

[Research Paper]

구획화재에서 벽면의 열전도 계수와 내부 온도의 상관관계 분석

유우준 · 고권현[†]

동양대학교

Investigation of the Relationship Between Wall Thermal Conductivity and Inner Room Temperature in Compartment Fires

Woo Jun You · Gwon-Hyun Ko[†]

Dongyang University

(Received December 26, 2017; Revised March 5, 2018; Accepted March 13, 2018)

요 약

본 연구에서는 Buckingham 파이 정리를 이용하여 구획 공간에서 화재가 발생한 경우 벽면을 구성하는 재료의 열전도 계수와 내부 온도의 상관관계에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해서 기존 무차원 변수의 주요 인자를 고려하여 발열량, 열전도계수, 구획공간의 체적, 벽면 두께 그리고 대류 열전달 계수의 관계를 분석하였다. 또한, 발열량에 대한 화염에서의 최대 온도 그리고 벽면의 온도를 산출하기 위해서 내화보드를 사용하여 ISO 9705 룸 코너 시험기(Room Corner Tester)의 1/6 크기를 갖는 축소 규모의 구조물을 제작하였으며, 10 cm, 15 cm 그리고 20 cm인 정사각형 화원에 대해서 가솔린 화재실험을 수행하여 국부 지점의 산소 농도와 화염에서의 온도분포를 측정하였다. 그 결과 대류 열전달 계수와 열전도 계수의 변화에 따라서 외벽에서의 온도가 증가하는 조건을 제시하였으며, 발열량 변화에 대한 Buckingham 파이의 무차원 경험식을 도출하였다. 본 연구 결과는 구획 공간에서 외벽 형상 및 열전도 계수의 변화를 고려한 화재 현상을 연구하기 위한 기초 자료의 활용이 가능할 것으로 사료된다.

ABSTRACT

In this study, the relations of the wall thermal conductivity and surface temperature in a compartment fire are investigated using Buckingham Pi theorem. The dimensionless parameters of the previous study are analyzed in order to correlate the dimensionless groups of the heat release rate, the thermal conductivity, the volume of compartment and the convective heat transfer coefficient. In addition the reduced scale of compartment, which has 1/6 size of ISO 9705 Room Corner Tester, is manufactured and the oxygen concentration and the maximum temperature in the space are measured for the gasoline pool fire (10 cm×10 cm, 15 cm×15 cm and 20 cm×20 cm). Finally, the criterion of the wall temperature increase are suggested in accordance with the thermal conductivity and the convective heat transfer coefficient. In addition, the dimensionless empirical equation using Buckingham Pi theorem considering the heat release rate are presented suggested. The results of this study will be useful especially for the fire phenomenon investigation of the wall thermal conductivity coefficient and shape in the compartment space.

Keywords : Buckingham Pi theorem, Reduced scale of compartment space, Thermal conductivity, Convective heat transfer coefficient, Room corner tester, Surface temperature

1. 서 론

실규모급 화재 현상을 재현하기 위해서는 주변 환경 인자를 고려한 초기 조건과 가연물의 열화학적 특성 그리고 화재시나리오 등이 정확하게 고려되어야 한다⁽¹⁻²⁾. 하지만, 초기 조건은 외부 온도 및 풍속에 따라서 쉽게 변할 수 있

고, 가연물의 정확한 성분을 고려한 열화학적 상태량을 적용하기 어려운 단점이 있으며, 화재 확산이 예기치 못하게 변동되는 경우 화재시나리오를 분석하기 위한 비용과 시간이 많이 소모될 수 있다⁽¹⁾. 또한, 실화재 실험의 제한적인 요인으로 인해서 재현성을 고려하지 않은 상태에서 결과를 도출하고 일반화 하게 되면 오류를 범하게 될 가능성이 발

[†] Corresponding Author, E-Mail: kogh@dyu.ac.kr, TEL: +82-31-839-9062, FAX: +82-31-839-9042

© 2018 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

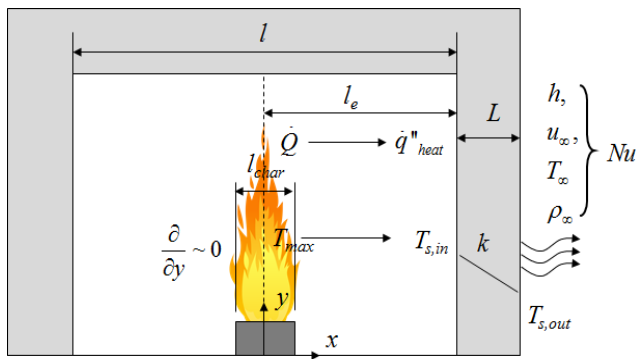


Figure 1. Schematic diagram of gasoline pool fire in a compartment space.

생하게 된다. 이러한 관점에서 실험실 규모(Lab-scale)로 축소된 구획 공간에서 화재 현상을 분석하는 것은 비용과 시간을 절약할 수 있을 뿐만 아니라 현상의 명확한 분석을 위해서도 매우 효과적인 방안이다⁽³⁻⁷⁾. 화재 현상의 축소 모델에 관한 선행 연구로 Quintiere[3]는 무차원화된 질량, 운동량, 에너지, 복사열전달, 화학종, 이상기체 및 고체의 에너지 보존에 관한 방정식을 유도하였으며 Froude 모델, Analog 모델 그리고 Pressure 모델을 적용하여 주요 실험군에 관한 상관관계를 규명한 바 있다. 그의 연구에서 가장 주목할 만한 점은 Alpert⁽⁸⁾의 정상상태에서 천정 제트 유동에 관한 경험식과, Heskestad and Delichatsios[9]의 비정상 거동에 관한 천정 제트 유동의 경험식 등 기존 연구 결과와 무차원 관계식을 비교하여 정확성을 검증한 데 있다⁽³⁾. 하지만, Quintiere의 모델은 논문에서 언급하고 있듯이 모든 화재 현상의 문제를 다루고 있지 않기 때문에 관심이 되는 주요 인자를 고려하여 지배 방정식의 무차원 과정을 검토할 필요가 있다. 특히, 그가 적용한 Froude 모델은 고체 경계면에서 발열량에 대한 외벽의 전도 손실을 고려하지 않은 상태에서 유도되었기 때문에 벽면의 재료 특성과 내부 온도의 관계를 분석하는데 한계가 있다⁽³⁾. 하지만, 구획 공간 화재 시 가연물이 지속적으로 연소함에 따라서 내벽의 온도가 상승하여 복사열에 의해서 내부의 온도와 연소율이 급격히 상승하게 되면 화재 확산이 빠르게 전파될 수 있기 때문에 벽면에서의 열전달 현상과 내부 온도의 상관관계를 분석하는 것은 매우 중요한 연구 중에 하나이다. 따라서 본 연구에서는 축소된 구획 공간에서 벽면의 열전도 계수 및 두께 변화를 고려한 내부 온도의 상관관계를 분석하기 위해서 Buckingham 파이 정리를 사용하여 무차원 형태의 발열량, 열전도계수, 구획공간의 체적과 벽면의 두께 그리고 열전도 계수의 상관관계를 분석하였다. 또한, ISO 9705 룸 코너 시험기(Room Corner Tester)의 1/6 크기를 갖는 축소 규모의 구조물을 제작하여 화염의 최대 온도와 외벽의 온도 차이에 관한 경험식을 구하였으며, 무차원 인자의 관계식을 제시하였다.

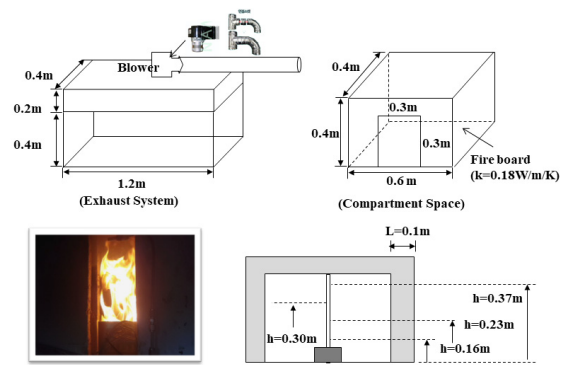


Figure 2. The Schematic diagram of the equipment and an experiment picture.

2. 본 론

2.1 이론 정리

Figure 1과 같은 구획 공간에서 점성소산을 생략하고 1차원 공간에서 정상상태인 조건을 가정하여 열원과 구획공간의 형상 및 열전도 계수 그리고 열 유동을 고려하여 변수의 관계를 정리하면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다⁽³⁾.

$$\dot{Q} = f(L, u, \rho, T, k, l^3, \mu, c_p) \quad (1)$$

여기서, \dot{Q} , L , u , ρ , T , k , l^3 , μ , 그리고 c_p 는 각각 발열량, 벽면의 두께, 화염에서의 속도, 밀도, 온도, 벽면의 열전도 계수, 구획 공간의 체적, 점성계수, 그리고 비열을 각각 의미한다. 또한, Figure 1에서 보듯이 화염에서의 열원(\dot{Q})이 복사에너지에 의해서 벽면에 일정하게 열 유속(\dot{q}''_{heat})이 공급되는 현상을 가정하였다. 따라서 Buckingham 파이 정리에 의해서 반복되는 독립 변수를 L, u, ρ, T 로 하여 종속변수인 발열량에 대해서 기본 단위인 길이(L), 질량(M) 그리고 시간(t)에 대해서 정리하면 식 (2)와 같은 관계에서 식 (3)과 같은 각각의 Π 군에 대한 값을 구할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5) \quad (2)$$

$$\Pi_1 = \frac{\dot{Q}}{\rho u^3 L^2}, \quad \Pi_2 = \frac{Tk}{\rho u^3 L}, \quad \Pi_3 = \frac{l^3}{L^3}, \quad \Pi_4 = \frac{\mu}{\rho u L}, \quad \Pi_5 = \frac{c_p T}{u^2} \quad (3)$$

본 연구의 주요 관심 대상은 외벽의 재료 특성과 내부 온도로 Froude 모델의 가정에서와 같이 점성의 효과가 작다고 할 수 있으며, 열확산계수($\alpha = k/\rho c_p$)의 정의를 적용하면 종속 변수인 발열량을 포함하고 있는 무차원군 Π_1 은 식 (4)와 같은 형태의 함수로 표현할 수 있다.

$$\Pi_1 = \frac{\dot{Q}}{\rho^1 u^3 L^2} = f\left(\frac{Tk}{\rho u^3 L}, \frac{l^3}{\rho u L}, \frac{c_p T}{u^2}\right) \quad (4)$$

식 (4)에서 왼쪽의 무차원 항은 상태방정식에 의해서 $\rho_0 T_0 \approx \rho T$ 를 적용하고 Quintiere⁽³⁾의 무차원 변수와 동일하게 표현하면 식 (5)와 같은 형태로 정리할 수 있다.

$$\hat{Q} = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 c_p u T_0 L^2} = f\left(\frac{\alpha}{uL}, \frac{l^3}{L^3} \frac{u^2}{c_p T}, 1\right) \quad (5)$$

그림 1에서 온도는 화염에서의 최대 온도(T_{max})와 내벽에서의 온도($T_{s,in}$)를 고려하여 $T \rightarrow \Delta T = T_{max} - T_s$ 로 치환하고 무차원 함수를 정리하면 식 (6)과 같은 관계를 갖게 된다.

$$\hat{Q} = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 c_p u T_0 L^2} \equiv f\left(\frac{\alpha}{uL}, \frac{l^3}{L^3} \frac{u^2}{c_p \Delta T}\right) \quad (6)$$

무차원 함수 식 (6)을 분석하기 위해서 연료의 연소 면적이 일정한 Pool 화재의 경우 발열량은 식 (7)과 같이 산출할 수 있다⁽¹¹⁻¹²⁾.

$$\dot{Q} = \dot{m}_f'' \Delta h_c (1 - e^{-k\beta D}) A_{pool}, \quad l_{char} = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 \sqrt{g} c_p T_0}\right)^{2/5} < l \quad (7)$$

여기서 \dot{m}_f'' , Δh_c , $k\beta$, D 그리고 A_{pool} 은 각각 가솔린의 연소율(0.055 kg/m²·s), 연소엔탈피(43.7 MJ/kg), 광학 특성을 고려한 실험상수(2.1 m⁻¹), 연료 팬의 수력직경 그리고 연소 면적을 의미하며, 화원의 특성길이(l_{char})는 구획공간의 길이 보다 크지 않아야 하는 조건을 만족하여야 한다⁽³⁾. 또한, 식 (7)로부터 연료의 질량유량은 식 (8)과 같다⁽¹²⁾.

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q}}{\Delta h_c \times \eta} \quad (8)$$

여기서 \dot{m}_f 와 η 은 연료의 질량유량(kg/s)과 연소효율을 의미하며, 외벽에서의 열 유속(q''_{heat} , kW/m²)은 발화원에서 거리의 제곱 승에 반비례하므로 식 (9)과 같은 관계로 표현할 수 있다⁽¹²⁻¹³⁾.

$$q''_{heat} \sim \frac{\dot{Q}}{l_c^2} \rightarrow q''_{heat} = \frac{\dot{Q}\chi}{4\pi l_c^2} \quad (9)$$

정상상태에서 일정 열 유속이 내벽에 전달되는 조건을

가정하면 1차원 전도 방정식은 식 (10)과 같다⁽¹⁴⁾.

$$q''_{heat} = -k \frac{dT}{dx} \rightarrow T(x) = -\frac{q''_{heat}}{k} x + T_{s,in} \quad (10)$$

전도에 의한 열 유속은 외벽 끝에서 대류 열전달에 의해서 냉각되므로 식 (11)과 같은 관계가 성립한다⁽¹⁴⁾.

$$\left[-k \frac{dT}{dx}\right]_{x=L} = h(T_{s,out} - T_\infty) \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)에 의해서 구획 공간 내벽에서의 온도는 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$T_{s,in} = q''_{heat} \left(\frac{Lh+k}{kh}\right) + T_\infty = q''_{heat} \left(\frac{Nu+1}{h}\right) + T_\infty \quad (12)$$

여기서 A , h , $T_{s,in}$ 그리고 T_∞ 는 각각 단면적, 대류열전달계수, 내벽에서의 온도 그리고 외기의 온도를 의미하며, Nu는 Nusselt 수로 외벽의 형상과 외부의 환경 조건에 따라서 결정되는 인자로 Figure 1과 같은 구획 공간 외벽을 수직 평판으로 가정하는 경우 Rayleigh 수와 형상인자의 함수 관계를 갖게 되며⁽¹⁴⁾ 본 연구에서는 Ingason의 문헌을 참고하여 대류 열전달 계수를 10 W/m·K로 가정하였다^(6,13). 또한, 화염에서의 속도는 Quintiere[3]의 Froude 모델의 가정을 적용하면 식 (13)과 같다.

$$u = \sqrt{g} \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 \sqrt{g} c_p T_0}\right)^{1/5} \quad (13)$$

따라서 무차원 함수 식 (6)은 연소 면적이 결정되면 식(7)과 식 (8)로부터 연료의 발열량과 질량유량을 구할 수 있고, 식 (9)로부터 $\chi=1$ 로 가정하여 외벽에서의 열 유속, 식 (12)와 식 (13)으로부터 내부 벽면온도와 화염의 속도를 구할 수 있으며, ΔT 의 T_{max} 값은 실험에 의해서 산출할 수 있다.

2.2 실험장치 구성 및 측정

무차원 실험군 식 (6)의 T_{max} 를 산출하기 위해서 Figure 2와 같이 ISO 9705 룸코너 시험기를 1/6로 축소한 실험 장치를 구성하였으며, 한 변의 길이가 10 cm, 15 cm 그리고 20 cm인 정사각형의 풀(pool) 화원에 대해서 가솔린 화재

Table 1. Specification and Wall Thermal Properties of Experiment

Components	Specification
Compartment Size	Width 0.4 m, Length 0.6 m, Height 0.4 m
Material of Structure	Thermal Conductivity 0.18 W/m·K, Wall thickness 0.1 m
Thermo-couple	K-Type Wire, Range: -200~1,000 °C
DAQ	Voltage, Temp, Sampling Rate 10 ms, Model : GL 840 (20 Ch)
O ₂ Analyzer	Output : 4~20 mA, Range: O ₂ 0~100%, Model : OXY3690MP
Fuel Pan Size	Small 0.1 m×0.1 m, Midium 0.15 m×0.15 m, Large 0.2 m×0.2 m

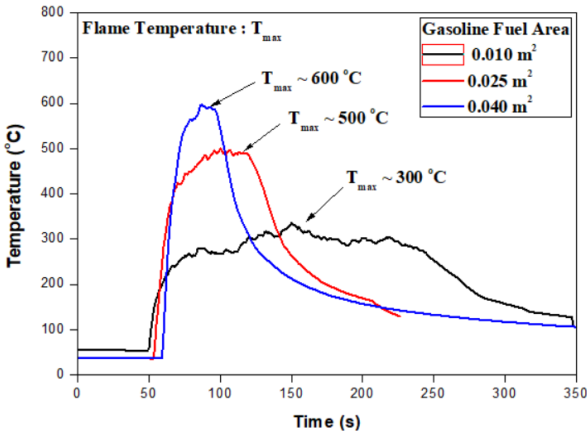


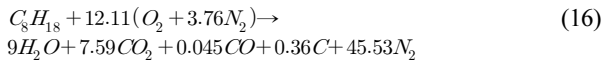
Figure 5. Maximum temperature vs. time for gasoline pool fire.

실험을 수행하였다. 그림에서 보듯이 구획 공간 바닥에서 부터 높이(h)가 16 cm, 23 cm, 30 cm 그리고 37 cm인 국부 지점에서의 온도와 h=37 cm인 곳에서 산소 농도를 측정하였다. 본 연구에서 사용한 실험장치의 사양과 구획 공간 재료의 특성을 Table 1에 나타내었다.

구조물의 개구부로 산화제가 유입되는 경우 공기의 질량 유량(\dot{m}_{air})은 식 (14)과 같으며^(2,6,12), 가솔린의 soot yield (0.038 g/g)와 CO yield (0.011 g/g)의 값에 대해서 화학당량적 계수(ν)를 산출하여 가솔린의 총괄반응 식 (16)를 고려하면 연소 반응은 산화제가 충분히 공급되는 조건임을 확인할 수 있다.

$$\dot{m}_{air} = 0.52A_w \sqrt{H} \quad (14)$$

$$y_i = \frac{v_i MW_i}{v_F MW_F} \quad (15)$$



여기서 A_w , H , y 그리고 MW 은 각각 구획 공간 개구부의 유효 면적, 개구부의 높이, 질량분율 그리고 분자량을 의미하며, 하첨자 i 와 F 는 화학종과 연료를 의미한다. 또한, 가솔린이 연소되는 동안 구획 공간 내부의 산소가 소모되는 정도와 발열량의 관계는 식 (17)과 같다⁽¹²⁾.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta h_{c,O_2} \dot{m}_e}{1 + \phi(\alpha' - 1)} \phi (1 - X_{H_2O}^0) X_{O_2}^0 \frac{MW_{O_2}}{MW_{air}} \quad (17)$$

여기서 $\Delta h_{c,O_2}$, \dot{m}_e , ϕ , X^0 그리고 α' 은 각각 산소의 연소열, 배기 질량유량, 산소소모계수(oxygen depletion factor), 초기상태의 물분율 그리고 화학적 팽창계수를 의미하며 하첨자 O_2 와 air 는 산소와 공기를 의미한다. 식 (17)에서

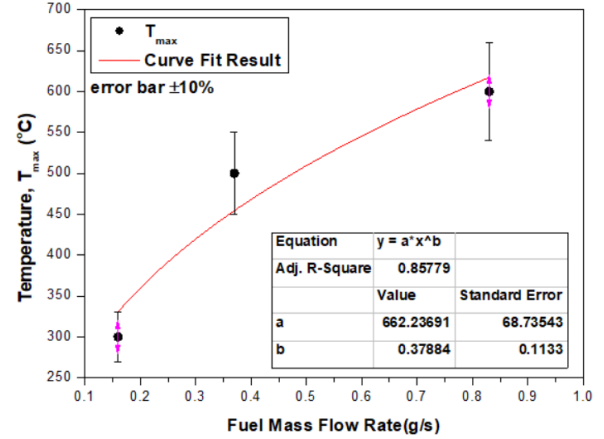


Figure 6. Curve-fit result for maximum temperature vs. fuel mass flow rate.

$\Delta h_{c,O_2} = 13.1$ MJ/kg의 값을 가지며, \dot{m}_e , $X_{H_2O}^0$ 그리고 ϕ 은 식 (18)~(20)와 같은 관계에 의해서 구할 수 있다^(1,12).

$$\phi = \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{(1 - X_{O_2}^0) X_{O_2}^0} \quad (18)$$

$$X_{H_2O}^0 = \frac{RH}{100} \frac{P_s(T_a)}{P_a} \quad (19)$$

$$\dot{m}_e = \left(\frac{P_a}{R_a T_e} \right) \frac{A}{k_c f(R_e)} \sqrt{\frac{2P_a}{P_a / (R_a T_d)}} \quad (20)$$

여기서 $f(R_e)$, k_c , RH , 그리고 $P_s(T_a)$ 는 각각 레이놀즈 수정 계수, 속도구배 형상 인자, 상대습도 그리고 주위온도에 대한 포화증기압을 의미한다. 또한, α 는 1.10, k_c 는 1.0 그리고 $f(R_e)$ 는 1.08을 갖게 되므로 초기 환경조건에 따라서 RH 와 P_a 을 구하여 식 (17)의 발열량을 산출하게 된다. 하지만, 본 연구의 경우 식 (7)의 최대 발열량과 국부지점(h=0.37 m)의 산소 농도를 측정하여 발열량의 시간 변화를 분석하였으며, 이로 인해서 가연물의 연소 효율 및 화원직경변화에 따른 연소율 등이 고려되어 있지 않은 이론 발열량으로 실험값과의 차이가 발생할 수 있다. 하지만, 본 연구의 경우 구획공간의 주요 인자를 고려한 상관관계를 분석하는데 목적이 있으며, 식 (17)~식 (20)에서 보듯이 산소 농도의 시간 변화량은 발열량 곡선과 비례하고 있는 것을 확인할 수 있다. Figure 3은 구획 공간 내부의 화원 바닥으로부터 높이 37 cm 지점에서 산소의 농도 측정 결과로 연소면적이 증가함에 따라서 구획 공간 내부의 공기가 가솔린 연료와 연소하는 양이 증가하게 되어 산소농도가 더욱 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림에서 보듯이 연료의 연소면적이 0.01 m²인 국부 지점에서의 산소 농도 최대값은 약 19.7% 정도이며, 연소면적 0.023 m²인 경우 산소 농도의 최대 값은 17.8% 그리고 연소면적 0.04 m²에 대해서는 산소

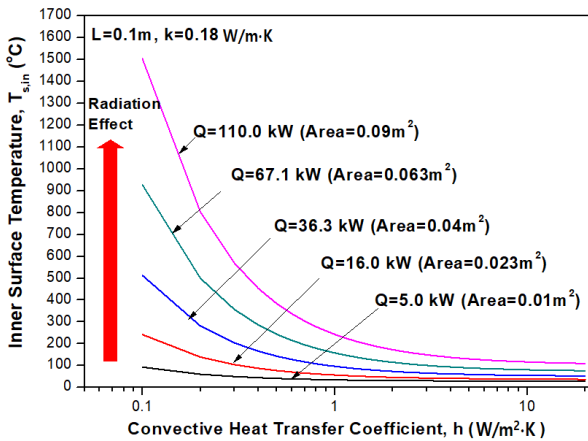


Figure 7. Effects of convective heat transfer coefficient and heat release rate on the inner surface temperature.

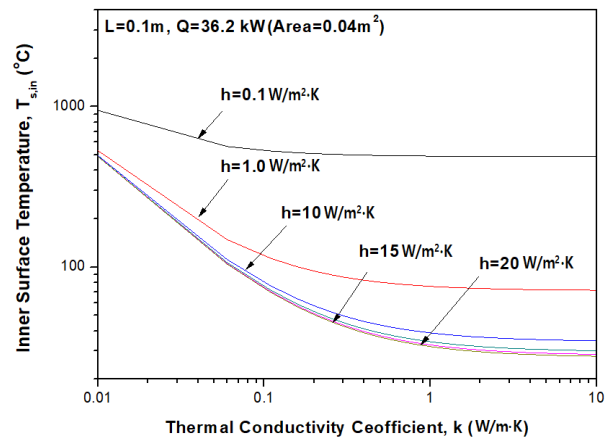


Figure 8. Effects of thermal conductivity coefficient and convective heat transfer coefficient on the inner surface temperature.

농도 최대값이 16.9% 정도까지 감소하는 것으로 나타났다.

Figure 4는 시간 변화에 따라서 측정된 산소 농도와 식 (7)로부터 구한 발열량의 최대값을 이용하여 나타낸 결과이다. 그림에서 보듯이 약 70초~100초 사이에서 모든 연소 면적에 대해서 정상상태인 조건에 도달하는 것을 확인할 수 있으며, 본 연구의 경우 구획 공간 재료의 열전도율과 두께 변화가 내부 온도 차이에 영향을 주는 관계를 분석하기 위해서 발열량이 정상상태인 구간을 고려하였다.

화원의 연소면적 0.01 m², 0.023 m² 그리고 0.04 m² 각각에 대해서 화원의 바닥에서부터 높이 16 cm, 23 cm, 30 cm 그리고 37 cm 간격으로 하여 4개 지점에서 3회 반복 실험을 수행하여 온도를 측정된 결과 높이 37cm인 지점에서의 온도가 다른 지점에 비해서 가장 높게 나타났으며, h=37 cm인 저점에서 연소면적에 따른 온도 곡선을 Figure 5에 나타내었다. 그림에서 보듯이 정상상태 구간에서 연소면적 0.01 m²의 경우 최대 온도는 약 300 °C, 0.023 m²의 경우 약 500 °C 그리고 연소면적 0.04 m²의 경우 약 600 °C인 것을 확인할 수 있다.

Figure 6은 식 (8)로부터 각각의 연소면적에 따라서 산출한 연료의 질량유량과 실험에서 측정된 최대 온도의 관계를 보여주고 있다. 연료의 질량유량은 Arrhenius 경험식으로부터 자연로그 함수의 형태로 표현할 수 있으나, 연소면적의 실험 개수가 작기 때문에 오차범위 10% 정도에서 최대 온도 값을 간단히 표현할 수 있는 식 (21)의 형태로 곡선 접합을 하였다. 하지만, 본 연구의 경우 무차원 인자의 상관관계를 분석하는데 목적이 있으며, 향후 다양한 연료에 대해서 최대 온도와 연료의 일반화된 관계식을 제시할 필요가 있을 것으로 사료된다.

$$T_{max} = 662.2 \dot{m}_{fuel}^{0.379} \quad (21)$$

2.3 결과분석

축소된 구획공간에서 재료의 열적 특성을 분석하기 위해서 실험조건과 동일한 열전도계수(0.18 W/m·K) 및 벽면 두께(0.1 m)를 식 (12)에 대입하여 대류열전달계수 변화에 따라서 내벽의 온도를 Figure 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 동일 발열량 조건에서 대류열전달계수가 증가함에 따라서 표면에서의 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 결과는 일정한 열 유속이 공급되는 상태에서 외부로 열이 보다 빠르게 전달되기 때문에 식 (12)의 분모 항이 증가하여 내부 표면 온도가 감소하는 것으로 판단된다. 특히, 열전도 계수가 0.18 W/m·K로 일정하고 대류열전달 계수가 O(~10) 이상인 경우 내벽의 온도가 약 100 °C 이하인 것을 확인할 수 있으며, 이러한 결과는 내벽에서의 온도가 화염에서의 T_{max}에 비해서 매우 작기 때문에 내벽의 복사 에너지도 상대적으로 작다는 것을 의미한다. 하지만, 대류열전달 계수가 O(~1) 이고 발열량이 약 70 kW 이상 증가하게 되면 외벽의 온도가 200 °C 이상 증가하기 때문에 식 (6)에서 외벽에서 방사되는 복사에너지의 효과를 고려해야 할 것으로 판단된다.

Figure 8은 식 (12)에 대해서 발열량의 크기가 36.3 kW이고 벽면의 두께가 0.1 m인 경우 열전도계수 변화에 따라서 내벽의 온도를 나타낸 것으로 열전도계수가 증가함에 따라서 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 동일 발열량 및 열 유속 조건에서 열전도 계수가 증가하면 외벽에서의 온도차가 감소하여 식 (12)의 분모 항이 증가하기 때문에 내벽의 온도가 감소하게 된다. 특히, 열전도 계수가 O(~1) 이상이고 대류열전달계수가 O(~10) 이상인 구간에서 내벽의 온도 변화가 작아지는 것을 알 수 있으며, 무차원 인자에서 대류 열전달로 인한 T_{s,in} 값이 일정해 지는 것을 의미한다. 하지만, 구획 공간을 구성하는 재료의 경우 열전도 계수는 O(10⁻²)~O(10⁻¹) W/m·K이기 때문에 재료의 열전도 계수를 고려해서 내부 구획공간의 화재 현상을 분석해야

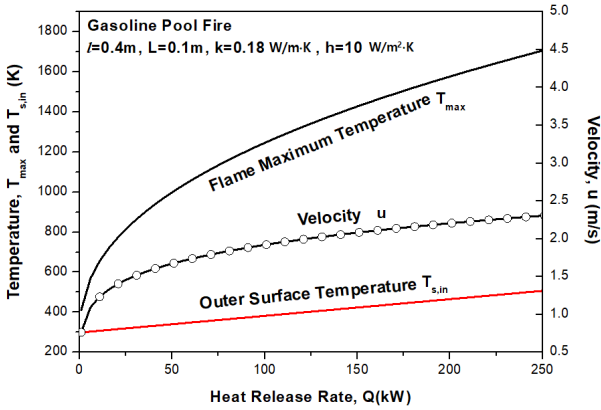


Figure 9. The effects of heat release rate on the maximum temperature and inner surface temperature.

할 것으로 사료된다.

Figure 9는 구획 공간의 길이가 0.4 m이고, 벽면의 두께가 0.1 m 그리고 열전도계수를 0.18 W/m·K로 하여 발열량 변화에 따라서 내벽의 표면온도와 화염에서의 최대온도 및 속도에 대한 결과를 보여주고 있다. 구획공간의 외부에서 냉각 조건은 수직 평판에서 강제 대류의 열전달계수 10 W/m²·K의 값을 적용하였으며⁽⁹⁾, 식 (7)의 화원 특성길이(l_{char})를 고려하여 발열량의 크기를 최소 1.0 kW에서 250 kW 정도까지 증가하여 화원에서의 속도, 화염의 최대 온도 그리고 내벽에서의 온도를 산출하였다. 그림에서 보듯이 화원의 발열량이 증가함에 따라서 화염에서의 속도는 최소 0.5 m/s~최대 2.3 m/s, 화염의 온도는 최소 400 K~최대 1,700 K 그리고 내벽의 온도는 최소 300 K~최대 500 K까지 발열량에 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 10은 무차원 인자의 상관관계를 분석하기 위해서 구획 공간의 길이가 0.4 m이고, 벽면의 두께가 0.1 m 그리고 열전도계수를 0.18 W/m·K로 하여 발열량 변화에 따라서 무차원군 $\pi_1 = \dot{Q}/(\rho_0 c_p u T_0 L^2)$, $\pi'_2 = \alpha/(uL)$ 그리고 $\pi'_3 = (\beta/L^3)(u^2/c_p \Delta T)$ 의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 발열량이 증가하게 되면 무차원군 π_1 의 \dot{Q} 와 π'_2 의 u 그리고 π'_3 의 ΔT 의 값이 증가하기 때문에 π_1 은 비례하여 증가하는 반면 π'_2 와 π'_3 의 값은 감소하게 되는 것을 확인할 수 있다. 특히, \dot{Q} 이 약 25 kW 보다 작은 구간에서 u 와 ΔT 의 변화가 증가하여 곡선의 기울기가 급격해 지는 것을 확인할 수 있으며, 종속 변수인 \dot{Q} 을 포함하고 있는 무차원 실험군 π_1 에 대해서 다음과 같은 관계로 표현할 수 있다.

$$\pi_1 = \frac{0.89 \times \pi_1^{0.72}}{\pi'_2 \pi'_3 10^7} \rightarrow \pi_1^a \pi'_2 \pi'_3 = b \quad (21)$$

여기서 a 와 b 는 본 연구의 경우 0.28과 0.89×10^{-7} 로 나타났지만 가연물의 종류 및 화원의 중심부와 내벽의 온도 관계에 의해서 달라질 수 있기 때문에 상수로 표현하였으며

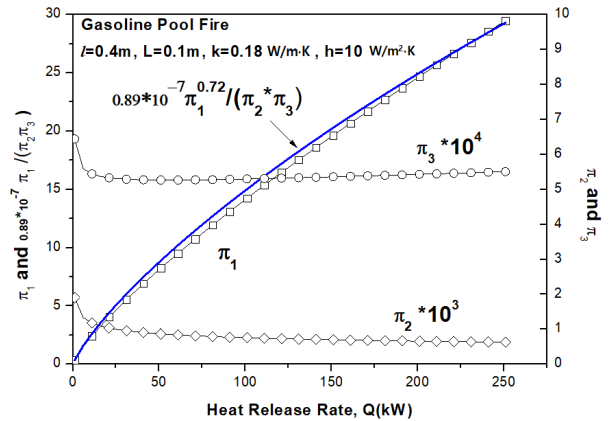


Figure 10. The effects of heat release rate on the dimensionless parameters.

향후 다양한 종류의 연료를 사용하여 구획 공간 외벽의 열전도 계수 및 형상 조건을 고려한 실험/해석 자료가 구축되어야 할 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 구획 공간에서 열원의 크기에 따라서 벽면을 구성하는 재료의 열전도 계수와 내부 온도의 상관관계에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해서 Buckingham 파이 정리와 Quintiere⁽³⁾의 무차원 변수를 고려하여 발열량에 대한 열전도계수, 구획공간의 체적, 벽면 두께 그리고 대류 열전달 계수의 관계를 분석하였다. 또한, 내화보드로 ISO 9705 룸 코너 시험기(Room Corner Tester)의 1/6 크기를 갖는 축소 규모의 구조물을 제작하였으며, 연소면적 0.01 m², 0.023 m² 그리고 0.04 m²에 대해서 가솔린 화재실험을 수행하여 화염에서의 최대온도와 내벽 온도를 산출하였다. 무차원 관계식에 화염에서의 최대온도와 내벽 온도 차이의 경험식을 적용하여 분석한 결과 다음과 같은 중요한 결과를 도출하였다.

첫째, 외벽의 열전도계수가 0.18 W/m·K이고 벽면 두께가 0.1 m인 구획 공간에서 대류열전달계수 변화에 따라서 내벽의 온도를 분석한 결과 대류열전달 계수가 $O(\sim 10)$ 이상인 경우 내벽의 온도가 약 100 °C 이하가 되어 벽면에서의 복사에너지가 상대적으로 작은 반면 대류열전달 계수가 $O(\sim 1)$ 이고 발열량이 약 70 kW 이상 증가하는 경우 벽면의 온도가 200 °C 이상 증가하여 내벽에서 방사되는 복사에너지의 효과를 동시에 고려해야 할 것으로 판단된다.

둘째, 발열량의 크기가 36.3 kW이고 벽면의 두께가 0.1 m인 구획공간에서 열전도 계수 변화에 따라서 내벽의 온도를 분석한 결과 열전도 계수가 $O(\sim 1)$ 이상이고 대류열전도 계수가 $O(\sim 10)$ 이상인 구간에서 내벽의 온도가 50 °C ± 15 °C 정도 범위인 것을 확인하였다. 하지만, 구획 공간을 구성하는 재료의 경우 열전도 계수는 $O(10^2) \sim O(10^1)$

W/m·K로 내벽의 온도 변화가 급격히 감소하는 구간에 해당하므로 재료의 열전도 계수와 내벽 온도의 범위를 고려해야 할 것으로 사료된다.

셋째, 외벽의 열전도 계수에 따른 최대 온도의 상관관계를 분석한 후 발열량 증가에 따라서 $\pi_1 = \dot{Q}/(\rho_0 c_p u T_0 L^2)$, $\pi_2 = \alpha/(uL)$ 그리고 $\pi_3 = (l^3/L^3)(u^2/c_p \Delta T)$ 을 산출한 결과 π_1 의 \dot{Q} 와 π_2 의 u 그리고 π_3 의 ΔT 의 값이 발열량과 비례하여 증가하기 때문에 $\pi_1 \pi_2 \pi_3 = const$ 의 형태로 나타났으며, 보다 정확한 값을 도출하기 위해서는 다양한 종류의 연료를 사용하여 구획 공간 외벽의 열전도 계수 및 형상 조건을 고려한 실험/해석 자료가 구축되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2015R1D1A1A01057176)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. W. J. You, D. G. Nam, M. C. Youm, S. C. Kim and H. S. Ryou, "Analysis of Heat Release Rate with Various Diameter of Heptane Pool Fire Using Large Scale Cone Calorimeter", *Fire Science and Engineering*, Vol. 28, No. 5, pp. 1-7 (2014).
2. 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).
3. J. G. Quintiere, "Scaling Application in Fire Research", *Fire Safety Journal*, Vol. 15, pp. 3-29 (1989).
4. V. Babrauskas and R. D. Peacock, "Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard", *Fire Safety Journal*, Vol. 18, pp. 255-272 (1992).
5. M. Foley, "The use of Small Scale Fire Test Data for the Hazard Assessment of Bulk Materials", Ph.D Thesis, University of Edinburgh (1995).
6. Haukur Ingason, "Model Scale Railcar Fire Tests", Brand Forks Project 404-011, SP Fire Technology Report (2005).
7. J. S. Roh, S. S. Yang, H. S. Ryou, M. O. Yoon and Y. T. Jeong, "An Experimental Study on the Effect of Ventilation Velocity on Burning Rate in Tunnel Fires-heptane Pool Fire case", *Building and Environment*, Vol. 43, pp. 1225-1231 (2008).
8. R. L. Alpert, "Fire Induced Turbulent Ceiling jet", FMRC ser. No.19722-2, Factory Mutual Research, Norwood, MA, Nay (1971).
9. G. Heskestad and M. A. Delichatsios, "The Initial Convective Flow in Fire", 17th Symp. Int. on Combustion, the Combustion Institute, Pittsburgh, Pa, pp. 1113-1123 (1978).
10. Batchelor, George Keith, "An Introduction to Fluid Dynamics", Cambridge University Press (2000).
11. J. Gore, A. Hamins and T. Kashiwagi, "Fuel Property Effects on Burning Rate and Radiative Transfer from Liquid Pool Fire", 3th Symp. Int on Fire Safety Science, pp. 395-404 (1991).
12. J. DiNenno, Philip, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", SFPE (2008).
13. W. J. You and H. S. Ryou, "Effects of Droplet Ratio and Void Fraction on the Attenuation of Zadiative Heat Flux in Water Curtain", *Fire Safety Journal*, Vol. 80, pp. 46-55 (2016).
14. L. Bergman, Theodore and P. Frank, "Incropera. Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons (2011).