

# 지하철 역사 및 터널의 실시간 공기질 제어 시스템

지하철 역사와 터널의 공기질을 개선하고 공조 에너지를 절약할 수 있는 시스템과 로직을 개발하여 전체 역사 및 터널에 적용 가능한 인공지능형 운전기술을 제공한다.

## 서론

지하철 역사와 터널에서 환기의 목적은 승객과 근로 인력에 쾌적한 환경을 제공하는 것이기 때문에 적절한 환기량을 공급해야 한다. 또한, 에너지를 절약할 수 있는 작동방법을 고려해야 함에 따라 인공지능형 시스템을 개발하여 효율적으로 공기질을 개선하고자 하였다.

에너지 절약을 위한 제어 방법을 개발하기 위하여 외기의 공기질과 실내의 공기질에 따라 대합실, 승강장, 본선터널의 급배기 제어에 따른 공기질 변화를 측정하여 제어로직을 개발하였다.

이를 활용하여 전체 역사 및 터널에 적용 가능한 인공지능형 운전기술이 될 수 있도록 본 연구를 진행하였다.

## 시스템 개요

공기질 제어 시스템의 구성은 **그림 1**과 같으며, 일반적인 환경환기 장치의 제어로직은 피드백 제어를 적용하지만, 지하철에서 사용하는 팬은 대형 설비로서 설비 수명과 유지보수를 고려하여 일정 제어 간격이 요구되었다.

이에 따라 30분 간격의 예측 데이터를 생성하고 5분 간격으로 6번

노희전

(주)나라컨트롤 산업사업본부 EPT팀

hjnoh@naracontrols.co.kr

이재효

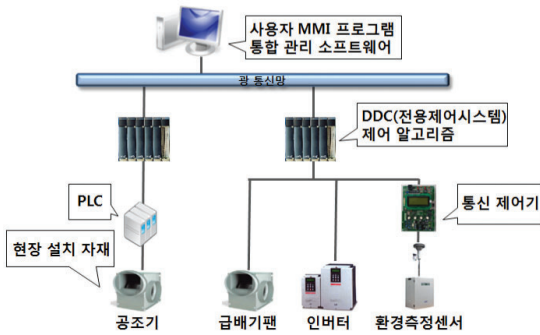
건국대학교 기계공학과

jaihyole@konkuk.ac.kr

김인원

건국대학교 화학공학과

in-won@konkuk.ac.kr

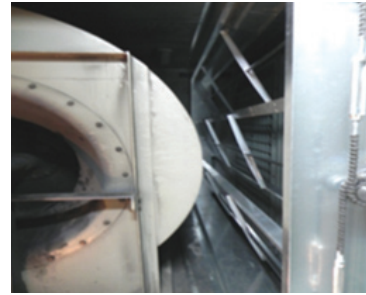


[그림 1] 공기질 제어 시스템 구성

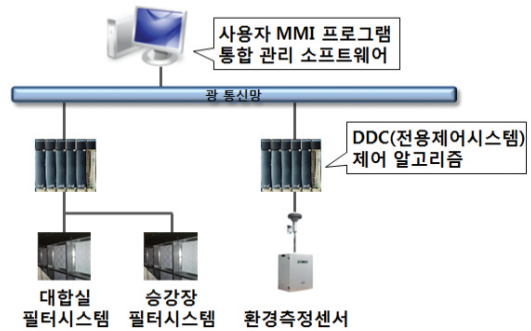
의 피드백 제어로 보정하여 제어의 정확도를 높일 수 있는 방법으로 그림 2와 같은 피드포워드-피드백 제어를 적용하였다.

피드백 제어는 PM10 최대기준값을 설정하고 역사의 공기질 농도를 측정 후 센서 네트워크로 전송하고 모니터링하며, 피드백 제어기에서 계산 및 분석하여 인버터값을 설정하여 환기팬을 작동시킨다. 이러한 피드백 제어는 5분 간격으로 이루어진다.

피드포워드 제어는 PM10 최대기준값을 설정하고 공기질 농도를 측정 후 센서 네트워크로 전송하고 모니터링한 후 예측 알고리즘이 들어간다. 예측 알고리즘을 통하여 최적의 예측 가중치값을 출력하여 피드백 제어 결과 값을 보정하게 된다.



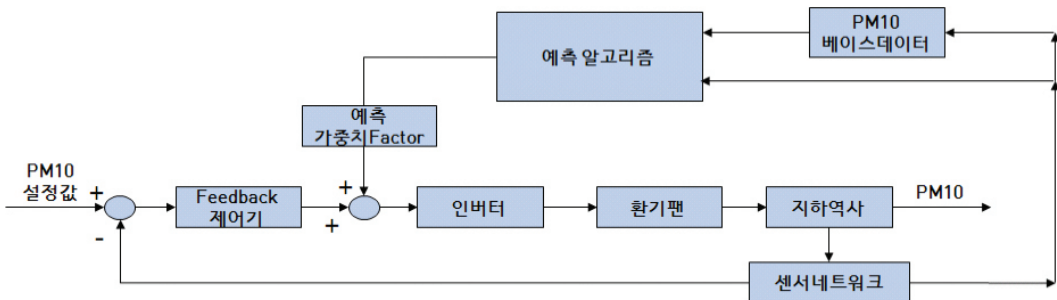
[그림 3] 댐퍼형 필터시스템



[그림 4] 필터시스템 통합 구성

대합실과 승강장 공조기에 그림 3과 같은 댐퍼형 필터시스템을 구축하여 그림 4와 같이 공기질 제어 시스템으로 통합하였다.

황사현상과 같이 내부와 비교하여 외부 공기의 오염이 심한 경우, 대합실 및 승강장용 공조기에 설치된 댐퍼형 필터시스템을 적용함으로써 내부 공기질을 기준치 이하로 항상 유지할 수 있다



[그림 2] 피드포워드-피드백 제어로직

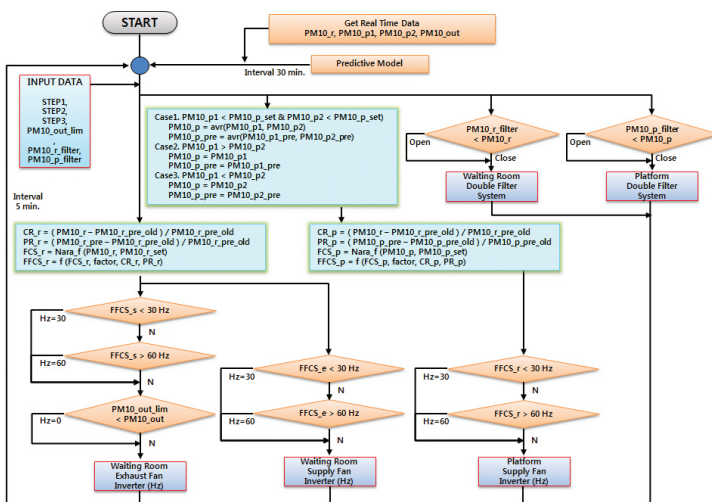
록 하였다.

## 테스트베드 실증

공기질 제어 시스템의 성능을 검증하기 위하여 다음과 같은 테스트베드를 통해 실험을 진행하였다.

- 테스트베드 역사: 서울 지하철 3호선 D 역사
- 테스트베드 터널 구간: 서울 지하철 3호선 D 역사와 H 역사 구간
- 공조기 구성: A공조실(대합실급기, 대합실 배기, 승강장급기, 승강장배기, 유막급기), B공조실(승강장급기, 승강장배기, 유막급기)
- 필터시스템 설치 공조기: 대합실 급기공조기 1대, 대합실 환기공조기 1대, 승강장 급기공조기 2대
- 설치 센서: 온도, 습도, CO<sub>2</sub>, PM10, PM2.5, 베타레이

그림 5는 지하철 역사 내의 공기질 제어 시스



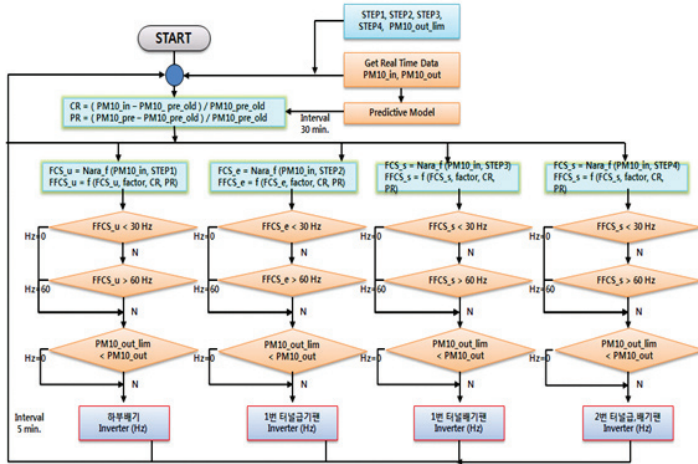
[그림 5] 역사 공기질 제어 로직

템 제어로직이다. 외부 공기질과 내부 공기질, 그리고 PM10 최대 기준값 등의 정보와 예측모델에 따라서 적절한 인버터 주파수를 계산한다. 황사 현상과 같이 외부 공기질이 매우 나쁜 상태에서는 환기실의 대합실과 승강장용 공조기에 설치된 필터시스템이 작동되며, 역사 내부를 양압으로 유지하기 위하여 배기공조기는 정지된다. 필터시스템은 외기와 내부 공기질에 따라 연동하여 작동한다.

그림 6은 지하철 터널의 공기질 제어 시스템 제어로직이다. 역사와 마찬가지로 외부 공기질과 내부 공기질, 그리고 PM10 최대 기준값 등의 정보와 예측모델에 따라서 적절한 인버터 주파수를 계산한다. 터널에서의 오염물질 배출에 효과가 큰 하부배기, 본선급기, 본선배기 순으로 터널의 공기질에 따라 작동되며, 이는 지하철의 운영자 입장에서 공기질 개선과 전기소비 절약을 동시에 만족시키기 위함이다.

터널의 경우 PM10 최대기준치를 Step 1, 2, 3, 4의 단계로 구분하여 Step 1 이하에서는 환기팬이 작동하지 않고, Step 1~2에서는 하부배기만 작동된다. Step 2~3에서는 하부배기와 본선급기가 점차적으로 작동하고 Step 3~4 사이에서는 모든 환기팬이 작동한다. Step 4를 넘어갈 경우에는 또 다른 본선 급기팬과 배기팬이 작동하도록 로직이 구성되어 있다.

필터시스템은 정해진 기준 농도 값을 통해 연동제어 실증 시험을 진행하였으며 기준 농도값에 근소한 차이로 미세먼지 농도가 측정될 시 필터시스템의 연속적인 Open/Close로



[그림 6] 터널 공기질 제어 로직

인한 고장을 방지하기 위하여  $\pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위를 설정하였고 측정된 PM10의 값은 5분 이동평균 값을 사용하였다.

## 테스트베드 실증 결과

역사와 터널 내부 PM10 값과 사용에너지를 비교하기 위한 실험을 실시하였다. 기존 서울메트로가 시행하고 있는 환기장치 가동방법과 개발된 공기질 제어 시스템을 적용한 경우를 비교하였으며, 대합실, 승강장, 터널로 구분하여 실시하였다.



[그림 7] 기준 값에 따른 필터시스템 가동

대합실에서 기존 제어 방법을 적용한 경우를 기반의 운전 제어로 평균 PM10 값은  $60.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이었고, 급·배기 인버터는 평균 48.2 Hz로 운전되었으며, 공기질 제어 시스템을 적용한 경우 피드포워드 피드백 제어로 평균 PM10 값은  $52.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이었고, 급·배기 인버터는 평균 43.8 Hz로 운전되었다. 공기질 제어 시스템 적용시 운전에서 공기질이 약 20% 좋아졌으며, 에너지 소비도 약 10% 절감

되는 것을 확인하였다.

승강장에서 기존 제어 방법을 적용한 경우를 기반의 운전제어로 평균 PM10 값은  $35.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이었고, 급기 인버터는 평균 48.2 Hz로 운전되었으며, 공기질 제어 시스템을 적용한 경우 피드포워드 피드백 제어로 평균 PM10 값은  $27.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이었고, 급기 인버터는 29.9 Hz로 운전되었다. 공기질 제어 시스템 적용시 공기질이 약 21% 좋아졌으며, 에너지 소비는 약 38% 절감되는 것을 확인하였다.

터널의 경우 기존 제어 방법을 적용한 경우와 공기질 제어 시스템을 적용한 후 PM10 최대기준 값  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 본선배기팬, 하부배기팬, 본선급기팬에서 각각 약 32%, 11%, 20% 정도의 에너지가 절감되는 것을 확인하였다.

그림 7은 농도에 따른 필터시스템의 작동 유무를 표현한 그래프로써 측정 장소의 미세먼지 기준 농도값은  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 사용하여 실험한 결과이다. 필터시스템은 기준 농도를 설정하여 미세먼지의 일정농도 이하의 깨끗한 공기질을 공급하는 것에 목적이 있다. 2단 필터를 계속적으로 사용할 경우 수명이 최대 3~4주 정도이지만 필

터시스템을 통하여 2단 필터를 사용할 경우 최대 3개월 사용이 가능하다. 필터시스템은 외부적인 환경변화에 따라 운영됨으로써 기준 농도 이하의 깨끗한 공기의 공급과 필터의 수명을 연장할 수 있다는 장점이 있다.

## 결론

현재 서울 지하철 대부분 역사에 스크린도어가 설치되어 터널부분과 역사를 분리시킴으로써 지하철 운행에 의해 발생하는 유해물질이 역사의 승객에게 미치는 영향이 줄어들었으며 승객의 안전도 상당히 높은 수준으로 개선되었다. 이에 따라 역사 내 환기가 열차풍에 영향을 거의 받지 않게 됨에 따라 공조기에 의한 공기질 제어 방법이 중요하게 되었다. 따라서 공조시스템과 필터시스템을 통합한 공기질 제어 시스템을 구축하고 공기질 제어 로직을 개발하여 테스트베드에 적용함으로써 지하 환경에서의 쾌적성 유지와 에너지 절감을 동시에 만족시킬 수 있음을 확인하였다.

또한, 본선터널에서도 가장 효과적인 환기 방법을 연구하여 터널의 공기질 개선과 에너지 절감이 가능함을 확인하였다.

이와 같은 지하철 역사 및 터널에 실시간 공기

질 제어 시스템과 제어 로직을 적용함으로써 항상 쾌적한 지하 공간을 유지할 수 있으며, 공조 및 환기에 사용되는 에너지 절약을 실현할 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고문헌

1. 김조천, 2010, 지하철역사 내 스크린도어 설치에 따른 미세먼지 농도 저감 효과, 공기청정지, 제23권, 제2호, 통권89호, pp. 8-18
2. 이석철, 2009, USN 기반의 지하철역사 모니터링 시스템의 설계 및 개발, 한국멀티미디어학회지, 제12권, 제11호, pp. 1629-1639
3. 정진호, 2012, 지하철역사 내 공기질 개선 및 에너지 효율을 위한 인공지능형 필터링 시스템, 제27회 ICOROS 학술대회, pp. 477-478
4. Kim MH, 2010, Data-driven prediction model of indoor air quality in an underground space, Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 27, No.6, pp. 1675-1680
5. 노희전, 2010, 지하철 역사와 본선 터널의 공기질 통합관리 시스템, 공기청정기술, 제23권, 제2호, 통권89호, pp. 28-34 