(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0000933
(43) 공개일자 2021년01월06일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F24F 11/63 (2018.01) *F24F 11/46* (2018.01)
F24F 11/70 (2018.01) *F24F 110/50* (2018.01)
F24F 140/50 (2018.01) *G06N 20/00* (2019.01)
(52) CPC특허분류
F24F 11/63 (2018.01)
F24F 11/46 (2018.01)
(21) 출원번호 10-2019-0076226
(22) 출원일자 2019년06월26일
심사청구일자 2019년06월26일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
유창규
경기도 수원시 영통구 웰빙타운로 20, 8308동 202호(이의동, 호반가든하임)
허성구
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스)
(74) 대리인
특허법인도담

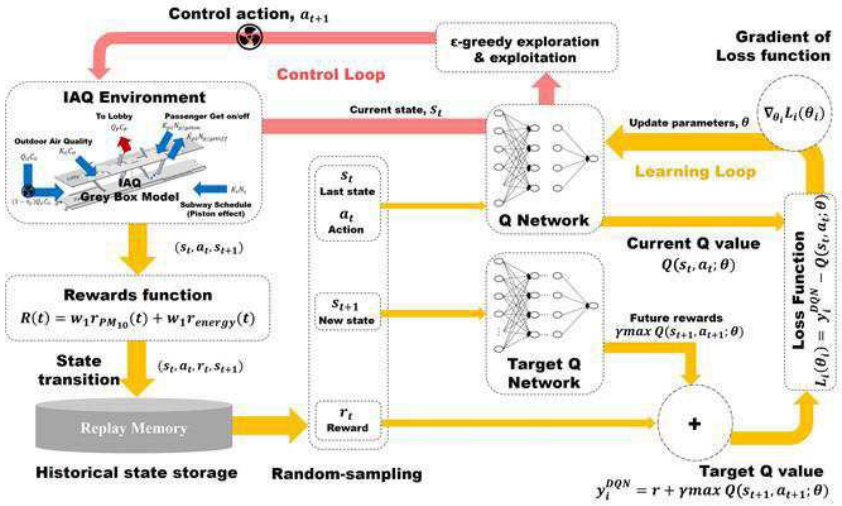
전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 발명의 명칭 **지하역사 내 환기 시스템 및 그 제어 방법**

(57) 요 약

본 발명은 지하역사 내 실내공기질을 조절하는 환기 시스템의 제어 방법에 관한 것으로, 환기 시스템의 소모 에너지량을 줄이면서 지하역사 내 실내공기질을 개선하기 위한 환기 시스템을 제공하는 것을 일 목적으로 한다. 이러한 목적을 달성하기 위한 본 발명은 지하역사 내 실내공기질을 조절하는 환기 시스템의 제어 방법에 있어서, 특정 시간구간에서의 제1 실내공기질 데이터를 측정하는 a 단계, 상기 제1 실내공기질 데이터 및 환풍기의 제1 주파수를 기반으로, 상기 제1 주파수에 따라 환기된 제2 실내공기질 데이터와 환기를 수행하는 데에 소모된 에너지량을 측정하는 b 단계, 상기 제2 실내공기질 데이터 및 상기 소모 에너지량 별로 상이하게 제공되는 보상 정보에 따라 상기 환풍기의 제2 주파수를 선택하는 c 단계, 상기 제2 주파수에 대응하는 보상을 지급받는 d 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
F24F 11/70 (2018.01)
G06N 20/00 (2019.01)
F24F 2110/50 (2018.01)
F24F 2140/50 (2018.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	19QPPW-B152307-01
부처명	국토교통부
과제관리(전문)기관명	국토교통과학기술진흥원
연구사업명	지하철 미세먼지 저감 기술개발 사업
연구과제명	인공지능 기반 지하철 이용객의 (초)미세먼지 노출 저감기술 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	한국철도기술연구원
연구기간	2019.04.25 ~ 2023.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

지하역사 내 실내공기질을 조절하는 환기 시스템의 제어 방법에 있어서,

특정 시간구간에서의 제1 실내공기질 데이터를 측정하는 a 단계;

상기 제1 실내공기질 데이터 및 환풍기의 제1 주파수를 기반으로, 상기 제1 주파수에 따라 환기된 제2 실내공기질 데이터와 환기를 수행하는 데에 소모된 에너지량을 측정하는 b 단계;

상기 제2 실내공기질 데이터 및 상기 소모 에너지량 별로 상이하게 제공되는 보상 정보에 따라 상기 환풍기의 제2 주파수를 선택하는 c 단계;

상기 제2 주파수에 대응하는 보상을 지급받는 d 단계를 포함하는 환기 시스템 제어 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 a 내지 d 단계를 수행하여 획득한 제2 주파수 및 상기 보상을 이용하여 강화학습을 수행한 정보를 저장하는 e 단계; 및

상기 a 내지 e 단계를 반복 수행하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 환기 시스템 제어 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 강화학습의 학습 환경을 생성하기 위하여,

지하역사의 실외공기질, 실내공기질, 유동 인구, 환풍기 주파수 또는 지하철 진입 주기 중 적어도 하나를 포함하는 공기질 측정 데이터를 기반으로 실내공기질 모델을 더 생성하는 것을 특징으로 하는 환기 시스템 제어 방법.

청구항 4

제2항에 있어서,

상기 강화학습은 DQN(Deep-Q-Network) 알고리즘을 이용하여 수행되는 것을 특징으로 하는 환기 시스템 제어 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 제2 실내공기질 데이터와 상기 소모 에너지량 각각에 제1 및 제2 보상을 제공하는 단계; 및

상기 제2 실내공기질 데이터, 상기 소모 에너지량, 제1 보상 및 제2 보상을 이용하여 상기 보상 정보를 설정하는 단계를 더 포함하는 환기 시스템 제어 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 제2 주파수는 상기 보상이 최대가 되도록 하는 것을 특징으로 하는 환기 시스템 제어 방법.

청구항 7

지하역사 내 실내공기질을 조절하는 환기 시스템에 있어서,

특정 시간구간에서의 제1 실내공기질 데이터를 측정하고, 상기 제1 실내공기질 데이터 및 환풍기의 제1 주파수를 기반으로, 상기 제1 주파수에 따라 환기된 제2 실내공기질 데이터와 환기를 수행하는 데에 소모된 에너지량을 측정하고, 상기 제2 실내공기질 데이터 및 상기 소모 에너지량 별로 상이하게 제공되는 보상 정보에 따라 상기 환풍기의 제2 주파수를 선택하며, 상기 제2 주파수에 대응하는 보상을 지급하는 제어부를 포함하는 환기 시스템 제어 시스템.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 강화학습의 학습 환경을 생성하기 위하여 지하역사의 실외공기질, 실내공기질, 유동 인구, 환풍기 주파수 또는 지하철 진입 주기 중 적어도 하나를 포함하는 공기질 측정 데이터를 기반으로 실내공기질 모델을 생성하는 기초 모델 생성부를 더 포함하고,

상기 제어부는,

상기 제2 주파수 및 상기 보상을 이용하여 강화학습을 반복적으로 수행하는 것을 특징으로 하는 환기 시스템 제어 시스템.

청구항 9

제7항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 제2 실내공기질 데이터와 상기 소모 에너지량 각각에 제1 및 제2 보상을 제공하고, 상기 제2 실내공기질 데이터, 상기 소모 에너지량, 제1 보상 및 제2 보상을 이용하여 상기 보상 정보를 설정하는 보상 제공부를 포함하는 것을 특징으로 하는 환기 시스템 제어 시스템.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 지하역사 내 환기 시스템 및 그 제어 방법에 관한 것으로, 보다 자세하게는 환기를 통해 지하역사 내 실내공기질을 제어하는 환기 시스템 및 그 제어 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 많은 도시에서 도심의 교통 혼잡을 해결하기 위한 하나의 수단으로 지하선로를 통해 운행 가능한 지하철 시스템을 채용하고 있다. 지하철은 한국을 포함한 선진국에서 가장 효율적인 교통 수단 중 하나로 꼽히고 있으며, 그 이용객 수나 이용 횟수가 증가됨에 따라 많은 사람들이 지하역사 내에서 보내는 시간도 늘어나고 있다. 이에 따라 지하역사 내의 실내공기에 대한 관심도가 점차 증대되고 있는 추세이다.

[0003] 지하역사 내에서는 이용객의 이동과 지하철의 운행 등에 따라 다량의 오염물질이 발생될 수 있으며, 특히 대부분의 지하철은 지면 아래에 위치하기 때문에 휘발성 유기 화합물(VOCs, Volatile Organic Compounds), 이산화탄소(CO2) 및 미세먼지(PM, Particulate Matter)을 포함하는 많은 유해 대기 오염물질이 지하역사 내에 축적된다.

이들 오염물질은 지하역사 내의 실내공기 중에 함유되어 이용객이나 역무원 등에게 부정적인 영향을 끼칠 수 있다.

[0004] 지하역사 내 실내공기질은 실내공기 중에 포함된 오염물질의 종류 및 농도 등에 따라 판단될 수 있는데, 그 중 하나로 미세먼지 농도가 널리 사용되고 있다. 일 예로 대한민국은 실내공기질 관리법에 의거하여 미세먼지 농도에 대한 유지기준(150 ㎍/㎥)을 설정하여 관리하고 있다. 지하역사 내 환기 시스템 역시 이러한 미세먼지 농도에 기반하여 환기를 제어함으로써, 목표하는 실내공기질을 달성할 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명은 전술한 문제점을 해결하기 위한 것으로서, 환기 시스템의 소모 에너지량을 줄이면서 지하역사 내 실내공기질을 개선하기 위한 환기 시스템을 제공하는 것을 일 목적으로 한다.

[0006] 또한 본 발명은 환기 시스템의 학습 환경을 생성하기 위하여 복수 개의 공기질 측정 데이터를 기반으로 실내공기질 모델을 생성하는 것을 일 목적으로 한다.

[0007] 또한 본 발명은 강화학습을 통해 소모 에너지량과 실내공기질 개선을 고려하여 최적의 환풍기 주파수를 선택하는 것을 일 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0008] 이러한 목적을 달성하기 위한 본 발명은 지하역사 내 실내공기질을 조절하는 환기 시스템의 제어 방법에 있어서, 특정 시간구간에서의 제1 실내공기질 데이터를 측정하는 a 단계, 상기 제1 실내공기질 데이터 및 환풍기의 제1 주파수를 기반으로, 상기 제1 주파수에 따라 환기된 제2 실내공기질 데이터와 환기를 수행하는 데에 소모된 에너지량을 측정하는 b 단계, 상기 제2 실내공기질 데이터 및 상기 소모 에너지량 별로 상이하게 제공되는 보상 정보에 따라 상기 환풍기의 제2 주파수를 선택하는 c 단계, 상기 제2 주파수에 대응하는 보상을 지급받는 d 단계를 포함하는 것을 일 특징으로 한다.

[0009] 또한 상기 a 내지 d 단계를 수행하여 획득한 제2 주파수 및 상기 보상을 이용하여 강화학습을 수행한 정보를 저장하는 e 단계 및 상기 a 내지 e 단계를 반복 수행하는 단계를 더 포함하는 것을 일 특징으로 한다.

[0010] 나아가 상기 강화학습의 학습 환경을 생성하기 위하여, 지하역사의 실외공기질, 실내공기질, 유동 인구, 환풍기 주파수 또는 지하철 진입 주기 중 적어도 하나를 포함하는 공기질 측정 데이터를 기반으로 실내공기질 모델을 더 생성하는 것을 일 특징으로 한다.

[0011] 또한 상기 강화학습은 DQN(Deep-Q-Network) 알고리즘을 이용하여 수행되는 것을 일 특징으로 한다.

[0012] 나아가 상기 제2 실내공기질 데이터와 상기 소모 에너지량 각각에 제1 및 제2 보상을 제공하는 단계 및 상기 제2 실내공기질 데이터, 상기 소모 에너지량, 제1 보상 및 제2 보상을 이용하여 상기 보상 정보를 설정하는 단계를 더 포함하는 것을 일 특징으로 한다.

[0013] 또한 상기 제2 주파수는 상기 보상이 최대가 되도록 하는 것을 일 특징으로 한다.

[0014] 나아가 본 발명은 지하역사 내 실내공기질을 조절하는 환기 시스템에 있어서, 특정 시간구간에서의 제1 실내공기질 데이터를 측정하고, 상기 제1 실내공기질 데이터 및 환풍기의 제1 주파수를 기반으로, 상기 제1 주파수에 따라 환기된 제2 실내공기질 데이터와 환기를 수행하는 데에 소모된 에너지량을 측정하고, 상기 제2 실내공기질 데이터 및 상기 소모 에너지량 별로 상이하게 제공되는 보상 정보에 따라 상기 환풍기의 제2 주파수를 선택하며, 상기 제2 주파수에 대응하는 보상을 지급하는 제어부를 포함하는 것을 일 특징으로 한다.

[0015] 또한 상기 강화학습의 학습 환경을 생성하기 위하여 지하역사의 실외공기질, 실내공기질, 유동 인구, 환풍기 주파수 또는 지하철 진입 주기 중 적어도 하나를 포함하는 공기질 측정 데이터를 기반으로 실내공기질 모델을 생성하는 기초 모델 생성부를 더 포함하고, 상기 제어부는 상기 제2 주파수 및 상기 보상을 이용하여 강화학습을 반복적으로 수행하는 것을 일 특징으로 한다.

[0016] 나아가 상기 제어부는, 상기 제2 실내공기질 데이터와 상기 소모 에너지량 각각에 제1 및 제2 보상을 제공하고, 상기 제2 실내공기질 데이터, 상기 소모 에너지량, 제1 보상 및 제2 보상을 이용하여 상기 보상 정보를 설정하는 보상 제공부를 포함하는 것을 일 특징으로 한다.

발명의 효과

[0017] 전술한 바와 같은 본 발명에 의하면, 환기 시스템의 소모 에너지량을 줄이면서 지하역사 내 실내공기질을 개선하기 위한 환기 시스템을 제공할 수 있다.

[0018] 또한 본 발명은 환기 시스템의 학습 환경을 생성하기 위하여 복수 개의 공기질 측정 데이터를 기반으로 실내공기질 모델을 생성할 수 있다.

[0019] 또한 본 발명은 강화학습을 통해 소모 에너지량과 실내공기질 개선을 고려하여 최적의 환풍기 주파수를 선택할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0020] 도 1은 본 발명의 일 실시 예에 의한 환기 시스템의 전체적인 프로세스를 도시한 도면이다.

도 2는 본 발명의 일 실시 예에 의한 환기 시스템의 구성을 도시한 도면이다.

도 3은 공기질 측정 데이터를 나타낸 그래프이다.

도 4는 본 발명의 일 실시 예에 의한 강화학습의 기본 원리를 설명하기 위한 도면이다.

도 5는 본 발명의 일 실시 예에 의한 환기 시스템의 강화학습 모델을 생성하기 위한 알고리즘을 도시한 도면이다.

도 6은 본 발명의 일 실시 예에 의한 실내공기질 모델에 공기질 측정 데이터를 입력 변수로 하여 식별한 실내공기질 데이터 및 공기질 측정 데이터가 측정된 시간에 실제로 측정된 실내공기질 데이터를 나타낸 그래프이다.

도 7은 본 발명의 일 실시 예에 의한 공기질 측정 데이터와 그에 따라 예측된 실내공기질 데이터를 나타낸 그래프이다.

도 8은 본 발명의 일 실시 예에 의한 강화학습 모델의 반복적인 학습을 설명하기 위한 도면이다.

도 9는 본 발명의 일 실시 예에 의한 강화학습 모델의 반복 학습 결과를 나타낸 그래프이다.

도 10은 본 발명의 일 실시 예에 의한 환기 시스템과 기존 수동 환기 시스템의 동작을 비교한 도면이다.

도 11은 본 발명의 일 실시 예에 의한 환기 시스템과 기존 수동 환기 시스템이 작동했을 때의 CIAI 값을 비교한 도면이다.

도 12는 본 발명의 일 실시 예에 의한 탑승객 수에 따른 환기 시스템과 기존의 수동 환기 시스템의 성능을 비교한 그래프이다.

도 13은 본 발명의 일 실시 예에 의한 실외공기질에 따른 환기 시스템과 기존의 수동 환기 시스템의 성능을 비교한 그래프이다.

도 14은 본 발명의 일 실시 예에 의한 환기 시스템의 성능을 검증한 결과를 나타낸 표이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0021] 전술한 목적, 특징 및 장점은 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 후술되며, 이에 따라 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 본 발명의 기술적 사상을 용이하게 실시할 수 있을 것이다. 본 발명을 설명함에 있어서 본 발명과 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 상세한 설명을 생략한다.

[0022] 도면에서 동일한 참조부호는 동일 또는 유사한 구성요소를 가리키는 것으로 사용되며, 명세서 및 특허청구의 범위에 기재된 모든 조합은 임의의 방식으로 조합될 수 있다. 그리고 다른 식으로 규정하지 않는 한, 단수에 대한 언급은 하나 이상을 포함할 수 있고, 단수 표현에 대한 언급은 또한 복수 표현을 포함할 수 있음이 이해되어야 한다.

[0023] 본 명세서에서 사용되는 용어는 단지 특정 예시적 실시 예들을 설명할 목적을 가지고 있으며 한정할 의도로 사용되는 것이 아니다. 본 명세서에서 사용된 바와 같은 단수적 표현들은 또한, 해당 문장에서 명확하게 달리 표시하지 않는 한, 복수의 의미를 포함하도록 의도될 수 있다. 용어 "및/또는," "그리고/또는"은 그 관련되어 나

열되는 항목들의 모든 조합들 및 어느 하나를 포함한다. 용어 "포함한다", "포함하는", "포함하고 있는", "구비하는", "갖는", "가지고 있는" 등은 내포적 의미를 갖는 바, 이에 따라 이러한 용어들은 그 기재된 특징, 정수, 단계, 동작, 요소, 및/또는 컴포넌트를 특정하며, 하나 이상의 다른 특징, 정수, 단계, 동작, 요소, 컴포넌트, 및/또는 이들의 그룹의 존재 혹은 추가를 배제하지 않는다. 본 명세서에서 설명되는 방법의 단계들, 프로세스들, 동작들은, 구체적으로 그 수행 순서가 확정되는 경우가 아니라면, 이들의 수행을 논의된 혹은 예시된 그러한 특정 순서로 반드시 해야 하는 것으로 해석돼서는 안 된다. 추가적인 혹은 대안적인 단계들이 사용될 수 있음을 또한 이해해야 한다.

[0024] 또한, 각각의 구성요소는 각각 하드웨어 프로세서로 구현될 수 있고, 위 구성요소들이 통합되어 하나의 하드웨어 프로세서로 구현될 수 있으며, 또는 위 구성요소들이 서로 조합되어 복수 개의 하드웨어 프로세서로 구현될 수도 있다.

[0025] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 바람직한 실시 예를 상세히 설명하기로 한다.

[0026] 본 발명은 환기 시스템의 학습 환경을 생성하기 위하여 복수 개의 제1 공기질 측정 데이터에 따라 변화하는 실내공기질의 오염도를 예측하는 실내공기질 모델을 생성하며, 실내공기질의 오염도와 환풍기 주파수를 이용하여 환기를 제어하는 환기 시스템을 개시한다.

[0027] 도 1은 본 발명의 일 실시 예에 의한 지하철 환기 시스템의 전체적인 프로세스가 도시되어 있고, 도 2는 본 발명의 일 실시 예에 의한 환기 시스템의 구성을 도시한 도면이다. 도 1 및 도 2를 참조하면, 지하철 환기 시스템은 실내공기질 모델 생성부(100)를 통해 지하역사 내 실내공기질의 오염도를 예측하고, 강화 학습의 기초 학습 환경을 위한 데이터 세트를 생성하는 실내공기질 모델을 생성할 수 있다.

[0028] 본 발명에서 사용되는 실내공기질 모델은 공기질 측정 데이터를 이용하여 생성될 수 있다. 도 3은 공기질 측정 데이터를 나타낸 그래프로, 도 3을 참조하면, 공기질 측정 데이터는 지하역사 외 실외공기질의 오염도(a), 지하철 탑승 승객 수(b), 지하철 하차 승객 수(c), 환풍기의 주파수(d), 지하철이 역사 내로 들어오는 주기(e), 및 지하역사 내 실내공기질의 오염도(f)를 포함할 수 있다. 도 3의 (f)에 도시된 바와 같이 지하역사 내 실내공기질은 러시아워 시간 대인 오전 7시~오전 10시와 오후 6시~오후 9시에 가장 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 본 발명의 일 실시 예에 따른 실내공기질 모델은 다수의 실험을 통해 검증하도록 하였는 바, 구체적으로 서울의 3호선 라인의 지하에 있는 D-역사에서 실험을 수행하였으며, 매일 D-역사 내에서 실시간 모니터링을 통해 공기질 측정 데이터를 측정하였다.

[0029] 지하역사 내 실내공기질은 지하역사 외 실외공기질과 유사한 흐름을 갖고, 지하철을 이용하는 탑승객은 지하역사 외부의 오염물질을 지하역사 내부로 이동시키는 수단이 되며, 지하철이 터널을 통과함에 따라 터널 내 오염물질을 지하역사 내 플랫폼으로 유입시키기 때문에 상술한 공기질 측정 데이터에 사용되는 복수 개의 파라미터는 모두 지하역사 내 실내공기질에 영향을 미칠 수 있다.

[0030] 실내공기질 모델 생성부(100)는 공기질 측정 데이터를 이용하여 지하역사 내 실내공기질의 오염도를 식별하는 실내공기질 모델을 생성할 수 있다. 실내공기질 모델은 지하역사 외 실외공기질의 오염도, 지하철 탑승 및 하차 승객의 수, 환풍기의 주파수, 그리고 지하철의 진입 주기를 입력 변수로 하여 지하역사 내 실내공기질의 오염도를 예측할 수 있다.

수학식 1

[0031] $$V\frac{dC_I(t)}{dt} = Q_o(t)C_o(t)(1-\eta_f) - Q_I(t)C_I(t) + k_oC_o(t) + k_pN_p(t) + k_sN_s(t)$$

[0032] 실내공기질 모델 생성부(100)는 수학식 1을 이용하여 지하역사 내 실내공기질의 오염도를 예측 가능한 실내공기질 모델을 생성할 수 있다. 수학식 1을 설명하면, V는 지하역사 내 플랫폼의 부피(m^3), $C_I(t)$는 지하역사 내 실내공기질, $C_o(t)$은 지하역사 외 실내공기질, $Q_o(t)$와 $Q_I(t)$는 환기 시 이동하는 공기의 유량($Q_I(t) = Q_o(t)$), η_f는 환풍기 주파수, $N_s(t)$는 지하철의 스케줄에 따른 지하철의 역사 내 진입 주기, $N_p(t)$는 지하철 탑승객의 수, k_o, k_p, k_s는 각 입력 변수에 대한 가중치 값이다. k_o, k_p, k_s는 시간에 따라 아래 표와 같이 설정될 수 있

다.

[0033] 본 발명의 일 실시 예에 의한 실내공기질 모델은 지하역사 외 실외공기질, 지하철 탑승객 수, 환풍기 주파수, 지하철 진입 주기를 입력변수로 하여 지하역사 내 실내공기질을 예측할 수 있다.

표 1

[0034]

시간	k_o(실외공기질에 대한 가중치)	k_p(지하철 진입 주기에 대한 가중치)	k_s(탑승객 수에 대한 가중치)
0~4	0.200	0	0
4~7	0	0	0.696
4~10	0.320	0.120	0.111
10~13	0.268	0.0137	0.846
13~17	3.98E-04	0.0736	0.294
17~21	0.206	0.100	0.210
21~24	0.241	0.01	0.150

[0035] 도 6은 본 발명의 일 실시 예에 의한 실내공기질 모델에 공기질 측정 데이터를 입력 변수로 하여 식별한 실내공기질 데이터 및 공기질 측정 데이터가 측정된 시간에 실제로 측정된 실내공기질 데이터를 나타낸 그래프이다. 도 6을 참조하면, 실내공기질 모델을 통해 예측된 실내공기질 데이터는 실제 측정된 실내공기질 데이터와 유사한 모양을 띄고 있어 실내공기질 모델의 신뢰도가 보장됨을 알 수 있다.

[0036] 또한 도 7은 본 발명의 일 실시 예에 의한 강화학습 모델을 학습하기 위하여 생성한 공기질 측정 데이터(a~e)와 그에 따라 예측된 실내공기질 데이터(f)를 나타낸 그래프이다. 상태 판단부(230)는 도 7의 (a) 내지 (e)와 같은 공기질 측정 데이터를 실내공기질 모델에 적용하여 (f)와 같은 실내공기질 데이터를 예측(생성)할 수 있다.

[0037] 제어부(200)는 특정 시간구간에 측정된 제1 실내공기질 데이터를 이용하여, 지하역사 내 실내공기질에 적합한 환풍기 주파수를 선택하여 지하역사 내 실내공기질을 개선하는 강화학습의 학습 환경을 생성할 수 있다.

[0038] 도 4는 강화학습의 원리를 설명하기 위한 도면으로, 도 4를 참조하면 강화학습은 특정 환경 내에서 정의된 에이전트(Agent)가 현재의 상태(State)를 인식하여, 선택 가능한 행동(Action) 중 보상을 최대화하는 행동 또는 행동 순서를 선택하는 방법이다. 본 발명의 강화학습은 DQN(Deep-Q-Network)를 통해 수행될 수 있다. 본 발명의 일 실시 예에 의한 DQN는 실내공기질 모델을 통해 식별된 제1 실내공기질 데이터를 현재 상태(State)로, 환풍기 주파수를 행동(Action)으로 하여, 에이전트가 제1 실내공기질 데이터에 대하여 보상을 최대로 하는 환풍기 주파수를 선택하였을 때 도출되는 제2 실내공기질 데이터를 이용하여 에이전트에게 보상을 제공할 수 있다.

[0039] 본 발명의 일 실시 예에 의한 환기 시스템의 제어부(200)는 DQN을 통해 제1 실내공기질 데이터를 개선하기 위하여, 제1 실내공기질 데이터(state), 제1 실내공기질 데이터를 개선하기 위한 환풍기 주파수(action) 및 그에 따른 보상(reward)를 이용하여 보상을 최대화하는 환풍기 주파수를 선택하는 강화학습 모델을 생성하는 강화학습 모델 생성부(210), 강화학습 모델의 입력변수로 사용 가능한 제1 실내공기질 데이터를 측정하는 상태 판단부(230), 제1 실내공기질 데이터에 적용 가능하며 보상을 최대로 하는 환풍기 주파수(Action)를 선택하는 행동 선택부(250) 및 행동 선택부(250)가 선택한 행동에 대한 보상을 제공하는 보상 제공부(270)를 포함할 수 있다.

[0040] 강화학습 모델 생성부(210)는 제1 실내공기질 데이터, 환풍기 주파수 및 제2 실내공기질 데이터를 이용하여 강화학습 모델을 생성할 수 있다. 강화학습 모델 생성부(210)는 제1 실내공기질 데이터에 환풍기 주파수를 적용했을 경우 얻어지는 제2 실내공기질 데이터에 따른 보상을 통해 강화학습 모델을 생성할 수 있다. 나아가 강화학습 모델 생성부(210)는 행동 선택부(250)가 보상을 최대로 하는 환풍기 주파수를 선택할 수 있도록 제1 실내공기질 데이터, 환풍기 주파수, 제2 실내공기질 데이터 및 제2 실내공기질 데이터에 따른 보상을 이용하여 반복적인 학습을 수행하여 강화학습 모델을 강화할 수 있다.

[0041] 보다 구체적으로 설명하면 강화학습 모델 생성부(210)는 도 5와 같은 알고리즘을 이용하여 강화학습 모델을 생성할 수 있다. 제1 실내공기질 데이터는 실내공기질 모델에서 제1 시간 구간에 대한 측정된 지하역사 내 실내공기질을 말하고, 제2 실내공기질 데이터는 제1 실내공기질 데이터와 행동 선택부(250)가 선택한 환풍기 주파수

(제1 주파수)를 입력변수로 하여 추출되는 제1 시간 구간과 연속되는 제2 시간 구간의 지하역사 내 실내공기질을 말한다. 강화학습 모델 생성부(210)는 제어부(200)에서 수행되는 일련의 절차를 반복적으로 수행하여 강화학습 모델을 학습시킴으로써 행동 선택부(250)가 보다 적절한 행동(제1 주파수)을 선택할 수 있게 한다. 본 발명의 일 실시 예에 의한 제1 및 제2 시간 구간은 특정 시간 또는 특정 시간 구간을 의미할 수 있다.

[0042] 상태 판단부(230)는 특정 시간구간에 대한 제1 실내공기질 데이터를 측정하여 제1 시간 구간의 지하역사 내 실내공기질의 오염도(제1 실내공기질 데이터, State)를 식별할 수 있다. 제1 실내공기질 데이터는 특정 시간구간에서 측정된 지하역사 내 실내공기질 오염도를 의미하며, 본 발명에서는 미세먼지 농도(PM10)를 실내공기질 오염도로 사용할 수 있다. 실내공기질 오염도는 미세먼지 농도(PM10) 뿐 아니라 초미세먼지 농도(PM2.5) 등 다양한 수치를 기준으로 할 수 있다.

[0043] 행동 선택부(250)는 상태 판단부(230)에서 식별한 제1 시간 구간의 제1 실내공기질 데이터를 개선하기 위하여, 보상을 최대로 하는 환풍기의 주파수(Action)를 선택할 수 있다. 행동 선택부(250)가 선택 가능한 환풍기의 주파수는 0, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60Hz 중 하나일 수 있다.

[0044] 보상 제공부(270)는 i) 강화학습 모델에 제1 실내공기질 데이터(State)와 행동 선택부(250)에서 선택한 제1 주파수(Action)를 입력변수로 하여 추출된 제2 실내공기질 데이터와, ii) 제1 주파수로 환풍기를 가동할 경우 소모되는 에너지량을 이용하여 보상을 산정할 수 있다. 보다 구체적으로 보상 제공부(270)는 제2 실내공기질 데이터와 소모 에너지량을 이용하여 보상을 산정할 수 있다. 보상 제공부(270)는 에이전트에 보상을 제공하기 위하여 MDPs(Markov Decision Processes)를 이용할 수 있다. 보상 제공부(270)가 보상을 산정하는 방법은 수학식 2와 같다.

수학식 2

[0045]

$$R(t) = 3 \times r_{PM_{10}}(t) + r_{energy}(t)$$

$$r_{PM_{10}}(t) = \exp\left(-\frac{(PM(t) - 91.03)^2}{2 \times 16.04^2}\right)$$

$$r_{energy}(t) = \frac{115^2 - energy^2}{115^2}$$

[0046] 수학식 2에서, $r_{PM_{10}}(t)$은 제2 실내공기질 데이터에 대한 제1 보상 값이고, $r_{energy}(t)$는 소모 에너지량에 대한 제2 보상 값이다. 즉 $R(t)$는 최종 보상 값으로, 제2 실내공기질 데이터와 소모 에너지량 각각에 대한 보상 값을 합연산하여 획득할 수 있다. 또한 수학식 2에서 $r_{PM_{10}}(t)$를 연산할 때 사용되는 91.03의 값은 실내공기질 데이터인 실내 미세먼지 농도의 평균 값을, 16.04의 값은 실내 미세먼지 농도의 표준 편차를 의미한다. 보다 구체적으로 $r_{PM_{10}}(t)$는 지하역사의 이용객의 건강에 직결되는 수치이기 때문에 $r_{energy}(t)$보다 중요한 의미를 갖는 데이터임에 따라 $r_{PM_{10}}(t)$에 대한 가중치를 3으로, $r_{energy}(t)$에 대한 가중치를 1로 설정할 수 있다. $r_{PM_{10}}(t)$과 $r_{energy}(t)$에 대한 가중치 값은 설정에 따라 달라질 수 있다. 보상 제공부(270)는 수학식 2를 통해 0에서 4 사이의 보상을 산정하여 제공할 수 있다.

[0047] 강화학습 모델 생성부(210)는 상태 판단부(230), 행동 선택부(250), 그리고 보상 제공부(270)를 거쳐 획득한 결과물인 현재 상태(제1 실내공기질 데이터, State)에 행동(환풍기 주파수, Action)을 선택할 경우 받는 보상에 대한 정보를 기존의 강화학습 모델에 추가하여 강화학습 모델을 학습시킬 수 있다. 강화학습 모델 생성부(210)는 지속적인 학습을 통해 강화학습 모델의 성능을 향상시킬 수 있다. 도 8은 강화학습 모델의 반복 학습을 설명하기 위한 도면으로, 현재 상태, 행동 및 현재 상태에 행동을 적용하여 얻어진 상태를 누적하여 강화학습 모델을 반복적으로 학습시킬 수 있음을 알 수 있다. 나아가 강화학습 모델 생성부(210)는 강화학습 모델의 학습에 사용되는 데이터가 저장된 메모리가 가득 차게 되면 가장 먼저 저장된 데이터를 제거하고 새로운 데이터를 추가할 수 있다.

[0048] 도 9는 본 발명의 일 실시 예에 의한 반복적인 강화학습을 통해 생성되는 강화학습의 결과를 나타낸 그래프로,

강화학습 모델의 반복 횟수에 따라 보상이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 도 9의 (b)를 참조하면, 초기의 강화학습 모델은 아무런 데이터가 없기 때문에 행동을 적절하게 선택하지 못하고 있으나, 반복 횟수가 거듭될수록 최적의 행동을 선택하는 것을 확인할 수 있다.

[0049] 도 10는 본 발명의 일 실시 예에 의한 강화학습 모델을 통해 선택된 환풍기 주파수에 따른 환기 시스템의 성능을 나타낸 그래프이다. 보다 구체적으로, 도 10의 (a)는 2016년 11월 21~25일, (b)는 2016년 11월 14~18일, (c)는 2011년 1월 31~2월 4일에 측정된 실내공기질에 대하여 본 발명의 환기 시스템과 기존의 수동 환기 시스템의 작동 결과를 비교한 도면이다. 도 10의 (a)에서 실내공기질의 오염도가 유지기준에 미치지 않기 때문에 본 발명의 환기 시스템은 환풍기 주파수를 낮추어 환기 시스템의 가동에 필요한 소모 에너지량을 감소시킨 것을 알 수 있다. 더 나아가 도 10의 (b)와 (c)에서 본 발명의 환기 시스템은 실내공기질의 오염도가 증가할 때 환풍기 주파수를 높여 실내공기질을 개선시킬 수 있다.

[0050] 도 11에는 본 발명의 일 실시 예에 의한 환기 시스템과 기존의 수동 환기 시스템의 소모 에너지량, 환기 시스템의 작동 시간 중 평균 실내공기질 오염도, 작동 시간 중 실내공기질 오염도가 유지기준(150 150㎍/m^3) 이상인 지점(points), 작동 시간 중 CIAI 지수가 민감군(어린이, 노약자 등)에 유해한 영향 유발 수준에 머무르는 시간을 비교한 그래프이다 도 11을 참조하면, 본 발명의 환기 시스템 작동 결과 지하역사 내 이용객이 존재하는 대부분의 시간 동안에 CIAI값을 보통 수준으로 낮춘 것을 확인할 수 있다.

[0051] 도 12에는 본 발명의 일 실시 예에 의한 환기 시스템과 기존의 수동환기 시스템이 탑승객 수 변화에 따른 성능 비교 그래프이다. 도 12을 통해 본 발명의 환기 시스템은 탑승객의 변화 및 러시아워/비러시아워의 변화에 반응하여 작동하는 것을 알 수 있다. 환기 시스템은 러시아워일 때, 환풍기 주파수를 최대로 하여 실내공기질을 향상 시키고, 비러시아워일 때, 환풍기 주파수를 낮추어 에너지를 저감시킬 수 있다. 따라서 본 발명의 환기 시스템은 실내공기질 시스템의 동특성을 학습하며 변화하는 조건에 맞게 환기시스템을 제어할 수 있다. 본 발명의 환기 시스템에 대한 성능 평가 결과, 3주 동안 실내공기질을 유지하면서 에너지소모량을 14.4% 감소시켰다.

[0052] 도 13은 본 발명의 일 실시 예에 의한 환기 시스템과 기존의 수동환기 시스템이 외부 공기질 변화에 따른 성능 비교 그래프이다. 도 13의 (a)는 외부 공기질이 대체로 '좋음' 상태(good condition)일 때의 성능 비교 그래프이다. 해당 기간에서는 외부 공기질이 실내공기질의 악화에 영향을 미치지 않기 때문에 본 환기시스템은 낮은 수준의 환풍기 주파수를 유지한다. 하지만 도 13의 (c)와 같이 '나쁨' 상태 (unhealthy condition)의 외부 공기질 조건에서는 환풍기 주파수를 최대로 하여 실내공기질을 향상시킨다.

[0053] 도 14은 본 발명의 일 실시 예에 의한 환기 시스템의 성능을 검증한 결과를 나타낸 표이다. 도 13을 참조하면, 본 발명의 환기 시스템의 성능을 판단하기 위하여 기존의 수동 환기 시스템과의 에너지소모량과 CIAI를 이용하여 비교할 수 있다. CIAI(Comprehensive Air-quality Index, 대기질 지수)는 현재 실내공기질의 상태와 이것이 인체의 영향에 미치는 영향을 평가할 수 있다. CIAI는 제2 실내공기질 데이터에 따라 결정되는 값일 수 있다. CIAI는 good, moderate, unhealthy for sensitive groups, unhealthy, very unhealthy 그리고 hazardous의 6단계로 구분될 수 있다. CIAI는 수학식 3에 따라 연산될 수 있다. 수학식 3에서, C_p는 대상 오염물질의 현재 농도, BP_{HI}는 특정 시간구간의 최대 오염도, BP_{LO}는 특정 시간구간의 최소 오염도, I_{HI}는 BP_{HI}에 해당하는 지수 값, I_{LO}는 BP_{LO}에 해당하는 지수 값을 의미한다.

수학식 3

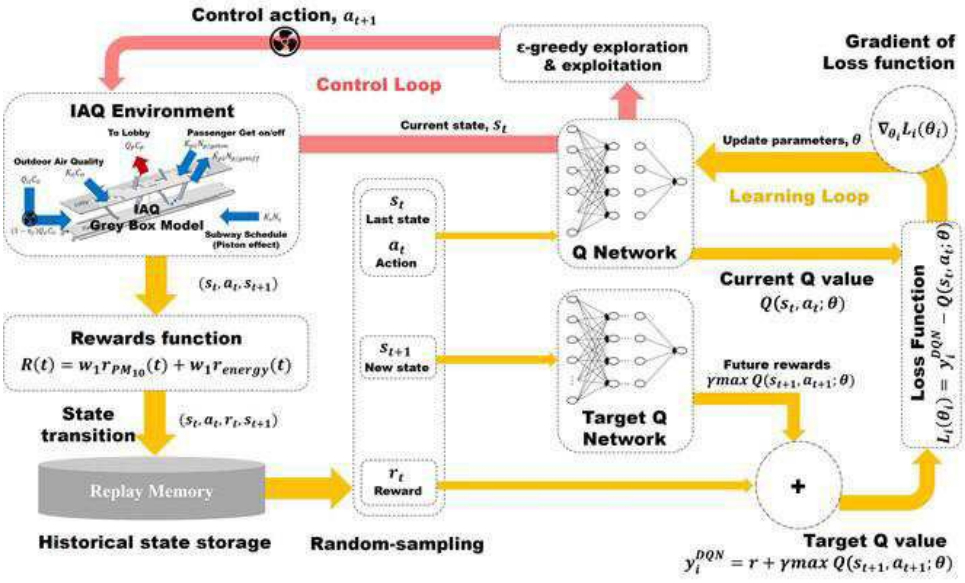
[0054]
$$CIAI = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}}(C_p - BP_{LO}) + I_{LO}$$

[0055] 이와 같이 본 발명의 일 실시 예에 의한 환기 시스템은 기존 수동 환기 시스템과 대비하여 지하역사 내 실내공기질을 유지하면서, 환풍기 구동에 소모되는 에너지량의 14.4%를 절감하는 효과를 가질 수 있다.

[0056] 본 명세서와 도면에 개시된 본 발명의 실시 예들은 본 발명의 기술 내용을 쉽게 설명하고 본 발명의 이해를 돕기 위해 특정 예를 제시한 것뿐이며, 본 발명의 범위를 한정하고자 하는 것은 아니다. 여기에 개시된 실시 예들 이외에도 본 발명의 기술적 사상에 바탕을 둔 다른 변형 예들이 실시 가능하다는 것은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 자명한 것이다.

도면

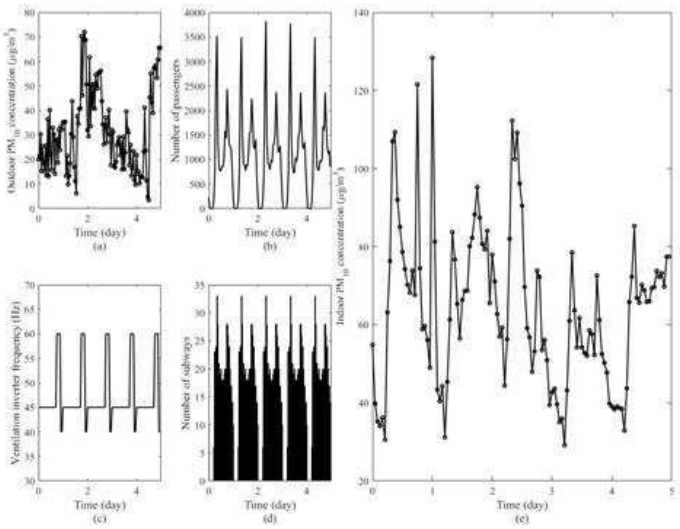
도면1


Control action, a_{t+1}
ε-greedy exploration & exploitation
Gradient of Loss function
Control Loop
IAQ Environment
To Lobby
Passenger Get on/off
Outdoor Air Quality
IAQ Grey Box Model
Subway Schedule (Piston effect)
Current state, S_t
Update parameters, θ
$\nabla_{\theta_i} L_i(\theta_i)$
Learning Loop
S_t Last state
a_t Action
Q Network
Current Q value $Q(s_t, a_t; \theta)$
(s_t, a_t, s_{t+1})
Rewards function $R(t) = w_1 r_{PM_{10}}(t) + w_1 r_{energy}(t)$
S_{t+1} New state
Future rewards $\gamma max\, Q(s_{t+1}, a_{t+1}; \theta)$
Target Q Network
Loss Function $L_i(\theta_i) = y_i^{DQN} - Q(s_t, a_t; \theta)$
State transition
(s_t, a_t, r_t, s_{t+1})
r_t Reward
+
Replay Memory
Historical state storage
Random-sampling
Target Q value $y_i^{DQN} = r + \gamma max\, Q(s_{t+1}, a_{t+1}; \theta)$

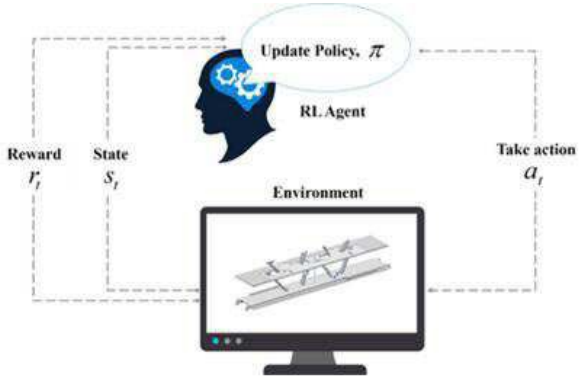
도면2


환기 시스템
실내공기질 모델 생성부 [100]
강화학습부[200]
강화학습 모델 생성부 [210]
상태 판단부[230]
행동 선택부[250]
보상 제공부[270]

도면3



도면4

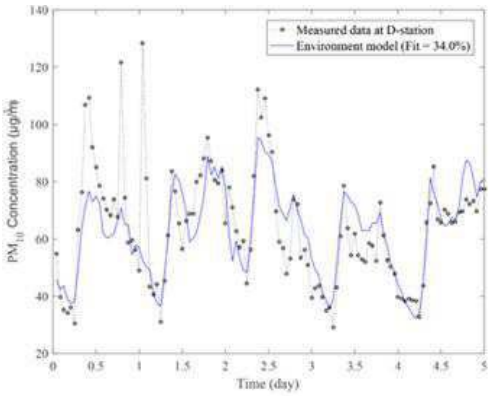


도면5

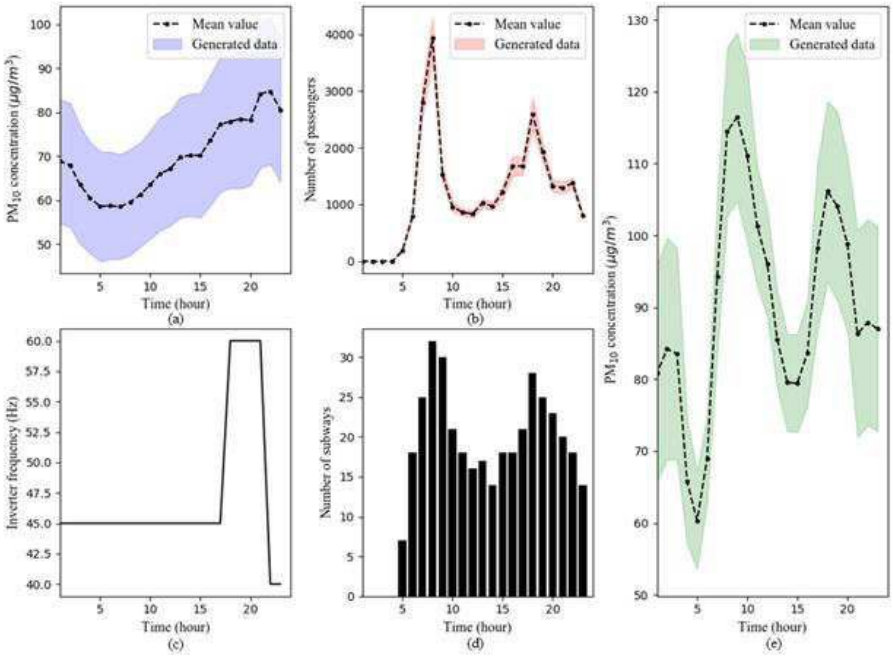
Algorithm 1 Pseudocode for training DQN agent for IAQ system with experience replay

Initialize environment for IAQ system at platform of the D-station
Initialize replay memory D to capacity N
Initialize action-value function Q with random weights
For episode = 1 to M **do**
  Initialize sequence $s_1 = \{x_1\}$ and preprocessed sequenced $\phi_1 = \phi(s_1)$
  For t = 1 to T **do**
    With probability ε select a random action a_t
    Otherwise select a_t t= $\max_a Q^*(\phi(s_t), a_t \mid \theta_t^-)$
    Execute a_t in environment and observe reward r_t and dynamics properties of indoor PM_{10} concentration x_{t+1}
    Set $s_{t+1} = x_{t+1}$ and preprocess $\phi_{t+1} = \phi(s_{t+1})$
    Store transition (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) in D
    Sample random minibatch of transition (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) from D
    Set $y_t^{DQN} = \begin{cases} r_t & \text{for terminal } \phi_{t+1} \\ r_t + \gamma \max_{a_t} Q(s_t, a_t \mid \theta_t^-) & \text{for non-terminal } \phi_{t+1} \end{cases}$
    Perform a gradient descent step on $((y_t^{DQN} - Q(s_t, a_t; \theta_t))^2$ according to eq. (4)
  End
End

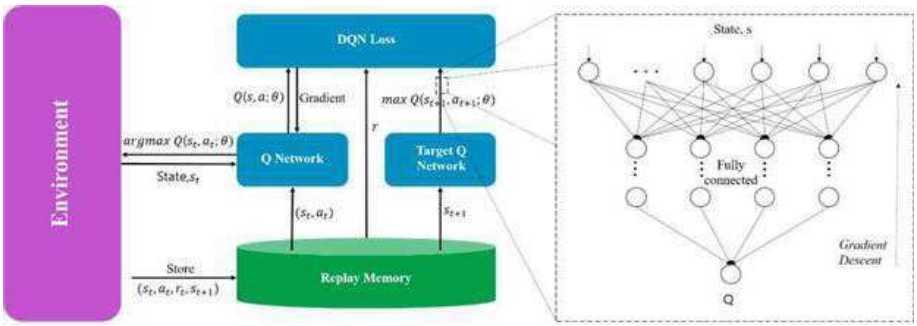
도면6


Measured data at D-station
Environment model (Fit = 34.0%)
PM10 Concentration (μg/m³)
Time (day)

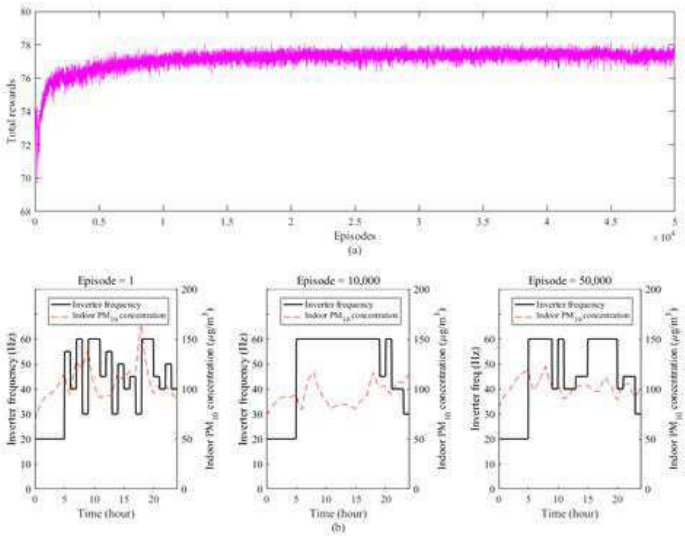
도면7


Mean value
Generated data
PM10 concentration (μg/m³)
Time (hour)
(a)
Number of passengers
(b)
Inverter frequency (Hz)
(c)
Number of subways
(d)
(e)

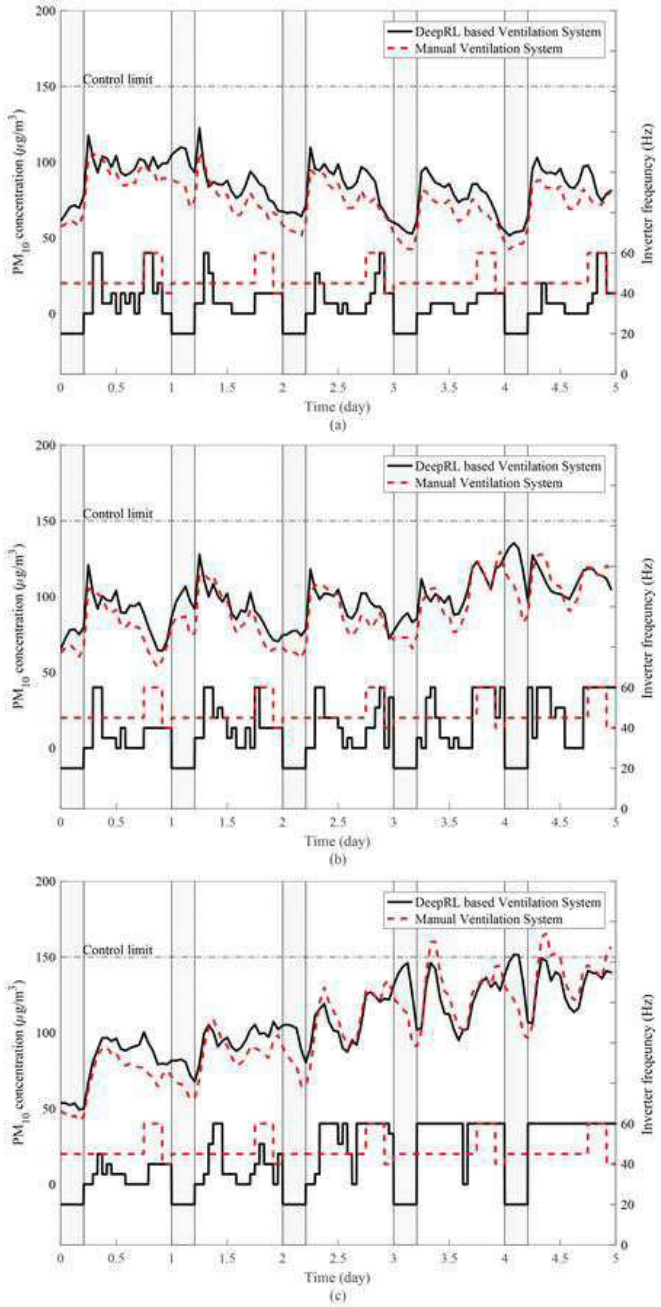
도면8


Environment
DQN Loss
Gradient
Q Network
Target Q Network
State, s_t
Store
Replay Memory
State, s
Fully connected
Gradient Descent
Q

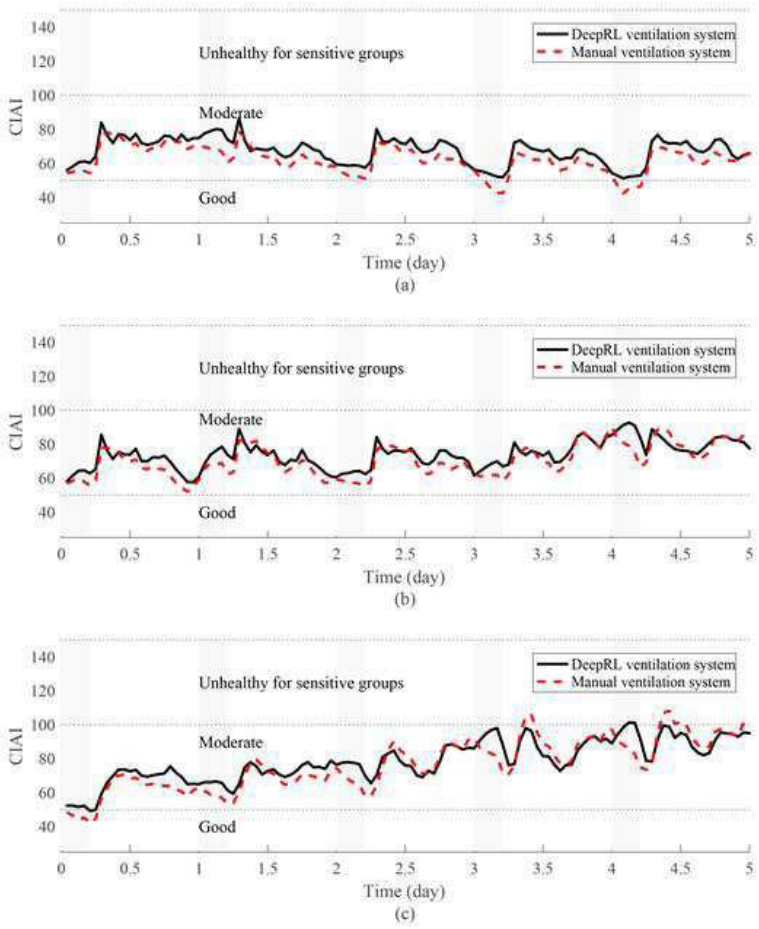
도면9


Total rewards
Episodes
(a)
Episode = 1
Episode = 10,000
Episode = 50,000
Inverter frequency
Indoor PM10 concentration
Inverter frequency (Hz)
Indoor PM10 concentration (μg/m3)
Time (hour)
(b)

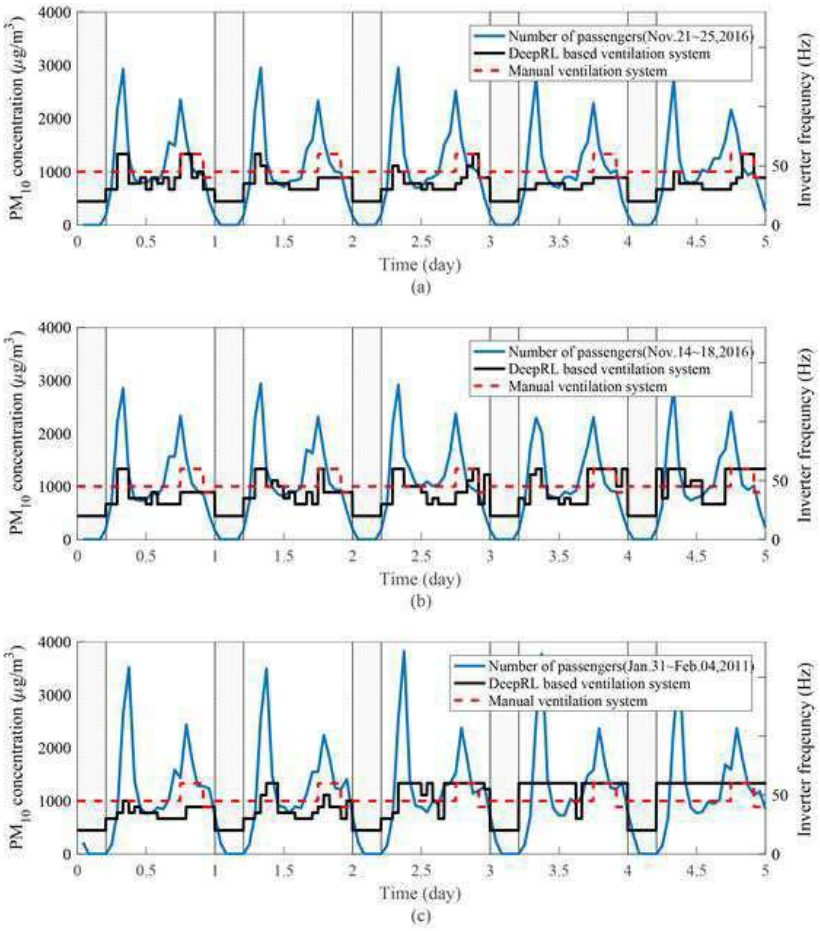
도면10


DeepRL based Ventilation System
Manual Ventilation System
Control limit
PM10 concentration (μg/m3)
Inverter frequency (Hz)
Time (day)
(a)
DeepRL based Ventilation System
Manual Ventilation System
Control limit
PM10 concentration (μg/m3)
Inverter frequency (Hz)
Time (day)
(b)
DeepRL based Ventilation System
Manual Ventilation System
Control limit
PM10 concentration (μg/m3)
Inverter frequency (Hz)
Time (day)
(c)

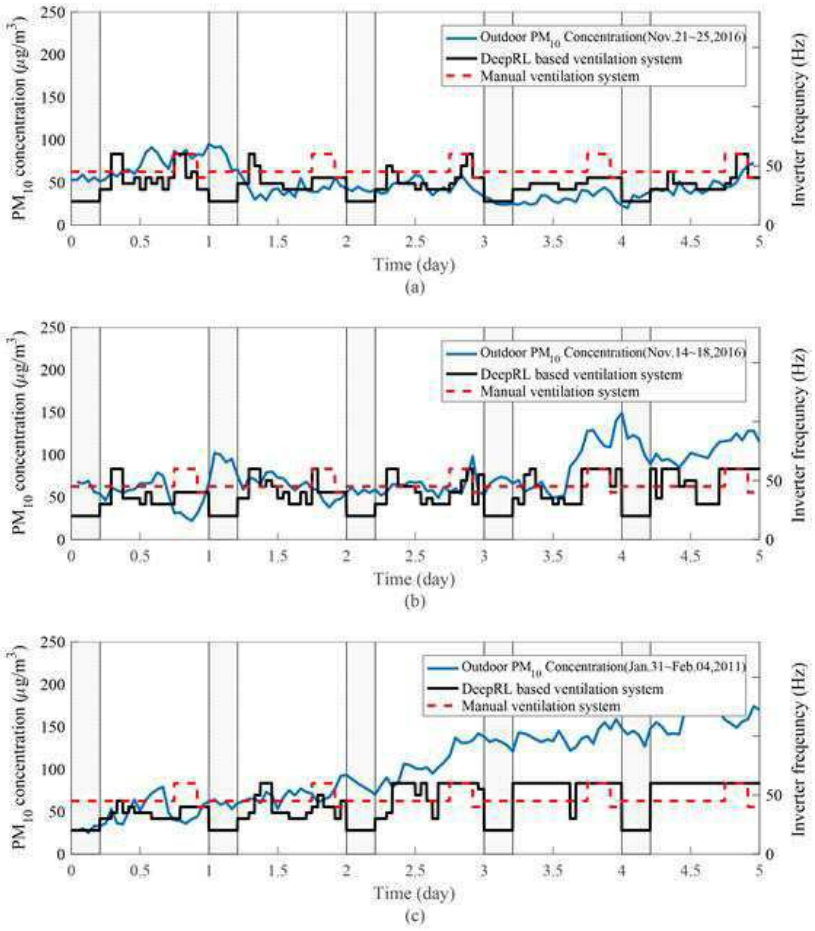
도면11


DeepRL ventilation system
Manual ventilation system
Unhealthy for sensitive groups
Moderate
Good
CIAI
Time (day)
(a)
(b)
(c)

도면12


Number of passengers(Nov.21~25,2016)
DeepRL based ventilation system
Manual ventilation system
PM10 concentration (μg/m3)
Inverter frequency (Hz)
Time (day)
(a)
Number of passengers(Nov.14~18,2016)
DeepRL based ventilation system
Manual ventilation system
PM10 concentration (μg/m3)
Inverter frequency (Hz)
Time (day)
(b)
Number of passengers(Jan.31~Feb.04,2011)
DeepRL based ventilation system
Manual ventilation system
PM10 concentration (μg/m3)
Inverter frequency (Hz)
Time (day)
(c)

도면13



도면14

Scenario	Ventilation system	Energy consumption (kWh)	Average PM_{10} on the platform ($\mu g/m^3$)	Excessive points of $PM_{10} \geq 150\ \mu g/m^3$	Time exceeding control limit of CIAI (hr)
Good OAQ conditions	Manual	9193.85	74.02	0	0
	DeepRL	6533.59	84.11	0	0
	(Improvement)	**(+28.93%)**	**(−13.63%)**		
Moderate OAQ conditions	Manual	9193.85	90.32	0	0
	DeepRL	7846.78	97.08	0	0
	(Improvement)	**(+14.65%)**	**(−7.48%)**		
Unhealthy OAQ conditions	Manual	9193.85	103.09	8	8
	DeepRL	9238.46	106.98	2	2
	(Improvement)	**(-0.49%)**	**(−3.77%)**		
Accumulated	Manual	27,581.55	89.14	8	8
	DeepRL	23,618.83	96.05	2	2
	(Improvement)	**(+14.37%)**	**(−5.51%)**		