

## 충돌수분류에 냉각되는 고온 강판의 열전달에 있어 노즐높이의 영향에 대한 연구

이필종<sup>†</sup> · 최해원\* · 이승홍\*\*  
(2002년 12월 23일 접수, 2003년 2월 13일 심사완료)

### The Effect of Nozzle Height on Heat Transfer of a Hot Steel Plate Cooled by an Impinging Water Jet

Pil-Jong Lee, Hae-Won Choi and Sung-Hong Lee

**Key Words:** Impinging Water Jet(충돌 수분류), Hot Steel Plate(고온 강판), Nozzle Height(노즐 높이), Jet Instability(제트 불안정성), Froude Number(프라우드수)

#### Abstract

The effect of nozzle height on heat transfer of a hot steel plate cooled by an impinging liquid jet is not well understood. Previous studies have been based on the dimensionless parameter  $z/d$ . To test the validity of this dimensionless parameter and to investigate gravitational effects on the jet, stagnation velocity of an impinging liquid jet were measured and the cooling experiments of a hot steel plate were conducted for  $z/d$  from 6.7 to 75, and an inverse heat conduction method is applied for the quantitative comparison. Also, the critical instability point of a liquid jet was examined over a range of flow rates.

The experimental velocity data for the liquid jet were well correlated with the dimensionless number  $1/Fr_z^2$  based on distance. It was thought that the  $z/d$  parameter was not valid for heat transfer to an impinging liquid jet under gravitational forces. In the cooling experiments, heat transfer was independent of  $z$  when  $1/Fr_z^2 < 0.187(z/d = 6.7)$ . However, it was found that the heat transfer quantity for  $1/Fr_z^2=0.523(z/d \approx 70)$  is larger 11% than that in the region for  $1/Fr_z^2=0.187$ . The discrepancy between these results and previous research is likely due to the instability of liquid jet.

#### 기호설명

$d$	: 노즐 직경 [mm]
$g$	: 중력 가속도 [ $m/sec^2$ ]
$x$	: 수분류 충돌점에서 반경방향 거리 [mm]
$z$	: 강판으로부터 노즐까지의 높이 [mm]
$U_{stag}$	: 수분류 평균 충돌 속도 [m/sec.]
$U_{jet}$	: 수분류 평균 분사 속도 [m/sec.]
$Re_d$	: Reynolds 수, $U_{jet}d/\nu$ [-]
$Nu_d$	: 국소 Nusselts 수, $q/\lambda(T_w - T_i)$ [-]
$We_d$	: Weber 수, $\rho d U_{jet}^2/\sigma$ [-]

$Fr_z$	: Froude 수, $U_{jet}/\sqrt{gz}$ [-]
$z/d$	: 기존 연구에서의 $z$ 무차원수 [-]
$1/Fr_z^2$	: 새로 제안한 $z$ 무차원수, $gz/U_{jet}^2$ [-]

#### 1. 서론

충돌 층류 수분류를 이용한 냉각은 비교적 단순한 장치에 의하여 높은 열전달 효과를 얻을 수 있다는 점에서 그 산업적 응용사례가 늘어나는 추세이다. 이러한 수분류에 의한 냉각은 높은 열전달 성능이 요구되는 고온 금속, 즉 철강 등의 냉각과 고성능 컴퓨터 시스템의 냉각, 연소 및 발전 설비의 국소 냉각 등에 응용되며 최근에는 이러한 열전달 특성에 관한 다양한 응용을 위한 연구가 활발하게 수행되고 있다.

<sup>†</sup> 책임저자, 포항산업과학연구원 열유체연구팀

E-mail : leepj@rist.re.kr

TEL : (054)279-6636, FAX : (054)279-6888

\* 미국 버클리대학 대학원 기계공학부

\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부

수분류 냉각에 대한 기존 연구들에서는 분류속도, 노즐형상 및 크기, 노즐과 열전달 대상물체 사이의 거리, 냉각매체의 온도 및 밀도, 표면장력 등의 물질 상수, 열전달 대상면의 표면상태 등 다양한 인자가 열전달에 미치는 영향을 고찰하여 왔다. 이러한 기존 연구들 중 냉각면으로부터 노즐까지의 높이에 따른 수분류의 유동특성 및 열전달에 관한 연구를 정리하여 보면 다음과 같다.

N.Hatta 등<sup>(1)</sup>은 노즐 직경이 약 10 mm인 역 U자형의 파이프 노즐을 이용하여 약 900 °C로 가열된 스테인레스 304 강관을 냉각하는 실험을 수행하였다. 노즐 높이(z)를 100 mm에서 500 mm, 유량을 1-7 liter/min.로 가변하였는데, 강관으로부터 노즐까지의 높이에 따른 냉각능력의 변화는 거의 무시할 수 있는 것으로 정리되었다. 반면, 오 승묵 등<sup>(2)</sup>은 N.Hatta 등<sup>(1)</sup>과 유사한 직경 10 mm의 역 U자형 파이프 노즐을 이용하여 노즐높이, z를 100, 300, 그리고 500 mm로, 유량은 1.14-2.27 liter/min.로 가변하면서 고온의 평판의 냉각을 실험을 수행하고 냉각속도를 비교하였다. 이들은 z가 300 mm일 때 최대의 냉각속도가 얻어진다고 보고하였다.

J.Stevens 등<sup>(3)</sup>은 Reynolds 수를 8500에서 47500로 가변하면서 2.1, 4.6, 그리고 9.3 mm 직경의 파이프 노즐들에 대해 노즐 출구에서 z/d = 6의 영역까지 충돌진 수분류의 표면 속도를 측정하였다. 이들은 z/d = 2 내지 3에서 U<sub>z</sub>/U<sub>jet</sub> = 0.9가 되며 곧 U<sub>z</sub>/U<sub>jet</sub> = 1의 완전 발달한 수분류가 형성된 후, z/d = 4 정도에서 수분류의 불안정성 (instability)이 진행된다고 보고하였다. 이들은 균일 열유속 조건에서 z/d를 최대 약 35까지 변경시켜 가면서 냉각실험을 수행하고 Nusselt 수를 구하였는데, z/d가 증가되면서 열전달이 미미하게 감소된다고 보고하였다.<sup>(4)</sup> 한편 저온의 비등이 수반되지 않는 영역에 대해, B.Elison 등<sup>(5)</sup>은 직경 0.32, 0.58 mm 파이프 노즐에서 Reynolds수를 920-5000로, z/d는 0 - 50로 가변하여 열전달 실험을 수행하였다. 이들의 결과에서 충돌점에서의 Nusselts수는 Reynolds수와 z/d 에 거의 무관하게 나타났다. 중력에 의해 수분류가 가속되는 효과에 관하여 Di Marco 등<sup>(6)</sup>은 실험을 통해 중력에 따른 열전달에 대하여 이론적 모델을 제시하였다. 이들은 충돌점의 Nusselts수 대신 Froessling 수, F<sub>d</sub> 를 도입하고 노즐과 평판의 거리를 Froude

수, Fr<sub>z</sub> 로 무차원화 하여 관계식을 다음과 같이 유도 하였다.

$$F_d = Nu_d / (Re_d^{0.5} \cdot Pr^{0.4}) \quad (1)$$

$$= a \cdot (1 + 2/Fr_z^2)^{0.375}$$

여기서 Fr<sub>z</sub> < 2 인 경우 a = 0.8로, Fr<sub>z</sub> ≥ 2 인 경우에는 F<sub>d</sub> = 1로 정리되었다.

이상의 기존 연구들을 보면 강관에서 노즐까지의 높이, z 에 따른 수분류의 열전달 특성이 일치되게 정리되어 있지 못하다. 따라서 본 연구에서는 먼저 기존 연구에서 고려되었던 무차원수 z/d 의 타당성을 검증하고 동시에 z 변화에 따른 열전달 실험을 하여 기존 연구결과들과의 비교함으로써 노즐과 평판의 거리에 따른 충돌 수분류의 열전달 특성을 규명하고자 한다.

## 2. 실험 및 해석

### 2.1 실험 방법

Fig. 1은 충돌압 및 열전달 실험장치의 개략도를 보여준다. 장치의 상세사항 및 열전달과 관련된 실험방법은 본 연구자의 기 연구문헌<sup>(7)</sup>과 같다. 열전달 실험에서 설정된 공기온도와 냉각수의 온도는 각 30 °C로 ±0.2 °C 오차범위 내에서 일정하게 유지되었다. 또한, 냉각실험 시작 직전의 공기방내 공기의 상대습도는 55-56 %로 유지되었다. 노즐 높이(z)는 0.04, 0.07, 0.16, 0.45 m로 설정하였다. 사용된 유량은 3 liter/min.(± 0.01 liter/min.)으로 프로우트식(float type) 유량계를 통해 계측되었다.

1. electric furnace
2. water reservoir
3. buoyant flow meter
4. air chamber
5. nozzle and water chamber
6. air line
7. test specimen
8. transport equipment
9. thermocouple
10. data acquisition system

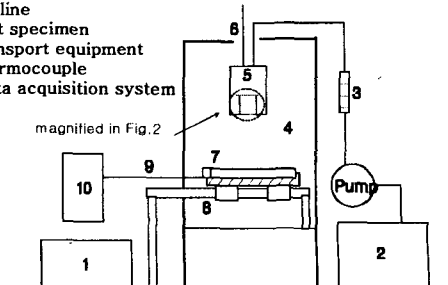


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

본 연구에서는 충돌압 및 열전달을 위하여 지름 6 mm의 sharp edged orifice 형태 노즐을 사용하였다. Fig. 2는 사용된 노즐의 기하학적 형상을 보여준다. 냉각수 챔버(water chamber) 내부에 위치한 철망을 이용하여 분사되는 냉각수가 평판에 층류(laminar flow)로 떨어질 수 있도록 하였다.

노즐 출구에서의 수분류 평균 속도( $U_{jet}$ )는 vena contracta 효과를 고려하여 계산하였다. 일반적인 sharp edged 노즐에서의 축소 계수(contraction coefficient)는 0.61이므로, 본 연구에서 설정한  $U_{jet}$ 는 2.89(m/sec.)이며 계산된 수분류 Reynolds수는 21,600 이다.

강판으로부터 노즐까지의 높이( $z$ ) 변화에 따른 충돌 수분류의 속도변화를 측정하기 위하여 액주계(water column)를 이용하여 충돌 압력을 측정하였다. 수분류와 충돌하는 아크릴 평판의 중심점에 0.6 mm의 구멍을 내고 1 m 높이의 액주계에 연결하여 충돌압, 즉 액주 높이( $h_w$ )를 측정하였다. 이 액주 높이에 따른 충돌속도는 다음의 식 (2)로 구할 수 있다.

$$U_{stag.} = \sqrt{2gh_w} \quad (2)$$

열전달 실험에 사용된 시편 두께는 10 mm이며 가로, 세로가 각 200 mm인 스테인레스 304 압연판을 사용하였다. 평판의 온도 측정을 위해 시편에서 냉각수 충돌면과 반대되는 면에서 충돌 직하면( $x/d=0$ ), 충돌점에서 반경반향으로 30 mm 떨어진 위치( $x/d=5$ ), 그리고 60 mm 떨어진 위치( $x/d=10$ )이 되는 3곳에 K형 열전대를 붙였다. 열전대는 스테인레스 304로 피복된 외경이 1.5 mm,

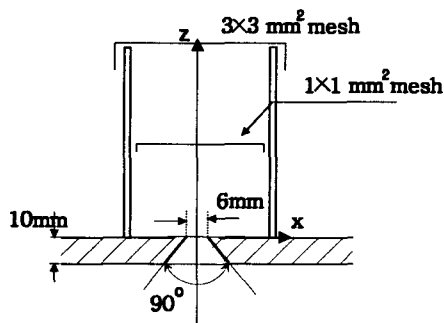


Fig. 2 Geometric shape of nozzle

내부 소선 직경이 0.076 mm 인 것을, 응답성을 향상시키기 위해, 피복을 약 5 mm정도 제거한 후 두 소선을 교차시켜 시편에 점(Spot) 용접하였다.

열전대를 붙이고 나서 냉각되는 시편 표면을 알코올로 깨끗이 닦은 후, 전기 가열로에 넣어 가열한다. 시편 온도가 940 °C에 도달된 후에 시편이 충분히 균열되면 시편을 꺼내고 공기방 외부에서 800 °C까지 자연 공냉시킨 후, 공기방 내부로 시편을 이송한다. 이 후 시편온도가 750 °C가 되는 순간 수분류를 강판에 분사한다.

본 연구에서는 기존 연구들에서  $z/d$  변화에 따른 진 열전달 실험결과와의 차이는 각각의 경우에 있어 수분류 연속성 또는 안정성(stability)의 다른 것에 기인한다고 가정하였다. 이의 검증을 위해  $z/d$  증가에 따른 수분류의 불안정성(instability)이 발달되는 상황을 관찰하였다. 실험은 열전달 실험에 사용된 sharp edged orifice 노즐을 통해 수분류를 분사하고 노즐면과 충돌 바닥면 사이의 거리를 2.5 m로 유지한 상태에서 수분류의 불안정성(instability)이 시작되는 지점을 살펴보았다. 측정에서는 650 W의 텅스텐 조명을 수분류에 비추어지는 상태에서 수분류의 떨림이 보이는 첫 번째 지점을 불안정성 개시점으로 판단하였고, 이후 사진 촬영을 통해 재확인하였다.

## 2.2 역열전도 해석

충돌 수분류 열전달에서 충돌면의 열전달 계수를 정량화하기 위하여 Trucomp사의 D.M.Trujillo에 의해 개발된 역열전도도 해석기법의 상용 패키지인 INTEMP<sup>(8)</sup>를 사용하였다. 본 연구의 해석에서 사용된 열물성 값은 Table.1과 같다.<sup>(9)</sup>

Table 1 Thermo-physical properties

T(K)	Cp(J/Kg °C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	K(W/mK)
293	543.7	8000	17.09
680	697.1	8000	26.90
878	748.5	8000	31.29
973	757.3	8000	33.01
1072	761.0	8000	34.01
1158	781.6	8000	35.91

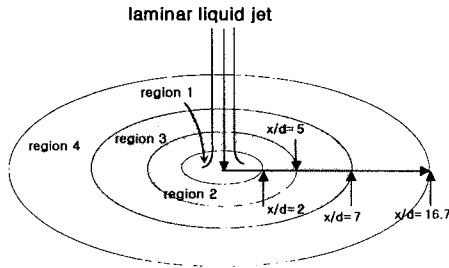


Fig. 3 Division of calculation regions for the unknown heat fluxes

계산영역은 충돌점인 중심면에 대해 온도의 대칭조건을 적용하였다. 충돌면을 제외한 나머지 면에서는 복사과 자연대류에 의한 열전달 효과가 있을 수 있으나 그 열전달량이 충돌면에서의 비등에 의한 열전달 효과에 비해 극히 작으므로 단열조건을 사용하였다.

한편 측정에 사용된 열전대 3 개로는 충돌면에서의 정확한 영역 열전달 특성을 구하기 어렵다고 보고 Fig. 3과 같이 강판상면을 4개의 영역으로 나누고, 이 중 영역 2에 대한 값은  $x/d=0$  과  $x/d=5$  위치에서 측정된 온도를 이용, 보간법으로 구하였다. 계산 결과로는 이들 각 영역에 대한 평균 열유속의 시간에 따른 변화가 얻어진다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 액주계에 의한 충돌속도 측정

노즐높이를 가변하면서 액주계(water column)를 이용하여 충돌 수분류의 충돌압력을 측정하였다. 측정된 액주 높이와 노즐 높이  $z$ 에 따른 충돌속도( $U_{stag}$ )의 측정값을 Fig. 4에 보여주고 있다. 노즐의 평균분사 속도  $U_{jet}$  를 구할 때에는 앞서 언급된 대로 vena contraction이 고려되었다.

수분류의 점성력 및 마찰력을 무시한 상태에서 초기속도  $U_{jet}$ 로 자유낙하한다고 가정하여 식 (3)으로 계산된 평균 충돌속도도 함께 표시하였다.

$$U_{stag} = \sqrt{U_{jet}^2 + 2gz} \quad (3)$$

계산 속도와 액주계로 측정되어 환산된 충돌 속도는 2.5 % 이내에서 잘 일치하는 것을 알 수 있

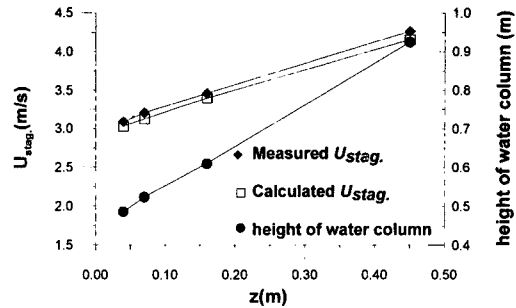


Fig. 4 Comparison of average impinging velocity  $U_{stag}$  between measured and calculated one

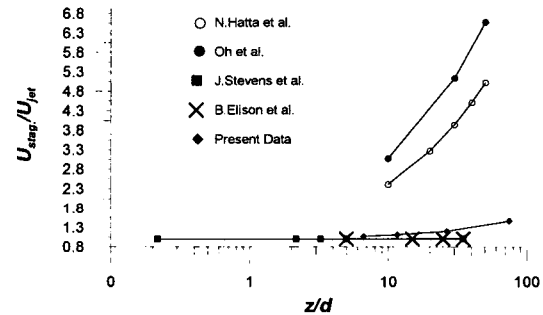


Fig. 5 Relation between  $U_{stag}/U_{jet}$  and  $z/d$

어, 본 연구와 같은 충돌수분류는 N.Hatta 등<sup>(1)</sup>이 이미 언급한 것처럼 자유 낙하한다는 가정이 타당하다.

본 연구에서 노즐 높이  $z$ 에 따라 측정된 충돌속도와 기존 연구들의 결과들에 대해  $z$ 에 대한 무차원수인  $z/d$ 와 중력에 의한 가속정도를 나타내는  $U_{stag}/U_{jet}$ 의 관계를 정리하여 보면 Fig. 5와 같다. 기존 연구의  $U_{stag}/U_{jet}$  도 앞의 식 (3)을 이용하여 정리되었다.

이를 보면 J.Stevens 등<sup>(3)</sup>과 B.Elison 등<sup>(5)</sup>의 경우에는 이미 이들이 언급하였듯이 중력에 의한 수분류 속도의 가속정도가 무시 가능한 반면, 나머지 경우에는  $z$ 에 따른 속도의 가속이 나타나고 있으나 그 경향이 일정하지 않고 상당히 분산되어 있는 것을 알 수 있다. 이는  $z/d$ 가 중력에 의한 수분류 가속 정도를 보여주기에는 부적합한 무차원수임을 보여주는 것이며 더불어  $z/d$ 에 따라 열전달의 영향을 살펴보는 것도 타당하지 않을 수 있음을 보여준다고 생각된다.

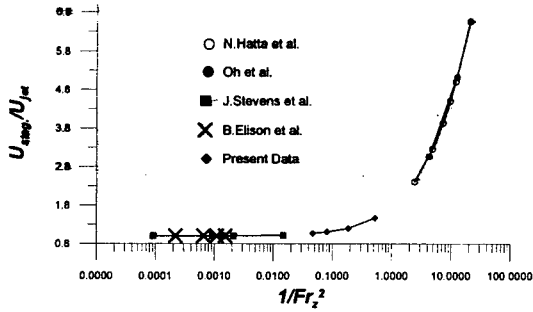


Fig. 6 Relation between  $U_{stag}/U_{jet}$  and  $1/Fr_z^2$

따라서 본 연구에서는 노즐높이  $z$ 를,  $z/d$  대신  $Fr_z$ 로 무차원화하여  $U_{stag}/U_{jet}$ 와의 관계를 다음과 같이 표현하였다. Fig. 6에 그 결과를 보여주고 있다.

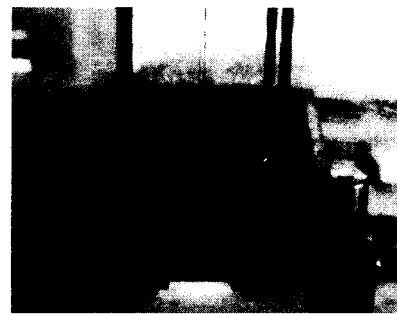
$$\frac{U_{stag}}{U_{jet}} = \sqrt{1 + \frac{2}{Fr_z^2}} \quad (4)$$

Fig. 6을 보면 식 (4)에서 예상할 수 있듯이  $U_{stag}/U_{jet}$ 의 결과들이 하나의 곡선으로 표현되고 있음을 알 수 있다. 여기서 J.Stevens 등<sup>(4)</sup>과 B.Elison 등<sup>(5)</sup>의 실험영역과 N.Hatta 등,<sup>(1)</sup> 오 승묵 등<sup>(2)</sup>의 그것이 완전히 다른 영역으로 구분된다. 전자의 실험 영역에서는  $O(Fr_z^2)$ 가 100이상, 즉  $O(1/Fr_z^2)$ 가 0.01 이하의 영역으로 중력에 의한 수분류 유동 특성이 나타나지 않는 반면, 후자의 경우에는  $O(1/Fr_z^2)$ 가 1 이상의 영역으로 중력의 영향이 수분류의 가속정도에 심각하게 영향을 미칠 수 있음을 보여주는 것으로 이들의 실험영역은 처음부터 달랐음을 알 수 있다. 그리고 본 연구의 실험영역은  $Fr_z^2$ 에 따라 곡선의 기울기가 급격하게 변하기 시작하는 부분으로 중력에 의한 속도의 가속영향이 나타나기 시작하는 천이영역에 해당된다는 것도 알게 되었다.

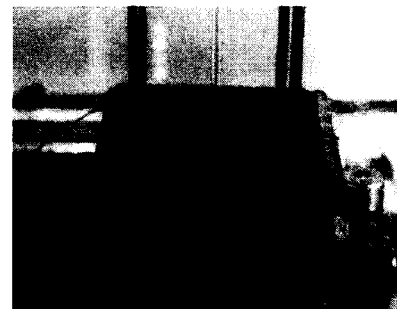
이상의 사실로부터 거리에 따라 중력에 의한 수분류 가속정도의 상관관계를 나타낼 때 무차원 수  $z/d$ 를 사용하는 것과 나아가  $z/d$ 로 무차원화하여 노즐 높이에 따른 열전달의 상관관계를 설명하는 것은 적절하지 못하며, 오히려 노즐 높이에 대해서는  $1/Fr_z^2$ 이 보다 적절한 무차원수인 것으로 판단된다. 본 연구에서 고려된 변수  $z$ 와 관련 무차원수를 정리하여 Table 2에 제시하였다.

Table 2 Experimental Conditions in this study

$z(m)$	$z/d$	$Fr_z$	$Fr_z^2$	$1/Fr_z^2$
0.04	6.7	4.628	21.42	0.047
0.07	11.7	3.498	12.24	0.082
0.16	26.7	2.315	5.36	0.186
0.45	75	1.378	1.9	0.52



(a) Immediately after cooling starts



(b) 5 seconds after cooling starts



(c) 10 seconds after cooling starts

Fig. 7 Photographs of successive cooling stages ( $1/Fr_z^2 = 0.186$ )

3.2 노즐 높이 변화에 따른 열전달 특성

노즐 높이 변화에 따른 열전달 특성을 파악하기 위하여 거리  $z$ , 즉  $1/Fr_z^2$ 에 따른 고온 평판의 냉각실험을 수행하였다.

Fig. 7은  $1/Fr_z^2 = 0.186$  인 조건에서 냉각이 진행되는 단계를 보여주고 있다. 냉각개시 직후(0초) 사진에서 보면 충돌점을 중심으로 증기막에 해당하는 큰 원형태의 영역이 순간적으로 생겨나지만, 이는 1초 이내에 사라지면서 단상 강제대류 영역(single phase forced convection area)이, 그 경계면에는 핵비등과 천이비등 영역이 생기게 된다. 또 이 그 부근에서부터 냉각수는 아주 작은 물방울로 쪼개지면서 사방으로 튀어나가는 것(sputtering)을 관찰할 수 있다. 시간이 경과되면 단상강제 대류영역이 점차로 확대되지만 확대의 정도가 둔화되며 튀어나가는 물방울의 크기가 점차로 커지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 노즐 높이 변화에 대해 시간에 따른 시편의 온도변화 결과를 보여주고 있다. 이를 보면, 수분류와 고온평판의 충돌점인  $x/d = 0$ 에서는  $1/Fr_z^2$ 에 무관하게 온도변화가 모두 일치하고 있다. 한편,  $x/d$ 가 증가한 영역에서는  $1/Fr_z^2 = 0.186$  까지 온도변화가 거의 일치하나 1로 근접하는  $1/Fr_z^2 = 0.52$  조건에서는 냉각이 빠르게 진행되고 있다. 이에 대해 Fig. 6과 연계하여 보면 수분류 속도가 가속화되는  $z$  영역에서 열전달이 증가된 것으로 이해된다. 그리고 온도가 측정된 위치가 충돌 반대면임을 고려하면, 실제 충돌면에서의 온도차이는 더 크게 나타났을 것으로 생각된다.

역열전도 계산은  $1/Fr_z^2 = 0.186$  이하의 조건에 대

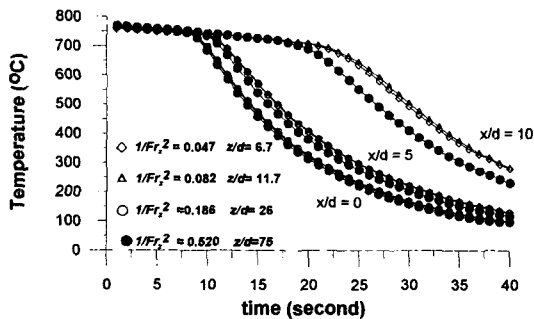


Fig. 8 Comparison of measured temperature history according to  $z$  variation

해서는 냉각시간에 따라 동일한 온도가 얻어진 것으로 보고,  $1/Fr_z^2 = 0.047$ 과  $1/Fr_z^2 = 0.52$ 의 두 조건에 대해서만 고려하여 계산하였다.

Fig. 9는 계산된 평판 내부 온도의 시간에 따른 변화를 보여준다. 수분류의 충돌 후 수냉영역이 발달함에 따라 수냉영역 발달방향에 대해 평판 내부의 온도 contour가 비스듬하게 형성되고 있으며 온도변화 곡선에서 알 수 있듯이  $1/Fr_z^2 = 0.047$ 인 경우에 비해  $1/Fr_z^2 = 0.52$ 인 경우에 평판 내부와 충돌면에서의 온도 강하가 더 빠르게 진행되고 있다.

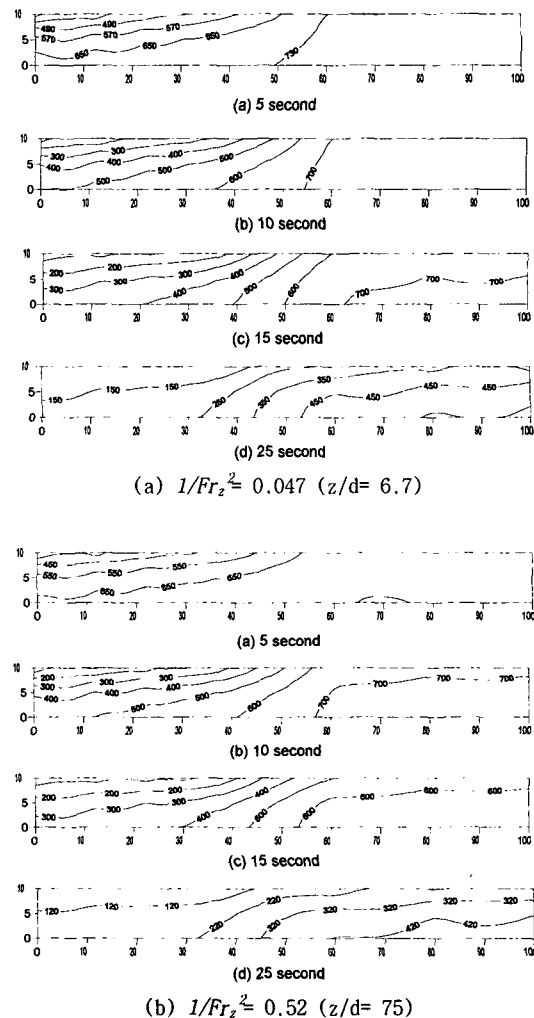


Fig. 9 Comparison of thermal field between  $1/Fr_z^2 = 0.047$  and  $0.52$  conditions

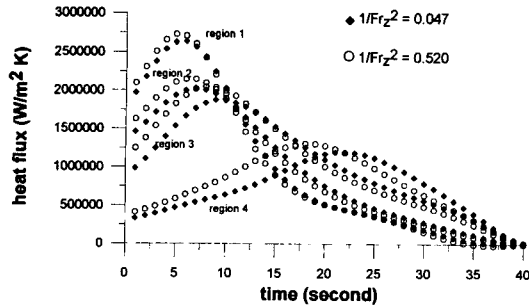


Fig. 10 Comparison of heat flux history between  $1/Fr_z^2 = 0.047$  and  $0.52$  conditions

Fig. 10에는 계산된 열유속의 시간에 따른 변화가 제시되어 있다. 수분류와의 충돌점인 영역1에서는 열유속의 차이가 거의 없으나,  $x/d$ 가 증가할수록 그 차이가 나타나고 있다. 이러한 차이는 수냉 영역의 진행이 이루어지는 냉각초기에 주로 발생하고 있고 열유속의 최대값을 통과한 이후에는 열유속의 차이가 상당히 작아지고 있음을 알 수 있다. 한편 단상 강제대류 영역의 진행이 냉각 후반부에 발생하는 Fig. 3의 영역4의 경우에는 냉각초기에 열유속의 차이가 작으나 일정시간이 지나 냉각이 진행되면서 차이가 증가한다. 이러한 계산 결과는  $1/Fr_z^2$ 에 따른 수분류의 충돌속도 차이에 의해 수냉 영역의 발달 정도가 다르며 이에 따라 열전달량의 차이가 발생 하였음을 암시한다고 생각된다.

두 실험조건에 따른 냉각 중 강판으로부터의 전달된 열량을 비교하기 위해  $1/Fr_z^2 = 0.047$ 의 조건에서 영역4의 열유속이 최대값이 되는 순간인 27초간 열전달량을 계산하였다. 냉각시간을 무한히 길게 설정하여 계산하면 열전달량의 차이가 감소하므로 각 경우에서 최대 열전달이 이루어지는 조건까지를 계산에 포함한 것이다. 이와 같이 설정된 냉각시간까지 계산된 전달 열량은 두 실험조건에서 약 11%의 차이가 발생하고 있다. 본 실험결과를 Di Marco 등<sup>(6)</sup>의 이론적 모델 결과와 비교해 보면,  $Fr_z$ 가 2이상(즉  $1/Fr_z^2$ 가 0.25 이하)에서는  $Nu$ 수의 변화가  $Fr_z$ 수에 무관하다는 결과와 잘 일치한다고 생각된다. 본 실험에서 유사한 범위에서 수행된 냉각 중 온도이력이 거의 일치하기 때문이다. 또한  $Fr_z$ 가 2미만인 경우인 본 연구의  $1/Fr_z^2 = 0.52$ 인 경우에 대해 Di Marco 등<sup>(6)</sup>에 의해 제시된 관계식을 이용하여 보면 본

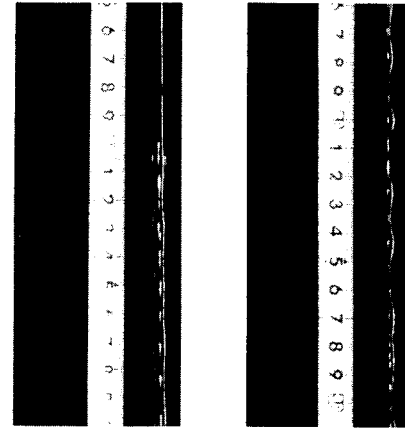


Fig. 11 Subsequent development of instability of jet ( $We_d = 131.7$ , instability starting at 0.6m)

연구에서처럼 냉각이 증대되는 것으로 얻어지지만, 증대되는 정도는  $Nu$ 수에 있어 약 4.8%로 적은 편이다.  $Nu$ 수에 면적과 시간을 곱하면 냉각 중 전달된 열량이 얻어지므로 4.8 %의 열전달량 차이를 보여주는 것이다. 본 연구와 Di Marco 등<sup>(6)</sup>에 의해 고려된 열전달 영역(비등의 유무)이 서로 다른 것을 감안할 때, 본 연구에서 11%의 열전달량 차이는 타당한 결과로 판단된다.

### 3.3 수분류 불안전성(instability) 관찰

실험 및 계산을 통해 구하여진 본 연구의 결과는 N.Hatta 등<sup>(1)</sup>과 오 승묵 등<sup>(2)</sup>에 의해 얻어진 냉각 실험결과에서 노즐 높이에 따른 결과와 다르게 얻어지고 있다. N.Hatta 등<sup>(1)</sup>의 온도 측정 결과인 100, 500 mm에서의 냉각 이력(history)곡선을 재해석해 보면 오히려 높이가 낮은 100 mm에서 더 빠르게 고온 평판이 냉각되고 있는 것으로 판단된다.

이와 같이  $1/Fr_z^2$ 가 1과 유사하거나 큰 영역에서  $Fr_z^2$ 의 변화에 따른 수분류 열전달의 변화 관계가 불분명한 원인에 대해, 본 연구에서는 수분류 유동 발달에서 발생하는 유동 불안정성과 이에 따른 열전달 정도의 변화에서 기인하였을 가능성을 고찰하여 보았다. 일반적으로 고온 강판의 원형 층류 충돌 수분류 냉각에서 불안정에 의한 유동 교란(disturbance)의 발생은 열전달을 저해시킨다고 알려져 있는데,<sup>(10)</sup>  $z$ 의 증가에 따라

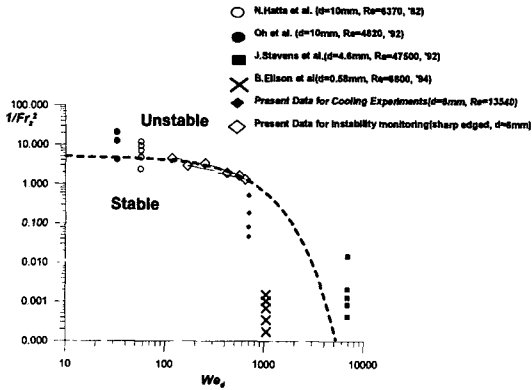


Fig. 12 Instability starting point in a liquid jet

나타나는 중력의 영향에 의한 수분류의 가속으로 인하여 불안정성이 발달할 수 있기 때문이다. 그 확인을 위해 본 연구에서 사용된 노즐에 대해 유량을 가변하면서 수분류 불안정성 시작위치를 측정하는 실험을 실시하였다. Fig. 11은 그 예를 나타낸 것이다. 분류의 불안정성 시작 위치와 유량과의 관계를 수분류  $We_d$  수와  $1/Fr_z^2$  수의 관계로 정리하여 다음 식(5)를 얻었다.

$$1/Fr_z^2 = \exp(-0.002055 \cdot We_d) \cdot 5.09886 \quad (5)$$

위의 불안정성 시작위치에 대한 관찰 결과와 함께 앞서 본 연구에서의 열전달 실험에 사용된 조건, 그리고 기존 연구들의 실험조건들에 대해서도  $We_d$  수와  $1/Fr_z^2$  수로 무차원화하여 Fig. 12에 그 결과를 제시하였다.

본 연구에서 열전달 실험에 사용된 모든 조건들은 수분류가 Stable한 영역에 있었음을 알 수 있다. 그리고 그에 따라  $1/Fr_z^2$ 가 0.52로 최대인 조건에서 전달 열량이 가장 크게 나타났다.

반면 위의 식 (5)를 이용하면 N.Hatta 등<sup>(1)</sup>과 오승묵 등<sup>(2)</sup>의 연구에도 적용할 수 있다고 가정하면  $z = 500$  mm 실험 조건 경우인  $We_d = 56.96, 32.61$ 에 대해 계산된 수분류 불안정 시작위치,  $1/Fr_z^2$ 는 각각 4.54, 4.77로 얻어진다. 하지만 실제 이들의 실험조건  $z$ 의  $1/Fr_z^2$ 는 12.04, 21.07 이므로 이들의 실험에서  $z = 500$  mm경우에서 원형 수분류의 불안정성이 존재하였을 것으로 추정된다. 이에 따라 최대 높이에서 열전달이 저하가 예상될 수 있어 노즐 높이에 따른 영향이 없다든지, 아니면 최대 높이가 아닌 중간에서 냉각효과가

최대가 되는 결과들이 얻어진 것으로 생각된다.

식 (5)가 J.Stevens 등<sup>(4)</sup>과 B.Elison 등<sup>(5)</sup>의 실험에도 적용될 수 있다고 보면 J.Stevens 등<sup>(4)</sup>의 실험은 그들이 언급한 것처럼 모든 조건이 수분류가 unstable한 조건이 되고 B.Elison 등<sup>(5)</sup>은 모든 조건이 수분류가 stable한 조건에서만 실험된 것으로 추정된다. 그런데 이들의 실험은 앞서 본 연구결과를 바탕으로  $1/Fr_z^2$ 이 0.186 이하인 조건에서 열전달의 차이가 거의 없다고 하였는데, 이들의 모든 실험이 그러한 조건(실제로는  $1/Fr_z^2$ 이 약 0.01이하)에 있으며 이들의 실험결과에서 노즐과 평판의 거리에 따른 충돌점  $Nu$ 수의 변화가 없었게 나타났다.

이상의 결과로 볼 때, 충류 수분류가 유지되며 노즐과 평판의 거리가 증가하는 경우, 일정  $1/Fr_z^2$  (약 0.186)이하에서는 열전달의 차이가 거의 없으나, 일정  $1/Fr_z^2$  이상에서는  $1/Fr_z^2$ 가 증가함에 따라 열전달의 향상이 급격하게 이루어지는 것 같다는 결론에 도달하게 되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 강판으로부터 노즐까지의 높이 변화에 따른 수분류의 충돌 속도변화와 고온 평판에 대한 열전달 특성을 살펴보고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 중력에 의한 수분류의 가속과 이에 따른 열전달의 영향을 나타내기 위해서는  $1/Fr_z^2$ 를 거리에 대한 무차원수로 사용하는 것이 타당하다.

(2)  $1/Fr_z^2$ 이 0.18 이하의 영역에서는 열전달의 차이가 무시 가능하다.  $1/Fr_z^2$ 이 0.186과 0.52인 두 조건을 비교하면 노즐 높이가 높은 조건인  $1/Fr_z^2$ 가 0.52인 조건에서 전달 열량이 약 11%정도 크게 얻어진다.

(3)  $O(1/Fr_z^2)$ 가 1 이상인 영역에서 행하여진 기존 연구 결과들에 있어서의 차이는 수분류의 불안정성에서 기인한 것으로 판단된다. 노즐 높이가 높더라도 수분류가 안정(stable)할 수 있다면 전달 열량은 증대될 수 있다.

#### 후 기



본 연구는 POSCO(주)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Hatta, N., Kokado, J., Hanasaki, K., Takuda, H. and Nakazawa, M., 1982, "Effect of Water Flow Rate on Cooling Capacity of Laminar Flow on Hot Steel Plate," *Iron and Steel Japan*, No. 8, pp. 80~87.
- (2) Oh., S. M. and Lee, S. J., 1992, "Cooling Characteristics of a Hot Steel Plate by a Circular Impinging Liquid Jet," *Journal of KSME*, 1992, Vol. 16, No. 6, pp. 1150~1155.
- (3) Stevens, J. and Webb, B. W., 1992, "Measurements of the Free Surface Flow Structure Under an Impinging, Free Liquid Jet," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 79~84.
- (4) Stevens, J. and Webb, B. W., 1991, "Local Heat Transfer Coefficients Under an Axisymmetric, Single Phase Liquid Jet," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 71~78.
- (5) Elison, B. and Webb, B. W., 1994, "Local Heat Transfer to Impinging Liquid Jets in the Initially Laminar, Transitional and Turbulent Regimes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, pp. 1207~1216
- (6) Di Marco, P., Grassi, W., and Magrini, A., 1994, "Unsubmerged Jet Impingement Heat Transfer at Low Liquid Speed," *Proc. Int. Heat Transfer Conf., 10th*, Vol. 3, pp. 59~64, Hemisphere, NewYork.
- (7) Lee, P. J., Choi, H. W., Lee, S. H. 2000, "The Effect of Ambient Air Condition on a Hot Steel Plate Cooled by Impinging Water Jet," *Journal of KSME*, Vol. 24, No. 1, pp. 29~38.
- (8) Trujillo, D. M., 1994, INTEMP user's manual, TRUCOMP CO., CA.
- (9) Kim, S. J., 1990, "Characteristics of Thermo-physical Properties of Various Kinds of Steels at Elevated Temperatures," Research Institute of Industrial Science and Technology, pp. 78.
- (10) Auman, P. M., Griffiths, D. K. and Hill, D. R., 1967, "Hot Strip Mill Runout Table Temperature Control," *Iron and Steel Engineer*, September, pp. 174~179.