

# 이중 동심관 유동에서 핵비등 시발점의 영향인자에 대한 실험적 연구

송 주 한\*, 김 경 천\*\*, 이 승 홍\*\*,  
박 주 환\*\*\*, 석 호 천\*\*\*

## An experimental study on the effect of parameters for onset of nucleate boiling in concentric annuli flows

J. H. Song\*, K. C. Kim\*\*, S. H. Lee\*\*,  
J. H. Park\*\*\*, H. C. Suk\*\*\*

**Key words** : Onset of Nucleate Boiling(ONB, 핵비등의 시작점), Concentric annulus(동심 환형관), Wall superheat(가열면 과열도), Subcooling(과냉도), Reynolds number(레이놀즈 수) Surface curvature (표면곡률)

### ABSTRACT

An experimental investigation on the incipience of nucleate boiling in forced flow of water is performed as a verification and extension of previous analysis. The effects of the subcooling, Reynolds number and surface curvature on the onset of nucleate boiling(ONB) in a concentric annulus flow channel with smooth inner heating surface is investigated experimentally. Through flow visualization, the boiling phenomenon was observed directly and the experimental results were examined to find ONB heat flux. The results show that the variation of heat flux at ONB is increased linearly as the Reynolds number and subcooling are increased. The effect of surface curvature is very great specially for a small radius when radius of the inner heating tube is increased, the heat flux at ONB is almost inversely increased for the range of this investigation. It is found that the effect of convex surface curvature on ONB heat flux is very significant for a small radius

### 기 호 설 명

$\Delta T_{sat}$  : 벽면 과열도 [ $^{\circ}\text{C}$ ] ( $T_w - T_{sat}$ )  
 $\Delta T_{sub}$  : 입구과냉도 [ $^{\circ}\text{C}$ ] ( $T_{sat} - T_{fluid-in}$ )  
 $q''_{ONB}$  : 핵비등 시발점에서의 열유속 [ $\text{kW/m}^2$ ]  
 $\alpha$  : 반경비 ( $R_i/R_o$ )  
 $R_i$  : 내관의 반지름 [mm]

### 1. 서 론

비등현상은 핵발전소의 원자로, 냉동시스템의 증발기나 각종 열교환기등 산업전반에서 광범위하게 이용된다.

비등현상이 공학자들의 상당한 관심과 연구를 통해 많은 공학적 응용에 활용되는 것은 상(相) 변화 시에 잠열에 의한 열전달이 매우 크기 때문이다.

특히, 비등의 시작점(Onset of Nucleate Boiling, ONB)에 대한 연구에서 비등의 시발에 영향을 미치는 요인으로는 유동장의 기하학적 형상과 유체

\* 부산대학교 대학원

\*\* 부산대학교

\*\* 한국 원자력 연구소

의 온도, 속도, 압력 등의 시스템적인 요인과 유체의 성질로부터 기인한 요인, 고체면의 상태 등의 미시적인 요인 등으로 알려져 있다.<sup>[1]~[4]</sup>

Rohsenow<sup>[3]</sup>는 열경계층 내에서 온도분포는 선형적이고 벽면으로부터 기포의 평형온도의 등온선까지의 거리가 임계기포반경과 같다고 가정하여 그래프해법에 의해 핵비등의 시작점의 열유속 ( $q''_{ONB}$ )에 대해서 다음 식을 제안하였다.

$$(\Delta T_{sat})_{ONB} = 0.556 \left[ \frac{q''_{ONB}}{1082 \rho^{1.156}} \right]^{0.463 \rho^{0.0231}} \quad (1)$$

Davis<sup>[4]</sup>는 Begles 와 Rohsenow의 이론적 해석을 수정하여 핵비등의 시작점의 열유속 ( $q''_{ONB}$ )에 대하여 과열방정식을 이용하여 새로운 수학적 모델을 제시하였다.

$$q''_{ONB} = \frac{k_f \lambda_g \rho_g}{8 \sigma T_{sat}} [(T_w - T_{sat})_{ONB}]^2 \quad (2)$$

이 식은 유체의 물성치를 고려하였으며 높은 압력이나 낮은 표면장력의 계에 대해서 유효하다.

Lee<sup>[5]~[7]</sup> 등은 강제대류 비등열전달에 관한 이론적 연구에서 표면 볼록곡률(surface convex curvature)의 영향을 고려하여  $q''_{ONB}$ 를 다음의 함수로 표현하였으며 내관의 무차원화된 반경( $Ri^*$ )이 작을수록  $q''_{ONB}$ 가 증가한다고 하였다.

$$q''_{ONB} = F(Ri^*, \alpha, R_b, Re, Pr, \theta) \quad (3)$$

본 연구에서는 동심 환형관(concentric annulus tube)에서 강제대류 비등 열전달에 관한 실험을 통하여 완전히 발달된 난류유동에서 핵비등의 시작점(ONB)에 영향을 주는 인자들 중 Reynolds 수, 입구의 물의 과냉도( $\Delta T_{sub}$ ), 가열부 표면의 볼록곡률(convex curvature)을 변화시켜 이들이 ONB에 미치는 영향을 파악하고, 비등현상의 가시화를 통해 비등현상에 대한 이해를 높이는 것을 목적으로 연구를 수행하였다

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 물을 작동유체로 하는 환형관 내부의 강제 대류 열전달 실험에 사용한 실험 장치이다.

본 실험 장치는 직경 3인치의 스텐레스 강관과 연결구들로 순환 루프 시스템을 이루며 15HP 전기 구동 모터를 사용하는 원심펌프(1750 RPM)로 유체를 순환시킨다. 작동유체는 주 라인(main loop line)의 유량 계측장치, 예열장치, 시험부, 응축 열교환기와 기체 제거장치(degassing chamber)를 통과하여 펌프로 돌아오게 된다. 유량 계측장치로는 venturi관들과 연결된 수은 마노미터와 시험부 입구에 설치된 flow meter를 통해 입구의 속도를 측정할 수 있다. 유량은 펌프의 출구쪽에 설치된 주 라인밸브와 바이패스밸브, 예열장치 출구의 바이패스 밸브에 의해 조절할 수 있다. 예열장치에는 스텐레스강 케이스속에 15 kW 전기히터 2개가 사용되어 합계 30 kW 용량의 전기 가열장치가 설치되어 있다.

Test Model의 외관은 Pyrex(내열유리)을 사용하여 비등현상을 관찰할 수 있도록 제작하였다.

Test Model은 각기 다른 내관의 반지름을 가진 3개의 Model을 제작하여 실험하였으며 각 Test Model의 사양은 Table.1에 나타내었다.

균일한 Roughness 조건을 위하여 직독식 표면 거칠기 측정기(Mitutoyo, SV-400)로 측정된 결과 평균 표면거칠기는 0.5~1.2 $\mu$ m 이었다.

전기공급은 내부관 양단에 있는 동봉을 통해 공급하는데 Test Model에 최대 200 kW 전력의 공급이 가능하며 전압은 Test Model의 두지점에서 측정하였고 전류는 전류계로 측정하였다.

실험을 수행하기 전 작동 유체속의 기체를 제거하기 위해 증압기 상부 가스의 압력을 약 1 기압 정도로 유지하면서, 예열 장치와 응축 열교환기

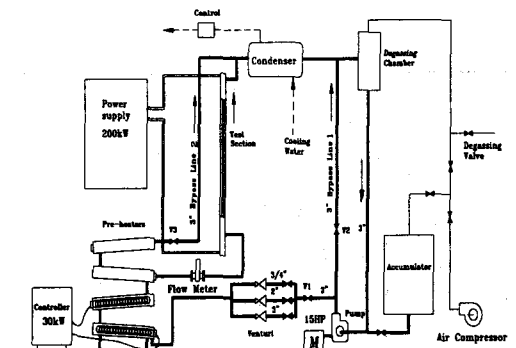


Fig. 1 Schematic diagram of heat transfer loop

Table 1. Test Model specification

Test Section	Model I	Model II	Model III
내관의 외경	25.4 mm	13.1mm	6.35 mm
외관의 내경	50.8 mm	26.2 mm	12.7 mm
가열부의 길이	174 cm	98 cm	57 cm
반경비 ( $\alpha = R_i/R_o$ )	0.5	0.5	0.5
가열부의 재료	SUS304	SUS304	SUS304

를 이용하여 비등과 응축을 동시에 하는 작업을 반복하여 기체가 기체 제거장치에 모이게 한 후 탈기(degassing)하여 실험에 들어간다.

Test model의 가열부 표면의 온도는 가열부 내부 벽면의 온도를 원통에서의 1차원 전도방정식을 이용하여 표면의 온도를 계산하였다.<sup>[8]-[9]</sup>

### 3. 실험결과

#### 3.1 가시화 실험결과

Fig. 3는 Model 1( $R_i = 12.70\text{mm}$ )에서 Reynolds수 120000( $V = 1.35 \text{ m/sec}$ ), 입구과냉도  $13^\circ\text{C}$ 일 때, 동심 환형관 내에서 비등 양상을 디지털 카메라(4000 frame/sec)로 촬영한 것으로 Fig. 2의 비등선도에 따른 각지점의 비등양상을 가시화 하였다.

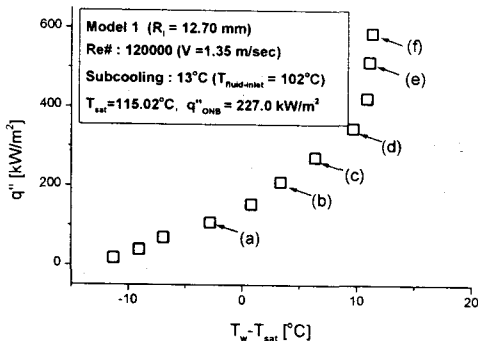


Fig. 2 The boiling curve of Reynolds number 120,000 and subcooling  $13^\circ\text{C}$  in Model 1.

가열부 표면의 온도( $T_w$ )가 포화온도( $T_{sat}$ )이하인 (a)점에서는 기포의 생성이 관찰되지 않았다. 열

유속이 ONB점( $q''_{ONB} = 227.0 \text{ kW/m}^2$ )이하의 (b) 점( $q'' = 210.65 \text{ kW/m}^2$ )에서 가열부 표면에서 부분비등(partial boiling)이 발생하였고, ONB점을 지나면서 열유속이 증가함에 따라 가열부 표면에서의 발생하는 기포가 증가하면서, 완전발달 비등영역(Fully Developed Boiling)인 (e)과 (f)점에서는 가열부 표면에서 기포가 격렬하게 발생하는 것을 관찰할 수 있었다

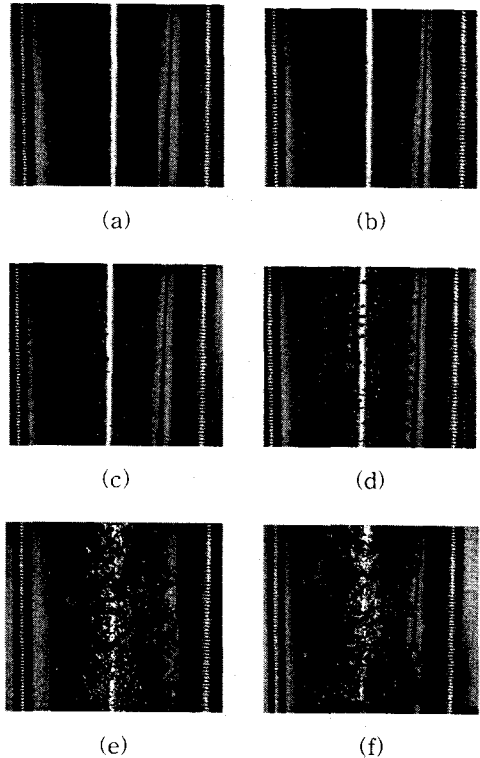


Fig. 3 Flow visualization results at Model 1,  $Re = 120000$ ,  $\Delta T_{sub} = 13^\circ\text{C}$

#### 3.2 ONB점의 판정방법

Bowring<sup>[11]</sup>은 과냉핵비등의 시발점에 대한 정의에 있어서 비등 시작 전의 단상 액체영역(Forced Convection)선도와 완전발달 비등(Fully Developed Boiling)선도의 교차점을 비등의 시발점으로 제시하였는데 본 연구에서는 이 방법으로 ONB점에서의 열유속( $q''_{ONB}$ )을 추정하였다.

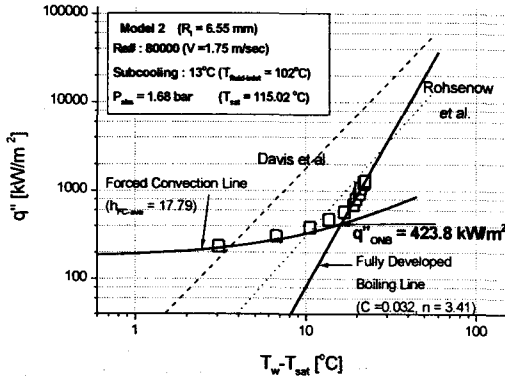


Fig. 4 The onset of nucleate boiling heat flux (Model 2, RE = 80000, Subcooling = 13°C)

Fig. 4는 Model 2 ( $R_i=6.55$  mm)의 Reynolds 수 120000, 과냉도 13°C에서의 적용예를 보여준다. 본 연구에서는 가열부의 반지름이 각기 다른 3가지 Model에 대해서 Reynolds수와 유체의 입구과냉도( $\Delta T_{sub}$ )를 변화시킨 24가지 실험조건에서 실험을 수행하였으며, 각 실험조건에서의  $q''_{ONB}$ 를 Table. 2에 나타내었다.

Table. 2 Experiment Result of  $q''_{ONB}$

MODEL	Reynolds Number	Subcooling		
		13°C	20°C	30°C
		$q''_{ONB}$ [kW/m²]	$q''_{ONB}$ [kW/m²]	$q''_{ONB}$ [kW/m²]
1	40000	66.0	106.5	185.4
	80000	156.1	209.0	350.6
	120000	227.0	455.7	616.7
2	40000	235.5	333.4	456.2
	80000	423.8	499.3	687.8
	120000	623.0	763.8	998.8
3	80000	1079.3	1432.0	1910.4
	120000	1613.1	2137.5	2739.0

ONB 예측식 식(1)과(2)를 실험결과와 비교해 본 결과, 시험부의 반지름이 큰 영역(Model 1)에서는 Davis의 상관식이 실험결과와 근접함을 보였고, 시험부의 반지름이 작은 영역(Model 2, Model 3)에서는 Rohsenow의 상관식이 더 근접함을 보였다

### 3.3 Reynolds 수가 ONB에 미치는 영향

Fig. 5는 실험된 세가지의 Model중에서 Model 2에 대해서 Reynolds수 변화에 따른  $q''_{ONB}$ 를 나타내었고, Fig 6은 세가지 입구과냉도 조건중에서 ( $\Delta T_{sub} = 13^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}$ ) 입구과냉도 13°C일 때 Reynolds수의 변화에 따른  $q''_{ONB}$ 를 나타내었다.

실험결과를 살펴보면 Reynolds수의 변화에 의한 ONB point에서 열유속( $q''_{ONB}$ )은 동일한 시험부 반지름( $R_i$ )과 입구과냉도에 대해서 일정한 직선적인 변화의 경향을 나타내면서 입구과냉도와 시험부의 반지름( $R_i$ )의 변화에 밀접한 영향을 받는 것을 알 수 있다.

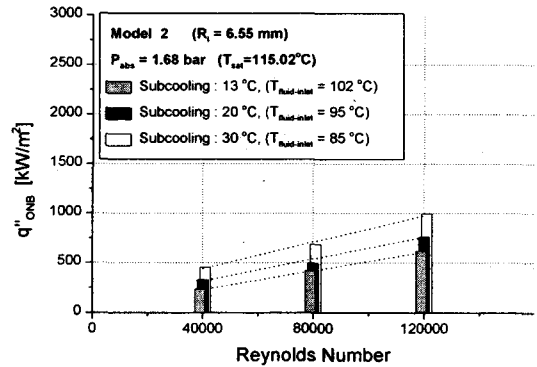


Fig. 5  $q''_{ONB}$  .vs. Reynolds number for various subcooling at Model 2

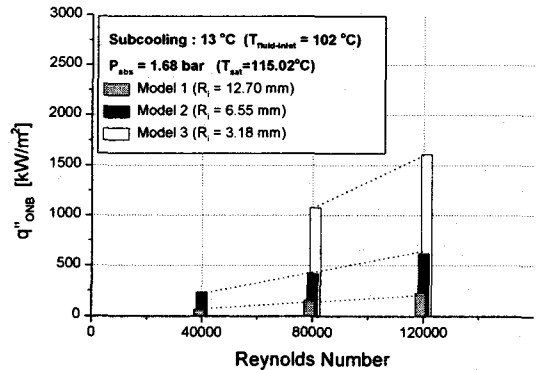


Fig. 6  $q''_{ONB}$  .vs. Reynolds number for various  $R_i$  at subcooling 13 °C

### 3.4 입구 과냉도가 ONB에 미치는 영향

Fig. 7은 Model 1에서 입구과냉도의 변화에 따른  $q''_{ONB}$ 를 나타내었고, Fig.8은 실험된 3가지 Reynolds 수 조건( $Re=40000, 80000, 120000$ )중에서 Reynolds수가 80000인 경우에 입구과냉도의 변화에 따른  $q''_{ONB}$ 를 나타내었다.

실험결과를 살펴보면 앞서 분석했던 Reynolds수를 변화시켰을 때의 경향과 매우 유사하며, ONB point에서 열유속( $q''_{ONB}$ )은 입구과냉도의 변화에 대하여 일정한 직선적인 변화의 경향을 나타내면서 Reynolds수와 시험부의 반지름( $R_i$ )의 변화에 밀접한 영향을 받는것을 알 수 있다.

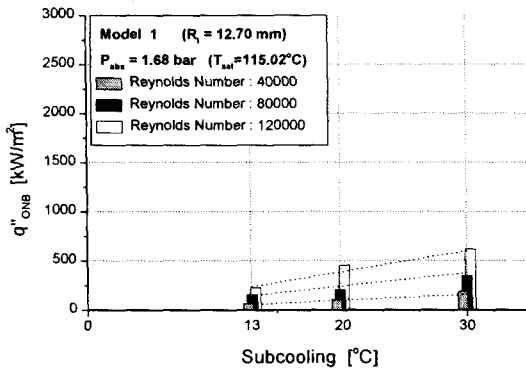


Fig. 7  $q''_{ONB}$  vs. subcooling for various Reynolds number at Model 1

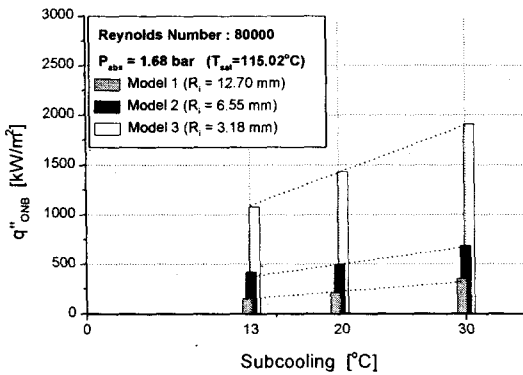


Fig. 8  $q''_{ONB}$  vs. subcooling for various  $R_i$  at  $Re = 80000$

### 3.5 표면의 곡률이 ONB에 미치는 영향

Fig. 9는 Reynolds수 120000에서 시험부의 반지름( $R_i$ ) 변화에 따른  $q''_{ONB}$ 를 나타내었고, Fig. 10은 입구과냉도 30°C에 대해서 시험부의 반지름( $R_i$ )변화에 따른  $q''_{ONB}$ 를 나타내었다.

실험결과를 살펴보면 시험부의 가열 원관의 반지름(볼록곡률)의 변화에 대해서  $q''_{ONB}$ 의 변화경향은 앞서 분석한 Reynolds수를 변화시켰을 때와 입구과냉도를 변화시켰을 때처럼 비례하여 증가하는 경향과는 달리 반비례하여 감소하는 경향을 나타내었고, 이것은 표면의 곡률이 작은 경우에 곡률의 변화에 대해서  $q''_{ONB}$ 가 매우 큰 영향을 받는 것을 의미한다.

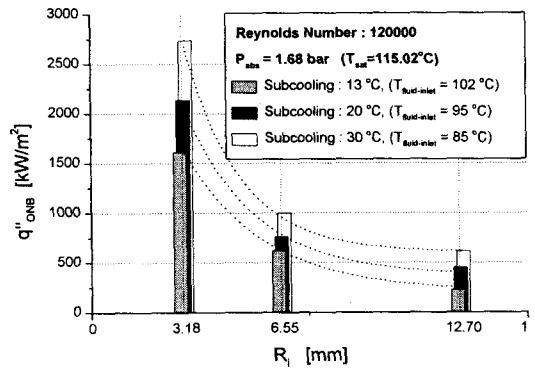


Fig. 9  $q''_{ONB}$  vs.  $R_i$  for various subcooling at  $Re = 120000$

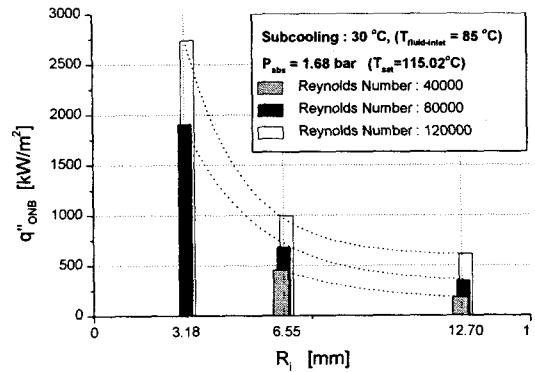


Fig. 10  $q''_{ONB}$  vs.  $R_i$  for various Reynolds number at subcooling 30 °C

즉, 가열 표면의 곡률이 작을 경우에는 표면곡률의 변화는  $q''_{ONB}$ 에 대해서, Reynolds수와 입구 과냉도의 변화보다  $q''_{ONB}$ 에 더 큰 영향을 미친다고 판단되어 진다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 강제대류 과냉각상태의 물이 동심 이중관의 환형 유동 채널에서 내관이 가열되어 그 외부 표면에서 비등 열전달 현상이 일어날 때, 가열부 외부의 표면의 볼록곡률(convex curvature), Reynolds수, 유체의 입구의 과냉도의 변화에 따른, 반경비( $\alpha$ )가 0.5인 동심환형관 수직상향 유로에서 과냉 핵비등에서 시발점(ONB point)의 열유속( $q''_{ONB}$ )에 미치는 영향에 대한 연구를 통해서 실험 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동일한 표면의 곡률과 유체의 입구과냉도 조건에서 Reynolds수를 변화시켰을 때, Reynolds수가 증가하면  $q''_{ONB}$ 도 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타 내었다.
2. 동일한 표면의 곡률과 Reynolds수의 조건에서는 유체의 입구의 과냉도를 변화시켰을 때, 유체의 입구과냉도가 증가하면  $q''_{ONB}$ 는 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다.
3. 동일한 Reynolds수와 유체의 입구과냉도 조건에서 가열 표면의 곡률을 변화시켰을 때, 표면의 곡률이 감소하면  $q''_{ONB}$ 는 거의 반비례하여 증가하는 경향을 나타내었다.
4. Reynolds수, 유체의 입구과냉도의 변화는  $q''_{ONB}$ 에 영향을 주는 중요한 요인이지만, 특히 가열 표면의 곡률의 변화는 곡률이 작은 경우에  $q''_{ONB}$ 에 대해서 가장 크게 영향을 주는 요인으로 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 한국 원자력 연구소(KAERI)의 지원을 받아 이루어진 연구 결과의 일부이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Bowring. R. W., 1962, "Physical Model Based on Bubble Detachment and Calculation of Steam Voidage in the Subcooled Region of a Heated Channel", OECD Halden Reactor Project Report HPR-10.
- [2] Hsu, Y. Y., 1962, "On the Size Range of Active Nucleation Cavities on a Heating Surface," J. Heat Transfer, pp. 207-216.
- [3] Bergles, A. E., and Rohsenow, W. M., 1964, "The Determination of Forced-Convection Surface Boiling Heat Transfer," J. Heat Transfer, pp. 365-372.
- [4] Davis, E. J., and Anderson, G. H., 1966, "The Incipience of Nucleate Boiling in Forced Convection Flow," J. AIChE, vol. 12, pp. 774-780.
- [5] Kim, K. C., Lee, Y., and Ma, E., 1990, "Effect of Transverse Convex Curvature on Turbulent Flow and Heat Transfer," First International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, pp. 202-207.
- [6] Kim, M. W., 1996, "Effect of Transverse Convex Surface Curvature on Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer," Ph.D. Thesis, Univ. of Ottawa.
- [7] Kwon, S. Y. et al., 1998, "Analytical Study on Onset of Nucleate Boiling due to Transverse Convex Surface Curvature," Proceedings of KSME, pp. 188-193.
- [8] Lee, S. H. and Han, S., 1999, "Introduction to Numerical Heat Transfer," PNU, p. 63
- [9] Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 1996, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," 4th Edition, John Wiley & Sons., pp. 106-110