

도시철도 지하역사 PSD 설치에 따른 배기시스템 개선 연구

권순박^{1*} · 송지한¹ · 류승원² · 조주환² · 오태석³ · 배성준³ · 김효규⁴

¹정회원, 한국철도기술연구원

¹비회원, 한국철도기술연구원

²비회원, (주)이음엔지니어링

³비회원, 서울메트로

⁴정회원, (주)주성지앤비

A study on the improvement of the air exhaust system at the PSD installed subway station

Soon-Bark Kwon^{1*}, Ji-Han Song¹, Ju-Hwan Ryu², Seung-Won Jo², Tae-Suk Oh³, Sung-Joon Bae³, Hyo-Gyu Kim⁴

¹Transport Environmental Research Team, Korea Railroad Research Institute

²EUM Engineering Co., LTD

³Seoul Metro Urban Railway R&D Center

⁴JS G&B Inc.

ABSTRACT: Platform screen door (PSD) installed at underground subway station has reduced the safety accident, but it may cause poor air ventilation condition due to the isolated exhaust duct in the subway tunnel area. In this study, the additional ventilation system was suggested, which can be installed at a void space (i.e., storage room under stairs) of platform in order to improve efficiency of air ventilation rate. Exhausted air from platform was directed to underneath of platform and joined with existing ventilation duct of train exhaust system (TES). One subway station in Seoul city was selected to predict the effectiveness of the suggested lower exhaust system by using the computational fluid dynamics (CFD) analysis. The predicted mean age of air was decreased by 16.5% which proves the improvement of air ventilation efficiency when the suggested lower exhaust system was applied.

Keywords: Subway, Platform, Ventilation system, Platform Screen Door, Lower Exhaust System

초 록: 도시철도 지하역사에 설치되어 운영중인 승강장 안전문(PSD)은 승객의 추락방지 등 안전사고 예방에 큰 기여를 하고 있지만, 기존 승강장 선로 배기설비의 차단으로 인해, 일부 역사에서 승강장내 환기효율 저하문제를 발생시키고 있다. 본 연구에서는 PSD가 설치된 승강장의 기존 급배기 시스템의 환기효율 개선을 위해, 승강장과 대합실로 통하는 계단부 하부공간의 무효한 공간(창고)에 국부적인 하부 배기시스템을 추가하고, 승강장 배기용 덕트를 선로부의 기존 배기시스템에 연결하여 연동함으로써 기존 시스템에 무리 없이 승강장 실내환경을 개선하고자 하였다. 즉, PSD 설치이후 승강장 내부의 전체적인 기류혼합효과와 오염된 실내공기를 효율적으로 배출하기 위한 하부배기 방식을 연구하였다. 이러한 하부배기 방식의 효과를 예측하기 위하여, 서울지하철 2호선 역사를 선정하여 급배기량을 실측하고, 이를 바탕으로 전산수치해석 연구를 수행하여 개선효과를 예측해보았다. 하부 배기시스템의 적용은 승강장 기류의 지체상태 및 환기효율 특성을 나타내는 공기연령 측면에서 약 16.5%의 개선효과가 있는 것으로 분석되었다.

주요어: 도시철도, 승강장, 환기시스템, 스크린도어, 하부배기시스템

*Corresponding author: Soon-Bark Kwon

E-mail: sbkwon@krii.re.kr

Received May 1, 2015; Revised May 11, 2015;

Accepted May 13, 2015

Copyright ©2015, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

지하철의 일반적인 공조시스템은 승강장 상부에 급배기 덕트를 설치하여 실내환기를 시키고 있으며, 선로부에서는 TES (train exhaust system) 시스템을 통해 본선내 열부하를 처리하고 있다. 따라서 승강장 실내환기(공조)는 상부덕트를 이용하고 있으며, 상대적으로 플랫폼 하부공간은 선로부 열차풍이나 발열제거 등을 목적으로 계획하고 있다.

기존의 승강장은 열차풍의 교란으로 승강장내 상부공간과 하부공간의 기류 혼합효과가 발생하였으나, 승강장 안전사고 예방을 위해 도입된 스크린도어(PSD; platform screen door) 설비의 설치 이후로는 이러한 기류 혼합효과가 발생하지 않고 있다. PSD 설비는 선로부의 오염된 공기나 차량의 발열부하가 승강장내로 직접적으로 침투하는 것을 방지하고 각종 추락사고나 안전에 도움이 될 수 있으나, 환기적 측면에서는 상부 공간에서만 급배기가 이루어져 승강장 실내 전체의 기류유동에는 다소 비효율적인 측면이 제기될 수 있다. Fig. 1에서처럼 PSD 설치에 따른 기류흐름과 승강장내 공기순환이 부족할 경우 오염축적 및 쾌적성 저하의 가능성을 예시해 주고 있다.

지하철 PSD 설치이후 실내환경의 변화(Jeon et al., 2012; Lee et al., 2010) 및 화재와 연계된 환기시스템 관련 연구(Chow et al., 2011; Huang et al., 2011;

Meng et al., 2014; Roh et al., 2009) 가 진행되고 있다. 본 연구에서는 기존의 상부급배기 시스템을 개선하기 위해, 승강장과 대합실로 통하는 계단부 하부공간의 무효한 공간(창고)에 국부적인 배기시스템을 추가하고, 승강장 배기용 덕트를 TES에 연결하여 연동함으로써 기존 시스템에 무리 없이 승강장의 실내환경을 개선하고자 하였다. 즉, PSD 설치 이후 승강장 내부의 전체적인 기류 혼합효과와 오염된 실내공기를 빠른 시간내에 배출하기 위해서 계획하였다. 따라서 본 연구에서는 PSD 설치 이후, 기존 상부급배기 시스템에 대한 환기방식과 이를 개선하기 위해 기존 시스템에 계단부 하부바닥에 배기시스템을 추가한 환기방식에 대한 비교연구를 전산수치해석(CFD; computational fluid dynamics) 분석을 통해 수행하였다.

2. 해석개요

2.1 모델링 영역 및 해석조건

Fig. 2는 서울지하철 2호선 G역사의 평면 및 횡단면을 나타내고 있으며, 점선부분은 모델링에 의한 해석영역을 나타내고 있다. 먼저 승강장은 PSD에 의해 선로부와 실내가 분리되어 있으며, 대합실은 계단부를 통해 개방된 형태이므로 승강장과 대합실을 해석영역으로 하였다. 선로부 평면은 상하좌우 중앙부분

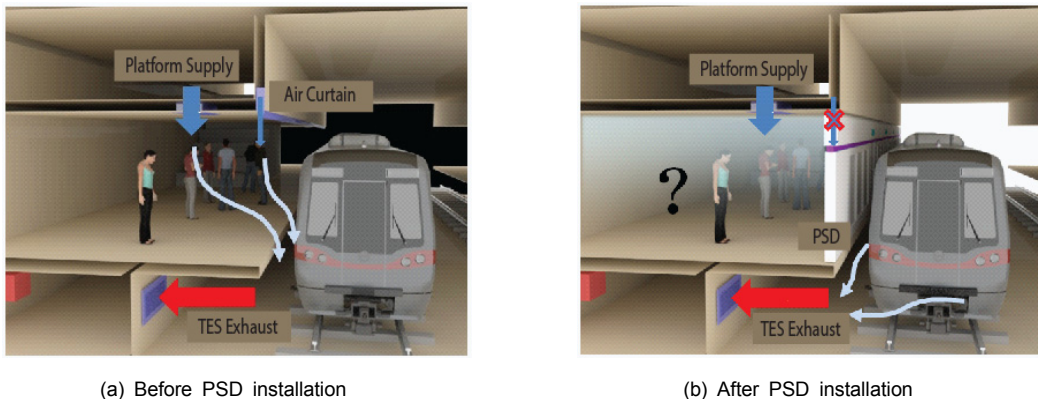


Fig. 1. Air flow pattern by the PSD is installed or not

을 기준으로 대칭구조를 하고 있으며, 수치해석에서는 Fig. 2의 점선을 기준으로 우측과 하부를 축대칭 (symetric condition) 조건을 적용하였다.

해석 프로그램은 유한체적법(F.V.M)에 기초한 Fluent V12 버전을 사용하였고, 비압축성 유동 (incompressible flow)에 난류모델은 표준 k-e 모델을 적용하였다. 해석시간 및 해석격자를 축소하기 위해 좌우대칭에 대한 대칭 조건 및 계단부 하부배기쪽의 루버는 다공성(porous) 모델(개구율 60%)을 적용하였으며, 이산화(discretization)를 위한 메쉬 사이즈는 관심영역(B2F 및 계단부)에 약 40만개(격자사이즈: 0.08~0.2 m), 비관심영역(B1F)내 10만개(격자사이즈: 0.3~0.5 m)의 Hexahedral Cell 을 Fig. 3과 같이 적용하였다.

Fig. 4는 기존 역사의 계단부 하부공간의 모습과

본 연구에서 제안하는 하부배기 시스템에 대한 환기 시스템의 개요를 나타내고 있다. 즉, 기존 계단부 하부 공간(창고)내에 국부 배기시스템을 설치하고 기존의 선로부 TES 하부 배기시스템과 연동되는 개요를 나타내고 있으며, 전체적인 승강장내 기류유동 특성을 관찰하기 위해 상부급배기시스템(Case 1)과 상부급배기+하부배기시스템(Case 2)에 대한 급배기 풍량은 Table 1에 정리하였고, 해석영역에 대한 경계조건은 Fig. 5와 같다. 해석 경계조건의 선정을 위하여 승강장의 급기구(디퓨저)와 배기구 풍량을 직독식 풍량계(TSI Anor, model ABT711)를 이용하여 승강장 전체에 대하여 측정하여, 승강장 전체 급기량 33,230 CMH와 전체 배기량 17,700 CMH로 산출한 결과를 적용하였다.

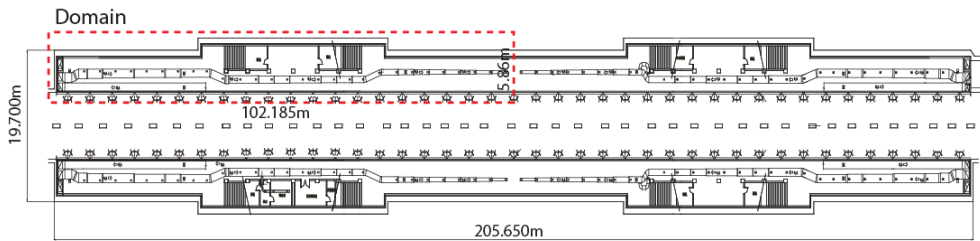


Fig. 2. Domain overview

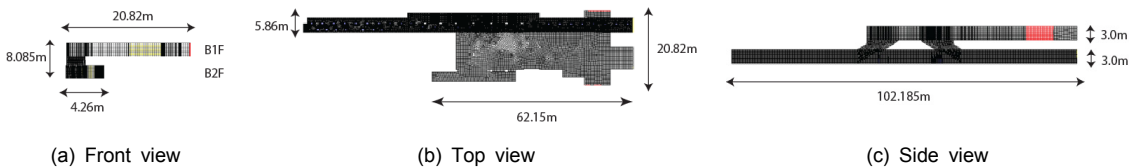


Fig. 3. Mesh overview

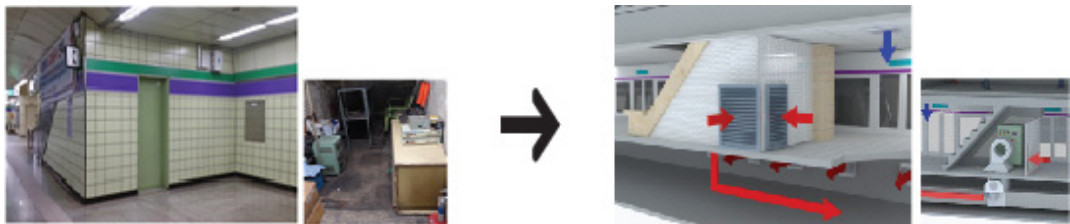


Fig. 4. Concept of bottom exhaust system using the void space of platform

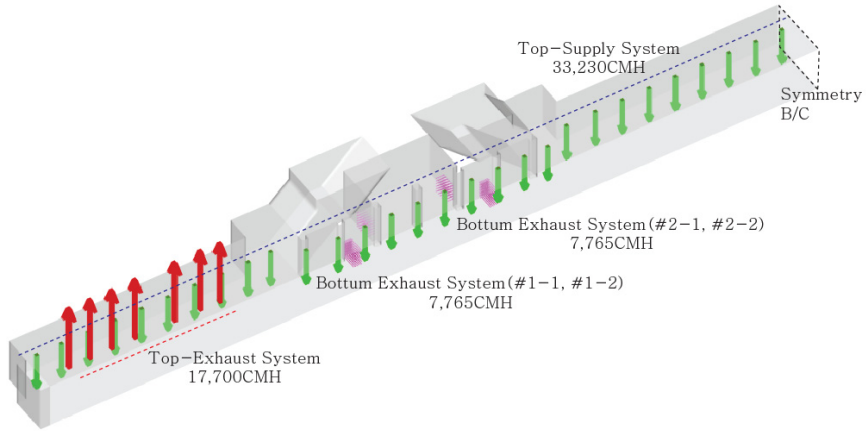


Fig. 5. Overview of ventilation system & boundary conditions(B2F)

Table 1. Input conditions for CFD analysis

Case		Case 1 (Top Supply-Exhaust System (T.S.E.S))	Case 2 (T.S.E.S + Bottom Exhaust System)
Input Condition	Top Supply	Area [m ²]	0.08 m ² × 29 EA = 2.32 m ²
		Flow rate [m ³ /s]	33,230 CMH = 9.231 m ³ /s
		Velocity [m/s]	9.231 CMS / 2.32 m ² = 3.98 m/s
	Top Exhaust	Area [m ²]	0.1 m ² × 7 EA = 0.70 m ²
		Flow rate [m ³ /s]	17,700 CMH = 4.917 m ³ /s
		Velocity [m/s]	4.917 / 0.70 = 7.02 m/s
	Bottom Exhaust	Area [m ²]	N/A
		Flow rate [m ³ /s]	15,530 CMH = 4.314 m ³ /s
		Velocity [m/s]	4.314 / 2.40 = 1.80 m/s

2.2 해석방법 및 절차

PSD 설치에 따른 역사 승장장내 실내기류 유동특성을 공기연령(age of air)에 의해 분석하였다. 공기연령이란 실내로 유입된 공기가 임의의 지점까지 도달하는 시공간에 대해 평균한 값을 의미하는 개념으로 시간단위를 갖는다. 일반적으로 외부로부터 유입된 공기는 임의의 지점까지 다양한 경로를 통해 도달하게 되는데 이때 각 경로를 통해 임의의 지점까지 도달한 시간의 평균값을 국소 평균 공기연령(local mean age; LMA)이라 한다. 반대로 임의의 지점에서 다양한 경로를 통해 배기구까지 도달하는 각 시간의 평균값

을 국소 평균 잔여체류시간(local mean residual life time; LMR)이라 정의하며(Sandberg and Sjoberg, 1983; Bartak et al., 2001), 기본적인 개념도는 Fig.

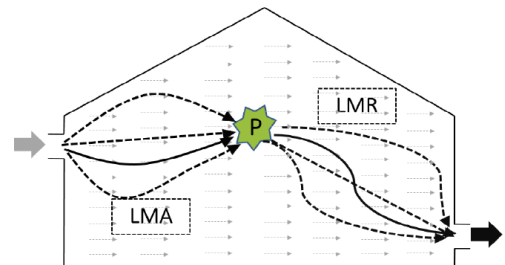


Fig. 6. The concepts of LMA and LMR based on the age of air

6과 같다(Park et al., 2013).

CFD에서 LMA 와 LMR 값은 Bartak et al. (2001)에 의해 제시된 수송방정식(passive scalar transport equation)에 의해 계산될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i \Phi - \vec{J} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} = \rho, (\vec{J} = -(\rho D_m + \rho D_t) \frac{\partial \Phi}{\partial x_i})$$

여기서, x_i 는 단위길이(m), ρ 와 u_i 는 실내 공간내 유체의 밀도(kg/m³)와 속도성분(m/s)를 나타낸다. \vec{J} 는 확산항(diffusion flux; [kg/(m²s)])를 나타내고, D_m 은 이류확산계수(m²/s), D_t 는 난류확산계수(m²/s), Φ 는 LMA 값(s)을 의미한다. 이때 $(\rho D_m + \rho D_t)$ 항은 Turbulent Schmidt Number(S_{ct})를 나타내며, 와류점성(eddy viscosity; [m²/s])을 와류확산계수(eddy diffusivity; [m²/s])으로 나눈 값으로 운동량의 난류수송과 질량의 난류수송의 비를 의미한다. 일반적인 공기의 S_{ct} 값은 0.7 정도로 알려져 있다(Park et al., 2013, Lee et al., 2014).

본 연구에서는 먼저 역사 승강장내 급배기 시스템에 의한 유동장(Flow field)을 해석한 후 공기연령을 산정하였다. 즉, LMA의 산정은 Fluent에서 제공하는

UDS (user defined scalar) 기능과 UDF (user defined function) 기능을 이용하였고, 이때 Flux function은 질량유량(mass flow rate)으로 정의하였다. Fig. 7은 이상의 과정을 나타내고 있으며, 해석순서는 먼저 급배기 시스템에 의한 기류유동장을 정상상태(steady state)에서 해석 한 후 UDS 전달방정식만을 추가로 해석하여 공기연령을 계산하였다. 이때 스칼라에 의해 표출되는 값은 초(sec) 단위로 급기연령(LMA)을 나타내게 된다.

3. 분석결과

3.1 승강장내 기류해석

Fig. 8과 Fig. 9는 승강장내 호흡선 높이(H=1.8m)와 바닥배기구 중간높이(H=0.5m)에서의 풍속분포 결과를 나타내고 있다. 먼저 Case 1은 기존의 상부 급·배기 시스템을 가동한 경우를 나타내며, Case 2는 상부 급·배기시스템에 하부배기시스템을 함께 가동한 경우를 나타내고 있다. 상부 급기풍량 33,230 CMH (9.231 m³/s), 상부 배기풍량 17,700 CMH (4.917 m³/s) 이며, 하부배기풍량은 15,530 CMH (4.314 m³/s) 이다.

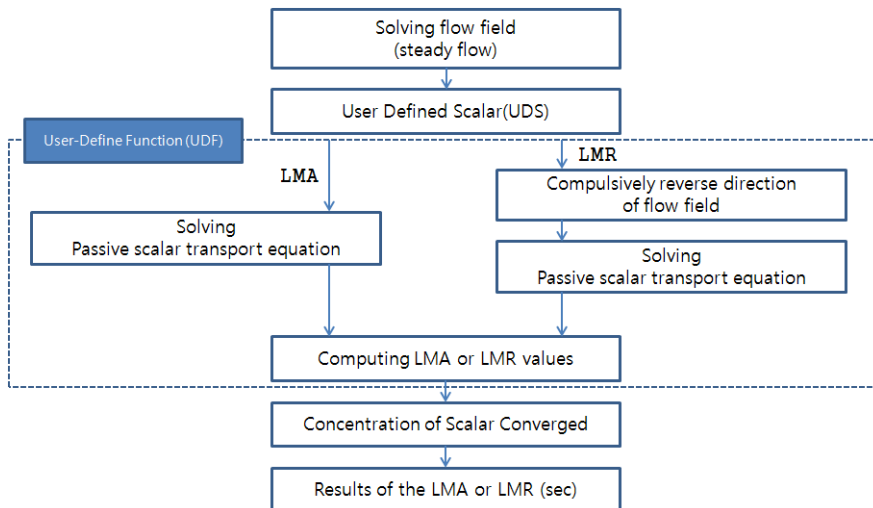


Fig. 7. The flow chat designed for calculation of age-of-air values

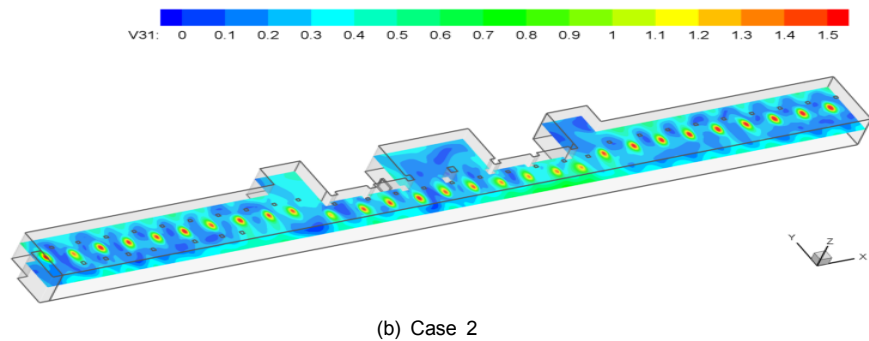
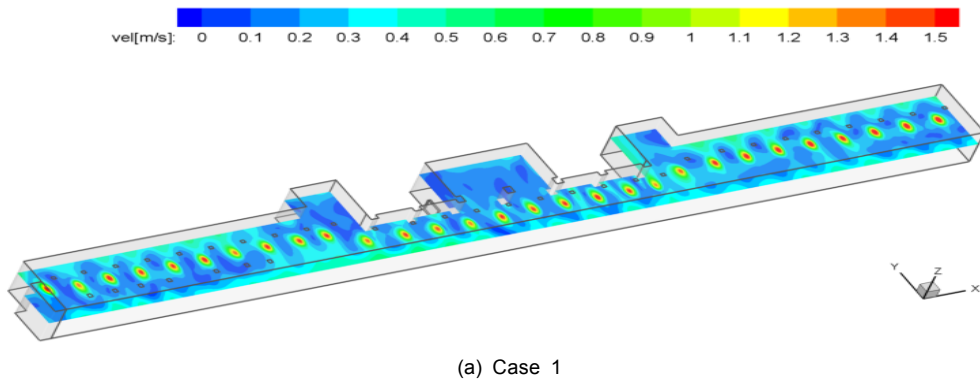


Fig. 8. Velocity profiles at H=1.8 m for Case 1 and Case 2

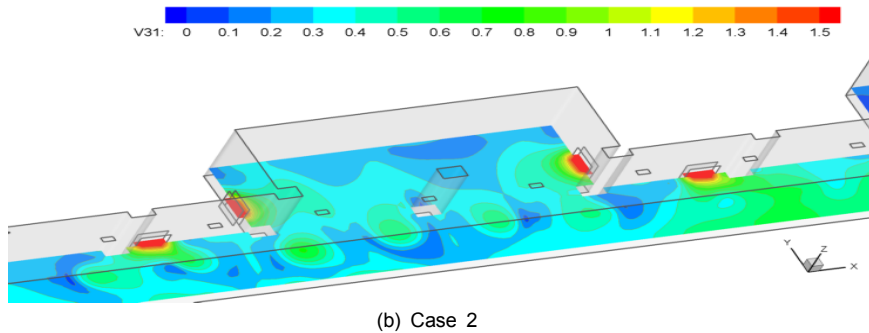
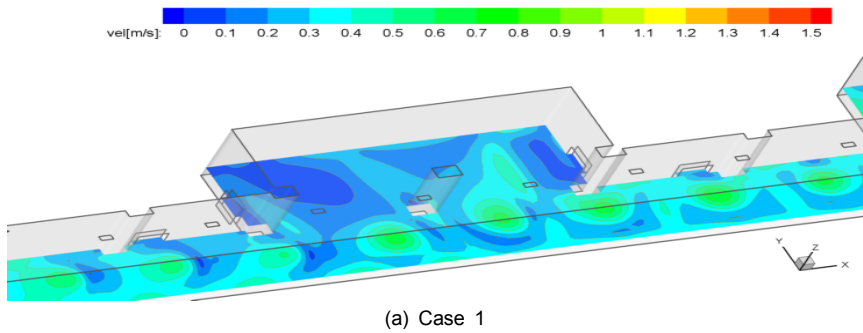


Fig. 9. Velocity profiles at H=0.5 m for Case 1 and Case 2

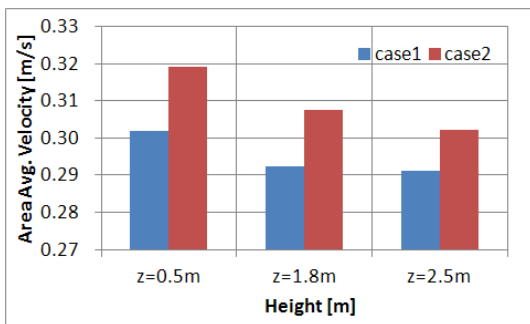
www.kci.go.kr

하부 배기구가 없는 Case 1의 경우, 계단부를 제외한 승강장내 체적평균 유속(volume-weighted average velocity magnitude)이 0.306 m/s 정도로 나타나며, 하부 배기구가 있는 Case 2의 경우, 승강장내 체적평균 유속이 0.323 m/s 정도로 나타나 약 5.6%의 유동효과가 상승한 것으로 분석된다. 호흡선 높이(1.8 m)에서의 평균유속(area-weighted average velocity magnitude)이 각각 0.293 m/s 0.308 m/s 로 분석되어 상부 급기측에서 토출되는 기류의 강도에 따라 승객이 느끼는 불쾌감이 없으며, 전체적인 급·배기 시스템에 의한 기류유동이 안정되게 공급되는 것으로 분석된다. 또한 각 Case 별 바닥에서 높이 0.5 m, 1.8 m, 2.5 m에서의 평균유속분포(area-weighted average velocity magnitude)를 분석한 결과, 하부배기시스템을 가동한 경우가 0.5 m 지점에서는 5.7%, 1.8 m 지점에서는 5.2%, 2.5 m 지점에서는 3.7%의 유속이 증가한 것으로 분석되었으며, Fig. 10과 같다.

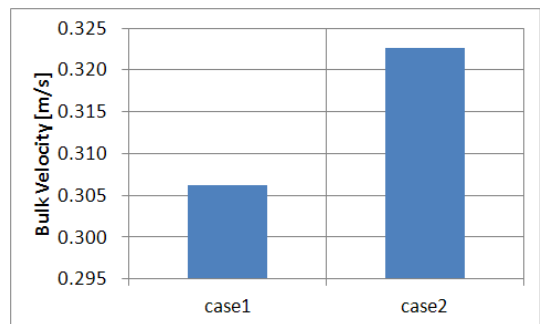
Table 2은 두 방식(Case)간의 높이에 따른 질량유속(mass-weighted average velocity)을 나타내고 있다.

즉, 하부배기가 있는 Case 2의 경우가 Case 1에 비하여 바닥높이 0.5m 에서는 질량유동이 약 4.2% 정도 증가하고 있으나, 호흡선(1.8 m) 및 상부(2.5 m)에서는 0.4%, 1.1% 정도 낮게 나타났다. 이는 하부배기로 인한 상대적인 유량에서 Case 2가 Case 1보다 하부쪽에 많은 유동이 발생한 것으로 분석되며, 상대적으로 상부에서의 질량유속은 Case 1 보다 Case 2의 경우 상부쪽에서는 약간 감소한 것으로 분석된다. 그러나 Fig. 10(b)처럼 전체적인 체적유속이 Case 2가 Case 1 보다 크므로 Case 2의 환기방식이 유리한 것으로 분석되었다.

승강장 내부와 계단부 단면에서의 기류분포 특성을 속도벡터를 이용하여 Fig. 11에 제시하였다. 하부배기가 없는 Case 1의 경우 승강장에 초과 공급되는 급기량으로 인해, 계단을 통해 상승하여 대합실로 이동하는 분포를 나타내는 반면, 하부배기를 통해 승강장의 급배기량이 균형을 이루는 Case 2의 경우 계단을 통한 상부로 이동하기 보다는 오히려 대합실의 일부 공기가 승강장으로 이동하는 특성을 나타내고 있다.



(a) Area-Weighted Average Velocity



(b) Bulk Velocity

Fig. 10. Velocity profiles by height from bottom

Table 2. Mass-weighted average velocities for different heights

Height	Mass-weighted average velocity [m/s]		Change rate
	Case 1	Case 2	
0.5 m	0.383	0.399	+0.016 (+4.2%)
1.8 m	0.528	0.526	-0.002 (-0.4%)
2.5 m	0.720	0.712	-0.008 (-1.1%)

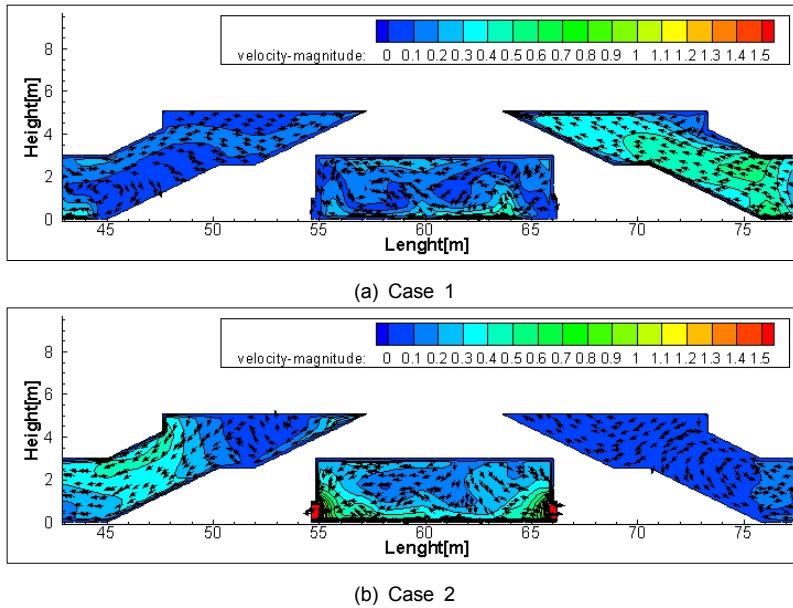


Fig. 11. Distribution of air flow profiles for Case 1 and Case 2

3.2 공기연령 분석

Fig. 12은 승강장내 호흡선 높이(H=1.8 m)의 수평 방향과 상부 급기구쪽의 수직방향에서의 공기연령 (age-of-air)를 나타내고 있으며, 기류유동장을 정상상태(steady) 해석후 UDS에 의한 수송방정식만을 추가

로 해석한 결과이다. 이때 범례의 단위는 초(sec)를 의미하며 급기연령(LMA)을 나타내고 있다.

PSD 설치에 따라 정거장 내부의 급기환기구 직하부에서의 공기연령 값은 신선공기의 유입으로 짧은 시간 값을 나타내고 있으며, 양쪽 계단부 사이의 중앙부근 지역에서는 공기연령이 상대적으로 지체되어

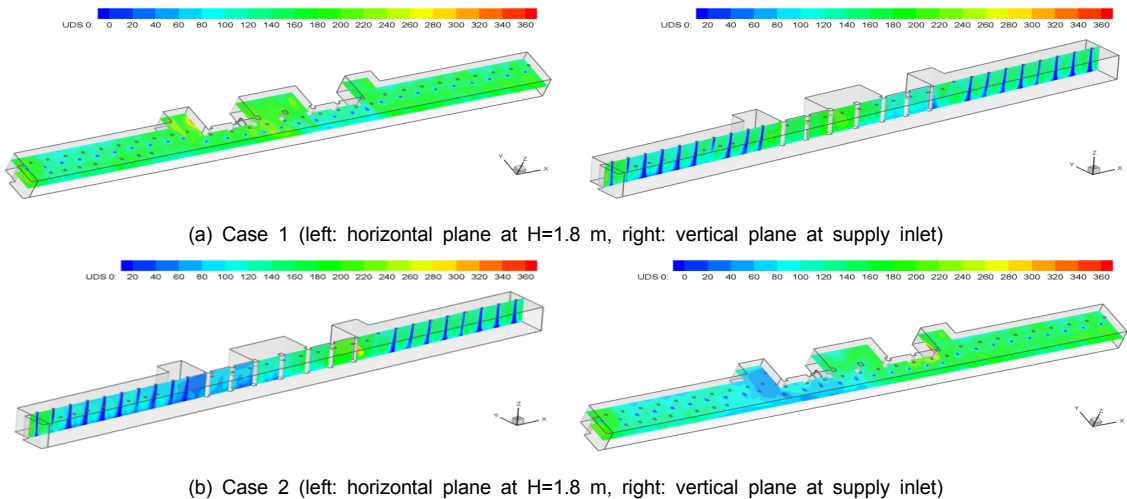


Fig. 12. Distribution of age-of-air Velocity profiles for Case 1 and Case 2

Table 3. Results of age-of-air

	Age-of-air [sec]		Improving efficiency
	Case 1	Case 2	
Volume average age-of-air in the station	143.9	120.1	16.54%
Respiratory line height(H=1.8 m)	152.3	127.2	16.48%

긴 시간 값을 나타내고 있다. 즉, 신선공기가 유입되는 곳은 짧은 공기연령 값을 나타내고, 기류가 지체되거나 유속이 낮은 경우나, 오염된 공기에 의한 환기효율이 낮은 곳은 상대적으로 긴 시간의 공기연령 값을 나타내고 있다.

Table 3은 두 방식(Case)간의 공기연령을 분석한 결과를 나타내고 있다. 먼저 Case 1의 경우 승강장내 체적평균 공기연령 값(volume-weighted average UDS value)은 143.9초 정도로 나타나며 호흡선 높이(1.8 m)에서의 평균 공기연령 값(area-weighted average UDS value)은 152.3초로 분석되었다. 반면 Case 2의 경우 승강장내 체적평균 공기연령 값은 120.1초 정도로 나타나며 호흡선 높이(1.8 m)에서의 평균공기연령 값은 127.2초로 분석되었다. 따라서 역사 전체 공기 또는 1.8 m 높이에서의 공기연령감소 비율은 Case 1에 비하여 Case 2에서 평균 16.5% 정도의 개선효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 연구에서는 최근 PSD 설치에 따른 열차풍 영향의 제거로 정거장내 환기효율의 저하문제가 발생하고 있는데, 이를 해소하기 위해 계단실 하부공간(창고)에 배기 팬을 설치하여 환기효율문제를 개선하고자 CFD를 통한 기류유동 특성과 공기연령에 관한 수치해석을 수행하였다. 이상의 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 먼저 하부 배기구가 없는 Case 1의 경우, 승강장내 체적평균 유속이 0.306 m/s 로 나타났으며, 하부 배기구가 있는 Case 2의 경우, 승강장내 체적평균

유속이 0.323 m/s로 나타나 약 5.6%의 유동효과가 상승한 것으로 분석되었다. 또한 호흡선 높이(H=1.8 m)에서의 평균유속은 각각 0.293 m/s, 0.308 m/s 로 분석되어 상부 급기측에서 토출되는 기류강도에 따른 승객이 느끼는 불쾌감은 없으며, 전체적으로 급배기 시스템에 의한 기류유동은 안정되게 공급되는 것으로 분석되었다.

2. 또한 기류의 지체상태 및 환기효율 특성을 공기연령 이론에 기초한 분석결과, Case 1의 경우 승강장내 체적평균 공기연령 값은 143.9초 정도로 나타나며 호흡선 높이(1.8 m)에서의 평균공기연령 값은 152.3초로 분석되었고, 반면 Case 2의 경우 승강장내 체적평균 공기연령 값은 120.1초 정도로 나타나며 호흡선 높이(1.8 m)에서의 평균 공기연령 값은 127.2초로 분석되었다. 따라서 Case 2가 Case 1보다 16.5% 정도 공기연령이 개선된 것으로 분석되었다.
3. 본 연구에서 수행한 하부 배기시스템을 고려한 Case 2의 경우가 기존의 정거장 급·배기 시스템(Case 1) 보다는 체적유속 및 공기연령 측면에서 각각 5.6%, 16.5% 정도 개선된 것으로 분석되어, 향후 PSD 설치에 따른 정거장 역사내 환기효율 저하문제를 해소하기 위한 대안으로 제시될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부의 재원으로 미래철도기술연구사업(14RTRP-B067918-02)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Bartak, M., Cermak, M., Clarke, J.A., Denev, J., Drka, F., Lain, M., Macdonald, I.A., Majer, M., Stankov, P. (2001), "Experimental and numerical study of local mean age of air", Proceedings of the 7th International Building Performance Simulation Association Conference, pp. 773-779.
2. Chow, W.K., Qu, L., Pang, E.C.L. (2011), "Incidents on fire and ventilation provision in subway systems in Hong Kong", International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Vol. 10, No. 3, pp. 41-47.
3. Huang, Y.-d., Gong, X.-l., Peng, Y.-j., Lin, X.-y., Kim, C.N. (2011), "Effects of the ventilation duct arrangement and duct geometry on ventilation performance in a subway tunnel", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 26, pp. 725-733.
4. Jeon, J.-S., Yoon, J.-C., Lee, H.-C., Eom, S.-W., Chae, Y.-Z. (2012), "A noticeable change in indoor Radon levels after platform screen doors installation in Seoul subway station", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 28, No. 5, pp. 59-67.
5. Lee, S.Y., Lee, I.B., Park, S.J. (2014), "Development of a straightforward method of estimating age-of-air using CFD", Int. Conference of Agricultural Eng., (Ref. C0564), pp. 1-8.
6. Lee, T.-J., Jeon, J.-S., Kim, S.-D., Kim, D.-S. (2010), "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, Vol. 26, No. 5, pp. 543-553.
7. Meng, N., Hu, L., Wu, L., Yang, L., Zhu, S., Chen, L., Tang, W. (2014), "Numerical study on the optimization of smoke ventilation mode at the conjunction area between tunnel track and platform in emergency of a train fire at subway station", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 40, pp. 151-159.
8. Park, S.-J., Lee, I.-B., Hong, S.-W., Kwon, K.-S., Ha, T.-H., Yun, N.-G., Kim, H.-G., Kwon, S.-H. (2013), "Development of straightforward method of estimating LMA and LMR using computational fluid dynamics technology", Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 55, No. 6, pp. 135-144.
9. Roh, J.S., Ryou, H.S., Park, W.H., Jang, Y.J. (2009), "CFD simulation and assessment of life safety in a subway train fire", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 24, pp. 447-453.
10. Sandberg, M., Sjoeborg, M. (1983), "The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms", Building and Environment, Vol. 18, No. 4, pp. 181-197.