

[Research Paper]

구획 화재 시 벽면 재료 특성과 헵탄의 질량유속 상관관계 실험

박정욱 · 신연제 · 김정용* · 유우준**†

동양대학교 건축소방안전학과 학부생, *경일대학교 소방방재공학과 대학원생, **동양대학교 건축소방안전학과 교수

Experiment on the Correlation between Mass Flux of Heptane and Material Property of Wall in Compartment Fire

Jung Wook Park · Yeon Je Shin · Jeong Yong Kim* · Woo Jun You**†

University Student, Dept. of Architecture & Fire Safety, Dong Yang Univ.,

*Graduate Student, Department of Fire & National Emergency, Gyeong Il Univ.,

**Professor, Dept. of Architecture & Fire Safety, Dong Yang Univ.

(Received November 21, 2018; Revised January 16, 2019; Accepted February 11, 2019)

요 약

본 연구에서는 구획 화재 시 벽면을 구성하고 있는 재료 특성과 질량 유속의 상관관계를 분석하였다. 이를 위해서 내화보드와 철판 각각을 사용하여 폭 0.3 m, 높이 0.5 m 그리고 길이 3.0 m의 한 쪽 면이 밀폐된 구조물을 제작하였으며, 헵탄 풀 화재 실험을 수행하여 연소면적 0.01 m²과 0.0225 m² 각각에 대해서 화원의 위치 변화에 따른 질량 감소율을 산출하였다. 그 결과 헵탄의 질량 유속은 연소 초기 0.0087 kg/m²·s에서 내화보드 구조물의 경우 최대 0.166 kg/m²·s로 증가하였으며, 철판 구조물의 경우 최대 0.019 kg/m²·s 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 구획 공간에서 화재 확산을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 재료의 열적 특성과 기하학적 형상을 고려하여 화재시나리오가 구성되어야 하는 것을 의미한다.

ABSTRACT

In this study, the relationships between the material properties of the wall and the fuel mass flux in compartment fire. The fire resistant board (fire-board) and steel plate compartments are constructed with a 0.3 m width, 0.5 m height and 3.0 m length. To obtain the mass loss rate considering the location of the fire origin in compartment, experiments of a heptane pool fire are performed with a combustion area of 0.01 m² and 0.0225 m². The results show that the initial mass flux of heptane, 0.0087 kg/m²·s, is increased to 0.166 kg/m²·s for fire board and 0.019 kg/m²·s for steel plate. It means that the fire-scenario should be considered with the thermal characteristics of the material properties and geometric shapes of the compartment to predict fire propagation accurately in a compartment space.

Keywords : Burning rate, Material property, N-heptane, Mass loss rate, Thermal conductivity coefficient, Pool fire

1. 서 론

구획 공간에서 화재가 확산되는 현상을 정량화하기 위해서는 주변의 환경조건과 가연물의 열화학적 물성, 연소에 필요한 에너지, 개구부의 면적과 공간을 구성하고 있는 기하학적 형상에 따른 열전달 현상을 분석해야 한다⁽¹⁾. 하지만, 모든 변수를 고려한 화재 확산의 일반화된 관계식을

제시하기는 어렵기 때문에 일반적으로 가연물이 단위 시간 동안 연소되는 질량유량(Mass flow rate, kg/s)과 연료가 단위 시간 동안 소모되면서 발생하는 에너지인 발열량(Heat release rate, kW)에 의해서 구획 공간의 화재 확산을 분석하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다⁽²⁾. 이 중에서도 화원의 단위 면적에 대해서 기화되는 연료의 질량유속(Mass flux, kg/m²·s)은 화염에서부터 연료 표면으로의 대류, 전도,

† Corresponding Author, E-Mail: wjyou@dyu.ac.kr, TEL: +82-54-630-1207, FAX: +82-54-630-1371

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

복사에 의한 결과로 나타나며, 화원의 직경과 재료, 유면의 높이, 화염의 형상, 국소 지점의 온도분포 그리고 연소생성물에 따른 숯의 농도 등에 의해서 달라질 수 있다⁽³⁾.

구획 화재 확산의 기존 연구 사례로 국내의 경우 Oh 등은 Pool 화재의 연소 특성에 관한 연구에서 용기의 재질과 직경 변화에 따른 대류 및 복사열전달에 관한 연구를 수행하였으며⁽⁴⁾, Kim 등은 실규모 실험에서 화재 조건에 따라서 고체 가연물의 질량 감소율과 유효 연소열 그리고 총 방출 에너지의 상관관계를 분석하였다⁽⁵⁾. 국외의 경우 Hammis는 화염이 균질한 상태의 혼합물로 구성되어 있는 상태를 가정하고 연소 생성물이 물과 이산화탄소, 숯, 미연소 연료 그리고 불활성기체인 질소로 구성된 경우 액체 가연물의 기존 연소 실험 데이터를 분석하여 화원 직경 변화에 따른 연소 모델을 제시하였다⁽⁶⁾. Quintiere는 가연물 주위의 온도가 상승하게 되면 복사 열전달에 의해서 질량유속이 급격히 증가할 수 있는 현상에 대해서 물질전달 수(Mass transfer number, B)를 고려한 이론적 분석 방법을 기술한 바 있다⁽⁷⁾. 또한, 에너지 보존 법칙에 의해서 단위 시간 동안 발생하는 액체 연료의 에너지(J/s)를 수학적 의미만을 적용하여 연소 시간에 대해서 적분하게 되면 총 에너지의 양이 일정하기 때문에 연소 시간이 감소할수록 최대 발열량은 더욱 높은 값을 갖게 된다. 특히, 공간을 구성하고 있는 벽면은 가연물에서 발생된 열원을 축적해 주는 역할을 하게 되어 내부의 온도가 상승하게 되고 열전달에 의해서 가연물이 보다 빠르게 발화할 수 있는 조건을 형성해 줄 수 있다^(8,9). 이러한 현상은 구획 화재 시 발열량의 비정상 거동 및 최대 발열량이 변하는 시간을 고려해야만 정확한 화재 확산 예측이 가능하다는 것을 의미한다. 따라서 구획 화재에서 가연물의 질량유속을 정확히 고려하지 않게 되면 화재 확산 결과의 신뢰성이 낮아지는 점을 고려하였을 때 벽면 재료에 따른 열전달 현상과 질량 유속의 상관관계를 분석하는 것은 화재 공학 분야에서는 매우 중요한 문제로 판단된다. 본 연구에서는 구획 공간을 구성하고 있는 재료를 You의 문헌을 참고하여 열전도 계수를 다음과 같이 가정하여 $\alpha(\sim 0.1 \text{ W/m}\cdot\text{K})$ 로 낮은 내화보드와 $\alpha(\sim 10 \text{ W/m}\cdot\text{K})$ 인 철판을 사용하여 헤파탄 가연물의 연소면적 및 화원의 위치 변화에 따른 화재 실험을 수행하고 질량유속 변화와 내부 최대 온도를 분석하여 화재 확산을 예측하기 위한 기초 실험 자료를 구축하고자 한다⁽⁹⁾.

2. 본 론

2.1 실험장치 구성

Figure 1은 벽면 재료 특성에 따른 헤파탄의 질량유속 변화를 측정하기 위한 실험 장치를 나타낸 것으로 구조물의 크기는 폭 0.3 m, 높이 0.5 m, 그리고 길이 3.0 m이며, 내화보드와 철판 각각을 사용하였다. 특히, 연료의 연소율과 구획 공간 재료의 열적 특성의 상관관계를 보다 효과적으로 분

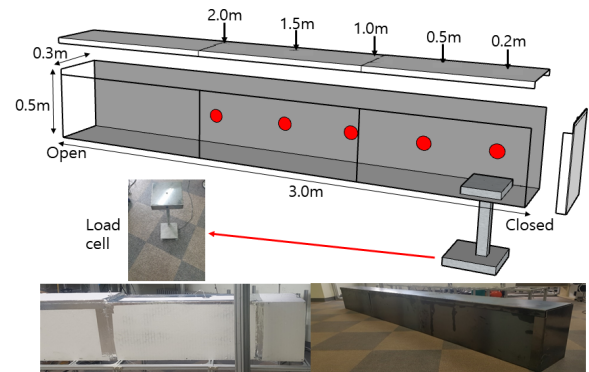


Figure 1. A picture of the experiment apparatus.

Table 1. Specification of the Experiment

Component	Spec.
Compartment Size	Materials : Fire-board & Steel Width: 0.3 m, Height: 0.5 m, Length: 3.0 m
Load Cell	Output: 4~20 mA, Range: 0~20 kg, Accuracy: 1 g
Thermo-Couple	K-Type Wire, Range: -200~1,000 °C
DAQ	Voltage: 20 mV to 100V, 1-5 V F.S. Chnnels: 20 ch, Accuracy: $\pm 0.1\%$
Cone Calorimeter Hood	Length: 5 m, Diameter: 0.2 m, Fan capacity: 1 hp

석하기 위해서 한 쪽 면을 밀폐하여 제작하였으며, 화원의 위치를 변화에 따른 연료의 질량감소율을 측정하였다. 그림에서 보듯이 로드셀은 온도의 영향을 받지 않기 위해서 계측부를 구조물로부터 이격된 상태로 설치하였다. 열전대의 위치는 대류 및 복사열에 따른 온도구배를 고려하여 연료 팬을 중심으로 하부에서 상부 방향으로 0.2 m 인 중간 지점 벽면 근방에 길이방향으로 총 5개의 데이터를 받도록 구성하였으며, 본 연구에서 사용한 계측장비의 주요 사양은 Table 1과 같다.

2.2 실험 조건

구획 화재에서 연소율이 급격히 변하는 현상을 분석하기 위해서 Figure 2와 같이 내화보드와 철판 각각의 경우에 대해서 구조물이 밀폐된 벽면으로부터 길이방향으로 화원 위치가 0.2 m, 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m 그리고 2.0 m 떨어진 지점에서 연소면적 0.01 m²과 0.0225 m²일 때 연소시간에 따른 헤파탄의 기화된 질량과 벽면 근방 높이 0.2 m의 온도를 측정하였다.

2.3 결과 및 분석

Figure 3은 구획공간을 내화보드로 구성한 경우 연소시

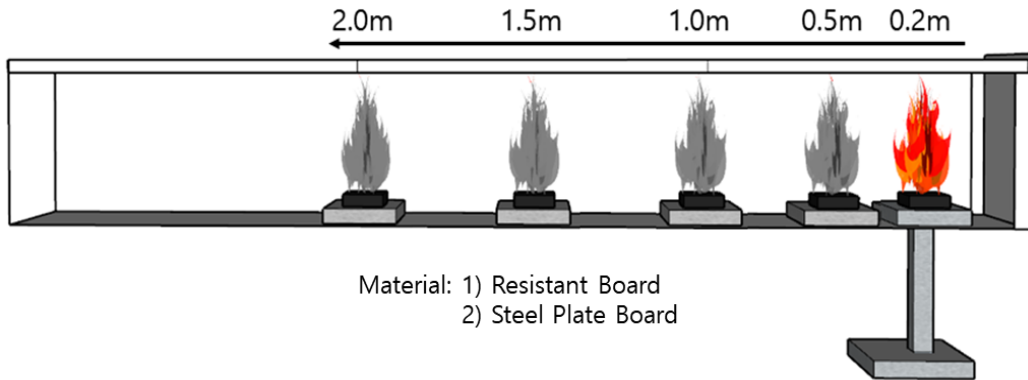


Figure 2. Schematic diagram of the experiment conditions in the compartment (fire-board and steel).

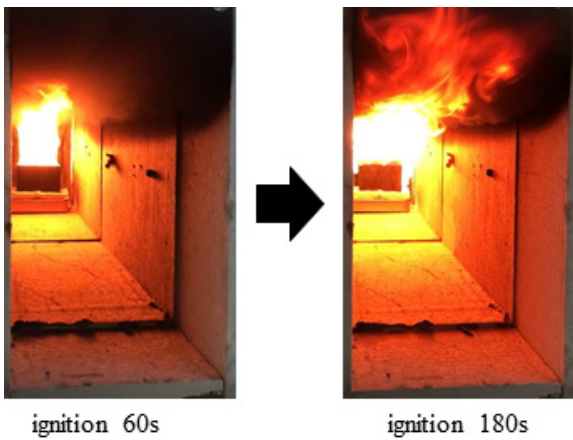


Figure 3. A picture of the flame shape in a compartment.

간 60 s와 180 s에서의 화염 형상을 나타낸 결과이다. 그림에서 보듯이 연소 초기에는 연소면적 주위로 화염이 형성된 것을 확인할 수 있지만, 시간이 증가함에 따라서 화염이 성장하여 구획 공간 개구부까지 확산된 것을 확인할 수 있다.

Figure 4는 헵탄 가연물의 질량 감소율을 측정하기 위한 로드셀의 정확성을 검증하기 위해서 분동 추와 로드셀 측정값을 비교한 결과이다. 본 연구에서 사용한 로드셀의 분해능(Accuracy)은 1 g 정도이며 약 0.5 g~2.0 g 정도에서 최대 오차가 10% 정도 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 질량이 소모되는 시간을 보다 정확히 산출하기 위해서는 질량 감소율을 고려하여 데이터의 분석시간을 선정해야 하며, 본 연구의 경우 샘플링 데이터(N_{sample})를 1/s로 하고 분석 시간은 분해능을 고려하여 2.0 g 이상인 경우로 질량 감소율을 산출하였다.

$$\dot{m}_{fuel} \times \Delta t > 2.0g \quad (1)$$

여기서 Δt 는 분석시간으로 수식에서 알 수 있듯이 $2.0g/\dot{m}_f$ 보다 큰 값을 가져야 하며, \dot{m}_{fuel} 은 헵탄의 질량 감소율로 다음과 같은 관계에 의해서 산출할 수 있다.

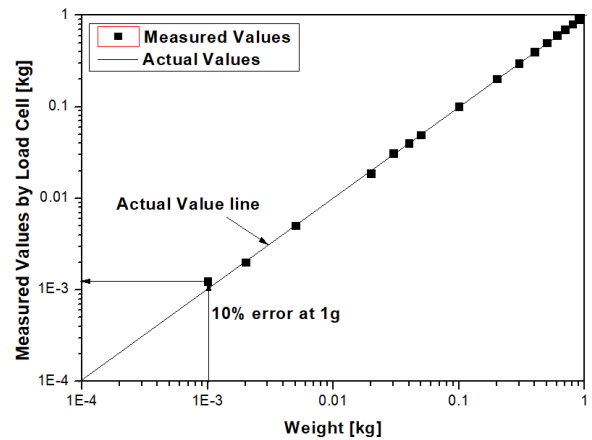


Figure 4. Comparison of load cell VS. Actual Values by weight.

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{m(t_i + \Delta t) - m(t_i)}{\Delta t} \quad (2)$$

여기서 t_i 는 샘플링 데이터의 시간을 의미하며, 헵탄의 질량유속(\dot{m}''_{fuel})은 아래와 같은 관계에 의해서 산출된다⁽¹⁰⁾.

$$\dot{m}''_{fuel} = \frac{\dot{m}_{fuel}}{Fuel\ area} \quad (3)$$

Figure 5는 구획공간의 재료가 내화보드이고 헵탄의 연소면적이 0.01 m²인 경우 시간 변화에 따른 질량 감소율을 나타낸 결과이다. 대기가 개방된 공간에서 측정된 질량 감소율(Heptane Pool fire)과 구획공간이 밀폐된 벽면에서부터 거리 0.2 m, 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 그리고 2.0 m 각각의 경우를 비교한 결과 연소 시작 시간에서부터 약 250 s까지 질량 감소율은 0.09 g/s 정도로 개방된 공간에서와 동일한 상태(Steady state region)를 유지하고 있지만 질량 감소율이 비선형으로 변하는 약 250 s~350 s 구간(Unsteady region) 이후 화염의 크기가 급격히 증가하면서 질량 감소율은 최소 0.83 g/s에서 최대 1.66 g/s까지 급격히 증가(Increased region)

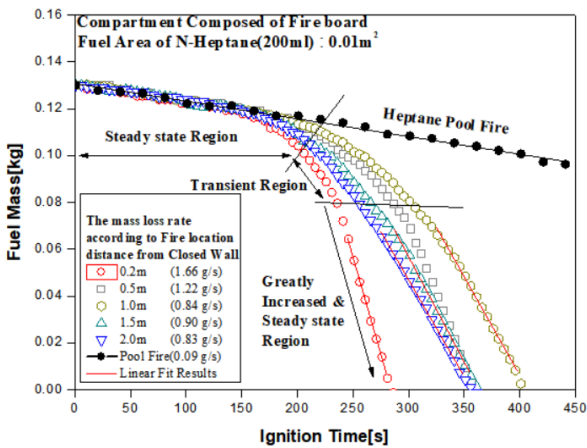


Figure 5. The mass loss rate of heptane for each distance of the fire origin location from the closed wall in the fire-board compartment (fuel area = 0.01 m²).

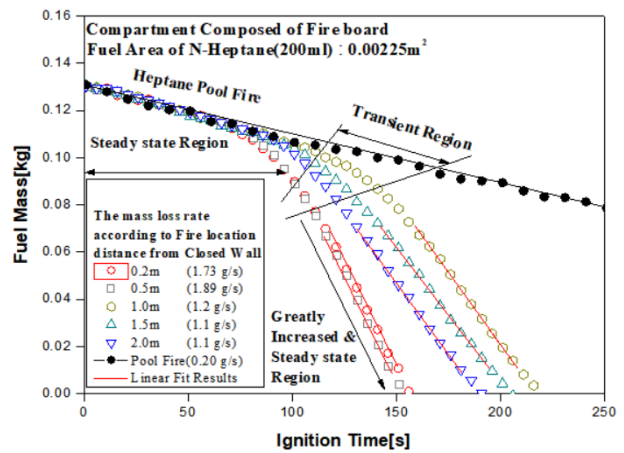


Figure 6. The mass loss rate of heptane for each distance of the fire origin location from the closed wall in the fire-board compartment (fuel area = 0.0225 m²).

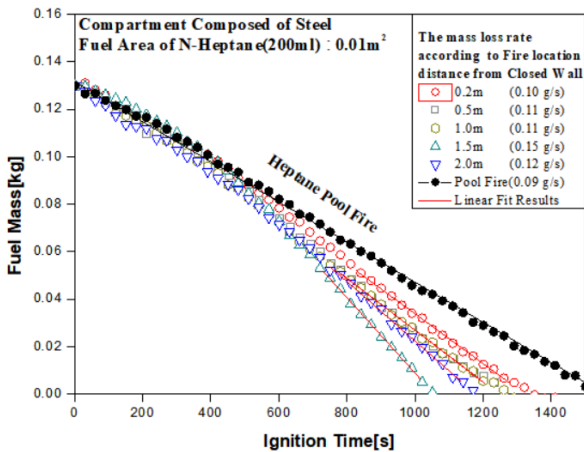


Figure 7. The mass loss rate of heptane for each distance of the fire origin location from the closed wall in the steel compartment (fuel area = 0.01 m²).

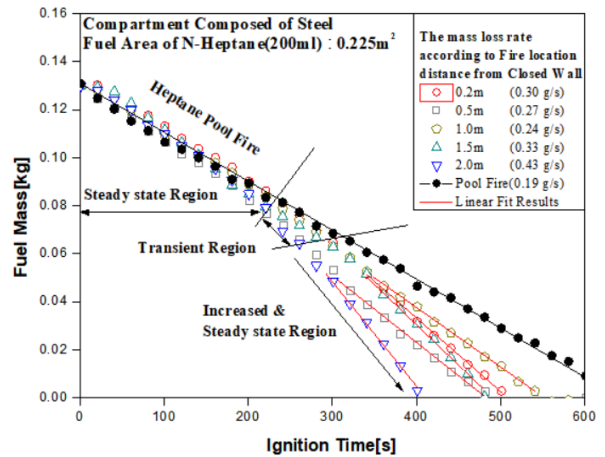


Figure 8. The mass loss rate of heptane for each distance of the fire origin location from the closed wall in the steel compartment (fuel area = 0.0225 m²).

하는 것으로 나타났다. 특히, 화원의 위치가 밀폐된 벽면으로부터 0.2 m와 0.5 m 떨어진 지점에서 질량 감소율은 1.66 g/s와 1.22 g/s로 높게 나타난 반면 1.0 m, 1.5 m 그리고 2.0 m 떨어진 지점의 질량 감소율은 각각 0.84 g/s, 0.90 g/s 그리고 0.83 g/s로 상승 폭이 유사한 것을 확인할 수 있다.

Figure 6은 구획공간의 재료가 내화보드이고 헵탄의 연소면적이 0.0225 m²인 경우 시간 변화에 따른 질량 감소율을 나타낸 결과이다. 대기가 개방된 공간에서 측정한 질량 감소율(Heptane pool fire)과 구획공간이 밀폐된 벽면에서부터 거리 0.2 m, 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 그리고 2.0 m 각각의 경우를 비교한 결과 연소 시작 시간에서부터 약 110 s까지 질량 감소율은 0.20 g/s 정도로 개방된 공간에서와 동일한 상태(Steady state region)를 유지하고 있지만 질량 감소율이 비선형으로 변하는 약 110 s~150 s 구간(Unsteady region) 이후 화염의 크기가 급격히 증가하면서 질량 감소율은 최소 1.10 g/s에서 최대 1.89 g/s까지 급격히 증가(Increased

region)하는 것으로 나타났다. 특히, 화원의 위치가 밀폐된 벽면으로부터 0.2 m와 0.5 m 떨어진 지점의 경우 연소시간 약 120 s에서 질량 감소율이 약 1.83 g/s로 유사하게 나타났으며, 1.0 m, 1.5 m, 그리고 2.0 m인 경우 질량 감소율은 평균 1.13 g/s 정도로 상승 폭이 유사한 것을 확인할 수 있다. 하지만, 연소율이 변하는 시간은 반복 실험 과정에서 초기 연료 투입 양과 점화 시점 그리고 유면의 높이의 편차에 의해서 정확히 고려하지 못한 결과이며, 본 연구의 경우 구획 공간을 구성하는 재료에 따라서 질량 유속의 크기가 변하는 관계를 분석하는데 보다 중요한 목적이 있다.

Figure 7은 철판으로 구성된 구조물에 대해서 헵탄의 연소면적이 0.01 m²인 경우 시간 변화에 따른 질량 감소율을 나타낸 결과이다. 밀폐된 벽면으로부터 0.2 m, 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m 그리고 2.0 m 떨어진 지점에서 질량 감소율은 각각 0.10 g/s, 0.11 g/s, 0.11 g/s, 0.15 g/s 그리고 0.12 g/s로 개방된 조건에서의 질량 감소율인 0.09 g/s와 편차는 최소 11%에서

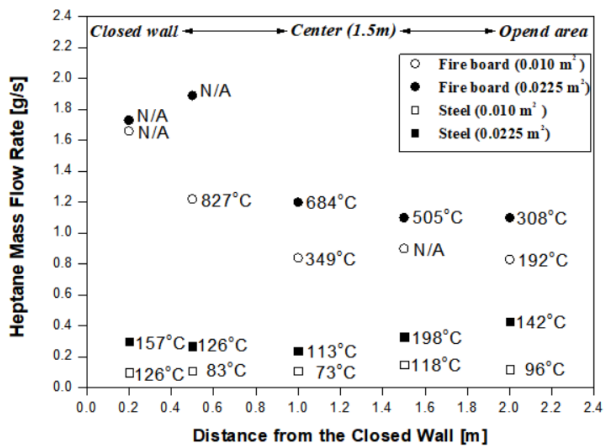


Figure 9. The mass flow rate of heptane for each distance of the fire origin location from the closed wall in the compartment.

최대 33% 정도 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 8은 철판으로 구성된 구조물에 대해서 헵탄의 연소면적이 0.0225 m²인 경우 연소시간 변화에 따른 질량 감소율을 나타낸 결과이다. 밀폐된 벽면으로부터 0.2 m, 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m 그리고 2.0 m 떨어진 지점에서 질량 감소율은 각각 0.30 g/s, 0.27 g/s, 0.24 g/s, 0.33 g/s 그리고 0.43 g/s로 개방된 조건에서의 질량 감소율 0.19 g/s와 최소 26%에서 최대 126% 증가하는 것으로 나타났다. 하지만, 밀폐된 벽면에서부터 1.0 m 이상의 거리에서는 화원의 위치가 개구부에 근접해 감에 따라서 질량유량이 증가하는 경향을 확인할 수 있으며, 정확한 분석을 위해서는 구획 공간 재료의 열적 특성에 따른 내부 온도 분포와 미 연소된 연소 생성물 그리고 산화제의 유동 특성을 고려한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Figure 9는 내화보드와 철판 구조물 각각에 대해서 질량 감소율과 최대 온도를 나타낸 결과이다. 높이 0.2 m에서 길이방향으로 5개의 지점에서 연소면적 0.01 m²과 0.0225 m² 각각의 온도 분포를 분석한 결과 화원이 위치한 지점에서의 온도가 가장 높게 나타났으며, 그림에서 보듯이 철판(steel) 구조물의 연소면적 0.01 m²인 경우 질량 감소율은 0.1 g/s~0.15 g/s이며 화원의 위치와 상관없이 평균 0.13 g/s로 약 ±11% 범위에서 일치하였으며 최대 온도는 126 °C 정도이며, 연소면적 0.0225 m²의 경우 질량 감소율은 0.24 g/s~0.43 g/s이며 밀폐된 벽면에서부터 개구부 방향으로 길이가 증가할수록 질량 감소율이 보다 높았으며 대기가 개방된 조건 보다 약 2.6배 정도 증가하였다. 최대 온도는 198 °C인 것을 확인할 수 있다. 하지만, 동일한 실험조건에 대해서 내화보드(Fire-board) 구조물의 경우 연소면적 0.01 m²에 대해서 질량 감소율은 0.83 g/s~1.66 g/s이고 연소면적 0.0225 m²의 경우 질량 감소율은 1.10 g/s~1.73 g/s 정도로 철판 구조물에 비해서 약 6배 이상 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 내화보드 구조물의 최대 온도는

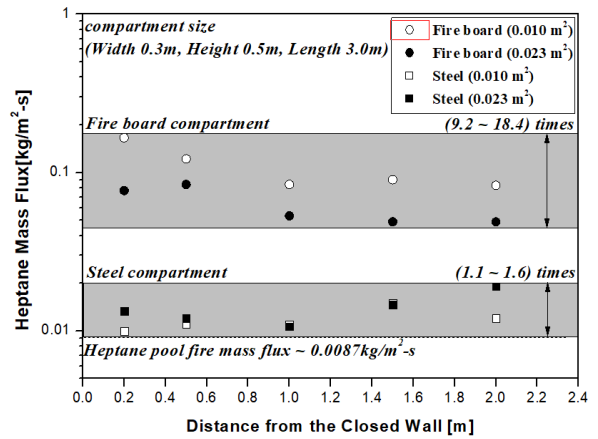


Figure 10. The mass flux of heptane for each distance of the fire origin location from the closed wall in the compartment.

화염이 확산되는 과정에서 측정값의 편차가 발생하였으며, 그 결과 최대값의 분석은 어려운 것으로 판단된다.

Figure 10은 헵탄 화원의 연소면적이 0.01 m²와 0.0225 m² 각각의 경우 내화보드와 철판으로 구성된 구조물 내부에서 동일한 연료가 연소되었을 때의 질량 유속 산출 값을 비교한 결과이다. 즉, 구획공간의 폭 0.3 m, 높이 0.5 m 그리고 길이 3.0 m의 한 쪽 면이 완전히 개방된 구조물에 대해서 밀폐된 벽면으로부터 개구부 방향으로 2.0 m까지 길이 방향에 따른 질량유속을 분석한 결과 연소 초기 0.0087 kg/m²·s에서 열전도 계수가 $O(\sim 0.1 \text{ W/m}\cdot\text{K})$ 인 내화보드 구조물의 경우 최대 0.166 kg/m²·s로 증가하였으며, 열전도 계수가 $O(\sim 10 \text{ W/m}\cdot\text{K})$ 인 철판 구조물의 경우 최대 0.019 kg/m²·s 증가하였으며, 본 연구에서 도출한 결과를 Table 2에 나타내었다.

3. 결 론

본 연구에서는 내화보드와 철판 각각을 사용하여 폭 0.3 m, 높이 0.5 m 그리고 길이 3.0 m의 한 쪽 면이 완전히 개방된 구조물을 제작하였으며, 헵탄의 연소면적 0.01 m²과 0.0225 m² 각각에 대해서 화원의 위치 변화에 따른 질량 감소율과 온도분포를 측정하여 다음과 같은 사항을 분석하였다.

첫째, 내화보드로 구성된 구획 공간에서 헵탄의 연소면적 0.01 m²와 0.0225 m²의 질량 감소율을 산출한 결과 연소 초기 정상상태 구간 이후 연소율이 급격히 변화한 시간은 각각 약 250 s~350 s와 110 s~150 s 정도로 나타났다. 하지만, 보다 정확한 시간을 분석하기 위해서는 초기 연료 투입 양과 점화 지점 그리고 유면의 높이에 대한 편차 등을 정확히 고려해야 할 것으로 판단된다.

둘째, 내화보드로 구성된 구획 공간의 경우 벽면의 열전도계수가 $O(\sim 0.1 \text{ W/m}\cdot\text{K})$ 로 철판에 비해서 매우 작기 때문에 화원에서 발생된 열기가 내부에 축적되어 질량 감소

Table 2. The Results of Mass Flow Rate, Mass Flux and Maximum Temperature in the Compartment Fire

Location (m)	Fuel Area(m ²)	Fire-board			Steel		
		Mass Flow Rate (g/s)	Mass Flux (kg/m ² -s)	Near the Wall Temp.	Mass Flow Rate (g/s)	Mass Flux (kg/m ² -s)	Near the Wall Temp.
0.2	0.01	1.66	0.166	N/A	0.1	0.010	126
0.5		1.22	0.122	827	0.11	0.011	83
1		0.84	0.084	349	0.11	0.011	73
1.5		0.9	0.090	N/A	0.15	0.015	118
2		0.83	0.083	192	0.12	0.012	96
0.2	0.0225	1.81	0.081	N/A	0.3	0.013	157
0.5		1.81	0.081	N/A	0.27	0.012	126
1		1.2	0.053	684	0.24	0.011	113
1.5		1.1	0.049	505	0.33	0.015	198
2		1.1	0.049	308	0.43	0.019	142

율이 보다 높게 나타난 것으로 판단된다.

셋째, 철판의 경우 열전도계수가 $O(\sim 10 \text{ W/m}\cdot\text{K})$ 로 내화보드에 비해서 높기 때문에 화원에서 발생된 열원이 벽면에 도달한 이후 보다 빠르게 외부로 전달되어 질량 감소율의 변화가 비례하여 작아진 것으로 판단된다.

넷째, 내화보드와 철판 구조물 각각에 대해서 연소면적 0.01 m²과 0.0225 m² 각각의 온도 분포를 분석한 결과 철판(steel) 구조물의 경우 최대 온도는 126 °C와 198 °C로 나타났으나, 내화보드(fire-board) 구조물의 최대 온도는 화염이 확산되는 과정에서 측정값의 편차가 발생하여 최대값을 판단하는데 한계가 발생하였다. 하지만 본 연구 결과에서 확인할 수 있듯이 구획 화재 확산을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 벽면의 재료 특성과 화원의 위치 변화에 따른 질량 감소율을 고려하여 화재시나리오가 구성되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 소방청 소방대응력 향상을 위한 연구개발서(2018-NFA002-008-01010000-2018)의 지원을 받아 이루어진 것으로 이에 감사합니다.

References

1. S. C. Kim and G. H. Ko, "Characteristics of Heat Flux in a Compartment Fire - Reduced Scale Test", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No. 5, pp. 128-133 (2011).
2. W. J. You, D. G. Nam and M. C. Youm, "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).

3. J. H. Lee, W. J. Kim and J. C. Kim, "A Literature Review on Compartment Fire Temperatures during Fully Developed Fire", Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 30, No. 10, pp. 21-28 (2014).
4. K. H. Oh, S. J. La and S. E. Lee, "A Study on the Characteristics of Pool Fire", Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 39-44 (2004).
5. S. C. Kim, "A Study on Fire Characteristics of Solid Combustible Materials Based on Real Scale Fire Test", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No. 5, pp. 62-68 (2011).
6. A. Hamins, C. Y. Jiann and K. Takashi, "A Global Model for predicting the Burning Rates of Liquid Pool Fires", NISTIR 6381 (1999).
7. F. G. Quintiere and M. F. Harkleroad, "New Concepts for Measuring Flame Spread Properties", National Bureau of Standards, NBSIR-84-2493 (1984).
8. F. P. Incopera and D. P. Dewitt, "Introduction to Heat Transfer", pp. 79-86 (1996).
9. W. J. You and G. H. Ko, "Investigation of the Relationship Between Wall Thermal Conductivity and Inner Room Temperature in Compartment Fires", Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 2, pp. 17-23 (2018).
10. J. Dinunno and Philip, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", SFPE (2008).