

구획 화재 시 벽면의 열적 특성을 고려한 온도분포 해석결과

유우준¹, 고권현^{2*}

¹동양대학교 건축소방안전학과, ²동양대학교 안전공학과

Numerical Analysis of the Temperature Distribution Considering the Wall Thermal Conductivity in Compartment Fire

Woo Jun You¹, Kwon Hyun Ko^{2*}

¹Department of Architecture & Fire Safety, Dong-Yang University

²Department of Safety Engineering, Dong-Yang University

요약 본 연구에서는 구획 공간에서 가솔린 화재 시 내벽의 열전도 계수 변화에 따른 열유동 현상에 관한 기초 연구를 수행하였다. 이를 위해서 내벽의 열전도 계수가 0.18 W/m·K인 내화보드의 재질로 구성된 가로 0.4 m, 세로 0.6 m, 높이 0.6 m인 축소된 구획공간을 제작하였으며, 개구부 면적이 0.12 m²이고 연료 팬의 크기가 0.01 m²인 조건에서 가솔린 화재실험을 수행하여 높이 0.37 m 국부지점의 온도와 총괄 발열량을 산출하였다. 벽면 열전도 계수 변화가 구획 공간 내부의 온도 분포에 미치는 영향을 분석하기 위해서 화재해석 프로그램인 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 사용하여 동일한 발열량 조건에서 온도분포 측정값과 해석결과를 비교하였다. 그 결과 최대 발열량이 4.8 kW인 정상상태 구간에서 온도분포 예측 값이 10% 이내로 일치하는 것을 확인하였으며, 벽면 열전도 계수가 0.1 W/m·K에서부터 100 W/m·K까지 증가한 결과 벽면의 평균 온도는 약 71% 정도 감소되는 것으로 예측되었다.

Abstract This study examined effects of the wall thermal conductivity coefficients on the thermal fluid phenomenon of a compartment fire. The reduced scale compartment was 0.4 m in width, 0.6 m in length and 0.6 m in height with a fire-board, which has a thermal conductivity coefficient of 0.18 W/m·K. The local temperature at a 0.37 m height and the overall heat release rate were measured under the following experiment conditions: a 0.12 m² opening area and 0.01 m² pool size of a gasoline fire. The numerical results obtained by the Fire Dynamic Simulation were compared with the experimentally measured temperature. The deviations were within 10% in the period of the steady state for maximum heat release rate (4.8 kW). The numerical results show that the average temperature of the compartment wall decreases by approximately 71% with increasing thermal conductivity coefficient from 0.1 W/m·K to 100.0 W/m·K on the fixed heat release rate.

Keywords : Compartment Fire, Thermal Conductivity Coefficient, Fire Board, Heat Release Rate, Temperature Distributions

1. 서론

구획 공간 화재 확산은 최초 발화지점에서 열원에 의

해 인접 가연물의 표면으로 대류 및 복사열이 전달되어 발생하게 된다[1-3]. 표면에 전달된 열은 전도에 의해서 고체 가연물을 기화시키고 주변의 산화제와 가연성 기체

본 논문은 2015, 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2015RID1A1A01057176 및 2018R1C1B5045686)입니다. 이에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Kwon Hyun Ko(Dong-Yang Univ.)

Tel: +82-10-8438-5265 email: kogh@dyu.ac.kr

Received October 29, 2018

Revised December 12, 2018

Accepted February 1, 2019

Published February 28, 2019

가 화학반응을 일으키면서 인접 가연물이 연소되기 때문에 건축물을 구획하는 외벽은 화재 확산을 억제하기 위해서 내화성능이 있는 재료를 사용하고 있다. 하지만 내벽의 열전도 계수가 낮은 재료의 경우 화재가 지속될수록 벽면 온도가 상승하여 복사 열전달에 의한 내부 가연물이 급격히 발화될 수 있는 조건을 형성해 줄 수 있다 [3-5]. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 내벽의 열전도 계수가 높은 재료를 사용하게 되면 여름이나 겨울철 주위 온도에 의한 영향을 쉽게 받게 된다[3]. 따라서 내벽의 열적 특성을 고려하여 구획 공간의 화재확산 현상을 분석하는 것은 건축물의 에너지 손실뿐만 아니라 적정 소화설비를 설계하는데 중요한 연구 중 하나이다.

구획 공간의 화재 특성을 분석한 기존 연구 사례로 Beyer[6]는 점화 지수를 정의하여 상부와 하부의 계면에서 기화된 연료가 점화되는 정도를 예측하기 위한 연구를 수행하였다. Thomas and Heselden[7]은 구획 공간에서 점화원 연료의 연소율을 예측하기 위해서 개구부의 면적과 높이 그리고 구획공간의 면적을 고려한 이론식을 제시한 바 있다. Walton and Thomas[8]은 구획 공간에서 내부의 구조 및 특성, 가연물의 점화원, 플래시오버 등을 고려하여 가연물이 연소함에 따라 발생하는 공간 온도분포를 예측하기 위한 연구를 수행한 바 있다. 기존 연구사례에서 보듯이 구획 화재 특성은 화재공학 분야에서 주요 관심 주제중 하나이며, 본 연구에서는 벽면의 열전도 계수 변화에 따른 구획 공간 내부 온도 분포에 관한 기초 연구를 수행하고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험방법

Fig. 1은 열전도 계수가 0.18 W/m·K인 내화보드의 재질로 구성된 구조물과 콘 칼로리미터 실험장치의 개략도이다. 그림에서 보듯이 화원의 크기는 한 번의 길이가 10 cm인 정사각형의 연료 팬을 사용하였으며, 가솔린(Gasoline) 화재 시 발생하는 열원에 의한 발열량과 높이 0.37 m인 지점에서 온도를 측정하였다. Table 1에 본 연구를 위해서 구성된 실험장치의 주요 사양을 나타내었다.

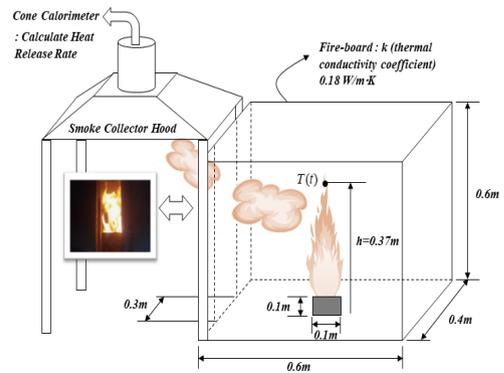


Fig. 1. Schematic diagram of the experiment in a cone calorimeter.

2.2 실험결과

Fig. 2은 시간 변화에 따라서 발열량 측정값을 나타낸 것으로 35초~150초 사이의 구간에서 발열량은 평균 4.8 kW 정도로 정상상태 조건에 도달하는 것을 확인할 수 있으며, 150초에서 200초 사이에는 발열량이 감소하는 것으로 나타났다. 화원의 연소 면적이 동일함에도 불구하고 발열량이 감소한 이유는 연소가 진행됨에 따라서 내부 산소 농도가 감소하여 미 연소된 상태의 연소 생성물이 보다 많이 발생한 것으로 사료된다. 또한, 본 연구에서 발열량을 측정할 콘 칼로리미터의 경우 덕트 형상 인자 등으로 인해서 측정 불확도는 $\pm 12.5\%$ 정도로 신뢰도가 낮기 때문에 정확한 발열량을 산출하기 위해서는 향후 실험장치의 개선이 필요한 상태이다. 하지만, 본 연구의 경우 벽면 열전도 계수의 변화에 따른 구획 공간 내부 온도분포를 분석하는데 주요 목적이 있으며, 발열량 측정값을 해석 조건에 적용하고 동일한 지점에서의 온도 측정값을 비교하여 정확성을 검토한 후 열전도 계수 변화에 따른 내벽의 온도분포 해석 결과를 분석하고자 한다.

2.3 수치해석 검증

벽면의 열전도계수가 화재특성에 미치는 영향을 분석하기 위해서 미국의 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator) 해석 프로그램 Ver 6.5를 이용하였다. FDS는 화재 공학 분야에서 범용화된 해석 프로그램으로 LES(Large Eddy Simulation)를 적용하여 화재에 의한 난류 유동장을 분석하고 있으며[9], 해석공간의 격자 크

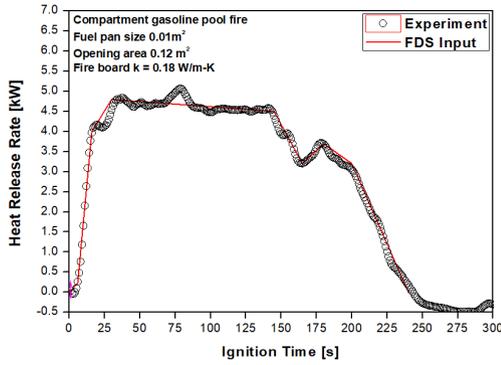


Fig. 2. Heat release rate vs ignition time for gasoline pool fire.

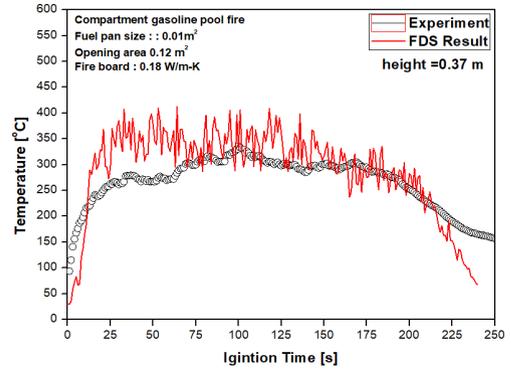


Fig. 3. Heat release rate vs time for pool area = 0.01 m².

Table 2. Test results of grid independence

Test Num.	Grid Size [m]	Calculation Time [hour]	h=0.37m Temperature [°C]
Test 1	0.010 m	120.55	329.46 °C
Test 2	0.015 m	24.30	330.70 °C
Test 3	0.020 m	7.20	301.56 °C
Test 4	0.030 m	2.16	278.84 °C

기를 선정하기 위해서 특성화재 직경을 고려하여 단위격자의 크기변화에 따른 화원상부 높이 0.37 m에서 연소 시간 75초부터 175초 구간의 평균 온도 측정값인 304.3 °C와 비교하였다. 그 결과 격자 크기가 0.020 m 보다 작은 경우(0.015m, 0.010 m) 높이 h=0.37 m인 지점에서의 평균 온도값은 약 330 °C 정도로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 본 연구의 경우 해석 시간을 고려하여 격자의 크기를 0.015 m로 정하였으며, Table 2에 결과를 나타 내었다.

Fig. 3은 격자 의존성 평가를 통해 도출된 단위격자의 크기 0.015 m일 때 화원상부(h=0.37 m)에서의 온도 측정 결과와 해석 결과를 비교한 것으로 해석시간 25초 이후 150초 구간까지 화원상부의 천정온도는 약 330 °C

정도로 실험 결과보다 약 30 °C 더 높게 예측되었다. 하지만, 해석시간 150초 이후의 온도는 실험 측정 값과 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 약 210초 이후 보다 빠르게 대기의 온도로 감소하여 약 10 % 정도 실험 측정 값과 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 반복 실험에 의한 내화 보드 재질의 물성 및 누설 틈새 변화 그리고 해석 모델의 경계 조건과 실제 환경 조건에 따라서 해석 결과의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 또한, 측정값에 비해서 해석결과 편차가 더욱 큰 이유는 본 연구에서 사용한 FDS의 경우 explicit의 해석 기법으로 time step에 대한 시간 증가분에 대해서 수렴 조건 범위에서 반복 계산을 하지 않고 격자의 크기와 시간 간격 그리고 유속의 크기에 의해서 계산되는 CFL(Courant - Friedrichs - Lewy)에 따라서 유동장을 계산하기 때문에 나타난 결과이다.

2.4 수치해석 조건

FDS의 해석 모델은 벽면에서의 대류 및 전도열을 계산하기 위해서 열전달 관계식의 함수를 호출하고 벽면의 격자 두께를 고려할 수 있도록 구성되어 있다. 또한, 대

Table 3. FDS Variables : Thermal conductivity coefficient, HRR, Fuel and material properties

Num	k [W/m·K]	History of HRR		Fuel [10]	Materials & Properties
		Time [s]	HRRPUA [kW/m ²]		
#1	0.1			Gasoline (C8H18) Heat of Combustion 43,700 kJ/kg Soot Yield 0.038 g/g CO Yield 0.011 g/g	FIRE_BOARD · SPECIFIC_HEAT = 1.13 kJ/kg·K · DENSITY = 250 kg/m ³ WALL_INCREMENT=1 CHECK_HT=TRUE. THICKEN_OBSTRUCTIONS=TRUE. BACKING='EXPOSED'
#2	1.0	0	0.00		
#3	10.0	30	480.0		
#4	50.0	50	480.0		
#5	100.0	80	0.00		

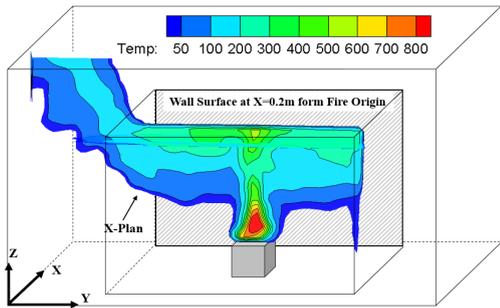


Fig. 4. Temperature contour in 3 dimensional for fixed heat release rate(4.8kW).

류 열전달 계수는 수직 벽면의 형상과 격자의 크기를 고려해서 고체 표면과 물질 정보 각각에 열전달 함수를 계산하도록 명령어를 적용하여야 한다[10]. 따라서 본 연구에서는 구획공간의 벽면 및 내부 온도분포를 분석하기 위해서 실험 조건과 동일한 구조물을 모델링 하였으며, 3.1절의 결과로부터 총 해석 시간을 80초로 정하여 Table 3과 같이 해석 조건을 나타내었으며, 해석결과와의 분석은 Fig. 3에서 보듯이 발열량이 정상상태에 도달한 이후인 50초로 정하였다.

2.5 수치해석 결과

Fig. 4는 발열량이 4.8 kW이고 열전도계수의 값이 0.1 W/m·K인 경우 해석시간 50초에서 화원 중심의 온도 분포 해석 결과를 나타낸 결과이다. 그림에서 보듯이 화원 위쪽 면에서 기화된 가연물과 산화제가 만나는 화염경계층이 형성되어 온도가 800 °C 이상 정도로 계산되었으며, 상층부로 올라갈수록 온도가 감소한 이후 천장 상부에서 다시 500 °C 이상의 열원이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 천장 상부 벽면에서 제트 유동에 의한 대류 열전달이 보다 높게 형성되어 그 하층부에서 열이 축적되고 벽면의 경계 조건에 수렴하면서 나타나는 결과로 판단된다.

Fig. 5는 발열량이 4.8 kW이고 열전달계수의 값이 0.1 W/m·K인 경우 해석시간 50초에서 화원 중심으로부터 x축 방향으로 0.2 m 떨어진 벽면에서 온도분포 변화를 나타낸 결과이다. 연료와 산화제가 만나는 화염 경계 층 영역으로 예측되는 높이 약 0.2 m에서 벽면의 온도가 140 °C 이상으로 가장 높게 분포된 것으로 예측되었으며, 반경방향으로 비례하여 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 화원 주위에서의 온도는 가연물의 연소율에 가장 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 본 연구에서

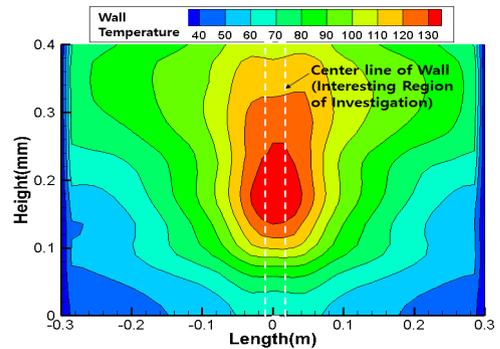


Fig. 5. Contour of wall temperature at $k=0.1$ W/m·K for at 4.8 kW heat release rate.

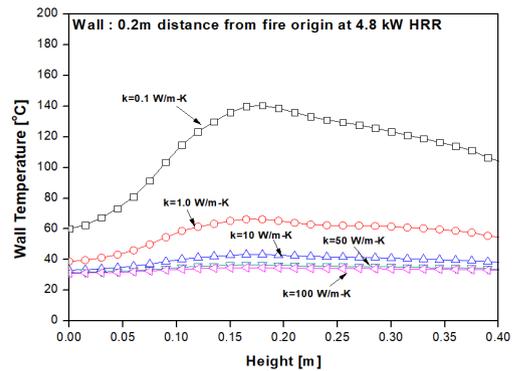


Fig. 6. The effects of $k(0.1, 1.0, 10.0, 50.0$ and 100 W/m·K) on the wall temperature distribution from 0.2m distance from the fire origin for fixed heat release rate.

는 벽면의 열전도 계수와 벽면 온도의 상관관계를 분석하였다.

Fig. 6은 해석시간 50초에서 Table 3의 조건을 이용하여 발열량이 4.8 kW이고 벽면 열전도 계수의 값이 0.1, 1.0, 10, 50 그리고 100 W/m·K 각각의 경우 화원 중심으로부터 x축 방향으로 0.2 m 떨어진 벽면에서의 평균 온도를 나타낸 결과이다. 그림에서 보듯이 열전도 계수의 값이 0.1 W/m·K에서 1.0 W/m·K로 10배 증가하는 경우 벽면의 최대 온도는 140 °C에서 60 °C 정도로 약 2.3배 정도 감소하여 편차가 가장 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 그 이후 열전도 계수가 100 W/m·K까지 상승하는 동안 온도 감소율은 최대 71 % 정도로 예측되었다. 하지만, 화원의 열원 크기에 따른 벽면 온도분포의 상관관계를 보다 정확히 예측하기 위해서는 벽면 소재 및 주위 온도 변화를 고려한 대류 열전달을 분석한 실험 연구가 선행되어야 할 것으로 사료된다.

3. 결론

본 연구에서는 화재 해석 프로그램인 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 사용하여 구획 공간에서 가솔린 화재 시 내벽의 열전도 계수 변화에 따른 열유동 현상에 관한 기초 연구를 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 사항을 분석하였다.

첫째, 내벽의 열전도 계수가 0.18 W/m·K인 내화보드의 재질로 구성된 가로 0.4 m, 세로 0.6 m, 높이 0.6 m 인 축소된 구획공간을 제작하여 개구부 면적이 0.12 m² 이고 연료 팬의 크기가 0.01 m²인 조건에서 가솔린 화재 실험을 수행한 결과 총괄 발열량은 약 4.8kW 정도로 산출되었다.

둘째, 실험 결과에서 구한 시간 변화에 따른 발열량을 FDS의 입력값으로 하여 동일한 실험 조건에서 온도분포 측정값과 해석결과를 비교한 결과 최대 발열량이 4.8 kW인 정상상태인 구간에서 높이 0.37 m 지점의 평균 온도는 330 °C 정도로 실험 측정값인 300 °C 보다 10 % 정도 높게 나타나는 것을 확인하였다.

셋째, 해석 결과의 정확성을 검토한 이후 발열량이 4.8 kW인 조건에 대해서 벽면 열전도 계수가 0.1, 1.0, 10, 50, 100 W/m·K 각각의 벽면의 온도를 산출하였으며, 그 결과 열전도 계수 값이 증가함에 따라서 온도 편차는 약 71% 정도 감소하는 것으로 계산되었다.

하지만 열원 크기에 따른 벽면 온도분포의 상관관계를 보다 정확히 예측하기 위해서는 다양한 소재를 사용하여 대류 열전달 계수를 고려한 벽면 온도의 실험 측정 결과를 분석해야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] S. Y. Mun, C. H. Park, C. H. Hwang and S. H. Park, "Effects of the Geometry and Location of an Vertical Opening on the Fire Characteristics in the Under-Ventilated Compartment Fire", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 27, No. 3, pp. 20-29 (2013).
- [2] W. J. You and G. H. Ko, Investigation of the Relationship Between Wall Thermal Conductivity and Inner Room Temperature in Compartment Fires, *Fire Sci. Eng.*, Vol. 32, No. 2, pp. 7-13, (2018).
- [3] L. Bergman, Theodore and P. Frank, "Incropera. Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons (2011).

- [4] M. Foley, "The use of Small Scale Fire Test Data for the Hazard Assessment of Bulk Materials", Ph.D Thesis, University of Edinburgh (1995).
- [5] J. G. Quintiere, "Scaling Application in Fire Research", *Fire Safety Journal*, Vol. 15, pp. 3-29 (1989).
- [6] C. L. Beyler, "Ignition and Burning of a Layer of Incomplete Combustion Products," *Combustion Science and Technology*, 39, pp. 287 - 303 (1984).
- [7] P. H. Thomas and A. J. M. Heselden, "Fully Developed Fires in Compartments," CIB Report No. 20; Fire Research Note No. 923, Conseil International du Batiment, France (1972).
- [8] W. D. Walton and P. H. Thomas, "Estimating Temperatures in Compartment Fires," in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed. (P.J. Di Nenzo et al., eds.) pp. 3.171 - 3.188 (Society of Fire Protection Engineers, Boston, 2002).
- [9] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator User's Guide", NIST Special Publication 1019, 6th Edition (2015).
- [10] J. DiNenzo, Philip, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", SFPE (2008).

유 우 준(Woo Jun You)

[정회원]



- 2007년 12월 ~ 2016년 6월 : 한국 연구소 시험인증 및 연구
- 2017년 3월 ~ 현재 : 동양대학교 건축소방안전학과 교수

<관심분야>

다공성 매질의 열전달 현상 및 가연물의 연소 특성 분석

고 권 현(Kwon Hyun Ko)

[정회원]



- 2008년 ~ 2009년 : 중앙대학교 기계공학부 BK21 연구교수
- 2010년 3월 ~ 현재 : 동양대학교 건축소방안전학과 교수

<관심분야>

전산유체해석, 안전공학 설계