

분무냉각에 있어서 임계열유속 상관식에 관한 연구

김 영 찬†

Study on Correlation of Critical Heat Flux in Spray Cooling

Yeung Chan Kim

Key Words: Spray Cooling(분무냉각), Boiling Curve (비등곡선), Critical Heat Flux(임계열유속), Correlation(상관식), Droplet Flow Rate (액적유량밀도)

Abstract

The critical heat flux of spray cooling were measured on the test surface of 10 mm diameter made by stainless steel. The experiments were carried out for the droplet-flow-rate of 0.00002~0.003 m³/(m²s) and liquid subcooling temperature of 40~75°C. Experimental results showed that the critical heat flux of spray cooling increased remarkably with the increase of droplet-flow-rate. Meanwhile, the effect of liquid subcooling on critical heat flux of spray cooling appeared weakly under the present experimental conditions. In additions, correlation between the dimensionless critical heat flux and Weber number based on droplet-floe-rate was developed for experimental results.

기호설명

C : 실험상수 또는 수정상수
c_p : 액체의 비열 [J/kg°C]
d : 분무노즐의 직경 [m]
d" : 분무액체의 평균직경 [m]
D : 냉각면의 직경 [m]
g : 중력가속도 [m/s²]
k : 열전도계수 [W/m°C]
L : 냉각면의 크기 [m]
Q : 액적유량밀도 [m³/m²s]
q_c : 임계열유속 [W/m²]
q_c^{*} : 무차원 임계열유속(=q_c/ρ_vΔh·Q)
T_l : 액체(액적)의 온도 [°C]
T_s : 냉각면의 온도 [°C]

T_{sat} : 액체의 포화온도 [°C]
u : 액체의 분출속도 [m/s]
σ : 액체의 표면장력 [N/m]
Δh : 액체의 증발열 [J/kg]
ΔT_{sat} : 냉각면 과열도(= T_s-T_{sat}) [°C]
ΔT_{sub} : 액체의 과냉도(= T_{sat}-T_l) [°C]
ρ_l : 액체의 밀도 [kg/m³]
ρ_v : 기체의 밀도 [kg/m³]
Ja : Jacob number (=ρ_lc_pΔT_{sub}/ρ_vΔh)
We : 수정 Weber number (=ρ_lQ²d"/σ)

1. 서 론

분무냉각 기술을 다양한 산업분야⁽¹⁻⁶⁾에 활용하기 위해서는 Fig. 1에 나타낸 액체의 비등곡선(boiling curve)을 명확히 파악하는 것이 매우 중요하다. Nukiyama⁽⁷⁾는 금속선(wire)을 이용하여 액체를 가열하는 실험을 통하여 Fig. 1에 나타낸 비등곡선을 완성하였다. 즉 표면온도가 증가함에 따라 ① 대류(convection)영역, ② 핵비등(nucleate boil-

(Received: 11 Apr 2018, Received in revised form: 28 May 2018, Accepted: 29 May 2018)

†책임저자, 회원, 안동대학교 기계자동차공학과
E-mail : yeung@anu.ac.kr
TEL : (054)820-6013 FAX : (054)820-5092

ing) 영역, ③ 천이(transition boiling) 영역, ④ 막비등 (film boiling) 영역이 차례로 나타나게 되며, 핵비등영역과 천이 영역의 경계에 임계열유속(critical heat flux, CHF), 천이영역과 막비등영역의 경계에 최소열유속(minimum heat flux, MHF)이 존재하는 것이 그의 연구에 의해 밝혀졌다. 이는 냉각 대상물의 온도범위와 요구되는 열유속의 크기에 따라 적용할 수 있는 열전달 메커니즘이 다르게 됨을 의미한다. 미립화한 액체를 분무하여 고온의 물체를 냉각시킬 경우에 있어서도 이와 유사한 형태의 비등곡선이 나타난다. 분무냉각 기술을 산업분야에 활용하기 위해서는 이러한 비등곡선을 명확히 파악하는 것이 가장 중요하지만, 분무냉각은 벌크액체(bulk liquid)에 의한 냉각과는 현상이 매우 상이할 뿐만 아니라 액적(droplet)의 유량, 온도, 평균크기, 충돌속도 등 많은 요소들에 영향을 받기 때문에 분무냉각의 비등곡선을 명확히 파악하기가 쉽지 않은 실정이다. 비등곡선에 있어서 임계열유속은 열유속이 가장 높게 나타나는 영역이며, 이 영역의 열유속을 적절히 활용할 경우 고열유속의 제거가 가능하므로 경수로의 냉각장치, 고밀도 전자장치의 냉각을 위해 매우 흥미롭게 연구되고 있다. 임계열유속은 주로 액체의 공급방법에 따라 풀비등(pool boiling), 강제대류비등(forced convective flow boiling), 충돌분류비등(impinging jet flow boiling), 분무냉각비등(spray flow boiling) 등으로 구분되어 연구되었다.

Kutateladze와 Zuber⁽⁸⁾는 포화액체 풀비등에 있어서 이론해석을 통하여 다음의 형식으로 나타나는 임계열유속에 관한 상관식을 개발하였다.

$$q_c = C\rho_v\Delta h \left[\frac{g\sigma(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

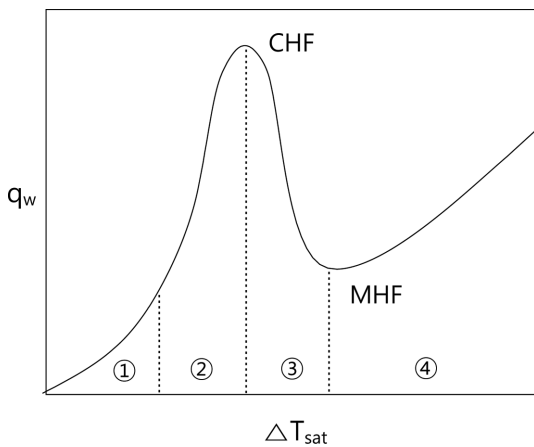


Fig. 1 Boiling curve

위 식에서 C는 상수이며, Kutateladze는 C=0.16-0.19, Zuber는 C=0.156을 제안하였다. 이후에 Lienhard & Dhir는 실험을 통하여 C=0.149를 제안하였다.⁽⁸⁾

Katto & Kurata⁽⁹⁾는 관내부 강제대류유동에 대한 임계열유속 상관식 연구를 수행하였다. 강제대류비등은 풀비등과는 다르게 액체의 유동속도가 매우 중요한 요소로 작용할 것으로 판단하였으며, 다음의 임계열유속 상관식을 제안하였다.

$$\frac{q_c}{\rho_v\Delta h u} = 0.186 \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.441} \left(\frac{\sigma}{\rho_l u^2 L} \right)^{0.264} \quad (2)$$

위 식은 L=10~20 mm, u=1.3~10 m/s에서 적용 가능한 것으로 제안하였다. 또한 Monde *et al.*⁽¹⁰⁾은 Fig. 2(a)에 나타난 것과 같은 충돌분류유동에 대한 임계열유속에 관한 연구를 수행하여 다음의 상관식을 제안하였다.

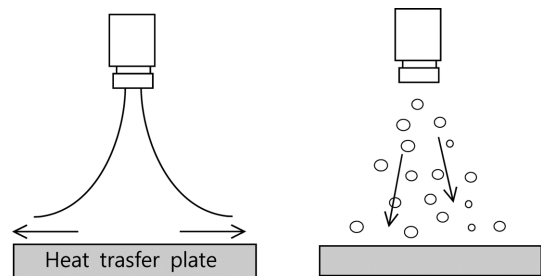
$$\frac{q_c}{\rho_v\Delta h u} = 0.221 \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.654} \left[\frac{2\sigma}{\rho_l u^2 (D-d)} \right]^{0.343} \times \left(1 + \frac{D}{d} \right)^{-0.364} \quad (3)$$

위 식에서 알 수 있듯이 Monde *et al.*의 연구에서는 액체의 속도이외에도 냉각면의 직경과 분류노즐의 직경의 비(D/d)가 임계열유속에 영향을 미친다고 판단하고 상관식을 개발하였다. 또한 그들은 액체의 과냉도(sub-cooling) 영향을 고려한 상관식도 함께 제안하였다.

Mudawar & Estes⁽¹¹⁾는 Fig. 2(b)에 나타난 분무류에 있어서 임계열유속을 예측하기 위한 상관식을 개발하였다. 그들은 강제대류비등 또는 충돌분류비등 상관식에 포함되어 있는 액체의 속도를 액적유량밀도로 대체하여 다음의 상관식을 제안하였다.

$$\frac{q_c}{\rho_v\Delta h Q} = 2.3 \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.3} \left[\frac{\sigma}{\rho_l Q^2 d''} \right]^{0.35} \times (1 + 0.0019Ja) \quad (4)$$

이와 같이 액체를 냉각면에 공급하는 방법에 따라 다양한 형식의 임계열유속 상관식이 개발되었다. 그러나



(a) impinging jet flow (b) spray flow
Fig. 2 Schematics of impinging jet and spray flow

분무냉각 임계열유속은 여러 가지 요소들에 의해 영향을 받을 뿐만 아니라, 넓은 범위의 표면온도에서 임계열유속이 나타날 수 있기 때문에 이를 실험적 방법으로 정확히 측정하는 것이 매우 어려운 실정이다. 또한 임계열유속에 대한 상관식 연구도 매우 적으며, 이미 개발된 상관식도 다양한 실험조건에서의 적용 가능성에 대해 검토가 필요한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 분무냉각에 있어서 액적유량밀도가 임계열유속에 큰 영향을 미칠 것으로 판단하여 액적유량밀도가 0.00002~0.003 m³/(m²s) 범위의 비교적 희박한 분무영역을 대상으로 분무냉각 열전달실험을 수행하여 임계열유속을 측정하였으며, 측정된 임계열유속을 이용하여 상관식을 개발하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치 및 방법은 기존의 연구⁽¹²⁾와 동일하므로 간략히 설명하기로 한다. Fig. 3에는 실험장치의 개략도를 나타내었다. 본 실험에서 사용한 냉각면은 직경×높이가 10×10 mm의 원통형 스테인리스강으로 제작하였다. 냉각면을 적외선 히터를 이용하여 최대 800°C까지 가열한 후, 분무액적을 분사하여 실온까지 냉각시키는 비정상 실험을 수행하였다. 냉각면 후면에는 직경 1.0 mm의 열전대를 냉각면 표면에서부터 약 2.0 mm의 위치에 삽입하였으며, 냉각과정에 있어서 측정된 온도이력을 Beck⁽¹³⁾이 제안한 열전도 역산법(inverse conduction method)에 적

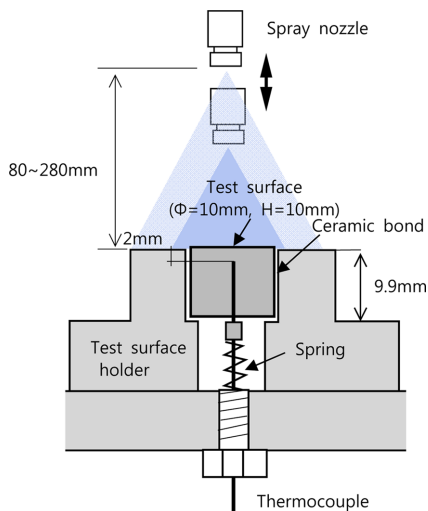


Fig. 3 Schematic of test surface

Table 1 Specifications of spray nozzles

Model	분무압력	분무유량	분무각	SMD
J020	100 kPa	0.14 l/min	60°	200 μm
JJXP005	100 kPa	0.36 l/min	55°	270 μm

용하여 냉각면 표면의 온도와 열유속을 계산하였다⁽¹⁴⁾. 본 연구에서는 2종류의 가압 원추형 분무노즐을 이용하여 분무노즐과 냉각면과의 거리를 변화시켜 냉각면에서의 액적유량을 측정하였다. 직경 10 mm의 냉각면에 공급되는 액적의 유량은 냉각면과 동일한 직경의 유리관을 이용하여 측정하였으며, 이 값을 냉각면의 면적으로 나누어 액적유량밀도(m³/m²s)로 나타내었다. 액적유량밀도는 각 실험조건에 있어서 10회 이상 측정을 반복하여 그 평균값을 활용하였다. 실험결과로부터 분무노즐과 냉각면의 거리가 80~280 mm로 변화할 경우, 액적유량밀도는 0.00002~0.003 m³/(m²s)의 범위에서 변화하고 있음을 알 수 있었다. 분무압력과 주위공기의 온도는 각각 100 kPa, 25°C로 일정하게 유지하였다. 분무액체의 온도는 저장탱크에 설치된 히터를 이용하여 조절하였으며, 본 실험에서는 25~60°C의 범위에서 변화시켜 실험을 수행하였다. 또한 본 실험에서 사용한 분무노즐의 특성을 Table 1에 나타내었다. 열전대의 위치와 온도측정의 오차 등을 고려한 실험결과의 불확실성은 4% 이내이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4에는 두 가지 액적유량밀도 대한 분무냉각 열유속을 측정한 대표적인 실험결과를 나타내었다. Fig. 4에 나타난 실험결과는 냉각면을 약 800°C까지 가열한 후에 분무냉각실험을 수행하여 냉각면의 내부온도를 0.5 sec 간격으로 측정한 후, 이를 비정상 열전도 역산법을 이용하여 표면온도와 표면열유속을 계산하여 나타난 결과이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 액적유량밀도가 큰 경우가 임계열유속을 비롯하여 전 영역에서 열유속이 높게 나타나고 있다.

Fig. 5에는 액적유량밀도를 0.00002~0.003 m³/(m²s)의 범위에서 변화시켜 분무냉각 임계열유속을 측정하여 액적유량밀도와의 관계를 나타내었다. 그림에는 Zuber⁽¹⁵⁾가 제안한 포화상태 물에 대한 풀비딩 임계열유속을 계산한 결과를 나타내어 비교하였다. Fig. 5로부터 분무냉각에 있어서 임계열유속은 액적유량밀도가 증가할수록 점차 증가하고 있으며, 액적유량밀도가 본 연구의 최대

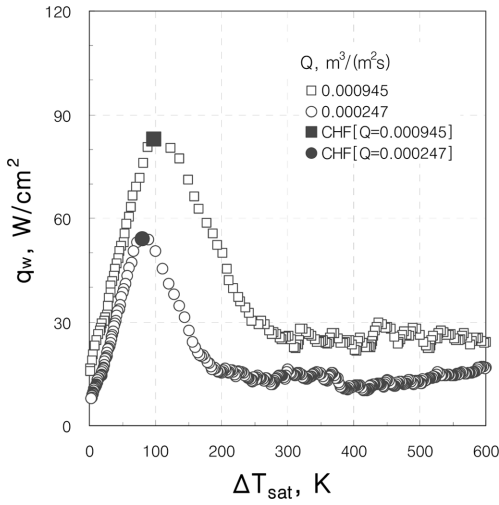


Fig. 4 Measurement of critical heat flux in spray cooling

조건인 0.003 m³/(m²s)에 이르러 포화상태 물의 임계열유속과 거의 비슷한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 5에 나타낸 실험결과는 분무액적의 과냉도를 40~75°C의 범위에서 변화시켜 실험한 결과이며, 분무액적의 과냉도 영향을 파악하기 위해 Fig. 5에 나타낸 실험결과를 과냉도에 대하여 재구성하여 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이 과냉도의 영향이 명확하게 나타나지 않거나, 오히려 과냉도가 높은 경우가 임계열유속이 낮게 나타나는 실험결과가 일부 존재하지만 전반적으로 분무액적의 과냉도가 증가할수록 임계열유속이 약간 증가하는 경향이 있는 것을 알 수 있다. 분무액적의 과냉도에 대한 영향을 더욱 명확히 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 7에는 본 실험결과를 무차원 임계열유속과 수정 Weber수와의 관계를 나타내었다. Fig. 7으로부터 액적유량밀도가 0.00002~0.003 m³/(m²s)의 범위에서 물을 대상으로 실험한 본 연구결과는 아래의 상관식과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

$$q_c^* = 32.02 \times \left[\frac{\sigma}{\rho_l Q^2 d''} \right]^{0.25} \quad (5)$$

또한 Fig. 7에는 Mudawar & Estes가 제안한 상관식 (4)를 이용하여 계산한 결과를 함께 나타내었으며, 상관식 (4)를 포화상태 물(ρ_l/ρ_v = 1602, Ja = 0)에 대하여 나타내면 다음과 같다.

$$q_c^* = 21.04 \times \left[\frac{\sigma}{\rho_l Q^2 d''} \right]^{0.35} \quad (6)$$

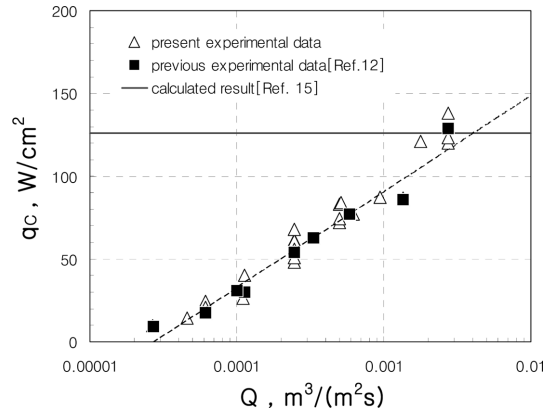


Fig. 5 Correlation between critical heat flux and droplet flow rate in spray cooling

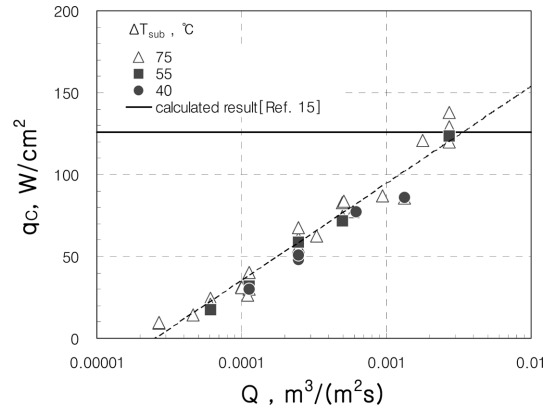


Fig. 6 Effect of liquid subcooling on critical heat flux in spray cooling

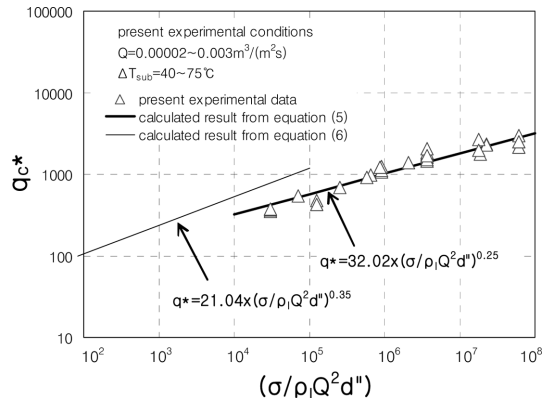


Fig. 7 Correlation between critical heat flux and Weber number in spray cooling

단, 위식은 액적유량밀도가 0.0002~0.216 m³/(m²s)의 범위에서 FC-72, FC-87, 물 등을 이용하여 실험한 결과

에 기초하여 개발한 임계열유속 상관식이다. Mudawar & Estes의 실험조건과 본 연구의 실험조건이 상이하서 상관식 (5)와 상관식 (6)을 직접적으로 비교하는 것은 어렵지만, 기존의 상관식 (6)을 본 연구에서 수행한 액적유량밀도 범위에 확장하여 적용할 경우 본 연구결과가 기존의 연구결과보다 조금 낮게 나타나고 있음을 Fig. 7로부터 알 수 있다. 이는 액적유량밀도가 희박한 분무영역에서는 임계열유속의 액적유량밀도에 대한 의존성이 작아지고 있기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 액적유량밀도가 $0.00002\sim 0.003 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 범위의 비교적 희박한 분무영역을 대상으로 분무냉각 열전달실험을 수행하여 임계열유속을 측정하였다. 또한 측정된 임계열유속을 이용하여 상관식을 개발하기 위한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 분무냉각 임계열유속은 액적유량밀도가 증가할수록 점차 증가하였으며, 무차원 임계열유속은 수정 Weber수를 이용하여 잘 정리할 수 있음을 확인하였다. 기존의 연구결과와 비교할 때 액적유량밀도가 비교적 작은 희박한 분무영역에서는 임계열유속의 액적유량밀도에 대한 의존성이 작아지고 있음을 알 수 있었다.

(2) 본 실험조건에서 과냉도의 영향이 명확하게 나타나지 않거나 오히려 과냉도가 높은 경우가 임계열유속이 낮게 나타나는 실험결과가 일부 존재하지만, 전반적으로 분무액적의 과냉도가 증가할수록 임계열유속이 약간 증가하는 경향이 있는 것을 알 수 있었다. 분무액적의 과냉도에 대한 영향을 더욱 명확히 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2017년도 안동대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

(1) H. Ohkubo and S. Nishio, "Study on Mist Cooling for Heat Treatment of Metals", J. of Materials Processing

- & Manufacturing Science, Vol. 2, 1993, pp. 14~27.
- (2) W. J. Yang and D. W. Clark, "Spray Cooling of Air-cooled Compact Heat Exchangers", Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol. 18-2, 1975, pp. 311~317.
- (3) A. Yamanouchi, "Effect of Core Spray Cooling in Transient State after of Coolant Accident", J. of Nuclear Science & Technology, Vol. 5-11, 1968, pp. 547~558.
- (4) D. B. Spalding, "The Combustion of Liquid Fuels", Fourth Symposium on Combustion, 1953, pp. 847~864.
- (5) E. C. Silk, J. Kim and K. Kiger, "Spray Cooling of Enhanced Surfaces (Impact of Structured Surface Geometry and Spray Axis Inclination)", Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol. 49, 2006, pp. 4910~4920.
- (6) M. S. Sehmbe, L. C. Chow, O. J. Hahn and M. R. Pais, "Spray Cooling of Power Electronics at Cryogenic Temperature", J. of Thermo-physics & Heat Transfer, Vol. 9-1, 1995, pp. 123~128.
- (7) S. Nukiyama, "The Maximum and Minimum Values of Heat Transmitted from Metal to Boiling Water Under Atmosphere Pressure", J. of Japan Society of Mech. Eng., Vol. 37, 1934, pp. 367~374.
- (8) F. P. Incropera and D. P. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", Wiley, 2003, pp. 674~675.
- (9) Y. Katto and C. Kurata, "Critical Heat Flux of Saturated Convective Boiling on Uniformly Heated Plates in a Parallel Flow", Int. J. of Multiphase Flow, Vol. 6, 1980, pp. 575~582.
- (10) M. Monde, K. Kitajima, T. Inoue and Y. Mitsutaka, "Critical Heat Flux in a Convection Subcooled Boiling with an Imping Jet", ASME J. Heat Transfer, Vol. 7, 1994, pp. 542~518.
- (11) I. Mudawar and K. A. Estes, "Optimizing and Predicting CHF in Spray cooling of Square Surface", ASME J. Heat Transfer, Vol. 118, 1996, pp. 672~679.
- (12) Y. C. Kim, "Effect of Droplet Flow Rate on Boiling Curve in Spray Cooling," Trans. of the KSME(B), Vol. 42-3, 2018, pp. 161~1696.
- (13) J. V. Beck, "Nonlinear Estimation Applied to the Nonlinear Inverse Heat Conduction Problem", Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol. 13, 1970, pp. 703~716.
- (14) Y. C. Kim, "Measurement of Critical Heat Flux Using the Transient Inverse Heat Conduction Method in Spray Cooling", Trans. of the KSME(B), Vol. 40-10, 2016, pp. 938~944.
- (15) N. Zuber, 1958, "On the Stability of Boiling Heat Transfer", Trans. of ASME, Vol. 80, pp. 711.