

전도조건 하에서 표면조도와 액적 직경의 변화에 따른 알루미늄의 액적 증발 냉각

장충선[†] · 최원식^{*}
경북대학교 기계공학과
^{*}밀양대학교 기계공학과

Evaporation Cooling of Water Droplet on Aluminum with Various Surface Roughness and Droplet Diameter in Conductive Condition

C. S. Jang[†] and W. S. Choi^{*}

Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea
^{*}Department of Mechanical Engineering, Miryang National University, Gyeongnam 627-706, Korea

Abstract This paper presents the results of experimental investigation for the effect of heat conduction on the evaporation cooling of water droplet in the process of heat treatment. The experiments are mainly focused on the surface temperature, the surface roughness and the droplet diameter at aluminum. The range of surface temperature is from 80°C to 140°C, surface roughness is from $R_a = 0.18 \mu\text{m}$ to $R_a = 1.36 \mu\text{m}$ and droplet diameter is from 2.4 mm to 3.0 mm. The results show that the total evaporation time is shorter for the larger surface roughness, the time averaged heat flux has maximum value for the larger surface roughness and exist the critical heat flux. The total evaporation time has a big influence on the evaporation region for the smaller droplet size, but the total evaporation time has not influence on the nuclear boiling region.

(Received November 18, 2005; accepted November 30, 2005)

Key words: Heat conduction, Evaporation cooling, Water droplet, Surface roughness, Droplet diameter, Time averaged heat flux, Critical heat flux, Total evaporation time, Droplet size

1. 서 론

액적을 이용한 증발 냉각은 금속의 열처리분야, 에너지 발전 및 변환분야, 전자장치의 냉각분야, 직접 분사식 디젤기관의 냉각분야, 핵 반응로의 긴급냉각 분야 등의 다양한 분야에서 연구되어 왔다.

이러한 냉각과정중 물을 이용한 증발 냉각은 중요한 과제로서 액적 증발 냉각의 특성과 최적의 냉각 성능을 나타내는 조건을 구명하려는 연구가 계속 진행되어 왔다.

특히, 금속부분의 열처리과정에서 알루미늄과 강과 같은 금속의 담금질은 고온으로부터 급냉이 필요한 곳의 집중 열충격을 제거할 필요가 있는 곳에 사용한다. 최근 이러한 적용의 발전은 강화된 열 제거율과 표면 온도조절 능력을 필요로 한다[1-3].

액적 증발 냉각에 영향을 주는 인자로는 가열 고체의 초기 표면온도와 표면조도, 액적 크기, 충돌 속

도, 액체의 종류 등의 다양한 변수가 존재하며, 기존의 많은 연구자들에 의하여 액체 내에서의 열적 거동과 열전달 현상 및 천이기간의 증발 현상 등의 연구가 진행되고 있으며, 이와 관련된 연구로 Kistenmaker[4]는 표면온도가 100~500°C 범위일 때, 증발유체로 물을 사용하여 연마된 황동 표면에 부착된 액적의 증발현상을 실험적으로 연구하였다. Gottfried 등[5]은 표면온도가 150~500°C일 때, 증발 유체로 물 및 다수의 탄화수소화합물을 이용하여 스테인레스 강 표면 위에서 LFP를 실험적으로 연구하였다.

Bernardin 등[6]은 알루미늄 표면 위에 액적 직경이 3.0 mm, Weber수가 20~220, 3개의 다른 표면을 가공 한 후 100~280°C의 표면온도를 변수로 하여 충돌 액적의 열전달 및 유체역학적 거동을 실험적으로 연구하였다. Betta 등[7]은 액적 직경이 2.8 mm이하이고, 표면온도가 60~350°C 범위에 있

[†]E-mail : csjang11@netian.com

을 때, 부착 액적에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 이들은 다른 연구 결과에 비해 다소 낮은 LFP값을 얻었다.

Bonacina 등[8]은 다중 액적 시스템에 대한 연구를 수행하여 핵비등이 일어나지 않는 영역에서는 전도가 지배적인 열전달 기구임을 보여주었다. Rizza[9]는 고온 고체표면 위에서 액적 증발에 대한 수치 해석적 연구를 수행하여 고체-액체 접촉면 온도가 일정한 온도로 유지되고 있다고 가정하였다. DiMarzo 등[10]은 물을 증발유체로 하여 표면 온도에 따른 증발시간, 증발체적, 국소 열유속 등에 대한 실험과 수치 해석적인 연구를 수행하였다.

이러한 연구들은 고온 영역으로서 얇은 증기층과 증기막을 형성하는 천비등 영역과 막비등 영역인 LFP점에 속하는 연구가 대부분이었다. 실제적으로 열처리 공정 중 이 영역들은 비등영역에서의 빠른 열처리 공정보다 느린 열처리 공정에 있어서 재료의 약한 강도와 경도를 가지는 파괴적인 결과를 초래하며, 특히 금속들은 고체 표면의 돌기에 의한 표면조도를 가지고 있기 때문에 표면조도에 관한 증발 영역의 냉각 특성에 관한 연구는 이루어지지 않아 이에 대한 연구가 절실히 요구되는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 비등영역에서 열 유동의 일시적, 공간적인 변동을 예측하는 방법을 제시하기 위하여 전도조건 하에서 표면조도와 액적 직경의 변화에 따른 액적 증발 냉각에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

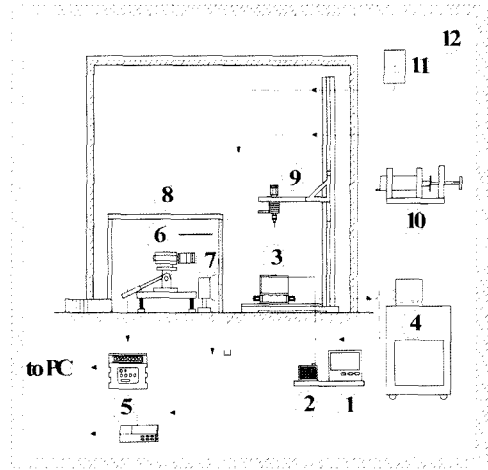
2.1 실험장치

Fig. 1은 액적 증발 냉각을 위한 실험장치를 개략적으로 나타낸 그림이다.

실험장치는 크게 전원 공급부, 실험부, 데이터 처리부, 영상 처리부, 액적 공급부, 온도 조절부로 구성되어 있으며, 외부 간섭을 막기 위해 모든 실험장치를 향한 항습실 ⑫에 설치하였다.

전원 공급부는 온도제어기 ①과 제어기에서 출력되는 전류에 의해 구동되는 전원 공급기 ②로 구성되어 있다.

실험부는 가열 케이스 ③이 액적 발생기 ⑨의 아



- ① Temperature controller ⑦ Halogen lamp
- ② Power supply ⑧ Chamber
- ③ Heating module ⑨ Droplet generator
- ④ Refrig-bath circulator ⑩ Syringe pump
- ⑤ Data acquisition device ⑪ Water tank
- ⑥ High-speed camera ⑫ Climate Chamber

Fig. 1. Schematic diagram of all apparatus of droplet experiment.

래로 50 mm 위치에 설치하였다. 하단에는 항온조 ④를 연결하여 일정한 온도를 유지하도록 하였다. 데이터 처리부는 가열고체의 표면온도와 표면에 부착될 물의 초기 온도, 가열 모듈 하단의 냉각판의 온도를 측정하는 데이터 수집장치 ⑤와 제어용 컴퓨터로 구성되어 있다. 영상 처리부는 부착된 액적의 영상을 얻기 위한 고속카메라 ⑥과 조명장치 ⑦ 및 영상처리용 컴퓨터로 구성되어 있다.

또한 고속카메라에는 영상 확대용 확대렌즈가 부착되어 있으며, 512×480의 해상도와 1/30s~1/20,000s의 노출 시간을 가진다. 조명장치로는 할로겐 램프를 사용하였으며 조명장치에서 나오는 열이 외기 온도에 영향을 미치지 않도록 별도의 케이스 ⑧을 제작하여 영상 처리부를 격리시켰다.

액적 공급부는 액적을 일정하게 토출해 주도록 제작된 액적 발생기 ⑨와 일정 양의 물을 공급해주는 Syringe pump ⑩로 구성되어 있다.

Fig. 2는 가열 케이스의 형상과 전도 가열조건시 고체 표면에서 전달되는 열유속의 방향을 나타낸 그림이다. 단열 블록케이스 ③는 세라믹 타일을 사용하

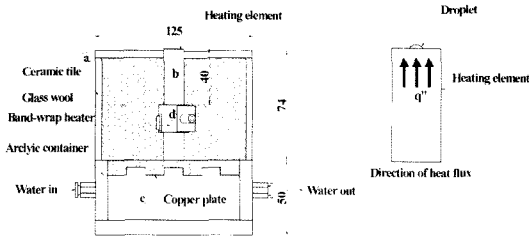


Fig. 2. Schematic diagrams of the heating container and direction of heat flux for heat input condition in conductive heating condition.

여 가공하였으며, 내부에는 grass wool을 채웠다. 가열고체 ⑤는 하부를 등온으로 유지하기 위하여 등온 모듈에 접촉하도록 위치시켰다. 등온 모듈 ③는 가열고체와의 열전달이 잘 일어나도록 상부에 열전도도가 좋은 동판을 사용하였고, 외부는 아크릴 판을 사용하여 제작하였다. 히터 ④는 가열고체 표면에서 40 mm 아래쪽에 위치시켰고, 열유속은 고체하부에서 가열고체 표면으로 전달된다. 온도제어는 가열고체 하부에 기준 열전대를 부착하여 실행하였다.

금속 재질의 경우 1차원적인 열전달 해석이 가능하기 때문에 알루미늄은 전체 길이 75 mm, 직경 16 mm의 원기둥형으로 가공한 후, 온도를 측정하기 위해 k형 열전대를 표면 중심에서 깊이 방향으로 1.5 mm, 7 mm, 9.5 mm, 12 mm, 14.5 mm의 위치에 심었다. 표면조도에 따른 액적 증발의 영향을 관찰하기 위하여 알루미늄의 표면을 산술 평균조도 (R_a)로 하여 0.18 μm , 0.64 μm , 1.36 μm 으로 가공하였다.

2.2 실험방법 및 실험범위

항온 항습실 내부의 온도는 $25.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 설정하였고, 액적의 온도는 $25.5 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 로 하였다.

액적 크기는 표면에 떨어질 때 촬영으로 얻은 화상을 분석하여 직경을 계산하고, 이를 보정하기 위하여 각각 50방울 및 100방울을 모아 무게를 측정하였다. 측정 결과 $\pm 3\%$ 이내로 잘 일치하였다. 또한 고속카메라를 이용하여 액적의 총증발 시간과 변화를 관찰하였으며, 데이터 획득장치로부터 온도데이터를 얻었다. 데이터의 해석 방법은 Kline[11]과 Moffat[12,13]에 의해 제시된 해석 방법을 이용하였다.

Table 1에 액적 실험의 변수와 범위를 요약하여

Table 1. Parameter and experimental ranges for droplet experiment

Surrounding & Initial droplet temperature	Surrounding : $25. \pm 0.5^\circ\text{C}$ Initial droplet : $25. \pm 0.3^\circ\text{C}$
Surface temperature	$80^\circ\text{C} \sim 140^\circ\text{C}$
Droplet	Pure water
Surface material	Aluminum(2024)
Droplet size	2.4 mm ~ 3.0 mm
Surface roughness(R_a)	$0.18 \mu\text{m} \sim 1.36 \mu\text{m}$

나타내었다.

실험에서 측정된 온도의 불확실도는 $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 이고, 제어되는 히터의 온도는 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이다. 길이의 측정에 대한 불확실도는 $\pm 0.25 \text{ mm}$ 이며, 질량의 불확실도는 $\pm 0.0001 \text{ g}$ 이다. 시간의 불확실도는 고속 카메라의 기본 측정 시간인 1/30s로 나타났다. 이와 같은 기본적인 파라미터들의 불확실도로부터 특정 조건에 대해 계산된 불확실도에 대한 온도의 경우는 $\pm 0.32^\circ\text{C}$ 이고, 길이의 경우는 $\pm 0.2501 \text{ mm}$ 이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 초기 표면온도에 따른 영향

Fig. 3은 가열고체의 재질이 알루미늄이고, 액적 직경이 3.0 mm, 표면조도가 0.08 μm 일 때, 액적 부착 후 경과시간에 따른 가열고체의 내부 온도변화를 나타낸 그림이다. 온도 측정위치는 접촉면 중심에서 깊이방향으로 1.5 mm, 7 mm, 9.5 mm, 12 mm이다.

각 고체의 표면온도는 증발, 핵비등 전·후까지 일어나는 온도범위를 기준으로 하였다. 액적 이 고체 표면에 부착된 후 물이 완전히 증발하여 고체 표면에서 물의 흔적이 완전히 없어지는 상태까지 측정된 값으로 정의하였으며, 이후 시간은 회복시간으로 정의하였다[14,15,8].

그림 (a)는 가열고체의 표면온도가 물의 비등점 (100°C)보다 낮은 증발영역을 나타낸 그림이다. 전체적인 가열고체의 표면 온도변화는 액적이 부착된 직후 급격히 하강한 후 증가하여 서서히 감소하며 액적 증발이 거의 완료된 후에 다시 상승하여 초기 표면온도로 회복된다.

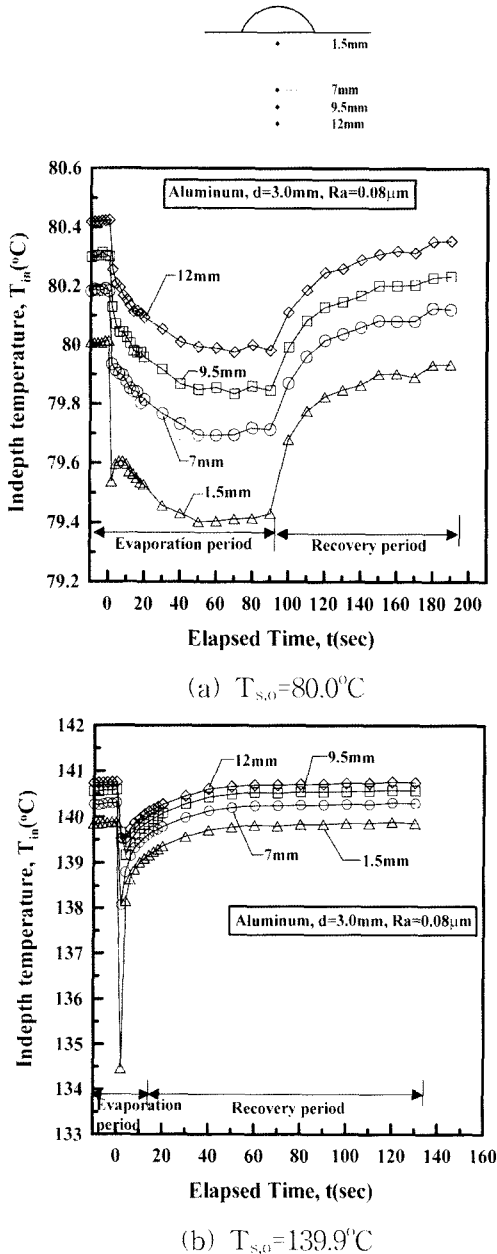


Fig. 3. In-depth temperature versus elapsed time at aluminum, $d = 3.0$ mm, $Ra = 0.08 \mu\text{m}$, (a) $T_{s,0} = 80.0^\circ\text{C}$, (b) $T_{s,0} = 139.9^\circ\text{C}$.

급격한 온도감소가 발생하는 구간은 액적이 부착 후 증력의 영향 때문에 가열고체 표면에 넓게 퍼져 액적의 전열면적을 증가시켜 두께가 얇아져 고체 표면에서 액적으로서의 열전달량이 증가하여 고체 표면이 액적에 의해 냉각되어 나타나는 현상이며, 이후 액적

에 의하여 고체 표면은 지속적으로 냉각되어 최소 값을 나타낸다. 다시 온도가 상승하는 것은 액적 증발이 거의 완료되어 액적의 증발에 의한 냉각효과는 없어지고 하부에서의 전도 열전달로 인하여 표면온도가 상승하기 때문이다.

깊이가 고체 표면에서부터 내부로 깊어질수록 내부 온도변화는 깊이에 관계없이 거의 유사한 성향을 나타내고 있으며, 깊이 1.5 mm와 12 mm 사이에 따른 가열고체의 내부 온도변화의 폭은 약 0.4°C 정도의 온도차를 나타내고 있다. 이는 알루미늄($k = 177$ W/mK)이 높은 열전도도를 가지는 재질이므로 깊이 1.5 mm와 12 mm 사이에서의 열전달이 잘 이루어져 냉각효과가 좋기 때문이다.

그림 (b)는 가열고체의 표면온도가 물의 비등점 (100°C)보다 높은 핵비등 영역을 나타낸 그림이다. 시간이 경과함에 따라 깊이가 1.5 mm인 지점에서 가열고체의 내부 온도변화는 액적이 표면에 부착된 직후 5.4°C 정도로 급하게 하락한 후 곧 초기 표면온도로 회복되었다. 이는 초기 액적 온도와 초기 표면온도의 차이가 커 액적과 표면의 계면온도가 물의 비등점을 초과하기 때문에 액적의 기저에서 핵비등이 발생하여 내부 열전달이 활발하게 일어나 크게 냉각되는 현상이며, 증발이 완료된 후 표면하부로부터의 전도 열전달에 의해 온도회복이 빨리 일어나기 때문이다.

깊이가 고체 표면에서부터 내부로 깊어질수록 내부 온도변화는 깊이에 관계없이 유사한 성향을 나타냈으며, 깊이 1.5 mm와 12 mm 사이에 있어서 가열고체의 내부 온도변화의 폭은 약 0.9°C 정도의 온도차를 나타내었다.

Fig. 4는 가열고체의 재질이 알루미늄이고, 액적 직경이 3.0 mm, 표면조도가 $0.18 \mu\text{m}$, $0.64 \mu\text{m}$, $1.36 \mu\text{m}$ 일 때, 액적 부착 후 경과시간에 따른 가열고체의 표면 온도변화를 나타낸 그림이다. 온도 측정 위치는 고체 접촉면에서 깊이 방향으로 액적이 부착된 고체 표면의 중심에서 1.5 mm 아래이다. 가열고체의 초기 표면온도는 대기압 하에서 물의 비등점보다 낮은 80°C 부근의 증발영역이다.

시간이 경과함에 따라 가열고체의 표면 온도변화는 액적이 부착된 직후 급격히 하강한 후 약간 증가하여 서서히 감소하다가 최소 값을 나타낸 후 냉각이

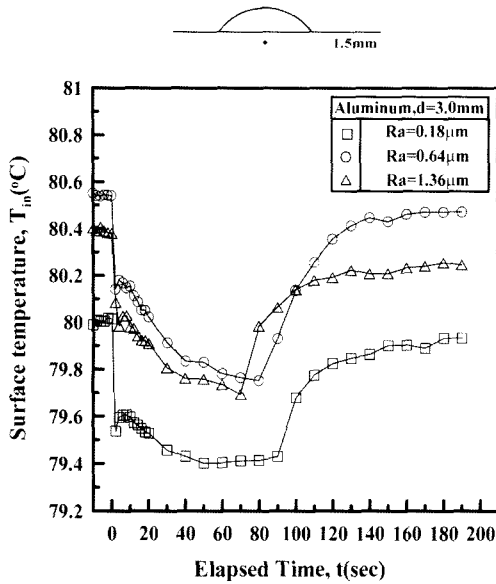


Fig. 4. Surface temperature versus elapsed time for various surface roughness at aluminum, $d = 3.0$ mm.

거의 완료되면 온도가 상승하여 초기 표면온도로 곧 회복된다.

표면조도의 변화에 따라 가열고체의 표면 온도변화는 모두 유사한 성향을 나타내고 있으며, 표면조도 1.36 μm 일 때가 0.18 μm 와 0.64 μm 일 때보다 고체 표면에서의 냉각이 더 빨리 완료되어 가열고체의 초기 표면온도로 먼저 회복되고 있다. 이는 표면조도가 크면 가열고체의 표면 돌기가 액적의 내부까지 침투하여 가열고체 표면과 액적 표면간의 접촉면적을 증가시켜 고체 표면으로부터의 액적으로 열전달이 크게 되어 냉각효과가 좋기 때문이다. 즉 액적으로 열전달이 잘 일어남은 증발시간이 짧아져 표면조도 1.36 μm 일 때가 0.18 μm 와 0.64 μm 일 때보다 초기 표면온도로 먼저 상승한다. 이상으로부터 액적 증발 냉각에서 표면조도가 증발시간을 단축시키는 주요 변수임을 나타내고 있다.

3.2 증발 시간에 따른 영향

Fig. 5는 가열고체의 재질이 알루미늄이고 액적 직경이 3.0 mm, 표면조도가 0.18 μm , 0.64 μm , 1.36 μm 일 때, 가열고체의 초기 표면온도에 따른 전체 증발시간을 나타낸 그림이다.

초기 표면온도가 증가함에 따라 증발영역에서의 전

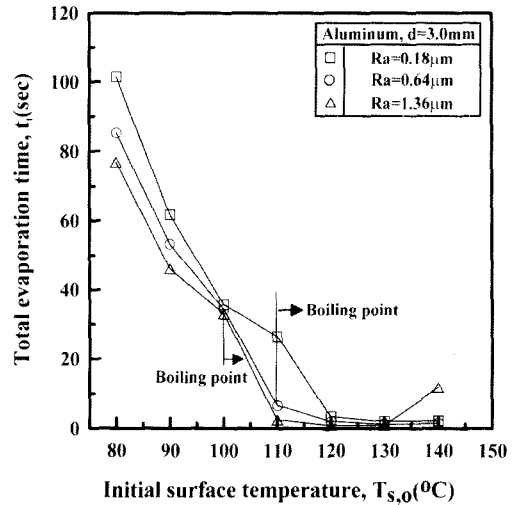


Fig. 5. Total evaporation time versus initial surface temperature for various surface roughness at aluminum, $d = 3.0$ mm.

체 증발시간은 감소하다가 핵비등 영역에서는 전체 증발시간이 더 감소하여 초기 표면온도의 증가에 따른 전체 증발시간의 차이가 많이 감소하였으며, 곧 천이 막비등 영역이 발생하여 다시 전체 증발시간이 증가하였다.

표면조도가 클수록 초기 표면온도에 대한 전체 증발시간은 짧게 나타나며, 증발영역의 경우 표면조도 1.36 μm 일 때가 0.18 μm 와 0.64 μm 일 때보다 전체 증발시간이 짧게 나타나고 있다. 이는 표면조도가 크면 가열고체의 표면 돌기가 액적의 내부까지 침투하여 가열고체 표면과 액적 표면간의 접촉면적을 증가시켜 고체 표면으로부터의 액적으로 열전달이 잘 일어나 냉각효과를 증가시키기 때문이다. 즉 같은 액적의 크기에서 표면조도가 클수록 접촉면적으로 인한 열전달량이 증가하여 증발시간이 짧아진다.

비등영역의 경우 표면조도 1.36 μm 일 때와 0.64 μm 일 때가 표면조도 0.18 μm 일 때 보다 더 낮은 초기 표면온도인 100°C에서 발생하였는데, 이는 표면조도에 의해 비등영역이 변화하는 온도가 달라졌기 때문이며, 표면조도 0.18 μm 일 때의 경우에는 초기 표면온도가 110°C에서 발생하였다. 반면 표면조도가 1.36 μm 에서는 천이 막비등 영역이 발생하여 초기 표면온도가 140°C 부근에서 증가하였다. 이는 액적의 온도와 초기 표면온도의 차이가 크기 때

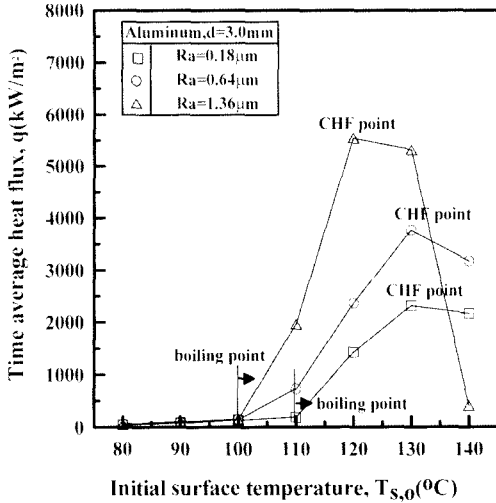


Fig. 6. Time average heat flux versus initial surface temperature for various surface roughness at aluminum, $d = 3.0\text{mm}$.

문에, 액적이 표면에 부착된 후 액적과 고체표면 사이에 증기층이 생성되어 액적이 구의 형태로 증기층에 떠 있는 상태인 막비등 영역이 발생하므로, 액적과 고체 표면과의 열전달량이 작아 냉각효과에는 큰 영향을 주지 못하기 때문이다. 이러한 현상은 앞의 Fig. 4의 성향과 같으며, 촬영된 영상자료에 의하여 확인되었다.

3.3 열유속에 따른 영향

Fig. 6은 가열고체의 재질이 알루미늄이고, 액적 직경이 3.0 mm, 표면조도가 0.18 μm, 0.64 μm, 1.36 μm일 때, 가열고체의 초기 표면온도에 따른 가열고체의 표면에서 액적으로 전달되는 시간 평균 열유속을 나타낸 그림이다. 여기서 시간 평균 열유속은 증발기간 동안 고체와 액적의 경계면에서 고체로부터 액적으로 전달되는 단위 시간당 액적의 단위 면적을 통한 열전달율로 정의된다.

가열고체의 초기 표면온도가 증가함에 따라 시간 평균 열유속은 점차적으로 증가하다가 비등영역에서부터 크게 증가하여 핵비등이 끝나는 시점에서 시간 평균 열유속이 최대(critical heat flux, CHF)가 된 후 다시 감소를 나타내고 있으며, 각각의 표면조도에 따른 CHF점을 중심으로 하여 CHF점 이전의 온도와 CHF점 이후의 온도에 대해 실험을 수행한 후

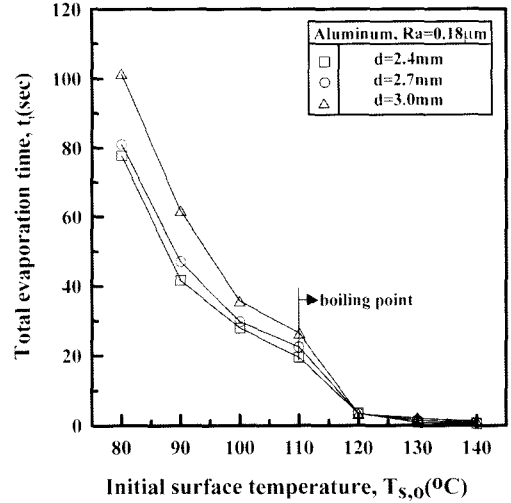


Fig. 7. Total evaporation time versus initial surface temperature for various initial droplet diameters at aluminum, $Ra = 0.18\ \mu\text{m}$.

확인 할 수 있었다. 이는 핵비등 영역에서의 증발시간이 다른 영역보다 증발시간이 현저하게 짧기 때문이다.

표면조도가 클수록 초기 표면온도에 대한 시간 평균 열유속은 큰 값을 가지며, 표면조도에 따른 시간 평균 열유속은 표면조도가 1.36 μm일 때 가장 크게 증가하며, 최대 시간 평균 열유속(CHF)이 나타나는 초기 표면온도는 표면조도가 0.18 μm와 0.64 μm일 때보다도 낮은 온도 120°C에서 발생한다. 이는 표면조도에 의해 증발시간이 감소하여 비등영역이 변화하기 때문이다.

3.4 액적 크기에 따른 영향

Fig. 7은 가열고체의 재질이 알루미늄이고, 표면조도가 0.18 μm이며, 액적 직경이 2.4 mm, 2.7 mm, 3.0 mm일 때, 가열고체의 초기 표면온도에 따른 전체 증발시간을 나타낸 그림이다.

가열고체의 초기 표면온도가 증가함에 따라 증발영역에서의 전체 증발시간은 액적의 크기에 따라 급격한 감소를 나타내고 있으며, 비등영역 이후 핵비등 영역에서는 거의 전체 증발시간이 일정하게 나타난다. 이는 알루미늄의 열전도도가 크므로 고체하부로부터 액적으로 열전달이 잘 이루어지기 때문이다.

액적의 직경이 작을수록 초기 표면온도에 대한 전

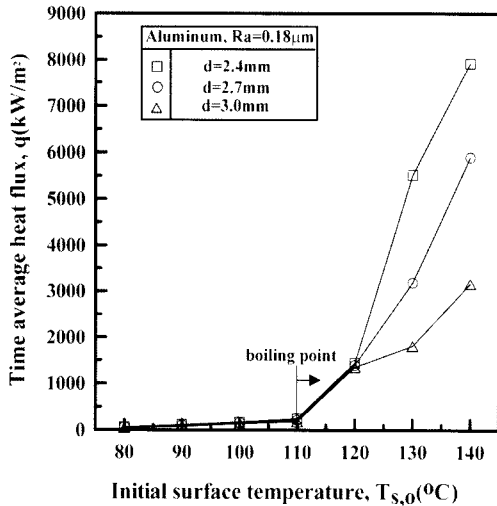


Fig. 8. Time average heat flux versus initial surface temperature for various initial droplet diameters at aluminum, $Ra = 0.18 \mu m$.

체 증발시간은 짧으며, 증발영역의 경우 액적 직경 3.0 mm일 때가 액적 직경 2.4 mm와 2.7 mm 보다 전체 증발시간이 더 높게 나타나고 있는데, 이는 액적이 고체 표면에 부착되어 있는 액적 크기에 따른 체적변화에 의한 영향이기 때문이다. 또한 비등영역 이후 핵비등 영역에서의 전체 증발시간은 액적의 크기에 관계없이 거의 같은 증발시간을 나타내고 있다. 이는 액적 내부에서 왕성한 비등의 발생으로 인하여 액적과 고체 표면과의 열전달이 활발히 일어나 증발율이 증가하여 액적이 짧은 시간 내에 증발이 완료되기 때문이다.

그러므로 동일 가열고체의 초기 표면온도에서 액적 직경이 작아짐에 따라 작은 증발열로 증발시킬 수 있으므로, 액적 직경이 큰 액적보다 증발영역에서의 냉각효과는 크지만, 핵비등 영역에서는 거의 영향을 크게 받지 않는다.

Fig. 8은 가열고체의 재질이 알루미늄이고, 표면조도가 $0.18 \mu m$ 이며, 액적 직경이 2.4 mm, 2.7 mm, 3.0 mm일 때, 가열고체의 초기 표면온도에 따른 가열고체의 표면에서 액적으로 전달되는 시간 평균 열유속을 나타낸 그림이다.

가열고체의 초기 표면온도가 증가함에 따라 시간 평균 열유속은 점차적으로 증가하다가 비등영역에서부터 크게 증가하여 핵비등이 거의 끝나는 영역까지

계속적인 증가를 나타내고 있다. 이는 시간 평균 열유속은 단위 시간당 액적의 단위 면적을 통한 열전달율로 정의되므로 Fig. 7의 경우와 같이 핵비등 영역에서의 전체 증발시간이 다른 영역보다 전체 증발시간이 현저하게 짧기 때문이다.

액적의 크기에 따른 초기 표면온도에 대한 시간 평균 열유속은 액적의 직경이 작을수록 큰 값을 가지며, 액적 직경이 2.4 mm와 3.0 mm일 때의 시간 평균 열유속의 차이는 5760.9 kW/m^2 로 크게 나타났다. 이는 핵비등 영역에서 액적의 크기에 따른 전체 증발시간의 차이가 크게 나타나기 때문이다.

4. 결 론

전도조건 하에서 액적 증발에 대한 순수 물 액적의 증발 냉각 특성을 조사하기 위하여 가열고체의 초기 표면온도를 알루미늄은 $80 \sim 140^\circ\text{C}$ 의 범위로 가열한 후 알루미늄의 표면조도는 $R_a = 0.08 \sim 1.36 \mu m$ 이며, 액적 직경이 $2.4 \sim 3.0 \text{ mm}$ 일 때, 액적 증발 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 경과시간에 따른 가열체의 표면온도는 표면조도가 클수록 증발기간이 먼저 완료되어 초기 표면온도로 먼저 회복한다.

2) 초기 표면온도에 따른 전체 증발시간은 표면조도가 클수록 액적과 고체 경계면의 접촉면적 증가로 인하여 전체 증발시간은 짧아진다.

3) 초기 표면온도에 따른 시간 평균 열유속은 표면조도가 클수록 최대 값을 가지며, 이때 최대 시간 평균 열유속은 액적 직경이 3.0 mm, 표면조도가 $1.36 \mu m$ 일 때, 5544.8 kW/m^2 의 값을 가진다.

4) 초기 표면온도에 따른 전체 증발시간은 액적 직경이 작아짐에 따라 증발영역에서의 전체 증발시간은 짧아져 큰 영향을 받고 있지만, 핵비등 영역에서의 전체 증발시간은 액적의 크기에 거의 영향을 받지 않는다.

5) 초기 표면온도에 따른 시간 평균 열유속은 액적의 직경이 작을수록 최대 값을 나타내며, 이때 최대 시간 평균 열유속은 표면조도가 $0.18 \mu m$, 액적 직경이 2.4 mm일 때 7923.2 kW/m^2 의 값을 가진다.

참고문헌

1. J. D. Bernardin and I. Mudawar, Int. J. of Heat Mass Transfer, **38** (1995) 863-873.
2. D. D. Hall and I. Mudawar, Int. J. of Heat Mass Transfer, **38** (1995) 1201-1216.
3. D. D. Hall and I. Mudawar, ASME J. Heat Transfer, **117** (1995) 479-488
4. J. Kistemajer, Physial, **29** (1963) 96-104.
5. B. S. Gottfried, C. J. Lee and K. J. Bell, Int. J. of Heat Mass Transfer, **9** (1966) 1167-1187.
6. J. D. Bernardin, C. J. Stebbins and I. Mudawar, Int. J. of Heat Transfer, **40** (1996) 247-267.
7. V. Betta, P. Mazzei, V. Naso and R. Vanoli, J. of Heat Transfer, **101** (1979) 613-616.
8. C. Bonacina, S. DelGiudice and G. Comini, J. of Heat Transfer, **101** (1979) 441-446.
9. J. Rizza, J. of Heat Transfer, **103** (1981) 501-507.
10. M. DiMarzo and D.D . Evans, J. of Heat Transfer, **111** (1989) 210-213.
11. S. Kline and F. A. McClintok, Mechanical Engineering, Jan, (1953) 3-8.
12. R. J. Moffat, J. of Fluids Engineering, **107** (1985) 173-182.
13. R. J. Moffat, Experimental Thermal and Fluid Science, **1** (1988) 3-17.
14. I. Michiyoshi and K. Makino, Int. J. of Heat Mass Transfer, **21** (1978) 605-613.
15. T. Jonas, A. Kubitzek and F. Obermeier, Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, (1997) 1263-1270.