

화재 발생시 환기방식에 따른 지하공동구내 열유동 특성 연구

김홍식[†] · 황인주^{*} · 김윤제^{**}

Characteristics of Fire-induced Thermal-Flowfields in an Underground Utility Tunnel with Ventilation

H.-S. Kim[†], I.-J. Hwang^{*} and Youn J. Kim^{**}

Key Words : Underground utility tunnel systems (지하공동구), Volumetric heat source (체적 열원, VHS), Flow pattern (유동 형태), Temperature distribution (온도분포).

Abstract

The underground utility tunnels are important facility as a mainstay of country because of communication developments. The communication and electrical duct banks as well as various utility lines for urban life are installed in the underground utility tunnel systems. If a fire breaks out in this life-line tunnel, the function of the city will be discontinued and the huge damages are occurred. In order to improve the safety of life-line tunnel systems and the fire detection, the behaviors of the fire-induced smoke flow and temperature distribution are investigated. In this study we assumed that the fire is occurred at the contact or connection points of cable. Numerical calculations are carried out using different velocity of ventilation in utility tunnel. The fire source is modeled as a volumetric heat source. Three-dimensional flow and thermal characteristics in the underground tunnel are solved by means of FVM (Finite Volume Method) using SIMPLE algorithm and standard κ - ϵ model for Reynolds stress terms. The numerical results of the fire-induced flow characteristics in an underground utility tunnel with different velocity of ventilation are graphically prepared and discussed.

기호설명

T	: 온도
P	: 압력
ρ	: 밀도
C_s	: 연기농도
Sc	: Schmidt 수
C_μ	: 상수 (=0.082)
Q	: 열원
δ_{ij}	: Kronecker 함수
t	: 시간

1. 서론

지하 공동구는 산업화로 인한 도심의 지형적 제약을 극복하여 지하공간을 활용하고, 현대 정보화 사회의 필수적인 인프라 시설을 구축하는데 없어서는 안될 중요한 기반 시설이다. 그러나, 지하라는 지형적 문제로 인해 화재 등의 재난사고가 발생하면 신속하고 효과적인 대처가 곤란하다. 뿐만 아니라 화재 발생시 막대한 재산피해와 시민의 불편이 발생하는 등 사회적인 문제로 확대될 수 있다.

지하 공동구에는 통신과 전력 케이블 뿐만 아니라 고압 스팀 배관, 냉각수 배관, 가정용 상수도 배관, 압축공기 배관, LNG 가스 배관, 공중하수구 등이 분포되어 있다.

특히, 공동구 내 전력 케이블은 연결부 과전류 등의 여러 가지 이유로 과열을 받아 발화될 수

[†] 성균관대학교 대학원

^{*} 한국건설기술연구원 건축설비 및 플랜트연구그룹

^{**} 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjk@skku.ac.kr

TEL : (031)290-7448 FAX : (031)290-5849

있으며, 공동구 내의 케이블 화재 시 그 여파는 이를 이용하는 회사나 각 가정에 심각한 문제를 야기시킬 수 있다.

케이블의 절연재나 피복재는 고분자 화합물로 구성되어 있기 때문에 열에 의해 쉽게 용융/분해될 뿐만 아니라 발화시 쉽게 연소되는 특성이 있다. 따라서, 공동구 내 케이블 화재가 발생하면, 밀폐 공간으로 인하여 불완전 연소에 따른 다량의 연기 및 유독가스가 발생하게 된다.

연기 및 유독가스는 고온기류에 의해 급속하게 확산되고 지상계단이나 환기구로 유입되므로 대피 및 소화활동에 장애요인이 된다. 따라서 화재 발생시 기류, 연기의 유동 특성 및 온도 등의 정확한 예측은 지하 공동구에서의 화재 소화 및 예방 시스템 설계에 매우 중요하다. 많은 연구자들이 발화원, 환기, 배기, 지하공간의 기하학적 특성, 재질 등에 대한 화재 현상을 규명하기 위해 많은 연구를 수행하였다. (1)-(4)

배기에 관한 연구는 Ingason⁽¹⁾ 등이 강제 및 자연배기 장치를 가진 모형실험을 수행하였고 그 결과를 수치해석 결과와 비교하여 터널 화재에 대한 배기구의 수나 강제배기 속도 등의 영향을 파악하였다. Laage 등⁽²⁾은 탄광 화재에 의한 환기 특성을 연구하였으며, 화재 경보 시스템 개발에 반영하였다. Woodburn & Britter⁽³⁾는 화재 발생시 화염 주위 유동에 대한 수치모사를 수행하였는데, 상층부로 흐르는 연기층 길이는 환기 속도, 난류모델, 열원의 크기에 민감하다는 것을 고찰하였다. Lea⁽⁴⁾는 탄광 내 화재 발생 영향을 연구하였는데 발화원 근접 유동을 자세히 조사하기 위해 다차원적인 수치 해석 모델을 이용하였다.

본 연구의 주된 목적은 지하 공동구 내 화재 발생시 환기 속도에 따른 온도 및 연기 분포를 파악하는데 있다. 일반적으로 설계되는 공동구 즉, 직방형 단면을 갖는 공동구를 모델로 하여 수치해석을 수행하였다.

2. 해석 방법

2.1 지배방정식

화재 발생시 고온 공기의 흐름을 예측하는 것은 지하 공동구와 같은 환경에서는 매우 중요하다. 부력을 고려한 난류 유동 해석은 질량, 운동량, 에너지, 그리고 농도 보존 방정식을 이용하였다. 비정상 상태의 지배 방정식을 텐서 형태로 표현하면

다음과 같다.

연속 방정식:

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

운동량 방정식:

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

에너지 방정식:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho C_p u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j}(k + \frac{\mu_t}{\sigma_T})\frac{\partial T}{\partial x_j} + Q, \tag{3}$$

연기 농도:

$$\frac{\partial(\rho C_s)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C_s) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{Sc})\frac{\partial C_s}{\partial x_j} \tag{4}$$

여기서,

$$\tau_{ij} = -(\mu + \mu_t)(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}, \tag{5}$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \tag{6}$$

위 식에서, C_s 는 연기농도를 의미하며, Sc 는 Schmidt 수, C_μ 는 상수 (=0.085), Q 는 열원을 각각 나타낸다. (5)

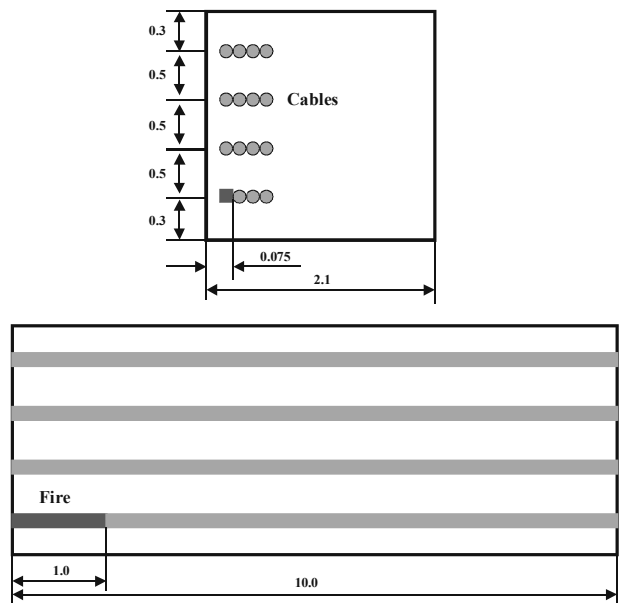


Fig. 1 Schematic diagram of the utility tunnel systems (unit: m) (top: cross-sectional views of utility tunnel; bottom: longitudinal cross-section).

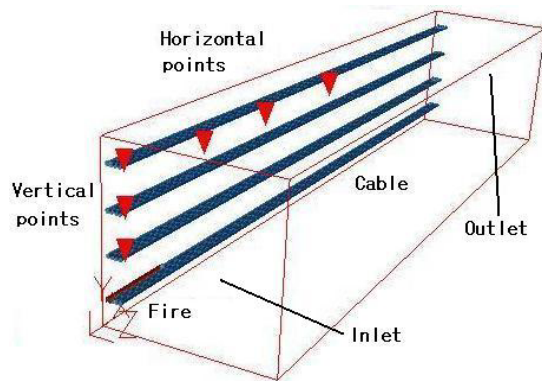


Fig. 2 Temperature measurement points of the underground utility tunnel.

2.2 연소 모델

일반적으로, 대표적인 연소 모델로는 체적 열원 (volumetric heat source, VHS), eddy break-up, 예측률 밀도 함수 (pre-PDF) 모델이 이용된다.

우선, VHS 모델은 화학반응을 고려하지 않는 대신에 가상의 화염과 동일하게 열방출율을 준다. 따라서, VHS 모델은 가장 간단한 화염 모델이고 사용하기 쉽다.⁽⁶⁾ 다음으로, Magnussen & Hjertager⁽⁷⁾ 이 도입하였던 eddy break-up 모델은 각각의 화학 반응율과 혼합된 반응율을 동시에 고려한다. 마지막으로, pre-PDF 모델을 이용하면 혼합 비율을 알 수 있는데, 난류 및 화학반응에 따른 상호작용도 고려할 수 있다. 본 연구에서는, 해석의 단순성을 위해 체적열원(VHS) 모델을 이용하였다.

2.3 수치해석 방법

해석은 상용 코드인 PHOENICS⁽⁵⁾를 사용하였고 비선형 지배 방정식의 해를 구하기 위해 유한 체적법 (finite volume method)으로 지배 방정식을 이산화하였으며, Patankar⁽⁸⁾에 의해 제안된 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 이용하여 해를 구하였다. 그리고 Reynolds 응력항을 계산하기 위해 난류 모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 이용하였고, 대류 및 확산항의 처리는 복합도식(hybrid scheme)을 사용하였으며, 수치해석에 용이하도록 엇갈림 격자계(staggered grid)를 사용하였다.

계산 수렴의 잔여분(residual)은 10^{-4} 보다 작을 때까지 최종 수렴된 해를 구하였으며, 약 250,000 개의 격자를 구성하였는데, 3 배로 증가시켜도 해석결과에는 큰 영향을 미치지 않았다. 수치해석 수렴 시간은 COMPAQ (Intel Pentium IV, Xeon 2GHz

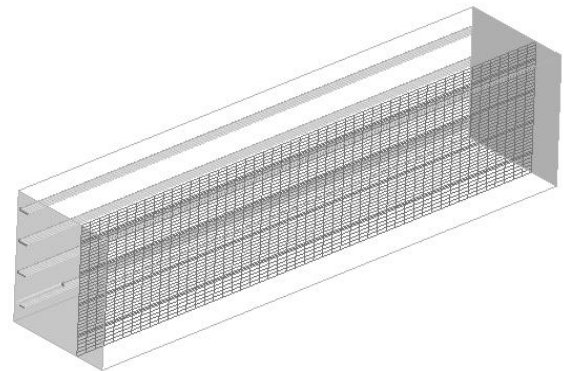


Fig. 3 Grid systems of the underground utility tunnel (50×50×100cells).

of CPU, 1GB memory) 컴퓨터에서 약 10 시간이 소요되었다.

해석대상은 Fig. 1 과 같이 직방형 지하 공동구를 다루었다. Fig. 2 에 도시한 것처럼 지하 공동구 온도측정은 천장의 길이방향으로 3 점과 벽면 수직방향으로 3 점에서 측정하였다. 천장의 3 점은 열원 중앙 위 천장, 열원 중앙에서 2m 떨어진 천장, 그리고 길이 방향 중앙에서 측정하였다. 또한, 벽면의 3 점은 열원 중앙에서 위로 케이블이 있는 벽면을 따라 측정하였다.

Fig. 3 은 지하 공동구 화재 모사에 사용된 50×50×100 개의 격자계를 나타낸다. 모사된 열원은 지하 공동구의 입구 한쪽 벽면 아래에 위치하였고, 열 소스의 열 방출율은 0.05m×0.05m×1.0m 의 공간에 일정하게 4.2MW 를 주었다.

경계 조건으로 입구 조건은 공동구의 전면을 입구로 주었고 출구는 공동구 후면을 출구로 주었다 (Fig. 2 참조). 벽면은 질량 유동이 없는 점착 조건을 주었으며, 벽 근처에는 계산시간을 줄이기 위해 벽함수를 사용하였다. 출구에서는 유동변수를 알기 어렵기 때문에 유선을 따라 모든 유동 변수의 구배가 0 인 Neumann 조건을 주었고 열 소스를 제외한 케이블에는 단열조건을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4 는 케이블 1 단에서 화재가 발생하고, 발화된 후 180 초가 경과했을 때, 발화시간과 환기 속도 변화에 따른 높이방향 (Y 방향)으로의 온도 분포를 나타내었다.

환기 속도가 없을 때, 열원에서 가까운 벽

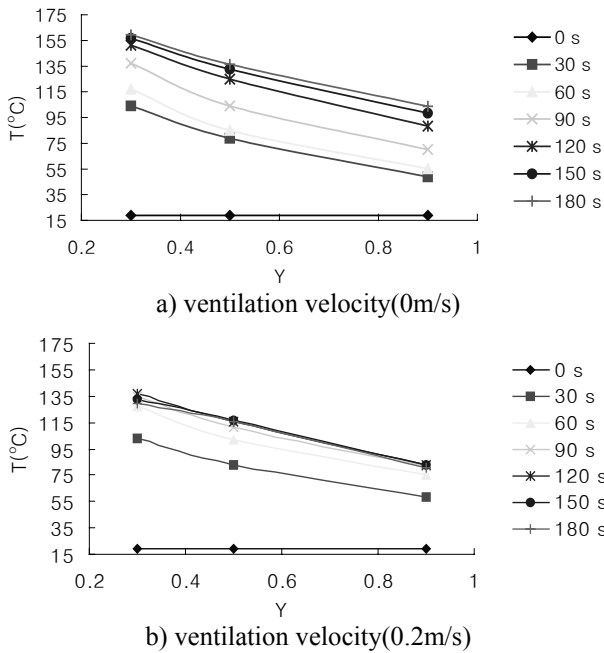


Fig. 4 Temperature variations on the wall along the vertical direction.

(Y=0.3)의 온도는 공동구 내부 온도인 19°C 에서 30 초가 지난 후 100°C 까지 상승하였고, 온도 상승율은 줄어들었지만 180 초가 지난 후 약 160°C 까지 상승하였다. 이는 다른 환기 조건이 없으므로 시간이 지남에 따라 천장에 고온의 기류가 계속 정체됨을 알 수 있다. 또한, 공동구 내부 벽면에서의 높이(Y 방향) 변화에 따른 온도는 점진적으로 낮아짐을 알 수 있었다.

환기속도를 0.2m/s 주었을 때, 열원에서 가까운 벽(Y=0.3)의 온도는 30 초 후 약 105°C까지 상승하였으며, 180 초가 지난 후 약 140°C까지 상승하였다. 하지만, 공동구 전체 온도는 환기 속도가 없을 경우 보다 20°C 정도 낮게 나타났다.

시간이 경과함에 따라 온도가 상승하지만 90 초 이후에는 온도가 시간에 따라 거의 상승되지 않음을 알 수 있는데, 이는 길이 방향의 공동구 내부 환기의 영향때문이라고 할 수 있다. 환기속도가 있을 경우 벽에서의 높이에 따른 온도변화는 높이가 높아질수록 온도가 감소함을 알 수 있었다.

따라서, 온도 감지기를 일정한 환기 속도가 있는 지하 공동구에 설치할 때, 천장에 설치하는 것보다 케이블과 가까운 벽쪽에 설치하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

Fig. 5 는 Fig. 4 와 동일 조건인 케이블 1 단에서 화재가 발생하고, 발화된 후 180 초가 경과했을 때, 발화시간과 환기 속도 변화에 따른 길이방향 (X 방향)으로의 온도분포를 나타낸다.

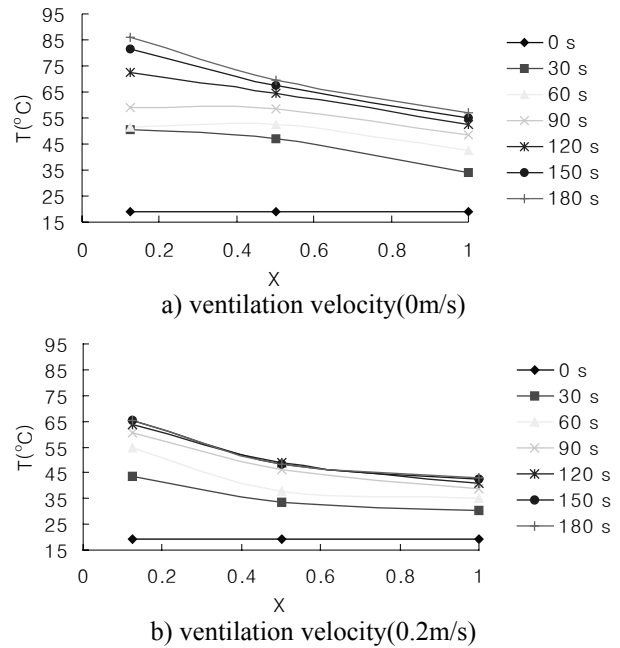


Fig. 5 Temperature variations on the ceiling along the horizontal direction.

환기 속도가 없을 경우, 초기온도 19°C 에서 30 초가 지난 후 열원 상부 중앙의 천장 온도 (X=0.1)가 50°C 까지 상승함을 알 수 있다. 시간이 경과함에 따라 온도 상승율은 줄어들었지만 온도는 지속적으로 상승하여 180 초가 지난 후에는 약 90°C 까지 상승하는 것을 알 수 있다. 열원에서 가장 먼 곳의 경우 (X=1), 시간이 경과함에 따라 온도는 증가하지만 길이방향으로는 지속적으로 온도가 감소하는 것을 알 수 있다.

환기속도가 0.2m/s 일 경우, 30 초가 지난 후에 화염 바로 위에 온도가 45°C가 되었다. 시간 경과에 따라 온도가 상승하지만 120 초 이후에는 온도가 시간에 따라 거의 상승되지 않음을 알 수 있다. 이는 높이 방향과 마찬가지로 환기 속도를 주었기 때문에 길이 방향으로도 일정온도 이상으로는 온도가 상승하지 않은 것으로 사료된다. 이상의 결과로 볼 때, 환기 시설의 설치에 공동구 화재 시 내부의 온도를 낮추는데 도움을 주는 것으로 나타났다.

또한, 길이 방향으로 온도가 급격히 하락하다가 중간지점(X=0.5)부터 완만하게 하락함을 알 수 있다. 이는 환기 영향으로 천장의 고온 기류가 길이방향으로 분산되기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

Fig. 6 은 공동구의 열원 중앙 높이 방향 단면에서의 연기분포 및 기류를 나타낸다. 열원의 위치는 최하단 케이블에서 화재가 발생하는 것으로 경

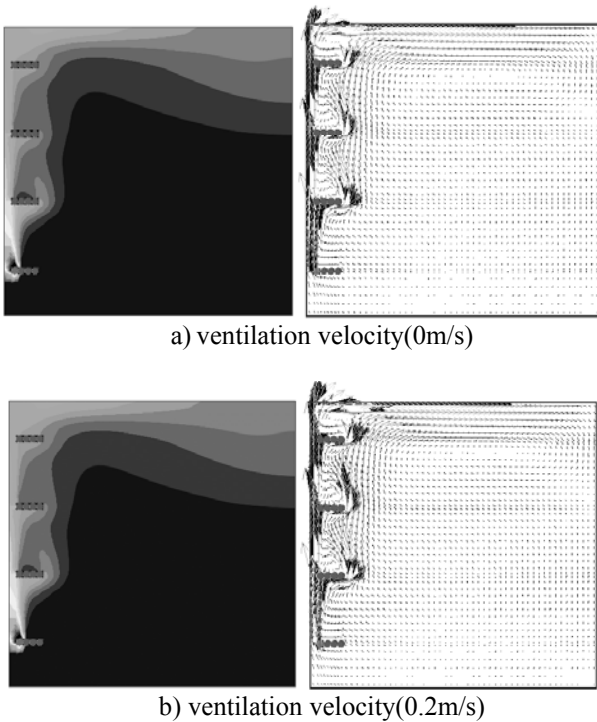


Fig. 6 Distributions of smoke and velocity vector in vertical section (center of heat source) at 180 seconds after ignition.

계조건을 설정하였다.

환기가 없을 때, 연기 분포를 보면, 일부는 케이블에 부딪쳐 타고 돌아서 상승하지만, 주로 벽을 타고 상승하는 것을 알 수 있고, 연기 분포가 천장 중앙 보다 벽쪽에 두껍게 분포하는 것을 알 수 있다. 또한, 기류는 벽쪽에서 가장 빠르게 상승하며 천장 부근에 미소한 순환영역이 나타나는 것을 볼 수 있다.

환기속도가 있을 때는 연기와 기류흐름이 1 단 케이블 벽쪽에서 환기속도가 없을 때 보다 얇게 분포하는 것을 제외하고 거의 유사한 분포를 보이고 있다. Fig. 7 은 열원 중앙의 길이 방향 단면에서 공동구의 연기분포와 기류를 나타낸다.

열원 상부의 연기 분포가 일정하게 천장까지 상승하여 천장에서 출구로 이동하는 것을 알 수 있다. 또한, 케이블의 영향으로 연기 분포가 상부로 가면서 층을 이루고 있다. 기류흐름을 보면 바닥부근에서는 열원방향으로 이동하고, 천장부근에서는 출구방향으로 흐르는 것을 알 수 있다.

환기 속도가 0.2 m/s 일 때, 공동구의 연기분포는 환기 영향으로 화염 위의 연기 분포가 약간 복잡하게 상승하고 있으며, 천장 뿐만 아니라 바닥에서도 연기의 영향을 받아 두껍게 멀리까지 분포하는 것을 알 수 있다. 기류흐름은 환기가 없을 때와 유사한 흐름을 나타냈다.

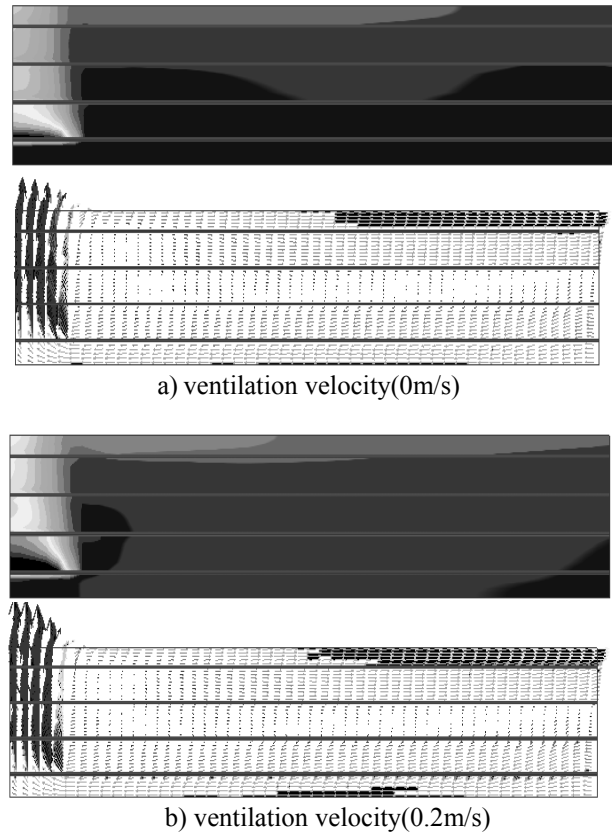


Fig. 7 Distributions of smoke and velocity vector in horizontal section at 180 seconds after ignition.

4. 결 론

본 연구는 다른 환기 조건에서 공동구 내 화재 발생시 온도 분포 및 유동 특성을 수치적 방법을 이용하여 해석하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 시간의 변화에 따라 환기가 없을 경우는 온도가 지속적으로 증가하였고, 환기가 있을 경우는 일정온도 이상으로는 온도가 상승하지 않았다.
- (2) 환기에 상관없이 높이 방향으로는 천장 중앙 보다 벽쪽에 연기가 두껍게 분포하였다.
- (3) 환기가 있을 경우, 길이방향으로는 천장 뿐만 아니라 바닥에도 연기의 영향을 받아서 두껍게 멀리까지 분포하였다.

후 기

본 연구는 한국건설기술연구원의 지원 하에 수행하였으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다

(E-02).

참고문헌

- (1) Ingason, H., Hagglund B., Werling P., 1999, Effects of ventilation on smoke spread in tunnels, Proceeding of the 1st international conference on tunnel fire and one day seminar on escape from tunnels Lyon, France.
- (2) Laage, L., Pomroy, W. and Weber, T., 1987, Computational modeling of the effect of mine-fire-induced ventilation disturbances on stench fire warning system performance, Bureau of Mines, BUMINESIC-9154.
- (3) Woodburn, P. J. and Britter, R. E., 1996, CFD simulation of a tunnel fire-Part I, Fire Safety Journal, Vol. 26, pp. 35 ~ 62.
- (4) Lea, C. J., 1994, Computational modeling of mine fires, Mine Eng. (London), Vol. 154(394), pp. 17 ~ 21.
- (5) PHOENICS, Ver. 3.4, User Manual, 2001, Advanced Computational Technology for Engineering.
- (6) Xue, H., Ho, J. C., and Cheng, Y. M., 2001, Comparison of different combustion models in enclosure fire simulation, Fire Safety Journal, Vol. 36, pp. 37 ~ 54.
- (7) Magnussen, B. F. and Hjertager, B. H., 1976, On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, 16th Int. Symposium on Combustion, Vol. 154(394), pp. 17 ~ 21.
- (8) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Hemisphere, New York.