

가열 상태의 다공성 판에 충돌하는 액적의 냉각 성능에 대한 기초 연구

류성욱* · 김우식* · 이상용†

Cooling Effect of a Heated Porous Plate by Droplets Impingement - A Preliminary Study

S. U. Ryu, W. S. Kim and S. Y. Lee

Key Wprds: Spray characteristics (분무 특성), Porous material (다공성 재질), Spray cooling (분무 냉각)

Abstract

In the present work, effects of spray characteristics (droplet size and velocity) on the temperature variation of a heated porous plate (Melamine foam) have been investigated through a series of experiments. Based on the measured data, time required to cool down the hot porous material turned out to be shorten by doing with the smaller droplet size and/or smaller impinging velocity. In particular, the droplet size effect is more prominent than the impinging velocity. The cooling performance in the porous material is directly proportional to the penetration velocity.

기호설명

d	diameter of droplet	[m]
V	droplet velocity	[m/s]

1. 서 론

스프링클러는 1874년 미국의 파밀리(Henry S. Parmelee)에 의해 발명된 이후로 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 소화장비 중 하나이다. 간단한 구조와 적은 제작 비용, 별도의 전력 공급없이 작동한다는 점, 소화액이나 소화분말이 필요 없이 쉽게 공급할 수 있는 물을 사용한다는 점, 화재 초기에 화염을 제어 혹은 제

압할 수 있는 장점을 가지고 있다. 스프링클러를 포함한 소화 장비의 국내 시장 규모는 2003년 기준으로 약 760만대 정도로 5년 전인1998년도의 330만대에 비해 100% 이상 수요가 급증하고 있다. 2009년에는 스프링클러에 대한 국내 시장 규모만 1000억원 이상으로 성장할 것으로 예상된다⁽¹⁾. 또한 장비의 수요량 증대와 함께 건축물의 안전 규제가 강화됨에 따라 소화 장비의 성능 개선에 대한 요구도 증가하고 있다.

화재 상황에서 스프링클러로부터 방사된 물은 화염과의 직접적인 접촉을 통해 화염을 냉각하고 화재를 진압(fire suppression)하는 역할과 함께 화염 주변의 고체 표면을 냉각함으로써 화염이 번지는 것을 막는 화재 제어(fire control)의 역할을 한다⁽²⁾. 일반적으로 사용되는 스프링클러는 후자와 같은 화재 제어의 목적으로 사용되며 화재 초기에 작동하여 전전실 화재 단계(growth period)에서 후전실 화재(fully developed fire)로 발전하는 플래시오버(flash over)를 예방하여 대피 시간을 확보하고 인명피해를 줄이는데 사용목적이 있다.

미립화된 액체에 의한 고체 표면의 냉각은 금속의

(2008년 2월 6일 접수 ~ 2009년 3월 24일 심사완료)

*KAIST 기계공학과

† 책임저자, 회원, KAIST 기계공학과

E-mail : sangyonglee@kaist.ac.kr

TEL : (042)350-3026 FAX : (042)350-8207

퀵칭, 전자장비 등과 같은 장치의 냉각 등의 여러 분야에 활용되는 이유로 Stodke와 Stephan⁽³⁾, Hsieh와 Yao⁽⁴⁾, Silke등⁽⁵⁾에 의해 다양하게 수행되었으나 대부분 금속 표면에 대한 실험 결과들이 주를 이루었다. 그러나, 화재 발생시 연소가 일어나는 대부분의 물질들은 낮은 열전도율을 가지는 다공성 재질들로서⁽⁶⁾ 이러한 다공성 재질의 특성이 화재에 미치는 영향을 파악하기 위해 Abu-Zaid와 Atreya⁽⁶⁾는 액적을 이용한 다공성 재질과 비다공성 재질의 냉각 특성을 비교하였다. 다공성 재료로는 33%의 다공도를 가지는 주조 가능한 다공성 세라믹 (castable porous ceramic)을 사용하였으며 비다공성 재료는 다공성 재질과 같은 열적 특성을 유지하기 위해 다공성 세라믹의 표면의 공극만 세라믹 분말로 채운 재료를 이용하였다. 그들은 각 재질의 표면과 다양한 깊이에 열전대를 설치하고 재료의 하부로부터 전도되는 열을 통해 표면을 일정 온도로 유지시킨 상태에서 액적을 충돌시켜 표면과 깊이 방향의 온도 변화를 측정하였다. 30 μl 의 액적을 100°C의 초기온도를 가지는 표면에 떨어뜨렸을 때 시간에 따른 온도 변화를 살펴본 결과 액적이 떨어진 후 액적이 모두 증발하는 시간(evaporation time)과 초기 온도로의 회복 시간(recovery time)이 비다공성 재료에 비해 다공성 재료의 경우가 오래 걸리는 것을 확인하였다. 주목할 점은 표면으로부터 깊이 방향으로 가장 멀리 떨어진 지점의 온도가 비다공성 재료의 경우 거의 변화가 없음에 반해 다공성 재료의 경우에는 약간씩 감소하는 경향을 보인다는 점이다. 그들은 이러한 차이가 다공성 재료 내부로의 물의 침투(penetration) 때문이라고 설명하였다. Abu-zaid⁽⁷⁾는 이후 같은 재료를 사용하여 재료의 상부로부터 표면에 복사열이 가해지는 경우에 대하여 액적에 의한 냉각 성능에 대하여 살펴보았다. 실험 결과 두 재료의 온도 변화 모두 하부에서 전도에 의해 열이 가해진 경우와 비슷한 경향을 보였지만 증발 시간과 회복시간 모두 이전 연구⁽⁶⁾에 비해 짧은 결과를 얻었다.

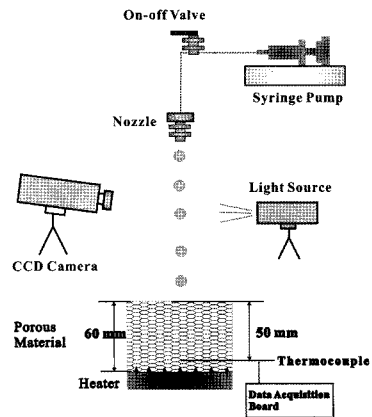
기존 연구들에서 다공성과 비다공성 재료의 냉각 특성이 차이를 보이는 주된 요인이라고 언급된 액적의 다공성 재료 내에서의 퍼짐 및 침투에 대한 연구는 현재 까지 매우 부족한 상황이다. 이에 본 연구에서는 액적의 분무 특성에 따른 침투 특성의 변화 및 다공성 판의 냉각 거동에 대해 살펴보았다. 이를 위해 액적이 다공성 판의 표면에 충돌한 후의 형상 변화 과정을 가시화 기법을 통해 살펴보았으며 재질 내부에서의 침투 속도 및 가열 상태의 다공성 판의 온도 변화 등을 측정하였다.

가열은 100°C 이하의 조건에서 이루어졌으며 이로 인해 재질 내부에서 수증기는 생성되지 않았다. 다공성 판의 온도가 액적의 비등점보다 높을 경우 재질 내부에서 발생하는 기체의 영향으로 현상이 달라질 수 있으며 이 경우 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 비등 현상이 발생하지 않는 가열조건으로 실험을 국한하였다.

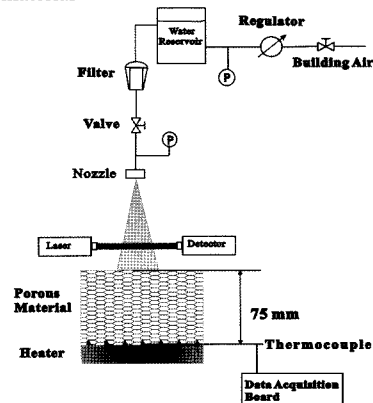
2. 실험 장치

액적들의 분무 특성과 다공성 판의 냉각 특성 간의 상관관계를 파악하기 위한 실험 장치는 Fig. 1과 같다.

Figure 1(a)는 동일한 크기의 액적들이 일렬로 연속적으로 다공성 판에 충돌할 경우의 침투 및 판의 냉각 성능을 파악하기 위한 장치이며, Fig. 1(b)는 미립화기로부



(a) Continuous droplets impacting against the porous material



(b) Spray impacting against the porous material

Fig. 1 Experimental configuration

터 생성된 분무(spray)가 재질에 충돌한 후 침투할 경우의 냉각 특성을 파악하기 위한 실험 장치이다. 즉, Fig. 1(a)의 장치는 액적의 크기 및 속도를 정확하게 제어하여 분무 특성이 다공성 판의 냉각 성능에 미치는 영향을 보다 구체적으로 살펴보기 위한 장치이다.

분무(spray) 냉각 성능 파악을 위한 실험 장치는 크게 유체 공급부와 입경 및 유량 측정부, 다공성 판의 온도 측정 장치로 구성된다. 실험유체로는 수도물(tap water)을 이용하였고 정압기(pressure regulator)를 거친 압축공기를 이용하여 가압하였다. 가압된 물은 불순물을 제거하기 위한 필터와 유량조절을 위한 미터링 밸브(metering valve)를 거친 후 노즐로 유입된다. 노즐은 분무 형태가 풀콘(Full-cone) 형태를 이루는 와류 분무 노즐(swirl spray nozzle TG0.5 & TG0.7, Spraying Systems Co.)을 이용하였다. 분무 액적군의 입경분포를 측정하기 위해 Fraunhofer 회절원리를 이용한 입경측정 장비(HELOS VARIO, Sympatec)를 이용하였다. 측정장비의 광원은 He-Ne 레이저이며 수광부에는 선택이 가능한 6개의 렌즈(R1~R6)가 부착되어 있다.

수광부의 렌즈 종류에 따라 유효측정영역(working distance) 및 입경 측정 범위(measuring range)가 결정된다. 유효측정영역이란 수광 렌즈로부터 측정이 가능한 액적까지의 최대거리로 정의되며, 입경 측정 범위란 측정이 가능한 입경 범위를 의미한다. 실험에 사용한 R6 렌즈의 경우, 유효측정영역이 566 mm 이고 0.5 μm 에서 1750 μm 까지의 입경을 측정할 수 있다. 분무는 입경측정 장치의 초점거리($f=1000$ mm) 안에 모두 포함되기 때문에 산란된 빛이 수광 렌즈를 벗어나는 비그네팅(vignetting) 효과는 배제할 수 있다. 일렬로 충돌하는 연속된 액적들의 냉각 성능을 파악하기 위한 실험 장치도 크게 유체 공급부와 입경 및 속도 측정부, 다공성 판의 온도 측정 장치로 구성된다. 다만, 액적들의 공급 유량은 시린지 펌프(syringe pump)를 이용하여 일정하게 제어하였으며 충돌 직전의 액적의 직경과 속도는 CCD 카메라를 통해 촬영한 충돌 가시화 이미지를 통해 측정하는 것이 가능하다. 액적의 크기는 공급되는 유체의 유량과 노즐 팁의 크기에 의해 결정되며, 실험에는 내경이 140(gage 30), 292(gage 24), 838(gage 18) 미크론인 세 종류의 노즐 팁을 사용하였다. 충돌 직전의 액적 속도는 다중 노즐로 촬영된 액적 충돌 가시화 이미지를 통해 측정하였다. 연속된 노즐 사이의 시간 간격과 이미지를 통해 측정된 액적의 수직방향 이동거리로부터 액적의 충돌 전 수직 방향 속도를 계산하는 것이 가능하다.

냉각 실험에 사용한 다공성 판은 실제 단열이나 방음(sound absorbing)의 목적으로 건축자재로 활용되는 물질인 직육면체 형태의 멜라민 폼(Melamine foam, BASF, model: Basotect)이다. 분무 액적군과 연속 액적들에 의한 냉각 실험에 사용된 폼의 크기는 각각 250 mm×250 mm×75 mm(가로, 세로, 높이 순), 30 mm×30 mm×60 mm 이다. 액적의 충돌 후 거동을 살펴보기 위한 실험에서는 세라믹 폼(Ceramic foam, COTRONICS, model: 311 ceramic foam block)과 스티로폼(Styrofoam)도 추가적으로 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1 액적의 충돌 후 거동 관찰

Figure 1(a)의 장치를 이용하여 형성된 일련의 연속된 액적들이 다공성 판의 표면에 충돌한 후의 거동 영역을 파악하기 위해 액적의 벽면 충돌 실험을 수행하였다. 표면온도의 영향을 배제하기 위하여 실험은 비가열 조건에서 수행되었다. Fig. 2는 액적이 멜라민 폼의 표면에 충돌한 후의 시간 경과에 따른 액적의 형상 변화 과정을 표현한 것이다.

Figure 2를 살펴보면 액적이 다공성 재질의 표면에 직접 충돌하는 것이 아니라 이전에 충돌한 액적들로 인해 생성된 액막에 충돌함을 확인할 수 있으며, 이는 액적이 다공성 재질의 내부로 흡수되는데 소요되는 시간(absorption time)이 액적의 충돌 시간 간격(액적이 충돌한 후 다음 액적이 충돌하는데 소요되는 시간)보다 길

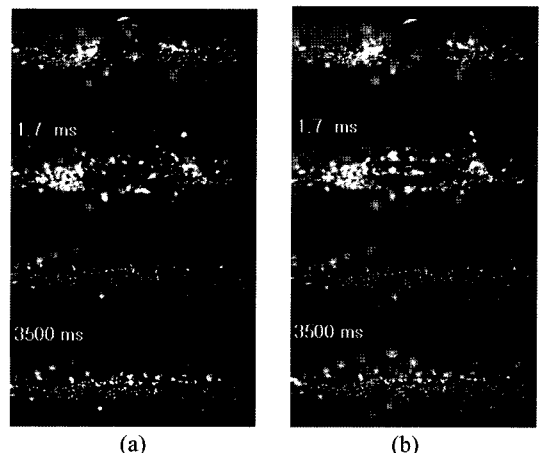


Fig. 2 Continuous droplets impacting on the Melamine foam (a) d : 3.0 mm, V : 1.2 m/s (b) d : 3.0 mm, V : 2.2 m/s

기 때문에 발생한 결과이다. Fig. 2의 결과는 유량이 0.5 ml/min 이고 액적의 크기가 3 mm인 조건에서 실험한 결과이며 이 경우, 충돌 시간 간격은 약 1.7초가 된다. 그러나 액적이 멜라민 폼의 표면에 충돌한 후 내부로 흡수되는데 소요되는 시간은 3.5 초 이상이며, 이로 인해 표면에는 액막이 형성된다.

멜라민 폼을 다공성 판으로 사용한 경우, 본 실험 조건(drop size d : 1.9~3.0 mm, velocity V : 1.2~2.2 m/s)에서는 액적들이 젖은 벽면(wetted wall)에 충돌한 후 코로나 스플래시 현상만이 발생하였다. 코로나 스플래시 현상이란 액적의 충돌 후 생성된 왕관 모양의 액막 주변부에서 액주가 형성되고 이 액주의 분열에 의해 이차 액적들이 생성되는 현상을 일컫는다. 일반적으로 코로나 스플래시 현상은 젖은 벽면이나 표면조도가 매우 작은 건조 벽면 조건에서 발생한다고 알려져 있다.⁽⁸⁾ 액적의 크기가 작아지고, 속도가 빨라질수록 액적이 다공성 판의 내부로 흡수되는데 소요되는 시간은 약간 감소하는 경향이 나타났으나 충돌 시간 간격에 비해서는 훨씬 큰 값이며 이로 인해 항상 젖은 벽면 조건에서 액적의 충돌이 이루어졌다.

그러나 액적이 다공성 판에 충돌할 경우 모든 경우에 젖은 벽면 조건이 형성되는 것은 아니다. Fig. 3은 다공성 판으로 세라믹 폼과 스티로폼(폴리스티렌)을 사용한 경우이며, 충돌 조건은 멜라민 폼을 사용한 경우(Fig. 2 (b))와 동일하다. 세라믹 폼을 사용한 경우, 액적은 액막이 전혀 없는 건조된 세라믹 폼의 표면에 충돌함을 확인할 수 있으며, 액적이 충돌한 후 49 ms의 시간이 경과하면 액적의 대부분이 다공성 판의 내부로 흡수됨을 Fig. 3(a)를 통해 확인할 수 있다. 즉, 충돌 시간 간격보다 훨씬 짧은 시간 안에 액적이 다공성 판의 내부로 흡수되기 때문에

Table 1 Comparison of time scales between absorption and impact interval

Substrate	Absorption time	Impact interval	Impingement regimes
Melamine foam	> 3.5 s	1.7 s	Wet impact
Ceramic foam	49 ms	1.7 s	Dry impact

액적의 충돌은 건조 벽면 조건에서 이루어진다.

Table 1은 멜라민 폼과 세라믹 폼을 사용한 경우에 대해 흡수 시간 및 충돌 시간 간격을 비교하여 정리한 것이다.

Figure 3(b)의 스티로폼의 경우에는 액적들의 충돌이 지속됨에 따라 표면 위에 형성된 액막의 부피가 점점 증가하게 되는데 이는 재질의 표면에 충돌한 액적들이 재질 내부로 흡수되지 않고 표면 위에 누적되기 때문에 발생한 결과이다. 이로 인해 세라믹 폼에 액적들이 충돌할 경우 코로나의 생성 없이 이차 액적들이 생성되는 프롬프트 스플래시(prompt splash) 현상이 발생했으나(Fig. 3(a)), 스티로폼의 경우 액적의 충돌 후 완전한 형태의 코로나가 생성되었다(Fig. 3(b)).

현재까지의 결과들을 정리해보면 액적의 충돌 조건이 완전히 동일한 경우에도 다공성 판의 성질에 따라 건조 벽면 충돌, 젖은 벽면 충돌, 액적의 누적 현상이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 충돌 현상이 구분되는 것은 재질의 특성에 따라 액적의 재질 내부로의 흡수시간이 달라진 결과로 판단된다. 충돌 후에 발생하는 액적의 거동 영역을 예측하기 위해서는 액적의 흡수 시간에 대한 충분한 정보가 필요하며 추후 연구를 통해 이에 대한 관계식의 제시가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서 중점적으로 관심을 가졌던 사항은 액적들의 분무 특성과 냉각 성능간의 상관관계에 대한 내용이므로 흡수 시간에 대한 추가적인 연구는 수행하지 않았다.

3.2 분무(spray)에 의한 다공성 재질 냉각

분무 평균입경과 다공성 판의 냉각 성능간의 상관관계를 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 이는 분무유량이 동일한 조건에서 냉각 성능을 향상시킬 수 있는 분무 특성을 파악하기 위한 목적으로 수행된 것이다. 화재 진압용 스프링클러에서 사용할 수 있는 액체의 저장량은 제한적이므로 동일 유량 조건에서 최대의 성능을 발휘할 수 있는 작동 조건을 파악하는 것은 응용 측면에서 매우 유용하다.

분무 실험은 오리피스 직경이 600 μm 와 760 μm 인 2

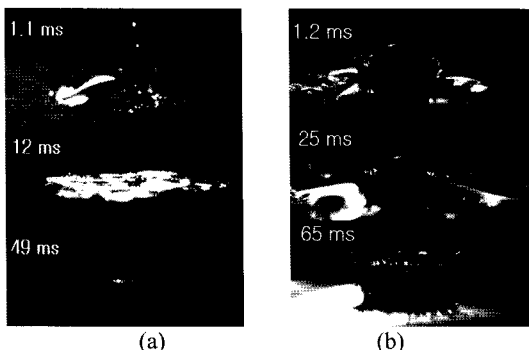


Fig. 3 Continuous droplets impacting on the (a) Ceramic foam (b) Styrofoam (d : 3.0 mm, V : 2.2 m/s)

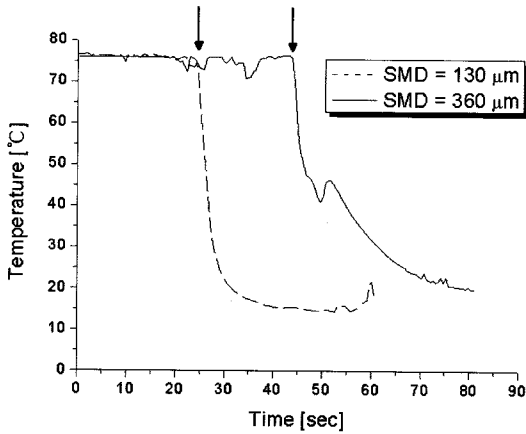


Fig. 4 Temperature variation (droplet size effect)

종류의 와류 분무 노즐(swirl spray nozzle TG0.5 & TG0.7, Spraying Systems Co.)을 이용하여 이루어졌다. 분무 평균입경은 노즐로부터 25 cm 정도 떨어진 위치에서 측정하였으며, 분사 압력 조건은 600 μm 및 760 μm 노즐에서 각각 2.0 bar와 1.4 bar이다. 이는 열전대가 위치한 지점을 중심으로 직경 26 mm인 공간에 공급되는 분무유량이 6 ml/min 로 동일할 때의 압력 조건이다. 600 μm의 노즐로부터 생성된 분무 액적들의 크기는 약 30 μm에서 800 μm의 분포를 보였으며, SMD(Sauter mean diameter)는 130 μm로 측정되었다. 760 μm의 노즐에서 생성된 분무 액적들의 크기 분포는 약 80 μm에서 1000 μm이며, SMD는 360 μm로 측정되었다.

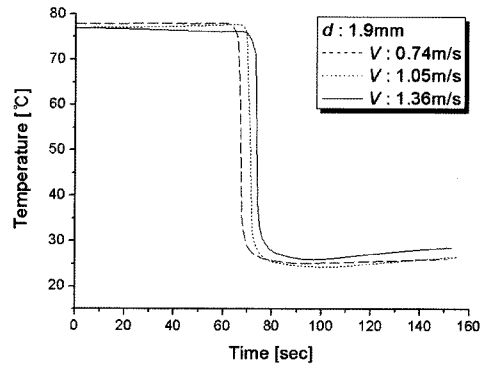
Figure 4는 두 노즐을 이용하여 다공성 판의 표면에 분무 시켰을 때의 시간에 따른 재질의 온도변화 결과이다. 실험에 사용된 다공성 재질인 멜라민폼의 두께는 75 mm이며 열전대를 실험 재료의 최하단부인 75 mm지점 중심부에 설치하여 최하단부가 냉각될 때까지의 시간을 측정하였다. 분무장치를 작동하기 전 측정부의 온도는 전열기를 이용하여 76°C로 유지하였으며, 분무에 의한 냉각 동안에도 전열기는 계속 가동시켰다.

실험 결과 SMD가 130 μm인 경우 분무가 시작된 후 25 초가 지난 시점에서 온도가 급격하게 감소한 반면 SMD가 360 μm인 경우 45초가 지난 시점에서 온도가 급격하게 감소하기 시작하는 것을 확인하였다. 동일유량이 공급되는 상황에서 평균입경이 작은 경우가 냉각 성능이 더 우수함을 확인할 수 있다.

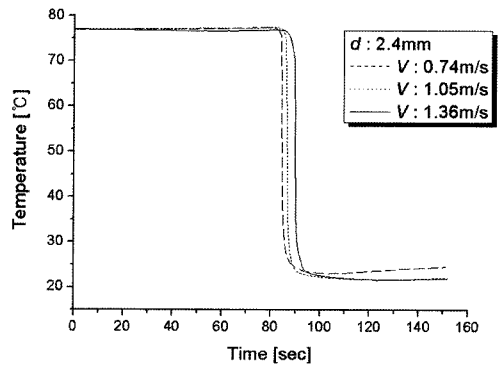
3.3 연속 액적들에 의한 다공성 재질 냉각

분무 냉각 실험을 통하여 평균 입경이 감소함에 따라

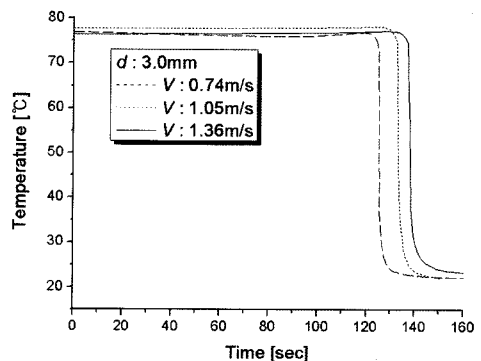
다공성 판의 하단부의 냉각 성능이 향상됨을 확인하였다. 액적의 크기 및 속도와 냉각 성능간의 상관관계를 좀더 정확하게 파악하기 위하여 연속적으로 공급되는 일정한 크기의 액적들을 이용하여 실험을 수행하였다. 입경은 1.9 mm, 2.4 mm, 3.0 mm의 세 가지 조건 하에서, 충돌 직전의 속도는 0.74 m/s, 1.05 m/s, 1.36 m/s의 범위에서 수행하였다. 이는 실제 스프링클러의 작동 조



(a) $d = 1.9$ mm



(b) $d = 2.4$ mm



(c) $d = 3.0$ mm

Fig. 5 Temperature variation with impinging velocity

건을 모사한 것으로 스프링클러의 경우 1 mm 내외의 입경 분포와 0.5~2.5 m/s의 속도 분포 범위를 갖는다⁹⁾. 공급유량은 시린지 펌프를 이용하여 모든 액적 크기 및 속도 조건에서 1 ml/min으로 일정하게 유지하였다. 실험에 사용된 멜라민 폼의 두께는 Fig. 1(a)에 표현된 바와 같이 총 60 mm이며, 상부 표면으로부터 50 mm에 열전대를 위치시켜 시간에 따른 온도 변화를 측정하였다. 열전대가 위치한 지점의 온도는 액적이 공급되기 전 전열기를 이용하여 75~80°C 범위를 유지시킨 상태로 실험을 수행하였다.

Figure 5는 액적의 크기가 일정한 경우 충돌직전 속도의 변화에 따른 다공성 판의 냉각성을 나타낸 것이다. 액적의 크기가 1.9 mm, 2.4 mm, 3.0 mm인 경우 모두 충돌직전의 액적 속도가 느릴수록 다공성 판의 온도가 하강하는데 소요되는 시간이 짧아졌다. 액적 크기가 1.9 mm인 경우 충돌속도가 0.74 m/s일 경우와 1.36 m/s일 경우의 온도 하강 시작 시점이 약 5 초의 차이를 보였으며, 액적 크기가 3.0 mm인 경우와는 약 10 초의 차이가 나타났다. 온도 하강이 급격하게 일어난 후 일정 시간이 지난 후에는 재질의 온도가 약 20~25°C를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 이는 공급된 물의 온도(20°C)와 유사한 수치로, 이는 액적이 열전대가 위치한 곳에 직접 도달한 후에 냉각이 이루어짐을 의미하는 것이다.

액적의 침투 속도와 냉각 성능의 상관관계를 보다 구체적으로 파악하기 위해 다공성 판 내부의 액적 침투 속도를 측정하였다. 액적이 열전대가 위치한 깊이까지 침투하는데 걸리는 시간은 앞 절에서 설명한 흡수 시간(absorption time)과는 의미가 약간 다르다. 흡수 시간은 액적이 표면으로부터 재질 내부로 흡수되는데 걸리는 시간만을 의미하며 침투 시간은 표면에 흡수된 후 내부로 이동하는데 소요되는 시간을 의미한다.

Figure 6은 침투 속도를 측정하는 장치로 다공성 판의 표면과 내부에 프로브(probe)를 위치시켜 두 프로브 사이의 저항차를 측정함으로써 물의 침투 여부를 판단하

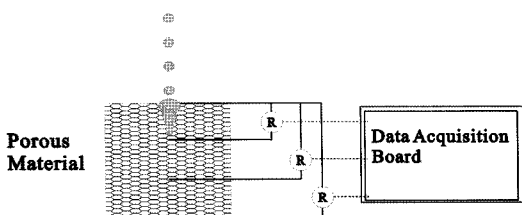


Fig. 6 Measurement of penetration velocity

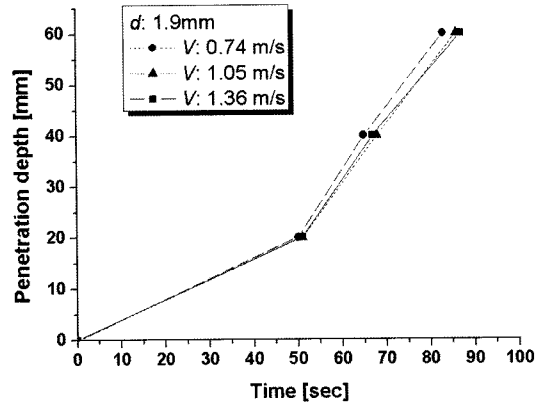


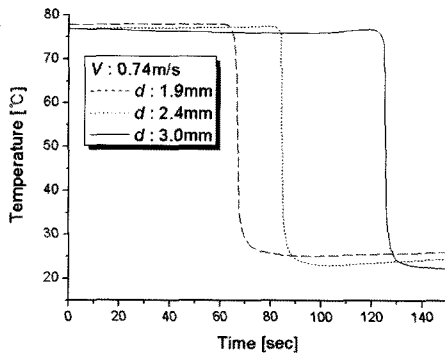
Fig. 7 Change of penetration depth with time (Effect of impinging velocity)

였다. 프로브는 표면으로부터 20 mm, 40 mm, 60 mm 깊이에 설치하였으며, 실제 측정에서는 프로브에 의한 유동의 방해를 최소화하기 위하여 각각의 깊이에 대한 실험 시 하나의 프로브만을 위치시켜 실험을 진행하였다.

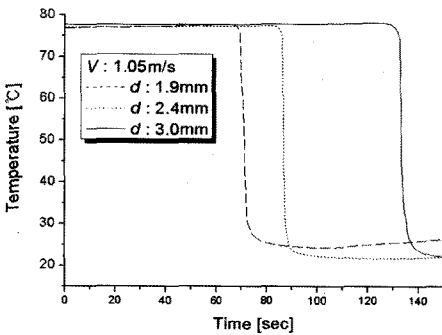
Figure 7은 액적 크기가 1.9 mm인 경우 액적의 속도를 변화 시킨 경우 시간에 따른 침투 깊이를 나타낸 결과이다. 50 mm까지 침투하는 데 걸리는 시간을 살펴보면 충돌직전 속도가 0.74 m/s인 경우 73초, 충돌직전 속도가 1.36 m/s인 경우 77 초로, 냉각성능 실험에서 다공성 판이 냉각되는데 소요되는 시간과 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

Figure 8은 충돌직전 속도가 일정한 경우 액적 크기의 변화에 따른 다공성 판의 냉각 성능을 나타낸 것이다. 충돌 직전 속도가 0.74 m/s, 1.05 m/s, 1.36 m/s인 경우 모두 공급되는 액적의 크기가 작아질수록 다공성 판의 온도가 하강하는데 소요되는 시간이 짧아졌다. 충돌직전 속도가 0.74 m/s인 경우 액적 크기가 1.9 mm인 경우와 3.0 mm인 경우 약 50초의 온도 하강 시작 시점까지의 시간차를 보였으며, 충돌직전 속도가 1.05 m/s, 1.36 m/s인 경우도 유사한 경향을 나타내었다.

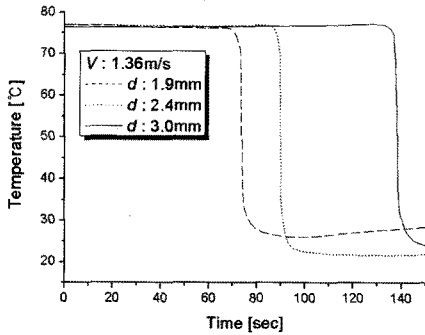
액적 크기에 따른 침투 속도와 냉각성능간의 상관관계를 파악하기 위하여 Fig. 6과 같은 측정방식을 이용하여 침투 속도를 동일하게 측정하였다. Fig. 9는 충돌직전 속도가 0.74 m/s인 경우 액적 크기의 변화에 따른 침투 속도를 나타낸 것으로 액적의 크기가 작을수록 침투 속도가 증가하였다. 액적의 크기가 1.9 mm일 때 50 mm까지 도달하는 시간은 73 초, 액적의 크기가 3.0 mm일 때 123 초로 Fig. 8(a)의 냉각 실험과 유사한 경향을 나타냈다.



(a) = 0.74 m/s



(b) = 1.05 m/s



(c) = 1.36 m/s

Fig. 8 Temperature variation with droplet size

4. 결 론

다공성 판을 사용하여 분무 (spray) 및 일련의 액적들에 의한 충돌 실험을 수행하였으며 실험 결과들로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 액적의 충돌 조건이 동일하더라도 다공성 판의 성질에 따라 액적의 다공성 판의 내부로의 흡수시간이 달라졌으며, 이로 인해 판의 표면 상태가 변화하였다. 다공성 판의 표면 상태는 건조 벽면, 젖은 벽면, 액적의 누

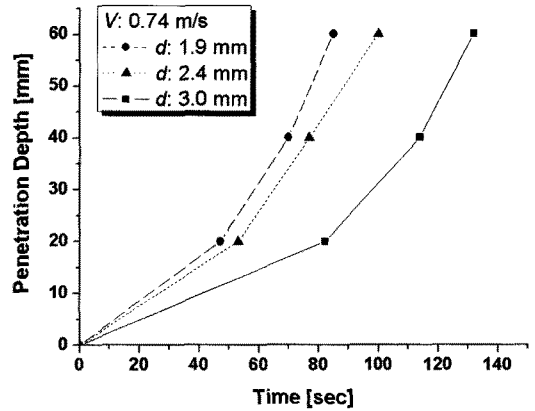


Fig. 9 Change of penetration depth with time (Effect of droplet size)

적으로 인한 액막 부피 증가로 구분할 수 있다.

2. 공급유량이 같은 경우 분무 (spray)의 평균 입경이 감소할수록 다공성 판을 냉각하는데 소요되는 시간이 단축되었다.

3. 연속적으로 낙하하는 단일 액적들의 충돌직전 속도 및 크기 변화에 따른 다공성 판의 냉각 성능을 파악하는 실험을 수행한 결과 충돌직전 속도가 느릴수록, 액적의 크기가 작을수록 냉각속도가 향상되었으며, 충돌직전 속도에 비해 액적 크기가 냉각속도에 미치는 영향이 상대적으로 크다.

4. 열원이 위치한 하단부의 냉각 시점까지의 소요 시간은 공급된 물이 침투하여 하단부에 도달하는 시간과 비례하였으며, 침투 속도가 빠를수록 냉각성능이 향상되었다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부의 BK-21 사업 출연금과 KAIST 기관고유사업(KI) 및 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2008-314-D00045)을 받아 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 광업·제조업 통계조사 보고서, 통계청, 2007.
- (2) J. A. Milke, S. C. Tinker and M. diMarzo, "Effect of dis-

- solved gases on spray evaporative cooling with water,” *Fire Technology*, 1997, Vol. 33, No. 2, pp. 99~114.
- (3) C. Sotke and P. Stephan, “Spray cooling on micro structured surfaces”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, Vol. 50, pp. 4089~4097.
- (4) C. C. Hsieh and S. C. Yao, “Evaporative heat transfer characteristics of a water spray on micro-structured silicon surfaces,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, Vol. 49, pp. 962~974.
- (5) E. A. Silk, J. Kim and K. Kiger, “Spray cooling of enhanced surfaces: Impact of structured surface geometry and spray axis inclination”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, Vol. 49, pp. 4910~4920.
- (6) M. Abu-Zaid and A. Atreya, “Transient cooling of hot porous and nonporous ceramic solids by droplet evaporation,” *Journal of Heat Transfer*, 1994, Vol. 116, pp. 694~701.
- (7) M. Abu-Zaid, “Droplet evaporation on porous and non-porous ceramic solids heated from top,” *Heat and Mass Transfer*, 2002, Vol. 38, pp. 203~211.
- (8) S. Y. Lee and S. U. Ryu, “Recent progress of spray-wall interaction research”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2006, Vol. 20, pp. 1101~1117.
- (9) Widmann et al, “Non-intrusive measurements in fire sprinkler sprays”, *Fire Technology*, 2001, Vol. 37, No. 4, pp. 219~315.