

봉다발 부수로의 단상 국부열전달 계수 측정기법에 관한 연구

서정식, 최영돈[†], 배경근^{**}, 안정수^{*}

고려대학교 대학원,[†] **고려대학교 기계공학과, *(주)LG 마이크론

Measurement Technique for Single Phase Local Heat Transfer Coefficients of Subchannels in a Rod Bundle using a Copper Sensor

Jeong-Sik Seo, Young-Don Choi, Kyong-Kuen Bea, Jeong Soo An

Graduated school, Korea University, Seoul 136-701, Korea

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

^{**} LG micron 407, Megavalley, 799 Gwangyang, Dongan-Gu, Anyang_Cyiti, Gyeonggi-Do, Korea

ABSTRACT: This paper presents the measuring technique for local heat transfer coefficients using a copper sensor in a rod bundle with mixing vanes. A copper sensor consists of a cartridge heater and four pieces of thermocouple. The Heater is located at the center of the copper sensor and thermocouples measure the surface temperature of the copper sensor. Unheated copper sensor and heated copper sensor are able to measure the local heat transfer coefficient at the position where the heated copper sensor is installed. However the entire region of a rod bundle is actually not heated, the decay of local heat transfer coefficients measured represents overestimated value rather than an actual value. The calibration curve for local heat transfer coefficients is presented using the correction factor calculated by CFD.

Key Words: Copper sensor(구리센서), Mixing vane(혼합날개), Rod bundle(봉다발), Local Heat transfer coefficient(국부 열전달계수), Stanton number(스탄튼 수)

기호 설명

Dh : 부수로 수력직경, 4A/P [m]
 h : 열전달계수 [W/m²K]
 k : 열전도계수 [W/mK]
 Nu : 누셀트수, hL/k
 Re : 레이놀즈 수, UD_h/ν
 Pr : 프란틀 수, ν/α
 St : 스타튼 수, $Nu / Re Pr = h/c_p\rho V$
 Ts : 구리센서의 표면온도 [°C]
 Tm : 냉각수 혼합평균온도 [°C]
 q : 대류 열전달량 [W]
 As : 구리센서의 표면적

그리스 문자
 ξ : 비가열거리
 ν : 동점성계수

하첨자
 s : 표면온도
 m : bulk온도
 D : 완전 발달한 영역
 c : 구리센서

1. 서론

부존 에너지자원이 빈약한 우리나라에서 원자력발전은 전력생산에 큰 역할을 하고 있으며 향후 온실가스 감축으로 인한 화석화 연료를 줄여 나가야 하기 때문에 그 역할은 더 커질 전망이다

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-2-3290-3355; fax: +82-2-926-9290
 E-mail address: ydchoi@korea.ac.kr

다. 이러한 원자력발전의 효율성 증진에 관한 연구는 매우 시급하고 중요한 과제이다.

원자력발전에서 노심간의 열원인 연료봉과 냉각수간의 열교환의 성능향상은 에너지 공급 효율을 높일 뿐 아니라, 운전의 안전성을 높이게 된다. 연료봉다발의 세부적인 열전달 성능을 조사하기 위해서, 국부열전달계수를 측정할 필요가 있다. 국부 열전달 계수를 측정하기 위한 가장 일반적인 방법은 필요한 지점에 열전대를 설치하여 표면온도를 측정하는 방법이다. 이 방법이 가장 쉽게 국부열전달 계수를 측정할 수 있는 방법이지만, 측정 점의 수가 많거나, 그 기하학적인 형상이 작은 경우에는 열전대의 설치가 어렵기 때문에 효율적이지 못한 단점을 가지고 있다. 다른 방법으로는 물질전달과 열전달의 유사성을 이용한 나프탈렌을 이용한 방법⁽¹⁾이 있으나, 이 방법의 경우, 유동이 비교적 단순한 경우에는 잘 일치하지만, 난류유동과 같은 복잡한 3차원유동에서는 측정값이 부정확하다는 단점을 가지고 있다. 그리고 끝으로 적외선 카메라와 같은 광학기기를 이용한 방법이 있는데 이 경우는 측정이 비교적 간단하고, 측정정확도도 과거에 비해 광학기기의 발달로 많이 향상이 되어 신뢰할 수 있으나, 그 대상체가 빛이 투과가 가능한 상태여야 하므로 그 적용에 한계를 가지고 있다.

원자력에서 사용되는 연료봉과 같이 긴 봉에서의 유동방향에 따른 국부 열전달 계수를 측정하는 방법으로 열전대를 이용해서 측정하고 있다. 하지만, 열전대 장치 특성상 측정위치를 증가시키는 것은 기하학적인 한계를 가지고 있기 때문에 보통 단일 봉에 관한 연구로 국한되어 있는 실정이다. 또한 원자로의 운전특성상 고온고압의 운전조건을 모사하기는 어려우므로, 열전달 특성에 관한 실험적 연구가 매우 어렵다. 이런 이유로 원자로 봉 다발에 대한 열전달 특성에 관한 연구는 실증실험을 제외하고는 물질전달의 유사성을 이용한 나프탈렌 승화법^(2,3)으로 연구가 진행되어져 왔다. 나프탈렌 승화법은 그 특성상 비교적 단순한 형상과 단일 부수로에 대한 열전달 계수측정이 이루어지고 있다. 또한 연료봉의 일부를 가열하여 그 표면온도를 측정하면서 위치를 변화시키는 구리센서(copper sensor)를 도입⁽⁴⁾하였으며, 이를 이용하여 유동방향으로 국부열전달 계수를 측정하였다^(5,6). 이러한 구리센서를 이용한

국부열전달 측정법은 다른 측정방법에 비해 보다 설치가 쉽고, 견고하다. 차후 고온고압 실험조건에서 측정기법으로 이용가능한 방법이기도 하다.

본 연구에서는 구리센서를 자체 설계하여, 단상 모형 연료봉에서 국부열전달 계수를 측정하는 방법을 소개하고 한다. 또한, 입구조건에 의한 가열 효과의 차이로 의한 국부 열전달계수의 차이를 확인하고 수정계수를 이용하여 보정하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

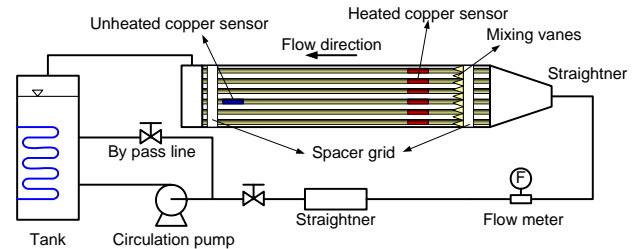


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

Fig. 1은 구리센서를 이용한 국부열전달 실험장치를 나타낸 것이다. 이 장치는 6 x 6 배열의 봉다발에 분리형혼합날개(split vane)과 대형와류혼합날개(LSVF vane)의 열수력적 특성⁽⁷⁾을 측정하고자 제작되었다. 구리센서(copper sensor)는 Fig. 2와 같이 9개가 한 단면에 배치되며, 유동방향에 따라 지지격자(spacer grid)로부터 1Dh에서 30Dh까지 총 8개 지점에 대하여 각 봉 다발의 국부 열전달계수를 측정할 수 있도록 설계되었다.

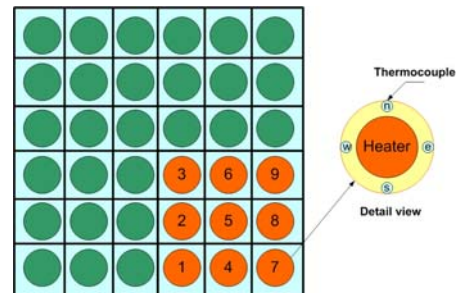


Fig. 2 Schematics of an arrangement for copper sensors

2.2 구리 센서(copper sensor)와 측정 원리

구리 센서를 이용한 봉다발의 국부열전달계수 측정은 일정 열유속(constant heat flux)조건하에서 이루어지며, 이때 연료봉의 열전달을 나타내는 뉴턴의 냉각법칙은 식(1)과 같이 나타내어진다.

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

히터에서 일정한 열유속(constant heat flux)이 나온다고 가정하게 되어, 그 위치에서의 열전달계수를 구하게 된다. 그 값을 구하기 위해서는 구리표면온도 T_s 와 유체의 평균온도 T_m 를 측정하여야 한다. T_m 은 삽입식 히터(cartridge heater)가 설치되지 않은 구리센서를 측정하였다. 본 측정 실험에서 특성길이 D_h 이고 열유속이 일정하다고 하면 그 위치에서 열전달계수는 식(2)와 같이 표현되어질 수 있다. 식(1)을 식(2)에 대입하여 정리하면 식(3)이 된다. 센서표면온도와 유체의 평균온도의 차이만 알면, 열전달 계수 값을 구할 수 있게 된다.

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

$$Nu = \frac{qD_h}{(T_s - T_m)Ak} = \frac{q''D_h}{\theta k} = C/\theta \quad (3)$$

구리 센서(copper sensor)는 Fig. 3(a)과 같이 봉과 같은 15.88mm의 지름을 가지며 총길이 70mm이다. 센서의 총 길이 중 양쪽으로 15mm 씩은 결합되는 부분이고 나머지 40mm부분은 열원으로 사용되는 삽입식 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 설치하였다. 구리센서의 양쪽 끝으로 발생할 수 있는 열손실을 막기 위해서, 단열소재로 테프론으로 만든 마개를 이용하여 단열 처리한 후 모의 연료봉과 결합될 수 있도록 하였다. 구리센서가 결합된 한쪽 끝의 모의 연료봉의 길이를 변화시키면 가열되는 구리센서의 위

치를 변화시킬 수 있기 때문에 이를 이용하여 측정 위치를 변화시킬 때 마다 실험장치의 분해 없이 실험을 진행할 수 있으며, 유동의 방해받지 않고 구리 표면의 온도를 측정할 수 있는 장점이 있다.

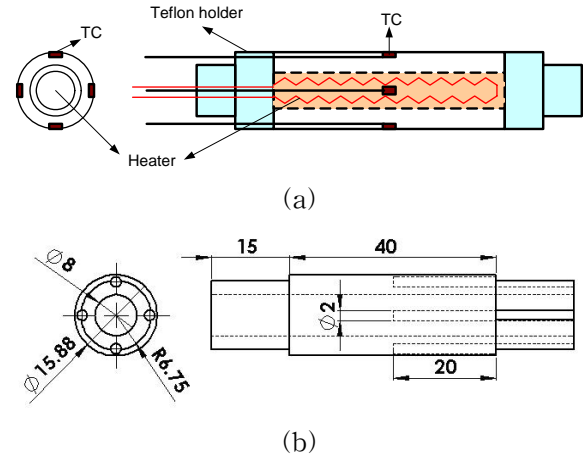


Fig. 3 Schematic of heated copper sensor

본 연구에 사용된 삽입식 히터는 상온(25도)에서 저항 $337 \pm 3\Omega$ 을 가지고 있으며, 교류로 작동하는 히터이다. 제작된 9개의 구리센서는 대형수조에서 0도에서 100도까지 온도를 변화시키면서, 열전대의 곡선을 보정(calibration)을 하여 사용하였다. 삽입식 히터에 의한 구리표면에서의 일정한 열유속(heat flux)을 가하기 위하여 이번 실험에 사용되는 9개의 히터를 각각 제어하기 위하여 공급하는 전원에 개별 전원 공급 장치를 통해서 조절해 줌으로써 일정한 열유속을 구리의 표면에 전해주도록 제어하였다.

Table 1은 센서의 기하학적인 조건과 열유속 조건을 정리하여 나타낸 것이다. 본 구리센서를 이용한 열전달계수 측정은 유동조건이 레이놀즈 수 30,000, 50,000 두 가지 조건에서 수행되어 졌다.

Table 1 Geometric parameters

Parameter	Unit	Value
Sensor length	mm	40
Sensor diameter	mm	15.88
Mean heat flux	W/m ²	59,864
Hydraulic diameter	mm	21.8

2.3 입구 수정계수

실제 연료봉에서는 열이 전체 연료봉에서 발생한다. 그러므로 구리센서를 사용할 경우 열이 구리센서에서만 발생하므로 열유속 경계조건이 달라져서, 국부열전달 계수 값이 부정확하게 된다. 따라서 연료봉 전체를 가열하였을 경우의 국부열전달계수 값을 얻기 위해서는 가열구리센서를 이용하여 측정된 열전달계수 값을 수정해야 해줘야한다. 이 수정값을 입구수정계수(entrance correction factor)라고 하고 Φ_{CFD} 라고 하자.

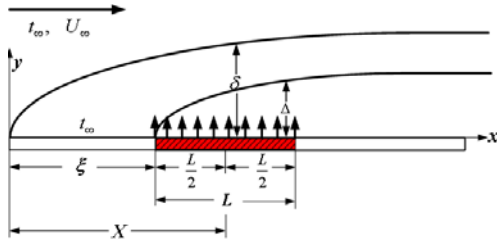


Fig. 4 Thermal boundary layer development by heated copper sensor located at x

Fig. 4는 비가열 입구길이 ξ 를 가진 열경계층의 발달을 나타내며, 이때의 스탠튼 수(Stanton)는 식(4)처럼 표현된다.

$$St = 0.0287 Re^{-0.2} Pr^{-0.4} \left[1 - \left(\frac{\xi}{x} \right)^{9/10} \right]^{-1/9} \quad (4)$$

이때, X 떨어진 곳에 길이 L되는 가열구리센서가 위치해 있다고 가정하자. 열은 길이 L인 구역에서 발생하고 열전대의 위치는 센서의 중앙 위치인 $x=X$ 에 있다. 이 경우 식(4)에서 ξ 와 X의 관계는 식(5)과 같이 표현된다.

$$\xi = X - \frac{L}{2} \quad (5)$$

$\xi = 0$ 인 경우에 전체봉을 가열하게 된 경우와 같게 된다. 부분가열한 경우와 전체가열한 경우에 대하여 X 위치에서의 스탠튼 수의 비는 식(6)처럼 나타내어진다.

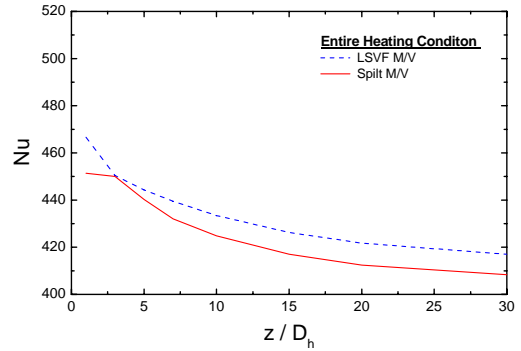
$$\frac{St_c}{St} = \frac{h_c}{h} = \left[1 - \left(\frac{x - \frac{L}{2}}{x} \right)^{0.9} \right]^{-1/9} = \frac{Nu_c}{Nu} \quad (6)$$

이에서 식(8)은 항상 1보다 크므로 가열구리센서를 사용하여 측정된 누셀트 수는 전체 연료봉에 열을 가했을 경우의 누셀트 수 보다 크다는 것을 알 수 있다. 하지만, 본 연구에서와 같은 봉다발의 복잡한 난류 유동장에서는 Nu_c/Nu 는 식(8)과 같이 단순하게 표현되기 어렵다.

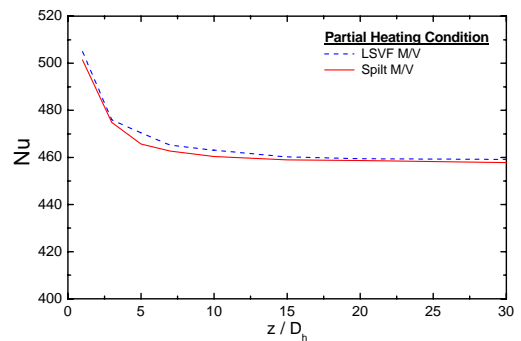
본 연구에서는 FLUENT 코드를 사용해서 계산되어진 가열구리센서에 의해서 발생한 열경계층과 전체 연료봉 가열에 의해 발생한 열경계층 모두를 해석한 자료⁽⁸⁾를 이용하여, 가열구리센서로 측정된 국부열전달계수 수정계수를 구하였다

3. 실험결과

3.1 부분가열 및 전체가열 효과



(a) Entire heating condition

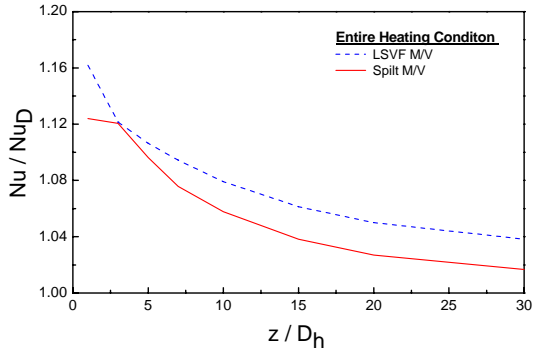


(b) Partial heating condition

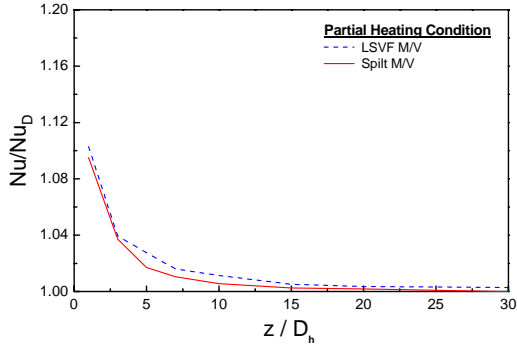
Fig. 5 Comparisons of Nusselt numbers calculated for $Re=50,000$

전체 연료봉을 가열하였을 경우는 Fig. 5(a)와 같이 누셀트 수는 지지격자를 지난 직후에는 급

격히 감소한 후 하류로 갈수록 서서히 감소한다. 그러나 Fig. 5 (b)와 같은 가열구리센서의 사용하여 부분적으로 열을 가해주는 경우 전체 연료봉에 열을 가해주었을 때보다 높은 누셀트수를 갖는다. 즉, 가열구리센서를 이용하여 측정된 열전달계수는 실제 연료봉 전체를 가열했을 경우의 열전달계수보다 높은 값을 갖는다. 그러나 혼합날개의 성능은 국부 누셀트 수를 완전 발달된 영역에서의 누셀트 수로 나눈 $(Nu/Nu_D)_{Copper}$ 형태로 나타내진다. 문제는 $Nu_{D(Copper)}$ 가 Nu_D 보다 크기 때문에 (Nu/Nu_D) 가 $(Nu/Nu_D)_{Copper}$ 보다 커지게 된다.



(a) Entire heating condition



(a) Partial heating condition

Fig. 6 Decay of Nusselt number normalized by CFD for Re=50,000

Fig. 6는 분리형 혼합날개를 장착한 경우에 봉다발에서 누셀트 수에 대해서 봉전체에 가열해서 얻은 결과와 부분 가열하여 얻은 결과를 비교한 것이다. 비교결과를 살펴보면 실험측정값이 같은 위치에서의 해석해와 정성적, 정량적으로 거의 유사한 형태를 나타내며, Nu/Nu_D 가 유동진행 방향에 따라 감소한다는 것을 알 수 있다. 즉 split 혼합날개를 부착한 경우는 $1D_h \sim 15D_h$ 사이

에서 x^{-1} 형태로 Nu/Nu_D 값이 감소하고 그 이후에서는 거의 일정한 값을 가진다.

3.2 수정계수 곡선

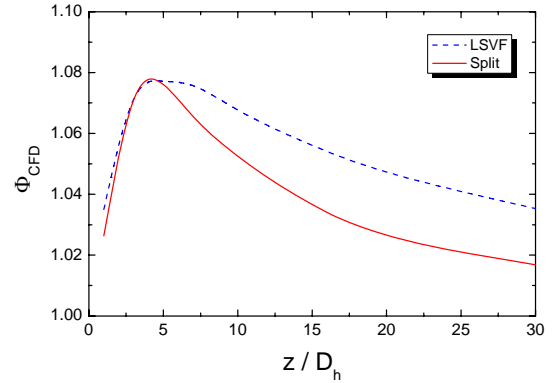


Fig. 7 Correction Factor(Φ) calculated for Re=50,000

본 연구에서 안⁽⁸⁾의 해석방법을 이용하여, 해석해를 통하여 수정계수(correction factor)를 구하였으며, 그 곡선은 Fig. 7처럼 나타나고, 식(7)처럼 표현되어 있다. 실제 실험값에 수정계수를 곱해줌으로써 실제 전체 연료봉에 열을 가했을 경우의 Nu/Nu_D 를 구할 수 있다.

$$\Phi = \left(\frac{Nu}{Nu_D} / \left(\frac{Nu}{Nu_D} \right)_{Copper} \right)_{CFD} \quad (7)$$

수정계수를 이용하여 구해진 국부열전달계수의 유동방향에 대한 감소곡선은 은 Fig 8처럼 나타난다. 유동방향으로 진행하면서 x^{-1} 형태의 추세⁽⁹⁾를 보이며, 감소하는 형태를 보여주고 있다.

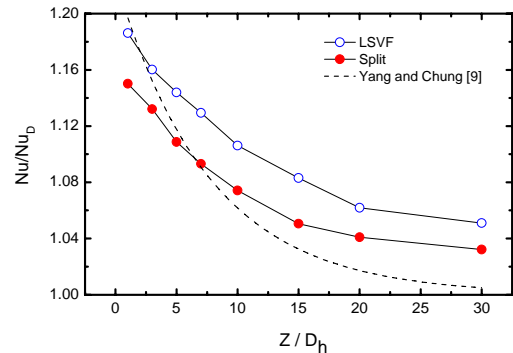


Fig. 8 Comparison of the Nusselt number normalized at Re = 50,000

4. 결 론

본 연구는 구리센서(copper sensor)를 이용한 단상 봉다발 국부 열전달 계수 측정기법을 소개하고, 혼합날개가 장착된 봉다발의 국부열전달계수를 측정하였다.

1) 수치해석 기법⁽⁸⁾을 이용하여, 가열길이에 따른 효과를 확인할 수 있었으며, 부분 가열 시와 전체가열 시의 구리센서가 전체적으로 높은 값을 나타내는 것을 확인하였다.

2) 수정계수를 구해서, 국부열전달 계수 측정값을 보정할 수 있었으며, x^{-1} 의 추세를 가지고 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 유성연, 노종광, 정장환, 정문기, 1993, 열전달과 물질전달의 유사성에 관한 연구, 대한기계학회논문집 제17권 10호 pp 2624-2633
2. 오동석, 정장환, 1999, 유동혼합장치가 설치된 핵연료집합체 봉다발 내 유동구조 측정, 공기조화 냉동공학회 동계학술발표회 논문집, pp 628-635
3. 이상섭, 유성연, 김병채, 김은기, 임덕재, 정장규, 김석범, 2003, Mixing vane 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp 408-413
4. 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.
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. 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.
7. 서정식, 배경근, 최영돈, 2006, LSVF 혼합날개를 이용한 6×6 봉다발의 부수로에서의 열수력적 특성에 관한 실험적 측정, 대한 설비공학회 춘계학술대회 논문집, pp188-193
8. 안정수, 최영돈, 2006, 핵연료 집합체에서의 대형이차와류 혼합날개의 난류생성 특성에 관한 연구, 설비공학논문집 제 18권 10호, pp 811-818
9. Yang, S. K., and Chung, M .K., 1998, Turbulence Flow Through Spacer Grids in Rod Bundles, ASME J. Fluid Eng., Vol. 120, pp. 786-791.