

< 논문 >

하부폐쇄 환상공간의 외부 튜브길이가 풀비등에 미치는 영향

강 명 기*

(2006년 2월 1일 접수, 2006년 6월 12일 심사완료)

Effects of Outer Tube Length on Pool Boiling in an Annulus with Closed Bottoms

Myeong-Gie Kang

Key Words: Pool Boiling(풀비등), Annuli(환상공간), Closed Bottoms(하부폐쇄)

Abstract

To improve pool boiling heat transfer in an vertical annulus with closed bottoms, the length of an outer tube has been changed from 0.2m to 0.6m. For the test, a heated tube of 19.1mm diameter and water at atmospheric pressure have been used. Annular conditions are made using glass tubes fabricated around the heated tube. The gap size of the annulus is 3.65mm. To elucidate effects of the outer tube length on heat transfer results of the annulus are compared with the data of a single unrestricted tube and the annulus with wider gap size of 6.35mm. Throughout the tests much higher heat transfer coefficients are observed for the annulus of 3.65mm gap size comparing to the other two cases. The change in the outer tube length results in much variation in heat transfer coefficients. Moreover, with shortening the length of outer tube the possibility of the CHF occurrence can be removed.

———— 기호설명 ————

D : 가열 튜브 직경
 h_b : 열전달 계수
 I : 공급전류
 L : 가열 튜브 길이
 L_o : 외부 튜브 길이
 q'' : 열유속
 s : 틈새간격
 T_R : 온도비
 T_{sat} : 포화온도
 T_W : 튜브 표면 온도

V : 공급전압

ΔT_{sat} : 과열도(= $T_W - T_{sat}$)

1. 서 론

보다 효율적인 열교환기 제작을 위한 열적설계와 관련하여 풀비등열전달은 지난 수십 년에 걸쳐서 광범위하게 연구되어져 왔다.⁽¹⁾ 풀비등열전달은 풀 속에 잠긴 가열면의 표면에서 비등이 발생하면서 열전달이 이루어지는 것으로 유체를 강제순환시키는 강제대류비등열전달의 경우와는 여러 가지 면에서 차이가 있다. 풀비등열전달은 풀속에서 비등이 발생하는 열전달에 모두 적용가능하며, 그 구체적인 사례로서 전 세계적으로 연구가 진행 중인 신형원전설계에 채택되는 피동형 안전계통들을 들 수 있겠다.^(2,3) 피동형열교환기는 안전계통에 설치되어 최종 열침원의 역할을 담당

* 회원, 안동대학교 기계교육과
 E-mail : mgkang@andong.ac.kr
 TEL : (054)820-5483 FAX : (054)823-1766

Table 1 Summary of the previous works

Author	Remarks
Yao and Chang (1983)	- heater: stainless steel tube - $D=25.4\text{mm}$, $L=25.4$ and 76.2mm - liquid: R-113, acetone, and water at 1 atm - liquid condition: saturated - geometry: vertical annuli with closed bottoms - gap sizes: 0.32, 0.80, and 2.58mm
Hung and Yao (1985)	- heater: stainless steel tube - $D=25.4\text{mm}$, $L=101.6\text{mm}$ - liquid: R-113, acetone, and water at 1 atm - liquid condition: subcooled or saturated - geometry: horizontal annuli - gap sizes: 0.32, 0.80, and 2.58mm
Kang (2002)	- heater: stainless steel tube - $D=25.4\text{mm}$, $L=570\text{mm}$ - liquid: water at 1 atm - liquid condition: saturated - geometry: vertical annuli, open/closed bottoms - gap sizes: 3.9 and 15mm
Kang and Han (2002)	- heater: stainless steel tube - $D=25.4\text{mm}$, $L=500\text{mm}$ - liquid: water at 1 atm - liquid condition: saturated - geometry: vertical annuli, open/closed bottoms - gap sizes: 3.9, 15.0, 25.1, 34.9 and 44.3mm
Kang (2005)	- heater: stainless steel tube - $D=19.1\text{mm}$, $L=540\text{mm}$ - $L_o=200, 400$ and 600mm - liquid: water at 1 atm - liquid condition: saturated - geometry: vertical annuli, closed bottoms - gap sizes: 6.35mm

하며, 좁은 공간에서 주어진 시간 내에 일정량의 열을 제거해야 하는 역할을 고려할 때 가열표면에서 높은 열전달계수(h_b)를 가지도록 열교환기를 설계하는 것은 매우 중요한 사항이다.

열전달 향상의 관점에서 고려할 수 있는 여러 가지 변수 중 한 가지 방법은 가열부 주변에 제한된 공간을 가지게 하는 것이다. 이러한 제한된 틈새 공간 내부에서의 비등열전달과 관련된 주된 현상 중 대표적인 것은 환상공간⁽⁴⁻⁹⁾과 평판^(10,12)을 들 수 있으며, 환상공간에 대한 주요 결과들을 Table 1에 나타내었다.

이들 결과들을 살펴보면 하부유로가 차단된 제한된 공간에서 풀비등열전달이 발생하면 구속되지 않은 경우와 비교할 때 저 열유속(q'') 영역에서는 300-500% 정도 열전달이 향상된다.^(4,6-8) 그러나 열유속이 지속적으로 증가하면 열전달계수의 증가가 둔화되는 경향을 나타낸다. Kang⁽⁶⁾에 의하면, 수직환상공간에서 하부로의 유체 유입이

차단되면 과열도(ΔT_{sat})가 2K 이하인 경우 열전달계수의 급격한 증가가 관찰되던 것이 열유속의 증가에 따라 과열도가 2K보다 큰 값을 가지면 열유속의 증가와 무관하게 일정한 열전달계수($20\text{kW/m}^2\text{-K}$)를 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 열전달계수의 둔화 경향은 환상공간 상부영역에서 발생하는 기포군집형성에 따른 큰 기포덩어리의 발생에 그 원인이 있다.⁽⁶⁾ 따라서 하부폐쇄 환상공간을 열교환기에 채택하기 위해서는 열유속 증가에 따른 열전달계수 둔화 현상을 해결하는 근본적인 방안이 제시되어야 한다.

최근, Kang⁽⁹⁾은 이러한 문제를 해결하기 위한 방안의 하나로 틈새간격(s)이 6.35mm인 환상공간의 외부 튜브 길이를 조절함으로써 고열유속 영역에서 발생하는 열전달계수의 둔화 현상을 제거할 수 있음을 밝혀냈다. Kang과 Han⁽⁸⁾에 의하면, 틈새간격이 감소하면 열전달계수가 증가하는 경향을 가지는 것을 알 수 있으므로 틈새간격과 외부 튜브 길이 사이의 관계를 상세하게 살펴보는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 틈새간격이 좁은 경우에 대한 열전달특성을 분석하여 Kang⁽⁹⁾의 결과와 비교함으로써 틈새간격과 결합된 외부 튜브 길이 효과를 규명하여 향상된 열전달 특성을 가지는 풀비등열교환기 설계 자료를 확보하고자 한다.

2. 실험

실험 장치의 개도는 Fig. 1과 같다. 수조[Fig. 1(a)]의 재질은 스테인리스강이며, 사각형 단면적($950 \times 1300\text{mm}$)과 1400mm의 높이를 가지고 있다. 이 수조의 전면은 관찰 및 사진 촬영을 위해 유리로 되어 있으며 가로×세로가 $1000 \times 1000\text{mm}$ 이다. 수조는 이중 벽 구조로 되어 있다. 안쪽 수조 크기는 $800 \times 1000 \times 1000\text{mm}$ (깊이×폭×높이)이며, 벽면에는 외부 수조로부터 유체가 유입되도록 하기 위해 여러 개의 구멍(직경 28mm)을 가지고 있다. 내부와 외부 수조의 바닥면 사이 공간에는 물을 예열하기 위해 히터당 용량이 5kW인 4개의 보조 히터를 설치했다.

열손실을 줄이기 위해 수조의 좌, 우, 그리고 뒷면은 50mm 두께의 유리섬유로 단열처리 하였다. 열교환 튜브는 Fig. 1(b)에 나타낸 것과 같은

Table 2 Test matrix

L_o , m	$\frac{L_o}{L}$	q'' , kW/m ²	Data points
0	0	0-120	12
0.2	0.37	0-120	12
0.3	0.56	0-120	12
0.4	0.74	0-120	12
0.5	0.93	0-120	12
0.6	1.11	0-120	11

표면이 매끈한 스테인리스강 튜브와 물의 조합인 경우는 열유속 증·감에 따른 이력현상은 무시할 수 있을 정도이므로^(7,13) 열유속이 증가하는 경우에 대해 실험값을 취득하였다. 하나의 조합에 대한 실험이 끝나면 다음 조합에 대하여 실험을 수행하였으며, 외부튜브 길이를 증가하면서 실험을 진행하였다.

전기적으로 가열한 튜브 표면에서의 열유속은 공급된 교류전원에 대한 측정값과 튜브의 형상으로부터 결정할 수 있으며 다음과 같다.

$$q'' = \frac{VI}{\pi DL} = h_b \Delta T_{sat} = h_b (T_W - T_{sat}) \quad (1)$$

여기서 V 와 I 는 공급한 전압과 전류를 각각 나타내며, D 와 L 은 각각 튜브 내경과 가열길이를 의미한다. T_{sat} 와 T_W 는 튜브와 수조 내부에 수직 방향으로 설치한 열전대의 측정값을 산술평균한 값을 사용하였다.

측정한 전압 및 전류에 대한 불확실도는 각각 0.5%이다. 열유속에 대한 불확실도는 시편 치수에 대한 불확실도를 무시하면 전달한 동력의 불확실도와 같아지므로 전압과 전류의 곱으로부터 구할 수 있다. 따라서, 열유속은 $\pm 1.0\%$ 의 불확실도를 가진다. 측정된 온도에 대한 불확실도는 열전대 접점의 오차, 접합부 오차, 그리고 계측기 변환오차의 합으로 나타낼 수 있으며, 그 값은 $\pm 0.3K$ 이다. 한편, 열전달계수에 대한 불확실도는 $q''/\Delta T_{sat}$ 의 계산을 거쳐서 결정되며, $\pm 10\%$ 정도의 값을 가지는 것으로 평가된다.

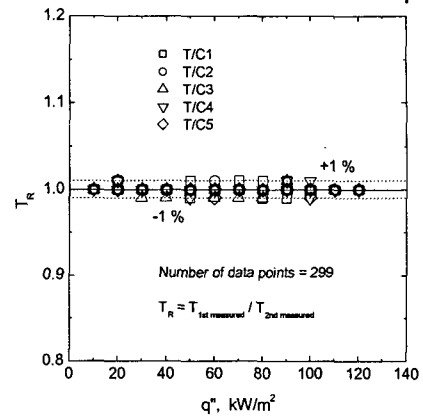


Fig. 2 Reproducibility of experimental data

3. 결과 및 토론

측정값에 대한 반복 재현성을 확인하기 위하여 튜브 표면의 각 위치[Fig. 1(b) 참조]에 대한 5개의 온도값을 30초 간격을 두고 2번 측정 후 그 두 값들 간의 비를 계산하여 Fig. 2에 나타내었다. 실험값에 대한 온도비 299개에 대한 결과를 살펴보면 전 열유속 영역에 걸쳐, 모든 값들이 $\pm 1\%$ 내에 들어오는 것을 알 수 있다. 따라서 실험값에 대한 반복재현성은 충분히 신뢰할 수 있다고 할 수 있다.

환상공간의 외부튜브 길이에 따른 열전달 특성의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. L_o 가 0.2m부터 0.6m까지 변화할 때의 실험값을 나타내었으며, 각각의 값들을 환상공간이 없는 경우($L_o=0.0m$)와 서로 비교하였다. 환상공간의 길이와 무관하게 환상공간이 있는 모든 경우에 대해 열전달계수는 환상공간이 없는 경우보다는 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 열유속이 $60kW/m^2 \cdot K$ 보다 낮은 경우 환상공간에 대한 열전달계수는 L_o 의 값에 무관하게 서로 비슷한 값을 가지지만 열유속이 이 값보다 증가하면 L_o 의 값에 따라 열전달 특성이 서로 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 열유속이 $60kW/m^2 \cdot K$ 보다 증가함에 따라 열전달계수 증가율의 둔화 현상이 관찰된다. 그러나 외부튜브 길이가 가열튜브 길이보다 약간 큰 $L_o=0.6m$ 의

경우는 열유속 증가에 따라 열전달계수가 선형적으로 증가하여 튜브간격이 6.35mm로서 본 연구보다 조금 더 큰 Kang⁽⁹⁾의 경우와는 다소 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. Kang⁽⁹⁾의 경우, 열전달계수가 60kW/m²-K를 기점으로 그 증가율이 둔화되는 현상이 관찰되었음에 비해 본 연구에서는 지속적으로 증가하고 있어 튜브간격에 따라 외부 튜브길이의 효과도 서로 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 하부유로가 폐쇄된 환상공간의 경우 열전달 특성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 환상공간 내부에 발생하는 기포덩어리의 형성과 기포덩어리의 교환운동에 따른 액체 교란이며 최종적인 열전달계수의 크기는 양자간의 영향 정도에 따라 결정된다.⁽⁶⁾ 튜브간격이 줄어들면 액체교란의 효과가 증가하므로 Kang과 Han⁽⁸⁾의 결과에서

살펴보는 것처럼 튜브간격 감소에 따라 열전달계수가 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 열유속이 증가하면서 기포덩어리 형성에 따른 유체 유입을 방해하여 열전달을 감소하는 정도가 증가하게 되면 열전달계수 증가율의 둔화현상이 발생하게 된다. 튜브간격이 본 연구보다 더 넓은 Kang⁽⁹⁾의 경우에는 $L_o=0.6m$ 에 대한 열전달계수 증가율이 점차적으로 둔화되는 경향을 보여주지만 튜브간격이 작은 본 연구에서는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 열전달계수의 둔화가 관찰되면서 이것이 곧바로 임계열유속(critical heat flux, CHF)으로 진행되는 것을 관찰할 수 있었다. 튜브간격이 좁아질수록 기포덩어리가 열전달에 미치는 영향이 더 민감하게 나타나므로 지속적인 열전달계수 증가 이후 갑작스런 CHF 발생으로 연결된다. CHF는 최상부 영역인 T/C1 부근에서 발생하며, 이러한 현상은 기포덩어리가 상부 영역에서 밖으로 빠져 나갈 때 유입 유체의 방해로 환상공간 내에서 일시적으로 정체하기 때문이다. 그러나 L_o 가

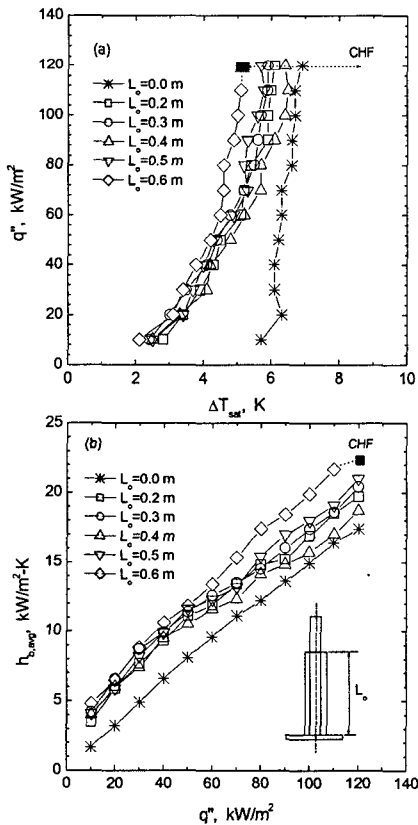


Fig. 3 Heat transfer characteristics as L_o changes

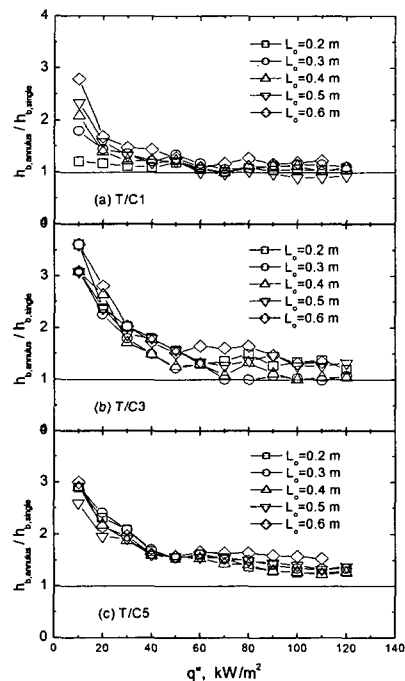


Fig. 4 Variations in local heat transfer coefficients as L_o changes

0.6m 보다 작은 다른 경우에는 CHF 발생이 관찰되지 않으며, 고열유속 영역에서도 단일튜브에 비하여 높은 열전달계수를 가진다. 특히 Kang⁽⁹⁾의 경우와 유사하게 $L_o=0.2m$ 인 경우, 전열유속 영역에서 열전달계수가 단일튜브에 비하여 향상되는 것은 물론 고열유속 영역에서 $L_o=0.6m$ 인 경우 관찰되는 CHF의 문제를 방지할 수 있는 것을 알 수 있다.

가열튜브 길이에 따른 국소열전달계수의 크기를 동일위치에서의 환상공간이 없는 단일튜브에 대한 값과 서로 비교하고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 최상부(T/C1), 중간부(T/C3), 그리고 최하부(T/C5)에 대한 결과를 L_o 의 변화에 대하여 표시하였으며, 국소열전달계수도 환상공간이 있는 경우가 단일튜브의 경우보다 더 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 열유속이 낮은 경우 L_o 의 변화가 국소열전달계수에 미치는 영향이 분명하게 관찰되며, 튜브 최상부 영역에 대한 값인 T/C1의 경

우 L_o 가 증가하면 국소열전달계수가 함께 증가하는 것을 알 수 있으며, 이러한 특성은 환상공간 내부에 발생하는 액체교란에 따른 것이다. 그러나 열유속이 증가하면서 기포덩어리에 의한 유체 유입 방해 효과가 증가하므로 열전달계수비가 급격하게 감소하고 있음을 알 수 있다.

환상공간의 틈새간격과 외부튜브길이 변화가 열전달특성에 미치는 영향을 함께 살펴보기 위하여 $s=6.35mm$ 인 Kang⁽⁹⁾의 결과와 $s=3.65mm$ 인 본 연구의 결과를 Fig. 5에 함께 나타내었다. 열유속 증가에 따른 열전달계수의 변화를 살펴보면 틈새간격이 작을수록 외부튜브 길이가 클수록 열유속 증가에 따른 열전달계수의 증가가 분명하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 전술한 것과 같이 환상공간 내부에 발생하는 액체교란 효과와 관계가 있으며, 외부 튜브길이가 증가하거나 환상공간의 틈새간격이 감소하면 환상공간 내부에서 기포덩어리가 더 강한 상하 교반운동을 하게 되고 이것이 환상공간 내부에 액체교란을 유발하는 것으로 해석된다.

4. 결 론

하부유로가 폐쇄된 환상공간($s=3.65mm$)의 외부 튜브 길이 변화가 대기압 조건하에 있는 물의 풀비동에 미치는 영향을 규명하기 위하여 다섯 가지 서로 다른 튜브길이(0.2~0.6m)에 대한 실험을 실시하고 그 결과를 단일튜브에 대한 결과와 서로 비교하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 환상공간의 존재는 외부 튜브길이의 크기와는 무관하게 단일튜브에 비하여 높은 열전달계수를 갖게 한다.
- (2) 외부튜브 길이 변화에 따른 열전달특성 변화는 열유속이 $60kW/m^2-K$ 보다 높은 경우 분명하게 관찰된다.
- (3) $L_o=0.6m$ 인 경우, 액체교란증가에 따른 열전달증가로 인해 다른 튜브길이의 경우에 비해 높은 열전달계수를 가지지만 $q''=120kW/m^2-K$ 에서 갑작스러운 CHF현상을 유발한다.
- (4) 외부 튜브길이의 감소는 환상공간이 지나는 열전달향상 효과는 그대로 유지하면서 고열유속 영역에서 발생 가능한 CHF와 같은 문제를 방지할 수 있다.

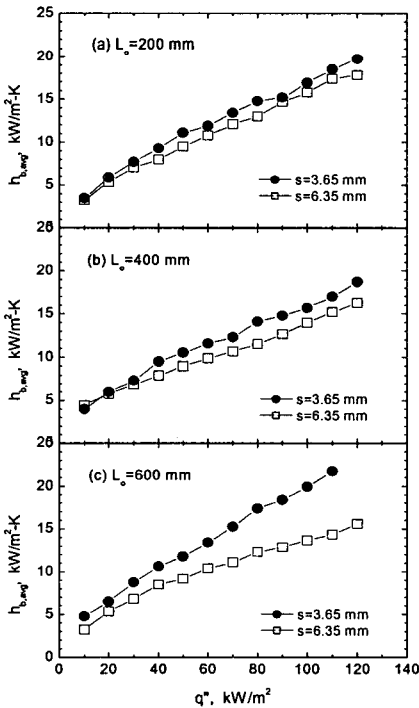


Fig. 5 Comparison of present results($s=3.65mm$) with Kang's results($s=6.35mm$)

(5) 하부유로폐쇄 환상공간을 열교환기 설계에 적용시 외부 튜브 길이를 전 가열길이의 일부로 제한함으로써 전열유속 영역에 걸쳐 단일튜브보다 높은 열전달계수를 기대할 수 있다.

후 기

이 논문은 2005학년도 안동대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Shoji, M., 2004, "Studies of Boiling Chaos: a Review," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 1105 ~ 1128.
- (2) Corletti, M.M. and Hochreiter, L.E., 1991, "Advanced Light Water Reactor Passive Residual Heat Removal Heat Exchanger Test," *Proc. of the 1st JSME/ASME Joint International Conference on Nuclear Engineering*, Tokyo, Japan, pp. 381~387.
- (3) Chung, Y.J., Yang, S.H., Kim, H.C. and Zee, S.Q., 2004, "Thermal Hydraulic Calculation in a Passive Residual Heat Removal System of the SMART-P Plant for Forced and Natural Convection Conditions," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 232, pp. 277 ~ 288.
- (4) Yao, S.C. and Chang, Y., 1983, "Pool Boiling Heat Transfer in a Confined Space," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, pp. 841 ~ 848.
- (5) Hung, Y.H. and Yao, S.C., 1985, "Pool Boiling Heat Transfer in Narrow Horizontal Annular Crevices," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 107, pp. 656 ~ 662.
- (6) Kang, M.G., 2002, "Pool Boiling Heat Transfer in Vertical Annular Crevices," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, No. 15, pp. 3245 ~ 3249.
- (7) Kang, M.G., 2001, "Nucleate Pool Boiling Heat Transfer in Vertical Annuli," *Trans. of the KSME B*, Vol. 25, No. 8, pp. 1113 ~ 1121.
- (8) Kang, M.G. and Han, Y.H., 2002, "Effects of Annular Crevices on Pool Boiling Heat Transfer," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 213, No. 2-3, pp. 259 ~ 271.
- (9) Kang, M.G., 2005, "Effects of Outer Tube Length on Saturated Pool Boiling Heat Transfer in a Vertical Annulus with Closed Bottom," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 48, No. 13, pp. 2795 ~ 2800.
- (10) Fujita, Y., Ohta, H., Uchida, S. and Nishikawa, K., 1988, "Nucleate Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux in Narrow Space Between Rectangular Spaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 2, pp. 229 ~ 239.
- (11) Passos, J.C., Hirata, F.R., Possamai, L.F.B., Balsamo, M. and Misale, M., 2004, "Confined Boiling of FC72 and FC87 on a Downward Facing Heating Copper Disk," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 313 ~ 319.
- (12) Bonjour, J. and Lallemand, M., 1998, "Flow Patterns During Boiling in a Narrow Space Between Two Vertical Surfaces," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 24, pp. 947~960.
- (13) Kang, M.G., 2001, "Hysteresis Effects in Pool Boiling of Water," *Trans. of the KSME B*, Vol. 25, No. 8, pp. 1037 ~ 1045.