

이력현상이 물의 풀비등에 미치는 영향

강 명 기*

(2000년 11월 30일 접수, 2001년 6월 15일 심사완료)

Hysteresis Effects in Pool Boiling of Water

Myeong-Gie Kang

Key Words: Pool Boiling(풀비등), Hysteresis(이력현상), Surface Condition(표면조건)

Abstract

The effect of hysteresis in saturated pool boiling of water from stainless-steel surfaces has been investigated experimentally. Several sets of test sections of different surface conditions, geometries, orientations, diameters, lengths, and water types were tested at atmospheric pressure. The experimental results show that hysteresis effects in pool boiling heat transfer are not significant, but some appreciable trends are observed in accordance with parameters change. At higher heat flux regions, the curve for heat flux decrease is shifted to the left side of the curve for heat flux increase. To clarify hysteresis in pool boiling and to give some improvement on published correlations, four empirical correlations are obtained in terms of tube diameter, surface roughness, and tube wall superheat.

기호설명

- A : 열전달 면적
- D : 튜브 외경
- h_b : 비등열전달계수
- L : 튜브 길이
- q : 공급 전력
- q'' : 열유속
- T_{sat} : 포화수 온도
- T_w : 튜브 표면 온도

그리스문자

- Δ : 차이
- ϵ : 평균 튜브 표면거칠기

1. 서론

풀비등 열전달 기구는 열교환기의 열적 성능 향상과 열제거계통(heat removal system) 설계에 있어 매우 중요한 변수로 작용하기 때문에 오랜 기간에 걸쳐서 연구되어 오고 있다. 최근 들어, 풀비등 열전달은 원자력발전소 설계 및 적용에 염두를 두고 광범위하게 연구되고 있는데 그 이유 중의 하나는 신형경수로에서 채택되는 주요 피동안전계통(passive safety system)에 설치된 일부 설비가 풀비등 현상을 수반하는 열전달을 수행하고 있기 때문이다.^(1,2)

열교환에 필요한 열전달면적의 결정과 사고 발생 및 진행동안 계통의 성능을 정확하게 평가하기 위해서는 계통에 적용 가능한 총괄열전달계수가 필요하다. 대개의 경우, 풀비등열전달계수(h_b)가 총괄열전달계수를 결정하는데 있어서 지배적인 변수로 작용하며, 최종적인 대안이 되는 경우가 많기 때문에 많은 사람들이 이에 대한 연구를 지속해오고 있다. 최근 들어 Chun과 Kang⁽³⁾

* 회원, 안동대학교 기계교육과

E-mail: mgkang@andong.ac.kr

TEL: (054)820-5483 FAX: (054)823-1766

은 기존에 발표된 폴비등 관련 상관식을 정리하고 새로운 실험 결과를 첨가하여 튜브형 열교환기 설계에 적용 가능한 상관식을 수직 및 수평 튜브에 대하여 개발하였다.

열유속을 증가할 때와 감소할 때 발생하는 동일 튜브 과열도에 대한 열전달량의 차이인 이력현상(hysteresis)에 대한 기존 연구는 크게 가열면과 주변 액체에 대한 연구로 분류할 수 있다. Stralen 과 Sluyster⁽⁴⁾는 대기압 상태인 수조 내부에 설치된 백금선을 가열할 때와 냉각할 때의 이력현상을 실험적으로 연구하였다. Bergles와 Chyu⁽⁵⁾는 매끈하거나 다공질인 구리 재질의 가열면으로부터 물이나 냉매로 폴비등이 이루어질 때 이력현상에 대하여 살펴보았으며, 다공질 표면일 때 이력현상이 뚜렷하게 관찰되는 결과를 발표했다. Marto 와 Lepere⁽⁶⁾는 아주 거칠게 가공한 표면으로부터 주변 냉매로 폴비등열전달이 발생할 때 이력현상에 대하여 연구하였다. 한편 Park 과 Bergles⁽⁷⁾는 1.65 mm 의 스테인레스강 튜브와 R-113 의 조합에 대해 초음파 교란의 영향을 살펴보았는데, 이력현상이 나타남을 알 수 있다. Maracy 와 Winterton⁽⁸⁾은 천이비등 영역에서 열유속을 감소할 때가 열유속을 증가할 때보다 열전달계수가 감소하는 결과를 발표했다.

기존의 연구들을 종합해보면, 이력현상은 가열면과 액체의 조합에 따라 달라지며 동일 재질의 가열면인 경우라도 형상에 따라 변화할 수 있음을 알 수 있다. 천이영역을 제외한 나머지 결과들에서 공통적으로 나타나는 경향은 핵비등이 시작되는 순간 과열도($\Delta T = T_w - T_{sat}$)의 급감현상으로 나타나며 이것은 비등 초기에 기포가 생성되기 어려움에 따른 것으로 해석되고 있다. 한편, 이들 결과들은 주로 표면이 아주 거칠거나 액체가 표면을 잘 적시는 경우에 대한 것이 거의 대부분으로 특정 분야에 한정되어 있는 것을 알 수 있는데, 이러한 경향은 상술한 것과 같은 표면과 액체의 조합일 때 이력현상을 효과적으로 관찰할 수 있기 때문인 것으로 해석된다.

기존의 연구 경향과 약간의 결과에서 살펴본 것처럼 물과 매끈한 표면에 대한 폴비등열전달시 열유속의 증가와 감소에 따른 이력현상은 거의 없을 것으로 예측되지만, 그에 대한 연구를 수행하여 이력현상의 정도와 주요 매개변수에 대한 영향을 살펴보는 것은 나름대로 가치가 있다고

보여진다. 이러한 연구는 특히, 가열과 냉각과정이 모두 다 중대사고(severe accident)로의 전이와 연결되는 피동형 열교환기 설계에 있어 매우 중요한 의미를 갖는다.

따라서, 본 연구에서는 매끈한 표면을 갖는 열교환기 튜브를 구성하는 여러 가지 매개변수(외경, 형상, 길이, 표면상태, 설치방향)와 물의 조합에 대한 폴비등열전달시 발생하는 이력현상에 대하여 실험적으로 살펴보고자 한다. 이러한 연구를 통하여, 이들 매개변수들이 미치는 영향과 전반적인 경향을 파악하는데 일차적인 목적이 있으며 나아가 이들 자료를 활용하여 보다 최적화된 열교환기 설계를 위한 자료를 확보하는 것에 최종적인 목적이 있다. 부가적으로, 이러한 목적 달성을 위한 한 가지 방편으로 튜브에 대한 실험결과를 이용하여 열유속의 증가와 감소에 대한 실험적 상관식을 수평 및 수직 구조에 대해 새롭게 제시함으로써 보다 정확한 열전달계수와 경향을 예측하는데 활용할 수 있도록 하였다.

2. 실험장치 및 과정

실험을 위한 수조와 시편에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 수조, 열교환 시편, 물 및 동력공급설비, 그리고 시편표면과 물 온도를 측정하고 분석하는 설비로서 구성되어 있다. 수조는 부식을 방지하기 위해 스테인리스강으로 제작되었으며, 다양한 조건에 대한 실험값을 획득하기 위해 서로 크기가 다른 세 개의 수조를 사용하였다. 수조들에 대한 주요 치수는 Table 1에 나타낸 것과 같으며, 수조의 전면에는 사진촬영과 비등 현상 관찰을 위하여 강화유리를 설치하였다. 열교환용 시편은 스테인리스강 재질의 튜브와 평판을 사용하였으며, 니크롬선으로 구성된 전기 저항체를 내부에 장착하고 전기적인 절연을 한 후 사용하였다. 튜브 표면의 온도를 측정하기 위하여 3~5 개의 지름이 1.5 mm 인 K-형식 열전대(수조 1 의 경우)와 T-형식 열전대(수조 2와 3의 경우)를 가열 표면에 설치하였다. 보다 정밀한 표면 온도 측정을 위하여 열전대 끝부분을 대략 10 mm 정도 수직으로 굽힌 후 표면에 등간격으로 접합하였다. 수조 내부 물의 온도는 수조 내부 높이에 따라 설치한 열전대로서 측정하였다. 튜브와 수조 1 의 내부에 설치한 열전

Table 1 Water tank size

Tank	Size, mm		
	Width (a)	Depth (b)	Height (c)
1	790	860	1000
2	600	600	800
3	600	300	600

Table 2 Test sections and test matrix

Heated Tube					
Orientation	D (mm)	Surface condition	L (mm)	Water Type	Water Tank
Horizontal	19.05	#800 polished	530.5	boiled	1
Vertical	19.05	#800 polished	530.5	boiled	1
Horizontal	19.05	#2000 polished	530.5	boiled	1
Vertical	19.05	#2000 polished	530.5	boiled	1
Horizontal	19.05	#3000 polished	530.5	boiled	1
Vertical	19.05	#3000 polished	530.5	boiled	1
Horizontal	9.7	#800 polished	300.0	boiled	1
Vertical	9.7	#800 polished	300.0	boiled	1
Horizontal	9.7	#3000 polished	300.0	boiled	1
Vertical	9.7	#3000 polished	300.0	boiled	1
Horizontal	14.0	#800 polished	300.0	boiled	1
Vertical	14.0	#800 polished	300.0	boiled	1
Horizontal	25.4	#800 polished	300.0	boiled	1
Vertical	25.4	#800 polished	300.0	boiled	1
Horizontal	25.4	#3000 polished	300.0	boiled	1
Vertical	25.4	#3000 polished	300.0	boiled	1
Horizontal	19.05	#3000 polished	100.0	boiled	1
Horizontal	19.05	#3000 polished	530.5	distilled	1
45° Inclined	19.05	#800 polished	530.5	distilled	1
Vertical	25.4	drawn	570.0	boiled	2

Heated plate					
Orientation	width (mm)	depth (mm)	Surface condition	Water type	Water tank
Horizontal	175	70	hot rolling	boiled	3
Vertical	175	70	hot rolling	boiled	3

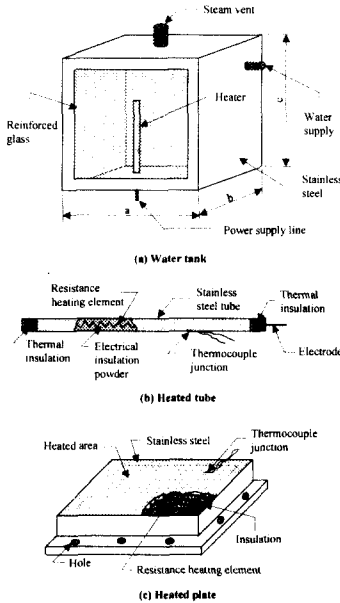


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus and test sections

대에 대한 상세한 위치는 Kang⁽⁹⁾의 문헌에 나타난 것과 같으며, 다른 수조와 시편에 대한 것도 유사한 방식으로 설치하였다.

열교환용 시편의 주요 변수들이 폴비동열전달에 미치는 복합적인 영향을 결정하기 위해 Table 2와 같이 다양한 조합을 준비하였다. 주요 변수로는 튜브외경 ($D=9.7\sim 25.4\text{mm}$), 튜브길이 ($L=100, 300, 530.5, 570\text{mm}$), 표면조건(사포가공, 인발, 열간압연), 설치방향(수평, 45° 경사, 수직), 그리고 물(비등수, 증류수)이 있다. 가열 표면은 세 가지 방식을 거쳐 준비하였다. 첫째는 사포(#800, #2000, #3000)를 이용해 길이 방향으로 일정하게 가공하는 방식으로 광위상간섭계(PMI, phase measuring interferometer)로 측정된 표면거칠기(ϵ)는 15.1~60.9 nm의 값을 가진다. 둘째는 인발가공한 표면을 사용하는 것이다.

세 번째 방법은 열간 압연한 것을 사용하는 것으로 평판형 시편에 적용하였다. 물의 영향을 살펴보기 위하여 일반적으로 실험에서 많이 사용되는 증류수와 실제 현장에서의 사용 조건과 유사할 것으로 생각되는 비등수를 사용하였다. 특히, 비등수는 수조 내부에 일정 높이로 물을 채운 후 물에 포함되어 있는 공기 등을 제거하기 위하여 100 °C 포화상태에서 약 30 분간 가열한 후 실험에 사용하였다.

보다 정확성을 기하기 위하여 실험에 대한 시편 제작 및 측정, 그리고 주변 환경에 따른 오차를 검토하였다. 표면거칠기에 대하여 발생하는 오차범위는 $\pm 5.0 \text{ nm}$ 정도이다. 그리고, 열유속(q'') 측정을 위하여 사용한 전압계와 전류계의 오차 범위가 각각 $\pm 0.5\%$ 이므로 각각의 읽음값으로부터 전력을 구하면 $\pm 1.0\%$ 의 오차 범위를 가진다. 또한, 온도는 열전대 오차($\pm 0.5\%$), 계기 및 측정오차($\pm 0.1\%$), 열전대 접합에 따른 오차($\pm 0.1\%$)를 합하여 최대 $\pm 0.7\%$ 오차범위를 가진다. 두 값을 이용하여 비등열전달계수에 대한 불확실성을 분석하면 열유속이 170 kW/m^2 일 때 최대 $\pm 17\%$ 의

오차범위를 가진다.

실험과정은, 대기압 상태 하에 있는 수조 내부에 물을 채운 후 예열히터를 이용하여 포화상태까지 가열하였다. 포화상태에 도달 후 공기 등을 제거할 목적으로 약 30 분 정도 추가적인 가열을 수행한 후 예열히터의 전원을 차단하고 시편의 열유속을 변화시키면서 시편의 온도를 측정하였다. 모든 온도는 표면 온도가 정상상태에 도달하였을 때 (시편에 따라 3~10분 정도 소요) 열전대에 대한 값을 데이터 처리 장치(DAS, data acquisition system)를 사용하여 측정하였다. 보다 정밀한 온도의 산출을 위하여 측정값들에 대한 산술평균을 취하여 그 열유속에 대한 온도로서 결정하였다. 하나의 시편에 대한 전 열유속 범위에서의 실험이 끝나면 시편을 교환하여 동일한 과정을 거쳐서 실험을 수행하였으며, 이러한 전 실험 과정은 실험값 재현성을 확인하기 위하여 적어도 2~3 회 반복 실험을 수행하였다.

전기적으로 가열한 튜브 표면에서의 열유속은 공급전력(q)을 열전달면적(A)으로 나눈 것이다.

3. 실험적 상관식의 개발

Table 2 에 나와 있는 조합에 의해 실험한 결과 얻어진 값 중 표면거칠기에 대한 값이 나와 있는 튜브 구조를 이용하여 수평 및 수직 구조에 대한 실험적 상관식(empirical correlation)을 개발하였다. 상관식 개발에는 모두 1,966 개의 실험값이 사용되었으며, 수평 구조에 대한 것은 1,076 개(열유속 증가: 594, 열유속 감소: 482)이며, 수직구조에 대한 것은 890개(열유속 증가: 463, 열유속 감소: 427)이다. 상관식 개발을 위하여 통계 처리프로그램(SAS, statistical analysis system)을 사용하여 지수와 상수를 결정한 바, 다음과 같은 식을 얻었다. 주요 변수인 $D, \epsilon, \Delta T$, 그리고 q'' 에 대한 단위는 각각 mm, nm, K, 그리고 kW/m^2 이다.

- 수평튜브구조(열유속 증가)

$$q'' = h_b \Delta T = 0.022 \epsilon^{0.062} \Delta T^{5.290} / D^{1.252} \quad (1)$$

Table 3 Mean and standard deviations of the error obtained by correlations

Orientation	Heat flux	Mean of error*	Standard deviation of error
Horizontal tube	combined	-0.81	16.25
	increase	1.14	15.50
	decrease	1.79	13.48
Vertical tube	combined	1.45	12.67
	increase	2.06	10.94
	decrease	2.24	11.24

* Error = Calculated heat flux - Measured heat flux

- 수평튜브구조(열유속 감소)

$$q'' = h_b \Delta T = 0.015 \epsilon^{0.079} \Delta T^{5.664} / D^{1.400} \quad (2)$$

- 수직튜브구조(열유속 증가)

$$q'' = h_b \Delta T = 0.012 \epsilon^{0.570} \Delta T^{4.566} / D^{1.070} \quad (3)$$

- 수직튜브구조(열유속 감소)

$$q'' = h_b \Delta T = 0.012 \epsilon^{0.668} \Delta T^{4.820} / D^{1.376} \quad (4)$$

열유속 증가와 감소를 고려하여 새롭게 개발한 상관식의 개선점을 확인하기 위해 열유속의 증가와 감소를 고려하지 않고 개발된 Chun 과 Kang⁽³⁾의 결과와 서로 비교하고 그 결과를 Table 3 에 나타내었다. Table 3 에 의하면, 열유속 증가와 감소를 고려한 상관식을 사용하여 계산한 열유속 값과 측정값의 오차에 대한 표준편차가 증가와 감소를 고려하지 않은 경우보다 5~17% 정도 작게 나오므로 실험값을 보다 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 설치방향에 따른 이력현상

시편의 설치 방향이 바뀔 때 발생하는 이력현상을 살펴보기 위해 설치방향을 수평, 수직, 그리고 45° 경사지게 바꾸어 가면서 열유속 증가와 감소에 따른 영향을 조사하고 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 세 경우 모두 열유속 증·감에 따른

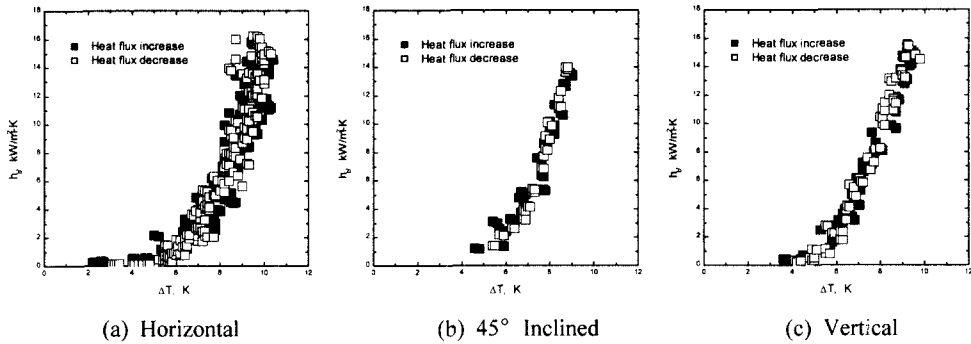


Fig. 2 Hysteresis in pool boiling with different tube orientation ($D=19.05\text{mm}$, $\epsilon =60.9\text{nm}$, $L=530.5\text{mm}$)

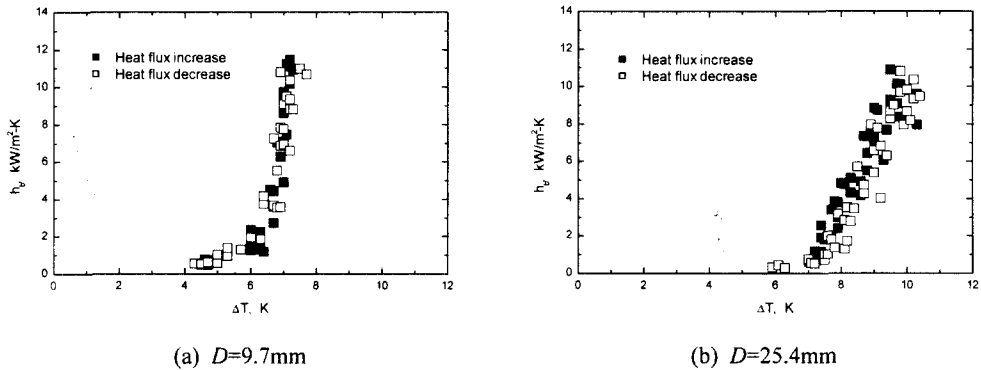


Fig. 3 Hysteresis in pool boiling with different tube diameter (horizontal, $\epsilon =15.1\text{nm}$)

이력현상은 거의 없는 것으로 관찰된다. 설치 방향의 변화에 따른 이력현상의 변화는 거의 없는 것으로 생각되지만 기포의 교란에 의해 열전달계수가 많이 변하는 수직구조⁽⁹⁾에서 약간의 이력현상을 살펴볼 수 있으며 튜브과열도(ΔT)가 높을 때 열유속이 감소하는 경우가 열유속이 증가하는 경우에 비해 열전달계수가 다소 높게 측정된다.

4.2 튜브외경 변화에 따른 이력현상

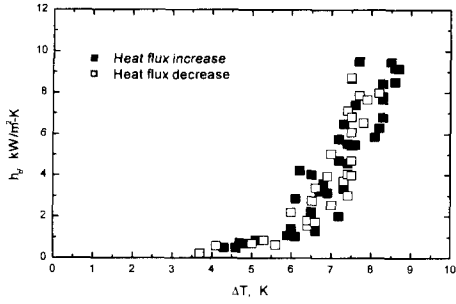
튜브외경 변화에 따른 이력현상을 살펴보기 위해 외경이 9.7mm와 25.4mm 인 튜브를 수평으로 설치한 경우에 얻어진 결과를 서로 비교하고 Fig. 3에 나타내었다. 실험 결과를 살펴보면 열유속 증·감에 따른 뚜렷한 이력현상은 관찰되지 않는다. 단지, 외경이 25.4mm일 때 튜브과열도가 낮아지면 열유속이 감소하는 방향에 대한 그래프가 열유속이 증가하는 경우에 비하여 열전달계수가 낮은 것을 알 수 있다.

4.3 튜브 표면거칠기에 따른 이력현상

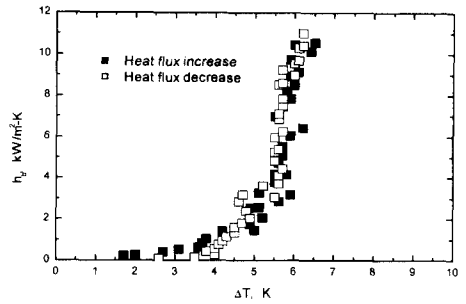
튜브 표면거칠기에 따른 영향을 살펴보기 위하여 사포로 가공된 시편 중 매끈한 것과 거친 것에 대한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 거칠기 효과는 수직구조에서 보다 강하게 나타나므로⁽³⁾ 수직으로 설치된 9.7mm 외경의 튜브를 사용하였다. 표면이 거친 경우에 이력현상이 어느 정도 뚜렷하게 나타나고 있음을 관찰할 수 있다. 튜브과열도가 높은 영역에서는 열유속이 감소하는 경우가 열유속이 증가하는 경우보다, 튜브과열도가 낮은 영역에서는 열유속이 증가하는 방향이 열유속이 감소하는 방향보다 약간 높은 비등열전달계수를 갖는 것을 알 수 있다.

4.4 수직튜브의 길이에 따른 이력현상

수직튜브 구조에서 길이 변경에 따른 이력현상을 살펴보기 위해 두 가지 서로 다른 튜브 길이에 대한 실험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 결과를 살펴보면, 튜브길이가 변화해도 뚜렷한 이력

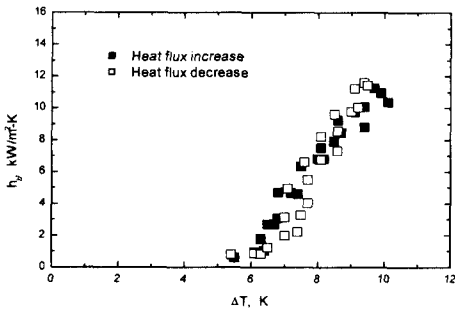


(a) $\epsilon = 15.1\text{nm}$

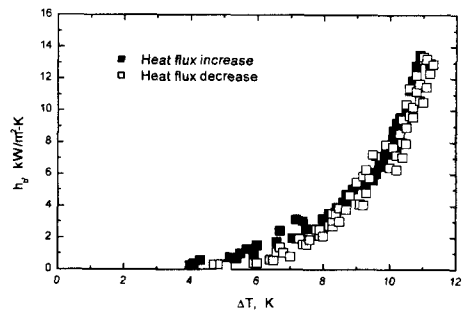


(b) $\epsilon = 60.9\text{nm}$

Fig. 4 Hysteresis in pool boiling with different surface roughness (vertical, $D=9.7\text{mm}$)

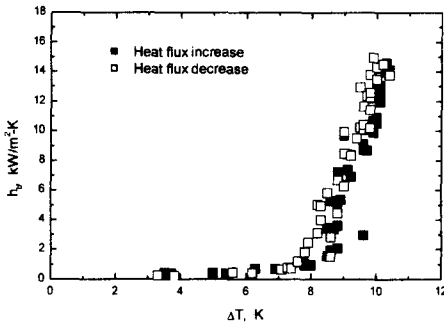


(a) $L=100\text{mm}$

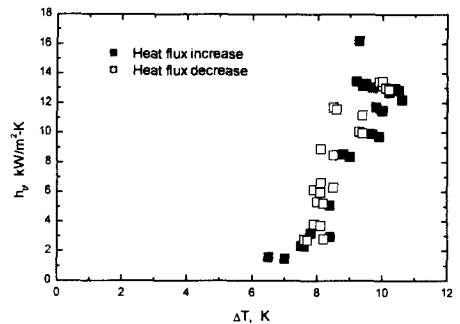


(b) $L=530.5\text{mm}$

Fig. 5 Hysteresis in pool boiling with different tube length(vertical, $\epsilon = 15.1\text{nm}$, $D=19.05\text{mm}$)



(a) Boiled water



(b) Distilled water

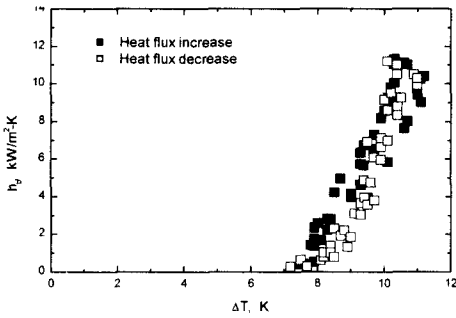
Fig. 6 Hysteresis in pool boiling with different water type(horizontal, $\epsilon = 15.1\text{nm}$, $D=19.05\text{mm}$)

현상이 나타나지는 않음을 알 수 있다. 그렇지만, 두 가지 튜브 길이(100, 530.5 mm)에 있어 공통적으로 튜브과열도가 증가할수록 열유속이 감소하는 경우에 대한 그래프의 기울기가 점차 증가하면서 열유속이 증가하는 경우에 대한 곡선의

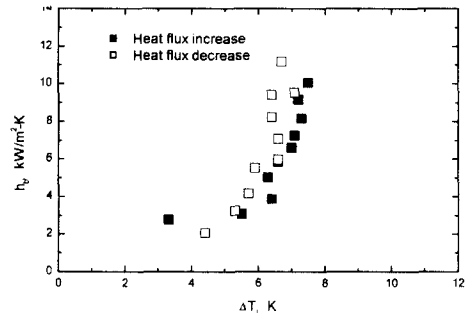
좌측으로 실험값이 이동하고 있음을 관찰할 수 있다.

4.5 물의 종류에 따른 이력현상

실험에 사용한 물의 종류가 이력현상에 미치는

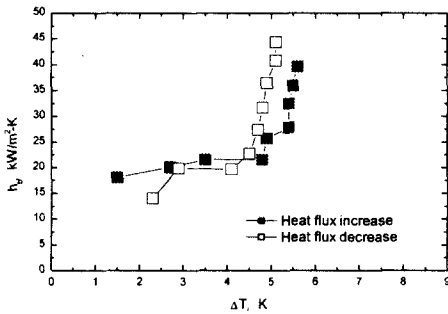


(a) Polished($\epsilon = 15.1\text{nm}$) tube

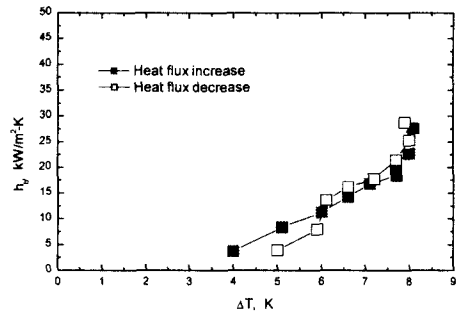


(b) Drawn tube

Fig. 7 Hysteresis in pool boiling with different surface manufacturing(vertical, $D=25.4\text{mm}$)

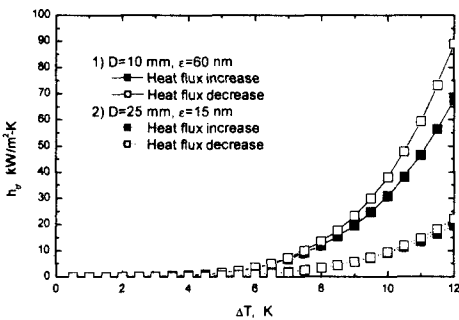


(a) Horizontal

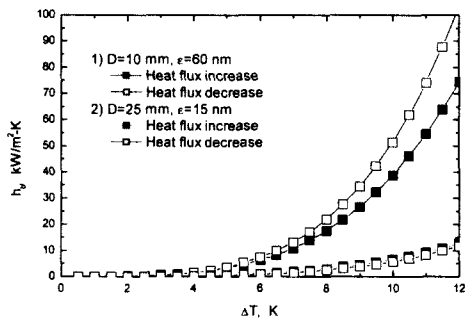


(b) Vertical

Fig. 8 Hysteresis due to heat flux increase and decrease for the plates



(a) Horizontal



(b) Vertical

Fig. 9 Calculated heat transfer coefficient versus tube wall superheat

영향을 살펴보기 위하여 수평으로 설치된 튜브를 이용하여 비등수와 증류수에 대한 열전달계수를 측정하고 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 두 가지 경우 모두 뚜렷한 이력현상은 관찰되지 않았지만 튜브과열도가 높은 영역에서는 열유속이 증

가하는 경우와 감소하는 경우에 대한 실험값이 약간 차이가 나고 있음을 알 수 있다.

4.6 표면 가공방법에 따른 이력현상

표면 가공방법을 달리 할 때 그에 따른 이력현

상의 변화를 관찰하기 위해 사포로 가공한 경우와 인발가공한 경우 두 가지를 선정하였으며 그에 대한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 두 가지 경우 모두 열유속을 감소시키는 경우에서 비등곡선의 기울기가 열유속을 증가시키는 경우보다 더 큰 것을 알 수 있다. 튜브과열도가 낮은 영역에서는 열유속을 감소시키는 경우에 대한 열전달계수가 열유속을 증가시키는 경우에 대한 것보다 다소 낮은 값을 갖는데, 튜브과열도가 줄어들면서 그 차이가 줄어들고 있는 것을 알 수 있다.

4.7 평판에 대한 이력현상

Fig. 8은 평판에 대한 이력현상을 나타내고 있다. 평판은 이력현상 효과를 보다 분명하게 나타낼 수 있도록 열간압연한 거친 표면을 사용하였으며, 열유속은 튜브 구조의 1.5~3 배 정도 값인 230 kW/m^2 정도까지 올려 실험을 수행하였다. 그림을 살펴보면 이력현상이 어느 정도 분명하게 나타나고 있음을 알 수 있는데, 그 현상은 수평 구조에서 보다 잘 관찰되고 있다. 이것은 수평 평판 구조의 경우 주변 기포와 액체의 교란에 의한 간섭을 거의 받지 않기 때문으로 해석할 수 있겠다. ΔT 가 5.0K 근방인 경우일 때 열유속이 증가하는 경우와 감소하는 경우에 대한 h_b 의 값이 각각 25 와 $45 \text{ kW/m}^2\text{-K}$ 이다. 따라서, h_b 에 대한 불확실도($\pm 17\%$)를 고려하더라도 동일한 튜브과열도에 대해 $8.1 \text{ kW/m}^2\text{-K}$ 의 비등열전달계수 차이가 발생하고 있다. 한편, 하부에서 생성되는 기포의 영향을 많이 받는 수직구조에서는 튜브 구조에서와 같이 이력현상이 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

4.8 상관식을 이용한 해석

보다 분명한 경향성을 살펴보기 위하여 새롭게 개발한 상관식을 이용하여 열전달이 가장 잘되는 조건(표면이 거칠고 튜브 외경이 작은 경우)과 가장 안되는 조건(표면이 매끈하고 튜브 외경이 큰 경우)에 대하여 표면과열도 변화에 따른 열전달계수의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에 의하면 튜브과열도가 증가할수록 열유속 증가와 감소에 대한 두 그래프 사이의 격차가 생기며, 튜브과열도가 낮은 영역에서는 열유속이 감소하는 경우가 낮은 열전달계수를 갖는 것으로 나타나 실험에서 얻어진 경향을 잘 나타내고 있는 것을

알 수 있다.

4.9 결과에 대한 고찰

튜브과열도가 높은 영역에서 열유속이 감소하는 경우가 보다 큰 열전달계수를 갖는 원인은 일단 활성화된 비등핵은 그 상태를 계속 유지하려고 하기 때문으로 해석된다. 이에 대한 것은 기존 문헌⁽¹⁰⁾에서도 발견할 수 있으며, 본 연구결과와 경우에도 적절한 해답이 될 수 있을 것으로 생각한다.

튜브과열도가 낮은 경우, 열유속 감소에 대한 곡선의 열전달계수가 더 낮은 것에 대한 경향은 다공질 표면과 물의 조합에 대한 Bergles와 Chyu⁽⁵⁾의 폴리등실험, Freon-11을 이용한 Abdelmessih 등⁽¹⁰⁾의 강제대류 실험, 그리고 백금선을 이용한 Stralen과 Sluyter⁽⁴⁾의 폴리등 실험에서 찾아볼 수 있지만 본 연구에서 사용한 조합들에 대한 결과는 아직까지 보고된 바 없으며, 기존의 연구 결과 역시 결과의 나열에 그치고 특별한 해석을 시도하지 않았다. 이것에 대한 하나의 원인으로 핵비등 현상을 지속하면서 그대로 비등곡선의 기울기를 유지하려고 하는 일종의 열적관성(thermal inertia) 현상을 고려해 볼 수 있겠다. 일반적으로 상변화를 수반하는 경우 준안정(metastable)현상⁽¹¹⁾이 나타나게 되는데, 본 결과의 경우 새로운 평형을 찾아가기 위한 일종의 과도 현상으로 고찰해 볼 수 있을 것으로 생각된다. 표면의 과열도가 감소하면 이러한 현상은 없어지며, 단상자연대류 곡선에 상응하는 새로운 평형을 형성하게 된다.

한편, 표면을 잘 적시는 냉매와 같은 액체와 다공질과 같은 아주 거친 가열면을 사용하는 경우 열유속 증가시 관찰되곤 하는 핵비등 시작(ONB, onset of nucleate boiling)점 부근에서의 온도급감 현상은 관찰되지 않고 있다. 이러한 경향은 매끈한 구리 튜브와 물의 조합을 이용한 Bergles와 Chyu⁽⁵⁾ 그리고 백금선과 물의 조합을 이용한 Stralen과 Sluyter⁽⁴⁾의 문헌에서 찾아볼 수 있는데, 공통되는 현상으로는 매끈한 가열면과 물의 조합인 경우 이러한 현상이 거의 관찰되지 않는다는 것이다. 이에 대한 원인으로서는 물과 매끈한 표면의 경우 표면으로부터 물의 분리가 상대적으로 용이하기 때문에 ONB 점 부근에서의 온도 급감과 같은 현상이 나타나지 않는 것으로

이해를 해볼 수 있겠다. 한편, 실험에 대한 결과를 그래프로 표시한 Fig. 2~Fig. 8 에서는 비등곡선의 기울기가 급격하게 변화하는 부분을 ONB 점으로 고려할 수 있다. 이 점을 중심으로 기울기가 작은 쪽은 초기비등영역에 속하며, 기울기가 큰 쪽은 핵비등영역으로 구분할 수 있다.

5. 결 론

스테인리스강 재질로 된 여러 가지 다양한 시편과 물의 조합을 사용하여 풀비등열전달시 발생하는 이력현상에 대하여 실험적인 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 내렸다.

(1) 열유속 증가와 감소에 따른 뚜렷한 이력현상은 관찰되지 않았지만 매개변수에 따른 경향성은 살펴볼 수 있었다.

(2) 이력현상은 주변 기포의 영향을 상대적으로 적게 받는 수평 튜브의 경우 보다 분명하게 나타나고 있으며, 튜브과열도가 증가하면 열유속을 감소하는 경우가 열유속을 증가하는 경우보다 큰 열전달계수를 갖는 것을 확인하였다.

(3) 튜브과열도가 낮아지면 열유속이 감소하는 경우가 열유속을 증가하는 경우보다 낮은 열전달계수를 갖는 것을 확인하였다.

(4) 열유속을 증가하는 경우, 표면을 잘 적시는 액체와 아주 거친 표면의 경우 핵비등 시작점 부근에서 관찰되곤 하는 표면과열도의 갑작스러운 변동은 관찰되지 않았다.

후 기

본 연구는 안동대학교 기성희의 학술연구조성비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Corletti, M. M. and Hochreiter, L. E., 1991, "Advanced Light Water Reactor Passive Residual Heat Removal Heat Exchanger Test," *Proceedings of the 1st JSME/ASME Joint International Conference*

on Nuclear Engineering, Tokyo, Japan, pp. 381~387.

(2) Kang, M. G., 1998, "Experimental Investigation of Tube Length Effect On Nucleate Pool Boiling Heat Transfer," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 25, No. 4-5, pp. 295~304.

(3) Chun, M. H. and Kang, M. G., 1998, "Effects of Heat Exchanger Tube Parameters on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer," *Trans. ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 120, pp. 468~476.

(4) van Stralen, S. J. D. and W. M. Sluyter, 1969, "Investigations on the Critical Heat Flux of Pure Liquids and Mixtures under Various Conditions," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 12, pp. 1353~1384.

(5) Bergles, A. E. and Chyu, M. C., 1982, "Characteristics of Nucleate Pool Boiling From Porous Metallic Coatings," *ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 279~285.

(6) Marto, P. J. and Lepere, V. J., 1982, "Pool Boiling Heat Transfer From Enhanced Surfaces to Dielectric Fluids," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 292~299.

(7) Park, K. A. and Bergles, A. E., "Ultrasonic Enhancement of Saturated and Subcooled Pool boiling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, No. 3, pp. 664~667.

(8) Maracy, M. and Winterton, R. H. S., 1988, "Hysteresis and Contact Angle Effects in Transition Pool Boiling of Water," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, No. 7, pp. 1443~1449.

(9) 강명기, 2000, 튜브 설치 방향이 풀비등 열전달에 미치는 영향, 대한기계학회논문집 B권, 제 24권 제1호, pp. 143~151.

(10) Ginoux, J. J., 1978, *Two-Phase Flows and Heat Transfer with Application to Nuclear Reactor Design Problems*, Hemisphere Publishing Corporation, pp. 103~105.

(11) Hahne, E. and Grigull, U., 1977, *Heat Transfer in Boiling*, Hemisphere Publishing Corporation, pp. 453~469.