

고온 실린더의 미스트 냉각

이수관* · 박지만** · 이필종*** · 김무환†
 (2001년 6월 28일 접수, 2001년 1월 2일 심사완료)

Mist Cooling of High-Temperature Cylinder Surface

Sookwan Lee, Jeeman Park, Piljong Lee, and Moohwan Kim

Key Words : High-temperature Cylinder(고온실린더), Mist Cooling(미스트 냉각), Surface Wetting Phenomena(표면 적심현상), Film Boiling(막 비등), Liquid Film Evaporation(액막증발 Critical Mass Flow Rate Ratio(임계질량유속비))

Abstract

Heat treatment such as quenching of a high-temperature cylinder is being used on steel to produce high strength levels. Especially, the mist cooling with the high and uniform surface heat flux rate is expected to contribute for better products. The experimental mist cooling curve is produced for better understanding, and two distinct heat transfer regions are recognized from the cooling curve produced. It is shown that the liquid film evaporation dominated region follows the film boiling-dominated region as decreasing the temperature of test cylinder by mist flow. Based on the intuitive view from some previous investigations, a simplified model with some assumptions is introduced to explain the mist cooling curve, and it is shown that the estimation agrees well with our experimental data. In the meanwhile, it is known that the wetting temperature, at which surface heat flux rate is a maximum, increases with mass flow rate ratio of water to air ($\chi < 10$). However, based on our experimental data, it is explained that there exists a critical mass flow rate ratio, at which the wetting temperature is maximum, in the range of $3 < \chi < 130$. Also, it is described that despite of the same value of χ , the wetting temperature may increase with mist velocity.

기호설명

A	: 면적	[m ²]
c	: 비열	[J/kgK]
D	: 실린더의 직경, 2r _o	[mm]
h	: 열전달계수	[W/m ² K]
h _{fg}	: 잠열	[J/kg]
H	: 시편과 노즐 사이의 수직거리	[mm]
k	: 열전도도	[W/mK]
L	: 시편의 길이	[mm]
\dot{m}	: 질량유량	[kg/s]

\dot{m}_{proj}	: 실린더의 투사영역(=D×L)을 지나는 질량유량	[kg/s]
P	: 압력	[bar]
q"	: 열유속	[W/m ²]
r	: 반경방향의 위치	[mm]
r _o	: 실린더의 반경	[mm]
SMD	: Sauter Mean Diameter	[μm]
t	: 시간	[s]
T	: 온도	[K, °C]
T _f	: 막온도, (T _s + T _∞)/2	[K, °C]
T _i	: 초기온도	[K, °C]
T _{wet}	: 적심온도, Leidenfrost 온도	[K, °C]
ΔT	: 과열도, T - T _{sat}	[K, °C]
U	: 속도	[m/s]
V	: 부피	[m ³]
z	: 축방향 위치	[mm]
Bi	: 비오(Biot)수, hr _o /k _s	
Fo	: 푸리에(Fourier)수, αt/r _o ²	

* 포항공과대학교 대학원 환경공학부

** 웅진코웨이 주식회사

*** 포항산업과학연구원 설비자동화센터

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : mhkim@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2165 FAX : (054)279-3199

- Nu_D : 누셀트(Nusselt)수, hD/k
- Pr : 프란틀(Prandtl)수, $c\mu/k$
- r^* : 무차원 반경거리, r/r_o
- Re_D : 레이놀즈(Reynolds)수, $\rho D U/\mu$

- α : 열확산계수, [m²/s]
- χ : 질량유량비, \dot{m}_w/\dot{m}_a
- δ : 경계층 두께 [m]
- ε : 방사율
- μ : 점도 [N·s/m²]
- θ : 무차원 온도, $(T-T_\infty)/(T_i-T_\infty)$
- ρ : 밀도 [kg/m³]
- σ : 슈테판-볼츠만 상수 [W/m²·K⁴]

하첨자

- 0 : 실린더의 중심($r=0$)
- a : 공기
- d : 미스트 입자
- g : 수증기
- s : 실린더의 표면($r=r_o$), 실린더
- w : 물
- ∞ : 주위 유체

1. 서론

미스트 냉각(Mist Cooling)은 분산유동(Dispersed Flow) 열전달의 일종으로, 분사된 분무 액적들이 뜨거운 표면에 부딪쳐서 발생한다. 이러한 미스트 냉각의 열전달 특성은 비등 곡선(Boiling Curve)과 유사하다고 알려져 있지만, 미스트 냉각은 표면에 부딪치는 액적의 거동과 공기유량 등에 의해서 영향을 받기 때문에, 비등 열전달보다 훨씬 더 복잡하다.⁽¹⁾

분무 액적에 의한 냉각에서 ‘스프레이 냉각(Spray Cooling)’과 ‘미스트 냉각’이라는 용어를 구분없이 사용하기도 한다. 그러나 분무방식에 따라 크게 스프레이 냉각과 미스트 냉각으로 분류할 수 있는데, 스프레이 냉각에서는 압축된 물이 노즐에서 수압에 의해 분무되고, 미스트 냉각에서는 액적을 분무시키는 데 있어 압축공기를 사용한다.⁽²⁾ 따라서 미스트 냉각에서는 압축공기의 분무효과 때문에, 생성된 액적의 크기가 상대적으로 작고 공기 유동에 의한 영향이 더 중요해진다.

실제로 스프레이 냉각은 상대적으로 높은 냉각 성능을 얻는 데 주로 사용되는 반면에, 미스트 냉각은 유동 내 액체의 양을 조절하여 균일하고 적절한 냉각을 하는 데 사용된다.⁽²⁾ 미스트 냉각의 이러한 특성 때문에 다양한 산업공정에서 널리 사

용되고 있다. 특히 재료적 특성과 열전달 특성을 모두 만족시켜야 하는 제강공정에서 사용될 수 있는데, 강철의 열처리, 특히 연속적인 주소 및 단조 공정에서 냉각속도가 빠르고 조절이 불가능한 담금질을 대신할 수 있다.⁽³⁾ 또한 고전력의 마이크로 전자칩이나 장비에 대한 냉각에도 미스트 냉각이 사용될 수 있다.^(4,5)

미스트 냉각은 시간에 대한 온도변화의 유무에 따라, 표면을 저온(100℃ 이하)의 온도로 유지시키는 정상상태의 열전달과 표면을 고온(100℃ 이상)에서 냉각시키는 비정상상태의 열전달로 구분할 수 있다.^(2,6) 따라서 전자는 대개 균일 열유속의 열을 방출하는 전자칩의 냉각과 관련된 연구에 해당되며, 후자는 제철공정에서의 급냉각과 관련된 연구에 해당된다.

지금까지 스프레이 냉각에 대한 연구는 많이 있었지만,⁽²⁾ 미스트 냉각에 대한 연구는 훨씬 적었고 실린더가 아닌 수직 평판이나 상향 수평 평판(혹은 원판)에 대한 것들이 대부분이었다. 실제로 미스트 냉각의 특성은 냉각표면의 형상, 미스트 유동의 방향, 그리고 중력방향에 대한 냉각표면의 방향에 따라 달라진다.⁽⁷⁾

Lee 등⁽⁵⁾은 균일 열유속이 공급되는 수직벽에 대해 표면 위에 만들어진 50~100 μm의 매우 얇은 (ultra thin) 액막이 증발할 때 매우 효과적인 냉각이 가능함을 보고하였다. Graham 과 Ramadhyani⁽⁴⁾도 물과 메탄올로 각각 만든 미스트 유동을 상향 수평 평판에 분사하여 열전달과 액막의 두께가 서로 중요한 관련이 있음을 확인하였다. Ohkubo 와 Nishio⁽⁸⁾는 상향 원형 평판의 미스트 냉각시 발생하는 표면 거칠기의 변화가 열전달 특성에는 크게 영향을 주지 않지만 냉각속도를 안정화 시키는 데 효과적임을 보였다.

최근 들어 미스트 냉각에 대한 인식이 확대되어, 제철산업의 제강공정과 선재 냉각공정에서 미스트 냉각을 적용하고 있다. 특히 선재 냉각공정의 경우 선재의 기본적인 형상이 실린더이기 때문에, 고온 실린더의 미스트 냉각에 대한 연구가 필요하게 되었다. 이에 따라 최근에 Buckingham 과 Haji-Sheikh⁽³⁾은 미스트 냉각에서 공기에 대한 물의 질량유량비($\chi < 10$)를 조절하면서, 1000℃까지 가열시킨 고온 실린더의 냉각실험을 실시하였다. 그리고 Monte Carlo 모사를 이용한 역열전도기법(Inverse Thermal Conduction Technique)을 사용하여 실린더의 표면온도를 계산하고, 표면적심온도보다 높은 온도에서 발생하는 열전달 영역을 복사 지배영역(radiation-dominated region)과 대류 지배영역(convection-dominated region)이라는 2 가지 영역으

로 구분하여 해석하고자 했다.

그러나 지금까지 보고된 고온 실린더의 냉각에 대한 연구들은 대부분 각 열전달 영역에서의 정성적인 해석을 하거나 실험식을 제시했을 뿐, 각 냉각과정에서의 열전달기구를 고려한 냉각곡선의 정량적인 해석을 하지 않았다. 본 연구에서는 고온(800°C 이하) 실린더의 미스트 냉각실험을 통해 질량유량비(χ)에 따른 냉각특성의 영향을 연구하고 임계질량유량비의 존재를 확인하였다. 그리고 측정된 냉각곡선으로부터 열전달 영역을 구분하고, 단순 계산을 통해 열전달기구를 정량적으로 해석하였다.

2. 이론

2.1 분산 유동에 의한 실린더 주변의 열전달

분산 유동에 의한 실린더의 냉각은 공기와 수증기로 구성된 혼합기체의 유동에 의한 강제 대류 열전달, 미스트 입자의 증발에 의한 열전달, 그리고 고온의 실린더에서 방출되는 복사열전달로 설명된다.

단상 유동에 의한 실린더 주변의 강제대류 열전달에서, 대류 열전달계수는 실린더의 정체점(Stagnation Point)으로부터 원주를 따라 변한다고 알려져 있다. 그리고 Re_D 값이 증가함에 따라 실린더 전면부와 후면부에서 대류 열전달계수의 차이는 더욱 증가한다.⁽⁹⁾ 그리고 Buckingham 과 Haji-Sheikh⁽³⁾는 공기와 수증기의 혼합기체에 의한 강제대류 열전달을 계산하기 위해, 실린더의 단상유동 열전달과 관련된 기존의 실험식을 사용하여 실험결과와 잘 일치함을 보였다.

미스트 입자의 증발은 식 (1)과 같이 복사열전달과 대류열전달에 의해서 좌우된다고 볼 수 있다.⁽³⁾ 즉 실린더 표면의 온도와 미스트 입자의 특성에 따라 미스트 입자가 열경계영역을 거치면서 증발되는 정도가 달라질 수 있다.

$$\rho_w h_{fg} \frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi r_o^3 \right) \cong A_s (q_{rad}^n + q_{conv}^n) \quad (1)$$

따라서 어떤 경우에는 미스트 입자가 모두 증발하지 못하고 고온의 표면까지 도달하여 직접적인 증발에 의해 표면을 냉각시키는 냉각과정을 보일 수도 있다.

고온 실린더의 복사열전달에서는, 실린더를 둘러싸는 물질의 방사율(ϵ)이 1 과 거의 같다면 식 (2)와 같이 간단한 근사식을 사용할 수 있다.⁽⁹⁾

$$q_{rad}^n = \epsilon_s \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2)$$

2.2 냉각곡선의 특성

고온의 물체를 미스트 냉각시키면, 고온의 초기 온도와 미스트 유동의 특성에 따라 몇 가지 냉각과정을 거치면서 냉각된다. Fig. 1 은 고온 실린더의 미스트 냉각시 측정되는 일반적인 냉각곡선을 보여준다.⁽³⁾ 곡선이 갖는 기울기의 변화로부터 열전달 기구가 각기 다른 3 개의 냉각과정(I, II, III)이 존재함을 유추할 수 있다. 그리고 냉각곡선을 비등곡선과 비교할 때, 냉각과정 I 과 II 는 막비등(Film Boiling) 영역에 해당되고 냉각과정 III 은 천이비등(Transition Boiling)과 핵비등(Nucleate Boiling) 영역에 해당된다.⁽¹⁰⁾

냉각과정 I 은 Buckingham 과 Haji-Sheikh⁽³⁾에 의해 복사 지배영역으로 구분되었다. 그들은 이 냉각과정에서는 표면온도가 충분히 높아서 복사열전달이 강하기 때문에 Fig. 2(a)와 같이 미스트 입자가 열경계층(δ_T)에 진입하기 전에 복사열전달에 의해 증발된다고 가정하고, 공기와 수증기의 혼합물에 의한 단상유동 열전달과 복사열전달을 고려하였다. 이러한 가정에 의한 Nu 의 계산결과는 실험결과와 잘 일치하였다.

Buckingham 과 Haji-Sheikh⁽³⁾은 냉각과정 II 를 강제대류에 의한 열전달로 보고 대류 지배영역으로 구분하였다. 그리고 복사열전달이 비교적 작아서 Fig. 2(b)와 같이 미스트 입자가 열경계층(δ_T)에 진입한 후에 대류열전달에 의해 증발된다고 가정하고 계산하였다. 그러나 공기와 수증기로 구성된 혼합기체에 의한 강제대류 열전달만으로는 측정된 냉각속도를 설명할 수 없음을 확인하였다. 실제로 냉각과정 II 는 막비등 영역에 해당되고, C 영역의 두께(δ_c)가 냉각과정 I 에 비해 훨씬 얇아서 증기막(vapor film)이 형성된다고 가정한다면, 막비등열전달을 추가하여 냉각과정 II 를 설명할 수 있다.

냉각과정 III 에서는 실린더 표면의 온도가 비교적 낮기 때문에, Fig. 2(c)와 같이 미스트 입자들이

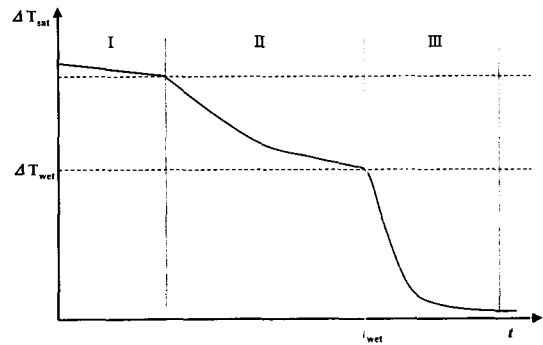


Fig. 1 Typical mist cooling curve

거의 증발하지 않고 실린더 표면과 충돌하게 된다. 따라서 냉각과정Ⅲ은 표면적심현상(surface wetting phenomena)이 발생하고 난 후에 진행되는 과정으로, 일반적으로 실린더의 표면온도가 Leidenfrost 온도보다 낮은 경우에 진행된다고 알려져 있다. Buckingham 과 Haji-Sheikh⁽³⁾는 이 냉각과정에서 얇은 액막(liquid film)의 증발에 의한 열전달 가능성을 제시했을 뿐, 정량적인 해석을 하지 않았다.

본 연구에서 측정된 냉각곡선을 Fig. 1 과 비교해보면, 측정된 냉각곡선이 냉각과정Ⅱ와 Ⅲ에 해당됨을 알 수 있다.

2.3 열전달 기구

앞서 언급하였듯이, 각 냉각과정에 대한 열전달 기구는 기존의 연구⁽³⁾로부터 Fig. 2 와 같이 이해할 수 있다.

본 연구에서 사용한 실린더는 $L/r_0 \gg 10$ 이므로 무한 실린더(Infinite Cylinder)로 가정할 수 있다. 따라서 실린더 내의 열전도에 의한 열전달은 반경 방향만 있다고 가정한다.⁽⁹⁾

냉각과정Ⅱ는 비등곡선에서 막비등에 해당되고 미스트 입자가 경계층 내에서 증발한다고 가정하기 때문에, 식 (3)과 같이 복사열전달과 공기와 수 증기로 구성된 혼합물에 의한 강제대류열전달, 그리고 막비등에 의한 열전달을 추가하여 쓸 수 있다.

$$q''_{II} = q''_{rad} + q''_{conv} + q''_{film} \quad (3)$$

$$q''_{conv} = h_{conv}(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

$$q''_{film} = h_{film}(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

따라서 전체 열전달계수는 식 (6)과 같이 쓸 수 있고, 각각의 열전달계수는 식 (7)~(10)을 사용하여 계산할 수 있다.

$$h_{II} = h_{conv} + ah_{rad} + h_{film} \quad (6)$$

식 (6)에서 a 는 고온 실린더의 막비등에 대한 기존의 실험에서 복사열전달을 고려하기 위해 사용된 상수로서 3/4 을 사용한다.⁽¹¹⁾

$$h_{rad} = \frac{q''_{rad}}{(T_s - T_\infty)} = \frac{\varepsilon_s \sigma (T_s^4 - T_\infty^4)}{(T_s - T_\infty)} \quad (7)$$

$$h_{conv} = \frac{k}{D} \overline{Nu}_D \quad (8)$$

$$\overline{Nu}_D = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282,000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (9)$$

$$h_{film} = 0.62 \left[\frac{\rho_g (\rho_w - \rho_g) g h_{fg} k_g^3}{\mu_g \Delta T_s D} \right]^{1/4} \quad (10)$$

식 (9)는 단상유동에 의한 실린더의 열전달과 관련된 식으로 $Re_D Pr > 0.2$ 인 조건에서 사용할 수 있다.⁽⁹⁾ 본 연구에서는 공기와 수증기로 구성된 혼합물에 대한 물성을 계산하고,⁽¹²⁾ 식 (9)에 대입하여 대류열전달계수를 구하였다. 그리고 식 (10)은 고온 실린더의 막비등 열전달에서 사용하는 실험

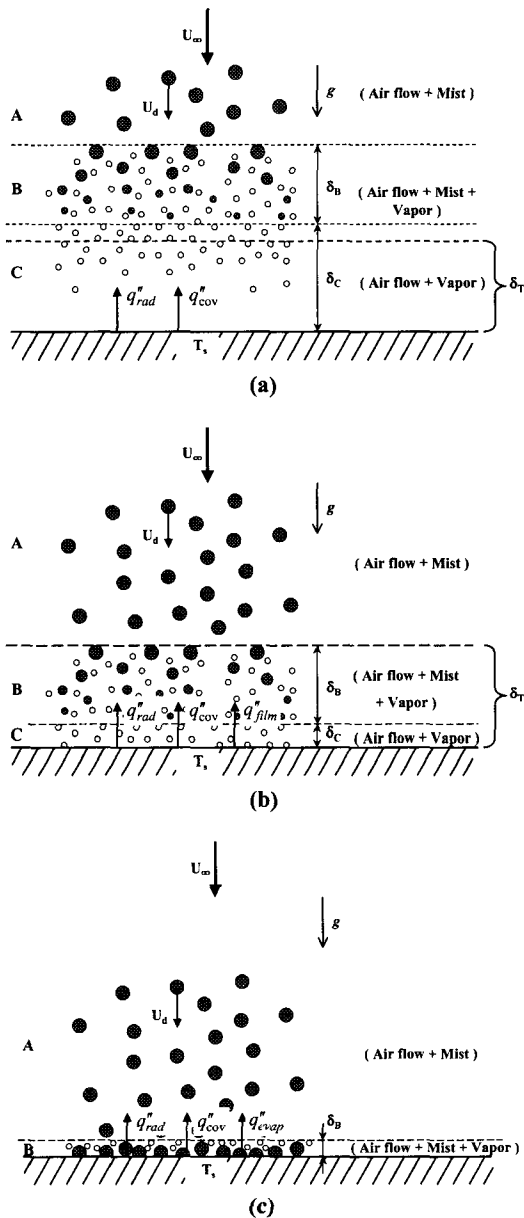


Fig. 2 Mist cooling Process (a) Cooling Process I, (b) Cooling Process II, (c) Cooling Process III (●: mist, ○: vapor)

식이다.⁽¹¹⁾

냉각과정Ⅱ에 대한 Bi 값을 계산하면 $Bi < 0.1$ 이기 때문에, 집중용량방법(Lumped Capacitance Method)을 사용할 수 있다. 따라서 집중용량방법과 전체 열전달계수(h_{II})를 적용하면, 시간에 따른 실린더 온도는 식 (11)과 같다.⁽⁹⁾

$$\theta^* = \exp\left[-\left(\frac{h_{II}A_s}{\rho_s V_s c_s}\right)t\right] \quad (11)$$

냉각과정Ⅲ에서는 실린더 표면에 적심현상이 발생하여 액막이 형성되기 때문에, 액막의 직접적인 증발에 의한 열전달을 고려해야 한다. 그리고 복사열전달과 대류열전달에 비해 액막의 증발에 의한 열전달이 훨씬 크기 때문에, 냉각과정Ⅲ에서의 열전달은 식 (12)와 같다.

$$q_{III}^* = q_{evap}^* = \frac{\dot{m}_{Proj} h_{fg}}{A_s} \quad (12)$$

$$h_{III} = \frac{q_{III}^*}{(T_s - T_\infty)} \quad (13)$$

냉각과정Ⅲ에 대한 Bi 값을 계산하면 $Bi > 0.1$ 이므로, 냉각과정Ⅲ에서는 집중용량방법을 사용할 수 없다. 그러나 실린더의 초기온도가 균일하고 균일 대류경계조건이면, 무한 실린더에 대해서 무차원 시간 $Fo > 0.2$ 에서는 근사해인 식 (14), (15)를 사용할 수 있다.⁽⁹⁾ 앞서 냉각과정Ⅱ에서 $Bi < 0.1$ 이기 때문에 냉각과정Ⅲ의 초기온도가 되는 냉각과정Ⅱ의 최종온도는 거의 균일하다고 가정할 수 있고, 액막의 직접적인 열전달이 다른 열전달에 비해 훨씬 크기 때문에 실린더 주변에 생성된 얇은 액막이 거의 균일하다면, 균일 대류경계조건을 가정할 수 있다.

$$\theta^* = \theta_0^* J_0(\zeta_1^2 r^*) \quad (14)$$

$$\theta_0^* = C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo) \quad (15)$$

여기서 식(15)의 C_1 과 ζ_1 은 Bi 값에 따라 결정되는 계수이다.⁽⁹⁾ 따라서 식 (15)로부터 시간에 따른 실린더 중심의 온도를 계산할 수 있다.

3. 실험

3.1 실험장치

Fig. 3 는 미스트 냉각 실험장치에 대한 개략도이다. 냉각수탱크에 있는 냉각수를 펌프로 가압하여 노즐로 보내고, 노즐에서 압축공기와 만나서 미스트를 발생시킨다.

본 실험장치는 크게 가열장치(Heater)와 냉각실(Quenching Chamber)로 구분할 수 있다.

가열장치로 인덕션 히터(Induction Heater)를 사용하였다. 인덕션 히터는 인덕션 코일(Induction Coil)에서 발생된 고주파 자기장이 실린더 내부에 유도전류를 발생시켜 가열하기 때문에, 실린더 주변에 전열선을 감을 필요가 없고 가열이 용이하다. 그러나 평판이나 원판의 미스트 냉각에 대한 기존의 연구에서는 대부분 냉각면의 안쪽에 전열선을 설치하여 시편을 가열하는 방식을 사용하였다. 실린더의 경우 그러한 방식을 사용하려면, 내부에 원통의 홈을 파서 전열선을 설치해야 하기 때문에 실린더의 냉각용량이나 열전달 특성에 영향을 줄 수 있다. 그리고 실린더 내부에 열전대를 설치하여 온도를 측정하려면, 중심에 설치된 전열선 때문에 열전대 설치가 용이하지 않다.

냉각실은 노즐, 방수관(waterproof tube), 냉각수 탱크(water tank), 이송대 등으로 구성된다. 방수관은 초기에 노즐에서 분사될 수 있는 미발달된 미스트 유동에 의한 냉각을 방지하려는 목적으로 설치되었다. 그리고 이송대는 시편을 고정시키고, 인덕션 코일 속으로 이동하거나 냉각실로 이동할 때 사용된다.

열전대로 측정된 온도 데이터를 NI 사의 DAS(Data Acquisition System)와 PC 를 사용하여 처리 및 저장하였고, Aerometrics 사의 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 사용하여 노즐에서 분사되는 미스트 입자의 속도와 크기를 측정하였다. 그리고 Sony 사의 Digital Video Camera 로 실린더 표면의 적심현상을 촬영하였다.

3.1.1 노즐(Nozzle)

Fig. 4 는 본 연구에서 사용한 노즐을 보여준다.

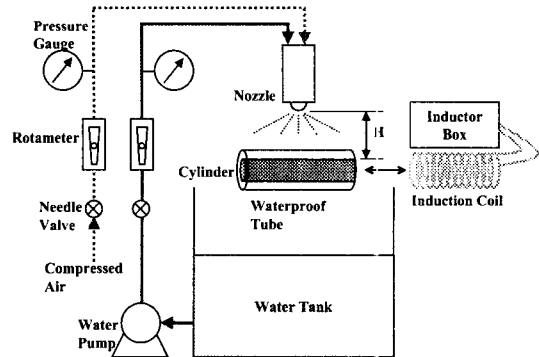


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus (— : cooling water, - - - : compressed air)

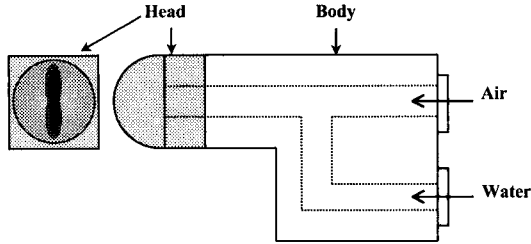


Fig. 4 Schematic diagram of nozzle head and body

Table 1 Position of 3 installed thermocouples

	z (mm)	r (mm)
TC ₁	0	0
TC ₂	10	4
TC ₃	40	0

Table 2 Experimental cases and conditions

	Air pressure (bar)			
	1.2	2.0	2.8	3.6
Water pressure (bar)	2.0	2.0	2.0	2.0
	2.8	2.8	2.8	2.8
	3.6	3.6	3.6	3.6
	4.4	4.4	4.4	4.4

그림과 같이 헤드(head)의 분사부인 팁(tip)이 갖는 형상 때문에, 노즐에서 분사되는 미스트 유동의 질량유량분포에서 최대 질량유량지점이 두 곳에 존재하고 그 사이에서 질량유량분포는 거의 일정하다.⁽¹³⁾

노즐은 시편으로부터의 수직높이(H)가 320mm 이고 시편의 중앙에 위치하도록 고정시켰다.

3.1.2 시편의 제작

Fig. 5 는 사용된 시편의 도면과 시편에 설치된 열전대의 위치를 보여준다. 시편의 길이(L)와 지름(D)은 각각 130mm, 10mm 이다. 그리고 시편의 양 끝에 M6 이고 깊이가 10mm 인 나사홈을 만들고, 가열 및 냉각시 시편이 휘어지지 않도록 이송대의 볼트와 단단히 고정시켰다. 그리고 반복적인 가열 및 냉각시 발생하는 산화막의 생성을 줄이기 위해 시편의 재료로 SUS 304 를 사용하였다.

각 시편에 지름 1.2mm 의 구멍을 3 개씩 뚫고, 직경이 1mm 인 K 형의 열전대를 설치하였다. 각 열전대가 설치된 곳의 z 방향과 r 방향의 위치는 Table 1 과 같다.

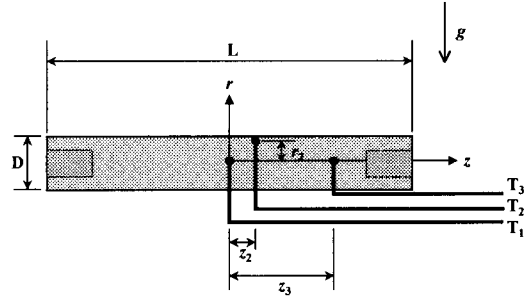


Fig. 5 Construction of SUS 304 testpiece

3.1.3 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)

Fig. 6 은 PDM(Phase Doppler Method) 기법을 이용하는 일반적인 PDPA 시스템을 보여준다.

Aerometrics 사의 PDPA 시스템은 레이저, 광조절부 (beam splitter/expander), 광투사부 (transmitter), 수광부 (receiver), 신호처리장치 및 자료처리 장치 등으로 구성된다. 레이저는 Ar-Ion 레이저를 사용하고, 광조절부는 레이저에서 발생된 단일 레이저 광을 동일한 강도를 갖는 두개의 레이저 광으로 나눈다. 그리고 광투사부는 렌즈를 이용하여 입사되는 두 개의 레이저광을 교차시켜 측정체적을 형성하도록 한다. 수광부는 입자에 의한 산란광을 계측하는 광센서와 렌즈로 이루어진다. 신호처리 장치에서는 수광부에서 측정한 도플러 신호로부터 주파수 천이 및 위상차를 산출하며, 이러한 광학 정보로부터 입자의 크기 및 속도 등의 유동정보를 산출하게 된다.⁽¹⁴⁾

3.2 측정

3.2.1 PDPA 측정

노즐에서 발생된 미스트가 광투사부와 수광부의 창에 묻지 않도록 초점거리가 500mm 인 광투사부와 수광부를 사용하였다. 그리고 노즐에 공급되는 압축공기와 냉각수의 압력을 Table. 2 에서 주어진 것 같이 조절하고 PDPA 의 광투사부가 만든 측정체적을 $z = -40, -20, 0, +20, +40$ 인 위치로 이동시킨 후, 노즐로부터 실린더의 정체점을 향해 떨어지는 미스트의 속도와 입경을 일정시간 동안 측정하여 평균하였다.

3.2.2 온도측정

먼저 이송장치를 사용하여 실험용 실린더를 인덕션 코일의 터널 속으로 이동시킨 후, 인덕터 박스를 작동시켜 실린더의 온도를 측정하면서 1000℃까지 가열시킨다. 가열이 끝나면 실린더를 방수관 안으로 옮기고, 압축공기 라인과 냉각수

라인의 밸브를 조절하여 수압과 공기압을 조절한다. 노즐에서 나온 미스트가 방수관 위에 분사되기 시작된 후 실린더를 자연냉각시켜 냉각시작 온도(T_i)인 800℃가 되면, 방수관을 제거하여 시편을 미스트 유동에 노출시켜 냉각시켰다.

4. 결과

4.1 노즐의 특성

본 연구에 사용한 노즐에 대해서 수압과 공기압을 조절해가면서 노즐의 특성을 테스트하였다.

Fig. 7 은 공기압이 일정한 경우, 수압이 증가함에 따라 노즐에 공급되는 물의 질량속도가 증가하고 공기의 질량속도가 상대적으로 감소함을 보여준다. 반면에 공기압이 증가하면, 노즐에 공급되는 공기의 질량유량은 증가하고 물의 질량유량은 감소한다. 이러한 특성을 공기의 질량유량에 대한 물의 질량유량의 비(χ)로 나타내면 Fig. 8 과 같다. 즉 수압이 증가하면 질량비가 비선형적으로 증가하고, 공기압이 증가하면 수압에 따른 질량유량비

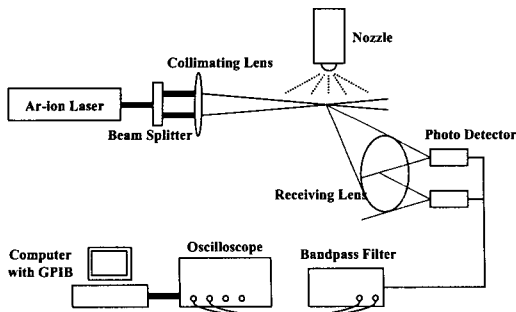


Fig. 6 Schematic diagram of typical PDPA system⁽¹⁴⁾

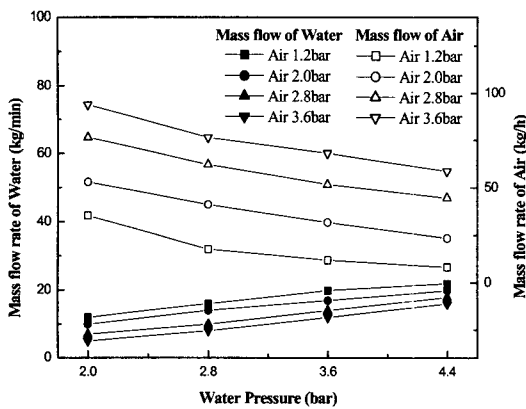


Fig. 7 The effect of nozzle pressure on mass flow rate

의 증가폭이 감소한다.

노즐에 걸리는 수압과 공기압을 달라지면, 노즐에서 분사되는 미스트 입자의 속도와 크기도 변한다. Fig. 9 에서 공기압이 증가함에 따라 입자의 평균속도는 증가한다. 그리고 일반적으로 액적 생성시 입자의 크기는 입자의 속도에 반비례하지만, 입자의 평균크기가 작아지는 경향은 뚜렷이 나타나지 않는다.

4.2 냉각특성

Fig. 10 은 실험을 통해 측정된 미스트 냉각곡선을 보여준다. 냉각과정Ⅱ에서는 반경방향의 온도차만 발생하고 축방향의 온도차가 거의 발생하지 않는다. 따라서 냉각과정Ⅱ에서 반경방향의 열전달만 고려한 모델은 적절하다고 본다.

시편의 양끝에 가까운 지점(TC_2)부터 냉각과정Ⅲ이 시작되었고, 이어서 TC_2 와 TC_1 에서 냉각과정Ⅲ이 시작되었다. 따라서 축방향의 온도차는 냉각과정Ⅲ에 대한 시작시점의 차이로 발생하였다.

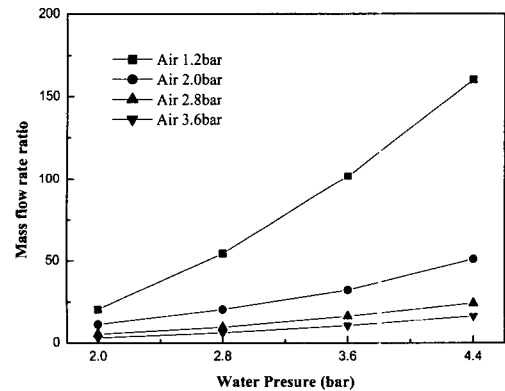


Fig. 8 The effect of nozzle water pressure on mass flow rate ratio (χ)

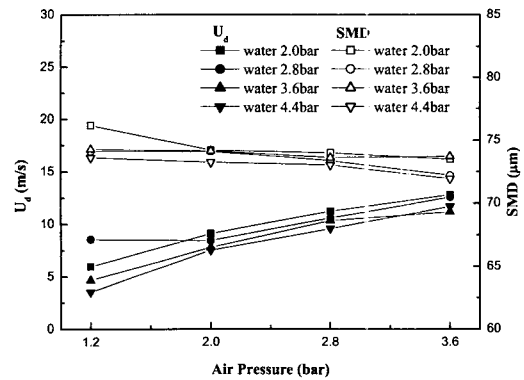


Fig. 9 The effect of nozzle pressure on SMD and velocity

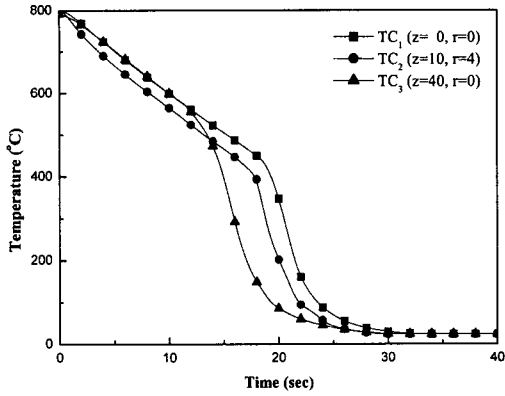


Fig. 10 Measured mist cooling curve ($P_a = 2.8\text{bar}$, $P_w = 4.0\text{bar}$, $T_\infty = 24^\circ\text{C}$)

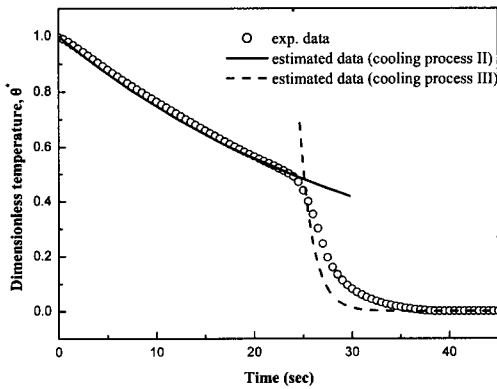


Fig. 11 Comparison of simple estimation with measured data at TC_1 ($P_a = 2\text{ bar}$, $P_w = 2\text{ bar}$)

Fig. 11에서는 실험을 통해 TC_1 지점에서 측정된 냉각곡선과 이론에서 제시한 식으로 단순 예측한 결과를 비교하였다. 냉각과정 II에서는 T_f 에서의 공기와 과열 수증기에 대한 각각의 물성을 계산하여 혼합기체의 물성을 구하였고, 방사율(ϵ_s)은 산화 스테인리스 강(highly oxidized stainless steel)의 값을 사용하였다.⁽⁹⁾

냉각과정 III에서 필요한 \dot{m}_{Proj} 는 본 연구에서 사용한 것과 같은 노즐을 사용한 장광훈⁽¹³⁾의 측정값으로 대신하였다. 그리고 냉각과정 II와 III의 경계가 되는 표면적심온도(T_{wet})의 측정값을 냉각과정 III의 초기온도로 사용하였다.

냉각과정 II에서는 예측된 냉각곡선과 측정 데이터가 거의 일치하지만, 냉각과정 III에서는 차이를 보인다. 이것은 전열면의 온도가 낮아짐에 따라 미스트 입자의 과냉도의 영향이 커져서, 전열

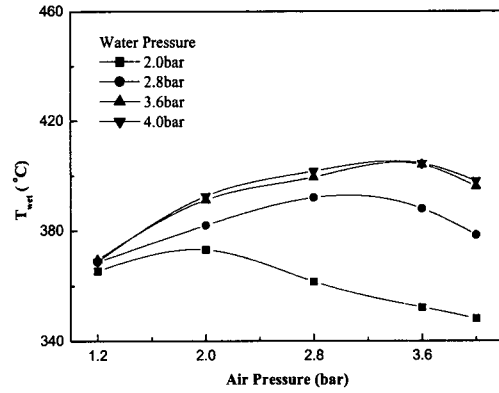


Fig. 12 The effect of nozzle pressure on surface wetting temperature (T_{wet}) at TC_2

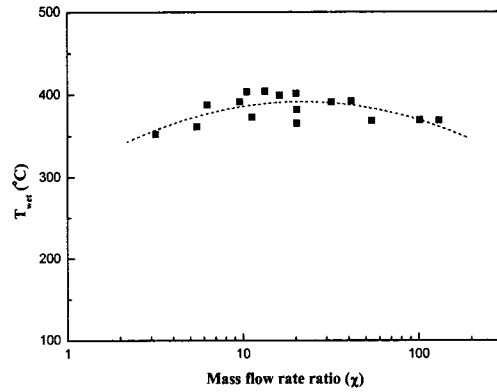


Fig. 13 The effect of mass flow rate ratio (χ) on surface wetting temperature (T_{wet}) at TC_2

면에 떨어진 모든 미스트 입자들이 증발하지 않기 때문일 것으로 판단된다.

Fig.12는 공기압에 따른 표면적심온도(T_{wet})를 나타내고 있다. 각 수압에 대해서 최고 적심온도를 보이는 공기압이 존재함을 확인할 수 있다. 그리고 수압이 증가함에 따라 최고 적심온도가 증가할 뿐만 아니라 해당되는 공기압도 증가한다. 그러나 수압이 3.6 bar 이상이 되면 표면적심온도 곡선이 거의 같은 양상을 나타낸다.

Fig.12에서 최고 표면적심온도에 해당하는 수압과 공기압의 값을 가지고, Fig.8에서 질량유량비를 확인해보면 거의 같은 질량유량비(χ)를 가짐을 알 수 있다. 따라서 최고 표면적심온도를 결정하는 질량유량비가 존재함을 유추할 수 있으며, 그 관계를 Fig.13과 같이 나타낼 수 있다. Buckingham과 Haji-Sheikh⁽³⁾은 $\chi < 10$ 인 범위에서 표면적심온도가 질량유량비에 따라 증가한다는 결과를 보였지만, Fig.13에서 실험데이터를 fitting한 곡선을 보면 최고 표면적심온도와 그에 해당하는 임계질

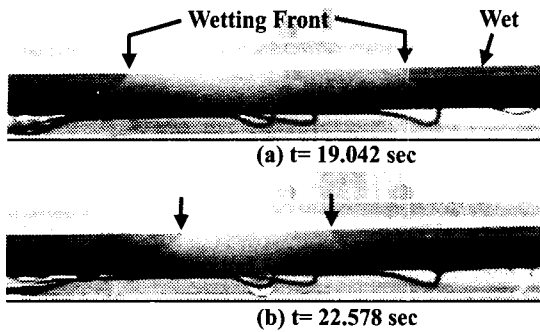


Fig. 14 Photograph of Surface wetting propagation

량유량비가 존재함을 확인할 수 있다. 즉 질량유량비가 임계질량유량비보다 더 커지면 표면적심온도는 다시 감소한다.

4.3 표면적심(Surface Wetting) 촬영

Fig. 14는 노즐로부터 미스트가 위에서 아래로 분사될 때 발생하는 표면적심 현상과 시간에 따른 표면적심의 전파를 보여준다. 냉각되는 동안 시편 표면이 갖는 명암의 차이로부터 표면적심 영역을 확인할 수 있었고, 표면적심이 시편의 가장자리로부터 가운데로 이동함을 관찰하였다. 그리고 표면적심 시점과 냉각곡선에서의 변곡점이 시간적으로 거의 일치함을 확인하였다.

따라서 Fig.10과 같이 각 열전대의 냉각곡선에서 보여주는 변곡점의 차이는 표면적심이 발생하는 시점의 차이에 따른 것임을 알 수 있었다.

5. 결론

고온 실린더의 냉각과정 중에서 냉각과정 I은 Buckingham과 Haji-Sheikh⁽³⁾에 의해 정량적으로 해석되었기에, 본 연구에서는 냉각과정 II와 III을 정량적으로 해석하고 실험하고자 하였다.

먼저 미스트 냉각에 필요한 노즐의 특성을 알아보기 위해서, 노즐에 공급되는 냉각수의 압력과 압축공기의 압력을 조절해가면서 노즐에서 분사되는 미스트 입자의 평균속도와 평균크기를 측정하였다. 그리고 노즐에서 발생된 미스트 유동을 고온의 실린더에 분사하면서 냉각특성을 테스트하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) $1.2 \text{ bar} < P_a < 3.6 \text{ bar}$ 인 냉각수 압력과 $2.0 \text{ bar} < P_w < 4.4 \text{ bar}$ 인 압축공기 압력 하에서, 노즐의 질량유량비는 수압에 비례하였지만 공기압에는 반비례하였다. 그리고 미스트의 평균속도는 공기압에 비례하였지만 수압에 따른 영향은 작았고, 미스트의 평균크기는 공기압에 따라 거의 변하지 않았다.

(2) 미스트에 의한 실린더의 냉각곡선에서, 냉각과정 II에서는 축방향의 온도차가 없었지만 반경방향의 온도차는 발생하였고, 각 열전대에서 냉각과정 III의 시작시점이 일치하지 않았다. 그리고 냉각과정 II와 III에서의 열전달기구에 대한 간단한 모델을 세우고 냉각곡선의 기울기 기울기 예측한 결과, 냉각과정 II에서는 측정값과 잘 일치하였지만 냉각과정 III에서는 측정값과 차이가 있었다. 냉각과정 II에서는 Buckingham과 Haji-Sheikh⁽³⁾의 강제대류 지배 열전달 모델과 달리, 강제대류 열전달과 복사 열전달에다 막비등열전달을 포함시켰다.

(3) 표면적심온도(T_{wet})의 경우, 임계질량유량비에서 최대값을 가졌고, 비슷한 질량유량비에서 표면적심온도는 미스트 입자의 평균속도에 비례하는 경향을 보였다. 그리고 실린더 표면의 적심현상을 관찰한 결과, 적심현상이 발생하는 시점과 각 열전대의 냉각곡선에서 냉각과정 III이 시작하는 시점이 일치하였다. 그리고 시편의 양끝에서부터 적심현상이 시작되었는데, 이것은 노즐의 특성과 위치 때문에 물의 질량유량이 시편의 양끝에 편중되었기 때문인 것으로 판단된다.

미스트 냉각의 경우, 전열면의 온도에 따라 여러가지 다른 열전달기구를 보이기 때문에 해석이 난해하다. 특히 고온 실린더의 미스트 냉각시 관련된 표면적심온도에 대한 연구가 부족하기 때문에, 앞으로 이에 대해서 더 많은 연구가 필요하다. 그리고 냉각과정 III에서의 냉각속도를 높이기 위해서 미스트 냉각시 고온 실린더의 표면에 형성되는 액막의 두께에 따른 열전달의 영향을 연구하는 것도 필요하다.

본 연구에서 최대 표면적심온도를 보이는 임계 질량유량비가 존재하고 미스트의 속도에 비례함을 확인하였기에, 이를 근거로 표면적심온도를 조절하는 것이 가능하다고 판단된다. 따라서 적절한 노즐의 선택을 통해 각 냉각과정의 냉각속도와 냉각시점을 조절하는 것이 가능하다.

기존의 연구^(3,6)에서도 확인된 바와 같이, 실린더의 다른 부분에 비해 실린더의 전면부에서 냉각이 가장 잘 되며, 특히 질량유량비가 증가할수록 이러한 차이는 더욱 증가한다. 따라서 제강공정에 미스트 냉각을 적용시킬 경우, 냉각속도와 균일냉각이 모두 중요하므로 단순히 질량유량비만 증가시켜서는 안되며, 실린더의 측면부와 후면부에 추가적인 미스트 냉각시스템의 설치가 필요하다.

후기

본 연구는 포항산업과학연구원(RIST)과 국가지

정연구실사업(NRL)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Ohkubo, H. and Nishio, S., 1993, "Study on Transient Characteristics of Mist-Cooling Heat Transfer from a Horizontal Upward-Facing Surface," *JSME Int. J.*, Vol. 36, pp. 543~555.
- (2) Ito, T., Takata, Y., Mousa, M. M. M. and Yoshikai, H., 1991, "Studies on the Water Cooling of Hot Surfaces," *Memoirs of the Faculty of Engineering*, Kyushi University, Vol. 51, pp. 119~144.
- (3) Buckingham, F. P. and Haji-Sheikh, A., 1995, "Cooling of High-Temperature Cylindrical Surfaces Using a Water-Air Spray," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 1018~1026.
- (4) Graham, K. M. and Ramadhyani, K. M., 1996, "Experimental and Theoretical Studies of Mist Jet Impingement Cooling," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 118, pp. 343~349.
- (5) Lee, S. L., Yang, Z. H. and Hsyua, Y., 1994, "Cooling of a Heated Surfaces by Mist Flow," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 116, pp. 167~172.
- (6) 최해원, 1997, "공기와 mist 주유동에 의한 고온 실린더의 냉각특성에 관한 실험적 연구," 석사 학위논문, 포항공과대학교.
- (7) Choi, K. J. and Yao, S. C., 1987, "Mechanism of Film Boiling Heat Transfer of Normally Impacting Spray," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 311~318.
- (8) Ohkubo, H. and Nishio, S., 1989, "Study on Accurate Prediction of Mist Cooling Characteristics (Part I, Effects of Surface Roughness)," *JSME Int. J.*, Vol. 32, pp. 43~50.
- (9) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 1996, *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Inc.
- (10) Klinzing, W. P., Rozzi, J.C., and Mudawar, I., 1992, "Film and Transition Boiling Correlations for Quenching of Hot Surfaces with Water Sprays," *J. Heat Treating*, Vol. 9, pp. 91~103.
- (11) Whalley, P. B., 1987, *Boiling, Condensation, and Gas-Liquid Flow*, Clarendon Press · Oxford.
- (12) Bird, R. B., Stewart W. E., and Lightfoot, E. N., 1960. *Transport phenomena*, John Wiley & Sons, Inc.
- (13) 장광훈, 2001, "하향 Mist 분무대와 상향 공기유동 중에 위치하는 원주형 실린더 주변의 속도장과 Mist 입자분포," 석사학위논문, 포항공과대학교.
- (14) 박군철, 노희천, 김무환, 송철화, 2000, "최신 2상유동 실험기법 및 응용," 대선