

LSVF 혼합날개를 이용한 6×6 연료봉 다발에서의 단상 국부적 열전달계수의 실험적 측정

배 경 근, 최 영 돈^{†*}

고려대학교 기계공학과 대학원, *고려대학교 기계공학과

Experimental measurements on Single-Phase Local heat transfer coefficients in 6×6 rod bundles with LSVF mixing vanes

Kyoung-keun Bae, Young-don Choi^{†*}

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

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

ABSTRACT: The present experimental study investigates single-phase heat transfer coefficients downstream of support grid in 6×6 rod bundles. Support grid with split mixing vanes enhance heat transfer in rod bundles by generating it make turbulence. But this turbulence is confined to short distance. Support grid with LSVF mixing vanes enhanced heat transfer to longer distance. The corresponding Reynolds number investigated in the present study is Re=30,000. The heat transfer coefficients are measured using heated and unheated copper sensor.

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 : 구리 센서의 표면온도 [°C]
 T_m : 냉각수 혼합평균온도 [°C]
 q : 대류열전달량[W]

A_s : 구리 센서의 표면적

그리스 문자

ν : 동점성계수

하첨자

s : 표면온도

m : bulk온도

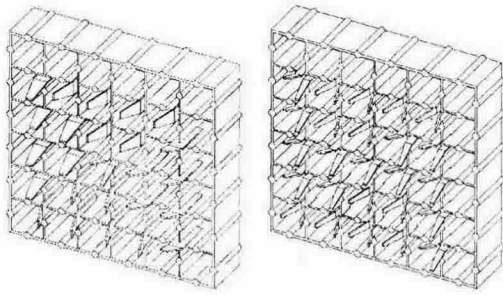
1. 서 론

연료봉 집합체 내의 지지격자는 연료봉 다발의 간격을 일정하게 유지시켜 냉각재의 유로를 확보

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-926-59081; fax: +82-2-926-9290

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



(a) LSVF mixing vane (b) Split mixing vane

Fig. 1 Drawing of space grid attaching mixing vanes

하고 유체의 유인진동으로 인한 연료봉의 손상을 방지해 줄 뿐만 아니라 유동혼합을 촉진하여 열전달의 성능을 증진시킨다. 유동혼합은 지지격자 직 후에서 가장 활발하게 일어나며 하류 방향으로 진행할수록 빠르게 감소한 후 일정한 수준의 유동혼합을 유지한다. 따라서, 연료봉 다발의 기하학적 형상과 열발생률이 동일한 조건이라면 전체적인 열전달 성능은 지지격자의 유동혼합에 의해서 좌우된다. 열전달 성능을 향상시키기 위한 또 다른 방법으로 냉각수의 흐름 방향을 조절하고 혼합할 수 있도록 지지격자에 혼합날개를 부착하여 와류(vortex)를 생성함으로써 발생하는 난류에 의해 열전달의 성능을 증가시키는 방법이다. 기존에 사용되고 있는 Fig. 1 (b)의 split 형태의 혼합날개가 가지고 있는, 난류의 길이척도(length scale)가 작아 난류에 의한 열전달 증진 효과가 단거리에 제한되고, 횡류에 의한 교차류(cross flow)의 효과가 적기 때문에 부수로 간의 열전달 증진효과를 크게 기대할 수 없다. Split 혼합날개의 단점을 극복하기 위해서 대형 2차 와류를 생성시키고, 교차류를 증가시킨 새로운 개념의 Fig. 1(a)의 형상을 지닌 LSVF(Large Scale Vortex Flow) 혼합날개를 지지격자에 부착하였다. 그리고 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)를 이용하여 본 연구에서는 냉각수의 온도와 연료봉의 표면온도를 측정함으로써 이 냉각수의 온도와 연료봉 표

면의 온도차, 즉 ΔT 를 이용하여 열전달 계수를 측정하였다.

이전의 선행 연구들은 split 혼합날개가 부착된 지지격자의 하류에서 생성된 선회류(swirl flow)에 의한 유동에 초점을 맞추어 연구되었다. Yang과 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 열전달 효과를 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. 열전달 증가를 위한 이 관계에 결합된 베커니즘은 유로 면적의 변화와 경계층의 재발달과 회전류이다. Park⁽⁴⁾은 CFD(computational fluid dynamics)를 이용하여 LSVF 혼합날개를 부착한 연료봉 다발에서의 열전달 성능을 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 단일부수로에서만 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 성

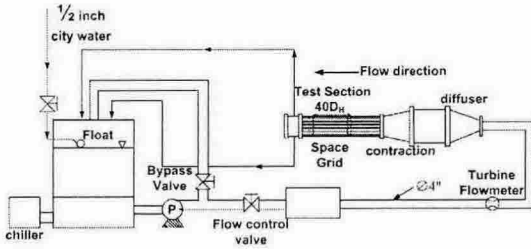


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

능의 향상을 나타내는 것으로 원자로의 건전성 확보에 도움을 줄 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험 장치는 Fig. 2와 같이 저장탱크, 펌프, 유량계, 유량제어밸브, 측정부 등으로 구성된 순환루프로 이루어져 있다, 측정부의 제원은 Table 1과 같다. 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 $Re=30,000$ 에 맞춰 조절된다. 유량계는 터빈유량계 [TRIMEE model명 : TP100S4C1211R2, 오차

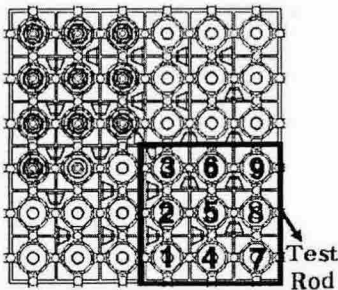


Fig 3. Schematic of cross test section

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

: $\pm 0.5\%$]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 하였다. 또한 냉각수가 측정부를 흐를 때 발생하는 기포를 제거하기 위하여 정류상자에 밴트 밸브(vent valve)를 설치하여 기포를 제거할 수 있도록 하였고, 유출부를 지난 냉각수는 저장탱크로 회수되는 순환루프로 이루어져 있다. 그리고 루프를 순환할 때 펌프에서 발생하는 열과 관에서의 마찰열에 의한 냉각수의 온도를 일정하게 제어하기 위하여 칠러(chiller)를 사용하였다.

2.2 열전달 측정

열전달계수 측정은 $Re=30,000$ 에서 6×6 연료봉 다발 중 Fig. 3의 9개의 연료봉에 설치된 구리센서(copper sensor)를 사용하여 측정된다. 구리센서의 모양은 Fig. 3과 같다. 구리센서는 15.88mm의 지름을 가지며 총길이 70mm이다. 구리의 총 길이 중 양쪽으로 15mm씩은 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 구

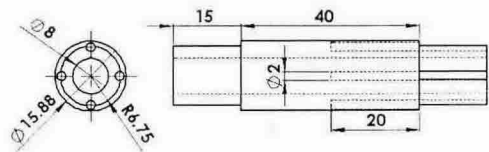


Fig. 4 Design of copper sensor

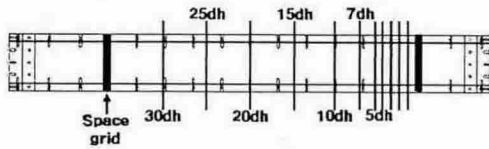


Fig. 5 Schematic of measuring position

리센서의 양쪽 끝으로 발생할 수 있는 열손실을 최대한 줄이기 위하여 테프론으로 만든 마개를 이용하여 단열 처리하였고, 구리센서의 양쪽 끝에는 스테인레스(stainless steel) 봉이 결합될 수 있도록 하였다. 또한 카트리지히터가 구리의 정중앙에 위치할 수 있도록 하기 위하여 카트리지히터의 비열 부분에 석면테이프를 감아서 정중앙에 위치하도록 하였으며 구리의 홈과 카트리지 히터의 사이는 써멀그리스(thermal greese)를 이용하여 카트리지히터에서 발생한 열의 구리 표면으로의 전도성을 높였고 밀봉될 수 있도록 하였다. 구리센서가 결합된 한쪽 끝의 스테인레스봉의 길이를 변화시키면 가열되는 구리센서의 위치를 변화시킬 수 있는데, 이 원리를 이용하면 가열되는 위치를 변화시킬 때 마다 실험장치의 분해 없이 실험을 실행할 수 있고, 유동의 방해를 받지 않고 구리 표면의 온도를 측정할 수 있는 장점이 있다. 카트리지히터에 의한 구리표면에서의 일정한 열유속(heat flux)을 가하기 위하여 이번실험에 사용되는 9개의 히터를 각각 제어할 필요가 있다. 왜냐하면 아무리 정확하게 만들어진 카트리지 히터라 하여도 저항이 조금씩은 틀리기 때문이다. 따라서 구리의 표면에 일정한 열유속(heat flux)을 가해주기 위해서 저항에 따른 전압을 전원공급장치를 통해서 조절해 줌으로써 일정한 열유속을 구리의 표면에 전해주도록 제어하였다. 이때의 전압의 측정은 디지털멀티미터[fluke 모델명 : #110, 오차 : $\pm 1.0\%$]를 사용하여 측정하였다.

본 연구에서는

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

을 이용하여 열전달계수를 구하는데, 이를 위해서는 T_s 와 T_m 을 측정하여야 한다. T_s 를 측정하기 위해서 카트리지히터가 설치된 구리 센서를

T_m 을 측정하기 위하여 카트리지히터가 설치되지 않은 구리센서를 사용하였다. 카트리지히터에 가해진 열량은 T_s 와 T_m 의 온도차 ΔT 가 충분히 크게 나도록 하기 위하여 약 $120W$ (heat flux $59,864W/m^2$)를 가하였다.

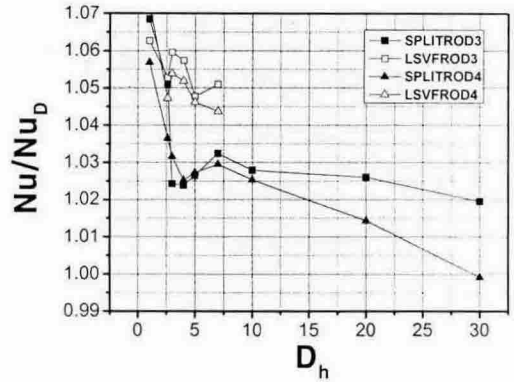
3. 실험 결과

3.1 실험 결과

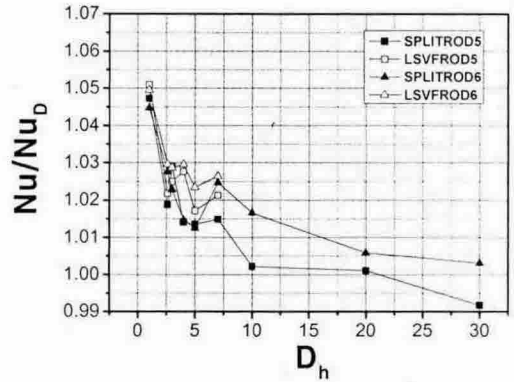
냉각수의 흐름 방향을 조절하고 혼합할 수 있도록 지지격자에 혼합날개를 부착하여 와류(vortex)를 생성함으로써 발생하는 난류에 의해 열전달의 성능의 증가를 확인하기 위하여 기존에 사용되는 split 혼합날개를 사용하는 경우와 split 혼합날개의 단점을 보완한 LSVF 혼합날개를 지지격자에 부착하는 경우를 $Re = 30,000$ 에서 실험하여 열전달 성능을 측정하였다. 지지격자 하류에서 완전히 발달된 부분의 누셀트수를 측정하기 위하여 혼합날개가 부착되지 않은, 즉 지지격자만을 사용하는 경우에 지지격자 하류에서의 위치에 따른 열전달계수를 측정하여 완전히 발달된 부분의 열전달계수의 값을 기준으로 하여, 열전달 성능 향상에 미치는 혼합날개의 영향을 알아보기 위하여 Nu/Nu_D 를 측정하였다. 또한 지지격자 하류에서의 측정 위치는 split 혼합날개와 LSVF 혼합날개를 부착하였을 경우 각각 Fig. 5와 같이 $1.0D_h$ 에서 $30D_h$ 까지 측정하였다. 본 연구에 사용된 Fig. 4의 구리센서는 단지 구리센서부분에서만 열이 가해지기 때문에 이 부분에서 새로운 열경계층(thermal boundary layer)가 발달하게 된다. 연료봉 다발에서 존재하는 복잡한 유동에서 속도 경계층(velocity boundary layer)의 실제 발달정도를 결정하기 힘들다. 원형 실린더의 표면을 축 방향으로 흐르는 유동은 더 급격한 속도 구배와 더 얇은 경계층을 형성한다는 것을 Kim⁽⁷⁾등은 증명하였다. 이 결과를 바탕으로 구리센서를 사용할 경우 실제 연료봉 전체에 열을 가했을 경우와 비교하여 항상 일정한 온도차이가 발생한다는 것을 알 수 있다. 따라서 완전히 발달되었을 경우로 나누어 준다면 날개의 형상에 따른, 즉 split 혼합날개를 사용하는 경우와 LSVF 혼합날개를 사용하는 경우의 열전달 성능

증진 정도를 알 수 있다.

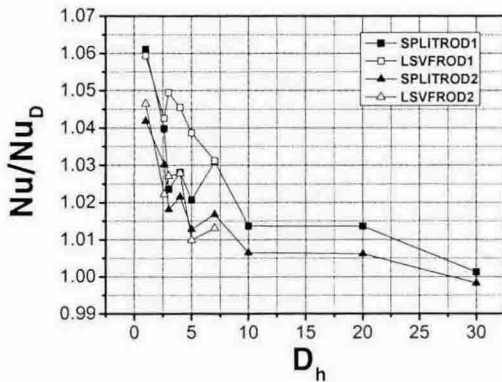
이 구리센서를 이용하여 지지격자 하류에서 거리에 따른 측정결과는 Fig. 6 과 같다. split 혼합날개를 부착하였을 경우는 모든 봉에서의 지지격자 하류에서의 열전달 효과가 비슷하게 나타나고 있다. 봉 2의 경우에는 split 혼합날개를 부착하였을 경우와 LSVF 혼합날개를 부착하였을 경우가 비슷한 경향을 보이는데 이것은 split 혼합날개와 LSVF 혼합날개의 경우 모두 정 중앙에는 split형 혼합날개가 부착되었기 때문에 비슷한 양상을 형성하는 것이라 생각된다. 나머지 봉들에서는 split 혼합날개의 경우 지지격자 하류 $5D_h$ 까지 열전달 효과가 지수 형태로 급격히 감소한 후 그 이후 $30D_h$ 까지는 완만한 직선 형태를 그리며 열전달 효과가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 LSVF 혼합날개를 사용할 경우 지지격자 하류 $1D_h$ 부터 $30D_h$ 까지 직선 형태를 그리며 열전달 효과가 감소한다는 것을 볼 수 있다. split 혼합날개를 사용하는 경우 $5D_h$ 까지는 유동의 혼합이 활발하게 이루어지고 있다는 것을 나타내는 것이며 split 혼합날개를 사용할 경우 단일 부수로 내에 부수로의 중심을 중심으로 하는 독립적인 선회류를 형성하고 다시 선회류와 연료봉 사이에 조그만 와류를 형성하는 것을 나타낸다고 할 수 있다. 이와 달리 LSVF 혼합날개를 사용하는 경우는 전체 부수로(sub-channel)에 대형 2차 와류를 형성하고 있다는 것을 보여주는 결과라고 할 수 있다. 또한 인접부수로 사이의 교차류(cross flow)의



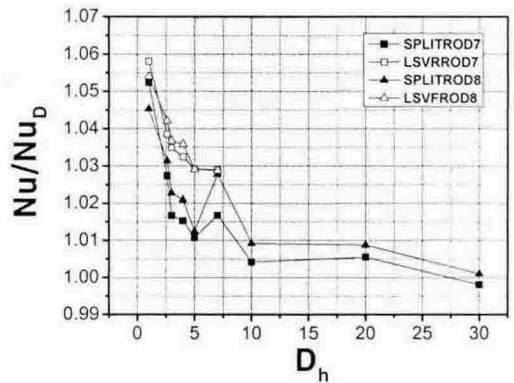
(b) rod 3 and rod 4



(c) rod5 and rod 6

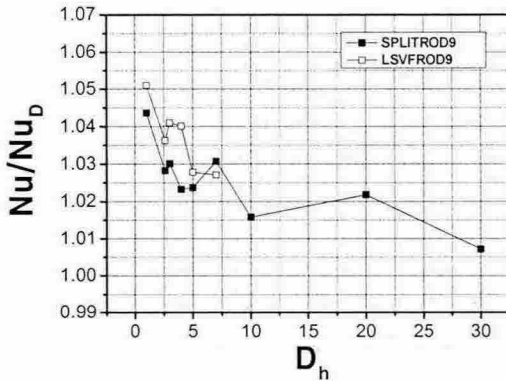


(a) rod 1 and rod 2



(d) rod 7 and rod 8

참고문헌



(e) rod 9

Fig. 6 comparison of Nusselt number of rod with support grid attaching split and LSVF mixing vanes

생성이 빈약한 split 혼합날개에 비하여 LSVF 혼합날개를 사용할 경우 교차류에 있어서 비약적인 발전이 있으므로 균등한 온도를 나타낸다고 할 수 있다.

4. 결론

구리센서를 이용하여 지지격자에 split 혼합날개를 부착한 경우와 LSVF 혼합날개를 부착한 경우의 지지격자 하류에서의 열전달 성능을 비교하면 난류의 지속성과 부수로 간의 교차류가 증가함에 의해서 LSVF 혼합날개를 사용하는 경우라 split 혼합날개를 부착하는 경우에 비해 열전달 성능이 향상되는 것으로 나타났다. 또한 교차류의 비약적 증가에 의해 연료봉의 온도 균등화가 이루어져 건전성을 확보할 수 있다.

후 기

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

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 Layer Flow Longitudinal to a Circular cylinder : analysis and Experiment, Heat Transfer in turbulent Flows, ASME, 318, pp. 137-144.