

대공간 화재시 배연효율 정의에 관한 수치해석적 연구

Numerical Study on the Definition of the Exhaust Effectiveness of Smoke under Fire in a Large Space

김정엽(Jung-Yup Kim)¹, 장경진(Kyung Jin Jang)², 한화택(Hwataik Han)^{3*}

¹한국건설기술연구원, ²국민대학교 에너지인력양성센터, ³국민대학교 기계시스템공학부

¹Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si 411-712, Korea

²Energy Technology Education Center, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

³Department of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received August 19, 2014; revision received October 6, 2014; Accepted: October 10, 2014)

Abstract This paper investigates the exhaust effectiveness of smoke, in the case of fire in a large atrium space. Numerical analysis was conducted to simulate transient fire growth in a test room, modeled by the Murcia atrium fire test. Various indices representing the exhaust performance of the exhaust system were obtained, such as the height of the smoke layer, and the instantaneous and accumulative capture efficiency of the smoke. The residual life time of smoke from the fire was also obtained, by injecting tracer gases at the fire location, depending on the airflow rate, and the location of the exhausts. The capture efficiency based on smoke concentration at the exhausts exhibits how much smoke can be removed by the exhaust system; whereas, the exhaust effectiveness based on residual life time indicates how rapidly the smoke can reach the exhaust locations, before being exhausted. The definitions and meanings of the indices to be used in representing the exhaust performance of a smoke exhaust system installed in a large space are discussed.

Key words Fire(화재), Smoke(연기), Exhaust effectiveness(배연효율), Tracer gas(추적가스), Residual life time(여명), Numerical analysis(수치해석)

* Corresponding author, E-mail: hhan@kookmin.ac.kr

기호설명

c_{ex}	: 배기구 연기농도 [kg/m^3]
C_{ex}	: 배기구에서의 추적가스 농도 [kg/m^3]
h	: 천장 꼭지점에서 배기구까지 거리 [m]
\dot{m}	: 연기발생량 [kg/s]
Q	: 배기풍량 [m^3/s]
R_p	: 여명 [s]
t	: 시간 [s]
V	: 실내 체적 [m^3]
z	: 수직방향 좌표 [m]

그리스 문자

ϵ_p	: 배연효율, 식(4)
η	: 순시 포집효율, 식(1)
$\bar{\eta}$: 누적 포집효율, 식(2)
ρ	: 공기 밀도 [kg/m^3]
τ_n	: 명목시간상수, V/Q

1. 서론

건축물 화재 시 발생하는 유독가스나 연기를 배출하기 위한 배연시스템의 성능은 건물 구조와 화재발생 특성 뿐 아니라 배기구의 상대적 위치, 그리고 배기풍량 등에 의해서 결정된다. 화재 시 거주자의 안전한 대피 계획을 수립하기 위해서는 화염에 의한 공간 내 열 및 연기의 거동을 이해하는 것이 필요하다. 또한 배연시스템의 성능을 표시할 수 있는 배연효율에 대한 정의가 적용목적에 적합하도록 정립되어야 한다.

아트리움이나 체육관 등과 같은 대공간의 화재 시 연기층의 높이와 필요한 대피시간을 규정하고 있다.⁽¹⁾ 대공간 내 성층화현상과 화염 열기둥에 의한 유동특성은 오래전부터 연구되어 왔다.⁽²⁻⁴⁾ Pretrel⁽⁵⁾의 연구와 Bennardo and Inzaghi⁽⁶⁾의 연구에서 존모델을 이용하여 다양한 시험조건에 하에서 시간경과에 따른 연기층의 높이를 계산하였다. Qin et al.⁽⁷⁾은 자연배연과 기계배연의 성능을 연기층의 하강 속도로 평가하고 천장온도가 연기 확산에

미치는 영향에 관하여 연구하였다. Xu et al.⁽⁸⁾은 최대 열발생률을 고려했을 때 연기층 높이를 유지하기 위한 배연풍량을 계산하는 단순 모델링 작업을 수행하였다. 연기층을 상층과 하층레벨로 나누고, 아트리움 형상계수에 따라서 배연풍량과 송풍기 최적가동 시점을 제시하고 있다. 배연효율을 언급하고 있으나 배연풍량의 의미로 사용하고 있으며 연기층이 충분하지 않은 경우 실내의 공기가 배기되는 흡입고갈(suction wear)현상이 발생할 수 있음을 설명하고 있다.

한편, 산업 환기에서는 국소 배기장치의 배기성능을 오염발생량 대비 포집된 오염물질량으로 정의하고 있다.^(9, 10) 주방후드에 의한 오염제거 성능 역시 포집효율에 근거하고 있으며,^(11, 12) 터널 내 화재 시 제연덕트의 배연효율도 유사한 개념을 이용하고 있다.⁽¹³⁾

본 연구에서는 단순한 구조의 대공간 내 특정위치에서 화재가 발생하였을 때^(14, 15) 배기구 위치와 배기풍량에 따른 실내유동 및 연기농도 변화를 수치해석하고 이로부터 배연시스템의 성능을 나타낼 수 있는 다양한 지표들을 비교 평가하고자 한다. 여기서는 연기층 높이와 포집효율에 추가하여, 발생한 연기가 배기구까지 도달하는데 소요되는 시간, 즉 여명의 개념을 이용한 배연효율을 해석하고자 한다. 대공간 내 화재에 의한 연기거동 해석에 추가하여 주입된 추적가스 농도변화를 분석하여 배연효율을 구하는 수치해석 방법을 제시한다. 배출량에 근거한 포집효율과 연기층 높이, 그리고 여명에 근거한 배연효율을 상호 비교하여 배연 성능을 나타내는 지표로서의 의미와 활용 가능성에 관하여 고찰하고자 한다.

2. 배연효율

배연효율은 배기구의 위치나 풍량에 따라서 배연시스템의 성능을 정량적으로 나타낼 수 있어야 한다. 앞서 설명한 바와 같이 연기층의 하강속도 또는 배기구의 연기 배출량 등을 이용하여 정의할 수 있다. 연기층의 높이는 시스템의 배연효율의 개념보다는 공간 내 대피 가능 시간 확보 차원에서 다루어진다. 또한 화염에서 발생하는 연기량 대비 배연시스템의 연기 배출량의 비율로 정의할 수 있다. 한 시점에서 발생량 대비 배출량 비율을 나타내는 순시배연효율과 화재 발생시점부터 누적된 발생량 대비 배출량 비율인 누적배연효율로 정의된다.

$$\eta = \frac{\rho Q \cdot c_{ex}(t)}{\dot{m}(t)} \quad (1)$$

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^t \rho Q \cdot c_{ex}(t) dt}{\int_0^t \dot{m}(t) dt} \quad (2)$$

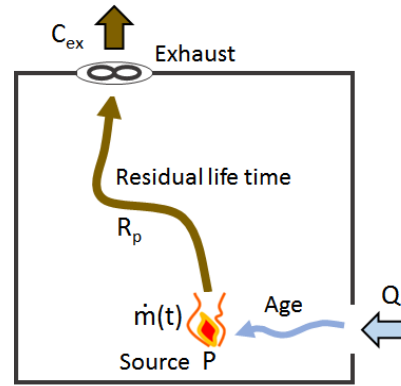


Fig. 1 Concept of residual life time of smoke.

여기서 ρ 는 공기의 밀도, Q 는 배기량, \dot{m} 은 연기발생량, c_{ex} 는 배기구에서의 연기농도이다.

급기구에서 공급된 신선외기가 실내 일정 지점에 도달하는 시간을 공기의 연령(age of air)로 정의한다.⁽¹⁶⁾ 마찬가지로 화염위치에서 발생한 연기가 배기구까지 도달하는데 걸리는 시간을 여명 또는 잔여체류시간(residual life time)이라 정의한다. 연령과 여명의 개념이 Fig. 1에 보인다. 배기구가 여럿인 경우에는 평균 배기농도를 이용한다.

여명을 구하기 위해서는 화재 발생위치 P에 추적가스를 주입하고 배기구에서 농도변화를 측정함으로써 구할 수 있다. 펄스형태로 추적가스를 주입하는 경우에 여명은 다음의 식으로 구해진다.

$$R_p = \frac{\int_0^\infty t \cdot C_{ex}^p(t) dt}{\int_0^\infty C_{ex}^p(t) dt} \quad (3)$$

여기서 C_{ex} 는 배기구에서의 추적가스 농도이며 상첨자 P는 추적가스 발생위치를 나타내기 위해 참고로 표기한 것이다. 여명이 길수록 발생한 연기가 배기구에 도달하는 시간이 오래 걸린다는 의미이므로 효율은 명목 시간상수와의 상대적 비율로 정의한다.

$$\epsilon_p = \frac{\tau_n}{R_p} \quad (4)$$

여기서 τ_n 은 명목시간상수로서 V/Q 로 계산되며 공기교환율의 역수이다. V 는 실내체적이고 Q 는 배기량이다.

3. 수치해석

본 연구에서는 스페인 Murcia에서 수행한 아트리움

화재실험실을 해석모델로 선정하였다.^(14, 15) Fig. 2와 같이 높이 20 m, 가로 세로 19.5 m인 하나의 개방공간으로서 바닥 중앙에 화원이 존재한다. 측벽 하단부에는 8개의 그릴형 흡입구가 있으며, 각 개구면적은 4.88 m × 2.5 m의 크기를 갖는다. 천장에는 직경 0.56 m인 4개의 배기구가 위치하고 있으며, 각 배기구에는 기준 풍량이 3.8 m³/s인 송풍기가 설치되어 있다. 풍량은 15.2 m³/s (송풍기 4대 가동)와 7.6 m³/s (송풍기 2대 가동)인 두 경우에 대하여 고찰하였다. 배기구는 중앙 꼭지점에서 경사면을 따라 Fig. 2와 같이 h = 1.8 m인 경우(Case A)와 5.0 m(Case B), 8.2 m(Case C)인 세 가지 경우에 대하여 해석하였다. 화재성장 및 연기발생 곡선은 Fig. 3과 같이 설정하였다. 정상상태에서 열발생율은 1.35 MW 이고 연기발생률은 0.0018247 kg/s이다.

수치해석 프로그램으로는 열유동해석 문제에 많이 사용되고 있는 ANSYS-CFX13을 사용하였다. 난류모델은 전단응력 수송 모델(Shear Stress Transport Model)을 적용하였으며, 경계조건으로는 배기구의 경우 배출 풍량을 반영하는 속도경계조건으로 설정하였고, 흡입구의 경우 압력차에 의해 유동이 자동으로 설정되는 개구부 조건으로 설정하였다.

Table 1 Airflow rates and exhaust locations for the present study

Exhaust	Case A	Case B	Case C
Flow rate	h = 0.18 m	0.5 m	0.82 m
Q = 15.2 m ³ /s (4 fans)	A-1	B-1	C-1
Q = 7.6 m ³ /s (2 fans)	A-2	B-2	C-2

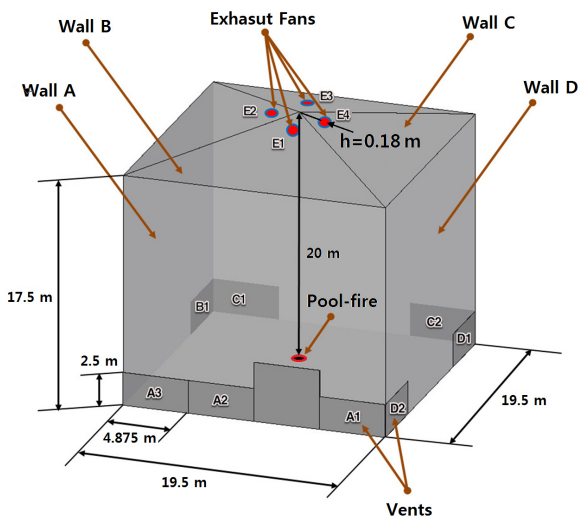


Fig. 2 Configuration of calculation domain.

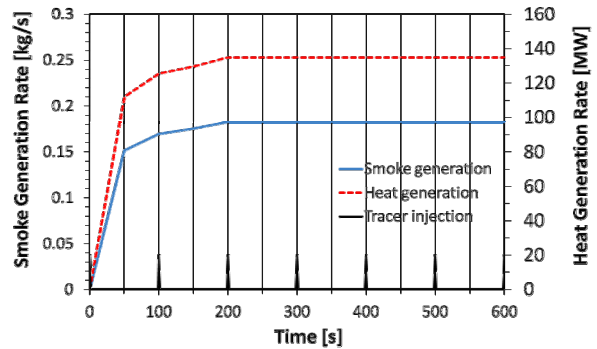


Fig. 3 Heat and smoke generation rates according to fire growth and superimposed tracer gas injections.

여명 해석을 위해서 화재발생위치에서 유동에 영향을 미치지 않을 정도로 미량의 추적가스를 펄스형태로 1초간 주입하고 배기구에서 농도변화를 관찰하였다. 화재경과에 따라서 여명의 변화를 분석하기 위해서 매 100초마다 서로 다른 종의 추적가스를 주입하여 상호 간섭을 일으키지 않도록 하였다.

4. 결과 및 고찰

배기구 4개가 천장 상단에 위치하고(h = 1.8 m) 송풍기가 모두 가동되어 풍량이 15.2 m³/s 인 경우(Case A-1)를 기본 케이스로 설정하였다. 시간경과에 따른 실내 중앙 단면을 따라 계산된 연기농도 분포가 Fig. 4에 보인다. 실내의 농도 성층화와 열기둥 현상을 볼 수 있다. Fig. 5는 벽면 A의 수직 중앙선 상에서 높이에 따른 농도변화를 보인다. 화재 초기에는 실내 각점에서 농도가 급격히 증가하다가 일정 시간 경과 후에는 발생량과 배출량이 균형을 이루면서 일정한 상태에 이른다.

Fig. 6은 Case A-1과 A-2에 대하여 시간경과에 따른 연기층의 높이 변화를 보인다. 여기 표시된 연기층 높이는 상층부와 하층부 평균 농도의 중간값을 갖는 위치이다. 연기층의 높이는 초기에 급격히 하강하다가 일정 시간 경과 후 일정한 높이를 유지한다. 실험적으로 구한 결과와 유사한 경향을 보인다. 풍량이 절반인 Case A-2 (7.6 m³/s)의 경우는 연기배출이 늦어 실내 연기층 높이가 Case A-1에 비하여 낮게 유지되고 있다.

해석 대상공간에서 급기용 개구부 위치가 비대칭이기는 하나 화염위치가 중앙에 위치하고 배기구가 서로 대칭으로 인접해 있어서 배기구 농도는 4곳 모두 거의 동일하다. 배연시스템의 포집효율을 구하기 위해 배기구의 평균 농도를 이용하여 배출량을 계산하였다. 연기 배출량을 발생량으로 나눈 순시포집효율을 Fig. 7에 풍량과 배기구 위치에 따른 6가지 경우에 대하여 보이고 있다.

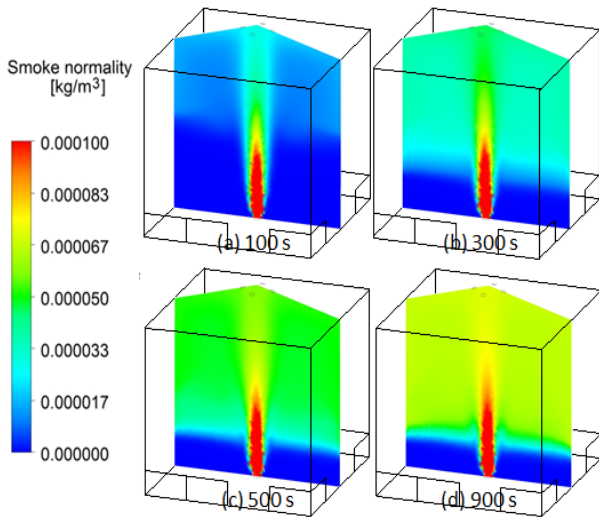


Fig. 4 Transient smoke concentration after fire for Case A-1.

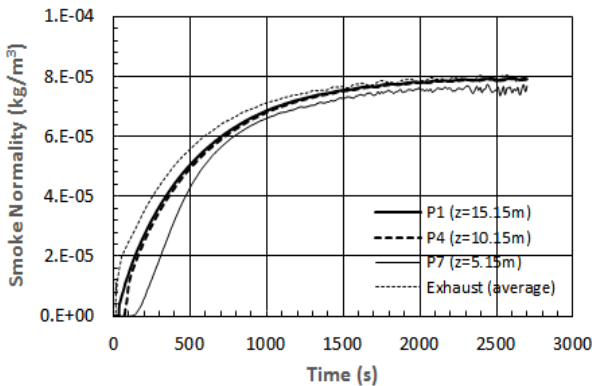


Fig. 5 Smoke normality at internal points along the centerline of wall A for Case A-1.

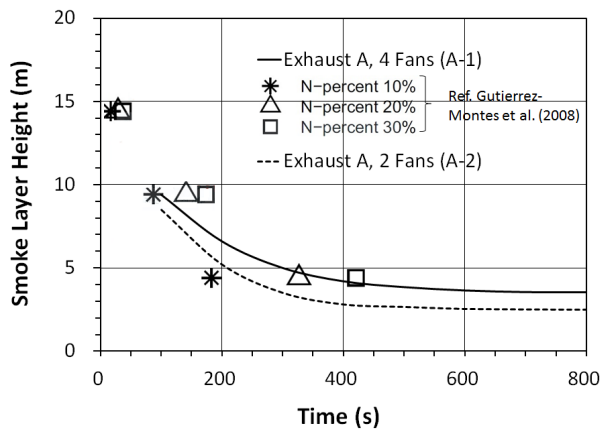


Fig. 6 Smoke layer heights for Case A-1 and A-2 in comparison with experimental results.⁽¹⁴⁾

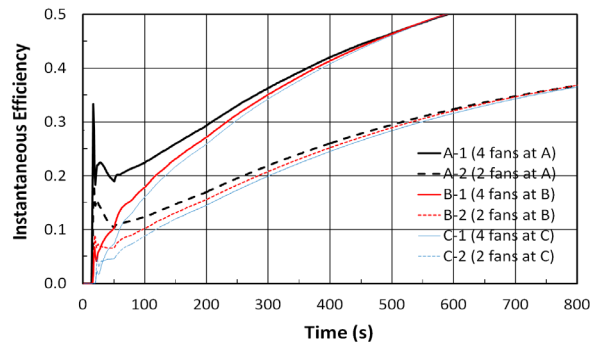


Fig. 7 Instantaneous capture efficiency of smoke by exhaust system.

Case A의 경우 초기발생 연기가 상단에 도달하여 약 20초 부근에서 순간적으로 고농도 배기가 배출되는 것을 볼 수 있다. 이후 열기둥은 주변의 실내공기를 유입하면서 천장 부근에 도달하기 때문에 농도는 일시적으로 감소한다. 시간 경과에 따라서 상층부의 연기층이 성층화 되면서 배기농도는 지속적으로 증가한다.

배기구 위치가 천장에서 아래쪽으로 내려올수록 화재 초기 고농도 배출현상은 분명하게 관찰되지 않으며 시간 경과에 따라서 성층화 되면서 배기농도가 증가한다. 일정 시간경과 후에는 배기구 위치에 관계없이 배기농도가 동일한 값으로 접근하는 것을 볼 수 있다. 배기풍량이 큰 경우가 배기농도는 낮으나 풍량이 두 배이므로 순시 포집효율은 두 배보다 약간 작게 나타난다.

Fig. 8은 누적 포집효율을 나타낸 것이다. 순시 연기발생량을 적분한 누적 발생량 대비 총 배출량의 비를 의미한다. 총 배출량은 화재발생 이후 배기농도를 적분하여 구한다. 누적효율은 그 시점까지 총 발생량 대비 배출된 연기량을 의미하므로 그 차이로부터 평균 실내농도를 가늠할 수 있다.

화재 위치에서 발생한 연기가 배기구에 도달하는 시간, 즉 여명을 계산하기 위해 추적가스를 화재 위치에 펄스범으로 주입하고 배기구에서의 농도변화를 해석하였다. $t = 0$ 일 때 주입된 추적가스는 배기구에서 Fig. 9와 같은 농도 반응을 보인다. 약 20초 후에 1차 피크가 나타나고 감쇠하는데, 커다란 실내 순환기류를 타고 다시 한 번 피크를 보이고 이후 서서히 감쇠한다. 시간이 가중된 1차 모멘트 값은 적분 구간에 따라서 크게 달라지기 때문에 적분 구간을 충분히 잡아주어야 한다. 여기서는 적분구간을 명목시간상수의 5배로 하였으며 시간 증가에 따른 적분값의 변동추이로부터 구한 접근값을 써서 여명을 구하였다.

시간에 따른 여명의 변화가 Fig. 10에 나타나 있다. 기본 A-1 조건에서 여명은 초기 0초와 100초에 주입된 추적가스는 실내유동이 충분히 발달되지 않다가 200초 이후에는 거의 일정한 값을 보인다. 즉 화재에서 발생한 연기가 배기구까지 도달하는 양상은 시간경과에

무관하게 일정하다는 의미이다. 배기 풍량이 작은 경우에는 여명이 시간경과에 따라서 서서히 감소한다. 풍량이 15.2 m³/s일 때는 410초로 일정하고, 7.6 m³/s일 때는 500초에서 서서히 감소한다. 또한 이 값은 배기구 위치에 관계없이 풍량에 의해서만 결정되는 것을 관찰할 수 있다.

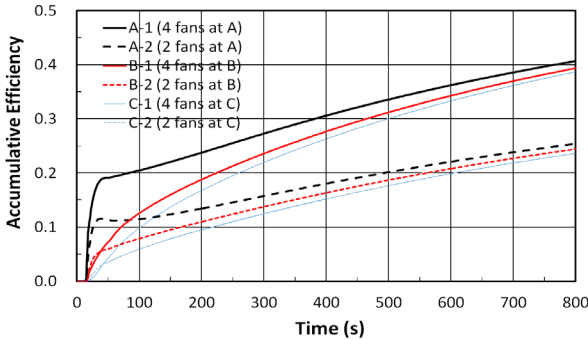


Fig. 8 Accumulative capture efficiency of smoke by exhaust system.

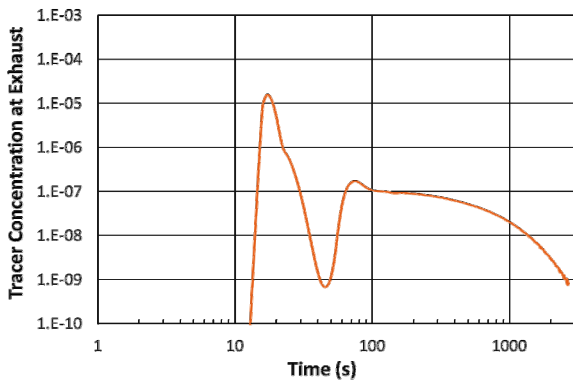


Fig. 9 Tracer response at exhaust after injection at fire location.

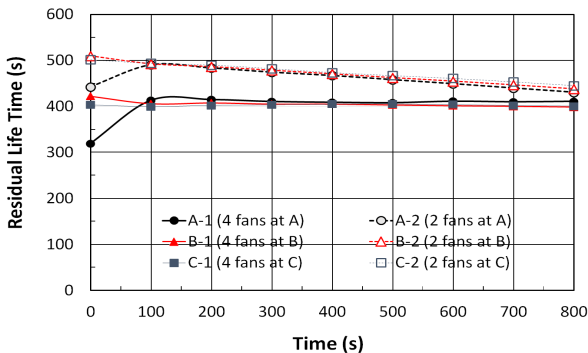


Fig. 10 Residual life time of smoke calculated from tracer responses at exhaust after injections at every 100 seconds.

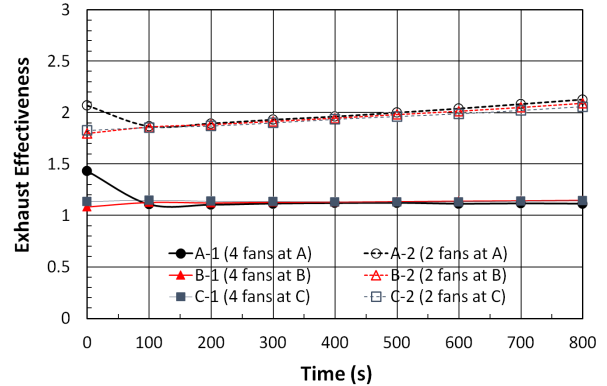


Fig. 11 Exhaust effectiveness calculated by residual life time of smoke.

배연효율은 명목시간상수를 여명으로 나눈 값으로서 Fig. 11에 나와 있다. 풍량이 작을 때에 비하여, 풍량이 클 때의 여명이 작기는 하지만 절반이 넘고 거의 유사한 값을 보이기 때문에 배연효율은 풍량이 작은 경우가 두 배 가까운 값을 보이고 있다.

5. 결 론

본 연구는 스페인 Murcia에서 수행한 화재실험 모델에 대하여 전산유체역학적 해석을 통해 시간경과에 따른 열 및 연기 유동변화를 해석하였으며 이를 바탕으로 연기층의 높이, 포집효율 그리고 여명에 근거한 배연효율을 계산하고 배연 성능을 표현하는 각각의 지표로서의 특성을 비교하였다.

- (1) 연기층의 높이는 거주자의 대피를 위한 성능평가에 적합한 지표이다. 화재 초기에는 연기층 높이가 급격히 하강하다가 일정 시간 경과 후에는 발생량과 배출량이 평형을 이루며 일정한 레벨을 유지한다. 안전한 대피를 위한 배기풍량을 결정하는데 적합하다.
- (2) 포집효율은 양적인 측면에서 배기시스템의 배출 성능을 표시한다. 포집효율은 화재초기 배기구 위치에 따라서 배기농도가 다르게 나타나고 변동이 심하므로 결과에 있어서 차이를 보인다. 그러나 성층화가 진행된 일정 시간 경과 후에는 배기구 위치보다는 배기풍량에 의하여 포집효율이 결정된다.
- (3) 여명에 근거한 배연효율은 발생된 연기가 배기구까지 도달하는 시간에 근거한 질적인 지표이다. 배기량이나 배기구 위치 등 배기시스템의 설계안에 따른 여명 값을 비교함으로써 각 시점에서 발생한 연기가 얼마나 빠르게 배출되는지를 나타낸다.
- (4) 여명을 구하기 위해 화재에 의한 연기발생에 추가

하여 별도의 추적가스를 주입하여야 한다. 실내 기류에 영향을 주지 않도록 주입하여야 하고 상당히 긴 시간 동안 배기구 농도를 관측해야 한다. 특히 펄스법에 의한 경우에는 1차 모멘트 값을 수립시키기 위해서는 명목시간상수의 수배에 달하는 시간동안 적분이 필요하다.

여명에 근거한 배연효율은 화재 초기에 배기구 위치에 따른 성능을 비교하는데 유효하나 연기층이 성층화된 이후에는 배연성능 비교가 어렵다. 또한 현실적으로 의미 있는 수립값을 얻기 위해서는 보다 간편한 계산 방법의 개발이 필요하다. 향후 대공간 화재 시 배연시스템의 배치 및 용량 산정 등 배연설계를 위한 해석도구로 활용되기 위해서는 많은 연구가 진행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국건설기술연구원의 ‘14주요-대공간 건축물 화재시 3시간 이상 견딜 수 있는 구조부재 및 연기, 피난기술 개발 과제’와 한국에너지기술평가원의 에너지인력양성사업(No. 2013 4040 200580)의 일환으로 수행된 연구입니다.

References

1. NFPA, 2000, Guide for smoke management systems in malls, atria and large areas, NFPA Report 92B, USA.
2. Zukoski, E. E., Kubota, B., and Cetegen, B., 1980, Entrainment in fire plumes, *Fire Safety Journal*, Vol. 3, No. 3, pp. 107-121.
3. Heskestad, G., 1984, Engineering relations for fire plumes, *Fire Safety Journal*, Vol. 7, No. 1, pp. 25-32.
4. McCaffrey, B. J., 1983, Momentum implications for buoyant diffusion flames, *Combustion and Flame*, Vol. 52, No. 2, pp. 149-167.
5. Pretrel, H., 2005, Effect of ventilation procedure on the behaviour of a fire compartment scenario, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 235, No. 20, pp. 2155-2169.
6. Bennardo, V. and Inzaghi, N., 2010, A mathematical model of the smoke layer evolution in compartment fires, *The Open Thermodynamics Journal*, Vol. 4, pp. 191-200.
7. Qin, T. X., Guo, Y. C., Chan, C. K., and Lin, W. Y., 2006, Numerical investigation of smoke exhaust mechanism in a gymnasium under fire scenarios, *Building and Environment*, Vol. 41, No. 9, pp. 1203-1213.
8. Xu, J., Zhang, C., Zhao, J., Chen, Q., and Wu, J., 2013, The study on influence factors of the mechanical smoke evacuation system in atrium buildings, *Procedia Engineering*, Vol. 52, pp. 508-513.
9. Berglund, R., 1995, Effective ventilation during plating-capture efficiency for rim exhausts, *Metal Finishing*, Vol. 93, pp. 79-83.
10. ASHRAE, 2013, ASHRAE Handbook-Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
11. Han, H. T. and Kang, Y. M., 2001, A study on the capture efficiency of kitchen exhaust system with make up airflow configurations, *Proceedings of the SAREK Winter Conference*, pp. 594-599.
12. Gao, J., Cao, C., Xiao, Q., Zhou, X., and Zhang, X., 2013, Determination of dynamics intake fraction of cooking-generated particles in the kitchen, *Building and Environment*, Vol. 65, pp. 146-153.
13. Vauquelin, O. and Megret, O., 2002, Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel, *Fire Safety Journal*, Vol. 37, No. 5, pp. 525-533.
14. Gutierrez-Montes, C., Sanmiguel-Rojas, E., Kaiser, A. S., and Viedma, A., 2008, Numerical model and validation experiments of atrium enclosure fire in a new fire test facility, *Building and Environment*, Vol. 43, No. 11, pp. 1912-1928.
15. Gutierrez-Montes, C., Sanmiguel-Rojas, E., and Viedma, A., 2010, Influence of different make-up air configurations on the fire-induced conditions in an atrium, *Building and Environment*, Vol. 45, No. 11, pp. 2458-2472.
16. Sandberg, M. and Sjöberg, M., 1983, The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms, *Building and Environment*, Vol. 18, No. 4, pp. 181-197.