

## 강에서 표면조도의 변화와 액적 직경에 따른 충돌 액적 증발 냉각 특성

장충선<sup>†\*</sup> · 손창현\* · 정성원<sup>\*\*</sup> · 최원식<sup>\*\*</sup>

<sup>†\*</sup>경북대학교 기계공학부

<sup>\*\*</sup>부산대학교 바이오시스템공학부

### Characteristic of Evaporation Cooling in Water Droplet Impinging on Steel with Various Surface Roughness and Droplet Diameter

C. S. Jang<sup>†\*</sup>, C. H. Sohn\*, S. W. Chung<sup>\*\*</sup>, W. S. Choi<sup>\*\*</sup>

<sup>†\*</sup>School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

<sup>\*\*</sup>School of Biosystems Engineering, Pusan National University, Gyeongnam 627-706, Korea

**Abstract** An experimental study is presented for water droplet impingement on a steel surface in the process of heat treatment. The objective of the present work is to examine characteristic of evaporation cooling due to surface roughness and droplet diameter under conductive heat input condition. The surface temperatures varied from 80~155°C, surface roughness was from  $R_a = 0.12 \mu\text{m}$  to  $R_a = 1.14 \mu\text{m}$  and droplet diameter was from 2.4 mm to 3.0 mm. The results show that the total evaporation time is shorter for the larger surface roughness and the smaller droplet size, the time average heat flux has maximum value for the larger surface roughness and the smaller droplet size. The total evaporation time has not influence on the nuclear boiling region.

(Received April 24, 2006; accepted May 16, 2006)

**Key words:** Water droplet impingement, Heat treatment, Characteristic evaporation cooling, Surface roughness, Droplet diameter, Conductive heat input condition, Surface temperature, Total evaporation time, Time averaged heat flux

## 1. 서 론

액적 증발 냉각에 대한 연구분야는 이용도가 높아 금속의 열처리, 터빈 날개의 냉각, 전자장치의 냉각, 고성능의 열교환기, 핵반응로의 긴급냉각, 화재진압 등의 다양한 분야에서 연구되어 왔으며, 최근에는 NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서 우주 왕복선 주위의 제어시스템에서 이 방법이 사용되어지는 것으로 밝혀졌다[1].

물을 이용한 증발 냉각은 중요한 과제로서 액적 증발 냉각의 특성과 최적의 냉각 성능을 나타내는 조건을 구명하려는 연구가 계속 진행되어 왔으며, 특히 금속부분의 열처리과정에서 알루미늄과 강과 같은 금속의 담금질인 경우 고온으로부터 급냉이 필요한 곳의 열 집중하중을 제거할 필요가 있는 곳에 사용하므로 이러한 적용의 발전은 강화된 열 제거율과

표면 온도조절 능력을 필요로 한다[2-4].

물을 이용한 냉각과정 중 액적 증발 냉각에 영향을 주는 인자들은 가열고체의 초기 표면온도와 표면 조도, 액적 크기, 충돌 속도, 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 Tamura 등[5]은 액적 직경이 1.17~2.98 mm이고, 표면온도가 25~1000°C일 때, 증발 유체로 물 및 다양한 탄화 수소계 화합물을 이용하여 스테인레스 강 표면과 수정 표면 위에서의 증발 현상과 LFP(Leidenfrost phenomenon)를 실험적으로 연구하였다. Gottfried 등[6]은 액적 체적이 0.1 ml 이하이고, 표면온도가 150~500°C일 때, 증발유체로 물 및 다수의 탄화수소화합물을 이용하여 스테인레스 강 표면 위에서 LFP를 실험적으로 연구하여

<sup>†\*</sup>E-mail : csjang11@netian.com

물을 제외한 모든 유체의 LFP는 액체의 포화온도보다 약 100~105°C 높게 나타났고, 물의 경우는 표면상태나 액적을 부착하는 방법에 따라 포화온도보다 150~210°C 높게 나타났다. Baumeister 등[7]은 액체의 임계온도, 고체의 열적 상태량, 액체의 표면에너지, 고체의 표면에너지 등의 영향을 고려하여 물과 액체금속에 대한 LFP를 예측할 수 있는 기술을 실험적으로 연구하였다. Emmerson[8]은 LFP온도보다 높은 온도범위에서 증발시간에 대한 압력과 표면재질의 영향을 실험적으로 연구하였다. Rizza[9]는 고온 고체표면 위에서 액적 증발에 대한 모델을 기초한 수치 해석적 연구를 수행하여 많은 양의 열이 액적 선단으로부터 전달되는 것을 보였으며, 고체-액체 접촉면 온도가 일정한 온도로 유지되고 있다고 가정하였다. Makino 등[10]은 액적 직경이 2.54~4.50 mm, 표면온도가 80~450°C, 가열체의 재질은 구리, 황동, 탄소강, 스테인레스 강에 대하여 실험적 연구를 수행하여 가열된 표면 위에서 액적의 증발과 관련된 전 영역의 비등곡선을 실험적으로 구하였다.

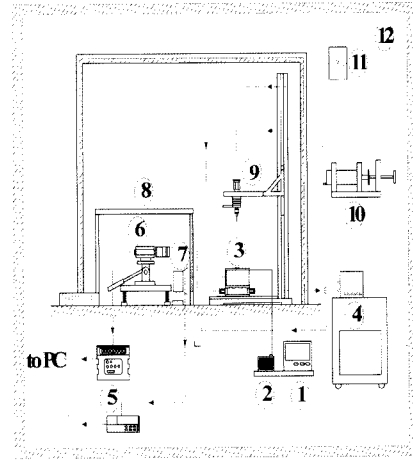
상기의 연구들은 공업적인 사용 목적을 위하여 얇은 증기층과 증기막을 형성하는 천이비등 영역과 막비등 영역인 LFP점에 속하는 고온영역의 연구가 대부분이었고, 열처리 과정 중 실제로 이 영역들은 비등영역에서의 빠른 열처리 공정보다 느린 열처리 공정에 있어서 재료의 약한 강도와 경도를 가지는 파괴적인 결과를 초래하였으며, 금속들은 특히 고체 표면의 돌기에 의한 표면조도를 가지고 있기 때문에 표면조도에 관한 증발영역의 냉각 특성에 관한 연구는 거의 이루어지지 않아 이에 대한 연구가 절실히 요구되는 실정이다.

본 연구는 강의 경우 비등영역에서 열 유동의 일시적, 공간적인 변동을 예측하는 방법을 제시하기 위하여 전도조건 하에서 표면조도의 변화와 액적 직경에 따른 충돌 액적의 증발 냉각 특성에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

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



- |                           |                     |
|---------------------------|---------------------|
| 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.

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 있고, 실험부는 가열 케이스 ③이 액적 발생기 ⑨의 아래로 50 mm 위치에 설치하였으며, 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 컴퓨터 ⑤로 구성되어 있고, 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

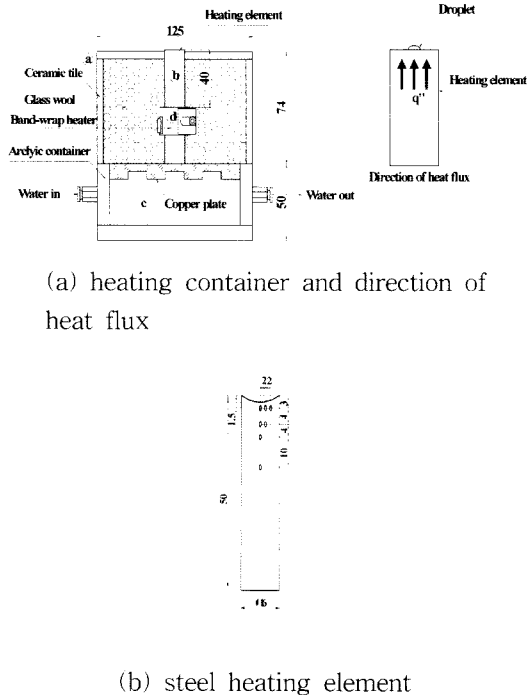


Fig. 2. Schematic diagrams of (a) the heating container and direction of heat flux for heat input condition in conductive heating condition, (b) the steel heating element.

적리시켰다.

액적 공급부는 액적을 일정하게 토출 해 주도록 제작된 액적 발생기 ⑨와 일정 양의 물을 공급해주는 Syringe pump ⑩ 및 표면에 부착되기 전의 액적 온도를 일정하게 유지시키는 냉각수 탱크 ④로 구성되어 있다.

Fig. 2는 가열 케이스의 형상과 전도 가열조건시 고체 표면에서 전달되는 열유속의 방향 및 가열고체 열전대 위치의 세부도를 나타낸 그림이다. 그림 (a)인 경우 단일 블록케이스 ①는 세라믹 타일을 사용하여 가공하였으며, 내부에는 grass wool을 채웠다. 가열고체 ②는 하부를 등온으로 유지하기 위하여 등온 모듈에 접촉하도록 위치시켰다. 등온모듈 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 전달되며, 온도제어는 가열고체 하부에 기준 열전대를 부착하여 실행하였다.

그림 (b)는 열전도도가 높은 금속 재질의 경우 1차 원적인 열전달 해석이 가능하지만, 강과 같이 열전도도가 낮은 금속은 액적 아래 등온이 될 수 없으므로, 축 대칭의 2차원 열전도를 고려하여 전체 길이 50 mm, 직경 16 mm의 원기둥형으로 가공하였다. 또한 온도를 측정하기 위해 K형 열전대를 표면 중심에서 깊이방향으로 1.5 mm, 5.5 mm, 9.5 mm로 3개를 심고, 표면 중심에서 반경방향으로 2 mm 떨어진 곳에 깊이방향으로 2개를 심었으며, 여기서 2 mm 떨어진 곳에 깊이방향으로 1개를 심어 총 6개를 심었다. 표면조도에 따른 액적 증발의 영향을 관찰하기 위하여 알루미늄의 표면을 산술 평균 조도( $R_a$ )로 하여 0.12  $\mu\text{m}$ , 0.46  $\mu\text{m}$ , 1.14  $\mu\text{m}$ 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 충돌발 시간과 변화를 관찰하였으며, 데이터 획득장치로부터 온도데이터를 얻었다. 데이터의 해는 Kline[11]과 Moffat [12, 13]에 의해 제시된 해석 방법을 이용하였다.

Table 1에 액적 실험의 변수와 범위를 요약하여 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 1/30 s로 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 강이고, 액적 직경이

**Table 1.** Parameter and experimental ranges for droplet experiment

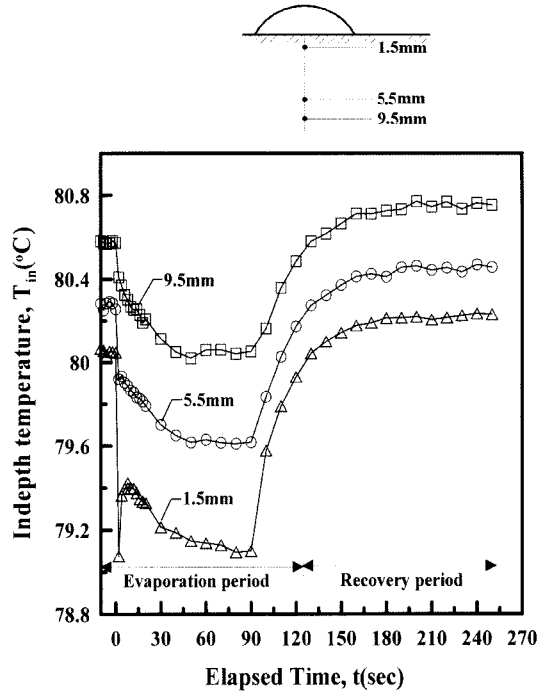
Surrounding & Initial droplet temperature	Surrounding : 25. ± 0.5°C Initial droplet : 25. ± 0.3°C
Surface temperature	80°C~155°C
Droplet	Pure water
Surface material	Steel(SSC400)
Droplet size	2.4 mm~3.0 mm
Surface roughness(Ra)	0.12 μm~1.14 μm

3.0 mm, 표면조도가 Ra = 0.12 μm, 초기 표면온도가 80.0°C 일 때, 액적 부착 후 경과시간에 따른 가열고체의 내부온도변화를 나타낸 그림이다. 온도 측정위치는 접촉면 중심에서 깊이방향으로 1.5 mm(80.07°C), 5.5 mm(80.28°C), 9.5 mm(80.58°C) 이다.

가열고체의 내부온도변화는 액적 부착 시 급격히 감소한 후, 서서히 감소하여 최소 값에 도달 한 후 다시 증가하여 초기온도로 회복하게 된다. 급격한 온도감소를 발생하는 구간은 액적이 부착 후 고체 표면온도가 초기 표면온도에서 액적의 접촉면 온도로 떨어지므로 나타나는 현상이다. 또한 온도가 서서히 감소하는 것은 액적이 증발함에 따라 고체 내부로 열확산이 서서히 일어나기 때문이며, 이후 다시 온도가 상승하는 구간은 액적의 증발이 거의 완료되어 초기 표면온도로 회복하는데 초기 표면온도보다 약간 높게 온도가 상승되는 것은 비정상상태로 초기 표면온도가 회복하기 때문이다.

깊이방향으로의 내부온도변화는 전반적으로 비슷한 경향을 나타내고 있으나, 깊이 1.5 mm인 부분의 온도변화가 깊이 5.5 mm와 9.5 mm인 부분의 온도변화보다 더 큰 변화를 보여주고 있다. 이는 깊이 1.5 mm인 부분에서 고체 내부의 깊이방향으로 열전달이 잘 일어나기 때문이다. 표면온도가 낮은 경우 액적 부착초기에 온도가 급격히 하강한 후에 일정한 온도로 되었다가 시간이 경과한 후 다시 서서히 감소하고 있으며, 이후 시간을 회복시간으로 정의하였다[14, 15].

이러한 변화를 보이는 것은 액적이 부착초기에 넓게 퍼졌다가 다시 수축하기 전에 전열면적이 넓고 액적의 두께가 얇아 열전달이 급속히 일어나다가,



**Fig. 3.** In-depth temperature versus elapsed time at steel, d = 3.0 mm, Ra = 0.12 μm, T<sub>s,0</sub> = 80.0°C.

액적이 수축을 하게 되면 전열면적이 감소하여 열전달량이 감소하며, 부착 초기보다 가열되고, 수축되어진 액적에 의하여 냉각이 일어나기 때문이다.

Fig. 4는 가열고체의 재질이 강이고, 액적 직경이 3.0 mm, 표면조도가 Ra = 0.12 μm, 초기 표면온도가 80.0°C일 때, 고체 접촉면의 깊이 1.5 mm에서의 액적 부착 후 경과시간에 따른 가열고체 반경방향의 내부온도변화를 나타낸 그림이다. 온도 측정위치는 액적이 부착된 고체표면의 중심점에서 반경방향으로 0 mm, 2 mm, 4 mm이다.

액적 접촉면의 깊이 1.5 mm에서의 반경방향의 내부온도변화는 반경 r = 4 mm 부근까지 액적이 부착된 후 급격히 하강한 후 서서히 감소하여 최소값을 나타낸 후 서서히 증가하여 초기 표면온도로 회복된다. 이는 액적이 고체표면에 부착 후 액적의 표면으로부터 증발하는 동안 고체표면의 반경방향으로 열전달이 약간 증가하였기 때문이다. 또한 반경방향으로의 초기 표면온도로 회복하는 경우를 보면 r = 0 mm에서 초기 표면온도로 회복하는 온도가 가장 높는데, 이는 강의 열전도도(k = 45 W/mK)가 낮아

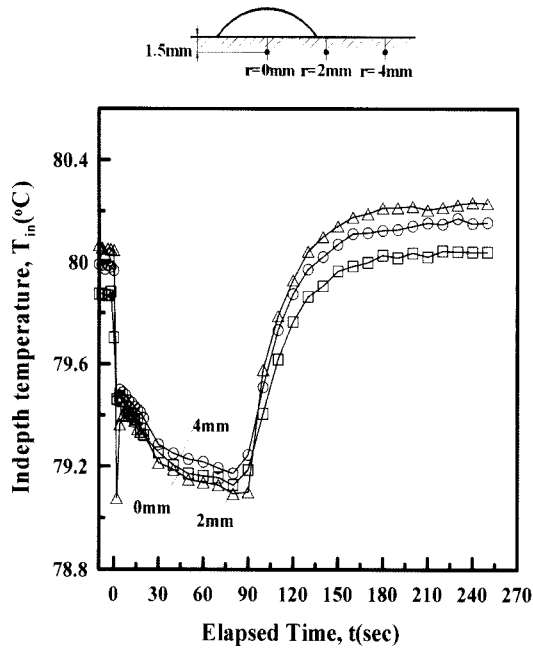


Fig. 4. Indepth temperature of radial variation versus elapsed time at steel,  $d = 3.0$  mm,  $Ra = 0.12 \mu\text{m}$ ,  $T_{s,0} = 80.0^\circ\text{C}$ .

고체하부로부터 고체표면으로의 열전달이 반경방향보다 중심에서 열전달이 잘 일어나기 때문이다.

Fig. 5는 가열고체의 재질이 강이고, 액적 직경이 3.0 mm, 표면조도가 0.12  $\mu\text{m}$ , 0.46  $\mu\text{m}$ , 1.14  $\mu\text{m}$  일 때, 액적 부착 후 경과시간에 따른 가열고체의 표면 온도변화를 나타낸 그림이다. 온도 측정위치는 고체 접촉면에서 깊이방향으로 액적이 부착된 고체 표면의 중심에서 1.5 mm아래 이다. 가열고체의 초기 표면온도는 대기압 하에서 물의 비등점( $100^\circ\text{C}$ )보다 낮은  $80^\circ\text{C}$  부근의 증발영역이다.

액적의 부착 후 경과시간에 따른 가열고체의 내부 온도변화는 액적이 부착된 직후 급격하게 냉각되는 현상이 나타나는데 이는 강의 열전도도( $k = 45 \text{ W/mK}$ )가 낮아 고체표면에 부착된 액적이 고체 내부에 까지 열전달이 잘되지 않아 강재의 표면만 급속히 냉각되기 때문이다. 그러므로 금속 재질의 열전도도가 낮은 재료에서의 액적을 이용한 냉각방법은 고체 하부로부터 액적으로의 전도 열전달이 작기 때문에 고온표면 위에서의 냉각과정 중 표면조도에는 큰 영향을 받지 않는다고 사료된다[16].

또한 표면조도가 1.14  $\mu\text{m}$ 일 때는 가열고체의 표

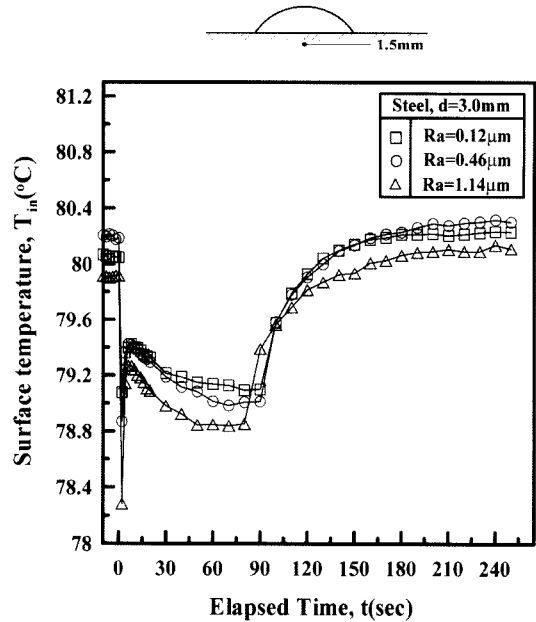


Fig. 5. Surface temperature versus elapsed time for various surface roughness at steel,  $d = 3.0$  mm.

면 돌기가 액적 내부까지 침투하여 액적으로의 열전달이 잘 일어나 냉각효과가 좋기 때문에 초기 표면 온도로 먼저 상승하지만, 표면조도가 0.12  $\mu\text{m}$ 와 0.46  $\mu\text{m}$ 일 때는 거의 표면조도에는 영향을 받지 않는다. 이는 강의 열전도도가 낮기 때문에 표면조도가 작은 경우에는 냉각효과의 영향을 크게 받지 않기 때문이다.

### 3.2 증발 시간에 따른 영향

Fig. 6은 가열고체의 재질이 강이고, 액적 직경이 3.0 mm, 표면조도가 0.12  $\mu\text{m}$ , 0.46  $\mu\text{m}$ , 1.14  $\mu\text{m}$  일 때, 가열고체의 초기 표면온도에 따른 전체 증발 시간을 나타낸 그림이다.

전반적으로 가열고체의 초기 표면온도가 증가함에 따라 전체 증발시간은 일정한 감소를 나타내고 있는데, 이는 강의 초기 표면온도 증가로 인해 고체하부로부터의 고체표면 부에서 열전달이 일어나기 때문이다.

표면조도가 클수록 초기 표면온도에 대한 전체 증발시간은 짧게 나타나고 있으며, 표면조도가 0.12  $\mu\text{m}$ 와 0.46  $\mu\text{m}$ 에서의 전체 증발시간은 거의 같아 표면조도에는 큰 영향을 받고 있지 않지만, 표면조도가 1.14  $\mu\text{m}$ 일 때의 전체 증발시간은 매우 짧아 표

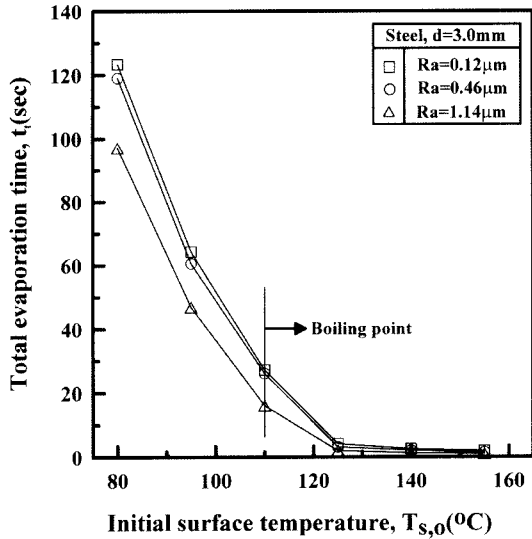


Fig. 6. Total evaporation time versus initial surface temperature for various surface roughness at steel,  $d = 3.0$  mm.

면조도의 영향이 크게 작용하여 냉각효과가 좋게 나타난다. 이는 액적과 가열고체 경계면에서 표면조도의 영향에 의해 접촉면적의 증가로 액적으로의 열전달이 증가하였기 때문이다. 반면, 비등영역이 발생하는 초기 표면온도는 표면조도에 관계없이 동일한 온도인  $125^{\circ}\text{C}$ 에서 발생하였는데 이는 강의 열전도도가 낮으므로 표면조도에 큰 영향이 미치지 않기 때문이다.

3.3. 열유속에 따른 영향

Fig. 7은 가열고체의 재질이 강이고, 액적 직경이  $3.0$  mm, 표면조도가  $0.12\ \mu\text{m}$ ,  $0.46\ \mu\text{m}$ ,  $1.14\ \mu\text{m}$  일 때, 가열고체의 초기 표면온도에 따른 가열고체의 표면에서 액적으로 전달되는 시간 평균 열유속(time average heat flux)을 나타낸 그림이다.

가열고체의 초기 표면온도가 증가함에 따라 시간 평균 열유속은 점차적으로 증가하다가 비등영역에서부터 크게 증가하여 핵비등이 끝나는 영역까지 계속적인 증가를 보이고 있으며, 최대 시간 평균 열유속은 나타나지 않고 있다. 이는 강의 열전도도가 낮으므로 고체 표면으로부터 액적을 증발시키기 위해서는 보다 큰 증발율이 요구되기 때문이다.

표면조도가 클수록 초기 표면온도에 대한 시간 평균 열유속은 큰 값을 가지며, 표면조도에 따른 시간 평균 열유속은 초기 표면온도가 증가할수록 표면조도

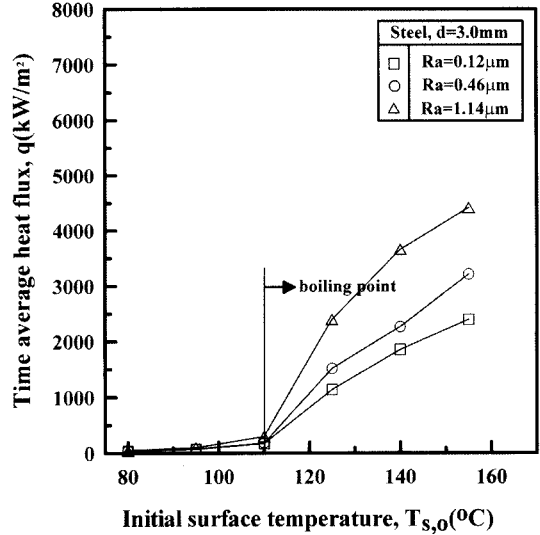


Fig. 7. Time average heat flux versus initial surface temperature for various surface roughness at steel,  $d = 3.0$  mm.

$1.14\ \mu\text{m}$ 일 때가  $0.12\ \mu\text{m}$ 와  $0.46\ \mu\text{m}$ 일 때보다 더 큰 값을 나타내고 있는데, 이는 표면조도가 크면 가열고체의 표면 돌기가 액적의 내부까지 침투하여 가열고체 표면과 액적 표면간의 접촉면적을 증가시켜 고체 표면으로부터의 액적으로 열전달이 크게되어 냉각효과가 좋기 때문이다. 이때 표면조도가  $1.14\ \mu\text{m}$  일 때의 시간 평균 열유속은  $4414.7\ \text{kW/m}^2$ 의 값을 가진다.

3.4 액적 크기에 따른 영향

Fig. 8은 가열고체의 재질이 강이고, 표면조도가  $0.12\ \mu\text{m}$ 이며, 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 큰 폭으로 일정하게 급격한 감소를 나타내고 있으며, 비등영역이후 핵비등 영역에서는 전체 증발시간의 차이가 작게 나타나고 있다.

증발영역의 경우 액적의 크기에 따라 전체 증발시간의 차이가 크게 나타나고 있는데, 이는 강의 열전도도가 낮기 때문에 고체 표면으로부터 낮은 열전달로 인하여 액적에서의 증발율이 작기 때문이다. 따라서 액적 직경이 작아짐에 따라 작은 증발율로 액적

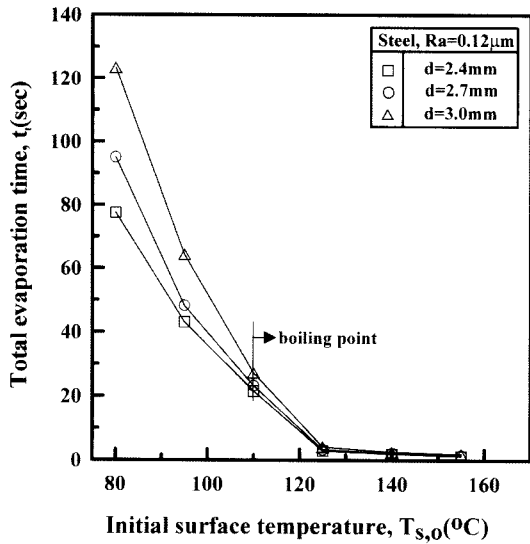


Fig. 8. Total evaporation time versus initial surface temperature for various initial droplet diameters at steel,  $Ra=0.12 \mu m$ .

을 빨리 증발시킬 수 있으므로 증발시간이 짧아져 냉각효과의 영향을 많이 받고 있지만, 핵비등 영역에서는 거의 영향을 받지 않는다.

Fig. 9는 가열고체의 재질이 강이고, 표면조도가  $0.12 \mu m$ 이며, 액적 직경이 2.4 mm, 2.7 mm, 3.0 mm일 때, 가열고체의 초기 표면온도에 따른 가열고체의 표면에서 액적으로 전달되는 시간 평균 열유속 (time average heat flux)을 나타낸 그림이다.

가열고체의 초기 표면온도가 증가함에 따라 시간 평균 열유속은 점차적으로 증가하다가 비등영역에서부터 크게 증가하여 거의 핵비등이 끝나는 영역까지 계속적인 증가를 나타내고 있다. 이는 Fig. 8의 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  $1137.6 \text{ kW/m}^2$ 로 작게 나타났다. 이는 강의 열전도도가 낮아 핵비등 영역에서 고체표면으로의 열전달이 작으므로 전체 증발시간의 차이가 작게 나타나기 때문이다. 액적 직경이 2.4 mm일 때의 시간 평균 열유속이 2.7 mm와 3.0 mm인 경우보다 높게 나타내고 있는데, 이는 시간 평균 열유속은 단위 시간당 액적의 단위 면적을 통한 열

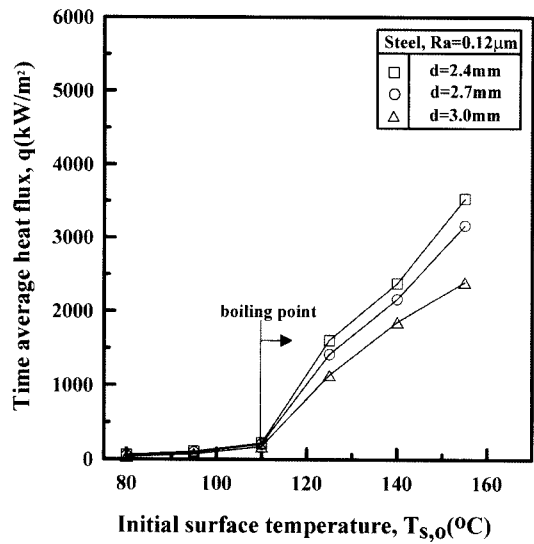


Fig. 9. Time average heat flux versus initial surface temperature for various initial droplet diameters at steel,  $Ra = 0.12 \mu m$ .

전달율로 정의되므로 Fig. 8의 경우와 같이 증발시간이 현저하게 짧기 때문이다. 이때 액적 직경이 2.4 mm일 때의 시간 평균 열유속은  $3533.5 \text{ kW/m}^2$ 의 값을 가진다.

#### 4. 결 론

증돌 액적 증발에 대한 순수 물 액적의 냉각 특성을 조사하기 위하여 액적 증발 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 경과시간에 따른 가열체의 표면온도는 표면조도가  $0.12 \mu m$ 와  $0.46 \mu m$ 일 때의 증발시간이 같아 초기 표면온도로 회복하는 시간은 같다.

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  $1.14 \mu m$ 일 때  $4414.7 \text{ kW/m}^2$ 의 값을 가진다.

4) 초기 표면온도에 따른 전체 증발시간은 액적 직경이 작아짐에 따라 증발영역에서의 전체 증발시간은 짧아져 큰 영향을 받고 있지만, 핵 비등영역에서의 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  $0.12 \mu\text{m}$ , 액적 직경이  $2.4 \text{ mm}$ 일 때  $3533.5 \text{ kW/m}^2$ 의 값을 가진다.

### 참고문헌

1. H. Dawson and M. Di Marzo, NIST-GCR, (1993) 93-624.
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. Z. Tamura and Y. Tanasawa, 7th Symposium (International) on Combustion, London and Oxford, (1958) 509-522.
6. B. S. Gottfried, C. J. Lee and K. J. Bell, Int. J. of Heat mass Transfer, (1966) 1167-1187.
7. K. J. Baumeister and F. F. Simon, J. of Heat Transfer, (1973) 166-173.
8. G. S. Emmerson, Int. J. Heat Mass Transfer, **18** (1975) 381-386.
9. J. Rizza, J of Heat Transfer, **103** (1981) 501-507.
10. K. Makino and I. Michiyoshi, Int. J. of Heat Mass Transfer, **30** (1989) 1895-1905.
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.
16. 최국광, 대한기계학회지, 21-1 (1981) 56-60.