

수치해석을 활용한 승강장 바닥배기 시스템 최적화 연구

남궁형규¹, 박세찬², 김민해^{1,2}, 김수연¹, 권순박^{1,2*}

¹한국철도기술연구원 교통환경연구팀, ²과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학

Study on the optimal design of floor exhaust system using computational fluid dynamics for subway platform

Hyeong-Gyu Namgung¹, Sechan Park^{1,2}, Minhae Kim^{1,2}, Soo-Yeon Kim¹,
Soon-Bark Kwon^{1,2*}

¹Transportation Environmental Research Team, Korea Railroad Research Institute(KRRI)

²Railway System Engineering, University of Science and Technology(UST)

요약 최근 국내 도시철도 지하역사에는 승강장 안전문의 설치로 인한 승강장의 급배기 불균형이 일어나며, 이러한 불균형은 승강장 내 오염물질 축적과 환기부족에 의한 쾌적성 저하를 일으키는 원인이 된다. 본 연구에서는 시뮬레이션 유동해석 프로그램을 이용하여 지하역사 바닥배기 시스템의 최적화 설계를 하고, 제작된 바닥배기 시스템의 미세먼지 제거 성능을 실험으로 검증하였다. 바닥배기 시스템의 시뮬레이션 유동해석은 CFX 17.0 프로그램을 이용하였으며, HEEDS를 최적화 소프트웨어로 적용하였다. 3차에 걸쳐 이루어진 최적화 결과, 약 430 Pa의 차압과 61%의 미세먼지 제거 성능을 갖는 전체높이 1.78 m의 바닥배기 시스템이 도출되었다. 최적화 설계에 따라 실규모로 제작된 바닥배기 시스템을 이용하여 미세먼지 집진 성능 실험을 실시하였으며, 약 65%의 집진효율을 보임으로써 수치해석을 통해 도출된 최적설계 결과와 유사한 수준임을 검증하였다. 결과적으로 최적화 프로그램을 활용한 바닥배기 시스템의 설계가 급배기 불균형을 갖고 있는 지하역사 승강장에 적용 가능함을 확인하였으며, 설계된 바닥배기 시스템이 공간상의 제약으로 추가적인 배기설비 설치가 어려운 기존 지하역사에서 배기개선 및 미세먼지 제거에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract The imbalance of air supply and the exhaust on subway platforms has led to the installation of platform screen doors in underground subway stations. This imbalance causes the accumulation of pollutants on the platform and loss of comfort due to the lack of ventilation. In this study, a floor exhaust system was optimized using computational fluid dynamics (CFD) and an optimization program. The optimized floor exhaust system was manufactured and tested experimentally to evaluate the particle collection efficiency. CFX 17.0 and HEEDS were used to analyze the flow field and optimize the principal dimensions of the exhaust system. As a result of the three-step optimization, the optimized floor exhaust system had a total height of 1.78 m, pressure drop of 430 Pa, and particle collection capability of 61%. A fine dust particle collection experiment was conducted using a floor exhaust system that was manufactured at full scale based on the optimized design. The experiment indicated about 65% particle collection efficiency. Therefore, the optimized design can be applied to subway platforms to draw in exhaust air and remove particulate matter at the same time.

Keywords : CFD, Floor exhaust system, Indoor Air Quality, Optimization program, Subway station

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업의 '도시철도 역사 이용객 편의성 향상기술 개발(16RTRP-B067918-04)' 연구비지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Soon-Bark Kwon (KRRI)

Tel: +82-31-460-5375 E-mail: sbkwon@krri.re.kr

Received January 2, 2017

Revised (1st February 1, 2017, 2nd February 2, 2017)

Accepted February 3, 2017

Published February 28, 2017

1. 서론

수도권을 포함한 광역도시의 지하철 역사 승강장에는 열차풍의 차단과 안전을 위한 승강장 안전문(스크린도어, platform screen door)이 설치되어 있다. 서울 지하철의 경우 모든 역사에 안전문이 설치되어 있으며, 광역도시철도의 역사에서도 안전을 이유로 전 역사의 승강장에 안전문을 설치하는 추세이다. 안전문의 설치는 지하철 선로에서 발생하는 미세먼지를 포함한 오염 공기와 차량에서 발생하는 열기가 승강장으로 직접 침투하는 것을 방지하는 역할을 하며, 안전문의 이 같은 역할은 기존 연구를 통해 증명된 바 있다[1-3]. 하지만 승강장의 공조 환기 측면에서는 승강장과 승강장 하부의 기류유동을 방해하는 요소가 되고 있다. 권순박 등[4]의 연구에서는 승강장 안전문 설치에 따라 승강장 실내오염축적 및 쾌적성이 저하되는 문제를 제기하였으며, 승강장 하부 바닥배기를 설치하였을 경우에 최대 16.5% 이상 환기효율 개선 효과를 나타내는 것을 확인하였다.

전 세계적으로 미세먼지에 대한 인체 유해도가 주목되면서 주요도시에서의 지하철역 승강장 미세먼지 농도에 대한 연구가 꾸준히 지속되고 있다. 각 주요도시별 승강장 미세먼지 농도는 부다페스트 $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $534 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 프라하 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 스톡홀름 $212 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $722 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 타이베이 $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $137 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었으며, 국내 지하철 승강장의 미세먼지 농도는 대합실이 59 - $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 승강장은 76 - $119 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위로 조사되었다[5-10]. 높은 미세먼지 농도는 지하철역을 이용하는 승객의 인체에 유해성을 끼칠 수 있기 때문에 이용객의 노출도가 높은 승강장에서의 미세먼지 농도를 낮추는 연구가 필요하다.

최근에는 시뮬레이션 수치해석을 통해 공학적 성능을 필요로 하는 기계의 성능을 예측 한다. 이와 같은 시뮬레이션을 통해 미처 고려되지 못했던 공학적 문제를 발견할 수 있고, 성능의 최적화를 이끌어 낼 수 있다. 박인형 등(2014)의 연구에서는 CFX와 HEEDs 시뮬레이션을 활용한 원심팬, 사류펌프 등 유체기계의 최적화 사례를 소개하였으며, 유체 기계의 개발과정에서 필요한 성능을 예측하고 여러 수치해석 방법을 활용하여 공학적으로 적합한 성능을 갖는 설계인자를 도출하였다[11, 12].

본 연구에서는 지하철역 급배기 불균형 문제를 해소하고 배기되는 미세먼지의 농도를 저감시킬 수 있는 승

강장 바닥배기 시스템을 개발하고자, 유동 전산수치해석 프로그램(CFX)과 최적화 시뮬레이션(HEEDs)을 적용하여 최적화 설계 인자를 도출하였다. 또한 최적화 설계된 지하철 승강장 바닥배기 시스템을 실 규모로 제작하였으며, 미세먼지 제거 실험을 통해 설계의 타당성을 검증하였다.

2. 최적화 방법 및 실험조건

2.1 유동해석

난류는 공간과 시간에 대한 유동의 교란으로 발생하며, 주로 3차원의 비정상 유동을 갖는다. 난류는 유체의 유동 특성에 중요한 영향을 미치며, 관성력이 점성력에 비해서 두드러지게 클 때 (레이놀즈수가 큰 경우) 발생한다. 난류의 영향을 분석하기 위해 난류모델을 이용하는 많은 CFD 기법들이 개발되어 왔으며, 난류모델은 불가능할 정도의 조밀격자를 이용한 계산이나 직접수치모사(DNS)에 의존하지 않고도 난류 영향을 설명하기 위해 끊임없이 개선되어 왔다.

일반적으로 수치해석에서 사용되는 Navier-Stokes 방정식은 부가적인 정보를 필요로 하지 않으며 난류와 층류를 모두 기술한다. 그러나 실제 레이놀즈수에서 난류의 길이와 시간에 대한 scale은 매우 다양하며 일반적으로 수치해석에서 사용할 수 있는 가장 작은 제어체적보다 작은 길이 scale을 포함하고 있다. 이러한 유동을 직접 수치 모사로 해석하기 위해서는 상당한 컴퓨터 성능이 필요하므로 현재로서는 사용이 거의 불가능하다.

전산유체해석(CFD)의 유동해석코드인 CFX는 특정 유동현상에 적합한 것도 있으며, 적정한 신뢰수준 하에 다양한 유동현상에 적용 가능한 모델도 포함되어 있다. CFX는 압력으로 표현한 수식을 해석하는 압력기초 해석 방법을 사용하므로 기존에 많이 사용하는 CFD 코드에 비해서 유체의 기계적 해석에 적합하며, 압축성 유체에 대한 해석에 강점을 갖고 있다.

이와 같은 특징들로 본 연구에서는 CFX를 적용한 유동해석을 수행하였다. 또한 지금까지 알려진 최적화 기법들을 모두 동시에 사용하는 SHERPA (Systematic Hybrid Exploration that is Robust, Progressive, and Adaptive) 알고리즘이 적용된 HEEDS(Hierarchical Evolutionary Engineering Design System)을 최적화 소프트웨어로 적용하였다[12].

2.2 해석조건

시뮬레이션 유동해석은 형상 제작, Mesh 생성, CFX 해석 및 HEEDS 최적화, 최적화 형상 결과 분석의 프로세스를 진행되었다. 해석 프로그램(solver program)은 CFX 17.0(ANSYS)으로 진행하였으며, Simulation Type은 Steady-state, 난류 모델은 SST(Menter's Shear Stress Transport)를 적용하여 시뮬레이션 하였다. 본 연구에서 개발하는 바닥배기 장치의 핵심 성능요소는 차압과 미세먼지 제거효율의 두 가지로 꼽을 수 있으며, 이는 통상 공기청정장치의 핵심 성능요소로 적용되고 있다. 따라서 요구되는 배기 유량에 대하여 최소의 차압으로 최대의 미세먼지를 제거하는 것이 시스템 개발 목표이다. 지하역사에서의 급·배기량 특성 분석을 통해 최대 6,000 m³/h의 배기 유량이 요구되고, 이때 차압은 1,000 Pa 이하로 유지될 수 있어야 하는 것으로 조사되어 이를 본 연구에서의 해석조건으로 상정하였다. 또한, 모든 해석 조건에서 미세먼지 입자의 밀도는 기존연구에서 철도역사에서 발생하는 입자의 평균밀도인 5 g/cm³으로 가정하여 입자 제거효율을 계산하였다[13].

2.3 실규모 미세먼지 제거 성능시험 방법

시뮬레이션 유동해석을 통해 얻어진 최적화 모델을 제작하여 실제 시스템에서의 미세먼지 제거 성능을 검증하고자 하였다. 미세먼지의 농도는 OPS(optical particle sizer, TSI 3330, USA) 2대를 이용하여 측정하였고, 집진효율은 유입구(inlet)와 유출구(outlet)에서 측정된 미세입자의 농도차이로 계산되었다. 실규모 미세먼지 제거 실험 모식도는 다음 Fig. 1과 같다.

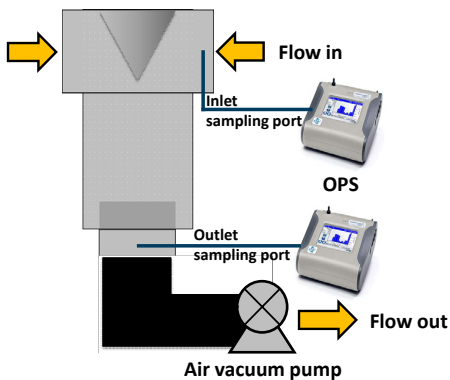


Fig. 1. Schematic diagram of removal efficiency experiment for floor exhaust system.

3. 최적화 시뮬레이션 및 검증

3.1 바닥배기 시스템 설계변수 선정

서울시 주요 환승 지하역사 승강장의 급·배기량 분석 결과 PSD설치로 인하여 기존 선로 하부배기가 막히면서 급기량 대비 배기량이 크게 부족한 문제가 발생하고 있으나, 협소한 승강장 구조와 복잡한 천장상부 구조물 등으로 인하여 기존역사에 상부배기를 추가로 설치하는 것은 현실적으로 불가한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 바닥배기 형태를 사이클론으로 검토하였으며 이는 기존 선로 하부배기 기능과 연계될 수 있는 장점이 있어 설치 비용을 절감시킬 수 있다. 또한 바닥배기 시스템의 설치 가능 위치에 대한 사전조사를 실시하였으며, 이를 통해 대합실에서 승강장으로 내려가는 계단 하부에 사용하지 않는 공간을 활용할 수 있음을 확인하였다. 여러 지하역사 계단하부 공간에 대한 검토를 통해 바닥배기 시스템 형태의 설치 가능 최대 높이는 2 m로 선정하게 되었다.

지하철 승강장의 바닥배기 시스템은 원기둥 형태의 사이클론으로 구성하였으며, 다음 Fig. 2에 표시하였다. 기본적인 구성으로는 유입부 높이(H_{in}), 유입부 넓이(D_{in}), 콘반경(R_{cone}), 콘높이(H_{cone}), 전체 높이(H_{total}), 유출구 직경(D_{out}), 출구부 높이(H_{out})로 이루어져 있다. 바닥배기 시스템은 전체 높이(H_{total})는 앞서 언급하였듯이 최대 2 m를 넘지 않아야 하며, 최적화의 기준이 되는 목적 값은 입자의 제거율과 입·출구에서의 압력 차이(ΔP)로 지정하였다.

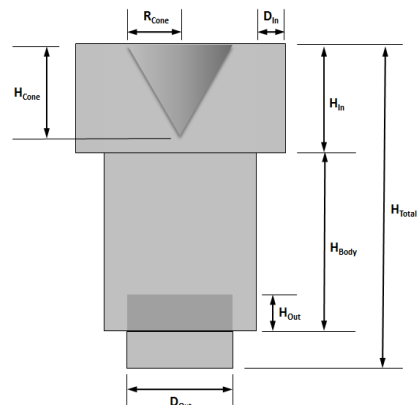


Fig. 2. Design variables of floor exhaust system of underground station.

3.2 CFX와 HEEDS를 활용한 집진 바닥배기 최적 설계

3.2.1 기초모델 (base model)

집진형 바닥배기 시스템의 기초모델(base model)의 각 설계변수별 수치범위는 $D_{in}(0.072 \text{ m})$, $H_{in}(0.4 \text{ m})$, $H_{body}(0.45 \text{ m})$, $D_{out}(0.15 \text{ m})$, $H_{out}(0.1 \text{ m})$ 로 설정하였으며, 최적화는 3단계에 걸쳐서 이루어졌다.

3.2.2 1차 최적화

1차 최적화(OPT 1)는 집진 바닥배기 시스템 수치해석 격자수를 40만으로 하였을 경우의 최대 집진효율을 나타내는 모델로 최적화 하였다. Fig 3에 기초모델과 1차 최적화 모델의 압력분포를 표시하였다. 기초모델의 집진효율은 6.4%였으나, 1차 최적화 모델은 96%의 집진효율을 나타냈다. 차압은 555 Pa에서 1,802 Pa으로 약 3.2배 상승하였다. 하지만 Fig. 2의 (b)와 같이 1차 최적화 모델에서는 유체의 유동패턴인 소용돌이(vortex)구조가 잘 나타나지 않아, 정확한 미세먼지의 유동 해석이 수행되지 못한 것으로 판단하였다. 따라서 모델 해석을 위한 격자수를 110만 개로 증가하여, 1차 최적화 조밀격자(fine mesh) 모델을 설계하였다. 그 결과, 유체의 소용돌이 구조에 의하여 배출되는 미세먼지의 양이 많아졌으며, 집진효율을 96%에서 56%로 하락하였다. 1차 최적화 모델의 설계변수별 수치는 다음과 같다.

H_{total} : 0.875 m, D_{out} : 0.156 m, H_{body} : 0.675 m

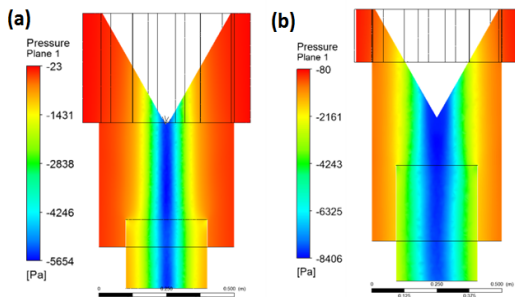


Fig. 3. Pressure contour of base model(a) and OPT1(b).

3.2.3 2차 최적화

1차 최적화에서 격자의 수가 미세먼지의 유동해석에 중요한 역할을 하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 2차 최적화(OPT2)와 3차 최적화(OPT3)는 약 110만개에서 140만개의 격자를 구성하여 모델 해석을 수행하고자 하였다.

었다. 또한 구조 내부의 유동 소용돌이 구조를 형성하는데 집진 바닥배기 모델의 상부 역 삼각뿔의 형태가 큰 영향을 미칠 것으로 판단하여 삼각뿔의 반경(R_{cone})과 높이(H_{cone})를 설계변수로 추가하였다. 2차 최적화 모델의 최적화 조건은 차압 1,000 Pa 이하, 바닥배기 장치의 총 높이가 2 m 이하로 설정하였다.

2차 최적화 해석 결과 압력손실은 1차 조밀격자 최적화 결과인 1,660.5 Pa에 비해 약 50% 감소된 843.8 Pa으로 나타났으며, 61%의 미세먼지 제거율을 나타냈다. 전체적으로 1차 최적화 결과에 비해 형상이 길어지며 소용돌이 형상의 움직임이 안정되는 경향을 보였다.

3.2.4 3차 최적화

유동모델을 설계하는데 있어 차압의 증가는 설계 유량의 감소를 일으키며, 원하는 유량을 만족하기 위해서 흡입 팬의 과다설계를 필요로 한다. 따라서 2차 최적화보다 차압을 감소시키기 위해 추가 최적화를 진행하였다. 2차 최적화에서의 차압 제한조건은 1,000 Pa이었지만, 3차 최적화에서는 500 Pa을 넘지 않도록 설계하였다. 최적화 결과 차압은 약 430 Pa으로 개선되었으며, 미세먼지의 제거효율은 2차 최적화와 동일한 61%를 보였다. 3차 최적화 결과에 의한 각 설계변수별 수치는 다음과 같다.

D_{out} : 0.301 m, H_{total} : 1.781 m, H_{cone} : 0.25 m,

R_{cone} : 0.16 m, H_{in} : 0.501 m, D_{in} : 0.066 m

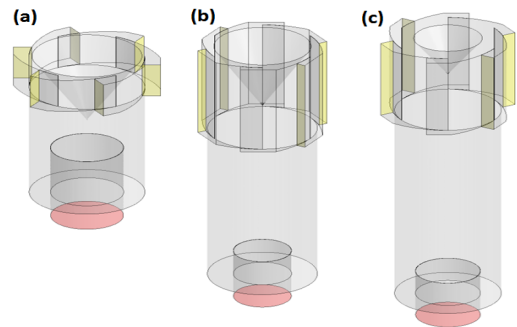


Fig. 4. Design drawing of (a) OPT 1-fine mesh, (b) OPT 2, (c) OPT 3.

다음 Fig. 4에 1차 조밀격자, 2차, 3차 최적화 모델에 대한 그림을 표기하였다. 1차 최적화 모델은 전체 길이가 0.875 m에 불과하며, 제거효율은 56%, 차압은 1,660 Pa에 달했다. 2차 최적화에서 차압을 줄이고 미세먼지의

집진 효율을 증가시키기 위해 시스템의 전체길이가 1.533 m로 늘어났으며, 차압은 843 Pa로 감소하였다. 3차 최적화 형상은 2차 최적화 형상에 비해 유입부의 역삼각뿔(콘)의 크기가 현저히 줄어든 것을 확인할 수 있으며, 이 콘의 영향으로 내부 소용돌이 유동이 안정화되고, 차압의 감소로 이어졌다. Fig. 5에 각 구조에서의 압력분포를 표기하였다. Fig. 3의 모델에서 보였던 압력의 분포와 다르게 Fig. 5에서는 구조 내부에서의 소용돌이 유동구조가 정확히 표현되는 것을 확인할 수 있다.

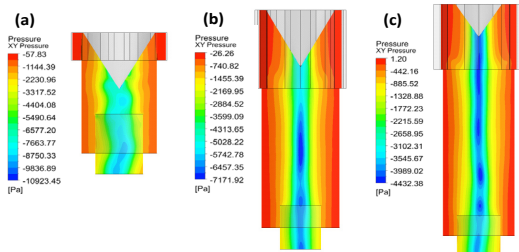


Fig. 5. Pressure contour of (a) OPT 1-fine mesh, (b) OPT 2, (c) OPT 3.

미세먼지의 유입과 유출은 유입부와 유출부에서의 유속과 밀접한 관계가 있다. 최적화 모델들의 유속 분포도를 아래 Fig. 6에 표기하였다. 1차 최적화 모델(a)에서 유입 유속은 약 18 m/s이며, 유출 유속은 64.3 m/s로 해석되었다. 유입과 유출의 유속차이는 Fig. 5 (a)에서처럼 큰 압력의 차이로 표출된다. 약 0.87 m의 공간에서 유속에 의해 불규칙적인 공기흐름(와류)가 발생한다. 반면 2차 최적화(b)와 3차 최적화(c)에서는 길이가 길어짐에 따라 유입 유속이 각각 12.5 m/s, 8.5 m/s로 1차 최적화 결과에 비해 52.7% 감소하였다. 유출 유속도 각각 58.2 m/s, 44.4 m/s로 1차 최적화에 비해 감소하였다. 유속에 의한 미세먼지의 이동 경로를 Fig. 7에 표시하였다.

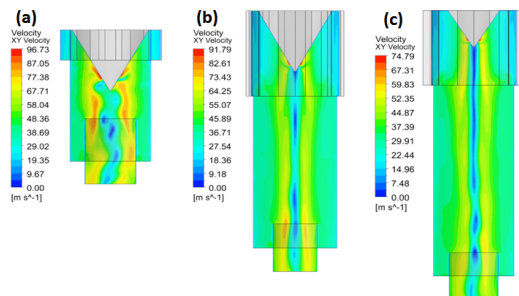


Fig. 6. Wind velocity contour (a) OPT 1-fine mesh, (b) OPT 2, (c) OPT 3.

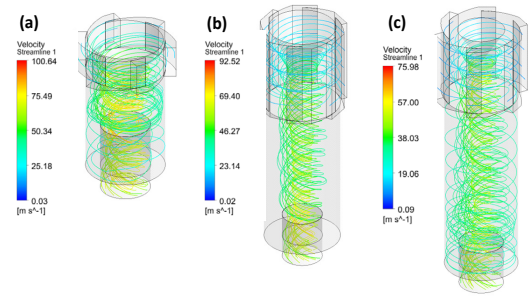


Fig. 7. Streamline (a) OPT 1-fine mesh, (b) OPT 2, (c) OPT 3.

3.3 최적설계를 적용한 집진 바닥배기 시스템 성능 검증

Fig. 8은 CFX와 HEEDS를 이용한 집진 바닥배기 시스템의 최적화를 통해 얻어진 설계도면을 나타내었다. 본 연구에서는 최적설계도면에 따라 실규모의 집진 바닥배기 시스템을 제작하였으며, 미세먼지 집진효율 평가를 실시하였다.

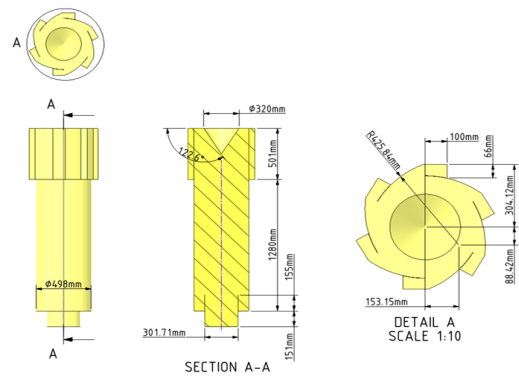


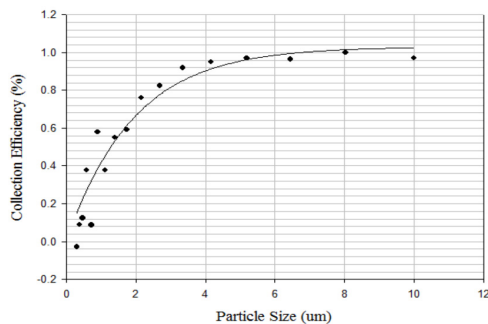
Fig. 8. Optimum design for floor exhaust system.

다음 Table 1에 미세먼지 집진효율 결과를 표시하였다. 집진 바닥배기 시스템 가동 전에 유입되는 미세먼지가 제거 되지 않았으며, 오히려 유출부에서의 미세먼지 농도가 농축되어 유입부보다 더 높은 수치를 보였다. 최적화 설계된 집진 바닥배기 시스템의 가동시 미세먼지 농도는 유입부에서 $118 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 유출부에서 $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 약 65%의 제거효율을 나타내었다. 3차 최적화에 의한 최종 모델의 해석 결과에서 제거 가능 효율은 61%를 보였던 것에 비해 4% 높은 수치를 보였다.

Table 1. Removal efficiency of PM₁₀ by floor exhaust system operation.

	Particle concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	Before system operation	System on	System off
Inlet	112.18	118.78	111.34
Outlet	140.60	41.74	132.94
Efficiency	-	65%	-

입자의 개수농도를 기준으로 제거효율을 평가하여 다음 Fig. 9에 표시하였다. 바닥배기장치의 가동 전(system off)과 가동 중(system on) 바닥배기장치를 통과하는 미세입자를 크기별 집진효율로 살펴보면, 입경이 1 μm 보다 커지면서 바닥배기장치 가동으로 인한 입자개수농도 감소량이 커지는 것을 알 수 있다. 입경별로 개수농도 저감효율을 살펴보면 약 1.5 μm 에서 약 50% 이상, 4 μm 에서 90% 이상, 6 μm 이상인 경우 먼지의 99%를 제거하는 것으로 확인되었다.

**Fig. 9.** Efficiency of particle removal with floor exhaust system.

4. 결론

본 연구에서는 CFX와 HEEDS를 이용하여 지하역사의 미세먼지 제거용 바닥배기 장치의 최적설계를 수행하였다. 설계 형상의 최적화 결과 전체높이 1.78 m, 유출부 직경 0.3 m를 갖는 바닥배기 장치가 설계되었다. 최적화 설계된 장치의 해석결과, 압력손실은 429.3 Pa, 미세먼지 집진효율은 61%를 보였으며, 최적화 설계에 따라 제작된 바닥배기 장치로 평가한 미세먼지 집진효율은 65%를 보였다. 최적화 설계로 제작된 집진 바닥배기 시스템의 지하역사 적용은 승강장에서의 미세먼지의 집진과 급배기 균형을 위한 역할을 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 지하역사 미세먼지 입자특성에 맞는 집

진 설비를 추가로 설치하는 연구를 통해 지하역사의 공기질을 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] Jeon, J. S., Yoon, J. C., Lee, H. C., Eom, S. W. and Chae, Y. Z., A noticeable change in indoor Radon levels after platform screen doors installation in Seoul subway station, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(5), pp. 59-67, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.1.059>
- [2] Kwon, S. B., Namgung, H. G., Jeong, W., Park, D. and Eom, J. K., Transient variation of aerosol size distribution in an underground subway station. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(362), pp. 1-11, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5373-5>
- [3] Lee, T. J., Jeon, J. S., Kim, S. D. and Kim, D. S., A comparative study on PM10 source contributions in a Seoul metropolitan subway station before/after installing platform screen doors, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(5), pp. 543-553, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2010.26.5.543>
- [4] Kwon, S. B., Song, J. H., Ryu, J. H., Jo, S. W., Oh, T. S., Bae, S. J. and Kim, H. K., A study on the improvement of the air exhaust system at the PSD installed subway station. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 17(3), pp. 353-362, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.9711/KTAJ.2015.17.3.353>
- [5] Cheng, Y. H., Lin, Y. L. and Liu, C. C., Levels of PM10 and PM2.5 in Taipei rapid transit system. *Atmospheric Environment*, 42, pp. 7242-7249, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.011>
- [6] Kam, W., Cheung, K., Daher, N. and Sioutas, C., Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro, *Atmospheric Environment*, 45, pp. 1506-1516, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.12.049>
- [7] Martins, V., Moreno, T., Minguillon, M. C., van Drooge, B. L., Reche, C., Amato, F., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S. and Querol, X., Origin of inorganic and organic components of PM2.5 in subway station of Barcelona, Spain. *Environmental Pollution*, 208, pp. 125-136, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.004>
- [8] Namgung, H. G., Song, J. H., Kim, S. Y., Kim, H. M. and Kwon, S. B., Characteristics of indoor air quality in the overground and underground railway stations. *Journal of the Korea Academia-Industrial*, 17(5), pp. 17-25, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.5.17>
- [9] Park, J. H., Park, J. C. and Um, S. J., Estimation of diffusion direction and velocity of PM10 in a subway station (for Gahwasan station of subway line 5 in Seoul), *Journal of Korean Society of Transportation*, 28(5), pp. 55-64, 2010.

- [10] Son, Y. S., Salama, A., Jeong, H. S., Kim, S., Jeong, J. H., Lee, J., Sunwoo, Y. and Kim, J. C., The effect of platform screen doors on PM10 levels in a subway station and a trial to reduce PM10 in tunnels, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 7(1), pp. 38-47, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5572/ajae.2013.7.1.038>
- [11] Park, I. H., Lee, Y. K., Jang, C. M. and Choi, Y. S., Introduction of turbomachinery optimization using HEEDS and CFX, *Korean Society for Fluid Machinery*, Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 161-162, 2014.
- [12] Lee, Y. K., Shin, J. H., Park, I. H., Kim, S., Lee, K. Y. and Choi, Y. S., Mixed-flow pump impeller-diffuser optimization method by using CFX and HEEDS, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 39(10), pp. 831-842, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.9.831>
- [13] Sanders, P. G., Xu, N., Dalka, T. M. and Maricq, M. M., Airborne brake wear debris: size distribution, composition, and a comparison of dynamometer and vehicle tests, *Environmental Science and Technology*, 37, pp. 4060-4069, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1021/es034145s>

남궁형규(Hyeong-Kyu Namgung)**[정회원]**

- 2010년 8월 : 세종대학교 건설환경 공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 : 세종대학교 건설환경 공학과 (공학박사)
- 2015년 7월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원(KRRI) 교통환경연구팀 박사후연구원

<관심분야>

대기환경, 실내환경, 미세먼지, 악취

박 세 찬(Sechan Park)**[정회원]**

- 2015년 8월 : 조선대학교 환경공학과 (공학사)
- 2015년 7월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원(KRRI) 교통환경연구팀 연구원, 과학기술대학원대학교 철도시스템공학과 석박통합과정

<관심분야>

실내환경, 미세먼지

김 민 해(Minhae Kim)**[정회원]**

- 2013년 2월 : 한양대학교 건설환경 시스템공학과 (공학사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원(KRRI) 교통환경연구팀 연구원, 과학기술대학원대학교 철도시스템공학과 석박통합과정

<관심분야>

실내환경, 미세먼지

김 수 연(Soo-Yeon Kim)**[정회원]**

- 2014년 2월 : 용인대학교 산업환경 보건학과 (보건학학사)
- 2015년 7월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원(KRRI) 교통환경연구팀 위촉연구원

<관심분야>

실내환경, 환경보건

권 순 박(Soon-Bark Kwon)**[정회원]**

- 1997년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학학사)
- 2003년 2월 : 광주과학기술원 환경 공학과 (공학박사)
- 2004년 4월 ~ 2006년 1월 : 일본 산업기술종합연구소(AIST) JSPS 박사후연구원
- 2006년 2월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

대기환경, 실내환경, 미세먼지