

지하생활공간 화재시 풍속에 따른 열유동 특성 연구 Experimental Study on Heat Flow According to the Wind Velocity in an Underground Life Space

김영노[†] · 석창목* · 김화중

Young-No Kim[†] · Chang-Mok Suk* · Wha-Jung Kim

경북대학교 공과대학 건축학부, *경북대학교 공과대학 건설학부
(2007. 6. 5. 접수/2007. 9. 18. 채택)

요 약

본 연구에서는 지하생활공간을 대상으로 풍속의 변화에 대한 축소모델 실험을 통하여 열유동 및 화재성상을 분석하였다. 풍속이 증가할수록 화재실의 온도상승 시간은 빨라지고, 실의 온도도 증가하였다. 그리고 풍속이 증가할수록 화재실의 개구부에서 최고온도를 나타내었다. 화재확산에 따른 열유동은 풍속이 증가할수록 와류확산을 촉진시켜 연기발생과 화염의 크기를 증가시키고, 인근실의 내부보다 통로에서 높은 온도분포를 나타내었다. 끝으로 지하생활공간의 화재시 열유동은 풍향과 풍속에 의해 화재확산이 결정되어지고 풍속이 증가할수록 온도증가와 감소는 빠르게 진행됨을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

The purpose of this study analyzes heat flows and fire behavior through a reduced-scale model experiments about change of wind velocity in underground life space. When the wind velocity is increased the temperature rise time of the fire room was risen fast. And temperature of fire room was increased. And increase of wind velocity displayed maximum temperature at an opening of the fire room. Heat flows by fire spread increase size of smoke occurrence and flame, and displayed high temperature distribution in passageway than inside of neighborhood department promoting eddy flow spread as wind velocity increases. Finally, heat flows are decided by wind and wind velocity at fire of underground life space, and Wind velocity increases, temperature increase and decrease could confirm that is gone fast.

Keywords : Underground life space, Reduced-scale experiments, Wind velocity, Heat flow

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

지난 40여 년 동안 우리나라는 산업화의 커다란 조류에 부흥하여 1960년대에는 900만 명이던 도시인구가 2003년에는 4,300만 명으로 약 5배 가까이 증가하여 국민의 90% 정도가 도시에 거주하는 시대를 맞이하게 되었다. 이러한 도시의 과밀화와 평면적인 토지공간의 부족으로 인한 교통의 수요는 지하철 건설에 의한 지하공간의 활용을 증가시키고 있다. 그리고 도시생활권 또한 산업발전과 경제성장으로 인한 생활여

건 변화와 편의성 추구에 따라 급속도로 지하생활권으로 이동하고 있다. 따라서 지하철과 지하상가가 연계된 지하생활공간은 점점 규모가 커지고 복잡, 다양화되어 가는 실정이다.

지하생활공간은 지상시설과 달리 반밀폐 공간이라는 특수성으로 대부분 개구부가 작고 출입구가 한정되어 있어 작은 화재나 폭발이 발생하더라도 대구지하철화재 참사와 유사한 대형 참사로 발전될 가능성이 매우 높다.¹⁾

최근에는 대구지하철화재사고와 같은 대형재난을 경험함으로써 화재 위험성에 대한 인식이 범국민적으로 확산되었고, 지하생활공간의 방재계획은 화재는 물론 테러를 포함한 광범위한 선까지 그 범위를 넓히는 것

[†]E-mail: betavia@knu.ac.kr

이 세계적 추세이며,²⁾ 지하생활공간의 방재 안전을 위한 건축 구조계획, 피난계획, 설비 구성계획 등이 보다 합리적이고 과학적으로 이루어지도록 제도적, 기술적 장치의 보완을 마련하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다.

그러나 지하생활공간에 대한 대부분의 연구는 피난과 설비, 연기유동에 국한되어 있으며, 직접적인 화재성상이나 열유동에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 지하생활공간에 대한 축소실험을 통하여 화재성상과 열유동을 분석하여 화재 초기진압과 성능적 내화설계법의 기초 자료를 제공하는데 목적이 있다.

1.2 연구 범위 및 방법

본 연구에서는 대구에 위치한 중앙지하생활공간을 대상으로 열유동 및 화재성상을 분석하였다. 화재성상 예측시 화재온도나 화재지속시간을 좌우하는 인자인 화재하중 및 풍속을 파악하기 위하여 현장방문을 통하여 가연조건을 조사하고, 실의 용도별 가연조건에 대하여 각 재료의 단위발열량을 이용하여 화재하중을 산정하였다.³⁾ 또한 실험에 사용된 풍속은 유동인구의 변화와 지하철 도착유무에 따라 현장 조사한 풍속을 기본 데이터로 이용하였다.

본 연구에서 선정한 중앙지하생활공간은 지하철 입구와 연계되어 있으며, 지하 1층으로 이루어진 RC조로 판매시설과 부대시설이 모듈화된 단위실의 가변적인 평면으로 구성되어 있는 특징을 가진다. 실의 용도별 화재하중을 조사한 결과 45~204 kg/m²의 다양한 분포를 보였다. 특히 의류판매장은 전체 판매 공간의 20%를 점유하고 있으며, 화재하중은 34~113 kg/m²의 분포를 나타내었다.

중앙지하생활공간은 전체적으로 유동인구가 많은 것이 아니라 의류판매점이 밀집된 구획과 지하철 연계부분만 유동이 많으며 다른 구획은 유동이 많지가 않았다. 지하철 연계부분의 평균풍속은 2.6 m/s 정도 측정되었으며 지하철의 도착유무에 따라 많은 차이를 보였다. 의류판매점이 밀집된 상가지역의 경우 사람의 유동이 많은 시간 때에는 평균풍속이 1.2 m/s 정도 측정되었으며, 유동이 적을 때에는 0.5 m/s 정도의 평균풍속이 측정되었다. 상가지역의 일일 전체 평균 풍속은 0.12 m/s 정도로 측정되었으며 유동인구가 없을 때의 풍속은 0에 가까웠다.

따라서 본 연구에서는 지하철과 연계된 상가지역을 대상으로 통로부분의 풍속의 변화에 따른 공간내부부의 열유동 및 화재성상과 인접실로의 화재확산을 비교 분석한다.

2. 실험

2.1 실험조건 설정

본 실험에서는 의류판매장 중 유동인구가 많은 언더웨어매장을 대상으로 97 kg/m²을 화재하중으로 산정하여 실험하였다. 화원의 위치는 실의 바닥중앙으로 설정하였으며, 가연물은 면섬유를 사용하였다. 섬유의 크기는 콘칼로리미터 기준인 10×10 cm로 잘라서 바닥에 균일하게 배치하였다. 통로부분의 지하철 도착유무와 유동인구의 변화에 의한 풍속은 축소법칙^{4,5)}에 의하여 0.1 m/s, 0.3 m/s, 0.5 m/s, 0.7 m/s, 1.0 m/s의 5가지로 산정하고, 축소모형 내부에 동일 방향으로 작용하는 것으로 실험하였다. Table 1은 축소법칙을 나타낸다.

2.2 실험체 제작

본 연구에서는 화재실의 화재성상과 인근실 및 통로로의 확산을 조사하기 위하여 지하상가의 일정구획을 Table 1의 축소법칙을 적용하여 1/10 축소모델로 제작하였다. 모형의 재료는 두께 15 mm인 석고보드로 제작하였으며 공간 내부의 온도변화를 측정하기 위하여 K-type φ-0.6 mm 열전대를 총 60개소에 설치하였다. Figure 1은 축소모형의 형상과 크기를 나타내며, 그림에서 화살표는 풍향을 나타낸다. Figure 2는 열전대 위치의 상세를 나타낸다. Figure 2의 숫자는 열전대의 위치를 나타내며, 로마체는 층고의 1/3H, 이탤릭체는 층고의 2/3H에 위치한다. 그림에서 ㉔지역은 인근건물 지

Table 1. Scaling law

	Full-scale	Reduced-scale	
Geometry	L	$L'=(1/10) \times L$	0.1L
Caloric Value	Q	$Q'=(L'/L)^{5/2} \times Q$	0.0032Q
Velocity	V	$V'=(L'/L)^{1/2} \times V$	0.3162V
Temperature	θ	$\theta'=\theta$	θ
Time	t	$t'=(L'/L)^{1/2} \times t$	0.3162t

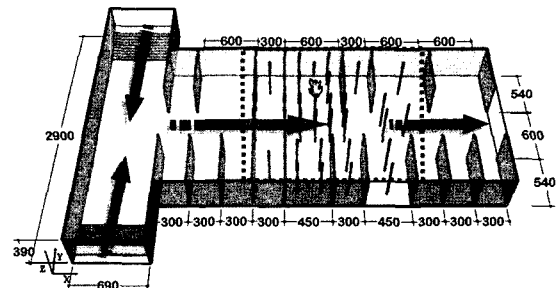


Figure 1. Geometry of the experimental set-up.

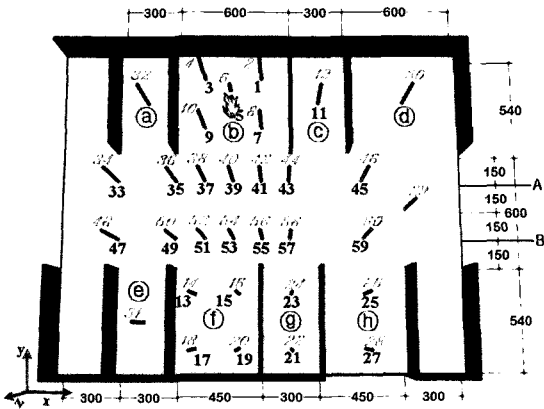


Figure 2. Thermocouple position.

하쇼핑몰의 통로부분이다.

열전대의 배치는 통로 부분과 실내로 구분하여 설치하였다. 화재실과 맞은편 실에는 열전대를 층고의 1/3H와 2/3H 지점에 설치하고, 인근실에는 층고의 2/3H 지점에 설치하였다. 그리고 화원에서 전의되는 열유동과 화염의 확산을 측정하기 위하여 통로부분에는 열전대를 A열 및 B열로 구분하고 각각 층고의 1/3H 지점과 2/3H 지점에 설치하여 시간에 따른 온도변화를 측정하였다. 온도측정 장비로는 National Instrument사의 Data Logger를 사용하였다. Data Logger에 의한 온도 측정은 10회/sec로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 풍속의 변화에 따른 화재성상

지하생활공간의 풍속의 변화에 따른 화재성상을 예측하기 위하여 축소모형실험을 행한 결과는 다음과 같

Table 2. Maximum of average temperature and time

	Wind velocity (m/s)				
	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0
Time	4'25"	4'19"	4'03"	3'15"	2'15"
Temp. (°C)	748.6	858.2	849.4	852.3	873.7

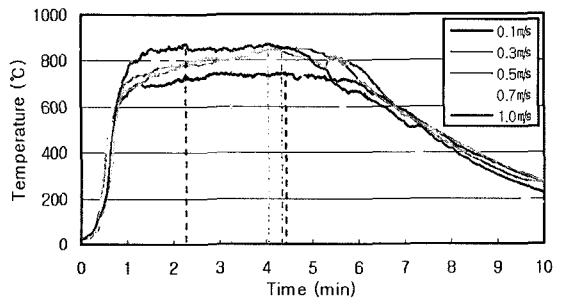


Figure 3. Average temperature-time history.

다. Table 2는 풍속의 변화에 따른 화재실의 평균최고 온도에 도달하는 시간과 온도를 나타내고, Figure 3은 풍속의 변화에 따른 ①화재실의 시간-평균온도 곡선을 나타낸다.

풍속의 변화에 따른 화재실의 평균최고온도와 도달 시간을 살펴보면 풍속이 증가할수록 빠른 시간에 열전체가 평균최고온도에 이르는 것을 알 수 있으며, 풍속이 증가할수록 실의 평균최고온도도 증가하였다.

풍속변화에 따른 화재실 평균온도가 Table 2에 나타난 최고온도에 도달 했을 때의 온도분포를 Figure 4에 나타낸다. 풍속이 0.1 m/s인 경우 층고의 1/3H 지점에서는 화재실의 통로 반대쪽부분 즉, 열전대 3번이 높은 온도를 나타낸 반면 층고의 2/3H 지점에서는 열전대 4번과 6번에서 높은 온도 분포를 나타내었다. 풍속

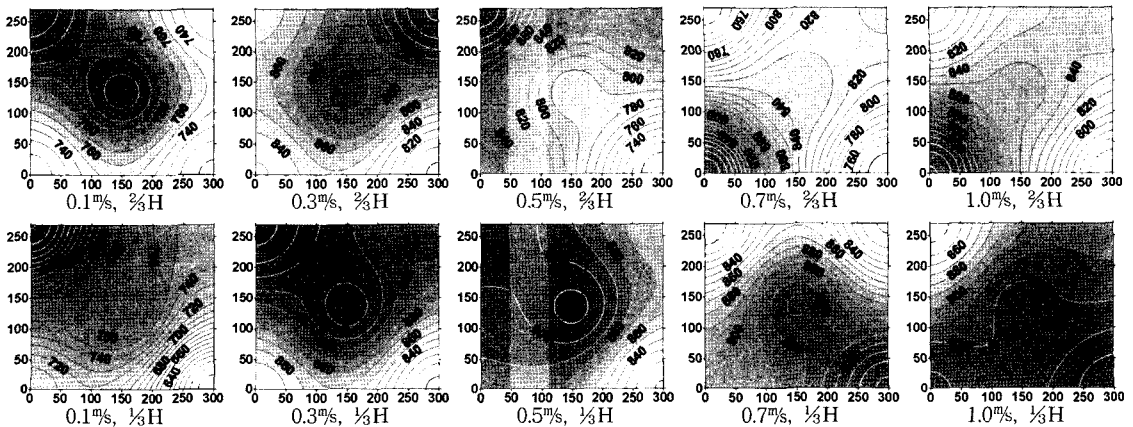


Figure 4. Temperature distribution of fire room at the time of the maximum temperature.

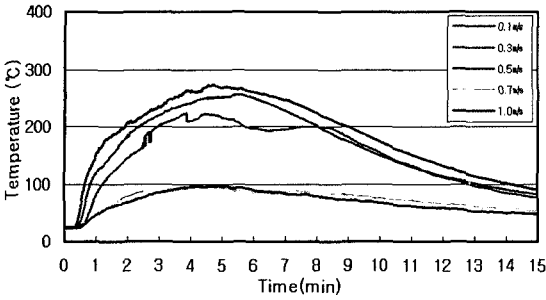


Figure 5. Temperature distribution of ㉓ room.

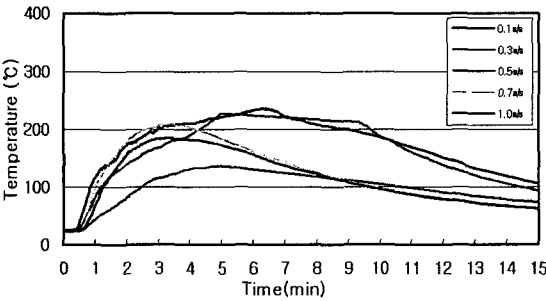


Figure 6. Temperature distribution of ㉔ room.

0.3 m/s인 경우는 열전대 2번, 3번, 5번에서 풍속 0.5 m/s인 경우는 3번, 4번, 5번, 9번에서 높은 온도를 나타내었다. 풍속 0.7 m/s과 1.0 m/s의 경우는 화재실 전체가 높은 온도분포를 나타내며 7번, 10번이 가장 높은 온도를 나타내었다.

이는 풍속이 증가할수록 공기유입에 의한 냉각효과 보다는 와류로 인한 화재의 축진이 화재실 내부의 온도를 상승시키며, 풍향의 반대방향으로 소용돌이치면서 개구부 통하여 급격히 확산됨을 알 수 있다.

풍속의 변화에 따른 화재확산을 분석하기 위하여 인 근실의 풍속의 변화에 따른 온도분포를 Figure 5~Figure 11에 나타낸다. Figure 5는 화재실 옆 ㉓실의 시간-온도곡선이고, Figure 6은 화재실 맞은편 ㉔실의 시간-온도곡선이다. ㉓실의 경우는 풍속이 증가할수록 낮은 온도분포를 나타내고, ㉔실의 경우는 풍속이 증가할수록 빠른 온도 저하를 보이며, 풍속 0.5 m/s의 경우는 전체적으로 낮은 온도분포를 나타내었다.

Figure 7은 풍향방향의 화재실 옆 ㉔실의 평균온도 분포이며, 평균온도는 풍속이 0.3 m/s일 때 가장 높은 온도를 나타내었다. ㉔실의 경우 풍속이 증가할수록 층고의 2/3H 높이인 열전대 12번보다 1/3H인 열전대 11번에서 높은 온도를 나타내었다.

Figure 8은 ㉔실의 시간-온도곡선이다. ㉔실의 경우

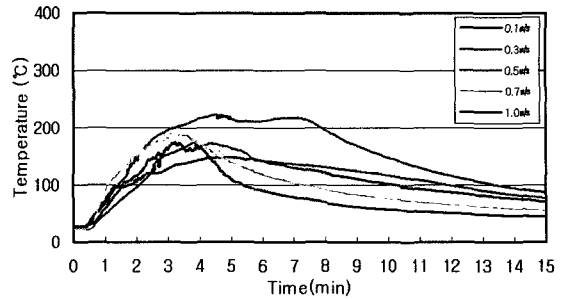


Figure 7. Temperature distribution of ㉔ room.

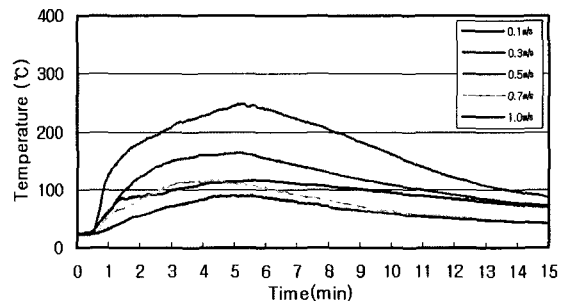


Figure 8. Temperature distribution of ㉕ room.

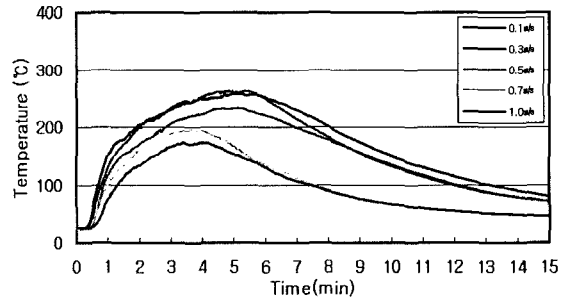


Figure 9. Temperature distribution of ㉖ room.

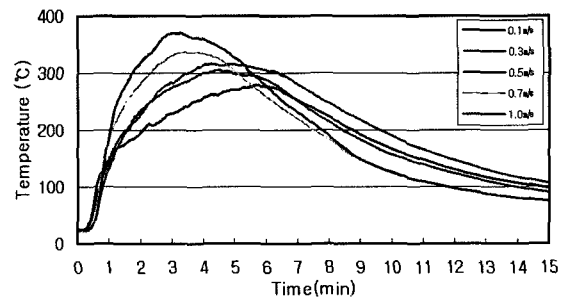


Figure 10. Temperature distribution of ㉗ room.

풍속이 빠를수록 통로를 통하여 빠르게 확산됨으로 실의 내부에는 전체적으로 낮은 온도 분포를 나타내며,

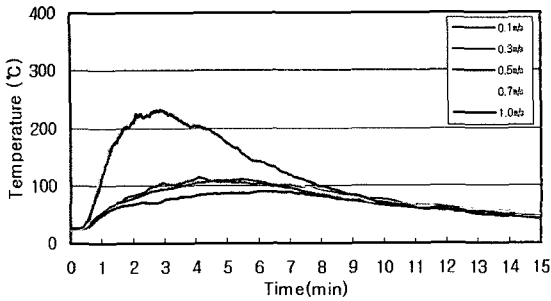


Figure 11. Temperature distribution of ⑪ room.

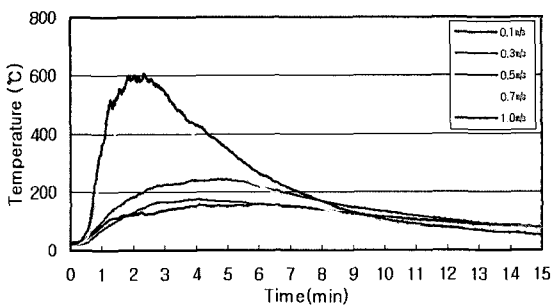


Figure 12. Temperature distribution of thermocouple No.29.

풍속 0.5 m/s의 경우에만 높은 온도 분포를 나타내었다.

Figure 9에서 Figure 11은 화재실의 전면부에 위치한 ①, ⑧실과 인근건물 지하쇼핑몰의 연결부인 ⑪실의 시간-평균온도곡선을 나타낸다. 풍속의 영향으로 화재실에서 풍향의 방향에 위치한 ⑧실이 ①실보다 높은 온도 분포를 나타내었다. 특히 ⑧실의 경우 인근실중에서 가장 높은 온도분포를 나타내었으며, 풍속이 증가할수록 화재초기에 실 전체가 평균최고온도에 도달하며, 실의 평균최고온도도 증가함을 알 수 있었다. 또한, ⑧실의 경우 풍속이 증가할수록 실의 내부보다는 개구부 부근에서 높은 온도분포를 나타내며, 풍속이 증가할수록 층고의 1/3H지점에서 높은 온도를 나타내었다. 이는 풍속이 증가할수록 통로부분을 통하여 1/3H

의 높이에서 풍향의 방향으로 화재확산이 빠르게 진행됨을 알 수 있으며, Figure 12의 열전대 29번의 시간-온도곡선으로 확인할 수 있었다. ⑪실의 경우 풍속 0.7 m/s과 1.0 m/s의 경우에만 초기에 높은 온도를 나타내며 찬공기의 유입으로 빠른 온도 저하를 나타내었다.

3.2 화재확산에 따른 열유동 분포

풍속의 변화에 따른 화재실에서 통로부분으로의 화재확산을 살펴보면, 풍속이 증가할수록 화재실 내부로의 공기유입속도가 증가되어 화원의 성장이 급속하게 이루어지고 이에 따른 부력상승과 외부 풍속의 영향으로 와류확산이 빠르게 증가하였다.

Figure 13은 최성기때의 화재실에서 통로부분으로의 확산을 나타내는 사진이다. 풍속이 증가할수록 화염의 크기가 증가하고, 연기발생 또한 풍속에 비례하여 증가하였다. 특히 풍속 0.7 m/s과 1.0 m/s의 경우는 와류 확산의 영향으로 연기유동이 소용돌이를 이루면서 풍향방향으로 급속히 확산하였다.

Figure 14~Figure 18은 통로부분으로의 화재확산이 최대온도에 도달했을 때, Figure 2의 A 및 B열에 위치한 열전대 위치별 온도를 나타낸다. 그림에서 화재실 전면 중앙을 중심으로 풍향의 방향을 (+) 거리로 나타내고, 층고의 A, B열 각각 1/3H와 2/3H로 구분하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 풍속이 증가할수록

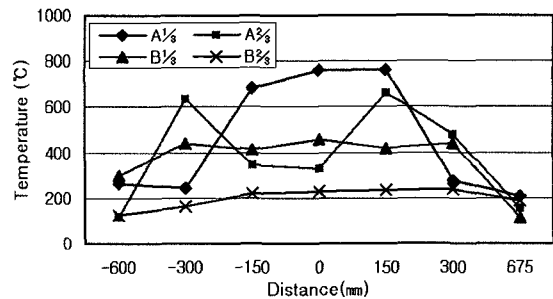


Figure 14. Passageway temperature at 4'4" (0.1 m/s).

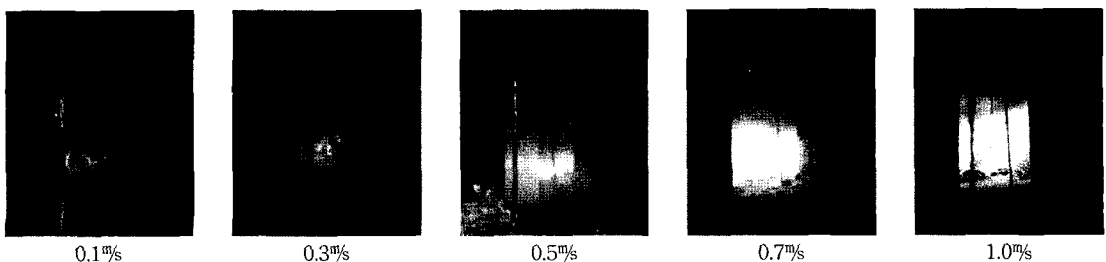


Figure 13. Flame photograph at the time of the maximum temperature.

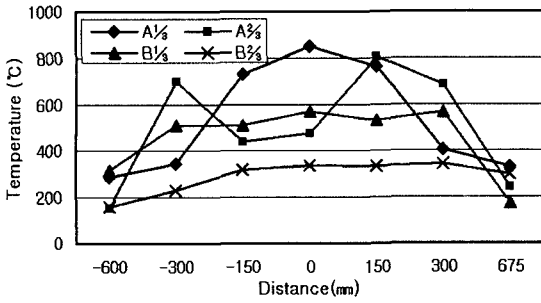


Figure 15. Passageway temperature at 4'40" (0.3 m/s).

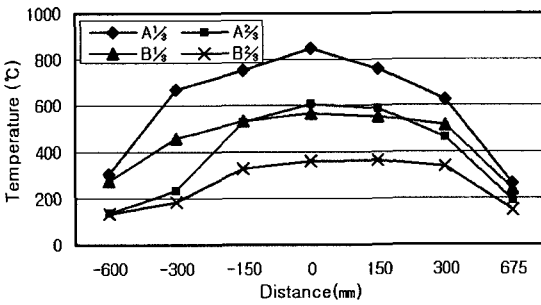


Figure 16. Passageway temperature at 4'08" (0.5 m/s).

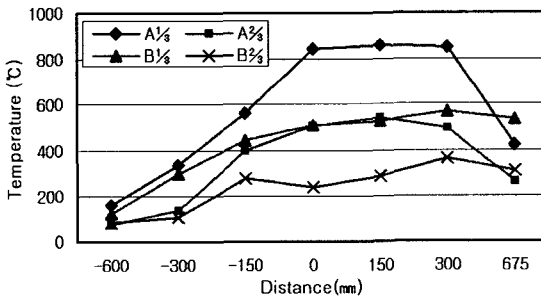


Figure 17. Passageway temperature at 3'48" (0.7 m/s).

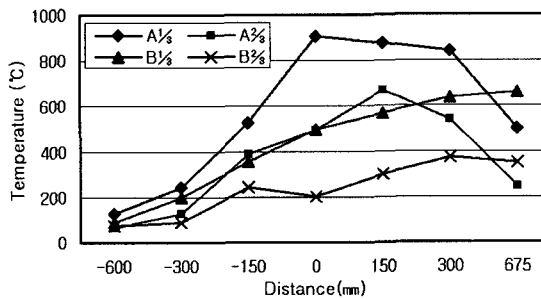


Figure 18. Passageway temperature at 2'24" (1.0 m/s).

통로부분 최대온도 도달 시간은 빠르며, 풍향의 방향으로 높은 온도분포를 나타낸다. 그리고 풍속에 관계

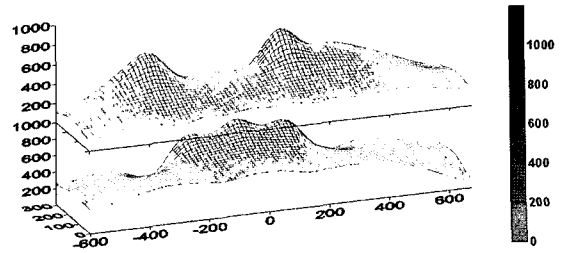


Figure 19. 3D temperature distribution of passageway at 4'44" (0.1 m/s).

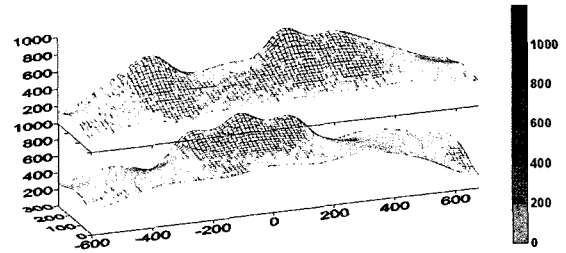


Figure 20. 3D temperature distribution of passageway at 4'40" (0.3 m/s).

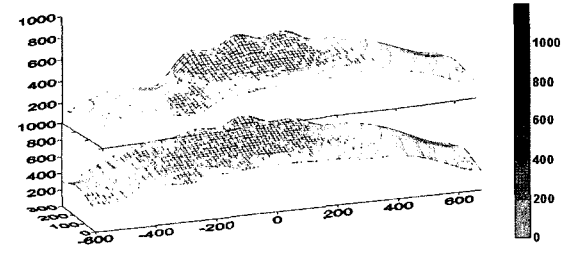


Figure 21. 3D temperature distribution of passageway at 4'08" (0.5 m/s).

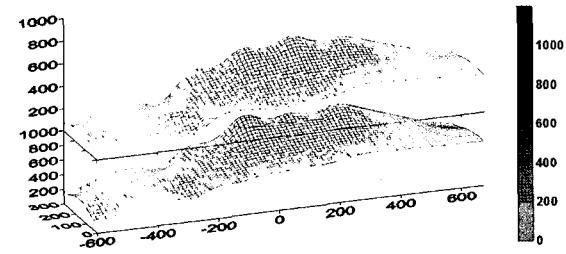


Figure 22. 3D temperature distribution of passageway at 3'48" (0.7 m/s).

없이 A열 1/3H에서 높은 온도분포를 나타내었고, B열 2/3H에서는 가장 낮은 온도분포를 나타내었다.

풍속 0.1 m/s과 0.3 m/s의 경우 개구부 중앙에서는 A 열 1/3H에서 높은 온도를 나타내며, 개구부 양옆에서

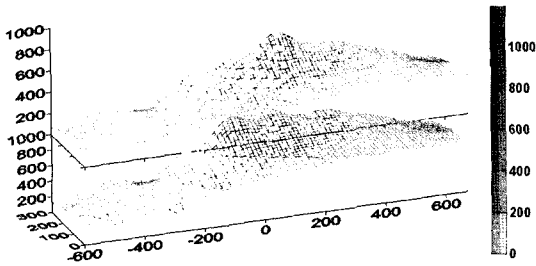


Figure 23. 3D temperature distribution of passageway at 2'24" (1.0 m/s).

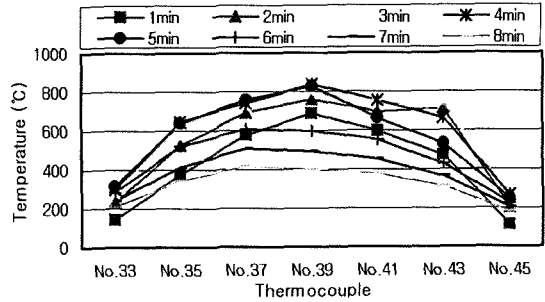


Figure 26. Temperature history of passageway (0.5 m/s).

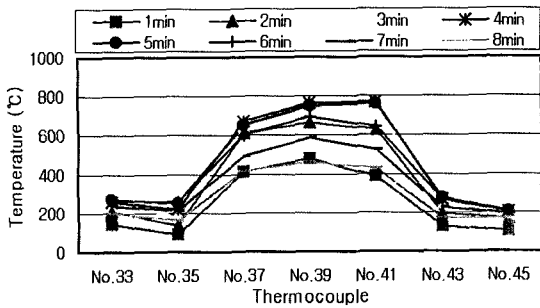


Figure 24. Temperature history of passageway (0.1 m/s).

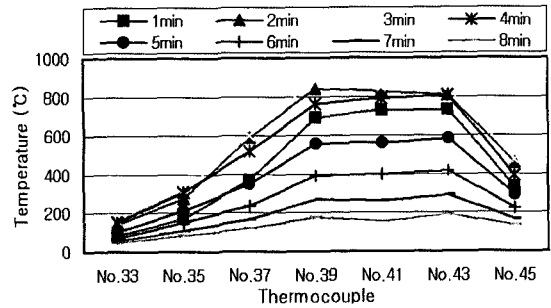


Figure 27. Temperature history of passageway (0.7 m/s).

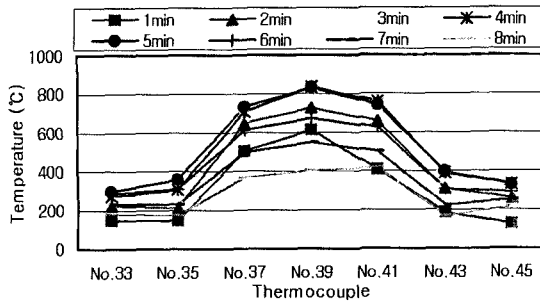


Figure 25. Temperature history of passageway (0.3 m/s).

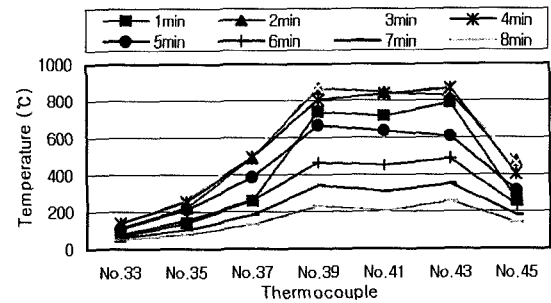


Figure 28. Temperature history of passageway (1.0 m/s).

는 A열 2/3H에서 높은 온도를 나타내었다. 풍속 0.5 m/s의 경우는 개구부 전체에서 A열 1/3H의 높이에서 가장 높은 온도분포를 나타내었다. 풍속 0.7 m/s과 1.0 m/s의 경우는 강한 풍속의 영향으로 풍향의 반대방향으로는 낮은 온도분포를 나타내었으나, 풍향 방향으로는 A열 1/3H에서 높은 온도를 나타내었다. 그리고 풍속이 증가할수록 B열 1/3H높이에서 풍향의 방향으로 뚜렷한 온도증가를 나타내었다.

특히, Figure 19~Figure 23에 나타낸 화재실에서 통로로의 화재확산에 대한 3차원 온도분포를 통하여 풍속이 증가할수록 화재확산은 층고의 1/3H 높이에서 풍향의 방향으로 빠르게 진행됨을 확인할 수 있었다.

Figure 24에서 Figure 28은 풍속의 변화에 따라 가장 높은 온도분포를 나타내는 A열 1/3H에 위치한 열전대의 최성기 전후의 온도분포를 나타낸다. 시간에 따른 열전대별 온도증가는 풍속에 관계없이 5가지 모델이 동일하게 최성기를 전후로 증가하다가 감소하고 있으며, 풍속이 증가할수록 온도증가와 감소가 빠르게 진행된다.

풍속 0.1 m/s과 0.3 m/s의 경우에는 4분 전후에서 화재실 전면부인 열전대 37, 39, 41번에서 높은 온도를 나타내며, 풍속 0.5 m/s의 경우는 화재실내로 공기유입량이 증가하여 연소속도를 증진시킴으로 열전대 39번 화재실 전면부를 중심으로 통로 전체에 높은 온도 증

가를 나타내었다. 그러나 풍속 0.7 m/s과 1.0 m/s의 경우는 풍속의 영향과 와류확산의 영향으로 화재실내 간헐 고온의 기류가 개구부를 통하여 빠르게 확산함으로써 3분대에서 열전대 39, 41, 43번에서 높은 온도증가를 나타내며, 풍향방향의 열전대 45번에서도 400 °C 이상의 높은 온도를 나타내었다.

5. 결 론

지하생활공간의 풍속에 따른 축소실험을 통하여 화재성상과 열유동을 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

풍속이 증가할수록 화재실의 온도상승 시간은 빨라지고, 실의 최고평균온도도 증가하였다. 그리고 풍속이 증가할수록 화재실의 개구부에서 최고온도를 나타내었다.

화재확산에 따른 열유동은 풍속이 증가할수록 와류확산을 촉진시켜 연기발생과 화염의 크기를 증가시키고, 층고의 1/3H 높이에서 빠르게 확산함으로써 풍향의 방향으로 온도를 급속히 증가시켰다.

인근실의 온도분포는 풍속에 관계없이 화재실 맞은편 풍향의 방향에 위치한 실에서 가장 높은 온도를 나타내었고, 풍속이 증가할수록 온도증가와 감소가 빠르게 진행되었다. 특히 풍속이 증가할수록 인근실의 내부보다 통로부분에서 높은 온도분포를 나타내었다.

끝으로 지하생활공간의 화재시 열유동은 풍향과 풍속에 의해 화재 확산이 결정됨을 확인할 수 있었으며, 추후 지하철 도착유무에 따른 변동풍속에 대한 화재성상의 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개

발사업인 “지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업”(03산학연C03-03)에 의한 것임.

참고문헌

1. “대구지하철 중앙로역 화재사고백서”, 대구광역시 (2005).
2. William A. Swansiger, “Defending Subways Against Chem-Bio Terrorism”, Sandia Report SAND98-8210, Sandia National Laboratories(1997).
3. 추연희, “건축물의 가연조건에 따른 화재성상 예측 연구”, 경북대학교 대학원 박사학위논문(2002).
4. 류승관, 김충익, 유홍선, “아트리움 공간에서의 화재성상에 관한 축소모델 실험연구”, 한국화재소방학회 논문지, 제13권, 제4호, pp.30-37(1999).
5. 辻本 誠, 奥宮正哉 外, “一部に開口のある空間での煙流動の關する模型實驗”, 日本建築學會 構造系論文集, 第488號, pp.153-160(1996).
6. Nelson P. Bryner, Erik L. Johnsson, and William M. Pitts, “Scaling Compartment Fires-reduced and Full-Scale Enclosure Burns”, International Conference on Fire Research and Engineering, pp.9-15(1995).
7. Ken Matsuyama and Takashi Fujita, “A Simple Predictive Method for Room Fire Behavior”, Fire Science & Technology, Vol. 18, No. 1, pp.23-32 (1998).
8. Leonard Y. Cooper, “Smoke Movement in Rooms of Fire Involvement and Adjacent Spaces”, Fire Safety Journal, Vol. 7, No. 11, pp.33-36(1984).
9. 장희철, 김태국, 박원희, 김동현, “지하역사에서 화재 발생시 자연풍 및 강제배연의 유무에 따른 열 및 연기거동 특성 연구”, 한국화재소방학회 논문지, 제19권, 제1호, pp.802-86(2005).
10. G. S. T. Armer and T. O'Dell, “Fire, Static and Dynamic Tests of Building Structures”, E&FN SPON(1997).