5)C_4$$

[식 10]

삭제

$$\frac{dC_4}{dt} = f_2(z, \theta, C_4, d_4, d_5) + g_2(d_4)C_{4,in}$$

상기 식 8 내지 10에서,

d_5 : 엔진에서 SCR로 들어오는 가스의 온도(엔진 방출 가스의 온도, $T_{g, inlet}$)

[식 11]

$$f_0(z, C_{in}, d_4, d_5) = \begin{bmatrix} -d_4 \frac{C_1}{L} + d_4 \frac{C_{1,in}}{L} + \frac{1-\epsilon}{\epsilon}(-R_3) \\ -d_4 \frac{C_2}{L} + d_4 \frac{C_{2,in}}{L} + \frac{1-\epsilon}{\epsilon}(R_3) \\ -d_4 \frac{C_3}{L} + d_4 \frac{C_{3,in}}{L} + \frac{1-\epsilon}{\epsilon}(-0.5R_3) \end{bmatrix}$$

$$g_0(z, d_5) = \begin{bmatrix} \frac{1-\epsilon}{\epsilon}(-4k_4C_1\Gamma - k_5C_1C_2\Gamma) \\ \frac{1-\epsilon}{\epsilon}(-k_5C_1C_2\Gamma - 3k_6C_2\Gamma - 2k_7C_2\Gamma) \\ \frac{1-\epsilon}{\epsilon}(-1.5k_2C_3\Gamma - k_4C_1\Gamma) \end{bmatrix}$$

$$f_1(z, \theta, d_5) = \frac{-2R_2 - 4R_4 - 2R_5 - 4R_6 - 2R_7}{\Gamma} - k_{1b}\theta$$

$$g_1(z, \theta, d_5) = k_{1f}(1 - \theta)$$

$$f_2(z, \theta, C_4, d_4, d_5) = -d_4 \frac{C_4}{L} + \frac{1-\epsilon}{\epsilon}(-R_1)$$

$$g_2(d_4) = \frac{d_4}{L}$$

R_1 은 C_4 , θ , 및 d_5 의 함수이고, R_j ($j=2,4,5,6,7$)는 z , θ , 및 d_5 의 함수이다.

[0093] [식 12]

$$V_0 = \frac{1}{2}C_1^2 + \frac{1}{2}C_2^2 + \frac{1}{2}C_3^2,$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 = & C_1[-d_4 \frac{C_1}{L} + d_4 \frac{C_{1,in}}{L} + \frac{1-\epsilon}{\epsilon}(-R_3 - 4R_4 - R_5)] \\ & + C_2[-d_4 \frac{C_2}{L} + d_4 \frac{C_{2,in}}{L} + \frac{1-\epsilon}{\epsilon}(R_3 - R_5 - 3R_6 - 2R_7)] \\ & + C_3[-d_4 \frac{C_3}{L} + d_4 \frac{C_{3,in}}{L} + \frac{1-\epsilon}{\epsilon}(-1.5R_2 - 0.5R_3 - R_4)] \end{aligned}$$

[0094]

[0095] R_1 과 R_3 을 제외한 다른 반응 속도는 역 반응이 없기 때문에 항상 0보다 크다. 따라서, 식 13이 얻어진다.

[0096] [식 13]

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 \leq & -d_4 \frac{C_1^2}{L} + d_4 \frac{C_{1,in}C_1}{L} + \underbrace{\frac{1-\epsilon}{\epsilon}(-R_3)C_1}_{B_1} \\ & - d_4 \frac{C_2^2}{L} + d_4 \frac{C_{2,in}C_2}{L} + \underbrace{\frac{1-\epsilon}{\epsilon}(R_3)C_2}_{B_2} \\ & - d_4 \frac{C_3^2}{L} + d_4 \frac{C_{3,in}C_3}{L} + \underbrace{\frac{1-\epsilon}{\epsilon}(-0.5R_3)C_3}_{B_3} \end{aligned}$$

[0097]

[0098] R_3 의 표현을 정리하면 식 14가 얻어진다.

[0099] [식 14]

$$\begin{aligned} B_1+B_2+B_3 = & \frac{1-\epsilon}{\epsilon}[k_{3f}C_3^{0.5}C_1(-C_1+C_2-0.5C_3) \\ & - k_{3b}C_2(-C_1+C_2-0.5C_3)] \\ = & \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \underbrace{(-C_1+C_2-0.5C_3)}_{B_4} \underbrace{(k_{3f}C_3^{0.5}C_1 - k_{3b}C_2)}_{B_5} \end{aligned}$$

[0100]

[0101] C_{O_2} 는 C_{NO} 와 C_{NO_2} 보다 훨씬 크기 때문에 항상 $B_4 < 0$ 을 유지하며 0이 되지 않는다. 배기관 배출 가스의 O_2 농도는 일반적으로 퍼센트 단위(10^{-2})로 기록되는 반면, NO 및 NO_2 농도는 ppm 단위(10^{-6})로 작성된다. B_5 는 $B_1+B_2+B_3 \leq 0$ 가 되도록 0보다 커야 하지만 $B_1+B_2+B_3 > 0$ 이 되도록 음의 값이 될 수 있다. 그러나, 식 13에서 $-d_4C_3^2/L$ 은 $B_1+B_2+B_3$ 의 양성(positivity)을 보상할 수 있다.

[0102] 엔진에서 배출되는 산소는 과도하며, SCR 시스템의 산소는 소량의 NO_x 및 소량의 NH_3 와 최대 1:1의 몰비로 반응한다. 따라서, SCR에서 소비되는 산소는 매우 적다. 또 d_4 의 범위는 일반적으로 구동 중에 0.1 ~ 10m/s이다 (4990초 데이터의 경우 d_4 의 최소값 및 최대값은 각각 0.4238 및 7.7098임). $d_4C_3^2/L$ 의 하한이 B_L 로 표시될 때, B_L 은 $B_1+B_2+B_3$ 보다 크다. $0 < s_1 < 1$ 에서 식 15가 얻어진다.

[0103] [식 15]

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 \leq & -d_4 s_1 \frac{C_1^2}{L} + d_4 \frac{C_{1,in} C_1}{L} - d_4 s_1 \frac{C_2^2}{L} + d_4 \frac{C_{2,in} C_2}{L} \\ & - d_4 s_1 \frac{C_3^2}{L} + d_4 \frac{C_{3,in} C_3}{L} \end{aligned}$$

[0104]

[0105] 최종적으로, $0 < \alpha < 1$ 에서 식 16이 얻어진다.

[0106] [식 16]

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 \leq & -(1-\alpha) \frac{d_4 s_1}{L} \|z\|^2 - \alpha \frac{d_4 s_1}{L} \|z\|^2 \\ & + d_4 \frac{C_{1,in} C_1}{L} + d_4 \frac{C_{2,in} C_2}{L} + d_4 \frac{C_{3,in} C_3}{L} \\ \leq & -(1-\alpha) \frac{d_4 s_1}{L} \|z\|^2, \quad \forall \|z\| \geq \frac{\|C_{in}\|}{\alpha s_1} \end{aligned}$$

[0107]

[0108] $f_0(z, C_{in}, d_4, d_5)$ 는 모든 $z(\in \mathbb{R}^3 \geq 0)$ 및 $C_{in}(\in \mathbb{R}^3 \geq 0)$ 에 대하여 국부적으로 립쉬츠(Lipschitz) 함수이다. 연속 미분가능 함수 V_0 와 식 16으로, z -서브시스템(식 8)은 $d_4(>0)$, d_5 , 및 θ 의 임의의 경계값에 불구하고, 디스터번스(C_{in})에 대하여 IS(input to state) 안정성을 갖는다.

[0110] **[모델 예측 제어와 통합된 백스테핑 제어]**

[0112] 모델 예측 제어는 현재의 상태를 알고 있는 상황에서, 모델을 기반으로 앞으로 가능한 입력 조작 시나리오에 대응되는 미래의 상태를 예측하고 그 미래의 상태들은 기반으로 정해진 목적함수를 최소로 만드는 최적의 입력 조작 시나리오를 찾아 그 중 현재의 입력을 명령내리는 제어이다. 이러한 작업을 매초 진행해 나가게 된다. 고려할 미래의 입력 조작 가능한 시간 길이(duration)를 제어 수평(control horizon, H_c)이라 하며 이와 모델에 기반하여 미래의 상태를 예측하는 시간 길이(duration)를 예측 수평(prediction horizon, H_p)이라고 부른다.

[0113] $\dot{x} = f(x, u)$ (x 는 상태변수, u 는 입력변수)의 비선형 상미분 방정식 시스템(nonlinear ordinary differential equation system) 모델이 있을 때 해당 모델을 사용하여 가능한 입력 시나리오에 대응되는 미래의 시스템 상태를 예측하는 일은 지나치게 계산 시간이 오래 걸리게 된다. 따라서 이 비선형 시스템을 연속적으로 선형화시키는 방법을 사용하게 된다. 예를 들어, k 시점에서 x_k 상태의 비선형 시스템에 일정한 입력 u_k 가 들어오는 경우, 비선형 시스템을 선형화한 뒤,

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{k+j|k} &= \frac{\partial f}{\partial x} | (x = F_{j \bullet t_s}(x_{k|k}, u_{k-1}), u = u_{k-1}) \\ \tilde{B}_{k+j|k} &= \frac{\partial f}{\partial u} | (x = F_{j \bullet t_s}(x_{k|k}, u_{k-1}), u = u_{k-1}) \quad (j=0) \end{aligned}$$

[0114]

[0115] 이산 시간 시스템(discrete time system)으로 변환하면 다음 식이 된다.

$$\begin{aligned} A_{k+j|k} &= \exp(\tilde{A}_{k+j|k} t_s) \\ B_{k+j|k} &= \int_0^{t_s} \exp(\tilde{A}_{k+j|k} \tau) d\tau \tilde{B}_{k+j|k} \quad (j=0) \end{aligned}$$

[0116]

$$x_{k+1|k} \approx F_{t_s}(x_{k|k}, u_{k-1}) + B_{k|k}(u_k - u_{k-1})$$

[0117]

[0118] k 시점의 정보를 기반으로 $k+1$ 시점의 상태 변수 $x_{k+1|k}$ 를 구할 수 있다.

[0119] 위 식에서 여기서, $F_{t_s}(x_{k-1}, u_{k-1})$ 은 x_{k-1} 가 초기 조건이며 일정한 입력 u_{k-1} 가 들어온다고 할 때 1 샘플 시간(t_s)

동안 $\dot{x} = f(x, u)$ 을 적분함으로 얻어지는 상태 벡터를 의미한다.

- [0120] 위 과정을 예측 수평까지 진행을 하고 민감도(sensitivity matrix)인 A와 B가 예측 수평 동안 일정하다는 가정 하에 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_{k+1|k} \\ x_{k+2|k} \\ \vdots \\ x_{k+H_p|k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{t_s}(x_k, u_{k-1}) \\ F_{2t_s}(x_k, u_{k-1}) \\ \vdots \\ F_{H_p t_s}(x_k, u_{k-1}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{k|k} & 0 & \cdots & 0 \\ A_{k|k}B_{k|k} + B_{k|k} & B_{k|k} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} A_{k|k}^i B_{k|k} & \cdots & \cdots & B_{k|k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+H_p-1} \end{bmatrix}$$

- [0121] 상기 식은 k 시점에서의 정보(x_k, u_k)를 기반으로 미래의 예측 수평 동안의 시스템 상태를 예측해주는 식이다.
- [0122] 복잡한 상미분 방정식은 예측 수평 동안 한번만 풀면 되며 입력이 달라짐에 따라 상태가 달라지는 효과는 식의 오른쪽 두번째 항(입력 변화에 선형)으로 모사가 된다. 이로 인하여 제어 수평 동안 가능한 입력 시나리오에 따른 예측 수평의 시스템 상태를 계산하기 위해서는 단순히 비선형 상미분 방정식을 한번 풀고 이에 각 입력 시나리오에 해당하는 입력 변화를 민감도 매트릭스(A,B)로 이루어진 행렬에 곱하여 구한 값을 더하면 된다.

- [0123] 백스테핑 제어는 아래와 같이 스트릭트-피드백 형태(strict-feedback form)로 나타낼 수 있는 시스템에 활용할 수 있는 제어 기법으로, 내부 시스템을 안정화 시키도록 가상의 제어 입력들을 설계하고 실제 입력들은 그 설계된 가상의 제어 입력을 달성하도록 설계가 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_0(x_1) + g_0(x_1)z_1 \\ \dot{z}_1 &= f_1(x_1, z_1) + g_1(x_1, z_1)z_2 \\ &\vdots \\ \dot{z}_i &= f_i(x_1, z_1, \dots, z_i) + g_i(x_1, z_1, \dots, z_i)z_{i+1} \\ &\vdots \\ \dot{z}_n &= f_n(x_1, z_1, \dots, z_n) + g_n(x_1, z_1, \dots, z_n)u \end{aligned}$$

- [0124]
- [0125] 위와 같은 시스템을 예로 설명하면, 우선적으로 x_1 시스템에 초점을 맞추어, z_1 을 가상의 입력으로 생각하여 x_1 을 안정화시킬 수 있도록 z_1 의 원하는 값이 설계된다. 그 후, z_2 을 (x_1, z_1)-시스템의 가상 입력으로 보아, 원하는 z_1 값을 달성하도록 원하는 z_2 값을 설계한다. 이런 방식으로 계속 진행하며 결국 시스템의 실제 입력인 u 를 설계하는 기법이다.

- [0127] z-서브시스템 분석 하에서, 촉매의 커버리지 분율(θ)은 디스터번스 정보를 이용하여 목적 함수를 최적화하기 위해 유한 수평 최적 제어 문제(finite-horizon optimal control problem, FHOCPP)를 해결하는 것에 의해 결정될 수 있다. 또, 조작되는 변수 $C_{4, in}$ 은 원하는 θ 를 얻기 위한 백스테핑 제어(backstepping control)에 의해 결정될 수 있다.

- [0129] 1 단계 : 유한 수평 최적 제어 문제(Finite-horizon optimal control problem)

[0130] [식 17]

$$\begin{aligned}
 & \min_{\bar{\theta} \in S(T_s)} \int_{t_k}^{t_k+T_p} \left(\left\| \frac{\bar{C}_1(s)}{C_{1,in}} \right\|_{Q_1}^2 + \left\| \frac{\bar{C}_2(s)}{C_{2,in}} \right\|_{Q_2}^2 + \|\bar{\theta}(s)\|_{R_1}^2 \right) ds \\
 & \text{subject to } \frac{d\bar{C}_1}{dt} = -d_4 \frac{\bar{C}_1}{L} + d_4 \frac{C_{1,in}}{L} \\
 & \quad + \frac{1-\epsilon}{\epsilon} (-R_3 - 4R_4 - R_5) \\
 & \quad \frac{d\bar{C}_2}{dt} = -d_4 \frac{\bar{C}_2}{L} + d_4 \frac{C_{2,in}}{L} \\
 & \quad + \frac{1-\epsilon}{\epsilon} (R_3 - R_5 - 3R_6 - 2R_7) \\
 & \quad \frac{d\bar{C}_3}{dt} = -d_4 \frac{\bar{C}_3}{L} + d_4 \frac{C_{3,in}}{L} \\
 & \quad + \frac{1-\epsilon}{\epsilon} (-1.5R_2 - 0.5R_3 - R_4) \\
 & \quad \bar{C}_1(t_k) = C_1(t_k), \bar{C}_2(t_k) = C_2(t_k), \bar{C}_3(t_k) = C_3(t_k) \\
 & \quad C_{j,in} = C_{j,in}(t_k) \text{ for } j = 1, 2, 3 \\
 & \quad d_4 = d_4(t_k), d_5 = d_5(t_k), \\
 & \quad \theta(t_i) \in [0, 1], \quad i = k, k+1, \dots, k+n_p-1
 \end{aligned}$$

[0131]

[0132] C_1 , C_2 및 C_3 은 t_k 에서의 값을 초기 조건으로 갖는 예측 상태이고, $S(T_s)$ 는 간격 T_s 를 갖는 구분되는 상수 함수의 집합이다. T_p 는 T_s 의 배수인 예측 수평선이다. $\bar{\theta}$ 는 시간 간격 T_s 를 갖는 T_p 동안 0차-홀드 방식으로 가상 제어 θ 를 나타낸다.

[0133] T_p 에서의 디스터번스(C_{in} , d_4 , d_5)는 센서에 의해 측정되거나 ECU(Engine Control Unit)에서 계산된 전류 값으로 설정된다. θ 는 커버리지 분율이다. 따라서 그 값은 0과 1 사이어야 한다. $t \in [t_k, t_{k+1})$ 시간 동안 제1 단계의 원하는 가상 제어(θ_d)는, FHOC의 최적 해가 $\theta^*(t)$ 로 표시될 때 $\theta^*(t_k)$ 이다. 즉, $t \in [t_k, t_{k+1})$ 에 대하여 $\theta_d(t) = \theta_k$ 이다.

[0134] 첫번째 및 두번째 항은 t_k 에서 SCR 입구의 각 농도에 의해 스케일된 NO 및 NO₂ 농도이며, 이는 NO 및 NO₂를 제거하는 비효율을 의미한다. 세번째 항은 과도한 요소 주입을 피하기 위해 필요하다.

[0136] 2 단계 : θ_d 는 FHOC에 의해 결정되고, 백스테핑 접근법에 의해 θ_d 를 얻기 위해 조작되는 입력을 설계하기 위해 다음 단계가 사용된다.

[0137] 식 16은 θ ($\theta \in [0, 1]$)의 임의 값에 대하여 만족하기 때문에 C_1 , C_2 , 및 C_3 의 양의 유한 함수는 연속 절차의 리아푸노프(Lyapunov) 함수에서 고려할 필요가 없다. $V_1 = e_\theta^2/2$ ($e_\theta = \theta - \theta_d$ 및 $\dot{\theta}_d = 0$ (0차 홀드 방식으로 주어진 θ_d))로 함으로써 식 18이 얻어진다.

[0138] [식 18]

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_1 &= e_\theta \dot{e}_\theta \\
 &= e_\theta [(k_{1f}C_4(1-\theta) - k_{1b}\theta) - 2k_2C_3\theta - 4k_4C_1\theta \\
 &\quad - 2k_5C_1C_2\theta - 4k_6C_2\theta - 2k_7C_2\theta] \\
 &= e_\theta \underbrace{[k_{1f}C_4(1-\theta)]}_{A_1} \\
 &\quad - e_\theta \underbrace{[k_{1b}e_\theta + 2k_2C_3e_\theta + 4k_4C_1e_\theta \\
 &\quad + 2k_5C_1C_2e_\theta + 4k_6C_2e_\theta + 2k_7C_2e_\theta]}_{A_2} \\
 &\quad - e_\theta \underbrace{[k_{1b}\theta_d + 2k_2C_3\theta_d + 4k_4C_1\theta_d \\
 &\quad + 2k_5C_1C_2\theta_d + 4k_6C_2\theta_d + 2k_7C_2\theta_d]}_{A_3} \\
 &= A_1 - A_2 - A_3
 \end{aligned}$$

[0139]

[0140] 반응 속도 상수(k_{1f} , k_{1b} , ..., k_7) 및 C_3 은 양의 값을 가지고, C_1 및 C_2 는 음이 아니다. 따라서, $A_2 > 0$ 이고 $e_\theta = 0$ 이면 $A_2 = 0$ 이다. 또, $-A_2 \leq -a_0 e_\theta^2$ 으로 적을 수 있다(a_0 는 양의 상수).

[0142] 케이스 I : $e_\theta > 0$ 일 때, 원하는 C_4 는 $C_{4,d} = 0$ 로 설정된다. 원하는 커버리지 분율(θ_d)은 양의 값이고 $e_\theta > 0$ 이므로 식 19가 성립된다.

[0143] [식 19]

$$\dot{V}_1 \leq -A_2 \leq -a_0 e_\theta^2$$

[0144]

[0146] 케이스 II : $e_\theta \leq 0$ 일때, 원하는 $C_{4,d}$ 는 식 20과 같고, 식 21을 얻을 수 있다.

[0147] [식 20]

$$\begin{aligned}
 C_{4,d} &= \frac{1}{k_{1f}(1-\theta)} [k_{1b}\theta_d + 2k_2C_3\theta_d + 4k_4C_1\theta_d \\
 &\quad + 2k_5C_1C_2\theta_d + 4k_6C_2\theta_d + 2k_7C_2\theta_d - a_1 e_\theta]
 \end{aligned}$$

[0148]

[0149] [식 21]

$$\dot{V}_1 \leq -a_1 e_\theta^2 - A_2 \leq -a_1 e_\theta^2 - a_0 e_\theta^2$$

[0150]

[0151] 상기 식 20 및 21에서,

a_1 : 백스텝핑 설계에서 나오는 상수(본 발명의 실시예에 따른 시뮬레이션 결과에서는 1로 설정됨)

[0152] 3 단계 : 식 19 및 식 21에 $V_2 = V_1 + e_{C4}^2/2$ 및 $e_{C4} = C_4 - C_{4,d}$ 을 적용하면 식 22를 얻을 수 있다.

[0153] [식 22]

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_2 &\leq -A_2 + e_{C4}[e_{\theta}k_{1f}(1-\theta) + \dot{C}_4 - \dot{C}_{4,d}] \\
 &= -A_2 + e_{C4}[e_{\theta}k_{1f}(1-\theta) - d_4\frac{C_4}{L} + d_4\frac{C_{4,in}}{L} \\
 &\quad + \frac{1-\epsilon}{\epsilon}(-R_1) - \dot{C}_{4,d}] \\
 &= -A_2 + e_{C4}[e_{\theta}k_{1f}(1-\theta) - d_4\frac{C_4}{L} + d_4\frac{C_{4,in}}{L} \\
 &\quad + \frac{1-\epsilon}{\epsilon}(k_{1b}\theta\Gamma - k_{1f}C_4(1-\theta)\Gamma) - \dot{C}_{4,d}] \\
 &= -A_2 + e_{C4}[e_{\theta}k_{1f}(1-\theta) - d_4\frac{e_{C4}}{L} + d_4\frac{C_{4,in}}{L} \\
 &\quad + \frac{1-\epsilon}{\epsilon}(k_{1b}\theta\Gamma - k_{1f}e_{C4}(1-\theta)\Gamma) - \dot{C}_{4,d}] \\
 &\quad + e_{C4}[-d_4\frac{C_{4,d}}{L} + \frac{1-\epsilon}{\epsilon}(-k_{1f}C_{4,d}(1-\theta)\Gamma)] \\
 &= -A_2 - d_4\frac{e_{C4}^2}{L} - \frac{1-\epsilon}{\epsilon}k_{1f}(1-\theta)\Gamma e_{C4}^2 \\
 &\quad + e_{C4}[e_{\theta}k_{1f}(1-\theta) + d_4\frac{C_{4,in}}{L} + \frac{1-\epsilon}{\epsilon}k_{1b}\theta\Gamma \\
 &\quad - \dot{C}_{4,d} - d_4\frac{C_{4,d}}{L} - \frac{1-\epsilon}{\epsilon}k_{1f}C_{4,d}(1-\theta)\Gamma]
 \end{aligned}$$

[0154]

[0155] SCR-in NH_3 농도는 식 23과 같고, 식 24를 얻을 수 있다.

[0156] [식 23]

$$\begin{aligned}
 C_{4,in,d} &= C_{4,d} + \frac{L}{d_4}[-e_{\theta}k_{1f}(1-\theta) - \frac{1-\epsilon}{\epsilon}k_{1b}\theta\Gamma \\
 &\quad + \dot{C}_{4,d} + \frac{1-\epsilon}{\epsilon}k_{1f}C_{4,d}(1-\theta)\Gamma] - a_2e_{C4}
 \end{aligned}$$

[0157]

[0158] [식 24]

$$\dot{V}_2 \leq -A_2 - d_4\frac{e_{C4}^2}{L} - a_2e_{C4}^2 \leq -a_0e_{\theta}^2 - d_4\frac{e_{C4}^2}{L} - a_2e_{C4}^2$$

[0159]

상기 식 23 및 24에서,

a_2 : 백스텝핑 설계에서 나오는 상수(본 발명의 실시예에 따른 시뮬레이션 결과에서는 1로 설정됨)

[0160] 원하는 SCR-in NH_3 농도(식 23)는 요소수 용액 주입으로 달성되며, 시간이 지남에 따라 촉매의 커버리지 분율이

원하는 값(Θ_d)에 가까워진다.

[0162] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치의 모식도이다.

[0163] 도 1을 참조하면, 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치는 제1 제어기 및 제2 제어기를 포함한다.

[0164] 상기 제1 제어기는 현재 엔진에서 방출되는 가스 내의 NO_x 농도, 온도, MFR(mass flow rate)(측정 혹은 계산 가능)과 시스템 동역학(system dynamics)의 일부를 고려하여 예측 수평 동안의 목적함수 값을 최소화하는 제어 수평 동안의 최적의 커버리지 분을 설정값을 생성한다.

[0165] 상기 제1 제어기는 유한 수평 최적 제어 문제를 해결하는 것에 의해 최적의 커버리지 분을 결정할 수 있다. 상기 제1 제어기는 현재 시점에 측정 가능한 배출 가스 정보와 추정된 SCR 시스템 상태에 기반하여 미래 일정기간 동안 목적함수 (NO_x 를 제거하지 못하는 비율과 암모니아 저장량에 관한 함수)를 최소화하는 커버리지 분을 결정한다. 따라서 상기 제1 제어기는 현재 시점에서의 배출 가스를 통하여 넘어오는 NO_x 양, 배기 온도, MFR 등을 고려하여 요소(urea)(요소수) 사용량을 줄이면서도 NO_x 를 효율적으로 제거할 수 있는 커버리지 분을 선택할 수 있다.

[0166] 상기 제2 제어기는 현재의 최적의 커버리지 분을 달성하도록 백스테핑 제어를 통하여 조작 변수인 요소(요소수) 주입량을 결정한다.

[0167] 상기 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치는 커버리지 분을 최적화 문제를 통하여 결정하고 요소(요소수) 주입량은 단순한 백스테핑 방법에 의하여 결정한다. 따라서 최적화 문제에서 고려해야 하는 동역학은 전체 동역학이 아닌 일부분이 된다. 따라서 빠르게 최적화 문제 풀이가 가능하며 최적의 커버리지 분이 결정되면 백스테핑 방법을 통해 구축된 함수에 의하여 바로 요소(요소수) 주입량을 계산할 수 있다. 따라서 상기 선택적 촉매 환원 시스템 제어 장치는 빠른 계산 속도를 요구하는 자동차의 선택적 촉매 환원 시스템 후처리 제어에 적합하다.

[0169] [시뮬레이션 분석]

[0171] 1/3 시내 주행, 1/3 고속도로 주행, 1/3 시외 주행으로 구성된 4990초 엔진 배출 가스 데이터를 갖는 가상 SCR 시스템을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 요소 주입기의 용량은 제한적이며 농도는 음의 값을 가질 수 없다. 따라서 각 제어기에 의해 결정된 원하는 입력($C_{4,in,d}$)은 식 25의 포화 함수와 함께 사용되었다.

[0172] [식 25]

$$C_{4,in} = \begin{cases} 0, & C_{4,in,d} \times F_{cov,1} < 0 \\ C_{4,in,d}, & 0 \leq C_{4,in,d} \times F_{cov,1} \leq 500\text{ppm} \\ 500 \times \frac{1}{F_{cov,1}}, & C_{4,in,d} \times F_{cov,1} > 500\text{ppm} \end{cases}$$

[0174] $F_{cov,1}$ 은 물 농도에서 부피 분율로의 환산 인자이다.

[0176] 본 발명의 실시예들에 따른 제어기(모델 예측 제어와 통합된 백스테핑 제어, BS-MPC)

[0177] BS-MPC 입력은 튜닝 파라미터 1($Q_1 = 1$ 및 $R_1 = 5$) 및 튜닝 파라미터 2 ($Q_1 = 1$ 및 $R_1 = 10$)로 FHOC(식 17)을 푸는 것에 의해 계산되었다. 도 2, 도 3 및 도 4는 각각 SCR-out NO_x 와 NH_3 의 누적량과 커버리지 분을 보여준다. 도 5는 NH_3 에 대한 완전한 요소 열분해를 가정하여 주입된 요소 용액의 누적량에 비례하는 각 시간 지수까지의 SCR-in NH_3 의 누적량을 보여준다. 도 6은 식 26에 의해 계산된 NH_3 사용의 총 효율을 나타낸다.

[0178] [식 26]

$$\eta_{total}(t_k) = \frac{M_{NO_x,in}(t_k) - M_{NO_x}(t_k) + (\theta(t_k) - \theta(0)) \times F_{cov,2}}{M_{NH_3,in}(t_k) + \theta(0) \times F_{cov,2}}$$

[0179]

[0180] $M_{j,in}(t_k)$ 와 $M_j(t_k)$ 는 각각 $[0, t_k]$ 동안 SCR-in j 와 SCR-out j 의 누적 물수를 나타낸다. Θ_k 는 t_k 에서의 커버리지 분율을 나타내고, $F_{cov,2}$ 는 커버리지 분율에서 촉매에 저장된 NH_3 의 물로의 환산 인자이다.

[0182] **백스테핑 제어기(BS)**

[0183] 백스테핑 제어 입력은 Θ 설정값, 0.1 및 0.2의 두 가지 경우로 계산되었다. 도 2, 도 3 및 도 4는 각각 SCR-out NO_x 와 NH_3 의 누적량과 커버리지 분율을 보여준다. 도 5 및 도 6은 각각 SCR-in NH_3 누적량과 n_{total} 을 나타낸다.

[0185] 표 2는 각 제어기와 백스테핑 제어 사이에 SCR-out NO_x 의 누적량($M_{NO_x}(4990)$), SCR-out NH_3 의 누적량($M_{NH_3}(4990)$) 및 입력의 누적량($M_{NH_3,in}(4990)$)의 상대적인 퍼센트 변화를 보여준다. 최종 시간에서 커버리지 분율은 표 2에 있다.

[0186] [표 2]

	BS-MPC (Tuning parameter 1)	BS-MPC (Tuning parameter 2)	BS (Set point 0.2)
$\frac{M_{NO_x} - M_{NO_x,ref}}{M_{NO_x,ref}} \times 100 (\%)$	-7.26	-1.91	-29.66
$\frac{M_{NH_3} - M_{NH_3,ref}}{M_{NH_3,ref}} \times 100 (\%)$	53.74	28.19	110.13
$\frac{M_{NH_3,in} - M_{NH_3,in,ref}}{M_{NH_3,in,ref}} \times 100 (\%)$	2.10	-0.24	15.27
Coverage fraction at the final time	0.47	0.36	0.2

[0187]

[0189] 도 2와 표 2는 튜닝 파라미터 1을 갖는 BS-MPC가 SCR-in NH_3 의 2.10% 작은 누적량으로 비교예보다 7.26%만큼 SCR-out NO_x 의 누적량을 감소시켰으나, 최종 시간의 커버리지 분율은 0.47로서 비교예의 값(즉, 0.1)보다 컸다. 이것은 더 많은 양의 환원제가 최종 시간에 촉매에 저장되어 있음을 의미한다. NH_3 슬립 누적량은 비교예보다 53.74% 크지만, NH_3 슬립의 절대 누적량은 두 경우 모두 적었다.

[0190] 비교예와 비교할 때, 튜닝 파라미터 2을 갖는 BS-MPC는 NH_3 에서 0.24% 적은 SCR-in NH_3 로도 SCR-out NO_x 누적량을 1.91% 줄였다. 두 튜닝 파라미터를 갖는 BS-MPC 제어기의 전체 효율은 처음 8초를 제외하고 항상 비교예의 전체 효율보다 높았다. 이러한 결과는 NH_3 사용의 효율이 디스터번스 정보(NO_x , MFR, 엔진 가스 배출의 Tg)로 FHOPC를 해결하는 것에 의해 결정된 커버리지 분율의 시변(time-varying) 설정값에 의해 증가될 수 있음을 보여준다.

[0191] 또, z -서브시스템의 IS(input to state) 안정성은 제어기의 시뮬레이션 결과로 검증되었다. 표 3은 4990초 동안 $B_1+B_2+B_3$ 의 최대값과 $d_4C_3^2/L$ 의 최소값을 나타낸다. $B_1+B_2+B_3-d_4C_3^2/L \leq \max(B_1+B_2+B_3) - \min(d_4C_3^2/L) < 0$ 으로 나타났다.

[0192] [표 3]

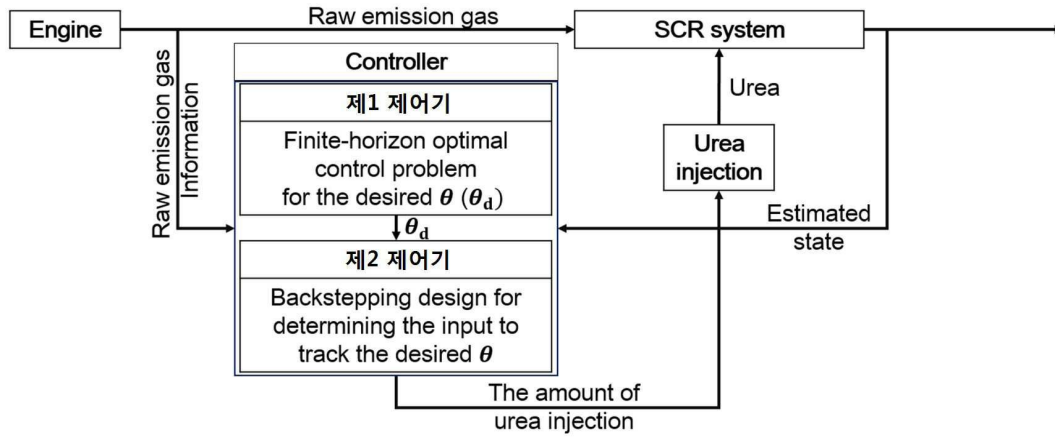
	$\max(B_1 + B_2 + B_3)$	$\min(d_4 \frac{C_3^2}{L})$ (i.e., B_L)	$\max(B_4)$
BS-MPC (tuning parameter 1)	2.0143e-11	16.0038	-0.7128
BS-MPC (tuning parameter 2)	-2.8345e-13	16.0039	-0.7129
BS (set point 0.1)	2.9718e-11	16.0062	-0.7127
BS (set point 0.2)	2.9718e-11	16.0018	-0.7126

[0193]

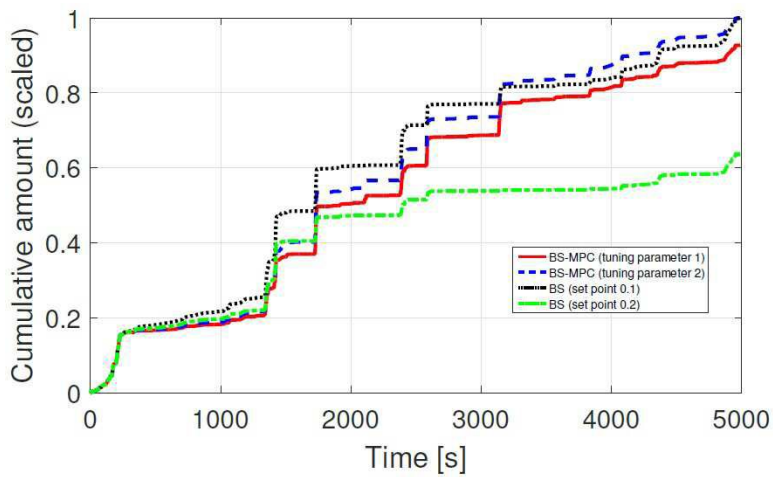
[0195] 이제까지 본 발명에 대한 구체적인 실시예들을 살펴보았다. 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자는 본 발명이 본 발명의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위에서 변형된 형태로 구현될 수 있음을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 개시된 실시예들은 한정적인 관점이 아니라 설명적인 관점에서 고려되어야 한다. 본 발명의 범위는 전술한 설명이 아니라 특허청구범위에 나타나 있으며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 차이점은 본 발명에 포함된 것으로 해석되어야 할 것이다.

도면

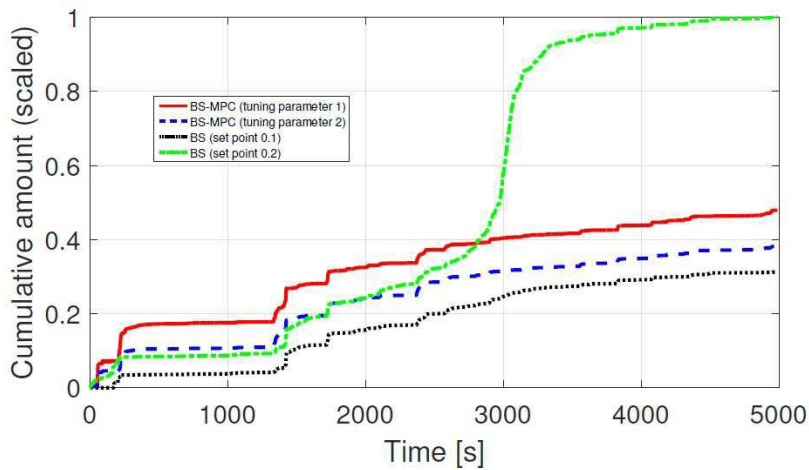
도면1



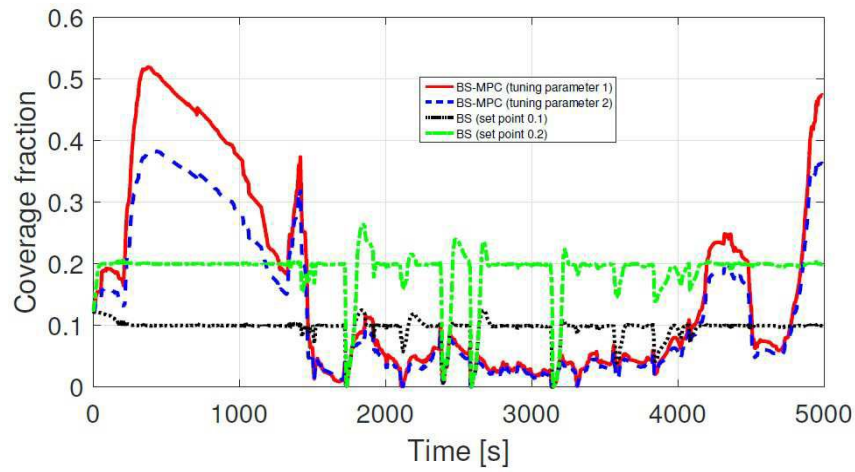
도면2



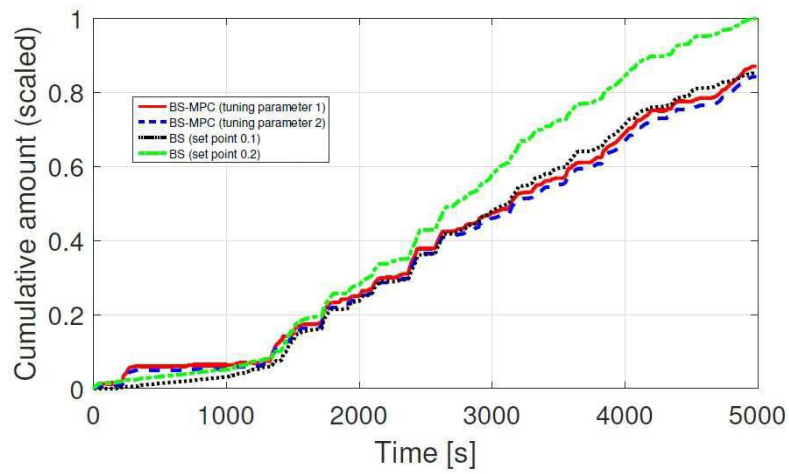
도면3



도면4



도면5



도면6

