

지하철 내 미세먼지와의 싸움, 그리고 AI

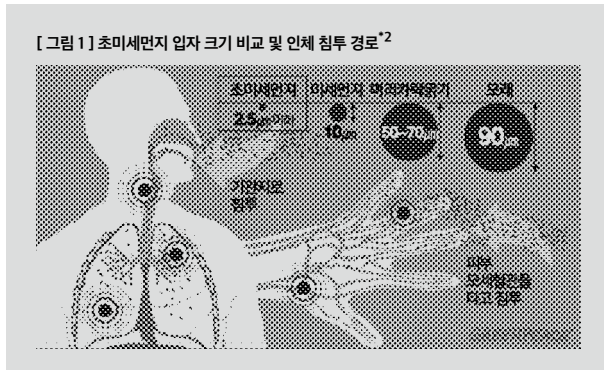
미세먼지 문제를 똑똑한 기술로 해결하기 위해서는 먼저 미세먼지가 무엇인지 정확히 이해할 필요가 있다. 최근 언론 보도를 통해 자주 언급되는 용어는 미세먼지 주의보, 황사 발생, 초미세먼지 발생, 2차 생성먼지 등 매우 다양하다. 이와 더불어 대기오염 외에 우리가 생활하는 공간의 실내 공기질에 대한 언급이 자주 등장하고 있다. 특히 하루 800만 명 이상이 이용하는 대중교통 시설인 지하철과 전국 590만 초중고생이 다니고 있는 학교, 유치원, 어린이집 등 생활 밀착형 공간에서의 미세먼지 문제가 중요한 화두가 되고 있다.

미세먼지란 무엇인가?

크기가 $10\mu\text{m}$ (마이크로미터, $1/1,000,000\text{m}$)보다 작은 경우에 한하여 미세먼지(particulate matter less than $10\mu\text{m}$, PM10)라 칭하고 있다. 우리가 흔히 말하는 미세먼지는 공기 중에 부유하는 직경 $10\mu\text{m}$ 이하의 모든 액체 또는 고체인 물질(또는 티끌)이라 할 수 있다. PM2.5란 직경 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 모든 공기 중 부유 입자를 말하는 것이다. 우리는 이를 미세먼지와 구분하여 초미세먼지라고 칭한다. $10\mu\text{m}$ 보다 큰 먼지는 입안의 점액, 콧털, 상기도에서 충분히 걸러지지만, $10\mu\text{m}$ 이하의 입자는 우리의 호흡기에 깊숙이 침투하여 폐까지 도달할 수 있다. 미세먼지가 기관지에 쌓이면 가래가 생기고 기침이 잦아지며 기관지 점막이 건조해지면서 세균이 쉽게 침투한다. 만성 폐질환이 있는 사람은 감염성 질환에 더욱 취약해지기도 한다. 특히, 초미세먼지는 폐포를 통해 혈관에 침투해 염증을 일으킬 수 있다. 이 과정에서 혈관이 손상되면서 협심증, 뇌졸중 등 심혈관 질환이 발생할 수도 있는 것이다.

최근 발표된 연구 결과에 따르면 초미세먼지로 인한 사망인구는 1999년 350만 명에서 2015년 420만 명으로 증가한 것으로 추정된다.¹ 미세먼지의 직경에 대한 연구와 인체 유해성 연구가 활발해지면서 학계에서는 폐의 더 깊은 부분(허파파리)까지 먼지가 침투하여 혈액과 산소 교환 시 인체에 해를 가하는 결정적 크기를 $2.5\mu\text{m}$ 로 한정했다. 이때부터 초미세먼지가 위험을 일으키는 먼지로 등극하게 됐다.

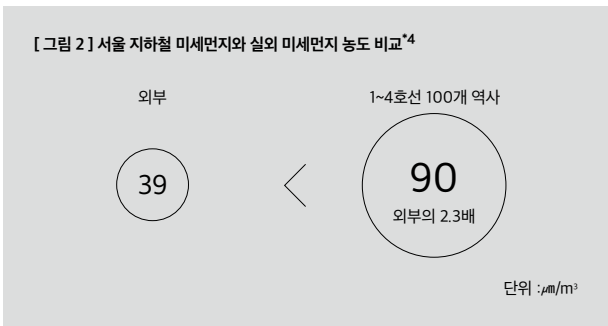
미세먼지의 크기 보다는 성분이 더 중요하지 않을까라는 의문에 대해서는, 크기가 조금 더 중요하다고 이해하면 좋을 것 같다. 앞서 언급했듯이, 크기에 따라 인체에 침투 여부가 결정되기 때문이다. 최근 몇 년 동안 대기 미세먼지 고농도 현상이 빈번하게 발생하면서 미세먼지에 대한 다양한 대책이 쏟아지고 있다. 특히 현대인이 대부분의 시간을 보내는 실내 공간의 공기질 관리 중요성이 증대되고 있으며, 이용자 수가 많은 지하 역사 등의 다중 이용 시설과 민감 계층이 이용하는 공공시설 및 학교 등의 미세먼지 저감이 시급하다.



지하철 공간의 미세먼지

저자는 실질적으로 국민들의 삶의 질을 높이기 위해 많은 사람들이 이용하는 지하철 미세먼지 문제를 인공지능을 통해 해결하는 방법에 대해 얘기를 풀어보고자 한다. 통상 지하철은 차량, 지하철역, 터널의 세 공간적 요소를 포함한다. 이 가운데 우리가 접하는 공간은 차량 내부나 지하철역 내부 공간인 대합실, 승강장, 환승 통로로 국한된다. 지하 공간은 기본적으로 부족한 일사와 높은 습도로 인해 공기질이 지상보다 전반적으로 좋지 않으며, 지속적인 환기(ventilation)를 통해 지상과 유사한 수준을 유지하는 것을 기본으로 하고 있다.

그러나, 환기만으로는 지하철 실내 공기질 문제를 해결할 수 없다. 왜냐하면, 지하철 공기질이 외기와 밀접하게 연관되어 있어 오염된 외기의 유입이 실내공기를 더욱 악화시킬 수 있기 때문이다.³ 특히, 지하철은 교통이 복잡한 도심의 지하공간에서 운행되기 때문에 도로에서 발생하는 매연 등 자동차 배출 오염 물질에서 자유로울 수 없다. 환기구와 출입구를 통해서 언제든지 도로 오염물질이 지하로 유입될 수 있다. 물론 외부에서 유입되는 공기 중 오염물질을 제거할 수 있는 저감장치가 일부 설치되어 운영되고 있지만, 고성능 사양이 적용되기는 어려운 실정이다.



지하철에서의 미세먼지 발생원은 차량 운행으로 발생하는 마모 입자, 열차풍에 의한 재비산(再飛散)과 외부에서 유입되는 미세먼지라고 볼 수 있다. 차량 운행으로 발생하는 마모 현상은 차륜(wheel)과 선로(rail) 간 마찰, 전력선과 집전부(pantograph) 간 마찰, 브레이크 마찰로 구분되며 이 모든 마찰은 다양한 크기의 먼지 또는 초미세먼지의 발생원이 되고 있다.⁵

지하철 미세먼지에 대해 기본적인 이해가 되었다면, 지하철 미세먼지 문제 해결에 AI를 활용하는 시도를 해보자. 우선 지금까지의 내용을 정리해보자. 첫째, 지하철 먼지는 외부에서 유입되거나 터널 안에서 차량 운행에 따라 발생하고 있다. 둘째, 미세먼지를 포함한 나쁜 공기를 정화하려면 환기가 필요하지만 환기량이 증가하면 운영 비용이 증가한다. 셋째, 환기량을 증가시켜도 바깥 공기가 좋지 않을 경우 지하철 공기질은 개선되지 않는다. 이 세 가지 문제를 해결할 수 있는 간단한 방법은 아래와 같다.

글 | 권순박 dapairsolution@gmail.com

2003년 미세먼지 분야 박사 학위 취득 후 서울대학교와 일본기계연구원(AIST)을 거쳐, 2006년부터 한국철도기술연구원 교통환경연구팀에서 지하철 미세먼지 문제를 연구하고 있습니다. 지난 2017년 9월 '인공지능 기반 미세먼지 해결'이라는 비전을 가지고 벤처기업 '쥬디에이피(DAP: Deep-learning Air solution for Public)'를 창업하였습니다. 다양한 연구 개발 과제를 수행하면서 논문과 특허 위주의 연구를 수행하던 정부출연연구기관 연구원이 스타트업 벤처의 대표가 된 이후, 기술실용화를 통한 사업화라는 새롭고 어려운 도전을 이어나가고 있습니다. 이 자리를 빌어 쉽지 않은 도전을 함께 하고 있는 저희 디에이피 직원들에게 감사를 표하고 싶습니다.

'바깥 공기가 좋을 때만 환기를 실시하여 비용도 절감하고 공기질도 개선한다.'

그러나 이 해결 방안에는 외부 공기상태가 계속 좋지 않으면 환기를 할 수 없는 상황에 처하게 된다는 약점이 있다. 지하철 안에는 계속 먼지가 발생되고 있는데 말이다. 따라서, 환기를 하지 않고도 공기질을 개선할 수 있는 공기정화장치가 필요하다.

이제 앞선 간단한 답에 조건을 추가하여 다음과 같은 방법을 적용할 수 있다.

'바깥 공기가 좋을 때는 환기를 하고, 좋지 않을 때는 실내 공기정화장치를 가동하는 것이다.'

여기에 기계 설비(환기 장치, 정화 장치 등) 운영의 문제를 덧붙이자면, 공기를 처리하여 효과가 나타나기까지는 일정 시간이 소요된다. 즉, 공기에 먼지가 많을 때는 기계 설비를 가동시켜도 효과가 나타나기까지 시간이 제법 소요되고 처리 공간이 커질수록 더 많은 시간이 걸린다는 것이다. 따라서 기계 설비의 성능이 제대로 구현되려면 사전에 설비를 가동시킬 필요가 있다. 미세먼지 오염 상태를 미리 파악할 수 있다면 말이다. 위의 사항을 반영하여 지하철 미세먼지 문제를 아래와 같은 방법으로 해결할 수 있다.

'바깥 공기 상태와 실내 공기 상태를 이용하여 지하철 미세먼지 오염을 예측하고, 이에 맞추어 환기나 공기정화 설비를 사전에 가동한다.'

지하철 미세먼지 문제를 해결하기 위한 AI

지하철 미세먼지 문제를 해결할 수 있는 방법의 핵심은 여러 데이터를 분석하여 미세먼지를 사전에 예측하는 것이다. 이때 AI를 활용하면 가장 정확한 예측이 가능할 것이다. 그렇다면 어떤 데이터를 통해 지하철 미세먼지를 예측할 수 있을까? 가장 좋은 방법은 바깥 공기 상태와 실내 공기 상태를 직접 측정하여 데이터를 얻는 것이다. 그러나 정확한 측정을 위해 많은 비용과 노력이 요구되기 때문에 보다 효율적인 데이터 수집 방안을 고민할 필요가 있다. 정부에서 제공하는 다양한 공공 데이터는 가장 효율적인 데이터 중 하나이다. 에어코리아(AirKorea)는 전국 97개 시군에 설치된 323개의 측정망에서 1시간 단위로 미세먼지를 포함한 다양한 오염 물질의 농도 값을 측정하여 공공 데이터를 제공한다.

미세먼지 농도에 영향을 주는 또 다른 요소는 기상 조건이다. 기상정보에 대한 공공데이터는 기상청에서 제공하고 있으며 그 항목에는 기압, 기온, 풍향, 풍속, 습도, 강수량 등이 있다. 이 외에 추가로 활용할 수 있는 데이터는 도로 교통량 정보다. 도심 지역에 위치한 지하 역사는 환기구 주변 도로 교통 오염원에서 자유로울

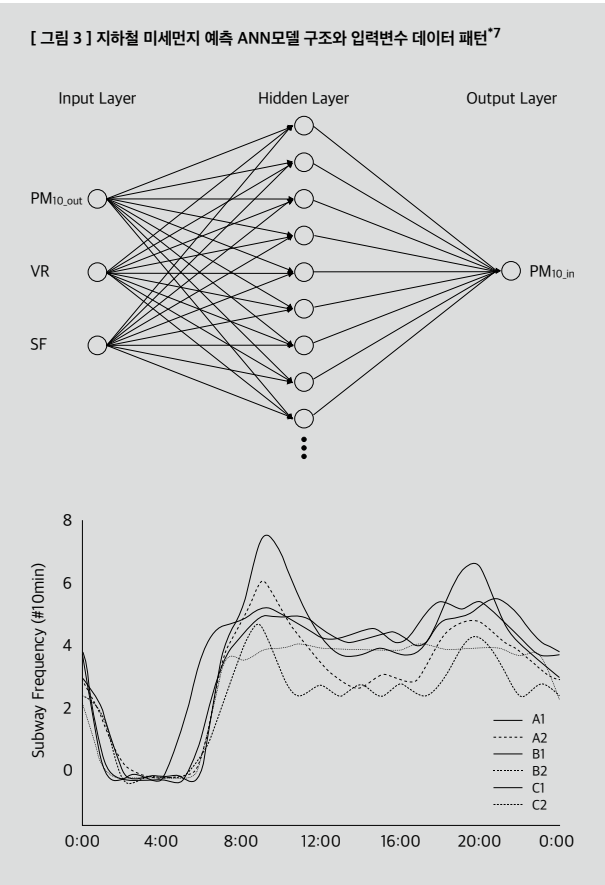
수 없기 때문에 교통량이 많은 곳 또는 정체가 심한 곳에서 매연 등의 오염 물질이 많이 발생할 것으로 추측할 수 있다. 따라서 해당 역사 인근 교통량 정보는 중요한 데이터가 될 수 있다. 외부 공기의 정보를 유추할 수 있는 공공 데이터는 이렇게 세 가지 요소 정도로 요약할 수 있다.

그렇다면 지하 역사 안에서의 실내 공기질 상태는 어떻게 파악할 수 있을까? 앞서 언급했듯이 지하철에서 미세먼지를 발생시키는 원인은 차량의 운행이다. 따라서 차량의 운행 횟수와 실내 공기질과는 상관관계가 존재할 것이다. 한편, 기계설비 운영 상태 데이터를 활용하여 실외공기와 실내공기가 교환되는 환기 정도를 파악할 수 있다. 우리는 오랜 기간 지하철 역사에서 실내 공기질을 측정해오고 있으며 지금도 미세먼지 농도와 실내오염도 등을 꾸준히 모니터링하고 있다. 이러한 데이터를 기계학습을 위한 참값 데이터로 활용할 수 있다.

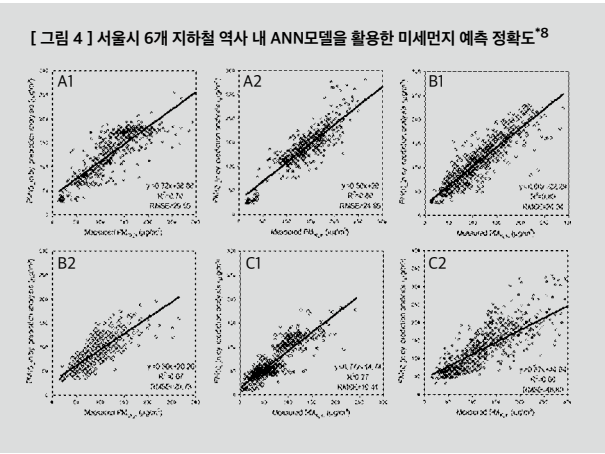
Features : 대기오염 정보, 기상 정보, 교통량 정보, 차량 운행 횟수, 공조 환기 설비 운영 정보 등
Labels : 지하 역사 미세먼지 농도, 지하 역사 초미세먼지 농도

미세먼지 또는 초미세먼지의 농도를 상기 특징(features)을 통해 학습시키는 인공지능 알고리즘은 영상처리나 자연어처리 등의 알고리즘에 비하여 비교적 단순하여, 복잡한 연산과정 없이 단층 신경망(single-layer neural network) 또는 층(layer) 몇 개를 추가한 다층 신경망(multi-layer neural network)으로 약 70% 이상의 정확도를 달성할 수 있다. 실제로 저자가 ANN(artificial neural network)을 이용해 외부 공기 환경 데이터로 지하철 실내 미세먼지를 예측하는 모델을 구축해 보았고, 이 모델이 67~80%의 정확도를 나타 낸다는 연구 결과를 발표한 바 있다.*6

지하철 미세먼지 예측을 위한 가장 심플한 ANN 모델은 외기 미세먼지(PM10_out), 환기량(ventilation rate, VR), 지하철 차량 운행 스케줄(subway frequency, SF)의 세 가지 변수를 통해 지하철 역사 승강장에서의 미세먼지 농도(PM10_in)를 예측하는 모델이다. 다음 그림은 ANN 모델 구조와 시간당 지하철 차량 운행 스케줄 데이터 패턴이다.



모델에 적용된 학습 알고리즘(learning algorithm)은 모멘텀 역전파(momentum backpropagation)가 적용된 경사하강법(gradient descent) 방식이며, 패턴 검색(pattern search)을 통해 학습 속도(learning rate, Lr) 및 노드(node)의 최적 개수를 도출하였다. 전체 데이터의 80%를 학습(training)에 사용하였고, 나머지 20%의 데이터를 검증(validation)에 사용하는 교차 검증(cross validation) 방식을 적용하였다.



6개 지하 역사(A1, A2, B1, B2, C1, C2)에 대해 역사별로 분석을 수행하였으며, 실제 측정 값과 예측 값의 상관 관계를 [그림 4]에

제시하였다. 예측 값의 정확성은 각기 다른 특성을 가진 6개 역사 별로 다소 차이가 발생하는데, 예측 값과 실측 값간 상관성(R^2)은 약 0.67~0.80 수준으로 나타났으며 해당 역사의 심도(깊이)가 깊어 질수록 상관성이 낮아지는 것으로 분석되었다.

앞서 이야기한 지하철 미세먼지 농도 예측 결과는 간단한 입력 변수만을 통해서도 승강장 미세먼지 농도를 예측할 수 있다는 것을 보여준다. 다양한 입력 변수를 사용하거나 개선된 알고리즘을 적용한다면 실제 미세먼지 예측 결과의 정확도를 향상시킬 수 있을 것이다. 또한 실제 지하철 미세먼지 문제를 해결하려면 단순한 공기질 개선 문제 외에도 운영 비용 최소화, 이용객 온열 쾌적성 향상, 여름철 피크타임 전력컨트롤 등 다양한 문제에 대한 해답이 필요하다. 이를 위해서는 외부 공기 데이터, 실내 환경 데이터, 설비 운영 데이터 등 현재 지하 역사의 다양한 정보를 활용하여 향후 미세먼지 농도를 예측할 수 있는 인공지능 기술의 개발이 필요하다. 또한 미세먼지가 기준 값을 초과할 것으로 예상되면 미세먼지 농도를 저감할 수 있는 기계설비의 운영방식을 제시하고 저감된 농도를 다시 예측하는 AI기술 적용이 필요하다. 이러한 두 단계의 인공지능 분석을 통해 지하 역사의 미세먼지 농도를 예측하고 필요에 따라 스스로 판단하여 역사 공조설비 및 정화장치를 가동시키는 기술은 현재 지하철 역사의 단순한 스케줄 제어로는 대응할 수 없는 혁신적인 스마트 제어를 가능하게 할 것이다. 이를 통해 지하철 미세먼지에 대한 효율적 관리는 물론 설비 운영 에너지도 절감할 수 있을 것이다. 향후 AI 기반의 지하 역사 공조설비 운영기술은 미세먼지 문제 대응 핵심기술로 활용될 것이며, 더 나아가 다양한 공공 시설물에도 확산될 것이 자명하다.

*1 논문 | Cohen, J., et al. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015, The Lancet 389.10082, 1907-1918 *2 참고 | 그린피스 <http://slownews.kr/38558> *3 논문 | Kwon, S.B., et al. (2015). A multivariate study for characterizing particulate matter (PM10, PM2.5, and PM1) in Seoul metropolitan subway stations, Korea, Journal of hazardous materials 297: 295-303. *4 참고 | 연합뉴스 <http://www.yonhapnews.co.kr/digital/2017/07/05/4905000000AKR20170705075300797.HTML> *5 논문 | Namgung, H.G., et al. (2016). Generation of nanoparticles from friction between railway brake disks and pads, Environmental science & technology 50.7: 3453-3461. *6 논문 | Park,S., et al. (2018). Predicting PM10 concentration in Seoul metropolitan subway stations using artificial neural network (ANN), Journal of hazardous materials 341: 75-82. *7 논문 | Park,S., et al. (2018). Predicting PM10 concentration in Seoul metropolitan subway stations using artificial neural network (ANN), Journal of hazardous materials 341: 75-82. *8 논문 | Park,S., et al. (2018). Predicting PM10 concentration in Seoul metropolitan subway stations using artificial neural network (ANN), Journal of hazardous materials 341: 75-82.