

지하철 승강장내의 환기 특성에 관한 해석적 연구

박병성*·김호영**·김용구***

The simulation on the characteristics of ventilation in the subway platform

B. S. Park, H. Y. Kim and Y. G. Kim

Key Words: subway(지하철), platform(승강장), curtain air(유막공기).

Abstract

The purpose of present study is to find design parameters and operating conditions of the HVAC system in a subway platform. The simulation was carried out for the flow, heat and mass transfer for heating, ventilating and air-conditioning(HVAC) environments in the subway platform. The steady-state, incompressible flow assumption and standard k-ε turbulence model are adopted. The location of HVAC air inlet above platform and the volume flow rate of curtain air released from inlet B are chosen as main parameters in this study.

The results of present study are following : In the case of existence of train, the heat and contaminant released under the train have no effect on the average temperature and mass fraction of contaminant in the platform, but heat released on the train has influence on the average temperature in the platform. Train acts as an obstacle to exhaust the contaminant in the platform, but has good effect on the average temperature in the platform.

기호설명

- $J_{i,i}$: Diffusion flux of species i' .
- $D_{i,m}$: Diffusion coefficient for species i' in the mixture.
- Sc_t : Turbulent Schmidt number.
- k_{eff} : Effective thermal conductivity.
- μ_{eff} : Effective viscosity.

1. 서론

1974년 서울지하철 1호선이 개통된 이후로

현재 서울지하철은 8호선까지 개통되어 운행되고 있다. 서울 뿐만아니라 부산, 인천 지하철이 운행되고 있고, 대구, 대전, 광주 등의 전국 여러 대도시에서는 현재 지하철 공사가 진행중이다.

현재 차량의 폭발적인 증가로 인하여 도심 지상교통수단은 거의 포화상태에 이르렀고, 그에 따른 시간적, 경제적 비용이 증가하였다. 이에 대한 대안으로 지하철은 가장 확실하고 안전하며 신속한 대중교통수단으로 각광받고 있다. 현재 지하철의 이용빈도와 이용시간이 계속적으로 증가하여 지하철 및 지하공간 내에서 체류하는 시간은 점차적으로 길어지고 있다^[4].

우리사회의 전반적인 생활수준의 향상과 더불어 지하철 및 지하공간 내의 환경에 대한 관심이 고조되고 있으며, 이와 함께 쾌적함에 대한 요구가 날이 증가되고 있다. 특히, 부유분진을 위시한 공기오염, 하절기의 고온다습, 환기부족으로 인한 불쾌감 등은 지하철 환기분야에서 시급히 해결해야 할 문제들이다.^[1]

* 고려대학교 대학원 기계공학과

** 고려대학교 기계공학과 교수

*** (주)에너지2000

지하환경은 여러 종류의 오염물질에 노출될 가능성이 더욱 높으며, 또한 지하공간의 특수성으로 인하여 유해물질이 발생되거나 화재 및 독극물 등의 유출로 인한 사고 발생 시 오염물질의 제거가 힘들고, 이들이 축적되어 심각한 문제를 초래할 수 있다.^[2]

현재 운용중이거나 건설중인 지하철 역사에 대한 설계 및 공조 설비의 설계는 대부분이 일본이나 외국 지하철의 자료에 의존하고 있다. 그러나 세계 각국 지하철마다 차량조건, 운행조건, 기후조건, 터널형상, 지하철 역사 등이 다르므로 그에 대한 검증이나 체계적인 연구가 절실히 필요할 실정이다.

본 연구는 차후 건설될 지하철 승강장의 공조 및 환기 시스템 설계의 기본자료를 제공하기 위하여 지하철 승강장 내의 유동, 열 및 물질전달에 대한 해석을 수행하는 것을 내용으로 하며, 그 결과로부터 효과적인 운전조건을 도출한다.

2. 이론 해석

2.1 지배방정식

본 연구에서 기체유동은 정상상태 유동이며, 최대 속도가 3.12m/s로 음속에 비해 매우 낮은 속도이므로 비압축성 유동으로 가정하였다. 난류 유동계산에는 표준 k-ε 난류모델을 사용하며, 오염물의 크기는 10μm 이하 (평균 3μm)의 것^[3]으로서 입자의 속도가 공기 유동 속도와 같다고 가정하였고, 입자의 농도분포는 성분보존방정식을 이용하여 해석하였다. 본 해석에 이용된 지배방정식은 다음과 같다.

2.1.1 연속방정식

$$-\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

2.1.2 운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \\ & + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_i}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \end{aligned}$$

$$\text{where } \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)$$

2.1.3 성분보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_i) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(J_{i,i}) + S_i$$

$$\text{where } J_{i,i} = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial m_i}{\partial x_i}$$

2.1.4 에너지보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} + (\tau_{ij})_{eff} u_j \right] + S_h$$

$$\text{where } \tau_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right)$$

2.2 해석 제원

본 연구의 모델은 현재 운용되고 있는 지하철 O호선 ××역의 실제 설계를 기초로 하여 Fig.1과 같이 3차원 모델링을 하고, 그 운용조건을 이용하여 기초 해석을 하였다.

계산영역은 길이방향(z)으로 배기구 중심부터 다음 배기구 중심까지 5m 반복조건을 이용하였고, 폭방향(x)으로 승강장의 일반적인 부분(폭 20.7m)의 중심까지 10.35m 대칭조건을 이용하였으며, 높이방향(y)으로 선로구역 기초부터 천장까지 5.8m로 설정하였다.^[5]

레일부분에 열차가 있는 경우와 없는 경우로 나누어 각각에 대해 해석하였다.

Fig.1은 해석모델의 형상과 오염물 및 열 발생 위치를 나타낸다. 표1은 급기구와 배기구의 치수를 나타낸다.

2.3 경계조건

본 연구에서는 지하철 역사 공조설비 설계시 사용되는 여름철과 겨울철의 공조부하가 가장 큰 시기에 대해 해석이 이루어졌다. 여름철의 경우, 외기 온도 305.5K 일 때 공조 공기는 288K이고, 겨울철의 경우, 외기 온도 265K 일 때 공조 공기는 293K로 조건을 설정하였다.^[5] 열차가 승강장에 출입시 발생하는 열차풍 등의 유동 간섭은 고려하지 않았고, 벽면에서는 단열조건을 이용하였다. 급기구 A와 B에서는 외기가 공급되고, 급기구 D에서는 공조 공기가 공급되며, 급기된 공기는 모두 하부 배기구로 빠져나가는 공조방식을 선정하였다.

Table1은 현재 사용되고 있는 기본 운용 조건

을 나타낸다.

Table 1. Dimensions of inlets and outlets and volumetric flow rate (mm, m³/s)

	Inlet A	Inlet B	Inlet D	Outlet
W×H	300×600	30×5000	200×450	400×400
Flow rate	0.486	0.0528	0.281	0.8198

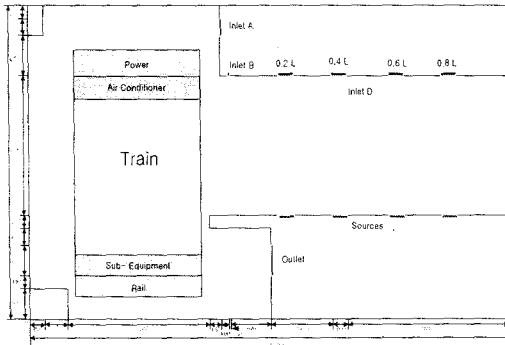


Fig.1 Schematic diagram of the model geometry

레일부분에서는 열차구동/제동 및 열차 보조기에 의한 열 발생을, 전원공급부분에서는 판도 그래프의 전원 공급 및 냉난방장치에 의한 열 발생을, 승강장부분에서는 이용승객의 체열 및 각종 전기장치의 열 발생을 고려하였고, 이들 각각의 발생 열량비율은 63%—22%—15%이다.^[5]

급기구에서 공급되는 공기는 오염물질 질량분율을 0으로 가정하여 승강장 내에서 발생하는 오염물질만을 고려하였고, 승강장 내의 오염물질은 선로부분에 0.048kg/s (80%), 승강장부분에 0.012 kg/s (20%)의 발생량을 각각 주었다.^[3]

2.4 계산방법

운동량 방정식에 나타난 속도와 압력과의 관계는 압력을 추정하여 속도장을 계산한 후 압력과 속도를 보정해 주는 방식인 SIMPLE Algorithm을 사용하였고, 열차가 있는 경우 117060개, 열차가 없는 경우 98398개의 격자를 사용하였고, 흡기 및 배기와 벽면쪽으로 밀착격자를 구성하였다^[9].

3. 결과 및 고찰

3.1 각 부분의 생성항이 승강장에 미치는 영향.

Table2는 여름철 각 부분 생성항들의 조합에 따른 승강장에서의 평균온도차와 오염물질 질량분율의 차이를 나타내고 있다.

Table 2. Average temperature & mass fraction of contaminant with various contaminant sources.

	승강장	전원공 급부분	레일 부분	온도	질량분율
no train	○	—	○	294.0 K	0.424
	○	—	×	293.4 K	0.418
	Difference			0.6 K	0.006
train	○	○	○	293.0 K	0.466
	○	×	○	291.8 K	0.466
	○	×	×	291.8 K	0.466
	Difference			1.2 K	0

열차가 없는 경우, 승강장과 레일부분에서 열과 오염물질의 발생이 이루어지고 있을 때와 승강장에서만 열과 오염물질이 발생될 때를 비교하면, 0.6K의 온도차와 0.006의 질량분율 차이가 있다. 이는 열차가 없기 때문에 유동과 확산에 의해서 레일부분에서 발생된 열과 오염물질이 승강장의 평균온도와 오염물질 농도에 영향을 주고있음을 나타내는 것이다.

열차가 있는 경우, (1) 승강장과 레일부분에서 열 및 오염물질이 발생하고 전원공급부분에서는 열 발생, (2) 승강장과 레일부분에서 열 및 오염물질이 발생, (3) 승강장에서만 열 및 오염물질 발생할 때, (1)과 (2)를 비교하면 1.2K의 온도차를 보인다. (2)와 (3)을 비교해보면 아무런 차이가 없음을 알 수 있다. 이것은 레일부분에서 발생하는 열 및 오염물질이 승강장에 어떠한 영향도 미치지 않음을 나타내는 것이며, 전원공급부분의 열만이 승강장의 평균온도에 영향을 미친다.

승강장의 평균온도와 오염물질 질량분율을 지배하는 것은 공조공기와 승강장 내에서 발생하는 오염물임을 알 수 있다. 또한 열차가 있고, 없애 따라 선로부분의 열 및 오염물질이 승강장에 약간의 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

여름철과 겨울철의 계절에 따른 변화는 거의 없다.

3.2 공조공기 급기구의 위치변화에 따른 영향.

승강장의 길이($x=6.33m$)를 특성길이(L)로 하여 공조공기 급기구 위치를 0.2L, 0.4L, 0.6L, 0.8L로 변화시켰을 때, 유동형태, 승강장 평균온도 및 오염물질 질량분율에 미치는 영향을 보면 다음과 같다.

Fig.2는 공조공기 급기구의 위치가 0.2L일 때, 급기구로부터 나온 공기의 궤적을 나타낸 것이다. 급기구에서 나온 공기가 우측 승강장에서 전체적으로 재순환하고 있기 때문에 우측 승강장 내에서 발생하는 열 및 오염물질이 없다면 매우 적합한 방식이라고 할 수 있으나 이것들이 발생할 때에는 쉽게 배출되지 않고 계속 순환하므로 상황이 더욱 악화될 수 있다.

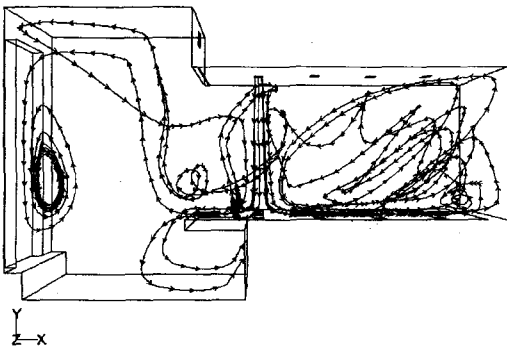


Fig. 2 Streaklines of conditioned air ejected from inlet C

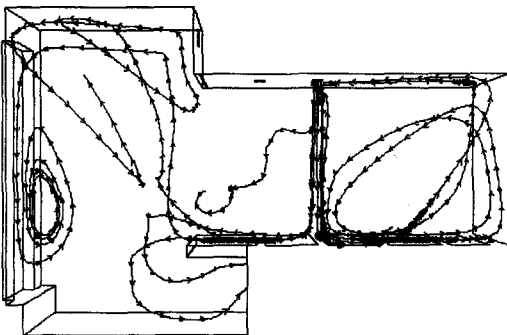


Fig. 3 Streaklines of conditioned air ejected from inlet D

Fig.3은 공조공기 급기구의 위치가 0.4L일 때, 급기구로부터 나온 공기의 궤적을 나타낸 것이

다. 0.2L일 때와 비슷하게 우측에 재순환 영역이 크게 나타나게 된다. 좌측으로 이동한 공기의 일부는 배기구로 배기되고 나머지는 선로부에서 배기되지 않고 상승하는 공기와 혼합되며 선로부 상부로 이동한다.

Fig.4는 공조공기 급기구의 위치가 0.6L일 때, 급기구로부터 나온 공기의 궤적을 나타낸 것이다. 우측 재순환 영역이 점차 작아지며, 좌측으로 이동하던 공기가 선로부에서 상승하는 공기로 인하여 일부는 승강장 내로 다시 재순환되고, 나머지는 선로부 상부에서 외기와 혼합되고 있다. 좌측영역에서의 재순환은 급기구 좌측으로 이동하는 공기의 운동량이 선로부 상승공기의 운동량보다 작기 때문이다.

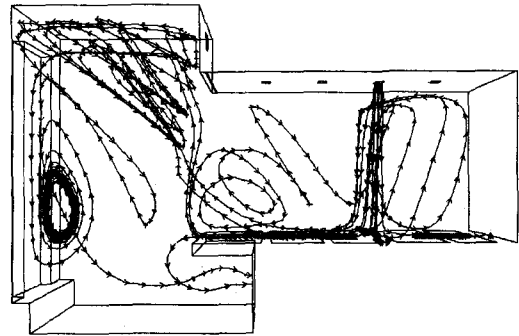


Fig. 4 Streaklines of conditioned air ejected from inlet E

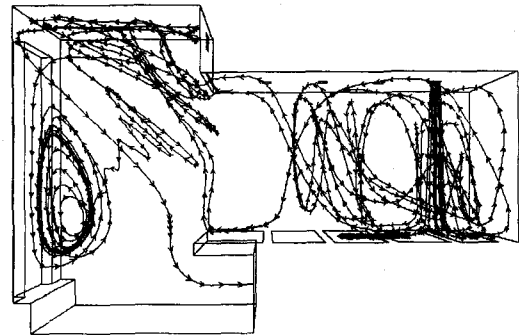


Fig. 5 Streaklines of conditioned air ejected from inlet F

Fig.5는 공조공기 급기구의 위치가 0.8L일 때, 급기구로부터 나온 공기의 궤적을 나타낸 것이다. 급기 우측의 재순환 영역이 매우 작게 나타

나며, 급기 좌측에서는 상하 공기의 혼합이 잘 이루어지며 선로부분으로 이동하고 있다.

보통의 의복을 입은 사람이 편안함을 느끼는 환경조건은 온도범위 20~26 °C, 습도범위 이슬점 온도로 2~17 °C, 평균공기속도범위 0.25~0.4 m/s이다.^[6]

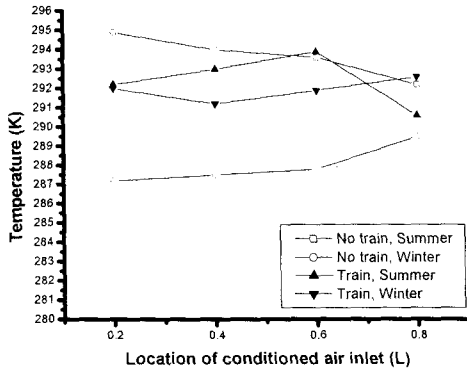


Fig. 6 Variation of average temperature in the platform for the various location of conditioned air inlet

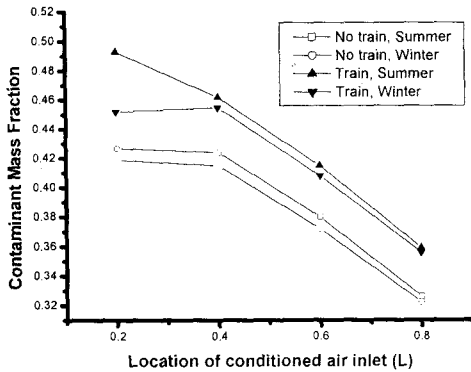


Fig. 7 Variation of average mass fraction of contaminant in the platform for various location of conditioned air inlet

Fig.6과 Fig. 7은 승강장 공조공기 급기구의 위치를 변화시켰을 때 승강장에서 평균온도와 오염물질의 평균질량분율을 나타낸 그래프이다.

열차가 없는 경우, 공조공기 급기구의 위치가 열차로부터 멀어질수록 승강장에서의 온도조절이

용이하게 나타난다. 이는 앞의 유동에 대한 고찰에서 보았던 바와 같이 선로부로부터 멀어질수록 재순환 영역이 적어지면서 승강장의 열 및 오염물질이 효과적으로 배출됨을 알 수 있다. 따라서 오염물질의 승강장 내에서의 평균 질량분율도 급기구의 위치가 열차로부터 멀어질수록 낮아진다.

열차가 있는 경우, 열차 상부의 공기가 승강장에 영향을 미친다. Fig.8, 9, 10, 11은 여름철, 공조공기 급기구가 0.2L, 0.4L, 0.6L, 0.8L일 때, 열차상부의 외기공기의 궤적을 나타낸다.

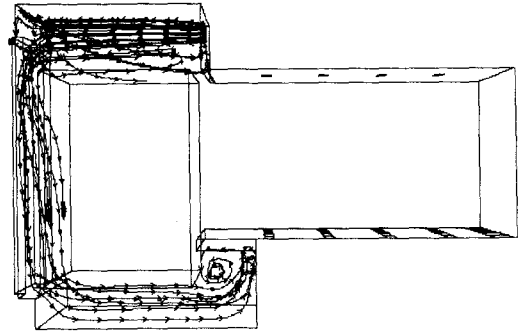


Fig. 8 Streaklines of outer air ejected from inlet A when the conditioned air ejected from 0.2L

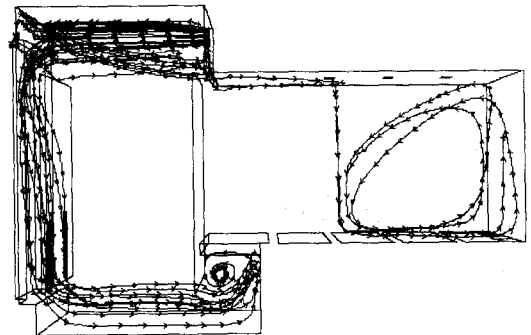


Fig. 9 Streaklines of outer air ejected from inlet A when the conditioned air ejected from 0.4L

0.2L의 경우, 열차 상부의 고온공기가 승강장으로 침투하지 않고 승강장 하부의 배기구로 모두 배기된다. 0.4L, 0.6L의 경우, 열차상부의 고온공기의 일부가 승강장으로 이동하는 것이 나타난다. 이로 인하여 승강장 내의 평균온도가 상승하게 된다. 그러나 0.8L의 경우, 승강장으로 열차상부의 고온공기가 침투하지 못하게 되어 승강장 내의 평균온도가 낮아지게 된다.

열차가 있는 경우, 열차가 없을 때보다 여름과 겨울의 온도차이가 적다. 이는 열차가 장벽역할을 하여 선로부분과의 공기혼합을 감소시켜 공조공기에 의해 승강장 내의 평균온도가 쉽게 조절되도록 한다. 그러나 열차는 오염물질을 배출하는데 장애물 역할을 하기 때문에 열차가 없을 때보다 평균 질량분율이 증가하게 된다.

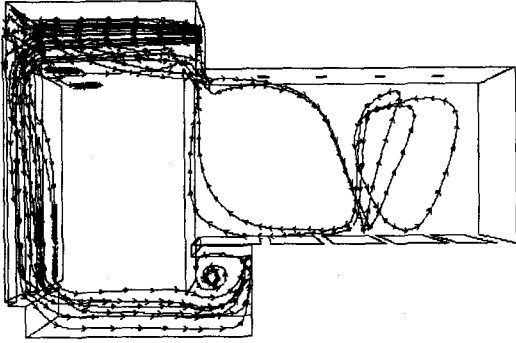


Fig.10 Streaklines of outer air ejected from inlet A when the conditioned air ejected from 0.6L

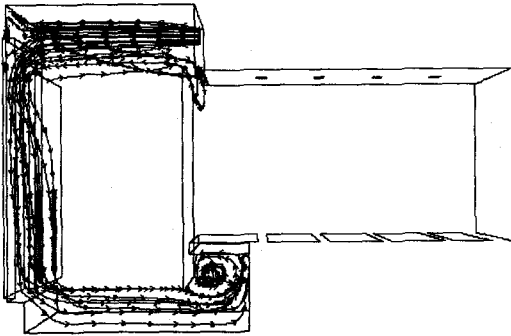


Fig.11 Streaklines of outer air ejected from inlet A when the conditioned air ejected from 0.8L

3.2 막공기(curtain air)의 유량변화에 따른 영향.

선로부분에서 생성되는 열 및 오염물을 차단하기 위해 외기가 공급된다.

Fig.12는 막공기의 유량을 변화시켰을 때 승강장에서 평균온도에 대한 영향을 나타내고 있다. 막공기의 유량이 증가할수록 냉난방 부하를 증가시킨다. 열차가 없을 때보다 열차가 있을 때 승강장의 온도조절에 효과적이다.

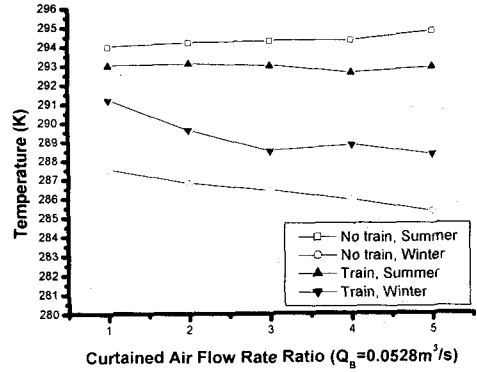


Fig. 12 Variation of average temperature in the platform for the various ratio of curtained air flow rate

Fig.13은 막공기의 유량을 변화시켰을 때 승강장에서 오염물질 평균질량분율에 대한 영향을 나타내고 있다. 막공기의 유량이 증가할수록 선로부분에서 발생하는 오염물이 승강장으로 유입되는 것을 막아주고, 선로부분으로의 유동을 촉진하여 오염물질이 전반적으로 감소하나 그 효과가 급기구의 위치를 변화시켰을 때 나타나는 효과에 비해 미미하며, 또한 냉난방 부하를 증가시키므로 적절한 급기량 선정이 필요하다.

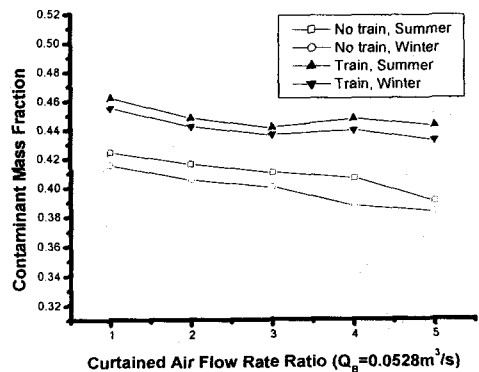


Fig. 13 Variation of average mass fraction of contaminant in the platform for the various ratio of curtained air flow rate

4. 결론

승강장 내의 공기조기 급기구 위치와 막공기의 유량을 변화시켜가며 3차원 난류유동, 온도장 및 오염물질의 유동에 대한 수치모사를 시행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열차가 없는 경우, 선로부에서 발생하는 열 및 오염물질이 승강장에 미치는 영향은 크지 않다.
2. 열차가 있는 경우, 선로부에서 발생하는 열 및 오염물질은 승강장에 전혀 영향을 미치지 않고, 열차 상부에서 발생하는 열만이 승강장에 영향을 미친다.
3. 열차는 장벽역할을 하여 승강장내의 오염물질 배출을 방해하지만 선로부분의 외기와 승강장 내의 공기공간간 열전달량을 감소시킨다.
4. 승강장 급기구의 위치가 0.8L일 경우가 승강장 내의 오염물질 배출 및 온도조절에 가장 효과적이다.
5. 막공기의 유량이 증가할수록 오염물질 제거량이 증가하지만 냉난방 부하 역시 증가하므로 적절한 급기량 선정이 필요하다.

후기

본 연구는 2000년도 「산·학·연 공동기술개발 컨소시엄 사업」의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 조울현, "지하철의 환기 시스템 현황 및 연구 과제", 공기조화 냉동공학 제26권 제2호, pp. 91~100, 1997.
- (2) 이명진, "지하철역의 공기오염 및 개선방안", 건축설비 제2권 제1호, pp. 32~40, 1999.
- (3) 김동술, 김신도, 김윤신, 신용배, 이태정, "서울시 지하철역내 분진 오염원의 정량적 기여

도의 결정", 대한환경공학회지 제16권 제3호, pp. 309~319, 1994.

- (4) 주지로, "지하철 승강장 내의 3차원 난류기류 유동에 대한 해석적 연구", 석사학위논문, 고려대학교 대학원, 1996.
- (5) 서울특별시 지하철건설본부, "지하철 O호선 실시설계 설비분야 각종계산서".
- (6) W. F. Stoecker, J. W. Jones, "Refrigeration & Air Conditioning", McGraw-Hill, 1997.
- (7) J. O. Hinze. "Turbulence", McGraw-Hill, 1975.
- (8) H. Tennekes. J. L. Lumley, "A First Course in Turbulence", MIT Publishing Company, 1994.
- (9) S. V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- (10) 손성철, 김진, "지하철 시스템의 온도 환경 및 환기 성능 분석", 공기조화 냉동공학 제28권 제6호, pp. 443~451, 1999.
- (11) 차철현, 김진국, "지하철 터널에서의 제연", 공기조화 냉동공학 제28권 제6호, pp. 425~432, 1999.
- (12) 김광용, 조재형, 리쉬밍, 양태윤, "지하철 환기시스템의 최적화에 관한 연구", 공기조화 냉동공학 논문집 제10권 제5호, pp. 630~639, 1998.