한국산학기술학회논문지
Vol. 8, No. 2, pp. 179-184, 2007

버스전용 지하주차장의 환기 특성에 관한 수치해석적 연구

이승철[1*], 승삼선[2]

Numerical Simulation on Ventilation Characteristics of an Underground Bus Parking Lot

Seung-Chul Lee[1*] and Sam-Sun Seung[2]

요 약 본 연구에서는 전산유체역학 기법을 도입하여 17대 버스가 주차된 지하주차장의 환기특성을 분석하였다. 그 결과 지하주차장내 버스 4대가 운행할 때 CO와 NO_x의 평균농도는 각각 1.3과 0.3 ppm으로 나타났다. 또한 15대 버스가 공회전할 때 지하주차장내의 CO와 NO_x의 평균농도는 2.9와 0.8 ppm으로 각각 나타났다. 따라서 두 가지 경우의 결과가 허용기준을 충족하여 지하주차장에 설치될 환기설비의 용량 및 위치는 적정한 것으로 판단된다.

Abstract In this paper, the ventilation characteristics of an underground parking lot with 17 buses has been investigated for two cases by computational fluid dynamics. It has been found that the average concentration of CO and NO_x gas in the parking lot were 1.3 and 0.3 ppm respectively, when four buses operated. When the fifteen vehicles stopped in the parking lot, the average concentration of CO and NO_x gas was 2.9 and 0.8 ppm respectively. The average concentration of two pollutants(CO, NO_x) are lower than the standard values. Therefore the facilities and its location is proper to ventilation.

Key Words : Ventilation Characteristics(환기특성), Underground Bus Parking Lot(버스전용 지하주차장), *Computational Fluid Dynamics*(전산유체역학), *Contaminant*(오염물질)

1. 서론

산업사회의 고도화에 따른 생활수준의 향상으로 유동인구가 증가하면서 교통수단의 다양화가 이루어지고 있다. 비록 개인 교통수단이 증가하고 있지만 대도시의 경우, 교통난의 완화 측면에서 대중 교통수단의 확충과 편의성의 향상은 시급한 현안중의 하나로 대두되고 있다. 대도시에서는 지하철이 대중교통의 중심이 되고 있지만, 버스의 경우에도 아직까지 그 중요성을 간과할 수 없다. 특히 인구가 밀집된 지역에서 버스 주차장을 확보하기 위한 공간 확보의 어려움은 버스의 대중 교통수단으로써의 역할을 가로막는 장애요인이 되고 있다.

특히 다량의 버스가 정차하는 버스 주차장의 경우, 오염물질이 집중적으로 발생하기 때문에 인근 주민들에 의해 혐오시설로 인식되어 민원의 대상이 되면서, 지상으로부터 지하에 위치하도록 하는 방안이 구체적으로 검토되는 경우가 빈번히 발생하고 있다. 또한 부족한 주차공간의 확보를 위해 지하공간을 활용한 지하주차장의 건설이 증대되고 있다. 그러나 지하주차장에서는 옥외주차장과는 달리 밀폐되어 있어, 버스 등의 자동차 배기가스(일산화탄소, 질소산화물, 탄화수소, VOCs 등)로 인한 공기오염이 심각한 문제로 대두되고 있다. 정부에서는 주차장법 시행규칙에 지하주차장의 환경기준을 제시하였고 이를 준수하기 위하여 지하주차장 설계 시에는 충분한 검토가 완료된 환기시스템이 제시되어야 한다.

대부분의 지하주차장에 적용되는 환기방식은 덕트 환기시스템, Drivent 환기시스템 및 젯트팬부 무덕트 환기시스템으로 구분된다. 본 연구의 대상 지하 주차장의 환기시스템은 덕트시스템과 젯트팬부 무덕트 환기시스템이 혼용되어 있다. 이러한 경우, 급·배기구 위치와 젯트팬의 배치방식에 따라 환기 유동특성은 상이하게 나타나며, 주차장내 국소오염물질 농도와 분포 또한 많은 차이를 보이게 된다. 따라서 이러한 문제의 해결을 위해서는 적정 급·배기구 위치와 젯트팬의 적절한 배치가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 대상 지하 주차장 환기시스템의

[1]강원대학교 소방방재학부
[2]강원대학교 기계·자동차공학부
*교신저자: 이승철(sclee@kangwon.ac.kr)

급·배기풍량, 급·배기구 위치 그리고 젯트팬의 배치가 적절한지를 평가하기 위해 전산유체역학기법을 도입하여 환기특성 및 오염물질 분포 특성을 해석하고자 하며, 이를 분석하여 오염물질 허용기준에 적합한지를 판단하고자 한다.

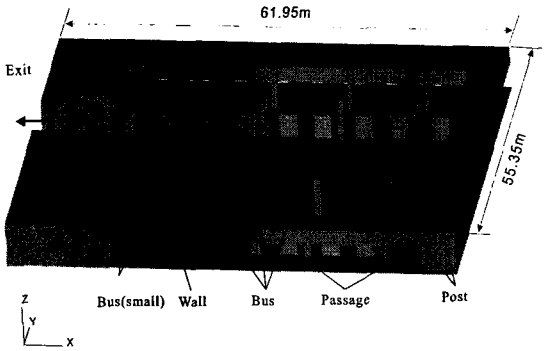

그림 1. 지하 버스주차장의 개략도

2. 모델 선정

본 연구의 대상 지하 주차장은 크게 주차공간, 호텔 이용자들의 이동통로 및 기타 부속실로 구성되어 있다. 대상 주차장의 3차원 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 주차공간은 15대의 대형버스와 2대의 소형버스가 주차 가능하며, 그림 좌측의 화살표(↔) 지점을 통하여 차량의 출입이 이루어진다. 대상 주차장의 환기시스템은 주차장 내부에서 발생하는 오염물질을 효과적으로 배출시키기 위하여 주차장 가장자리에 급기구가, 중앙부에 배기구가 배치되어 있는 구조이다. 또한 오염물질이 주차장 외부로 누기되는 것을 방지하기 위하여 주차장 내부는 급기풍량보다 배기풍량이 더 많게 설계되어 있다.

주차장 내부에는 신선 외기를 공급하는 급기구 32개(1개의 급기구당, 450 mm × 450 mm, 2,813 CMH)가 천장부에 설치되어 90,000 CMH의 급기풍량을 공급하고 있다. 배기구는 천장과 기둥 하부에 각각 10개와 17개가 설치되어 있다. 배기풍량은 급기풍량보다 약 42,000 CMH 많은 132,000 CMH로써, 천장부에 설치된 배기구(1개의 배기구당, 600 mm × 400 mm, 2,700 CMH)를 통해서는 27,000 CMH가 기둥 하부에 설치된 배기구(1개의 배기구당, 0.65 m^2, 6,176 CMH)를 통해서는 105,000 CMH가 배기되어지도록 설비되어 있다. 또한 버스의 장시간 공회전시, 버스의 배기구를 통해 배출되는 오염물질의 직접적인 방출을 제거하기 위하여 배기구에 직접 접속시켜 오염물질을 배출하는 전용배기구가 설치되어 있다.

3. 관련법규

주차장 환기시스템에 관한 국내법규는 건축법 시행규칙(건설교통부) 제 6조 제 7항에 노외주차장 내부의 환경은 일산화탄소(CO) 농도를 기준으로 8시간 평균 50 ppm 이하를 유지하도록 규정하고 있다. 이는 주변국가인 일본의 50 ppm, 홍콩의 100 ppm과 다소 유사한 수준이다.

자동차가 배출시키는 유해한 오염물질중 지하주차장에서 가장 많이 발생되고 있는 일산화탄소의 제거가 가장 중요하다. 왜냐하면 자동차의 배기가스는 일산화탄소 이외에 질소산화물(NO_x), 휘발성유기화합물(VOC:Volatile Organic Compounds) 등의 기타물질도 배출되나 그 양이 일산화탄소의 양에 비해 미미하기 때문에 일산화탄소의 양을 규제하는 것은 비교적 합리적인 조치이다.

그러나 주차차량이 디젤엔진을 사용하는 버스인 경우에는 배출되는 일산화탄소는 가솔린엔진을 사용하는 일반 승용차보다 일산화탄소의 배출비율이 낮아지지만 질소산화물의 경우, 배출비율이 약간 높아진다.[1] 표 1에는 ASHRAE에서 제시하는 서로 다른 연료의 자동차에서 배출되는 배출가스량을 성분별로 나타내었다.[1]

표 1. 연료종류에 따른 자동차 배출가스의 성분별 배출량 [단위 : g/mile]

Fuel	CO	NO_x	VOC
Gasoline	19.86	1.51	2.36
Diesel	1.71	1.55	0.74
LPG	2.00	0.40	0.16

주차장의 주차차량이 버스의 경우, 일산화탄소(CO)와 함께 질소산화물(NO_x)도 고려해야 할 오염물질이지만, 질소산화물에 대한 국내법규의 규제는 없다. 따라서 본 연구에서는 ANSI/ASHRAE 62-1999[2]에서 산업현장 규격(Industrial Workplace Standard)에 사용되는 CO와 NO_x의 농도를 도입하여 본 연구결과와 비교하였다. 표 2에는 주차장내 공기 오염물질의 규제기준 및 권고기준을 나타내었다. Table 2에서 보이는 바와 같이 ANSI /ASHRAE 62-1999에서 CO의 농도는 8시간 평균치 50 ppm이하, NO_x는 5 ppm 이하로 유지할 것을 권고하고 있다.

표 2. 지하주차장내 공기 오염물질의 규제기준

Item	MOCT*	ASHRAE
(CO)	50 ppm/8h	50 ppm/8h
(NOx)	-	5 ppm

*The Ministry of Construction and Transportation

4. 지배방정식 및 경계조건

본 지하주차장의 환기시스템 시뮬레이션은 주차장내 17대의 버스(대형버스 15대, 소형버스 2대) 중 대형버스 4대가 주차를 위해 감속운전 상태의 경우(case 1), 대형버스 15대가 공회전하고 있는 경우(case 2)에 대하여 각각 수행되었다.

지하 주차공간에서의 오염물질 환기 특성을 기술하는 정상상태의 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지소산율방정식 그리고 농도방정식이다. 각 식들에서의 기호 선정은 일반적인 교과서[3]에서의 예를 따랐으며 지면 관계상 생략하였다.

난류모델은 표준 $\kappa-\varepsilon$모델[4]을 이용하였으며, 운동량 방정식과 농도방정식에서는 제트팬 위치에서의 모멘텀 생성항과 주차장 내부의 오염물질 생성항이 추가된다.

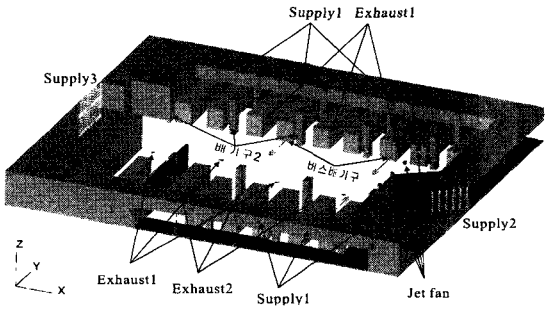

그림 2. 급배기 터미널 및 제트팬 위치

본 지하주차장 환기시스템의 급·배기구 및 제트팬 위치를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보이듯이 급기구는 모두 3가지 종류로 분류되고 배기구 또한 2가지로 분류 할 수 있다. 급기는 주차장 천장부에 위치한 급기구(급기구1, 33개), 호텔로비 통로(급기구2) 및 주차장 출입구(급기구3)를 통해 이루어진다. 이는 실제 덕트시스템을 통한 급기량이 배기량보다 적으므로 이 차이만큼의 풍량이 호텔로비 통로 및 주차장 출입구를 통해 유입되기 때문이다.

배기는 천장부의 배기구(배기구1, 8개)와 기둥 하부에 위치한 배기구(배기구2, 17개)를 통해 이루어진다.

본 지하주차장 환기시스템 시뮬레이션을 수행하기 위해 필요한 경계조건은 크게 입구조건, 출구조건 그리고 벽면조건으로 나눌 수 있다.

급기구를 통한 급기는 수치해석상의 입구 조건에 해당하며 배기구를 통한 배기는 출구조건에 해당한다. 본 시뮬레이션에 사용된 경계조건의 상세를 표 3에 나타내었다.

표 3. 경계조건

Inlet	1	$w_{in}=-4.0\ m/s,\ C=0$
	2	$u_{in}=-0.1\ m/s,\ v_{in}=-0.10\ m/s,\ C=0$
	3	$u_{in}=0.134\ m/s,\ C=0$
Outlet	1	2,700 CMH at each one
	2	6,175 CMH at each one
Wall		$u=v=w=0,\ \frac{\partial k}{\partial x}=\frac{\partial k}{\partial y}=\frac{\partial k}{\partial z}=0$ $\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}=\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}=\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}=0,$ $\frac{\partial C}{\partial x}=\frac{\partial C}{\partial y}=\frac{\partial C}{\partial z}=0$
Jet fan		$u_{in}=-16.71\ m/s,\ w_{in}=-4.48\ m/s$

본 지하주차장 환기시스템 시뮬레이션에서의 버스 배출가스량과 오염물질(CO, NO_x)의 농도는 공회전시와 주차하기 위한 감속운행시로 구분되며, ASHRAE 규격을 참조하여 부여하였다. 버스 운전모드에 따른 배기량 및 배기 오염물질의 농도를 표 4에 나타내었다.[5]

표 4. 엔진가동중인 버스의 운전모드에 따른 배기오염물질의 농도 [단위:ppm]

	stopped (198CMH)	accelerating motion (808CMH)	horizontal motion (587 CMH)	decelerating motion (515 CMH)
CO	215	500	230	130
NO_x	60	850	235	30

5. 수치해석 방법

본 연구에서는 버스전용 지하주차장의 환기특성을 해석하기 위하여 상용 CFD 코드인 STAR-CD[6]를 사용하였다. 대류항을 계산하기 위해서 상류차분법(upwind differencing scheme)을 사용하였고 속도장을 얻기 위하여 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 사용하였다. 수렴판정 조건으로는 입구에서의 운동량으로 정규화한 각 cell에서의 운동량 유수의 합과 연속방정식에서 유수의 합이 모두 10^{-3}이하일 때로 정하였다.

6. 결과 및 토의

6.1 대형버스 4대 운행시

6.1.1 기류분포

본 지하주차장의 대표적인 기류 특성을 알아보기 위해 호흡선 높이(z=1.5 m)에서 수평단면 속도벡터를 그림 3에 나타내었다. 전반적인 기류분포는 젯트팬의 영향과 천장부의 급기구 통한 급기의 영향으로 중앙부와 보행자 이동통로(passage) 부분에서 큰 속도가 존재하며, 그 크기는 대략 0.5 m/s로 감성기류가 형성되어 있다. 또한 기둥 하부에 존재하는 배기구(그림 2에서 배기구2)로 공기가 많이 유출되는 것을 볼 수 있다.

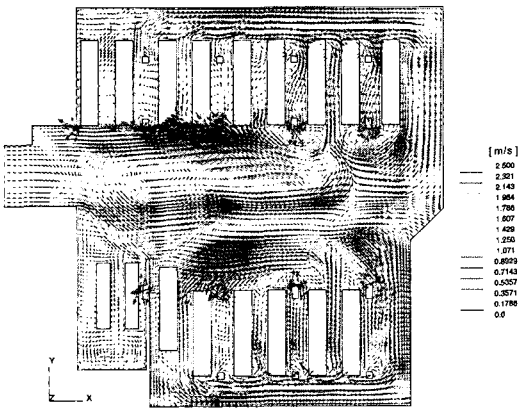

그림 3. 호흡선 높이에서의 유동분포(z=1.5 m)

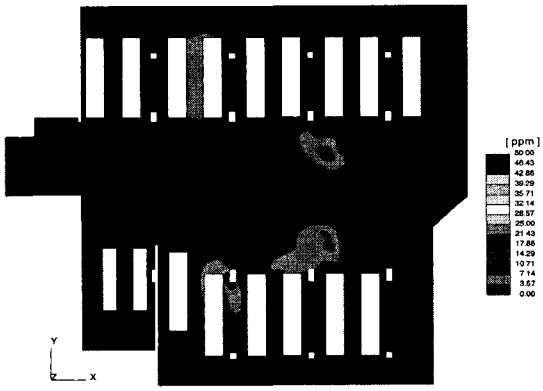

그림 4. 호흡선 높이에서의 CO농도 분포(z=1.5 m)

6.1.2 CO 농도분포

주차장내부에서 발생된 CO 오염물이 주차장 이용객의 호흡에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 그림 4에는 호흡선 높이(z=1.5 m)에서의 CO 농도분포를 나타내었다. 이 높이는 실질적으로 이용객들이 호흡을 하는 위치이므로, 호흡선 높이에서의 CO 농도분포는 반드시 기준치 이하로 유지되어야만 한다. 그림에서 보이듯이 호흡선 높이에서는 수평단면 일부 버스 배기구 지점부근에서 최대 10.7 ppm 정도를 보일 뿐 전체적으로는 3.5 ppm이하의 농도분포를 보이고 있다. 특히 이용객들이 존재할 가능성이 높은 이동통로부근에서는 약 2 ppm 이하의 농도분포를 보이고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 농도분포는 기준치 50 ppm 보다 안전한 수준이다.

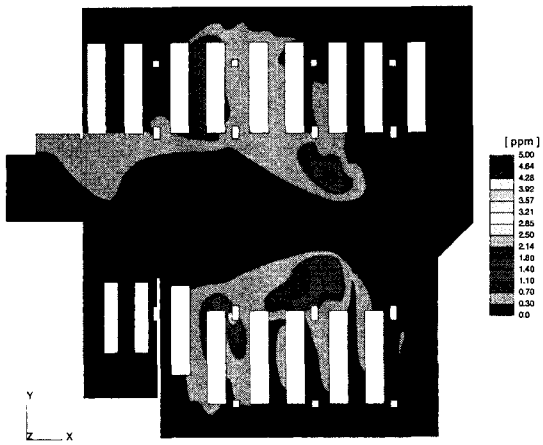

그림 5. 호흡선 높이에서의 NO_x농도 분포(z=1.5 m)

6.1.3 NO_x 농도분포

자동차(특히 디젤기관을 사용하는 버스 등) 배기가스 중 주요 오염원 중 하나인 NO_x 분포를 살펴보기 위하여 그림 5에는 호흡선 높이(z=1.5 m)에서의 NO_x 농도분포를 나타내었다. 그림에서 보이듯이 호흡선 높이에서는 수평단면 일부 버스 배기구 지점부근에서 최대 2.5 ppm 정도를 보일 뿐 전체적으로는 0.3 ppm이하의 농도분포를 보이고 있다. 특히 이용객들이 존재할 가능성이 높은 이동통로부근에서는 약 0.25 ppm 이하의 농도분포를 보이고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 농도분포는 권고치 5 ppm 보다 충분히 안전한 수준이다. 이는 주차장내부에 충분한 급기가 이루어지고 있으며 이러한 급기와 더불어 주차장 내부에 적절히 형성된 기류분포로 인하여 발생된 오염물이 신속히 희석되기 때문으로 사료된다.

6.2 대형버스 15대 공회전시

6.2.1 기류분포

주차장내 15대의 대형버스가 동시에 공회전하고 있을 때, 본 지하1층 주차장 이용자의 호흡선 높이에서의 기류특성을 알아보기 위해 그림 6에는 z=1.5 m에서의 수평단

면 속도벡터를 나타내었다. 전반적인 기류분포는 Fig. 3과 유사하다.

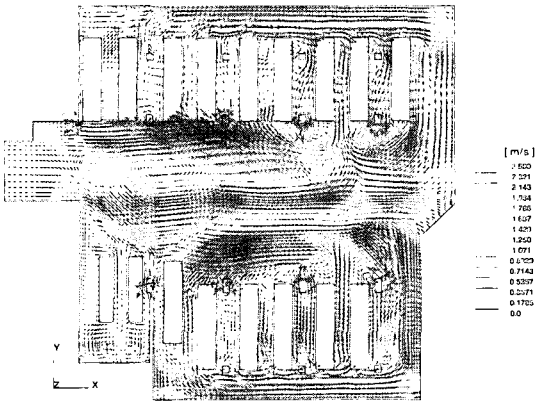

그림 6. 호흡선 높이에서의 유동분포(z=1.5 m)

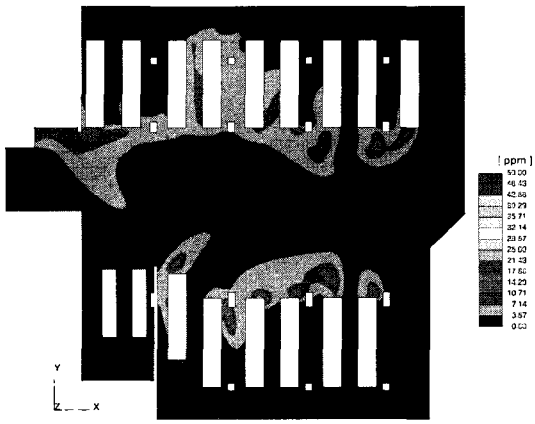

그림 7. 호흡선 높이에서의 CO농도 분포(z=1.5 m)

6.2.2 CO 농도분포

호흡선 높이(z=1.5 m)에서의 CO 농도분포를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보이듯이 호흡선 높이에서는 수평단면 일부 버스 배기구 지점부근에서 최대 21.4 ppm 정도를 보일 뿐 전체적으로는 3.5 ppm이하의 농도분포를 보이고 있다. 특히 이용객들이 존재할 가능성이 높은 이동통로부근에서도 유사한 약 3.2 ppm 이하의 농도분포를 보이고 있는 것을 볼 수 있다.

6.2.3 NO_x 농도분포

자동차 중 특히 버스의 배기가스중 주요 오염원 중 하나인 NO_x의 농도분포를 살펴보기 위하여 호흡선 높이(z=1.5 m)에서의 NO_x 농도분포를 그림 8에 나타내었다.

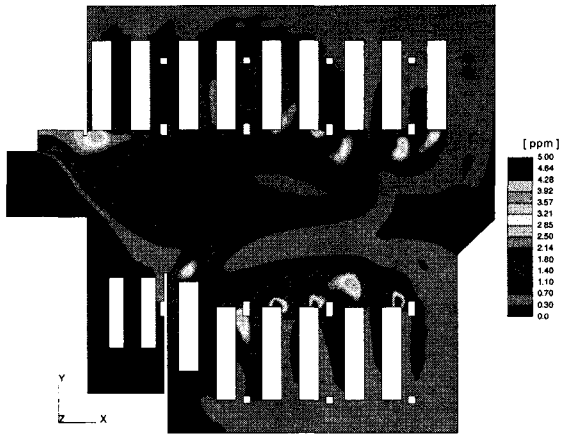

그림 8. 호흡선 높이에서의 NOx농도 분포(z=1.5 m)

그림에서 보듯이 호흡선 높이에서는 수평단면 일부 버스 배기구 지점부근에서 최대 4.5 ppm 정도를 보일 뿐 전체적으로는 1.8 ppm이하의 농도분포를 보이고 있다. 특히 이용객들이 존재할 가능성이 높은 이동통로부근에서는 약 0.7 ppm 이하의 농도분포를 보이고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 농도분포는 권고치 5 ppm보다 충분히 안전한 수준이다.

7. 결 론

본 연구에서는 버스전용 지하주차장 환기시스템의 적정 급·배기풍량, 적정 급·배기구 위치 그리고 젯트팬의 적절한 배치를 검토하기 위해 환기특성 및 오염물질 분포 특성을 해석하였으며, 이를 분석하여 오염물질 국내 허용기준에 적합한지를 판단하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 지하주차장에서 4대의 대형버스가 운행할 때 CO의 전체 평균농도는 약 1.3 ppm이며, 15대의 대형버스가 공회전할 때 CO의 전체 평균농도는 약 2.9 ppm으로 나타나므로 본 주차장의 환기시스템은 오염물질 국내 허용기준안을 통과할 수 있는 것으로 판단된다.
2. 지하주차장의 기류분포는 전반적으로 원활함을 보이고 버스 배기구를 통한 오염물질도 잘 희석되므로 전반적인 환기시스템의 설계와 제트팬의 위치선정은 적절하다고 판단된다.
3. 본 지하주차장에서 4대의 대형버스가 운행할 때 NO_x의 전체 평균농도는 약 0.3 ppm이며, 15대의

대형버스가 공회전할 때 NO_x의 전체 평균농도는 약 0.8 ppm으로 나타나므로 ANSI/ ASHRAE의 권고치를 만족시킴을 알 수 있다.

참고문헌

[1] M. Krarti, and A. M. Ayari, Overview of Existing Regulations for Ventilation Requirements of Enclosed Vehicular Parking Facilities, ASHRAE Transaction, 105(2), pp. 18-26.

[2] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineering, Inc., ANSI/ASHRAE Standard-Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineering, Inc., 1999.

[3] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, DC., 1980.

[4] B. E. Launder, and D. B. Spalding, The numerical Computation of Turbulent Flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp. 269-289, 1974.

[5] SAREK, Improvement on ventilation facilities of underground platform Sungnam(Bundang) bus terminal, final report, SAREK., 2002.

[6] Computational Dynamics Ltd., STAR-CD Version 3.15 User Manual, Computational Dynamics Ltd., 2002.

이 승 철(Seung-Chul Lee) **[정회원]**

- 1993년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2004년 10월 ~ 현재 : 강원대학교 소방방재학부 조교수

<관심분야>
방재설비, 터널(지하공간) 및 대공간 환기 및 화재

승 삼 선(Sam-Sun Seung) **[정회원]**

- 1981년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 (공학사)
- 1983년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1991년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 9월 ~ 현재 : 강원대학교 공학대학 기계·자동차공학부 부교수

<관심분야>
열유체 유동 현상, 효과적인 공학교육 방법론