

LSVF 혼합날개를 이용한 6×6 봉다발의 부수로에서의 열수력적 특성에 관한 실험적 측정

서정식, 배경근*, 최영돈†

고려대학교 대학원, *LG마이크론(주), **고려대학교 기계공학과

Experimental Measurement of the Thermal-hydraulic Characteristics of subchannels in 6×6 rod bundles using LSVF mixing vanes

Jeong-sik, Seo, Kyoung-keun Bae, Young-don Choi*

Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

**LG micron 407, Megavalley, 799 Gwanyang, Dongan-Gu, Anyang-City, Gyeonggi-Do, Korea*

†Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

ABSTRACT: In present study, the thermal-hydraulic characteristics of the subchannels are investigated as measuring single-phase heat transfer coefficients and the cross sectional velocity field using LDV in the downstream of support grid in 6×6 rod bundles. Support grid with mixing vanes make enhancing heat transfer in rod bundles by generating turbulent flow. But this turbulent flow only is reserved in a short distance. Support grid with LSVF mixing vanes keep the turbulent flow a long distance. The experiments are performed at the nominal Reynolds number 30,000 and 50,000. The heat transfer coefficients are measured using heated and unheated copper sensor. In this study, the comparison of local heat transfer coefficients for LSVF mixing vane and split mixing vane is represented.

Key words: LSVF(대형 2차 와류), rod bundles(연료봉 다발), Heat transfer(열전달), mixing vane(혼합날개), sub channel(부수로)

기 호 설 명

D_h : 부수로 수력직경, $4A/P$ [m]
 Nu_D : 완전히 발달된 영역의 누셀트수
 Nu : 누셀트수
 h_D : 완전히 발달된 영역의 열전달 계수[W/m²K]
 h : 열전달계수 [W/m²K]
 k : 열전도계수 [W/mK]
 Re : Reynolds수, $\frac{UD_h}{\nu}$
 T_s : 구리센서의 표면온도 [°C]

T_m : 냉각수 혼합평균온도 [°C]
 q : 대류열전달량[W]
 A_s : 구리센서의 표면적

하첨자

s : 표면온도
 m : bulk온도

†Corresponding author

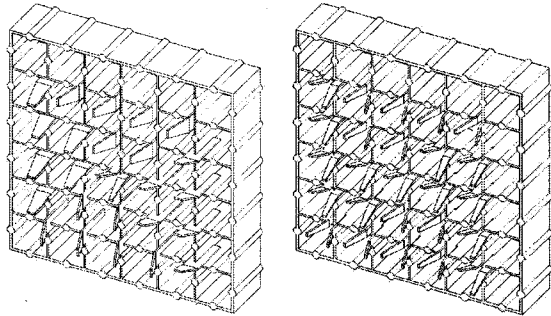
Tel.: +82-2-926-5908; fax: +82-2-926-9290

E-mail address: ydchoi@korea.ac.kr

1. 서론

연료봉 집합체 내의 지지격자는 연료봉 다발의

간격을 일정하게 유지시켜 냉각재의 유로를 확보



(a)LSVF mixing vanes (b)Split mixing vanes
Fig. 1 Schematics of space grid

하고 유체의 유인진동으로 인한 연료봉의 손상을 방지해 줄 뿐만 아니라 유동혼합을 촉진하여 열전달의 성능을 증진시킨다.

유동혼합효과(flow mixing effect)은 지지격자 직 후에서 가장 활발하게 일어나며 하류 방향으로 진행할수록 빠르게 감소한 후 일정한 수준의 유동 혼합 상태를 유지하게 된다. 따라서 연료봉 다발의 기하학적 형상과 열발생률이 동일한 조건이라면 전체적인 열전달 성능은 지지격자의 유동 혼합에 의해서 좌우된다. 열전달 성능을 향상시키기 위한 냉각수의 흐름 방향을 조절하고 혼합할 수 있도록 지지격자에 혼합날개를 부착하여 와류(vortex)를 생성함으로써 발생하는 난류에 의해 열전달의 성능을 증가시키는 방법이다. Fig. 1는 기존에 사용되고 있는 split 형태의 혼합날개와 본 연구에서 새롭게 도입한 날개형태인 LSVF 혼합날개의 개략적으로 나타낸 것이다. 기존의 split혼합날개가 발생시키는 난류성분의 경우, 그 난류의 길이척도(length scale)가 작아 난류에 의한 열전달 증진효과가 발생 후, 짧은 거리에 제한되고, 횡류(lateral flow)에 의한 교차류(cross flow)의 효과가 적기 때문에 부수로 간의 열전달 증진효과를 크게 기대할 수 없다. 이러한 split 혼합날개의 단점을 극복하기 위해서 대형 2차 와류를 생성시키고, 교차류를 증가시킨 새로운 개념의 LSVF(Large Scale Vortex Flow) 혼합날개를 지지격자에 부착하였고 지지격자에서 떨어진 거리에 따른 국부열전달계수(Local heat transfer coefficient)를 측정하여 기존의 split 혼합날개가 사용되었을 때의 국부적 열전달 계수와 비교하였다.

두 혼합날개에 의한 열전달 계수를 비교하기

위하여 구리센서(copper sensor)^(5,6)를 이용하여 냉각수의 온도와 연료봉의 표면온도를 측정하여 국부열전달 계수를 측정하였다.

split 혼합날개가 부착된 지지격자의 하류에서 생성된 선회류(swirl flow)에 의한 유동에 초점을 맞추어 연구되었다. Yang 과 Chung⁽¹⁾은 실험적으로 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 이용하여 split 혼합날개를 부착한 지지격자의 하류에서의 난류강도와 속도를 측정하였다. Blum and Oliver⁽²⁾는 선회류가 없는 내부유동 보다 선회류가 있는 내부유동이 열전달효과를 증진시킨다는 것을 발견하였다. Yao⁽³⁾등은 연료봉 다발에서 지지격자의 하류에서 국부적 열전달을 위한 두 가지 상관관계를 개발하였다. 첫 번째는 경계층의 재 발달과 지지격자에 의해서 변하는 유로의 단면적에 대한 관계이다. 두 번째는 날개를 부착한 지지격자의 하류의 열전달에서 경계층에 의한 효과를 위한 관계를 개발하였다.

Park⁽⁴⁾은 LSVF 혼합날개를 부착한 연료봉 다발에서의 열전달 성능을 CFD(computational fluid dynamics)를 이용하여 해석하여 지지격자에 split 혼합날개를 부착하였을 경우와 LSVF 혼합날개를 부착하였을 경우의 열전달 성능의 효과를 비교하였다.

Armfield^(5,6)등은 구리센서(copper sensor)를 이용하여 여러 가지 모양의 지지격자와 split 혼합날개를 부착한 지지격자를 사용하였을 경우의 지지격자 하류에서의 열전달 성능을 측정, 비교하였다.

Split 혼합날개에 의한 효과는 지지격자의 하류 방향에서 $5D_h$ 까지 급격하게 감소하는 지수 형태의 경향을 나타내었으나 LSVF 혼합날개에 의한 열전달 효과는 직선 형태로 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 단일 부수로에서만 선회류(swirl flow)를 생성시키는 기존의 split 혼합날개가 부착된 방식에서 벗어나 부수로 전체에 대하여 지지격자에 부착된 LSVF 혼합날개의 각도를 일정한 방향으로 조정하여 발생된 대형 2차 와류는 단일부수로의 와류에 비해 서서히 소멸되기 때문에 기존의 펌프 구동력 변화없이 열전달 성능을 증진시킬 수 있으며 단일 부수로 내의 유동이 아닌 부수로 전체에 해한 유동을 일으키므로 교차류(cross flow)가 비약적으로 확대되어 유체의 온도 균등화에도 큰 기여를 하여 열전달

성능의 향상을 나타내는 것으로 원자로의 건전성 확보에 도움을 줄 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

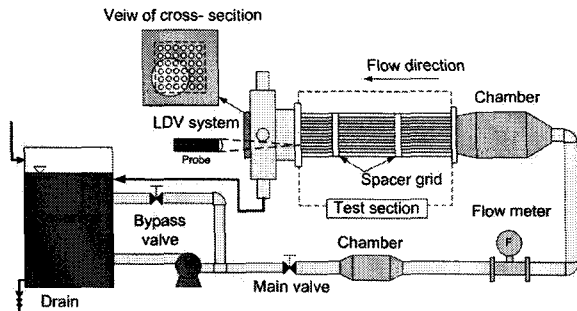


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

본 실험 장치는 Fig. 2와 같이 저장탱크, 펌프, 유량계, 유량제어밸브, 측정부 등으로 구성된 순환루프로 이루어져 있다, 측정부의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Geometric parameter

Parameter	Value
Area of housing(mm)	140×140
Rod Diameter(mm)	15.88
Hydraulic Diameter(mm)	21.17
Rod Pitch(mm)	21.8

15.88mm의 6×6 연료봉이 유입부에서 30Dh 떨어진 부분에 설치된 첫 번째 혼합날개가 부착된 지지격자와 첫 번째 지지격자(space grid)에서 40Dh 떨어진 곳에 설치된 두 번째 혼합날개가 부착된 지지격자에 의해서 21.80mm의 일정한 피치(pitch)를 가지고 위치하게 된다. 냉각수의 역할을 하는 정수된 물은 15-HP 펌프를 이용하여 실험장치를 순환하게 한다. 이 순환된 냉각수의 양은 유량조절 밸브와 유량계를 사용하여 레이놀즈수(30,000, 50,000)에 맞춰 조절된다.

유량계는 터빈유량계 [TRIMEE model명 : TP100S4C1211R2, 오차 : ±0.5%]를 사용한다. 또한 안정된 유동이 측정부에 유입되도록 하기 위하여 유입부 전에 유동을 균일하게 만들어 주는

정류상자를 설치하였으며, 펌프를 지난 다음 정류상자를 설치하여 안정된 유량이 공급되도록 하였고 실험부를 지난 냉각수는 저장탱크로 회수되는 순환루프로 이루어져있다. 그리고 루프를 순환할 때 펌프에서 발생하는 열과 관에서의 마찰 열에 의한 냉각수의 온도를 일정하게 제어하기 위하여 칠러(chiller)를 사용하였다.

2.2 국부 열전달측정

열전달계수 측정은 $Re=30,000, 50,000$ 에서 6×6 연료봉 다발 중 Fig. 3의 9개의 연료봉에 설치된 구리센서(copper sensor)를 사용하여 측정된다. 설치된 봉의 번호는 Fig. 3에 나타내었다. 그리고, 실험에 사용된 구리센서의 개략도는 Fig. 4와 같다.

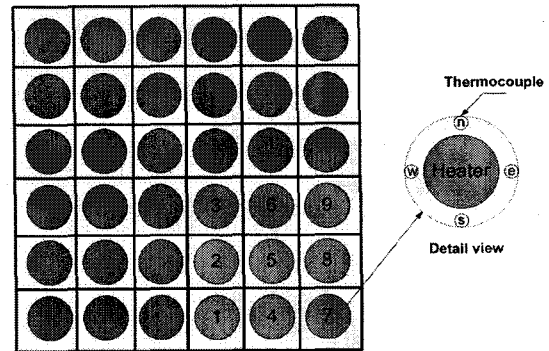


Fig 3. Schematic of cross test section

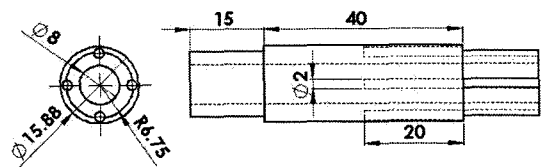


Fig. 4 Drawing of heated copper sensor
구리센서는 15.88mm의 지름을 가지며 총길이 70mm이다. 구리의 총 길이 중 양쪽으로 15mm 씩은 결합되는 부분이고 나머지 40mm부분은 열원으로 사용되는 카트리지 히터(cartridge heater)가 정 중앙에 위치하고 있어 일정한 열유속의 열원으로 작용할 수 있도록 하였다. 또한 구리 표면의 온도를 측정하기 위하여 구리센서의 정중앙에 원주 방향으로 90도 간격으로 T형 열전대(thermocouple)를 설치하기 위하여 구리 부분에 2mm의 홈을 설치하였다. 그리고 구리센서의 양쪽 끝으로 발생할 수 있는 열손실을 최대한 줄이

기 위하여 테프론으로 만든 마개를 이용하여 단열 처리하였고, 구리센서의 양쪽 끝에는 스테인레스(stainless steel) 봉이 결합될 수 있도록 하였다. 구리센서가 결합된 한쪽 끝의 스테인레스 봉의 길이를 변화시키면 가열되는 구리센서의 위치를 변화시킬 수 있는데, 이 원리를 이용하면 가열되는 위치를 변화시킬 때 마다 실험장치의 분해 없이 실험을 실행할 수 있고, 유동의 방해받지 않고 구리 표면의 온도를 측정할 수 있는 장점이 있다. 카트리지히터에 의한 구리표면에서의 일정한 열유속(heat flux)을 가하기 위하여 이번 실험에 사용되는 9개의 히터를 각각 제어하기 위하여 공급하는 전원에 개별 전원 공급장치를 통해서 조절해 줌으로써 일정한 열유속을 구리의 표면에 전해주도록 제어하였다. 이때의 전압의 측정은 디지털멀티미터[fluke 모델명 : #110, 오차 : $\pm 1.0\%$]를 사용하여 측정하였다.

$$h = q/A_s(T_s - T_m) \quad (1)$$

을 이용하여 열전달계수를 구하는데, 이를 위해서는 T_s 와 T_m 을 측정하여야 한다. T_m 를 측정하기 위해서 카트리지히터가 설치되지 않은 구리센서를 사용하였다.

본 실험에서 측정된 누셀트 수는 식(2)와 같으며, 식(1)를 식(2)에 대입하면, 식(3)이 나온다. 식(3)에 대한 불확실도를 계산하면 이때의 불확실도식은 식(4)와 같이 표현된다.^(9,10)

$$Nu = \frac{hA}{k} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{q}{(T_s - T_m)k} = \frac{q}{\Delta T k} \quad (3)$$

$$u_{Nu} = \sqrt{\left(\frac{\partial Nu}{\partial \Delta T} \delta \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial k} \delta k\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial q} \delta q\right)^2} \quad (4)$$

이때, 실험조건에서 불확실도는 다음과 같다.

$$u_h = \pm 1100 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad u_k = \pm 0.0022 \text{ W/mK}$$

$$u_q = 5.8 \text{ W}, \quad u_{Nu} = \pm 31 (\pm 4.5\%)$$

3. 실험 결과

3.1 열전달 실험 결과

지지격자의 후류부분에서 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, $30D_h$ 떨어진 위치에 대하여, 각 거리에서 봉표면의 온도와 완전 발달하였을 때의 온도를 측정하여, 국부 열전달계수를 구하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 LSVF 혼합날개를 장착한 지지격자와 split혼합날개를 장착한 지지격자에 대하여, 레이놀즈수 50,000에서 유동방향으로 진행하면서, 무차원화된 누셀트 수의 변화를 나타낸 것이다.

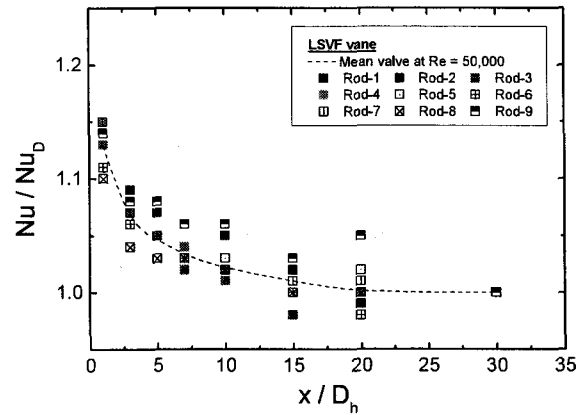


Fig. 5 Nusselt number normalized by hydrodynamically fully developed Nusselt number for the grid with LSVF vane at $Re = 50,000$

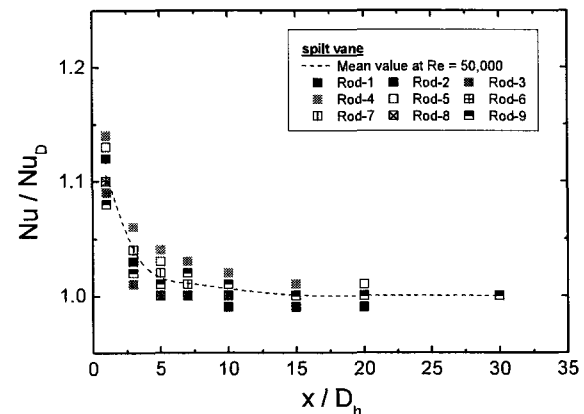


Fig. 6 Nusselt number normalized by hydrodynamically fully developed Nusselt number for the grid with split-vane at $Re = 50,000$

LSVF 혼합날개 경우, 기존의 split 혼합날개에 비해서, $10D_h$ 이상에서도 열전달촉진 효과가 나타나는 것을 알 수 있다. split혼합날개의 경우 5

D_h 를 지난 후에 급격하게 감소하는 것을 나타내고 있으나, LSVF 혼합날개는 완만한 곡선을 가지고, 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 레이놀즈 수 30,000에서 무차원화된 누셀트 수의 유동방향의 변화를 나타낸 것이다. 레이놀즈 수 50,000보다는 좀 그 차이가 작으나, LSVF 혼합날개의 경우가 split 혼합날개에 비하여 완만히 감소되는 것이 보인다.

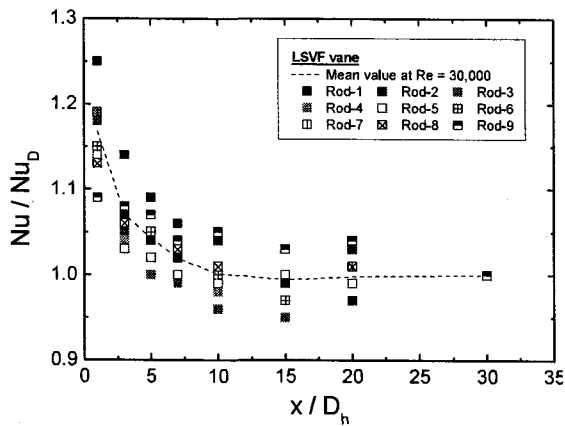


Fig. 7 Nusselt number normalized by hydrodynamically fully developed Nusselt number for the grid with LSVF at Re = 30,000

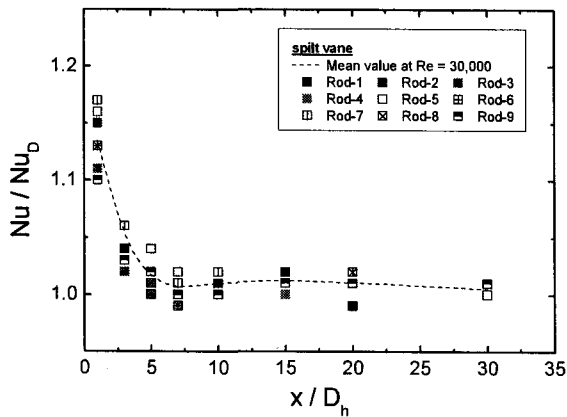


Fig. 8 Nusselt number normalized by hydrodynamically fully developed Nusselt number for the grid with split-vane at Re = 30,000

Fig. 9는 측정단면에서 무차원화된 누셀트 수의 평균값을 축 방향에 따라 분포를 나타낸 것이다. 레이놀즈 수 50,000에서는 split혼합날개와 LSVF 혼합날개의 차이가 확연히 나타나지만, 레이놀즈 수 30,000에서는 LSVF 혼합날개의 효과가 작게

나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 국부열전달계수의 감쇠는 Yao⁽³⁾등이 파워식의 함수로 나타내어진다고 하였으며, Amfield^(5,6)등은 감쇠함수의 일반식을 식(5)로 제안하였다.

$$\frac{Nu}{Nu_0} = 1 + C_1 \epsilon_s^2 e^{-\alpha z/D_h} \quad (5)$$

그러나, 본 연구에서 사용된 LSVF 혼합날개의 경우, 유로막힘비(Flow blockage ratio)가 split 혼합날개와 같으나, 대형와류를 발생시키는 형태이기 때문에 기존의 상관식을 가지고 표현하기가 어렵다.

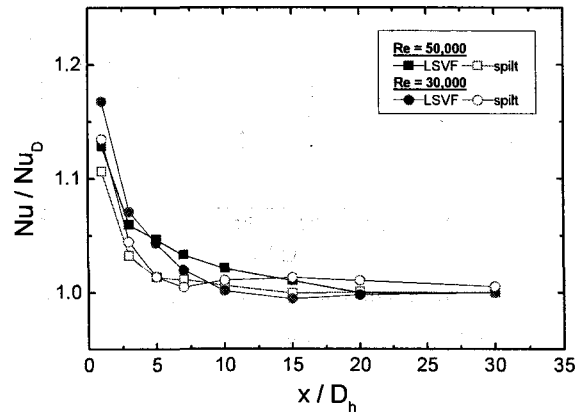


Fig. 9 Comparison of the Nusselt number normalized for the grid with split-vane and LSVF at Re = 30,000 and 50,000

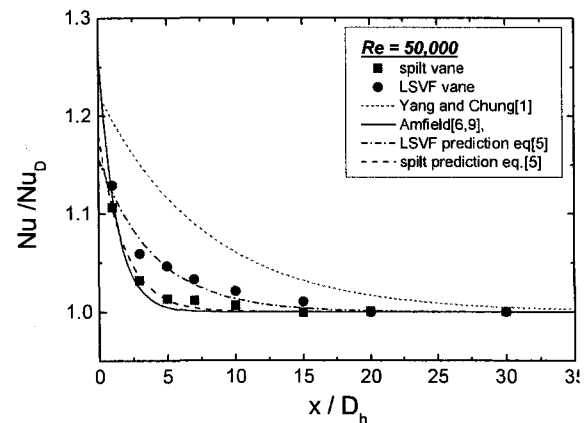


Fig. 10 Comparison of the Nusselt number normalized for the grid with split-vane and LSVF at Re = 50,000

Yang과 Chung⁽¹⁾은 유로막힘비 대신 와류인자 (Swirl factor)를 이용하여, 상관식을 구성하였으나, 와류 인자경우 실험적으로 측정해야 구해야 하는 어려움이 있다.

Fig 10에서 본 실험에서 사용된 split 혼합날개와 Ampield^(5,6)등이 split 혼합날개의 실험에서 사용된 상관식을 비교하여 나타내었다. 또한 식(5)를 이용하여, LSVF 및 split혼합날개에 관한 상관관계를 그래프로 나타내었다.

4. 결론

구리센서(copper sensor)를 이용하여 국부적 열전달 계수 측정을 수행하였다. 지지격자에 split 혼합날개를 부착한 경우와 LSVF 혼합날개를 부착한 경우의 지지격자 하류에서의 열전달 성능을 레이놀즈 수 30,000과 50,000에서 측정하여 비교하였다.

1) 레이놀즈 수 50,000에서 LSVF 혼합날개를 장착한 지지격자의 열전달 특성이 split 혼합날개의 경우에 비해 열전달 촉진효과가 오래 지속되는 알 수 있었다.

2) 대형와류를 이용하는 LSVF 혼합날개에 맞는 상관식개발이 필요하며, 와류인자를 고려하여야 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행하는 전력산업연구개발 사업의 기술개발(과제번호 : R-2002-0-234) 일환으로 한전전력연구원의 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Yang, S. K., and Chung, M .K., 1998, Turbulence Flow Through Spacer Grids in Rod Bundles, ASME j. Fluid Eng., 120, pp 786-791.
2. Blum, H. A., and Oliver, L. R., 1966, Heat Transfer in a Decaying Vortex System, proceeding of the 1966 ASME HTD Winter Annual Meeting, 62, pp. 1-8.
3. Yao, S. C., Hochreiter, L. E., and Leech, W. J., 1982, Heat Transfer Augmentation in Rod bundles Near Grid Spacers, ASME Journal of Heat Transfer, 104, pp. 76-81.
4. Park, J. S., 2001, A Study of Turbulent Heat Transfer Performance Enhancement in Rod Bundles Subchannel by the Large Scale Secondary Vortex Flow, D.S. thesis, korea university.
5. Armfield, M. V., Langford, H. M., Beasley . D .E., 2000, Average heat transfer coefficient measurements in a fuel bundle : Method Development, proceeding of the ASME heat transfer division, HTD-vol 366-2 ASME international, New York, pp. 136-170.
6. Armfield, M. V., Langford, H. M., Beasley . D .E., 2001, Single-Phase Turbulent Rod Bundle Heat Transfer, proceeding of 2001 ASME international Mechanical engineering and Exposition, HTD-24116, pp. 1-8.
7. Kim, M. W., Kim, K. C., Lee, Y., 1995, Effect of Transverse Convex Surface Curvature on Fluid and Heat Transfer for turbulent Boundary Laver Flow Longitudinal to a Circular cylinder : analysis and Experiment, Heat Transfer in turbulent Flows, ASME, 318, pp. 137-144.
8. Holloway, M. V., Conover, T. A., McClusky, H. L., Beasley, D. E. and Conner, M. E., 2005, The Effect of Support Grid Design on Azimuthal Variation in Heat Transfer Coefficient for Rod Bundles, Trans. of ASME, Vol 127, pp. 598-605.
9. Thomas G. Beckwith, Roy D. M., and John H. L. V, 1993, Mechanical Measurements, 5th edition, Addison-Wesley Publishing Company
10. John, R. T., 1997, An Introduction to Error Analysis, 2nd edition, University Science Books.