

분배계통에 따른 지하주차장 환기설비 성능의 예측

김 경 환, 이 재 현[†], 오 명 도^{**}, 김 종 필^{***}

한양대학교 대학원 기계공학과, ^{*}한양대학교 공과대학 기계공학부,
^{**}서울시립대학교 정밀기계공학과, ^{***}홍익대학교 기계공학과

Performance of Ventilation Equipment with Various Air Distribution System in Enclosed Parking Garages

Kyung-Hwan Kim, Jae-Heon Lee[†], Myung-Do Oh^{**}, Jong-Pil Kim^{***}

Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

^{}Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea*

*^{**}Department of Mechanical Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea*

*^{***}Department of Mechanical Engineering, Hongik University, Seoul 121-160, Korea*

(Received February 7, 2001; revision received August 3, 2001)

ABSTRACT: In this paper, the performance of ventilation equipments in enclosed parking garages were investigated for several air distribution systems by numerical method. Air change effectiveness of the non-mixing system was 0.42. It meant that more supply air as much as the design supply air was needed to maintain good indoor air quality. In the high speed nozzle ventilating system which is most expensive one, air change effectiveness was 0.54. Therefore this system satisfied to ventilation design. In the jet fan ventilating systems, air change effectiveness for jet fan ventilating system-A with 18 jet fans and jet fan ventilating system-B with 6 jet fans in circulation mixing arrangement were 0.565 and 0.42 respectively. Jet fan ventilating system-C with 6 jet fans in transport mixing arrangement was 0.535. Jet fan ventilating system-A and jet fan ventilating system-C met the ventilation design. But velocity in jet fan ventilating system-A was over 2.0 m/s which is inappropriate in human comfort. Therefore this system is not proper to ventilation. Jet fan ventilating system-C was the optimum one for enclosed parking garages among 5 systems examined in this paper.

Key words: Enclosed parking garages(지하주차장), Performance of ventilation equipment(환기 설비 성능), Arrival performance of fresh air(신선공기 도달성능), Discharge performance of contaminant air(오염공기 배출성능), Air change efficiency(공기교환효율), Local supply index(국소급가지수)

기 호 설 명

C : 농도 [ppm]

Q : 외기도입량 [m^3/h]

V : 체적 [m^3]

그리스 문자

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-2290-0425; fax: +82-2-2293-5169

E-mail address: jhlee@hanyang.ac.kr

α_s : 국소급가지수 [-]

ϵ_s : 공기교환효율 [-]

- τ_n : 명목시간상수 [sec]
- τ_b : 국소공기연령 [sec]
- $\psi(t)$: 연령빈도함수
- $\Phi(t)$: 누적연령분포

1. 서 론

국내의 건축법에서는 주차장 시행규칙 6조 1항에 “주차장 내부의 일산화탄소 농도는 주차장을 이용하는 차량이 가장 빈번한 시간의 전후 8시간 평균치가 50 ppm 이하로 유지되어야 한다.”고 지하주차장의 환경기준을 제시하고 있으나 이는 국소시간에서의 최대 농도가 무시될 수 있으므로 설계치의 제시라고 보기 어렵다. 반면 일본에서는 HASS(Heating, Air-Conditioning and Sanitary Standard)⁽¹⁾에 의거하여 완전확산인 경우의 필요환기량에 환기효율 지표를 고려하여 실제 설계환기량을 산정하고 있다.

지하주차장의 환기방법으로서 가장 바람직한 것은 차량으로부터의 오염가스를 가장 가까운 거리에서 국소적으로 처리하는 것이다. 그러나 이 방법의 채용에는 주차장 상부에 급기덕트를 설치하고 또한 주차장 하부에 배기덕트나 배기플레임을 설치하여야 하는 등 경제적인 측면에서 현실적이지 못하다. 이러한 이유로 인하여 실제 대부분의 지하주차장 환기에서는 회석환기 개념을 도입한 공간환기(space ventilation)방법이 이용된다. 즉, 배출된 오염가스를 신선공기와 잘 혼합하여 국소적으로 오염물질의 농도가 높지 않도록 희석시킨 후 배출시키는 것이다. 이러한 방법은 지하주차장과 같이 거주자가 상주하지 않는 공간의 환기 방법으로 가장 경제적이다.

공간환기성능이 우수하다는 것은 공간 내에서 오염물질의 절대 농도가 낮게 유지될 수 있는 것을 뜻한다. 따라서 환기성능은 얼마만큼의 신선공기가 유입되는가에 관한 척도인 “외기도입량” 그리고 설치된 환기설비가 도입된 외기를 어느 정도 효과적으로 분배시키면서 오염물을 배출시키는가에 관한 척도인 “환기설비 성능”에 따라 결정된다. 본 연구에서는 소요환기량이 이미 결정되어 있을 때 환기설비 성능에 관하여 검토하였다.

공간환기방법을 도입한 지하주차장의 환기설비는 크게 두 부분으로 나누어진다. 그 하나는 급

기팬과 배기팬으로 이루어지는 급배기계통으로서 주차공간 내에 신선공기를 도입하고 오염된 공기를 배출시키는 부분이다. 이러한 급배기계통의 존재는 기존 환기방법의 종류로 구분될 때 1종 환기방식으로 간주될 수 있다. 나머지 하나는 오염물질의 원활한 회석을 위하여 신선공기를 주차장 곳곳에 분배시키는 분배계통으로서 고속노즐을 이용한 환기설비 혹은 제트팬을 이용한 환기설비 등으로 이루어지는 부분이다.

지하주차장의 환기설비 성능은 상기 두 계통의 성능을 모두 고려하여 논의하여야 한다. 이중 급배기계통에 관련된 환기설비 성능은 급기팬과 배기팬의 기계적 성능과 배치위치에 의하여 평가된다. 한편 분배계통과 관련된 환기설비 성능은 주차장 내부에 설치된 분배장치의 기계적 성능과 배치위치에 의존된다.

지하주차장의 공기이동은 급기→분배→배기의 순서를 거치므로 (급기+분배)의 효율과 (분배+배기)의 효율로써 급배기장치와 분배장치를 포함하는 전체 환기성능을 표현하는 것이 타당하다. 이에 따라 (급기+분배)의 성능을 신선공기 도달 성능(arrival performance of fresh air)⁽²⁻⁴⁾이라 정의하고 이에 관련된 지표는 공기교환효율(air exchange efficiency)과 국소급기지수(local supply index)를 이용한다. 또한 (분배+배기)의 성능을 오염공기 배출성능(discharge performance of contaminant air)⁽²⁻⁴⁾이라 정의하고 이에 관련된 지표는 오염제거효율(contaminant removal effectiveness)과 국소배기지수(local exhaust index)를 이용한다.

최근 국내에서는 주차장의 분배계통 성능을 증대시키기 위해서 고속노즐방식이나 제트팬방식이 많이 사용되고 있다. 그러나 대부분의 급배기계통과 분배계통을 포함하는 환기시스템은 환기설비 성능을 고려하지 않고 설계되어지고 있으며, 이런 이유로 기본설계시 환기설비의 적정용량이나 배치위치 역시 면밀히 검토되지 않는 경우가 많은 실정이다.

본 연구에서는 공간환기방법이 도입된 실제 지하주차장에서 여러 가지 분배계통 설계방식에 따른 공기교환효율을 비교하고 효율적인 분배계통의 환기시스템 설계방안을 제시하고자 한다. 본 연구에서 제외된 오염공기 배출성능에 관하여서는 이어지는 연구에서 논의할 것이다.

2. 지하주차장의 신선공기 도달성능

지하주차장 공간 내에서 환기설비 성능 중 신선공기 도달성능에 대한 지표인 공간 평균 공기교환효율(space averaged air change efficiency, 이하 "공기교환효율"이라고 칭함) ϵ_s 는 다음 식으로부터 구하여질 수 있다.

$$\epsilon_s = \frac{\tau_n}{2 \tau_p} \quad (1)$$

여기서, τ_n 및 τ_p 는 각각 명목시간상수(nominal time constant) 및 공간 평균공기연령(space averaged air age)이다.

명목시간상수 τ_n 는 급기구에서의 외기도입량이 주차장공간을 채우는 데 소요되는 시간으로서 환기 횟수의 역수이며 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\tau_n = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

여기서, Q 는 해당 주차장의 외기도입량이며 V 는 주차공간의 체적이다.

공기교환효율은 설계자가 외기도입량을 결정하여 도입된 외기가 환기설비(분배계통)에 의해 얼마나 유용하게 사용되는가에 관한 상대적인 척도이며 주차장 내의 오염농도에 관한 절대적인 척도는 아니다. 즉 공기교환효율이 우수하다는 것은 주차장의 오염농도가 낮음을 의미하지 않는다. 주차장의 절대적인 오염농도는 도입외기량에 의존한다.

식(1)의 정의에 의하면 공기교환효율은 신선공기가 오염공기를 몰아내는 치환환기(displacement ventilation)인 경우에 1의 값을 갖는다. 그러나 오염공기를 신선공기와 혼합시켜 배출시키는 대부분 실제 주차장의 희석 환기방식 하에서는 완전혼합인 경우에 공기교환효율은 0.5의 값을 갖는다. 그러므로 공기교환효율이 0.5 이상이면 평균공기연령이 명목시간상수보다 작아서 전체적으로 주차장공간에 신선공기가 환기설비 설계시의 설계자의 추천시간(명목시간상수)보다 빠르게 분배될 수 있다는 의미이며, 0.5 이하인 경우는 신

선공기가 공간으로 설계시의 의도만큼 분배되지 못함을 의미한다.

공간 평균공기연령 τ_p 은 국소공기연령(local air age) τ_p 를 평균하여 구할 수 있으며 다음 식과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\overline{\tau_p} = \int \frac{\tau_p dV}{V} \quad (3)$$

국소공기연령은 급기구에서 공급된 외기가 여러 경로를 통하여 해당 국소위치에까지 도달하는데 걸리는 평균 시간이다. 국소공기연령의 물리적인 정의에 의하면 국소공기연령 τ_p 는 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_p &= \int_0^{\infty} t \psi(t) dt \\ &= \int_0^{\infty} [1 - \Phi(t)] dt \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\psi(t)$ 및 $\Phi(t)$ 는 각각 연령빈도함수(age frequency distribution) 및 누적연령분포(cumulative age distribution)이다.

국소공기연령을 결정하는 방법으로는 수치해석적 방법을 이용하여 주차장의 국소환기효율⁽⁵⁾을 산정하는 방법과 SF6 추적가스⁽⁶⁾를 이용하는 방법이 있으며 현재까지도 많은 연구⁽⁷⁻⁹⁾가 수행되어지고 있다. 추적가스실험은 급기와 배기가 이루어지고 있는 주차장공간에서 행하여지며 추적가스가 주차장 내부의 기류를 따라 이동한다고 가정한다. 이 실험방법 중 하나는 추적가스를 급구에 주입한 후 주차장 내부 위치에서의 추적가스의 농도 상승을 측정하는 채승법(step-up method)이고 다른 하나는 공간 내에 추적가스를 발생시켜 주차공간 내의 추적가스농도를 균일하게 유지시키고 있는 어느 시점에서 추적가스의 발생을 중지할 때 주차장 내부 각 위치에서의 추적가스 농도 하강을 측정하는 채강법(step-down method)이다. 이 방법에서는 급기 및 배기가 일정하게 유지되는 주차공간에서 추적가스를 발생시켜 공간 전체의 초기 추적가스농도를 일정하게 유지시킨다.

한편, 식(4)의 $[1 - \Phi(t)]$ 는 채강법에 의한 추

적가스 실험에서의 농도비를 이용하면 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$1 - \phi(t) = \frac{C_p(t)}{C_0} \quad (5)$$

여기서, C_0 는 초기 농도를 뜻하며 $C_p(t)$ 는 추적 가스발생을 중지시킨 후 시간 t 일 때 임의의 점 P 에서 추적가스의 농도이다.

식(4) 및 식(5)에 의해 국소공기연령은 추적가스의 초기 농도 C_0 에 대한 임의의 점 P 에서 시간에 따른 추적가스농도 $C_p(t)$ 의 비를 시간적분하여 구해질 수 있으며 아래 식과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\tau_p = \int_0^\infty \frac{C_p(t)}{C_0} dt \quad (6)$$

한편 국소공기연령을 이용하면 주차장공간의 각 위치에서 국소급기지수(local supply index), α_s 를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\alpha_s = \frac{\tau_n}{2\tau_p} \quad (7)$$

3. 모델 주차장

본 연구에서는 서울 동대문구 소재 M빌딩의 지하주차장을 연구대상으로 선정하였으며 그 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 주차장의 바닥면적 및 층고는 각각 1,340 m² 및 3.2 m이다. 자동차의 출입은 방화셔터(fire-proof shutter)를 통하여 이

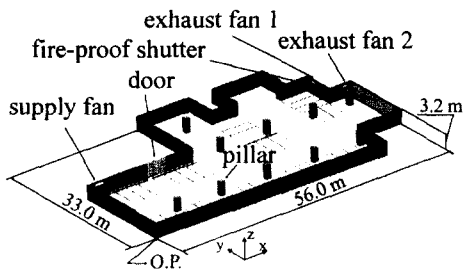


Fig. 1 Schematic diagram of model enclosed parking garages in present investigation.

루어진다. 주차장은 급배기계통으로서 20,000 m³/h 용량의 급기팬(supply fan) 1대와 10,000 m³/h 용량의 배기팬(exhaust fan) 2대가 설치되어 있으며 분배계통으로서 직경 3 cm, 출구속도 32.5 m/s 인 34개의 고속노즐이 설치되어 있다. 이에 따라 주차장에 공급되는 신선공기도입량은 20,000 m³/h로서 환기횟수는 5.1회/h이다. 이러한 환기횟수는 도심에 위치하는 사무용 건물의 지하주차장에서 추천되는 5~7회/h⁽¹⁰⁻¹¹⁾의 하한에 가까운 값으로서 번잡한 백화점의 지하주차장에서 요구되는 환기횟수로는 부족하다고 판단된다.

이후 설명의 편의를 위해 원점(O.P.)를 Fig. 1의 왼쪽 아래 지점에 정하고, 원점을 기준으로 방화셔터 방향을 x 축, 급기구 방향을 y 축, 그리고 높이 방향을 z 축으로 정하였다.

4. 환기시스템의 종류

본 모델주차장에서 공기분배방식에 따른 설비 성능을 비교 연구하기 위하여 특별한 분배계통이 설치되지 않고 급기팬과 배기팬만 사용하는 무혼합 환기시스템과 동일한 급배기계통을 가지면서 분배계통의 종류가 다른 고속노즐 환기시스템, 제트팬 환기시스템 A, B, C 등 모두 5개의 환기시스템을 고려하였다.

고속노즐 환기시스템은 연구대상 지하주차장에 설치된 34개의 작은 노즐에서 분사되는 고속의 공기를 이용해서 신선공기를 주차장 전체에 이송한 후 오염물과 혼합하여 배출되도록 설계되어 있으며, 이를 Fig. 2(a)에 나타내었다. 이때 노즐의 설치위치와 방향은 $x-y$ 평면에서 Fig. 2(a)에 나타낸 바와 같으며 2.7 m 높이에서 그 경사각은 35°이다. 이때 경사각은 $x-y$ 평면대비 하향 각도이다.

제트팬 환기시스템-A의 경우에는 기존에 설치된 고속노즐 환기시스템과 동일한 설치비를 기준하여 선정된 18대의 제트팬(노즐직경 17.5 cm, 출구속도 17.5 m/s)을 배치하였으며 $x-y$ 평면에서의 위치 및 방위각은 Fig. 2(b)에 보이는 바와 같다. 이때 방위각은 $x-y$ 평면에서 x 축 혹은 y 축으로부터의 회전각도를 뜻한다. 부가적으로 이 배치에서 제트팬 설치 높이는 2.5 m이며 경사각은 15°이다.

제트팬 환기시스템-B는 제트팬 환기시스템-A

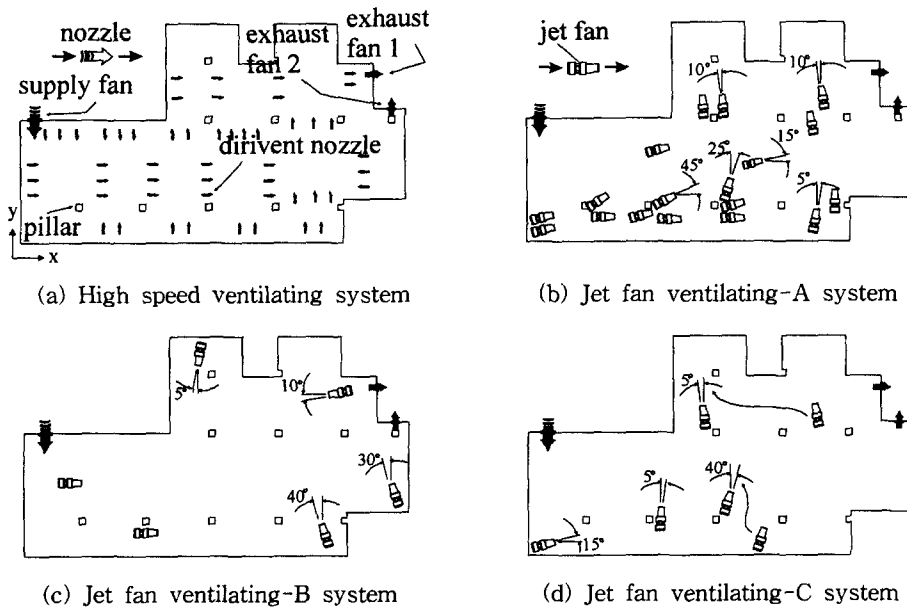


Fig. 2 Locations of dirivent nozzle and jet fan in various ventilating systems (A, B, C).

의 제트팬 수 대비 1/3 수준인 6대의 제트팬을 배치하여 주차장 공간에서 순환기류가 형성되도록 하였다. x-y 평면에서의 위치와 방위각은 Fig. 2(c)에 보이는 바와 같으며 설치 높이 및 경사각은 시스템 A와 동일하다. 그림에 보이는 바와 같이 이 시스템에서 제트팬의 위치는 급기구에서 유입된 공기가 반시계 방향으로 순환하면서 배기구로 배출될 수 있도록 배치된 것이다.

제트팬 환기시스템-C는 공간 전체에 이송된 신선공기가 배기가스를 이끌고 배기구로 배출될 수 있도록 6대의 제트팬을 배치시키는 이송혼합 방식 개념을 이용하였다. 즉 하단의 4개 제트팬은 급기구에서 유입된 공기가 주차장에서 이송되도록 배치하였고 상단의 2개 제트팬은 이송된 공기가 기류정체 영역으로 분배되도록 배치하였다. 이 배치에서 제트팬 위치와 방위각은 Fig. 2(d)에 보이는 바와 같으며 설치 높이 및 경사각은 시스템 A와 동일하다.

5. 신선공기 도달성능의 예측

5.1 국소공기연령 산정 이론

본 연구에서는 체강법을 선정하여 주차공간에서의 국소공기연령을 이론적으로 예측하고자 하였다.

일반적으로 위치와 시간에 따른 추적가스의 농도를 구하기 위한 비정상상태의 농도방정식, 초기조건, 최종조건 및 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i C) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\frac{\mu}{\sigma_i} + \frac{\mu_t}{\sigma_i} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right\} \tag{8}$$

$$C = C_0 ; \text{ in all space, at } t = 0 \tag{9}$$

$$C = 0 ; \text{ in all space, at } t = \infty \tag{10}$$

$$C = 0 ; \text{ in inlet, at } t > 0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial C}{\partial x_i} = 0 ; \text{ in outlet, at } t > 0 \tag{12}$$

식(8)의 농도방정식을 시간에 대해 0에서 무한대까지 적분한 뒤 초기 및 최종 조건을 이용하여 정리하면 다음 식과 같이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i \left(\int_0^\infty \frac{C}{C_0} dt \right) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\mu}{\sigma_i} + \frac{\mu_t}{\sigma_i} \right) \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\int_0^\infty \frac{C}{C_0} dt \right) \right] = 1 \tag{13}$$

한편, 동일한 주차공간에서 급기구를 통해 신

선공기가 유입되고 있으며 단위체적당 S_c 의 추적 가스가 일정하게 발생되면서 이 가스가 배기구로 유출되고 있는 정상 상태를 고려하자. 이때 주차 공간 내의 농도분포를 구하기 위한 정상 상태의 농도방정식과 경계조건은 아래 식과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i C) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\frac{\mu}{\sigma_i} + \frac{\mu_t}{\sigma_i} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right\} + S_c \quad (14)$$

$$C = 0 ; \text{ in inlet} \quad (15)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x_i} = 0 ; \text{ in outlet} \quad (16)$$

$$S_c = \text{constant} ; \text{ in all space} \quad (17)$$

S_c 가 일정하므로 식(14)를 정리하면 아래와 같이 변형될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i \frac{\rho C}{S_c} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\mu}{\sigma_i} + \frac{\mu_t}{\sigma_i} \right) \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\rho C}{S_c} \right) \right] = 1 \quad (18)$$

비정상상태 농도방정식 식(13)과 정상 상태 농

도방정식 식(18)은 동일한 형태이다. 또한 경계조건 식(11) 및 식(12)은 식(15) 및 식(16)과 동일하다. 따라서 식(18)에서 $(\rho C/S_c)$ 의 분포를 구하는 것은 식(13)에서 $(\int_0^\infty C/C_0 dt)$ 의 공간분포, 즉 국소공기연령의 공간분포를 구하는 것과 동일하게 된다.

5.2 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서는 3차원 주차장모델에서 신선공기 도달성능을 예측하기 위하여 식(18)로 표현되는 정상 상태 농도방정식을 풀이하였다. 농도방정식에는 주차장 내부의 국소 공기속도가 표현되므로 공기유동에 관한 연속방정식, 운동량방정식, 난류 운동에너지방정식, 그리고 난류운동량 소멸방정식이 함께 풀이되었다. Table 1에는 이들 지배방정식을 나열하였다. 지배방정식과 함께 정의되는 경계조건은 급기구와 배기구에서 정의될 수 있으며 상세한 내용은 Table 2에 나열하였다. 표에서 u, v 및 w 는 각각 x, y 및 z 방향의 속도이다.

Table 1 Governing equations and model coefficients

Concentration equation ;	
	$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_i \frac{\rho C}{S_c} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{1}{\rho} \left(\frac{\mu}{\sigma_i} + \frac{\mu_t}{\sigma_i} \right) \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\rho C}{S_c} \right) \right\} + 1$
Continuity equation ;	
	$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$
Momentum equation ;	
	$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right\} + S u_i$
Turbulent kinetic energy equation ;	
	$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} + G_k - \rho \epsilon$
Dissipation rate equation of Turbulent kinetic energy ;	
	$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right\} + G_k C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$
where,	
	$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \mu_t = \frac{c_\mu \rho k^2}{\epsilon}, G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i},$
	$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 0.9, \sigma_l = 1.0, \sigma_t = 1.0$

Table 2 Boundary conditions and trace gas source in enclosed parking garages

Inlet (supply fan)	$v = -4.0 \text{ m/s}, C = 0, k = 1.5(0.1v)^2, \epsilon = C_\mu k^{1.5}/(0.5D_h)$
Outlet 1 (exhaust fan 1)	$u = 3.3 \text{ m/s}, \frac{\partial k}{\partial x} = 0, \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0, \frac{\partial C}{\partial x} = 0$
Outlet 2 (exhaust fan 2)	$v = 3.3 \text{ m/s}, \frac{\partial k}{\partial y} = 0, \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = 0, \frac{\partial C}{\partial y} = 0$
Wall	$u = v = w = 0, \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial z} = 0, \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = 0, \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial C}{\partial z} = 0$
Whole space	$S_c = 1 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$

5.3 수치해석방법

본 연구에서는 Table 1에 나열된 지배방정식을 풀이하기 위하여 상용 프로그램인 PHOENICS를 이용하였다. 이 프로그램은 완전암시기법을 사용한 유한체적법(finite volume method)코드로서, 속도 등의 벡터량과 압력, 농도 등의 스칼라량의 존재위치가 서로 다른 엇갈린 격자계(staggered grid system)를 사용한다. 또한 운동량방정식의 압력장을 처리하기 위해서 SIMPLEST를 이용한다. 본 연구의 주차공간은 모두 400,000개의 제어체적으로 구분되어 해석되었다.

반복계산시 종속변수들의 수렴정도를 점검하기 위하여 아래에 정의된 잉여치(residual), R 값이 조사되었으며, 종속변수에 대하여 잉여치값이 10^{-3} 이하에 도달하면 수렴된 것으로 간주하였다.

$$R = \sum_{\text{all domain}} | \sum a_{nb} + b - a_p \phi_p | \quad (19)$$

여기서 ϕ 는 본 연구에서의 종속변수들, a 는 이

산화방정식의 계수, b 는 생성항, 그리고 하첨자 p, nb 는 각각 계산제어체적과 인접제어체적의 격자점을 뜻한다.

실제 계산에서는 RAM 용량 256 Mbyte, Pentium 300 MHz P/C에서 수렴조건을 만족하기 위하여 약 4,000회의 반복 계산이 필요하였다.

6. 기류속도 측정실험에 의한 타당성 검토

수치계산의 타당성 검증을 위하여 모델주차장 내부의 기류속도를 측정하였다. 기류속도 측정장치의 구성은 Fig. 3에 보이는 바와 같이 자동이송장치(automatic traversing device)부 및 자료획득(data receiving device)부로 구성된다. 자동이송장치부는 열선유속계(hot wire anemometer), 측정장치이송용 직류모터(DC motor), 그리고 획득자료 전송케이블(data transmission cable)로 이루어져 있다. 자료획득부는 제어박스과 PC로 이루어져 있다. 기류속도 측정실험에서는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 원점(O.P.)으로부터 x 방향 32.5 m 지점의 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m 높이에서 1.28

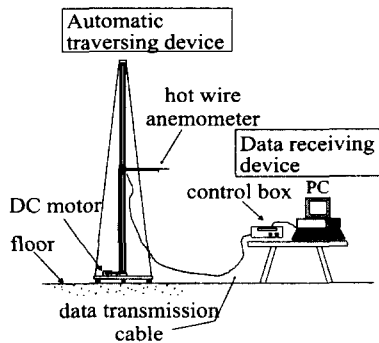


Fig. 3 Experimental apparatus.

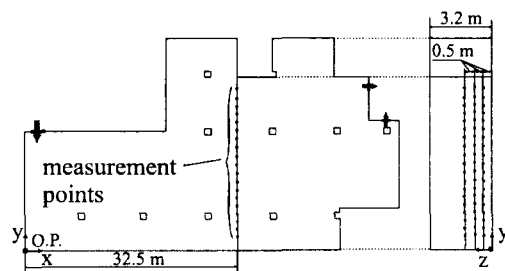


Fig. 4 Velocity measuring points in enclosed parking garages.

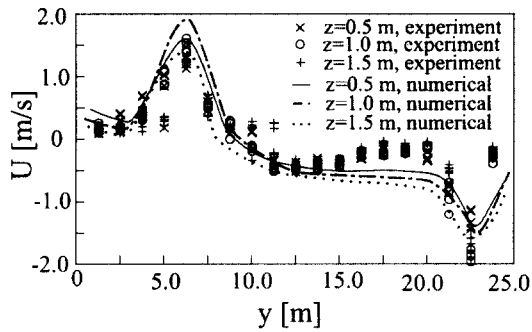


Fig. 5 Velocity profiles in the cross section.

m 간격으로 y축에 평행하게 모두 57개 위치에서의 u 속도를 2초 간격으로 10회 반복 측정하였다.

제트팬 환기시스템-B에 대한 x 방향 속도 U 의 실험결과와 수치해석결과를 Fig. 5에 나타내었다. 각 높이에서 속도는 정성적으로 비교적 잘 일치하며 정량적으로도 10% 이내의 오차를 가진다. 따라서 본 연구의 수치적 방법은 공학적인 응용 측면에서 타당하다고 사료된다.

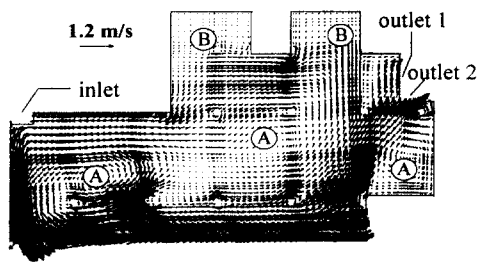
7. 결과 및 고찰

무혼합 환기시스템, 고속노즐 환기시스템과 3 종류의 제트팬 환기시스템(A, B, C)에 대해 바닥부터 1.5m 높이의 호흡영역에서 속도분포, 국소급기지수분포, 그리고 공기교환효율을 고찰하였다.

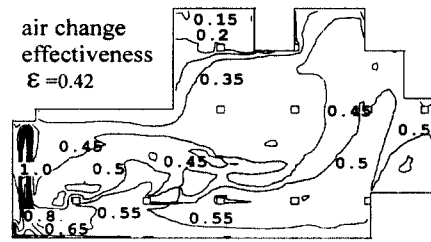
7.1 무혼합 환기시스템

무혼합 환기시스템의 경우, 호흡영역에서의 속도분포와 국소급기지수분포를 Fig. 6의 (a), (b)에 나타내었다. Fig. 6(a)의 속도분포에서 보면 왼쪽 상부에 위치한 급기구로부터 유입된 신선공기는 그림의 아래쪽 벽을 따라 이동하여 오른쪽 상부에 위치한 배기구방향으로 배출되며 ㉠로 표시된 재순환유동영역을 형성하고 있다. 더욱이 위쪽 ㉡로 표시된 영역에서는 정체영역이 나타난다.

국소급기지수의 분포를 나타낸 Fig. 6(b)를 보면 급기구로부터 아래쪽 벽, 그리고 배기구로 이어지는 경로를 따른 영역은 신선공기가 원활히 공급되어 국소급기지수가 0.5 이상으로 양호하게

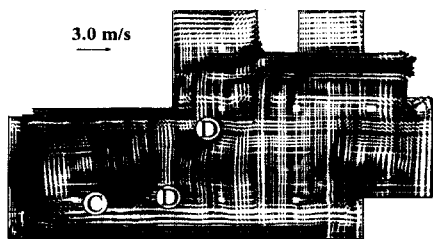


(a) Distribution of velocity vectors

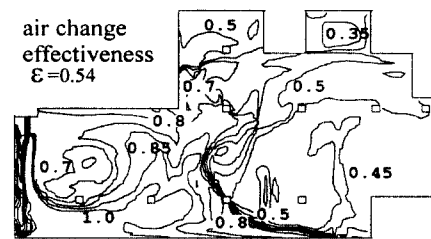


(b) Distribution of local supply index

Fig. 6 Distribution of velocity and local supply index in the case of non-mixing ventilating system ($z=1.5$ m).



(a) Distribution of velocity vectors



(b) Distribution of local supply index

Fig. 7 Distribution of velocity and local supply index in the case of high speed ventilating system ($z=1.5$ m).

나지만 재순환이 발생하는 영역과 정체영역에서는 최저 국소급기지수 0.15까지 낮게 나타난다. 한편 공간 전체의 공기교환효율은 0.42로서 도입되는 신선공기의 효율적인 이용을 위하여서는 공간 내의 공기혼합을 촉진시키는 방안을 고려하여야 할 것이다.

7.2 고속노즐 환기시스템

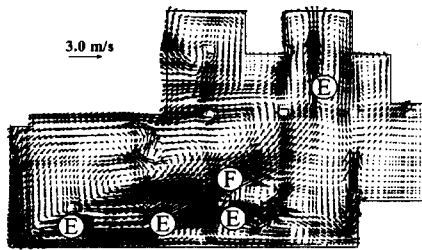
고속노즐 환기시스템의 경우, 호흡영역에서의 속도분포 및 국소급기지수분포를 각각 Fig. 7의 (a) 및 (b)에 나타내었다. Fig. 7(a)를 보면 공급된 신선공기는 그림의 왼쪽과 아래쪽 벽의 천장부근에 설치된 다수의 고속노즐에 의해 ㉔로 표시된 영역에서부터 공간의 중앙부로 이동된 후 ㉕영역부근을 거쳐서 배기구로 배출된다. 54개의 노즐이 공간 전체에 분포하기 때문에 공간 내에 다수의 소형 재순환 유동영역이 형성된다. Fig. 7(b)의 국소급기지수분포는 무혼합 환기시스템의 경우와 달리 주차장의 왼쪽 대부분 영역에서 0.5

이상으로 분포되었고 최소 국소급기지수도 0.35로서 비교적 양호한 결과를 보였다. 한편 전체 공간의 공기교환효율은 0.54로서 주차장 공간 내에 도입된 신선공기가 비교적 효율적으로 활용되고 있는 것으로 판단된다.

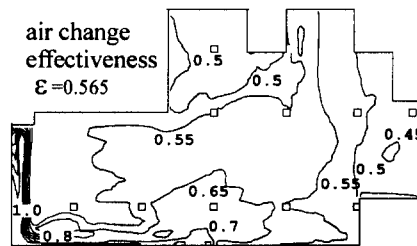
7.3 제트팬 환기시스템

제트팬 환기시스템-A, -B 및 -C의 경우, 호흡영역에서의 속도분포와 국소급기지수분포를 각각 Fig. 8, Fig. 9 및 Fig. 10에 나타내었다.

제트팬 환기시스템-A인 경우에 Fig. 8(a)를 보면 기류속도는 18대의 제트팬에 의해서 의해서 속도 2.0 m/s 이상의 강한 기류가 ㉖로 표시된 여러 영역에서 나타났다. 제트팬이 급기덕트로부터 공급된 신선공기를 공간의 왼쪽 아래의 영역에서부터 전체 공간에 이동시킬 수 있도록 배치되었으므로 기류가 주차장의 중앙부근 ㉗에서 크게 발달한다. Fig. 8(b)에서 보면 호흡영역 국소급기지수분포는 주차장의 대부분 영역이 0.5 이상이

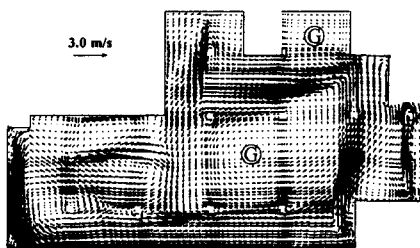


(a) Distribution of velocity vectors

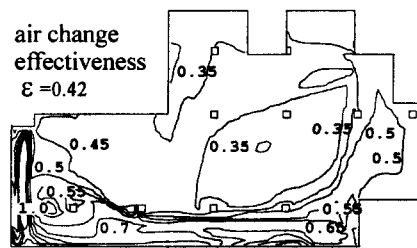


(b) Distribution of local supply index

Fig. 8 Distribution of velocity and local supply index in the case of jet fan ventilating system-A (z=1.5 m).



(a) Distribution of velocity vectors



(b) Distribution of local supply index

Fig. 9 Distribution of velocity and local supply index in the case of jet fan ventilating system-B (z=1.5 m).

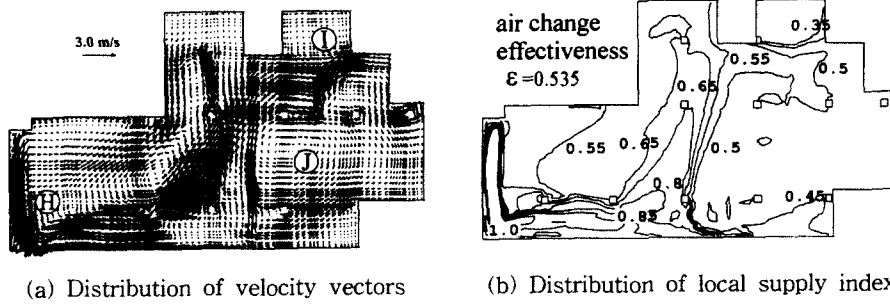


Fig. 10 Distribution of velocity and local supply index in the case of jet fan ventilating system-C ($z=1.5$ m).

고 최하 0.45로서 공간 전체에 걸쳐 국소급기 지수가 높게 나타났다. 전체 공간의 공기교환효율은 0.565으로서 신선공기의 분배가 비교적 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 이 경우에 공기교환효율은 높지만 2.0 m/s 이상의 기류속도는 재실자에게 불쾌감을 주므로 제트팬 대수의 과다설계로 판단할 수 있다.

제트팬 환기시스템-B에서는 공간 내에서의 공기순환을 주목적으로 6대의 제트팬을 배치한 결과 공간에 커다란 순환기류가 형성됨을 Fig. 9(a)의 속도분포에서 볼 수 있다. 그러나 순환영역 외의 영역 ㉔에서는 정체영역이 형성됨을 볼 수 있다. 이 경우의 호흡영역 국소급기 지수분포를 Fig. 9(b)에서 보면 급기구 주변에서부터 아래쪽 벽을 따라 배기구로 이르는 영역에서만 0.5 이상의 국소급기 지수분포가 나타났고 그밖의 영역에서 0.35~0.45로 나타났다. 이러한 분포는 무혼합 환기시스템에서와 비교할 때, 비교적 평균화된 국소급기 지수분포로서 내부에서 순환되는 기류에 의해서 어느 정도의 혼합이 수행되었기 때문으로 판단된다. 이때 전체 공간의 공기교환효율은 0.42이었다. 무혼합 환기시스템의 경우와 비교되는 이렇게 낮은 공기교환효율은 순환유동에 의해 주차장 내부 공기의 잔류시간이 길어지기 때문으로 판단된다. 따라서 이러한 제트팬 배치방식은 향상된 신선공기 도달효과를 위하여 개선되어야 할 것으로 사료된다.

이송혼합개념을 도입한 제트팬 환기시스템-C 경우의 기류분포 Fig. 10(a)를 보면 신선공기는 왼쪽 아래 영역 ㉔에서부터 공간의 중앙으로 이송되고 위쪽의 후미진 영역 ㉑부분을 거친 뒤 배기구로 배출된다. 기류의 속도는 평균 0.6 m/s 이

하로 나타났다. 한편 공간의 오른쪽 영역 ㉑에는 신선공기가 미치지 못한 재순환영역이 발생하였다. Fig. 10(b)에서 호흡영역 국소급기 지수분포를 보면 주차장 왼쪽의 절반 가량의 영역에서 국소급기 지수가 0.5 이상으로 나타났으며, 최소 국소급기 지수 영역 ㉑부분에서 0.35로서 공간 위쪽의 일부 영역에서만 낮게 나타남을 알 수 있다. 이러한 이송혼합개념에 의한 제트팬 배치에 따른 공간 전체의 공기교환효율은 0.535로서 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구에서 검토된 환기시스템 중에서 고속노즐 환기시스템의 설치경비의 약 1/3 비용으로 설치 가능하면서도 공기교환효율이 적절한 이송혼합방식으로 배치된 제트팬 환기시스템-C가 경제적인 측면과 신선공기 도달성능 측면에서 가장 적합한 시스템으로 판단된다.

8. 결 론

본 연구에서는 서울도심소재 M빌딩의 지하주차장에 다섯 가지 환기시스템을 고려하였을 때, 신선공기 도달성능을 여러 가지의 경우에 논의하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 무혼합 환기시스템은 호흡역에서 국소급기 지수가 최하 0.15까지 나타났으며 공기교환효율은 0.42로서 도입되는 신선공기의 효율적인 이용을 위하여서는 공간 내의 공기효율을 촉진시키는 방안을 고려하여야 할 것이다.

(2) 고속노즐 환기시스템의 국소급기 지수분포는 주차장의 공간 대부분 영역에서 0.5 이상으로 분포되었다. 또한 공기교환효율은 0.54로서 주차장 공간 내에 도입된 신선공기가 효율적으로 활용되

는 것으로 판단된다.

(3) 고속노즐 환기시스템과 동일한 비용으로 산정된 제트팬 18대를 사용한 제트팬 환기시스템-A의 경우에는 공기교환효율이 0.565로서 신선공기의 분배가 효과적인 것으로 보인다. 그러나 호흡영역에서의 기류속도가 2.0 m/s 이상으로 형성됨을 보아 제트팬 대수의 과다설계로 판단할 수 있다.

(4) 공간 내에서의 공기순환을 주목적으로 6대의 제트팬을 배치한 제트팬 환기시스템-B의 공기교환효율은 0.42로 나타났다. 따라서 이러한 제트팬 배치방식은 신선공기 도달효과의 향상을 위하여 좀더 개선되어야 한다.

(5) 6대의 제트팬을 이송혼합개념으로 배치한 제트팬 환기시스템-C의 경우에 공기교환효율은 0.535로서 신선공기 도달성능이 우수하였다. 또한 호흡영역에서 기류속도 역시 0.6 m/s 이하로 유지된다. 그러므로 고속노즐 환기시스템 설치경비의 약 1/3 경비로써 효과적인 환기성능을 구현할 수 있는 제트팬 환기시스템-C가 가장 실용적인 분배계통으로 추천된다.

후 기

이 논문은 (1998)한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- HASS, 1997, Heating, Air-Condition and Sanitary Standard 102, The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan.
- Sandberg, M. and Etheridge, D., 1996, Building Ventilation Theory and Measurement, John Wiley & Sons Inc, New York, pp. 241-280.
- ASHRAE Handbook, 1997, Ventilation and Infiltration, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia.
- Offermann, F. J., 1999, ASHRAE Standard 129 Standard method of measuring air change effectiveness: Initial test result, 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 1, pp. 206-211.
- Yoshino, H., 1999, Study on ventilation performance and efficiency in underground car parks (part 4) computational analysis on distribution of flow and concentration, Proceedings, SHASE, pp. 1165-1168.
- Imai, T., 1999, Study on ventilation performance and efficiency in underground car parks (part 3) field measurement with age of air, Proceedings, SHASE, pp. 1161-1164.
- Chow, W. K., 1995, On ventilation design for underground car parks, Tunnelling and underground space technology, Vol. 10, No. 2, pp. 225-245.
- Han, H. T., 1999, On the definition of ventilation effectiveness, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 28, No. 1, pp. 38-47.
- Sandberg, M. 1983, Ventilation efficiency as a guide to design, ASHRAE Trans., Vol. 89, pp. 455-479.
- Ayari, A. and Krarti, M., 1999, Analysis of the ventilation requirements in parking garages, 8th Int. Conf. on Indoor Air quality and Climate, Vol. 1, pp. 361-366.
- Chan, M. Y. and Burnett, J., 1999, A review of ventilation standards for underground car parks in Hong Kong, 8th Int. Conf. on Indoor Air quality and Climate, Vol. 1, pp. 224-229.