

고온벽면 충돌에 의한 미립화

전인곤* · 이준백* · 전흥신**

ATOMIZATION OF LIQUID DROPLET BY IMPINGEMENT ONTO THE HOT SURFACE

In-Kon Jeon, Jun-Baek Lee and Heung-Shin Jeon

Key Words: Impinging Droplet(충돌액적), Breakup(분열), Weber number(We 수), SMD(평균입경)

Abstract

The breakup behaviors of impinging droplet on a hot surface are studied experimentally. The droplets are produced by the dripping method and the breakup behaviors of liquid droplet are recorded by photographs. Experimental conditions are, droplet diameter d_i : 2.5, 3.2 [mm], weber number : 30~140, surface temperature : 28°C(room temperature)~450 °C. Water is used to liquid.

As weber number of droplet increases, a liquid sheet, which is formed after the impingement on a hot surface, is disintegrated by the dynamical effect. But at low weber number, it has effected by thermodynamical effect. The breakup behaviors of droplet are divided into three patterns with weber number and surface temperature, non-disintegration, transition and disintegration region. Further, these boundary values are affected by the hot surface temperature and weber number. SMD of breakup droplets are calculated in according to surface temperatures and weber number. The minium SMD of breakup droplets are observed at weber number 65.49, temperature 250°C and weber number 99.08, temperature 350°C.

기호설명

d_i : 액적직경, ρ : 밀도 σ : 표면장력
 L : 노즐선단에서 고온벽면까지의 거리

1. 서론

고온벽면에 액체 분무의 충돌에 대한 현상은 내연기관의 분무연소, 철강산업에서의 분무냉각, 터빈블레이드의 냉각, 스프링쿨러를 사용하는 화재진압, 연속주조시의 열처리등 공업적으로 광범위하게 나타나고 있다. 특히 디젤기관에서 고온의 피스톤 헤드로의 연료 액적의 충돌에 의한 미립화는 연소특성에 영향을 미치므로 이에 대한 연구가 필요하다.

고온벽면으로의 액적의 충돌 미립화특성은 온도에 의한 열전달 효과 및 액적의 속도, 크기에 의해 결정되는 We수($=\rho d_i V_i^2 / \sigma$)에 따라서 매우 복잡한 현상을 보이게 된다.

TOKUOKA와 SATO^{(1),(2)} 등은 We수와 고온벽면 온도에 따라서 분열영역을 비분열, 천이분열, 분열영역으로 구분하였다. 그들에 의하면 이 영역들은 벽면온도가 350°C로 일정할 때 We수가 각각 $We < 45$, $45 < We < 80$, $We > 80$ 일 때라고 보고하였다. 더욱이 분열영역에서 열에 의한 효과는 액적이 고온벽면에 충돌하여 액막이 형성된 후 일부가 증발하여 미립화하는 것과 충돌한 후 즉시 벽면에서 증발하여 미립화하는 Film boiling(막비등)현상으로 구분하였다. SENDA와 SATO^{(3),(4)} 등은 미소액적의 충돌후의 거동을 분열형태에 따라 [R]형, [RB]형, [N]형, [H]형, [V]형, [F]형의 6종류로 분류하였고, 충돌시의 벽면상의 액적퍼짐직경 및 분열 액적의 평균입경과 벽면온도사이의 관계를 조사하고 평균입경을 액막두께 및 We수에 따

* 경희대학교 대학원 기계공학과

** 경희대학교 기계·산업시스템 공학부

라 표시하였다. KUBITZEK와 JONAS⁽⁵⁾ 등은 We 수 12~3864사이와 벽면온도 20~500℃사이에 대하여 관성력의 영향이 미치는 영향에 따라 분류하였다. ARAKI와 MORIYAMA⁽⁶⁾ 등은 액적과 고온벽면사이의 전열계수 h_d 을 We 수의 의존성과 고온벽면을 구성하는 금속종류에 따라 결정하는 실험을 행하였다.

본 실험에서는 고온벽면 충돌미립화의 분열거동을 규명하기 위하여 We 수와 벽면온도에 근거하여 분열 거동을 사진촬영하여 관측하고, 각 경우에서의 분열된 액적의 평균입경을 측정하여 미립화 특성을 관찰, 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 방법

실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 크게 액적발생부, 고온벽면부 및 측정장치로 나눌 수 있다.

본 실험장치의 노즐은 시판의 주사바늘의 선단을 직각으로 가공 연마하여 사용하였고, 노즐의 선단에서 시료가 자중에 의하여 분열하는 적하기구를 형성하도록 하였다. 실험에 사용한 노즐은 두종류이며, 여기에서 발생된 액적의 크기는 사진촬영 측정하여 각각 3.2[mm]와 2.5[mm]이었다. 충돌점에서의 액적속도 V_i 는 $V_i = \sqrt{2g(L - D_i)}$ 식을 사용하여 평가하였다. We 수는 충돌거리와 액적크기를 조정하여 사용하였다.

액적을 충돌시킬 때 고온벽면부는 직경 $\phi 16$ 의 동봉재를 축에 대하여 직각으로 절단하고, 충돌부분은 조도의 영향을 없애기 위해서 샌드페이퍼(NO. 2000)로 연마하였다. 벽면온도는 히터를 슬라이드 덕스에 연결하여 온도를 조절할 수 있도록 하였다. 본 실험에서 사용한 온도는 상온, 150℃, 250℃, 350℃ 및 450℃이다.

액적이 고온벽면에 충돌한 후 분열거동은 리타더와 스트로브스코프를 사용하여 액적이 고온벽면에 충돌하려는 순간을 기점으로 시간지연간격을 1ms로 하여 사진촬영하여 평가하였다.

온도측정에 사용된 열전대는 직경 $\phi 0.3$ 인 K타입을 사용하였다. 고온벽면의 온도측정위치는 표면에서 중심축방향으로 1.5mm지점과 11mm 떨어진 곳이다.

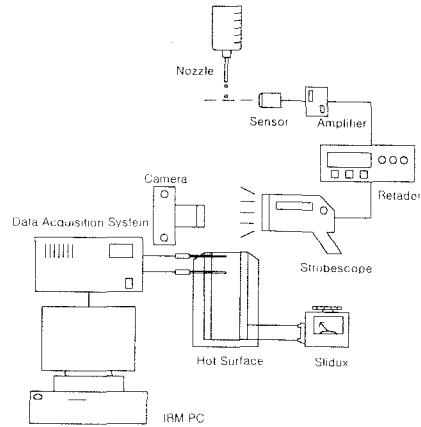


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2는 K 타입열전대의 온도특성이다. Fig. 3은 열전대의 순간적인 온도검출의 반응을 확인하기 위해 두 열전대를 끓는물에 동시에 넣었을 때의 온도반응을 보여준다. 실제로 두 열전대가 상승하는 온도는 큰 차이가 없다는 것을 보여준다.

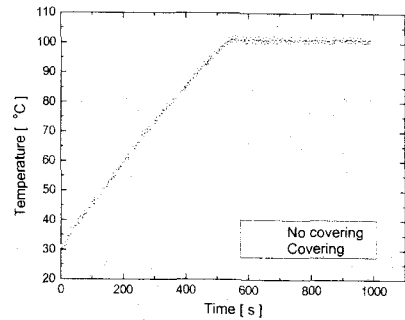


Fig. 2 Compare with rising temperature

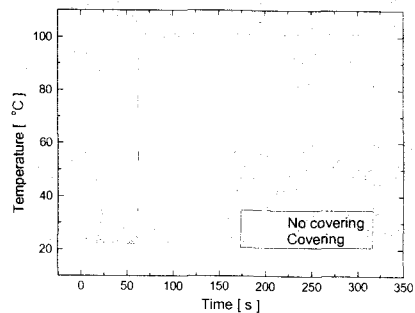


Fig. 3 Compare with the instant temperature

3. 결과 및 고찰

3.1 벽면온도에 따른 분열거동

3.1.1 상온에서의 분열거동

Fig. 4는 사진 촬영을 통하여 본 We수 31.94 ($d_i=2.5\text{mm}$)와 31.64 ($d_i=3.2\text{mm}$)에서의 액적의 분열거동이다. 액적의 크기가 다를지라도 동일한 We수 일 때는 동일한 분열거동을 나타냄을 알 수 있다.

상온에서 액적은 분열하지 않은 비분열 거동을 보이고있다. 단지 We수가 증가하면 퍼짐직경 테두리에서 액막의 파가 나타나고, We수의 증가에 따라 액막 파의 요동은 커지게 된다.

상온에서 액적이 벽면에 충돌하여 관찰되는 액적의 분열거동은 사진을 통하여 확실하게 확인할 수 있는 것처럼, 초기에 벽면에 충돌하여 하부에서부터 벽면상에 퍼져나가고(①), 최대퍼짐직경에 도달하게 되면(②) 액막의 파가 형성된다. 이것은 사진으로 제시하지 않았지만 We수가 높을수록 분명히 나타나고, 최대퍼짐직경 이후에는 요동을 보이다가 다시 액적하부가 벽면상에 퍼진형상(④)으로 안정을 이루게 된다.



(a) Weber number 31.94



(b) Weber number 31.64

Fig. 4 Breakup at room temperature

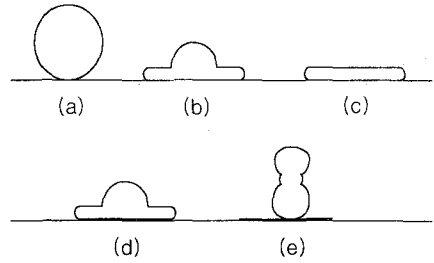


Fig. 5 Breakup model by impingement

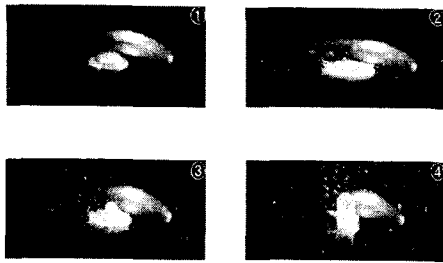
Fig. 5는 상온에서 분열거동의 기본 모델을 나타낸 것이다. 고온벽면의 액적의 분열은 이 모델을 근거로 하고 있다. 액적이 벽면에 접촉하면 운동에너지에 의하여 (b)의 형상으로 되고, 만약 열전달이 활발하게 이루어지는 단계에서는 바로 (b)의 단계에서 분열이 시작되어 액적이 비산하기 시작한다. 그러나 We수가 높은 경우에는 운동에너지의 효과가 크므로 다음 단계인 (c)의 단계에서 좀더 활발한 분열거동을 보여준다. 특히 이 모델은 350℃의 고온의 경우나 150℃정도의 비교적 낮은 온도에 대해서는 Fig. 5에 보여주는 모든 형태에 따르는 것이 관찰된다.

3.1.2 150℃에서의 분열거동

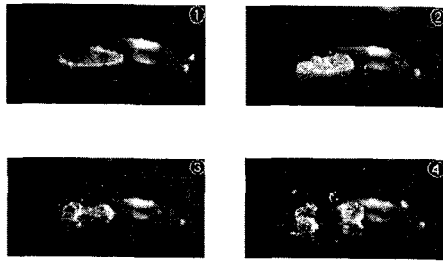
Fig. 6은 We수 31.94 ($d_i=2.5\text{mm}$)와 65.49 ($d_i=2.5\text{mm}$)에서의 분열거동을 나타내었다. 상온의 경우와 마찬가지로 동일한 We수에서는 동일한 분열거동을 나타낸다.

150℃에서의 분열거동은 We수가 증가할수록 액막의 퍼짐직경은 증가하지만 분열거동은 모두 Fig. 5의 분열모형을 따르는 것을 알 수 있다. 이때 We수 65.49 ($d_i=2.5\text{mm}$)에서는 액적이 분열하면서 둘로 쪼개지는 형상을 보이는데 이는 온도의 영향때문이라고 사료된다.

고온벽면의 온도가 150℃에서는 물의 핵비등 영역에 있으므로 액적이 고온벽면에 충돌하여 퍼질 때 작은 기포가 생기는 것을 목격할 수 있다. 이 기포들은 액막이 퍼지는 과정중에 터지는 듯이 비산하기 시작한다. 낮은 We수에서는 액적이 고온벽면에서 퍼져나가는 시간이 충분하여 고온벽면에서의 열적 영향을 받아 높은 We수에서 보다 미세한 액적이 비산하는 것처럼 보인다. We수가 증가하면 액적은 보다 빠르게 고온벽면상으로 퍼져나가므로 증발하여 비산하는 액적의 개수가 We수가 낮은 경우보다 적어보이고, 액적이 분열

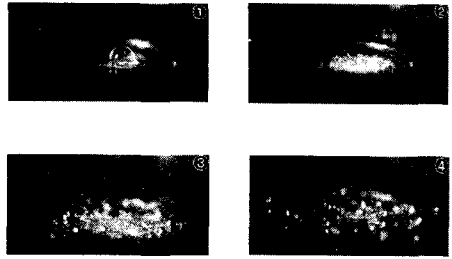


(a) Weber number 31.94

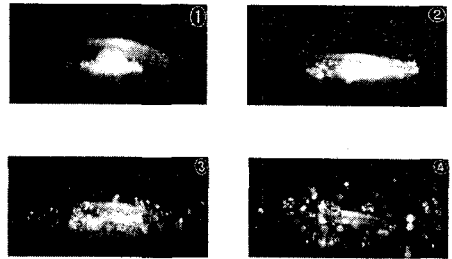


(b) Weber number 65.49

Fig. 6 Breakup at surface temperature 150°C



(a) Weber number 99.08



(b) Weber number 100.43

Fig. 7 Breakup at surface temperature 250°C

하면서 튀기는 Splash거동과 비슷한 형상을 보이지만 확실하게 관찰되지 않았다.

또한 We수의 효과가 극대화된 최대퍼짐직경에 도달하면 액막의 테두리에서부터 높은 파가 형성되지만 분열하지는 않는다. 이는 본 실험조건에서 모두 나타나고 특히, We수가 증가하게 되면 원주 테두리에서부터 분열이 시작되는 것을 알 수 있다.

3.1.3 250°C에서의 분열거동

Fig. 7은 We수 99.08($d_i=2.5\text{mm}$)와 100.43($d_i=3.2\text{mm}$)에서의 분열거동을 나타내었다. 250°C 온도범위에서는 We수에 따라 분열거동이 차이를 보이게 된다. We수 80이상인 경우는 액적은 균일한 크기를 갖는 미세액적들로 분열비산하여 고온벽면에 잔존 액적이 없게되고, 그 이하의 We수에서는 분열하지 않거나 분열하더라도 액적이 고온벽면에 남아있게된다.

분열비산하는 액적들의 크기는 We수에 따라 크기에 차이를 보이기도 하지만 비교적 균일하다. 그러나 액적이 고온벽면위에서 퍼져나갈 때 증발비산하는 액적의 크기와 비교할 때 비교적 커다란 크기이다. 이는 벽면위에서 열전달에 의하여 발생하는 액적의 크기가 We수에 의하여 발

생하는 액적의 크기보다 더 미세하다는 것을 보여준다. Fig. 8에 액적의 분포도를 나타내었다.

벽면온도 250°C인 경우 물의 막비등 영역에 해당한다. 막비등영역에서는, 액막이 벽면과 접촉, 변형한 핵비등과 달리, 액적이 고온벽면에 충돌한 후 액막이 퍼지면서 증기층이 형성되고 고온벽면과 분리되는 듯한 형상을 보이고, We수에 따라 미세액적들로 분열하거나, 불규칙한 형태의 단일액적으로 Rebound하는것과 같은 현상을 관찰할 수 있다.

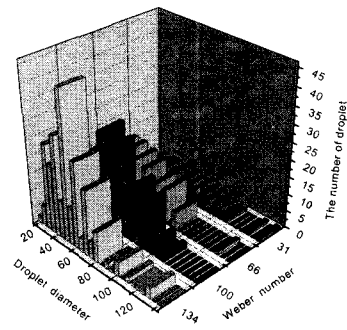
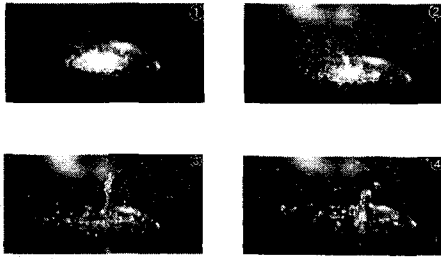
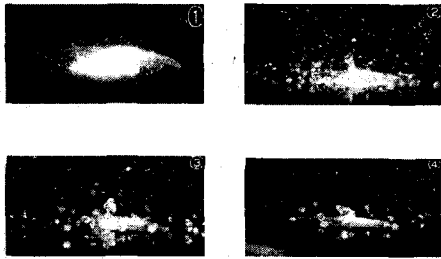


Fig. 8 Droplet diameter distribution at 250°C



(a) Weber number 65.49



(b) Weber number 66.74

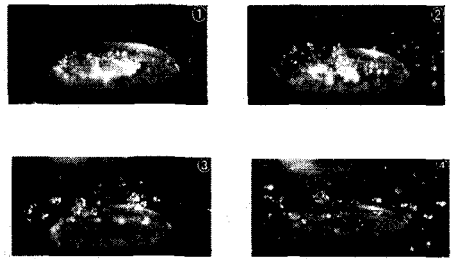
Fig. 9 Breakup with surface temperature 350°C

온도범위가 막비등에 해당하지만 초기에 액적이 고온벽면위에 퍼져나갈때 오히려 핵비등영역의 경우처럼 액적의 중심부가 부풀어 오르면서 작은 기포가 생성된다. 그러나 액막이 점점 더 퍼져나가면서 증기층이 발생하여 분열된 액적은 고온벽면위에서 비등하게 된다.

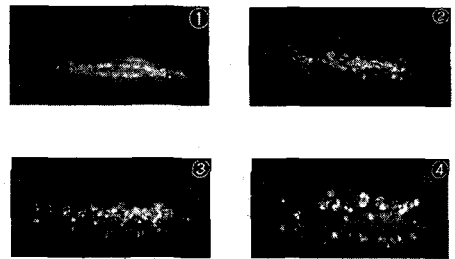
3.1.4 350°C에서의 분열거동

Fig. 9은 We수 65.49($d_i=2.5mm$)와 66.74($d_i=3.2mm$)에서의 분열거동을 나타내었다. 특이한 현상으로 액적의 중심부에서 액주형상이 관찰된다. 이는 We수 60부근에서만 관찰되는 현상으로, We수가 높아지게 되면 액주 형태의 액적이 미세분열하게 되고 We수가 작으면 분열하지 않고 불규칙한 형상의 액적이 고온벽면위에서 Rebound하다 서서히 증발하게 된다.

이와같이 We수 60부근에서만 관찰되는 것은, 액적이 고온벽면위에 퍼진후 관성력에 의하여 수축하게 되는데, 최대힘이 액막의 중심부에 집중되고, 액막과 고온벽면 사이에 증기층이 형성되어 액적들이 중심부에서 합체하여 Rebound유사의 거동을 하기 때문이다. We수 60이하에서는 운동에너지가 낮기 때문에 분열하지 못하고 액적 그 자체가 Rebound하지만, 높은 We수 영역에서는



(a) Weber number 132.67



(b) Weber number 134.82

Fig. 10 Breakup with surface temperature 450°C

액적들이 높은 운동에너지에 의하여 미세분열하기 때문에 이 영역에서만 관찰되는 것으로 사료된다.

3.1.5 450°C에서의 분열거동

Fig. 10는 We수 132.67($d_i=2.5mm$)와 134.82($d_i=3.2mm$)에서의 분열거동을 나타낸것이다.

이 경우에 분열거동은 앞서의 경우와 다른점은 발견되지 않는다. 다만 앞의 경우처럼 액막이 고온벽면위에서 퍼져나갈 때 핵비등과 유사한 현상이 명확하게 관찰되지 않고 분열된 액적이나, 분열되지 않은 액적들은 고온벽면과 접촉과 동시에 Rebound거동과 Splash거동을 보이며 비산하게 된다. 그 결과 충분한 열전달이 이루어지지 않아 분열된 액적들은 다른 온도 범위보다 크게 된다.

3.2 벽면온도와 We수에 따른 분열거동의 분류

고온벽면 충돌액적의 분열은 동력학적 효과와 열전달 효과가 서로 영향을 주는 복잡한 문제이다. 이에 분열의 형태를 명료하게 분류하기 위하여 다음과 같은 세가지 경우로 분류하였다.

- ① 미세분열 : 분열된 액적경이 그다지 차이가 없고 균일하게 분열
- ② 천이분열 : 분열하기는 하지만 액적경에 차이를 보이는 분열

③ 비분열 : 분열하지 않고 구형을 유지

본 실험의 조건에서는 분열은 We수 80을 경계로 미세분열영역과 천이분열영역으로 나누어진다. Fig. 11은 본실험의 경우를 정리한 것이다.

3.3 벽면온도에 따른 평균입경

We수와 벽면온도에 따른 SMD값을 실험을 통하여 측정하였다. 상온에서는 본 실험의 실험조건에서는 분열이 목격되지 않아 벽면온도 150℃, 250℃, 350℃ 및 450℃에서 SMD값을 조사하였다. 액적의 평균입경은 액침법을 사용하였고 도포액은 실리콘 오일을 사용하였다. Fig. 12은 We수와 벽면온도에 따른 SMD값을 보여준다. 최소 SMD는 약 52 μm이고 Fig. 12에 표시되어 있는 조건에서 측정되었다.

위와같은 결과는 고온의 벽면온도(450℃)에서는 확실한 막비등 현상으로 액적이 미처 미세분열하

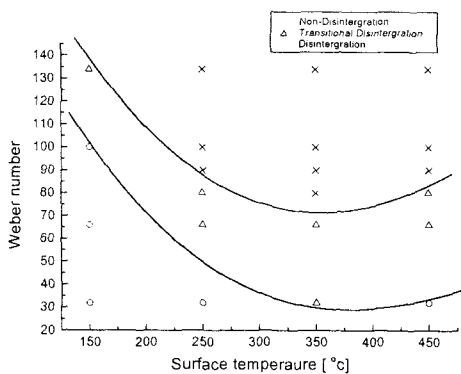


Fig. 11 Region of breakup pattern

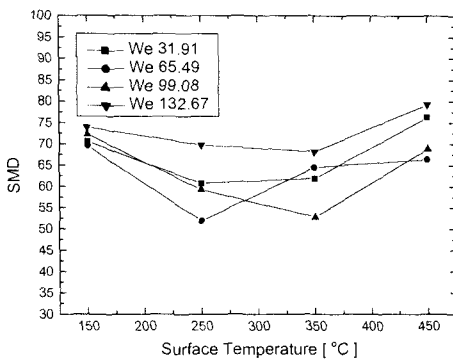


Fig. 12 Relation between SMD, weber number and surface temperature

기 전에 비등하여 비산하기 때문이고, We수가 높을수록 상대적으로 높은 운동에너지에 의하여, We수의 효과가 극대화되는 최대퍼짐직경의 원주 테두리에서 균일한 액적들이 발생하지만, 이는 열전달에 의하여 분열비산하는 액적들보다 크기가 크기때문이라고 사료되고 사진관찰을 통하여 확인할 수 있다. 측정된 액적중에서 최소 크기의 액적직경은 약 10 μm정도였고, 측정할 수 있는 단위는 5 μm이다.

4. 결론

본 연구에서는 고온 벽면과 충돌하는 단일 액적의 거동을 벽면온도와 We 수에 따라서 사진촬영을 통하여 가시화하고 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 충돌액적이 분열할 때 열역학적 영향은 낮은 We수(32,66)에서 강하게 나타나고, 높은 We수(100,132)의 영역에서는 관성력에 의한 효과가 크게 된다.

2) 벽면상의 액막이 분열할 때, 낮은 We수에서는 벽면온도가 250℃이하인 경우 액막이 완전히 퍼지기 전에 열전달이 이루어져 액적이 증발비산하고 액막이 최대 퍼짐직경에 도달하지만, 높은 We수의 경우는 온도와 상관없이 분열은 최대퍼짐직경의 원주 테두리에서 액막의 파 형상으로 발생한다.

3) 가장 양호한 SMD는 We수 65.49, 온도 250℃와 We수 99.08, 온도 350℃에서 발생한다. 이는 열역학적 영향과 We수에 의한 관성력이 영향이 균형을 이룬 결과라고 생각된다.

참고문헌

- (1) Naochika Tokuoka., G. Takeshi Sato., Takatsugu Shina., "The behavior of the water droplet impinging upon a hot surface" 第8回 液體の微粒化に關する 講演會 講演論文
- (2) Toshio Suzuki., Yasuo Suzuki., Naochika Tokuoka., G. Takeshi Sato., " The behavior of the droplet impinging upon a hot surface" 第10回 液體の微粒化に關する 講演會 講演論文

- (3) Kiichiro Takeuchi, Jiro Senda, Yoshiaki Sato.,
"Experimental studies on the breakup behavior
of a small droplet impinging upon a hot
surface" 第9回 液體の微粒化に 關する
講演會 講演論文
- (4) Kiichiro Takeuchi, Jiro Senda, Koji Yamada.,
Yoshiaki Sato., "Experimental studies on the
breakup behavior of a small droplet impinging
upon a hot surface" 第10回 液體の微粒化に
關する 講演會 講演論文
- (5) T, Jonas., A, Kubitzek., F, Obermeier.,
"Transient heat transfer and breakup mechanism
of drops impinging in heated walls"
Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics
and Thermodynamics 1997
- (6) Kazuo Araki., Akira Moriyama., "Heat transfer
from hot metal surface to a single water
droplet impinging on it" 第12回 液體の
微粒化に 關する 講演會 講演論文
- (7) P, Tartarini., G, Lorenzini., M, R, Rand., M, ϕ
Marzo., "Experimental and numerical study on
evaporative cooling of hot surfaces induced by
single water droplets"
Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics
and Thermodynamics 1997