

철도차량 객차내 오염물질의 분포경향에 관한 전산해석

소진섭* · 전철균** · 최주석*** · 박찬수***

Distribution of Pollutant on the Indoor Air of Passenger Car

Jin-Sub So, Chul-Kyun Chun, Ju-Seok Choi and Chan-Su Park

Abstract

The transfer of air pollutants between passenger room and service room in train are investigated by the computational analysis. The effects of service room temperature, inlet velocity, initial concentration and heating are studied. The flow induced by the difference of density between two rooms is found to take the major role in transfer of polluted air. Low temperature of service room enhances the polluted air flow into passenger room along the floor. Exhaust fan above the door between two rooms is not effective for this case. Strong inlet flow is found to suppress polluted air flow from service room. The heating of passenger room can promote air pollution.

Key Words: Indoor air, Pollutant transfer, Passenger room, Train

기 호 설 명

t : time	k : conductivity
ρ : density	C_p : constant-pressure specific heat
u : velocity component in the x-direction	Y : mass fraction of air pollutant
v : velocity component in the y-direction	D : diffusivity
p : pressure	T : temperature
μ : viscosity	\bar{R} : universal gas constant
g : gravity	W_i : molecular weight
h : enthalpy	

1. 서 론

실내 공기 오염에 대한 일반의 인식은 오히려 대기오염 문제에 대한 관심에 미치지 못하는 듯하다. 대기오염이 인간에게 장기적인 영향을 미친다면 실내 공기 오염은 승객의 건강에 즉각적이고도 때론 (일산화탄소에 의한 실내 공기 오염처럼) 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 이 같은 실내 환경

오염 문제의 중요성을 인지하고 이에 대처하기 위한 노력이 점차 활발해지고 있다. 최근 각국의 환경기관들은 실내공기 측정방법의 표준화[1], 주택의 거주환경 내 휘발성 유기물 실태[2], 대기 오염 및 실내 환경의 오염물에 의한 감염 실태[3], 실내 공기 오염 물질의 위험성 및 취급법[4] 등에 대한 조사 및 연구를 연이어 발표하고 있으며, 세계 보건기구 유럽 사무소는 유럽 공기질 가이드라인 (Air Quality Guidelines for Europe)[5]을 새로 발표하는 등 실내 공기 오염에 대하여 이전에 파악하지 못했던 문제들까지 찾아내고 대처하려는 노력을 활발하게 펼치고 있다.

실제로 실내 공간 및 지하 공간의 공기오염농도는 일반적으로 실외의 대기오염농도보다 상당

* 철도청

** 목포대학교 기계선박해양공학부

*** 목포대학교 기계선박해양공학부 대학원

† 연락처자 : juseokchoi@mokpo.ac.kr

*** 목포해양대학교 기관공학과

히 높은 편이며[6-9], 특히 과거의 조사에서 국내 실내 공기 오염의 지배적 요인은 담배연기임이 수 차례 보고된 바 있다[8,10-12]. 이에 대하여 Rogger등[13]은 담배연기에 의한 폐암발생의 위험성을 지적한 바 있다. 현재는 비흡연자의 간접 흡연에 따른 건강피해를 막기 위해 실내 금연 운동이 확산되면서 많은 개선이 이루어지고 있다. 하지만 아직도 이와 관련하여 개선이 요구되는 분야가 적지 않다고 본다. 담배 연기로 인한 개선이 요구되는 공간 중의 하나로 대중운송 수단의 철도 차량 객실을 고려해 보고자 한다.

보통 담배 1개피를 흡연할 경우 입자상 물질은 10.8~17.6mg, 일산화탄소는 38~72ml, 질소산화물은 0.32~1.08ml 정도 되는 것으로 알려져 있다[14]. 담배연기에 의한 악취와 불쾌감을 제거하기 위한 효과적인 방안은 환기인데, 악취를 제거하는데 필요한 공기량은 불쾌감을 제거하는데 필요한 공기량의 10배 이상으로 조사되었다[15]. 이처럼 많은 유해물을 방출하고 처리에 많은 비용이 드는 담배연기가 더 이상 발생하지 않도록 버스와 같은 도로형 대중운송수단에서는 전 좌석을 금연석으로 지정하고 있다. 그러나 궤도형 운송수단인 철도차량에서는 아직도 부분적인 흡연이 허용되고 있다. 한 량의 객차는 객실과 편의실로 구성되는데 객실은 금연지역으로 되어 있으나 출입문을 사이에 둔 편의실은 이에 관한 규제가 없어 금연이 허용되고 있다. 이 같은 기차를 포함한 대중교통 수단에서의 실내공기오염과 관련된 최근 연구는 다음과 같다.

자동차의 실내공기오염 농도 측정 결과 전체적으로 오염물질이 실외보다 높은 것으로 조사된 보고[16], 철도 차량 객실 내 오염도 측정 연구[17], 객차 내 기류속도 및 흡입구의 그릴각도와 객실 내 온도의 상관관계를 검토하여 공기조화 성능을 수치해석적으로 파악한 연구[18], 이산화탄소농도를 기준으로 기차 안 환기의 적절성을 검증한 연구[19], pPAH(particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbon)과 PM₁₀ (diameter of particle <10 μm) 농도를 측정하여 이들 농도가 기차 흡연 칸에서 비흡연 칸보다 훨씬 높으며 흡연 칸으로부터 비흡연 칸으로 번져가는 것으로 추정된 연구[20] 등이 있다.

이상의 연구들은 주로 차량 내부의 오염 농도 측정에 관련된 오염 실태 조사들[18-20]이거나 적정 온도 유지에 대한 공기조화 효과[18] 및 환기 기준[19]에 관한 연구들이다. 따라서 대부분 오염 결과만을 분석하고 있다고 볼 수 있다. 차량 내 공기오염 문제에 효율적으로 대처하기 위해서는 먼저 차량 내 오염원 발생 과정을 파악하고 발생 오염원의 전달 특성을 이해하며 효과적 제거 방안을 검토하는 등 오염물의 동적 전달 특

성을 파악하는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그러나 이러한 점을 고려한 연구를 찾아보기 어려운 실정이다.

실내 공기질은 환기 방법, 실외 공기질, 실내 오염원, 실내 표면 특성 등 다양한 요인에 영향을 받는다[9]. 또한 동절기와 하절기에 따른 냉난방여부에 따라 오염정도가 달라진다[21]. 또한 계속적인 인원의 출입, 이에 따른 출입문 개폐 등이 오염물의 전달에 영향을 미칠 가능성이 크다. 그러므로 이 같은 차량의 동적 특성을 고려한 오염물 전달 특성을 파악하여야 할 것이다. 그러나 이 같은 차량 특성을 고려한 오염물질 전달에 관한 연구를 찾아보기 어렵다.

철도차량은 객차와 객차 사이를 밀폐하여 객차 사이의 안전한 왕래 및 소음 차단 효과를 제공한다. 아울러 창문의 밀폐를 통하여 냉난방 효율을 높이고 있다. 이 같이 밀폐된 객실이 적절한 공기조제를 통해 양질의 공기를 유지한다 하더라도, 흡연이 허용되는 객차의 편의실은 일시적이거나 오염도 높은 공기로 가득 찰 가능성이 충분하며, 이 오염물은 결국 객실로 전달된다고 볼 수 있다. 이 같은 담배연기 및 공기 오염물질의 객실 내 유입 요인 중에는 객실 출입문 개방에 따른 객실과 편의실 사이의 공기 접촉 및 유동 현상이 있을 수 있다고 본다. 이 문제에 대한 완전한 대책은 흡연차량과 비 흡연차량을 완전 분리하는 것이겠지만 기존의 국내 운행 실태에서 이를 바로 채택하기는 어렵다. 따라서 현재처럼 모든 차량의 편의실에서 흡연이 허용되고 객실에서는 흡연이 금지되는 상황에서 편의실 쪽에서 발생한 공기오염물질이 실내에 어떻게 전달되는지 실내 급·배기 상황 및 출입문 개폐상황을 고려한 전달 특성을 파악하여 실내공기의 오염 방지책을 마련하는데 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 1은 철도차량에서 공기 오염 물질의 객실 전달 상황을 분석하기 위하여 채택한 차량 모델이다. 이것은 운행 중인 차량의 실제 체원을 기준으로 단순화시킨 것이다. 차량은 크게 편의실과 객실의 2개 공간으로 구성되어 있고 양 공간을 미닫이형 객실 출입문이 분리시키고 있다. 이 문은 개폐가 가능하며 높이는 1.8m이다. 문 상부에는 높이 0.5m의 수직벽이 있다.

객실 출입문 좌측의 편의실은 객실 진입을 위한 통로이자 화장실 등 편의시설이 위치하는 곳이다. 이곳은 또한 차량 출입문 및 다른 차량

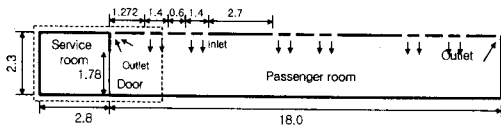


Fig. 1 Simplified shape of a passenger car

과의 연결 통로가 설치될 수 있으며 이를 통해 들어오는 외부 공기로부터 객실 내부를 분리시키는 일종의 완충공간 역할도 겸하고 있다.

편의실은 통상적으로 별도의 냉난방이 이루어지지 않으며 흡연에 대한 제한을 두지 않는다. 따라서 편의실에서는 흡연으로 인한 다량의 공기오염 물질이 발생할 수 있다.

실제 편의실에는 객실 공기를 급기시키는 정도의 환기가 이루어지고 있으나 본 연구에서는 오염이 심각한 경우를 가정하여 편의실에서는 급배기가 이루어지지 않는 것으로 설정하였다.

객실은 최초에는 공기오염 물질이 없는 것으로 설정하였으며 객실 내부는 천장에 설치된 12 곳의 급기구와 객실 좌우 끝 상부에 있는 2개의 배기구를 통해 환기 및 공조가 이루어진다고 보았다. 실제 차량의 급배기 상황은 3차원적인 것이나 좌석이 없는 객실 통로 상하부 공간을 중심으로 살펴보면 통로 상부의 천장에는 실제로 사각형 토출구가 있어서 통로 너비에 대해 급기가 이루어지고 있으며 배기구 또한 사각 형상으로 통로 폭 정도의 크기를 가지고 천장 가까운 곳에 설치되어 있다. 따라서 이를 감안하여 2차원적인 유동 및 전달 현상이 있는 것으로 가정하였다.

각 부분의 치수는 실제 차량의 제원을 토대로 결정하였고 급 배기구의 폭은 250mm로 하였다.

좌표계는 편의실 왼쪽 벽 하단의 정점을 원점으로 하여 수평방향을 x축, 수직방향을 y축으로 설정하였다.

2.2 지배방정식

차량의 실내공기에 대해 급배기 및 오염물질 전달 상황을 표현하는 수학적 모델은 다음과 같은 식들로 구성된다.

연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0$$

x방향 운동량 보존 방정식

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial u}{\partial y})$$

y방향 운동량 보존 방정식

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial y}) - \rho g$$

에너지 보존 방정식

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\frac{k}{C_p} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{k}{C_p} \frac{\partial h}{\partial y})$$

성분 보존 방정식

$$\frac{\partial(\rho Y)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v Y)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\rho D \frac{\partial Y}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho D \frac{\partial Y}{\partial y})$$

이상기체 상태식

$$p = \rho \bar{R} T \sum_i \frac{Y_i}{W_i}$$

2.3 경계조건

지배방정식을 해석하기 위한 초기 조건 및 경계조건은 다음과 같다.

모든 벽은 단열되어 있으며 오염물에 대해 불침투성이고 표면에서의 속도는 영이다. 단, 객차 바닥은 단열되어 있거나 혹은 균일 열유속에 의하여 가열된다. 객차 상부의 급기구에서 일정 속도 및 온도의 오염되지 않은 공기가 실내로 투입된다. 이와 같은 조건에 의하여 객차 내부에 대한 정상 상태의 수치해를 먼저 구하여 이것을 객차 내부 공간의 초기 조건으로 삼는다. 편의실은 최초에 밀폐되어 균일한 온도 및 균일 오염농도의 정지된 공기가 들어 있는 것으로 초기 조건을 삼는다.

객차와 편의실은 출입문이 닫힌 상태에 있다가 계산이 시작되면 열려서 양 공간의 공기가 서로 유통되며 문 개방 시간이 지나면 다시 닫힌다. 실제 객차의 출입문 개방시간에 근거하여 문이 열려 있는 시간은 5초로하고 5초 후는 다시 문이 닫혀 양 공간이 분리되는 것으로 하였다.

해석에는 상용 코드인 FLUENT를 사용했으며 Power law scheme을 적용하였다. 계산에서 공기의 상태량 및 루이스수(Lewis number) 1의 가정을 입력자료로 사용하였다.

해석상의 주요 검토 인자로 설정한 것은 편의실 초기온도(Ts), 편의실 초기오염물농도(Y), 객

실온도(T_a), 객실 급기속도(V_a), 실제 객실의 난방 수치고 같은 바닥면의 난방(q)을 위한 가열 여부 등이었다. 이러한 검토 인자들을 변화시키며 수치해를 구하였는데 검토한 각 경우별 인자 변화를 다음의 Table. 1에 나타냈다.

Table 1 Cases of study

case	Parameter				
	Ts(K)	Va(m/s)	Ta(K)	Y	q(w/m ²)
1	290	0.5	300	0.1	0
2	300	0.5	300	0.1	0
3	310	0.5	300	0.1	0
4	290	0.25	300	0.1	0
5	290	0.75	300	0.1	0
6	290	0.5	300	0.05	0
7	290	0.5	300	0.2	0
8	290	0.5	300	0.1	350

3. 결과 및 검토

3.1 경우1의 유동 특성

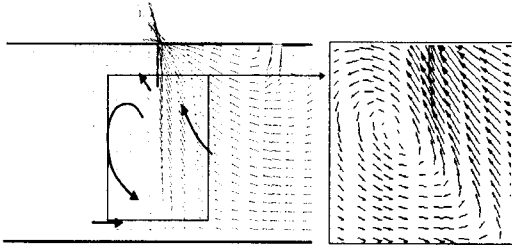


Fig. 2 Velocity distribution in detail

Fig. 2는 객실보다 편의실 온도가 10도 낮은 경우(case1)에 대한 문 개방 1초 후 실내 속도 분포의 일부로서 객실 출입문 부근의 유동을 부분 확대하여 나타낸 것이다. 그림의 중앙에는 객실 출입문과 함께 두 공간을 분리시키는 상부 수직벽이 나타나 있다. 이 벽의 우측 천장에는 배기구가 인접 설치되어 있고 그림의 우측 끝 천장은 문에서 가장 인접된 급기구이다. 문은 개방되어 나타나지 않지만 상부 수직벽 기준으로 좌측은 편의실이며 우측은 객실이다. 그림에서는 두 공간에 분리되어 있던 공기가 혼합되면서 유동 배기되는 상황이 나타난다. 그림의 객실에서 바닥에 평행하게 좌측을 향해 흐르던 공기가 배기구를 향해 상승하는 것을 볼 수 있다. 이 유동은 객실 안에서 급기구를 통해 투입된 공기가 문 부근에 있는 배기구를 향해 유동하면서 나타나는 현상으로 해석된다. 전체적으로는 급기구로 하향 투입된 공기가 하강 후 다시 배기구를 향해 상승하는 U

자형 유동이 나타나는데 그림의 유동은 그 일부로 볼 수 있다.

문 부근의 유동을 살펴보면 배기구를 향하는 상승 유동의 일부는 개방된 문을 통하여 편의실 쪽으로 유입되고 있음을 알 수 있다. 이에 따라 객실 공기가 편의실 상부로 유입될 수 있음을 알 수 있다.

한편, 편의실 하부에는 바닥을 따라 객실을 향해 흐르는 유동이 형성되어 있고 이 유동은 객실로부터 반대방향으로 흘러오는 유동과 마주쳐 일종의 정체점을 형성한 뒤 상부 배기구 쪽으로 상승 유동하는 것을 볼 수 있다. 이 정체점의 위치는 객실 내부에 형성되고 이로부터 편의실의 공기가 객실 내부로 유입될 수 있음을 알 수 있다.

편의실에서 객실을 향해 바닥을 따라 나타나는 유동은 편의실과 객실의 온도차에 따른 밀도차에 의해 유도되는 것으로 해석된다. 즉, 온도가 높아 상대적으로 가벼운 객실 공기가 편의실 상부로 유입되고 온도가 낮아 상대적으로 무거운 편의실 공기는 객실 하부로 바닥을 따라 유입된다고 생각된다. 한편, 편의실 하부로부터 객실 쪽으로 공기가 빠져나가고 객실 쪽 공기는 편의실 상부를 메우는 유동을 형성하는 과정에서 편의실 중심부에 반시계 방향 재순환 유동이 형성됨을 알 수 있다.

3.2 편의실 온도변화에 따른 오염물질 전달 특성

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 조건에서 객실초기 온도를 300K, 편의실 초기온도만은 290K, 300K, 310K로 변화시켰을 때 나타나는 실내 오염농도 변화를 시간대별로 비교 도시한 것이다. 등농도선의 간격이 좁아 숫자를 병기하지 못하였으나 각 선의 위치에 따른 농도 값을 그림 하부에 선도로 나타내었으므로 각 선의 배치 순서에 따라 값을 파악할 수 있다.

편의실 초기온도가 290K인 경우는 겨울 등 차가운 날씨에 객실을 난방 운행하는 경우에 가깝다 하겠다. 겨울철에 편의실은 통상 난방하지 않으므로 편의실 온도가 객실 온도(300K)보다 낮다. 따라서 오염되어 있는 상대적으로 무거운 편의실 공기가 Fig. 2와 같이 밀도차에 따라 객실로 흘러든다. 이 때 반시계방향 재순환 유동이 편의실 내에 형성되며 이에 따라 편의실 하부로부터 객실로 오염 물질이 유입되며 객실 오염 영역을 형성한다. 반면, 편의실 상부는 객실 쪽 공기가 유입되어 희석되며 오염 농도가 감소하는 편의실 희석 영역이 발생한다. 이 같은 경향은 시간이 경과함에 따라 점점 더 진행되어 상부의 편의실 희석 영역, 하부의 객실 오염 영역이 넓어진다.

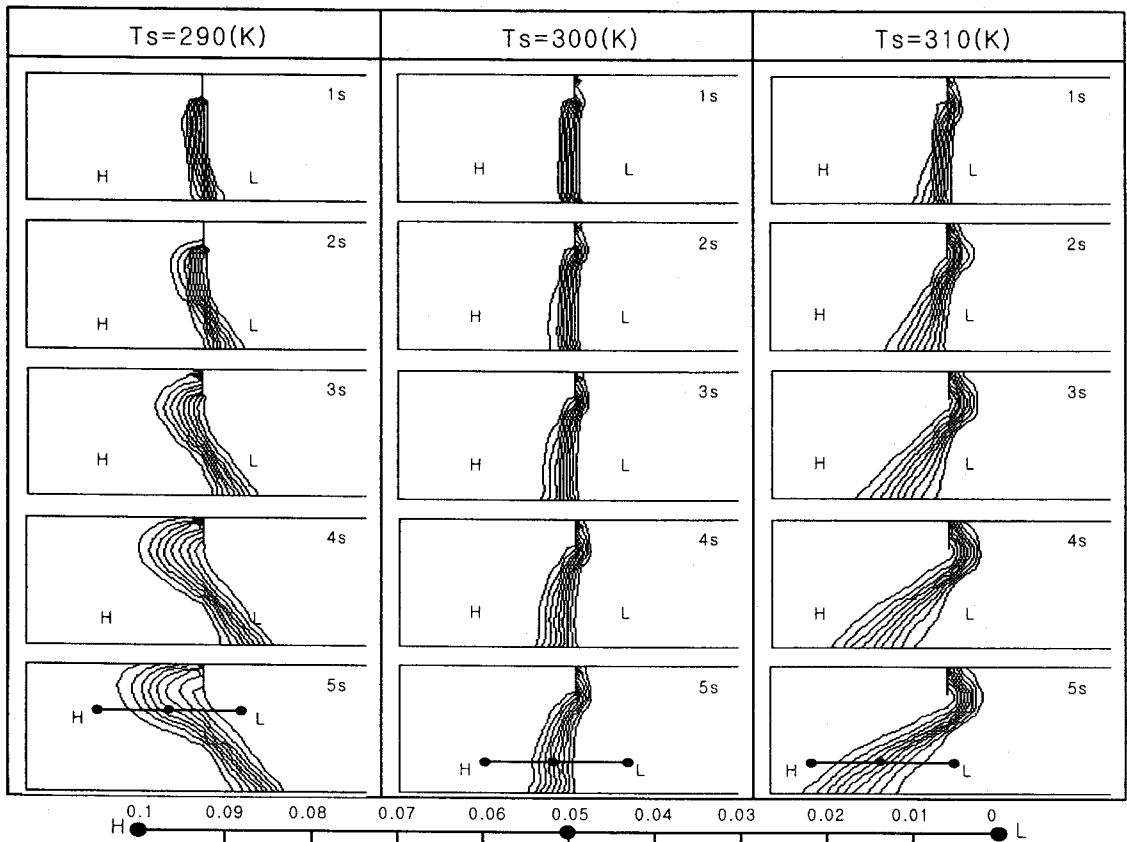


Fig. 3 The effects of service roof temperature on pollutant transfer

이 경우에 있어 오염물은 바닥을 따라 객실로 전달되므로 그림에 나타난 것처럼 문 상부 배출구 부근은 오염농도가 낮고 따라서 오염물 배출효과가 작다는 것을 알 수 있다. 이로부터 이런 상황에서 문 상부의 공기 배출구는 오염물 제거에 큰 도움이 되지 못함을 알 수 있다.

편의실 초기온도 300K인 경우는 객실과 편의실간 온도 차이가 없는 경우로써 봄가을 등 냉난방을 하지 않고 운행하는 경우에 해당한다고 볼 수 있다. 양 실에 온도차가 없으므로 밀도차에 따른 유동은 형성될 수 없다. 그림으로부터 급기구에서 투입된 공기가 바닥을 따라 흐르던 관성을 가지고 정지된 편의실 내의 공기 속으로 일부 침투하여 출입문 부근에서부터 편의실 안 쪽으로 희석영역을 넓혀 가는 추세임을 알 수 있다. 또한 객실 천장의 배기구를 향해 상승하는 유동을 따라 편의실내의 오염된 공기가 동반 상승 배출되며 객실 상부에 작으나마 오염 영역을 형성하는 것을 볼 수 있다.

편의실 온도 310K의 경우는 여름처럼 무더운 날씨에 객실을 냉방 운행하는 경우와 가깝다 하

겠다. 여름철에 편의실은 냉방하지 않으므로 객실보다 온도가 높다. 따라서 높은 온도의 객실공기는 상대적으로 편의실보다 높은 밀도차를 갖는다. 이에 따라 무거운 객실 공기가 바닥을 따라 편의실 내로 진입되며 이 밀도차에 따른 유입 방향은 객실 공기 주유동 방향과 일치하여 전달이 촉진된다. 따라서 시간이 경과할수록 편의실 내에 오염물이 희석된 공간이 크게 증가한다.

한편, 바닥부근에서 객실 공기의 편의실 내 유입이 증가하면 질량 연속의 원리에 따라 편의실 상부 공기의 객실 안 유입이 증가된다. 이에 따라 편의실 하부에는 오염희석영역이 크게 나타나고 객실 상부에는 객실 오염영역이 비교적 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

이 같은 객실 내 오염 영역은 객실 상부에 나타나므로 승객의 앉은키를 기준으로 생각하면 직접적 영향은 적을 것으로 보인다. 또한 가까운 배출구를 통해 효과적으로 배출 될 것으로 생각된다. 단, 배출구의 배출 용량이 충분치 못하다면 이 지역으로부터 내부로의 확산 등을 통해 객실 오염이 커질 수도 있음을 짐작케 해준다.

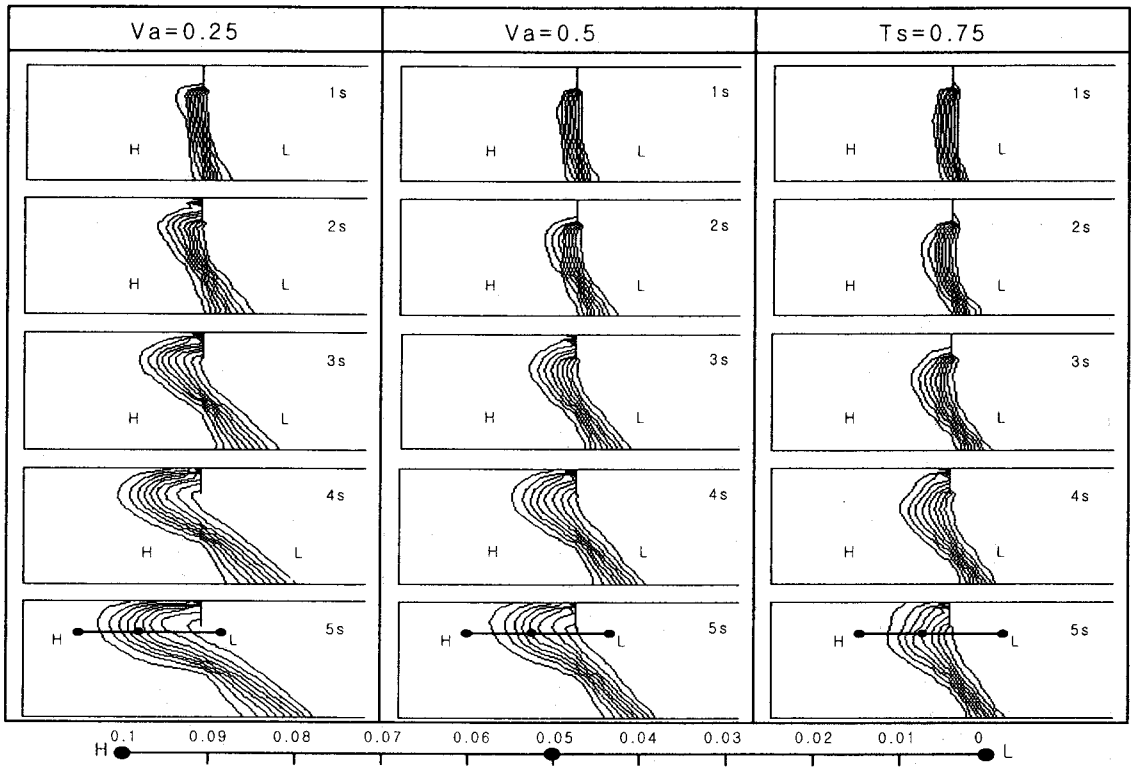


Fig. 4 The effect of inlet air velocity on pollutant transfer

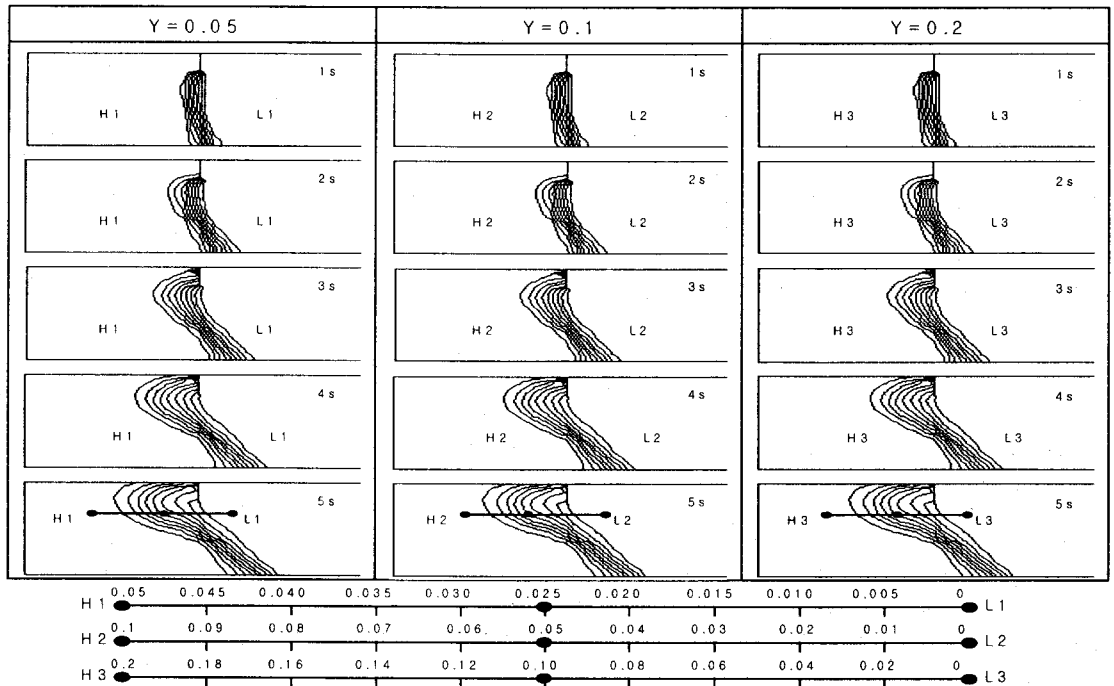


Fig. 5 The effects of initial pollutant mass fraction of service room on pollutant transfer

3.3 객실공기 급기 속도 변화에 따른 오염물질 전달 특성

Fig. 4는 Fig. 2와 동일한 조건에서 객실 내 급기 속도만을 0.25m/s, 0.5m/s, 0.75m/s로 변화시켰을 때 나타나는 오염농도 변화를 시간 경과에 따라 비교 도시한 것이다. 급기 속도가 클수록 객실 하부 오염영역의 크기가 작으며 객실 내부로의 전진이 늦고 편의를 상부의 회석 영역 또한 작아진다. 또한 등농도선의 간격도 좁아진다. 이로부터 큰 급기 속도는 오염물질의 전달을 억제하는 경향이 있음을 알 수 있다.

이 같은 현상은 편의를로부터 객실을 향하는 오염공기와 객실 내부에서 편의를를 향하는 실내공기가 서로 반대방향을 갖는데서 기인하는 것으로 해석된다. 밀도차에서 기인하는 편의실에서 객실을 향한 오염공기 유동의 강도는 어느 경우나 큰 변화가 없다고 볼 수 있다. 반면, 객실 급기가 배출구로 이동하는 실내공기 유동은 속도가 빨라질수록 관성력이 커지기 때문에 강도가 커진다. 따라서 급기 속도가 클수록 서로 마주보며 진행하는 두 유동이 마주쳤을 때 오염공기의 진행을 억제하는 효과가 더 커지게 된다. 이에 따라 편의를실 공기가 객실로 유입되는 것이 억제되는 것으로 생각된다.

급기 속도가 커질수록 하부의 편의를실 공기가 유출이 억제됨에 따라 연속법칙에 의하여 편의를실 상부 영역은 객실로부터 공기를 받아들일 여지가 줄어들게 되어 객실 공기가 유입되지 못해 편의를실의 오염공기 회석 영역도 증가하지 못함을 알 수 있다.

3.4 편의를실 공기 오염 농도 변화에 따른 오염물질 전달 특성

Fig. 5는 Fig. 2와 동일한 조건에서 편의를실 내 공기 오염물 초기 질량분율만을 0.05, 0.1, 0.2로 변화시켰을 때 나타나는 오염농도 변화를 시간 경과에 따라 비교 도시한 것이다. 그림에서 시간경과에 따른 객실 내 오염 영역 증가나 편의를실 내 회석 영역 증가는 매우 유사한 경향을 보인다. 하지만 자료를 검색해 보면 미세한 차이로 농도가 큰 경우 오염 영역 및 회석 영역의 크기가 크다는 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 전반적으로 오염물 농도 차이가 오염 및 회석영역 크기에 미치는 영향은 크지 않게 나타난다는 것을 알 수 있다. 이것은 문 개방시간(5초)이라는 비교적 짧은 시간 안에 나타나는 현상으로서 오염물질 전달에 있어서 시간을 요구하는 확산보다는 문 주위 유동의 영향이 지배적이라는 것을 의미하는 것으로 해석된다.

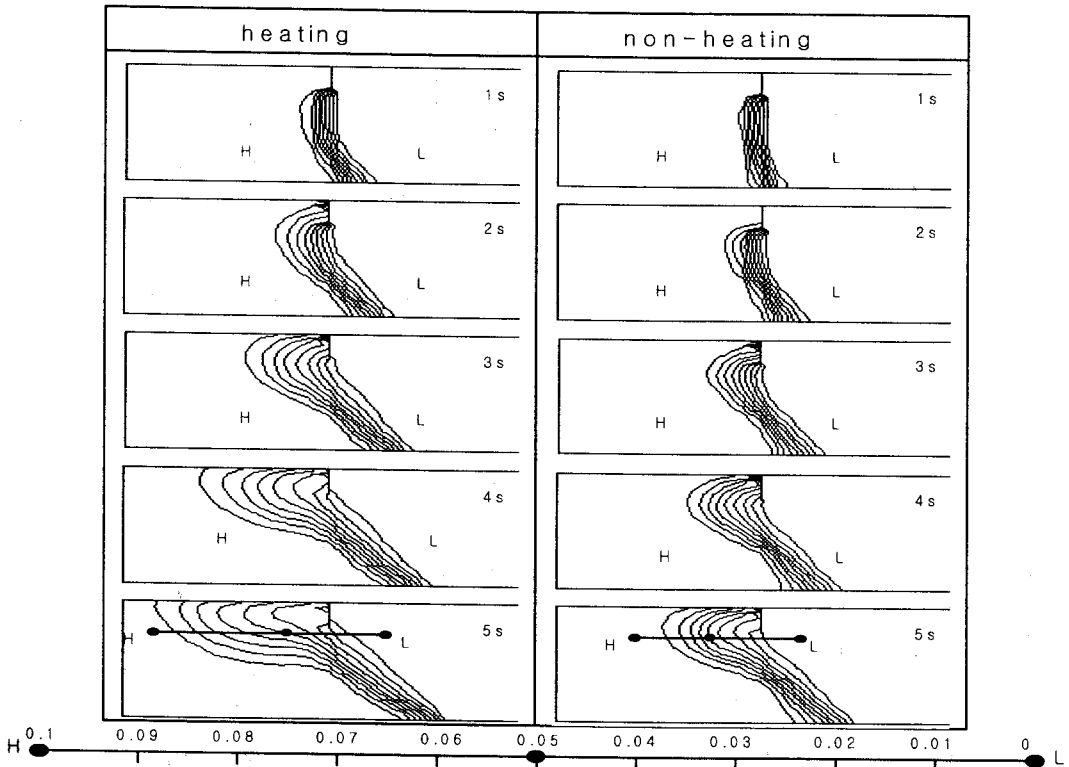


Fig. 6 The effect of heating for passenger room on pollutant transfer

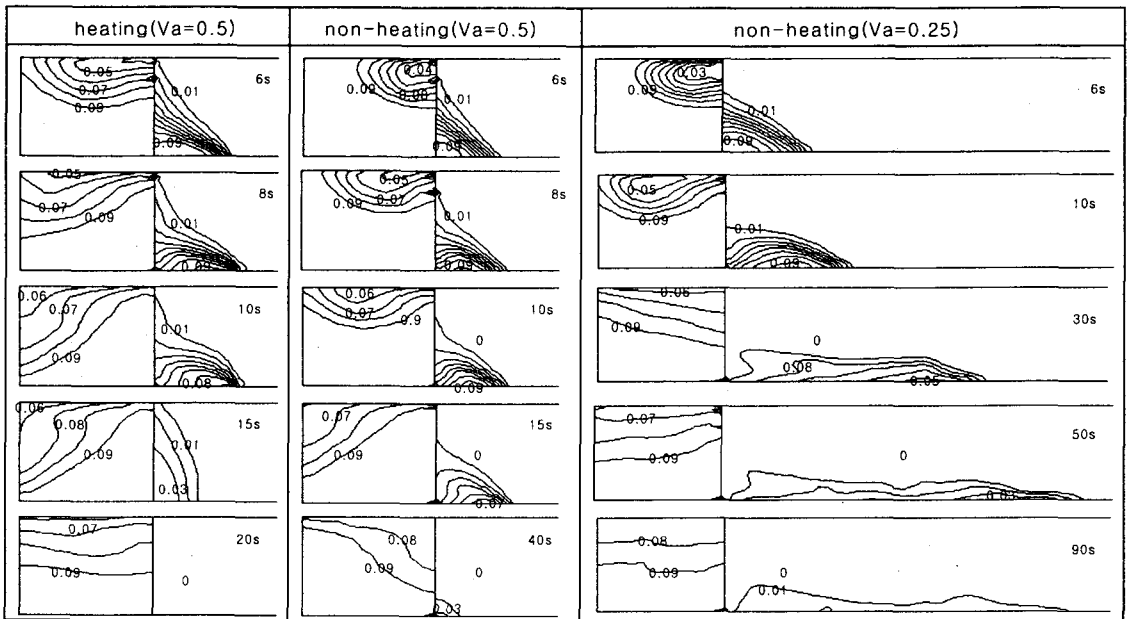
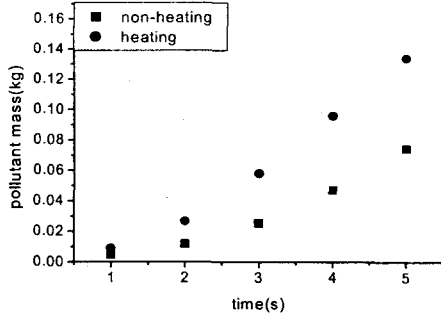
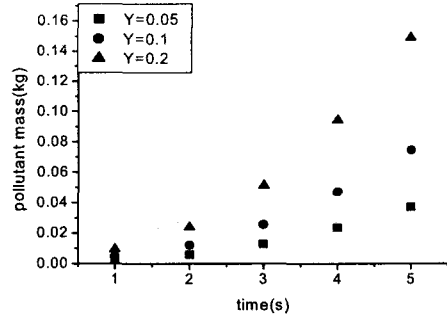


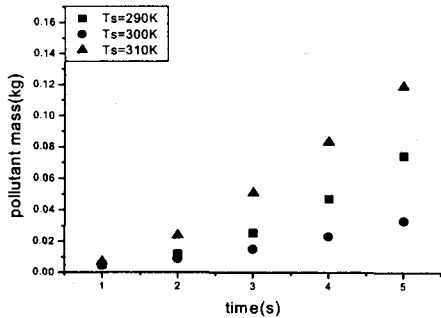
Fig. 7 Ventilating process after door closing



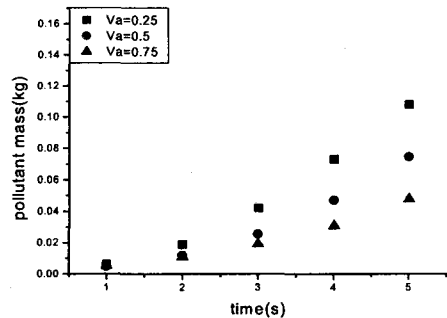
(a) Effect of Ts



(b) Effect of inlet velocity



(c) Effect of initial



(d) Effect of heating

Fig. 8 Variation of pollutant flow rate flowing into passenger room

3.5 객실 난방에 따른 오염 물질의 전달 특성

Fig. 6은 Fig. 2와 동일한 조건에서 객실의 바닥면을 객실의 실제 난방 수치와 유사한 350W/m²으로 가열 할 때와 가열하지 않을 때의 오염농도 변화를 시간 경과에 따라 비교 도시한 것이다.

그림으로부터 난방을 했을 때는 객실 내 오염영역이 크게 증가하고 등농도선의 간격도 넓어지며 편의실 상부 회색 영역도 현저하게 증가함을 알 수 있다. 즉, 객실 난방은 오염물질의 전달을 촉진하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 이같은 경향은 난방에 의해 객실 내부 공기의 온도가 증가하여 객실과 편의실의 밀도차가 커지기 때문에 나타나는 현상으로 해석된다. 커진 밀도차는 편의실 하부에서 객실로 향하는 오염공기 흐름의 강도를 증가시킨다. 반면 객실에서 편의실로 향하는 실내공기 흐름은 변화가 없다. 따라서 상대적으로 강해진 오염공기가 객실 내로 깊숙이 침투하게 되고 오염전달은 촉진된다고 생각된다.

또한 난방을 하게 되면 가열된 공기의 상승작용이 일어나고 이에 따라 객실 하부로 편의실 저온 공기의 침투가 쉬워진다. 아울러 객실공기의 편의실 상부로의 침투가 커져서 회색 효과 또한 촉진되는 것으로 해석된다.

3.6 문이 닫힌 뒤의 환기에 의한 오염물 배출 특성

Fig. 7은 Fig. 2와 동일한 조건에서 급기속도를 0.25m/s 및 0.5m/s로 취하고 난방을 하는 경우와 하지 않는 경우에 대하여 출입문이 닫힌 뒤 환기상황(5초에 출입문 닫힘)을 시간 경과에 따라 비교 도시한 것이다. 급기 속도가 같은 두 경우를 비교하면 문이 닫힌 직후 난방 객실에서는 비난방 객실보다 객실 안 넓은 면적에 오염 영역이 형성되었음을 볼 수 있다. 이것은 난방이 오염물 전달을 촉진하기 때문에 편의실로부터 많은 오염물질이 전달되어 나타난 현상으로 보인다.

그러나 이 같은 활발한 물질 전달 효과는 이후 환기과정에 긍정적으로 작용 할 수 있음이 그림에서 나타난다. 난방객실은 15초 정도에서 이미 문을 따라 배출구를 향해 0.04 이하의 낮은 농도 대만 남아 있으나 난방을 하지 않은 경우는 아직도 고농도대가 남아 있으며 등농도선 또한 배출구를 향하기보다는 바닥에 근접한 모습을 나타낸다. 20초 정도에서 난방객실은 오염물질을 대부분 배출한 것으로 나타나지만 비난방 객실은 그 이후까지 오염물질이 남아 있다. 이로부터 난방은 문 닫힌 뒤 객실의 오염물질 배출을 촉진하는 경향이 있음을 알 수 있다. 이 같은 효과는 난방에 의하여 바닥근 공기 온도가 증가함에 따라 부력에 의한 상승 효과가 나타남으로써 배출구를

향한 상방향 물질 전달이 활발해지는 데서 기인하는 것으로 분석된다.

급기 속도가 다른 비난방 객실의 두 경우를 비교하면 급기 속도가 작은 경우는 문이 닫힌 뒤 오염물질이 계속 확산되어 넓은 오염면적을 형성한 상태에서 배출이 이루어짐을 알 수 있다. 이는 급기속도가 작을 때 급기구로부터 문 쪽을 향하는 객실 내 유동이 상대적으로 약하여 객실 내부를 향해 전진하는 오염공기 유동을 억제하지 못해 나타나는 현상으로 해석된다.

3.7 오염 물질의 객실내 유입율

Fig. 8은 객실로 유입된 오염물질 총량(편의실로부터의 오염물질 배출 총량) 시간변화를 나타낸 것으로 객실 초기온도는 모두 300K이다. 제시된 값에는 객실로 유입되어 이미 배출된 량도 포함되어 있다.

Fig. 8(a)는 편의실 온도의 영향을 나타낸 것이다. 양 실의 온도가 같은 300K의 경우는 오염물의 유입이 가장 작다. 편의실 온도가 객실보다 높은 경우(310K)는 낮은 경우(290K)보다 오염물질 객실 유입량이 크다. 이로부터 객실 쪽 온도가 낮은 경우 편의실의 오염물 배출이 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5에서는 객실 내 오염물 잔류 면적이 310K보다 290K에서 작게 나타난다. 이것은 310K의 경우 객실로 유입된 오염물이 배기구를 통하여 효과적으로 제거되어 객실내 잔류량이 크지 않은 것으로 해석된다. 이로부터 편의실 온도가 객실보다 높을 경우 현 배기구는 오염물 배출에 효과적임을 확인할 수 있다. 반면 편의실 온도가 낮을 때는 문 상부에 있는 현 배기구는 효과적이지 못한 것으로 생각된다.

Fig. 8(b)는 급기속도의 영향을 나타낸 것으로 급기 속도가 클수록 편의실로부터 오염공기 객실 유입을 억제하는 효과가 있어 낮은 유입량을 보인다.

Fig. 8(c)는 편의실 초기오염농도의 영향을 나타낸 것으로서 최초 농도가 클수록 유입량이 크게 나타난다. Fig. 8(d)는 난방 및 비난방 객실의 유입량을 비교한 것으로 난방시는 오염물 전달이 촉진되어 전반적으로 오염 유입량이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

4. 결론

편의실 및 객차로 구성된 철도 차량 내부 오염물질 전달 특성을 파악하기 위하여 2차원적인 모델로 전산실험을 통한 예측을 시도하였다. 물리적 타당성을 갖는 결과를 얻었으며 객차 내 오염물질전달과 관련하여 몇가지 중요한 특성 및 지요소가 나타났다.

편의실과 객실간 온도차는 밀도차에 따른 유동을 유도하여 오염물질 전달에 지대한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이 유도효과는 편의실 온도가 객실보다 높을 때 편의실 하부로 객실 공기의 침투를 촉진하고 객실 상부 쪽으로는 오염된 편의실 공기를 배출시킨다. 그 결과 공간 상부에 설치된 배출구는 오염물 배출에 효과적으로 작동한다. 그러나 편의실 온도가 객실보다 낮으면 편의실 하부의 오염공기는 객실 쪽으로 바닥을 따라 침투하는 반면 객실 공기는 편의실 상부로 침투하여 오염공기를 희석시킨다. 이 경우 문 상부의 배기구는 오염물 제거에 효율적이지 못하다.

편의실이 객실보다 온도가 낮을 때 급기 유동을 증가시키면 편의실로부터 바닥을 따라 객실로 침투하는 오염공기 유동을 억제할 수 있다. 편의실 온도가 낮은 상황에서 객실 난방은 객실과 편의실 간 온도차를 증가시키므로 밀도차에 의한 유동을 촉진시키며 오염된 편의실 공기의 객실 전달을 촉진하는 효과를 낸다. 그러나 이 같은 난방의 효과는 기류의 상승을 촉진함으로써 문이 닫힌 후에는 오히려 오염 물질의 배출을 촉진하는 요소로 작용한다.

참고문헌

- [1] Brown, S. K., "Indoor Air Quality," Australia: State of the Environment Technical Paper Series(Atmosphere), 1997.
- [2] 厚生省生活衛生局企劃課 生活化學安全對策室, 居住環境中の揮發省有機化合物の全國失態調査について, 1999.
- [3] The National Board of Health and Welfare, Environmental Health Report 2001, NBHW's Customer Service, Article No. 2001-111-004, 2001.
- [4] Becher, R., Hongso, J. K. and Dybing, E., "Guidelines for Indoor Air in Norway-A Practical Approach, WHO Collaborating Centre for Air Quality Management and Air Pollution Control," *Newsletter*, No. 24, 1999.
- [5] "WHO Regional Office for Europe, Air Quality Guidelines for Europe," 2nd ed., European Series, *WHO Regional Publications*, Copenhagen, No. 91, 2000.
- [6] Dockery, D. W. and Spengler, J. D., "Indoor-Outdoor Relationship of Respirable Sulfates and Particles," *Atmospheric Environment*, Vol. 15, 1981, pp. 335-343.
- [7] Phillips, J. L., Field, R., Goldstone, M., Reynolds, G. L., Lester, J. N. and Perry, R., "Relationships between Indoor and Outdoor Air Quality in Four Naturally Ventilated Office in the United Kingdom," *Atmospheric Environment*, 27A, 1993, pp. 1743-1753.
- [8] 신혜수, 김윤신, 허귀석, "실내의 공기중 휘발성 유기화합물(VOCs)의 농도 조사에 관한 연구," *한국대기보전학회지*, Vol. 9, No. 4, 1993, pp. 310-319.
- [9] 김윤신, 홍승철, 전준민, "서울시의 대중교통수단내 실내공기질에 관한 연구," *한국위생학회지*, Vol. 20, No. 1, 1994, pp. 28-38.
- [10] 윤영훈, "도시지역 실내의 공기중 환경흡연(ETS)에 관한 연구," M.S thesis, 한양대학교, 환경과학대학원, 1995.
- [11] 김윤신, 윤영훈, 백성욱, Roger Perry, "실내 공간에서의 환경담배연기(ETS)에 관한 조사 연구," *환경과 산업의학*, Vol. 5. No. 1, pp. 1-10, 1996.
- [12] 유재홍, "지하철 내의 CO₂측정을 통한 최적 환기량 산정에 관한 연구," M.S thesis, 서울시립대학교, 산업대학원, 1997.
- [13] Walk, R., "Scientific Data for an Assessment of the Potential Risk for Lung Cancer Associated with the Exposure to Environmental Tobacco Smoke in Korea," *Proceedings of the International Conference on Tobacco Science*, 1997, pp. 30-78.
- [14] 대한산업보건협회 편집실, "흡연과 실내공기 오염," *산업보건*, Vol. 4, 1989, pp. 51-57.
- [15] 이광수, 장태준, "쾌적환경과 담배연기," *공기조화·냉동공학*, Vol. 19, No. 6, 1990, pp. 337-341.
- [16] Rodes, C. and Sheldon, L., "Measuring Concentrations of Selected Air Pollutants Inside California Vehicles," California Environmental Protection Agency Air Resources Board, 1999.
- [17] 김태규, "철도 객차내 공기오염도 분석," M.S thesis, 연세대학교, 산업대학원, 1997.
- [18] 이찬우, 최경진, 이동형, 조광수, "신형 무궁 객차 내 공기조화 성능 향상에 대한 수치연구," *대한기계학회 춘계학술대회논문집B*, 1998, pp. 41-46.
- [19] Chow, W. K., "Ventilation of Enclosed Train Compartments in Hong Kong," *Applied Energy*, Vol. 71, 2002, pp. 161-170.
- [20] Leutwyler, M., Siegmann, K. and Monn, C., "Suspended Particulate Matter in Railway Coaches," *Atmospheric Environment*, Vol. 36, 2002, pp.1-7.
- [21] 신동천, 이효민, 김종만, 정 용, "일부지역의 내공기오염도와 건강에 미치는 영향에 관한 연구," *한국대기보전학회지*, Vol. 6, No. 1, 1990, pp. 73-84.