

가연성 물질에 따른 워터커튼 시스템의 열 및 연기유동 제어특성에 관한 연구

A Study on the Effect of Inflammable Materials on the Control Characteristics of Thermal and Smoke Fluid of Water Curtain System

유우준 · 남준석* · 김동준** · 이정균** · 유홍선†

Woo-Jun You · Jun-Seok Nam* · Dong-Joon Kim** ·
Jeong-Kyoon Lee** · Hong-Sun Ryou†

중앙대학교, *한국소방산업기술원, **(주)파라다이스산업
(2012. 1. 10. 접수/2012. 2. 10. 수정/2012. 4. 13. 채택)

요 약

본 연구에서는 가연성 물질을 고려한 워터커튼 시스템(Water Curtain System)의 열 및 연기유동 제어 특성을 실험적으로 분석하였다. 이를 위해서 Room Corner Tester(RCT)를 사용하여 연료의 종류가 소나무(PineWood)와 가솔린(Gasoline)인 경우 각각의 발열량(Heat Release Rate)을 구하였으며, 워터커튼용 화재 실험 장치를 제작하여 화원근방에서 5m 떨어진 지점의 천장 부근에 분사각도 180°, 오리피스 직경 8.2mm의 노즐(Nozzle)을 설치한 후 목재와 가솔린 각각에 대해서 화재실험을 실시하여 워터커튼 전후의 온도분포와 가시도를 측정하였다. 그 결과 워터커튼 시스템의 열 및 연기유동 제어는 가연성 물질의 연소특성에 따른 고온의 연기발생량과 분사 노즐에 의한 유동현상이 중요한 상관관계를 갖고 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

In this study fire control characteristics for inflammable materials of water curtain system are experimentally analyzed. Heat release rate for pinewood and gasoline was calculated using Room Corner Tester (RCT) and fire test apparatus for water curtain system is manufactured. Nozzles (180 degree of injection angle, 8.2 mm of orifice diameter) are installed at the nearby ceiling of place at 5 m distance from fire originate and temperature profile as well as transmission are obtained from the fire experiment of pinewood and gasoline in the water curtain system. Based on the results, parameters of engineering importance for fire control characteristics of water curtain system such as generation of high temperature smoke and thermal phenomena of fluid flow by injection nozzle are identified.

Key words : Inflammable materials, Water curtain system, Room corner tester, Heat release rate, Nozzle

1. 서 론

현대의 도시 구조는 교통, 상업, 주거, 공공시설 등 다양한 형태의 기능을 포함하고 있으며, 이제는 지상에서 뿐만 아니라 지하공간의 활용이 요구되는 추세이다.¹⁻³⁾ 하지만 국내에서 발생한 지하철 화재사고 사례에서 보듯이 지하공간에서 화재가 발생한 경우 연기의 이동 경로와 피난동선이 동일하여 다량의 인명피해를 발생시킬 수 있으며, 연소가 지속됨에 따라서 환기부

족 상태에 이르게 된다. 이러한 환기부족 상태는 가연성 물질의 열적 피드백 현상으로 인해서 연료 증기가 공간 내부를 채우게 되고 산소가 부족해지기 때문에 불완전 연소형태가 지속될 수 있다.⁴⁾ 특히, 지하공간은 가연성 물질의 종류에 따라서 환기부족상태에 도달하는 정도가 다르며 피난의 장애요소인 그을음(Soot)과 인체에 치명적인 영향을 미치는 일산화탄소(CO) 등 유독가스의 생성량과 중요한 상관관계를 갖고 있다. 국내의 연구 자료에 의하면 노삼규^{1,2)} 등은 이러한 지하공간에서 화재가 발생한 경우 제연설비와의 연동성과 제연 경계벽의 중요성을 제안하였고, 김홍열⁵⁾ 등은 지

† E-mail: cfdmec@cau.ac.kr

하공간의 제연설비 성능에 관한 연구를 수행한 바 있으며 최근 노즐의 분사 형태를 얇은 커튼(Curtain)으로 하여 지하공간에서 열 및 연기의 이동을 차단하기 위한 워터커튼 시스템의 적용 방안이 제시되고 있다.^{3,6)} 따라서 본 연구에서는 가연물의 종류를 고려한 워터커튼 시스템의 열 및 연기유동 제어특성을 분석하기 위해서 Room Corner Tester(RCT)를 사용하여 목재와 가솔린 각각의 연소 생성물을 측정하고 발열량을 구하였으며 워터커튼 실험장치의 화재실험을 실시하여 온도 분포와 가시도를 측정하였다.

2. 본 론

2.1 연료의 발열량 측정

Figure 1은 ISO 9705의 기준에 의해서 제작된 RCT 실험장치로 그림에서 보듯이 계측 및 제어부, 덕트, 연소용 시험실, 시험용 화원 및 지지대 등으로 구성되어 있다. RCT 측정 데이터는 연소가스의 배출속도, 소화시간, 발열량, 산소(O₂)·이산화탄소(CO₂)·일산화탄소(CO)의 소모량 등으로 연료의 종류를 고려한 가연성 물질의 연소생성물과 발열량 측정이 가능하다.

Figure 2는 RCT 실험장치의 정확성을 검증하기 위한 Heptane의 연소실험 결과를 보여주고 있으며, 이론 발열량의 중간범위와 RCT 측정값이 거의 일치 하고 있는 것을 확인할 수 있다.

Figure 3은 국내 단위화재 시험기준⁸⁾에 의한 A급(Pinewood) 및 B급(Gasoline) 1단위 화재실험 과정에서

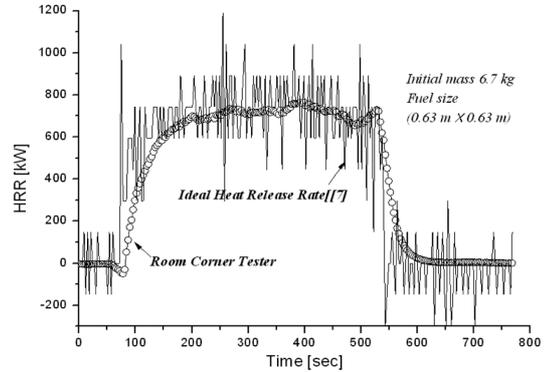


Figure 2. Heat release for heptane comparing the ideal heat release rate and room corner tester.

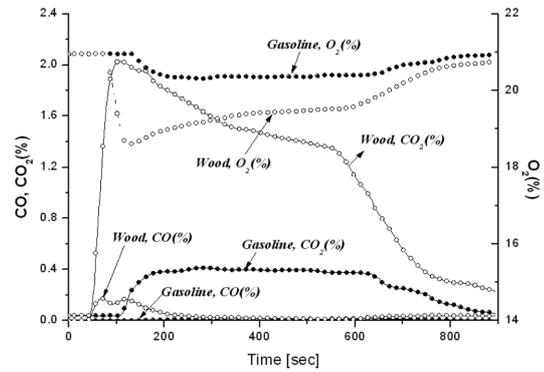


Figure 3. Combustion product for Pinewood and gasoline.

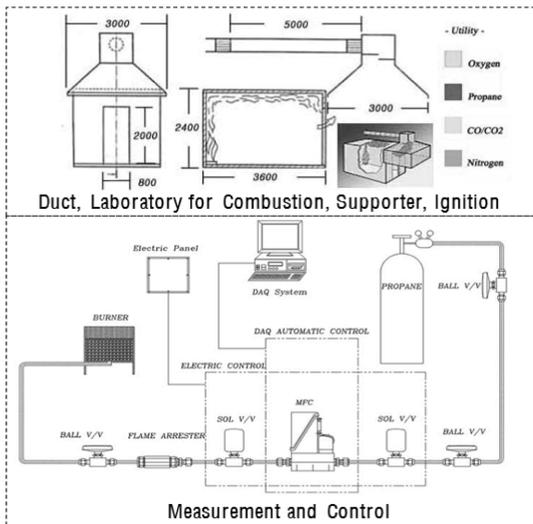


Figure 1. Schematic of room corner tester.

생성된 O₂, CO₂, CO의 측정결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 가솔린의 경우 O₂와 CO₂의 발생량이 일정하고 CO의 양이 매우 작은 반면 소나무의 경우 O₂가 증가할수록 CO₂의 양이 감소하고 연소 초기구간에 CO의 양이 가솔린에 비해서 많이 배출되는 것을 알 수 있다. 연소 조건중 화원의 크기는 소나무와 가솔린에 대해서 국내규격에 의한 1단위로 하여 연소시간 약 60초~800초까지 측정한 결과이며, 발열량은 식 (1)에 의해서 구할 수 있다.⁹⁾

$$\dot{q} = \left[E\Phi - (E_{CO} - E) \frac{1 - \Phi X_{CO}^A}{2 X_{O_2}^A} \right] \frac{\dot{m}_e}{1 + \Phi(\alpha - 1) M_a} \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^0) X_{O_2}^A \quad (1)$$

여기서 \dot{q} , E, Φ , X^A , X^0 , α , \dot{m} 그리고 M은 각각 발열량, 단위질량당 발열량, 산소분해인자(oxygen depletion

factor), 초기상태와 배기가스 각각에서의 물분을 측정 값, 연료의 구성인자(composition of the fuel), 질량유량 그리고 분자량에 대한 기호이며 하첨자 CO, H₂O, O₂는 분자기호를 의미한다. 식(1)에서 E = 13.1 MJ/kg, E_{CO} = 17.6 MJ/kg의 값을 가지며, \dot{m}_e , X_{H₂O}⁰, M_a 그리고 Φ 은 식(2)~(5)와 같은 관계에 의해서 구할 수 있다.^{9,10)}

$$\dot{m}_e = 26.54 \frac{Ak_c}{f(R_c)\sqrt{T_e}} \quad (2)$$

$$X_{H_2O}^0 = \frac{RHP_s(T_a)}{100 P_a} \quad (3)$$

$$M_a = M_{dry}(1 - X_{H_2O}^0) + M_{H_2O}X_{H_2O}^0 \quad (4)$$

$$\Phi = \frac{X_{O_2}^A(1 - X_{CO_2}^A - X_{CO}^A) - X_{O_2}^A(1 - X_{CO_2}^A)}{(1 - X_{O_2}^A - X_{CO_2}^A - X_{CO}^A)X_{O_2}^A} \quad (5)$$

여기서 A, ΔP , T_e, f(R_c), k_c, RH, 그리고 P_s(T_a)는 각 RCT에서 측정부의 덕트 단면적, 덕트의 압력차, 오

Table 1. Specification of Measurement³⁾

Sensor	Specification	Num
Thermo-couple	K-Type Length 200 mm	7 set ×3
Heat Fluxmeter	0~10 kW/m ²	1 set
Pressure Transducer	0~10 bar ±0.5% FSO	2 ea
Laser Measurement	0.5 m He-Ne Laser	1 ea
Nozzle Type	Injection angle: 180° Orifice Diameter: 8.2 mm	3 ea

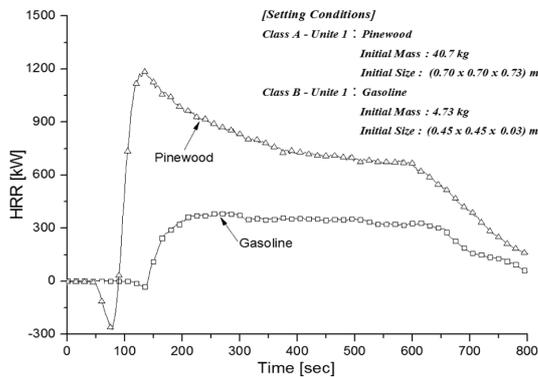


Figure 4. Heat release rate for comparing pinewood and gasoline.

리피스 평면에서 기체온도, 레이놀즈 수정계수, 속도구배 형상 인자, 상대습도 그리고 주위온도에 대한 포화 증기압을 의미한다.

Figure 4는 RCT를 사용하여 측정한 Φ , X^A, X⁰, α , \dot{m} 로부터 식(1)을 이용하여 구한 목재와 가솔린 각각의 발열량을 나타낸 것으로 소나무가 더욱 높게 측정되는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 유효 연소열(effective heat of combustion)이 소나무가 12.1 MJ/kg^{11,12)}인데 비해서 가솔린이 43.7 MJ/kg⁷⁾로 더욱 높지만 소나무의 연소체적과 질량이 가솔린보다 상대적으로 높기 때문에 동일한 시간 동안 소나무의 질량이 연료로 소모되어 발열량이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

2.2 실험장치제작

Figure 5는 워터커튼용 실험장치로 폭 5.0 m 높이 2.7 m 길이 15.0 m로 제작하여 중앙부에 화원을 배정하고 내·외부 공간의 온도변화를 측정하기 위해서 열전대 6개 각각에 대해서 높이 2.5 m 지점에 온도센서를 설치하였으며 출구 부분에는 레이저 투광기를 설치하여 방호 수막 동작 전·후의 가시도를 측정하였다.³⁾ 공급되는 급수압력을 모니터링하기 위한 압력센서를 2 개소에 배정하였으며 연기의 유동을 관찰하기 위한 초고속카메라와 무선 IP카메라 3대를 배정하여 워터커튼과 화원 사이구간, 화재실험모형 양 끝단에서 연기의 유동상황을 관찰하였다. 각종 센서로부터의 측정 Data는 Labview S/W 프로그램과 Agilent DAQ 장비를 이

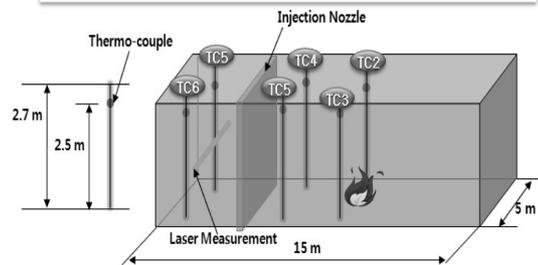


Figure 5. Schematic of water curtain experiment.

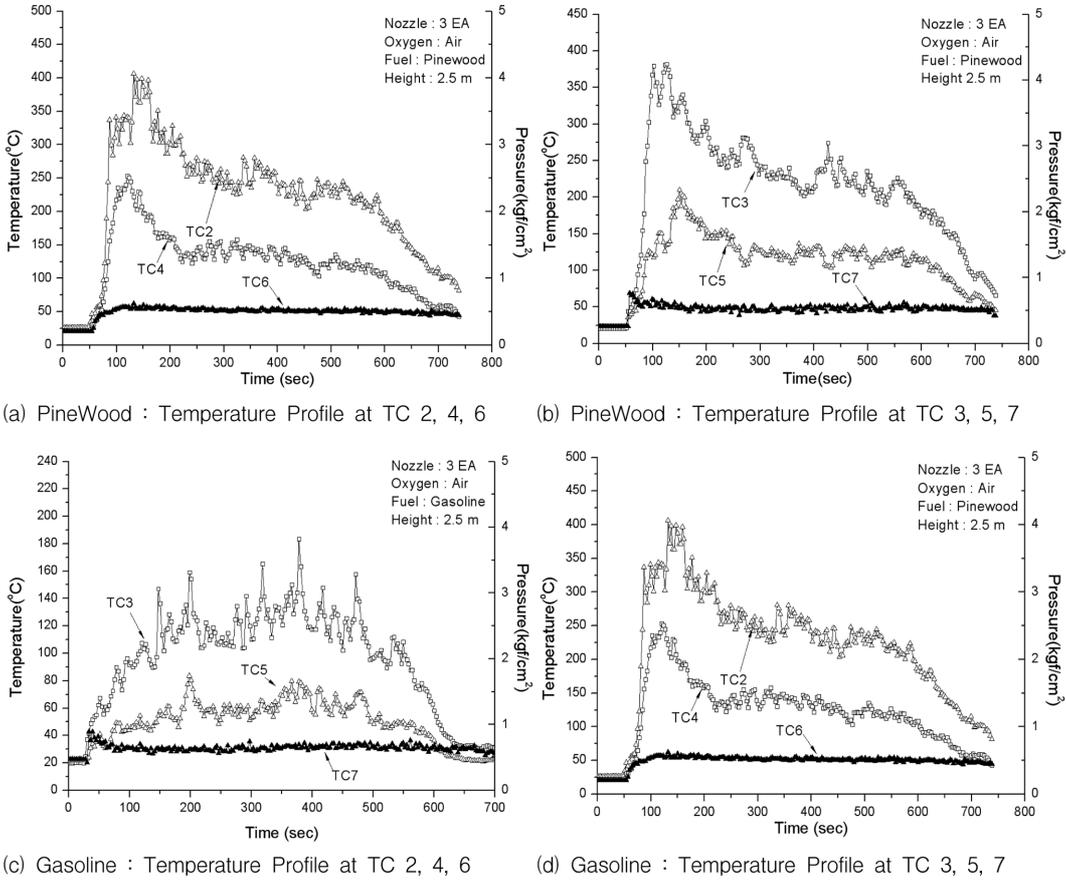


Figure 6. Temperature profile for comparing pinewood and gasoline.

용하여 수집하였으며 계측장비 및 노즐의 사양은 Table 1과 같다.

2.3 화재실험 시나리오 구성

지하공간은 다중이용시설 등이 자리하고 있으며 지하상가의 경우 의류, 인테리어 소품 등 갖가지 상품이

진열되어 있으나 이러한 가연성 물질에 대한 화재실험 데이터가 부족한 상태이며 본 연구에서는 소나무와 가솔린을 사용하여 국내 소화시험 규격 1단위 화재실험으로부터 구한 연소생성물과 발열량이 워터커팅 시험 장치에 의해서 열 및 연기가 제어되는 현상을 분석하기 위해서 Table 2와 같이 화재실험 조건을 구성하였다.

Table 2. Fire Scenario

Classification	Specification
Fuel	Gasoline (C ₃ H ₈), Pinewood (CH _{1.7} O _{0.83})
Oxygen	Air (O ₂ + 3.76 N ₂)
Heat Release Rate	Peak HRR _{Pinewood} = 1210 KW HRR _{Gasoline} = 300 KW
Combustion Time	~740 sec
Heat of Combustion	Δh _{c, gasoline} = 43.6 MJ/kg Δh _{c, Pinewood} = 12.0 MJ/kg

2.4 실험결과

2.4.1 온도분포

Figure 6은 연료의 종류가 소나무와 가솔린인 경우 워터커팅 실험장치의 화원 중앙에서 길이방향으로 온도분포 측정결과를 보여주고 있다. 화재실험 과정동안 측정된 온도는 화원중앙에서 외벽방향으로 좌우 각각 1 m 떨어진 지점에서 길이방향으로 0 m 떨어진 지점의 천장온도(TC2, TC3), 2.5 m 떨어진 지점의 천장온도(TC4, TC5), 6.5 m 떨어진 지점의 천장온도(TC6, TC7)이며, 배관의 공급압력을 3.4 MPa인 조건에서 노

즐은 화원의 길이방향으로 5.0 m 떨어진 지점에서 천장의 중앙부와 좌우 각각 약 1.6 m 간격을 두고 3개를 설치하였다. Figure 6의 (a)와 (b)에서 보듯이 연료가 소나무인 경우 화원에서 발생한 고온의 열기가 천장부근에서 양방향으로 확산되고 화원 근방의 온도 TC2와 TC3에서 최대 400 °C까지 상승한 후 길이방향으로 이동하면서 TC4와 TC5에서 200 °C로 하강하고 워터커팅 노즐을 통과하면서 온도가 급격히 하강하여 TC6과 TC7에서 50 °C까지 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 특히 화원 근방에서 측정된 TC2와 TC3의 온도분포 형태가 Figure 5의 소나무 발열량과 유사하며, 워터커팅 노즐에 의해서 열기가 차단되는 것을 알 수 있다.

Figure 6의 (c)와 (d)는 가솔린의 화재실험에 대한 온도분포로 화원근방의 TC2와 TC3에서 최대 180 °C까지 상승한 후 길이방향으로 2.5 m에서 온도가 60 °C로 하강하는 것을 보여주고 있다. 하지만 워터커팅 노즐을 통과하면서 6.5 m 지점에서 TC 6과 TC 7이 약 45 °C와 30 °C로 온도차가 발생하는데 그 이유는 화원에서 발생하는 열기류가 수평방향으로 이동하면서 노즐에서 분사되어 수직 하향하는 수막의 운동량에 의해서 유동의 간섭을 받는 정도와 연료의 종류에 따른 발열량의 크기 그리고 연소생성물인 O₂, CO₂, CO의 생성량에 따라서 국부지점의 온도차가 발생할 수 있는 것으로 사료된다.

2.4.2 가시도

Figure 7은 연료의 종류가 소나무인 경우 워터커팅 실험장치의 화원 중앙에서 길이방향으로 5 m 떨어진 지점에 노즐 1개와 3개를 각각 설치하였을 때 수막 이후 높이 약 1.5 m 지점의 가시도 측정 결과를 보여주고 있다. 노즐 1개를 설치하여 실험한 경우 워터커팅

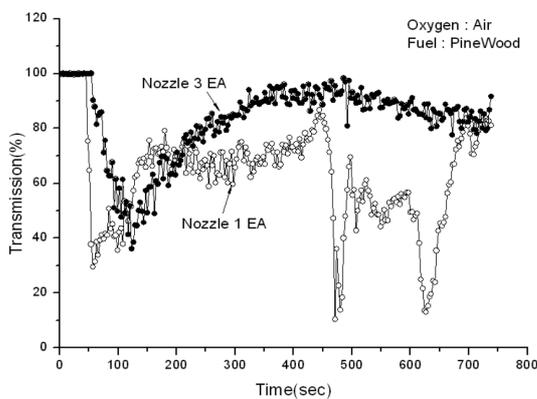


Figure 7. Transmission results (Pinewood).

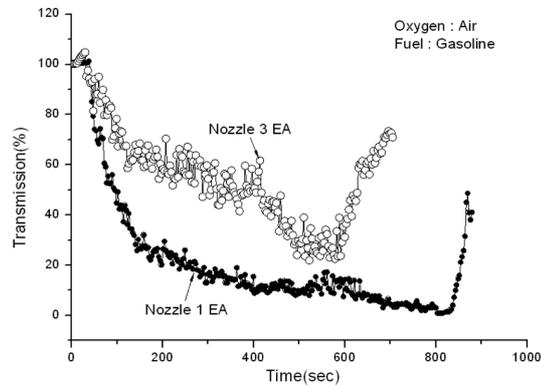


Figure 8. Transmission results (Gasoline).

유무에 따른 가시도 효과를 확인하기 위해서 약 450초 지점에서 가시도가 급격히 떨어지는 것은 노즐로 유입하는 공급밸브를 차단하였기 때문이며 그림에서 보듯이 시간이 경과함에 따라서 가시도는 Figure 6의 소나무 발열량과 반비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 고온의 열기를 가진 연기가 수막을 통과하면서 냉각되어 멀리 이동하지 못함으로써 연기밀도를 저감시켜는 것으로 사료된다.

Figure 8은 연료의 종류가 가솔린인 경우 워터커팅 실험장치의 화원 중앙에서 길이방향으로 5 m 떨어진 지점에 노즐 1개와 3개를 각각 설치하였을 때 수막 이후의 가시도 측정 결과로 노즐을 1개 설치한 경우에 비해서 3개 설치한 경우의 가시도가 더욱 향상되는 것을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 가시도가 시간이 경과함에 따라서 감소하는 것을 확인할 수 있는데 그 이유는 가솔린의 경우 연료표면적은 일정하지만 약 600초 정도에서 Figure 3의 CO의 감소에 따른 Figure 4의 발열량이 감소되는 것을 확인할 수 있으며, 이로 인해서 연료가 거의 소모되어 화원의 크기가 감소하였기 때문에 가시도가 상승하는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 가연성 물질의 종류를 고려한 워터커팅 시스템의 열 및 연기유동 제어 특성을 실험적으로 분석하기 위해서 Room Corner Tester를 사용하여 소나무와 가솔린 각각의 발열량을 구하였으며, 워터커팅용 화재 실험 장치를 제작하여 화원근방에서 5 m 떨어진 지점의 천장 부근에 분사각도 180°, 오리피스 직경 8.2 mm의 노즐을 설치한 후 화재실험을 실시하여 워터커팅 전후의 온도분포와 가시도를 측정하였다. 그 결과

다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

첫째, 소나무와 가솔린의 연소생성물 및 발열량 측정결과 연소가 지속되는 동안 가솔린은 CO가 거의 발생하지 않는데 비해서 O₂, CO₂ 및 발열량의 크기가 일정한 반면 소나무는 연소 초기 구간에 CO가 일시적으로 상승한 후 감소하였으며, O₂는 연소가 진행됨에 따라서 증가하는 반면 CO₂와 발열량이 감소하는 것을 실험적으로 분석하였다.

둘째, 가연성 물질인 소나무와 가솔린을 사용하여 워터커팅 실험 장치에서 국내 규격에 의한 A·B급 1단위 화재실험을 실시하였으며, 열 및 연기 차단효과를 정량적으로 비교하기 위해서 온도분포와 가시도를 측정하였다. 특히, 가솔린의 1단위 화재실험 과정에서 노즐을 전·후로 하여 국부 온도차가 달라지는 것을 확인하였으며 이는 화원에서 발생하는 열기류가 수평방향으로 이동하면서 노즐에서 분사되어 수직 하향하는 수막의 운동량에 의해서 유동의 간섭을 받는 정도와 연료의 종류에 따른 발열량의 크기 그리고 연소생성물인 O₂, CO₂, CO의 생성량에 따라서 국부지점의 온도차가 발생할 수 있는 것으로 판단된다.

셋째, 소나무와 가솔린의 가시도 측정결과 노즐의 설치 개수가 증가할수록 연기의 차단효과가 뛰어나지만 가솔린의 연소과정동안 발열량이 일정하여 화원과 분사노즐에 의한 수막사이에 그을음이 연속적으로 생성되어 투과율이 반비례하는 것을 실험적으로 확인하였으며, 보다 다양한 가연물에 대해서 실험을 진행한다면 연기 유동에 의한 가시도와 연소생성물의 상관관계를 제시할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 본 연구의 결과로부터 가연물의 종류, 연소특성에 따른 고온의 발열량 그리고 분사노즐에 의한 유동 현상을 분석하고 온도분포와 가시도를 측정하여 워터커팅 시스템에서 피난에 영향을 줄 수 있는 연기 유동과 화재의 확산을 방지하기 위한 열의 정량적인 제어가 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. J.S. Kim, J.K. Park, and S.K. Roh, "A Study on the Development of Evacuation Safety Assessment System on Underground Space", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol.17, No.4, pp.57-63(2003).
2. S.K. Roh and J.H. Hur, "A Study on the Risk Assessment of the Underground Space - The Estimation of Smoke Reservoir Screen for Smoke Control in Subway Station Platform", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol.18, No.4, pp.103-109(2004).
3. W.J. You, J.S. Nam, J.J. Choi, and D.J. Kim, "An Analysis of the Smoke Control Characteristics of Water Curtain System for Underground Space", Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference, pp.298-301(2011).
4. G.H. Ko, S.C. Kim, A. Hamins, and H.S. Ryou, "FDS Simulation and Validation on the Under-Ventilated Compartment Fires", J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol.23, No.5, pp.103-109 (2009).
5. C.S. Ahn, H.S. Chae, and H.Y. Kim, "A Study on the performance Criteria of Smoke Control System for Underground Spaces Through Numerical Analysis", KIFSE, Proceedings of 2008 Autumn Annual Conference, pp.356-362(2008).
6. Reiko Amano, "Water Screen Fire Disaster Prevention System", Seisan-Keneyu, Vol.57, No.4, pp.177-181 (2005)
7. The SFPE Handbook 4th, Chapter 3(2008).
8. Standards of Model Approval and Inspection Technology for Manual Extinguisher, National Emergency Management Agency Notice No.2010-13.
9. V. Babrauskas and S.J. Grayson, "Heat Release in Fires", Fire Science and Technology Inc.
10. W.K. Chow and S.S.Han, "Heat Release Rate Calculation in Oxygen Consumption Calorimetry", Applied Thermal Engineering, Vol.31, pp.304-310 (2011).
11. Robert H. White and Mark A. Dietenberge, "Wood Handbook - Wood as an Engineering Material", Forest Products Laboratory, U.S.D.A Forest Service.
12. Y.J. Chung and M. Spearpoint, "Combustion Properties of Native Korean Wood Species", International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Vol.9, No.3, pp.118-125(2007).