

대와류모사를 이용한 연기이동의 연구

I. 제연방식과 배기풍량

박 외 철

부경대학교 안전공학과

(2003. 3. 31. 접수 / 2003. 5. 26. 채택)

A Study on Smoke Movement by Using Large Eddy Simulation

I. Smoke Control Systems and Extraction Flowrate

Woe-Chul Park

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received March 31, 20031 / Accepted May 26, 2003)

Abstract : To evaluate the smoke control systems, the large eddy simulation turbulence model based Fire Dynamics Simulator was applied to a 2 m x 2 m x 2.4 m room with an opening. The smoke removal rate was investigated for three different smoke control systems: ventilation, extraction and pressurization. When the opening was closed, the smoke removal rates of the smoke control systems were almost the same as expected. The pressurization system showed a lower smoke removal rate compared with the other two smoke control systems for the room with the opening, and hence the pressurization system might not be efficient for a place with large openings. It was shown that the lower extraction flowrate is, the longer time the ventilation system requires to remove smoke. From these results, the ventilation system is recommended for subway stations where several large openings exist.

Key Words : smoke control systems, opening, ventilation system, pressurization system, extraction system, extraction flowrate, large eddy simulation

기 호

- g : 중력가속도, 9.81 m/s²
- N_p : 실내의 입자 개수
- p : 압력
- Q : 제연설비의 풍량
- t : 시간
- u : 속도
- ρ : 밀도
- τ : 전단응력

1. 서 론

매년 많은 사람들이 화재로 발생한 연기에 질식

하여 사망하고 있다. 화재로 인한 인명손실을 줄이기 위해서는 화재의 조기탐지와 초기진화뿐만 아니라 난연성 불연성 자재와 유독성 가스를 적게 발생하는 재질의 사용과 함께 발생한 연기를 신속하게 제거해야 한다. 2003년 2월18일 대구 지하철 중앙로역 화재참사는 이를 잘 보여주고 있다.

제연설비에는 제1종 기계제연방식인 급배기방식(ventilation system)과 제2종 기계제연방식인 급기가압방식(pressurization system), 그리고 제3종 기계제연방식인 배기방식 또는 흡인방식(extraction system)이 있다. 급배기방식은 실내에 외부의 공기를 공급하여 연기농도를 희석하고, 외부보다 높은 압력을 유지하여 연기의 유입을 방지하면서 실내의 연기를 배출하는 방식이다. 급기가압방식은 실내 압력이 주위 압력보다 높게 유지되도록 급기함으로써 연기의 유입을 방지하는데 사용되지만, 화재참사가 발생한 대구 지하철 중앙로역에는 급기가압방식(개구부가

[†]To whom correspondence should be addressed.
wcpark@pknu.ac.kr

있는 경우에는 가압되지 않으므로 단순한 급기방식이며, 이하 급기방식으로 부름)의 제연설비가 설치되어 있다. 또 배기방식(흡인방식)은 실내의 연기를 제거하는데 효과적이거나 새로운 공기가 유입될 수 있는 개구부가 작으면 충분한 제연효과를 기대할 수 없다. 한편, 급기 또는 배기 풍량도 연기를 배출하는데 중요하며, 연기를 신속하게 배출하기 위해서는 충분한 풍량이 필요하다. 제연설비에 관한 일반적인 사항은 추병길과 박찬국¹⁾에 기술되어 있다.

실내에 유입된 연기를 제거하기 위한 배기방식에 관한 제연성능 비교에 대한 연구는 거의 없으나, 터널화재의 연구는 국내외에서 다수 수행되었다. 이성룡 등²⁾은 축소모형 터널 내 0.7~2.5 kW의 휘발유 화재에 대한 실험적 연구에서 급기방식에서는 터널하부의 연기층 두께가 증가하였고 배기방식이 더 적합하다고 보고하였다. 지하철도에 사용되고 있는 급기방식 제연설비의 제연성능을 확인할 필요가 있다. 본 연구의 목적은 수치모사를 통해 실내에 유입된 연기에 대한 제연방식과 배기풍량에 따른 제연성능을 조사하는 것이다. 수치법으로 FDS (Fire Dynamics Simulator)³⁾를 사용한다. 국내에서도 대향류 확산화염의 모사⁴⁾, 공동주택 보일러 연소 배기가스의 유동⁵⁾ 등에 FDS가 사용되었다. 3차원 공간 내에 일정한 개수의 입자를 배열한 다음, 각 제연방식을 가동했을 때 유동장의 속도벡터와 시간에 따른 입자수의 변화를 비교하였다.

2. 수치법

본 연구는 Fig. 1과 같이 좌우에 각각 한 개의 급기구와 배기구가 있는 2 m × 2 m × 2.4m의 공간을 대상으로 하였다. 급기구와 배기구의 크기는 각각 0.5 m × 0.5 m이고, 그 중심위치는 m단위로 각각 (2.0, 1.0, 1.2), (0.0, 1.0, 2.05)이다. 가압급기방식에서는 배기구가 개구부로, 또 배기(흡인)방식에서는 급기구가 개구부로 취급한다. 1 m × 0.25 m 크기의 개구부는 왼쪽 벽 아래에 중심점 (0.0, 1.0, 0.275)에 위치하고 그 면적은 급기구, 배기구와 같게 하였다. 벽과 실내·외 공기의 온도는 모두 20°C이고 공기는 이상기체로 가정하였다.

지배방정식은 연속방정식과 운동량방정식으로 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, t 는 시간, u 는 속도, p 는 압력, g 는 중력가속도, 9.81 m/s², τ 는 전단응력이다. 이 연구에서는 연기의 배출을 등온상태에서 다루므로 에너지 방정식과 연소모델, 화학종 방정식은 필요하지 않다. 난류모델은 대와류모사(large eddy simulation)⁶⁾를 사용한다.

이 편미분방정식의 해는 미국표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology)의 Fire Dynamics Simulator(FDS)³⁾를 사용하여 구한다. FDS는 상용 패키지는 아니지만 공개된 화재 모사용 소프트웨어로서, Fortran으로 작성되어 있으며, 간단히 계산영역의 크기와 격자수, 출력변수 등을 정의한 입력파일만 작성하면 PC에서도 사용할 수 있다. 격자의 크기는 x, y, z방향 모두 균일하게 0.05m로 하여 격자수는 40 × 40 × 48로 하였다. 수치법에 관한 자세한 내용은 McGrattan 등³⁾에 기술되어 있다.

연기의 온도가 주위 공기보다 높아 부력에 의해 상부에 연기층을 형성하지만, 연기층의 두께를 정의하기가 곤란하며, 연기층의 두께에 따라 제연설비의 성능이 달라질 수 있다. 그러므로 제연설비가 가동되기 전에 연기가 실내에 유입된 상황을 Fig. 2와 같이 20,000개 입자의 무작위 분포로 가정하였다. 제연성능 비교의 객관성을 확보하기 위해서는 입자수가 많을수록 좋지만, 입자수가 많으면 컴퓨터의 기억용량과 계산시간이 더 요구되므로 20,000개로 하

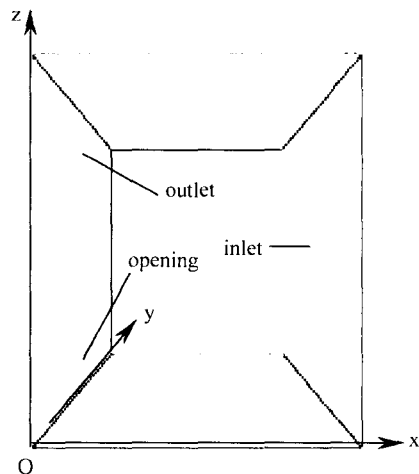


Fig. 1. Computational domain (2 m × 2 m × 2.4 m)

였다. 이 입자분포는, 공기와 비슷한 온도의 연기가 실내에 다량 유입하여 공기 중에 혼합된 상태라고 할 수 있으며, 공기-연기의 밀도 차이와 연기의 농도분포와는 무관하다.

각 제연설비의 가동시간에 따라 실내 입자수의 감소율을 조사함으로써 제연성능을 비교할 수 있게 하였다. 이 때 급기구 또는 배기구의 유량은 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 일정하게 유지하였다. 또 풍량에 따른 조사에는 급배기방식을 대상으로 하고, 급기구와 배기구의 풍량을 같게 하여 $0.25\sim 1.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 범위의 5가지 값을 대상으로 하였다. 이것은 각각 급기구와 배기구의 평균유속 $1\sim 5 \text{ m/s}$ 에 해당한다. 제연방식과 배기풍량에 따라 속도백과 입자분포, 입자수의 감소율을 비교하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 제연방식

급기구와 배기구 외에 다른 개구부가 없다면 제연방식에 관계없이 정상상태의 유동장은 동일하며 따라서 입자감소율도 같아야 한다. 이를 확인하기 위해 배기 및 급기 풍량 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 제연설비를 가동하여 30초 동안 입자감소율을 비교하였다. 풍량 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 는 급기구와 배기구의 평균유속 2 m/s 에 해당한다. Fig. 3과 같이 세가지 제연방식 모두 실내 입자감소율이 예상대로 거의 비슷하게 나타났다. 입자수가 20,000개에서 10,000개로 감소하는데 세 제연방식 모두 약 13초가 소요되었다.

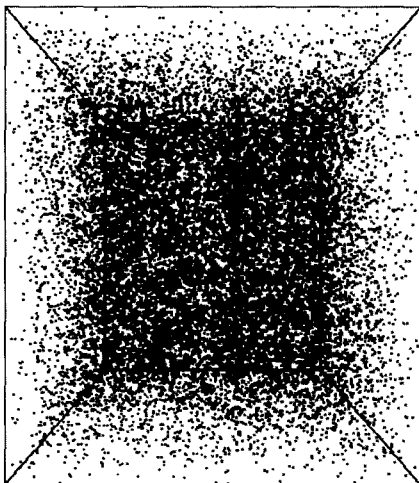


Fig. 2. Initial particle distribution ($t = 0 \text{ sec}$, 20,000 particles)

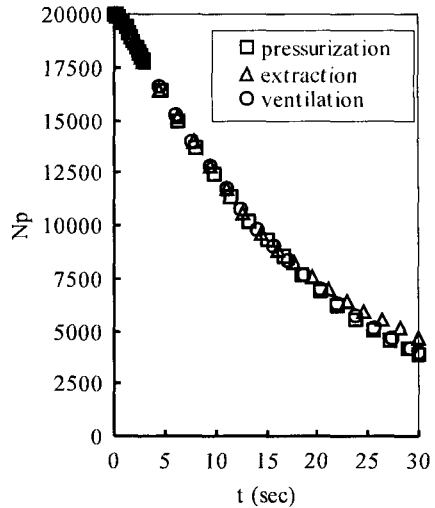


Fig. 3. Decreasing rate of the number of particles in the room without opening ($Q = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$)

개구부가 열려있는 경우에는 제연방식에 따라 이 개구부를 통해 공기가 유입되거나 유출되므로 같은 배기풍량에서도 유동형태가 서로 다르게 된다. Fig. 4는 풍량을 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 유지하면서 제연방식에 따른 유동형태를 비교한 그림이다. 급기방식(Fig. 4a)에서는 배기구와 개구부로 공기가 흘러나가지만, 배기방식(Fig. 4b)에서는 급기구 뿐만 아니라 개구부에서도 공기가 유입되고 있다. 급배기방식(Fig. 4c)에서는 배기구와 급기구를 통해 같은 양의 공기가 흐르므로 개구부에는 흐름이 거의 형성되지 않았다.

Fig. 5에는 개구부가 열려있는 경우에 제연방식에 따른 입자의 감소율을 나타내었다. 배기방식과 급배기방식의 입자 감소율은 차이가 없고, 앞의 개구부가 없는 경우(Fig. 3)의 입자 감소율과도 큰 차이가 없었다. 그러나 급기방식은 다른 두 제연방식에 비해 입자 감소율이 작아 제연성능이 낮음을 알 수 있다. 초기 입자수 20,000개에서 50%인 10,000개로 감소하는데 걸린 시간은 급배기방식과 배기방식은 약 13초인데 비해 급기식은 약 17초였다. 이 결과는 지하철역과 같이 여러 개의 큰 개구부가 존재하는 공간에서는 급기방식이 배기방식이나 급배기방식에 비해 제연성능이 낮음을 의미한다.

3.3. 배기풍량

배기풍량에 관한 조사에는 급배기방식의 제연설비를 대상으로 하고 배기풍량을 $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.75 \text{ m}^3/\text{s}$, $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $1.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 5가지로 하였다. 이 값

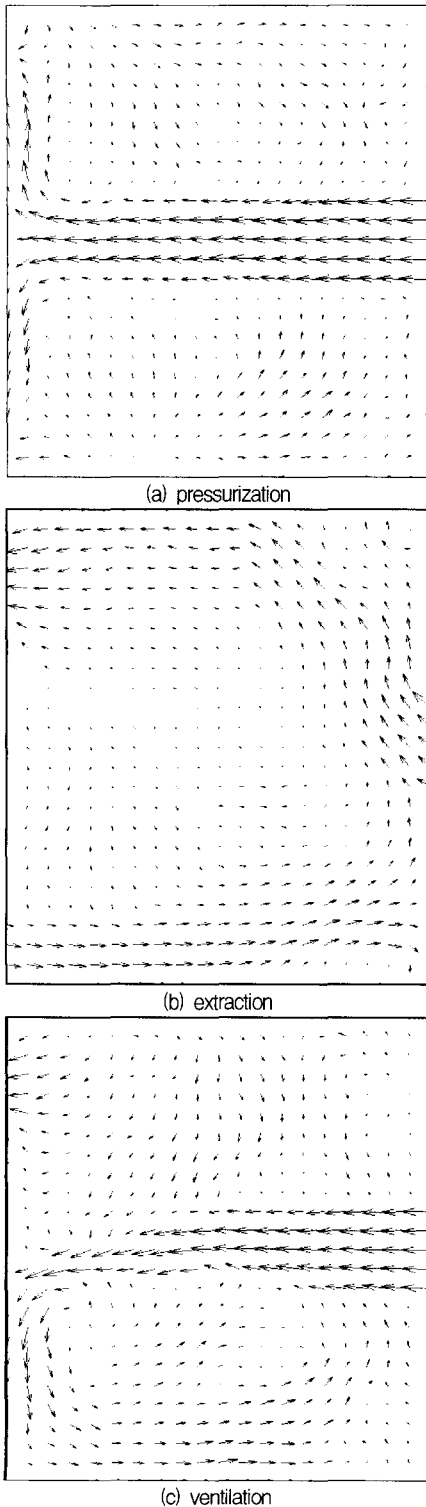


Fig. 4. Velocity vectors at $t=30$ sec ($y=1m$, $Q=0.5m^3/s$)

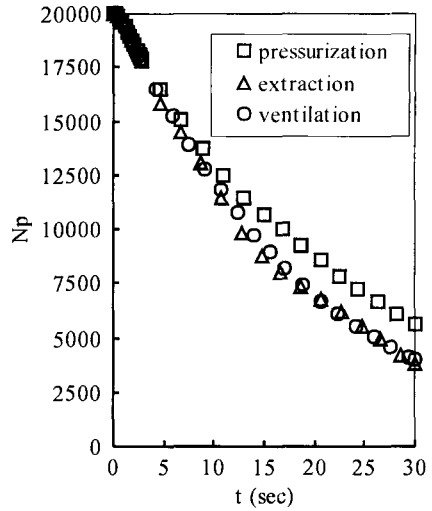


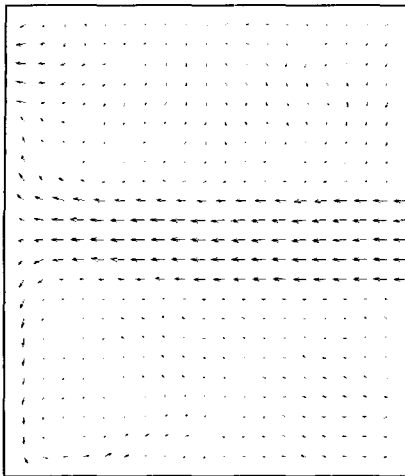
Fig. 5. Decreasing rate of the number of particles in the room ($Q=0.5m^3/s$)

은 각각 급기구와 배기구에서의 평균유속 1m/s, 2m/s, 3m/s, 4m/s, 5m/s에 해당한다. 급기구의 풍량은 질량보존의 법칙에 따라 배기풍량과 같게 하였다.

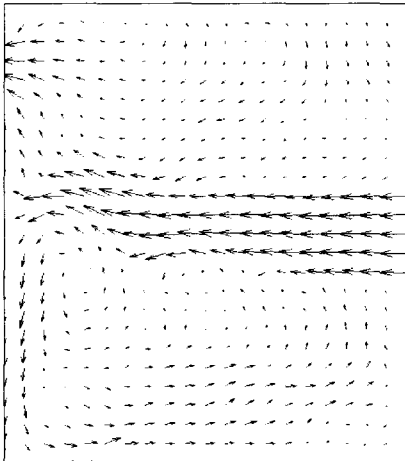
Fig. 6은 배기풍량 $0.25m^3/s$, $0.75m^3/s$, $1.25m^3/s$ 에 대한 중앙평면($y=1$ m)의 속도벡터를 나타낸 그림이다. $t=30$ sec에서의 순시값이지만 풍량에 따른 유동장의 차이가 뚜렷하게 나타나 있다. 풍량의 증가는 실내 속도를 증가시켜 입자의 배출을 촉진하게 된다. 풍량이 증가해도 개구부에서는 공기의 흐름이 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 앞의 Fig. 3과 Fig. 4에서 급배기방식의 입자감소율이 거의 같게 되는 이유이다. 또 이러한 결과는 급배기방식에서는 개구부가 제연효과에 미치는 영향이 작음을 의미한다.

30초 동안 급배기방식의 제연설비를 가동했을 때 배기풍량에 따라 실내에 남아있는 입자의 분포를 Fig. 7에 비교하였다. 풍량이 증가할수록 입자수의 감소가 뚜렷이 나타나 있다. 실내에 남은 입자수는 $Q=0.25m^3/s$ 일 때 9028개, $0.75m^3/s$ 일 때 1696개, $1.25m^3/s$ 일 때 387개였다.

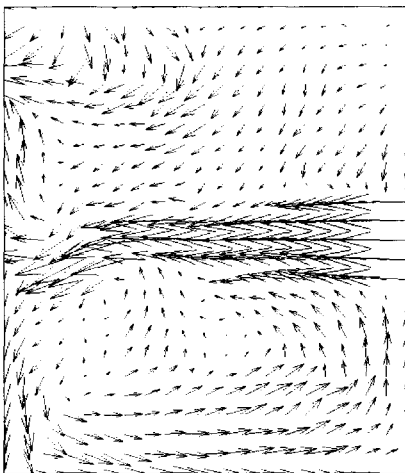
배기풍량에 따른 실내 입자수의 감소율을 Fig. 8에 나타내었다. 풍량이 클수록 입자수의 감소율이 증가하지만, $1.0m^3/s$ 에서 $1.25m^3/s$ 로 증가해도 감소율에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것은 주어진 공간에서 배기풍량의 값이 일정치를 넘으면 공기가 공간 내에서 연기입자와 혼합하지 않은 채 배출함으로써 연기의 배출에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.



(a) $Q = 0.25 \text{ m}^3/\text{s}$

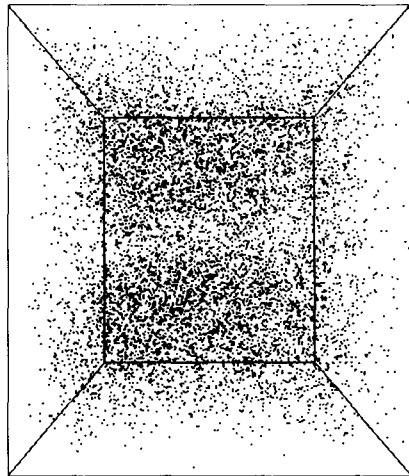


(b) $Q = 0.75 \text{ m}^3/\text{s}$

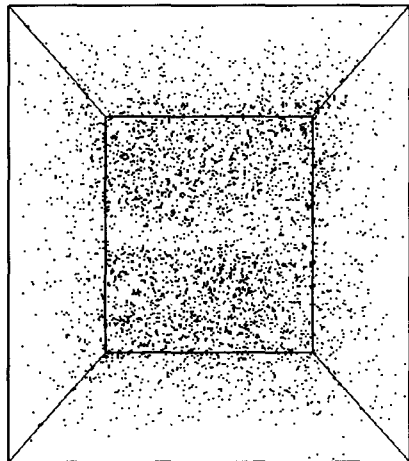


(c) $Q = 1.25 \text{ m}^3/\text{s}$

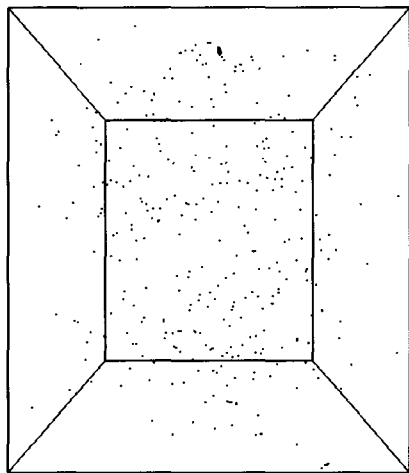
Fig. 6. Velocity vectors for different extraction flowrate at $t = 30$ sec ($y = 1$ m, ventilation system)



(a) $Q = 0.25 \text{ m}^3/\text{s}$



(b) $Q = 0.75 \text{ m}^3/\text{s}$



(c) $Q = 1.25 \text{ m}^3/\text{s}$

Fig. 7. Particles for different extraction flowrate at $t = 30$ sec (ventilation system)

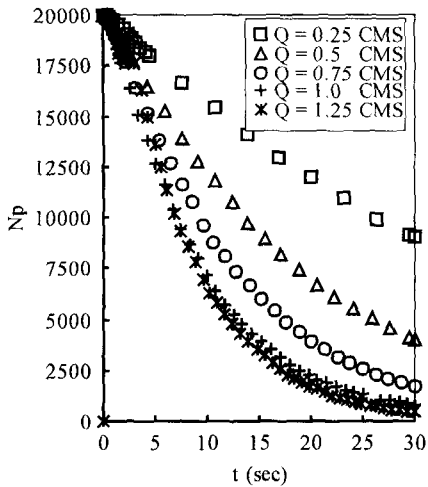


Fig. 8. Decreasing rate of the number of particles in the room for different air flowrate (ventilation system)

초기 입자수 20,000개에서 10,000개로 감소하는데 걸리는 시간은 풍량이 0.25m³/s일 때 약 27초, 0.5 m³/s일 때 약 13초, 0.75m³/s일 때 약 9초, 1.0m³/s와 1.25m³/s일 때 약 7초가 소요된다. 이것은 풍량이 감소하면 제연에 소요되는 시간이 급격히 증가함을 나타낸다. 그러므로 지하철 역과 같은 다중이용시설의 제연설비는 연기를 신속히 제거할 수 있도록 급기기와 배기구의 유속 5m/s이하의 범위 내에서 풍량을 크게 할 필요가 있음을 알 수 있다.

4. 결론

급기방식, 배기방식(흡인방식), 급배기방식의 세 가지 제연방식과 풍량에 따른 실내 유입 연기의 배출을 전산유체역학으로 조사하였다. 개구부가 있는 실내에 20,000개의 입자가 무작위로 분포된 것으로 가정하여 입자수의 감소율을 비교한 결과 다음의

결론을 얻었다.

- (1) 개구부가 없는 경우에는 세가지 제연방식 모두 제연효과에 차이가 거의 없음을 확인하였다.
- (2) 개구부가 있는 실내에서는 급배기방식과 배기방식의 제연성능이 거의 비슷했으나, 이 두 방식에 비해 급기방식은 제연성능이 낮아 개구부가 많은 장소에는 적합하지 않음을 알 수 있었다.
- (3) 풍량이 낮을수록 제연에 걸리는 시간이 급격히 늘어나므로, 급배기구의 풍량을 충분히 크게 할 필요가 있다.

참고문헌

- 1) 추병길, 박찬국, 방배연설비 실무, 동화기술, pp. 212, 1995.
- 2) 이성룡, 정진용, 김충익, 유홍선, "터널화재시 환기방식에 따른 연기거동에 관한 실험적 연구," 설비공학논문집, 제14권, 제9호, pp. 691~698, 2002.
- 3) K. B. McGrattan, H. R. Baum, R. G. Rehm, A. Hamins, G. P. Forney, J. E. Floyd and S. Hostikka, *Fire Dynamics Simulator - Technical Reference Guide v.3*, NIST, Gaithersburg, Maryland, U.S.A.
- 4) 박외철, 고경찬, "다트 두께가 대향류 화염구조에 미치는 영향의 조사," 산업안전학회지, 제17권, 제4호, pp. 61~65, 2002.
- 5) 박외철, 정락기, "공동주택 보일러 연소배기가스의 실내유입에 관한 연구," 설비공학논문집 투고, 2003.
- 6) J. Smagorinsky, "General Circulation Experiments with the Primitive Equations - I. The Basic Experiment," *Monthly Weather Review*, Vol. 91, pp. 99~164, 1963.