

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.3.157>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

봉다발 유동 내 비틀림 혼합날개 지지격자의 대류열전달 성능 평가

이 치 영^{*†}

* 부경대학교 소방공학과

Evaluation of Convective Heat Transfer Performance of Twist-Vane Spacer Grid in Rod Bundle Flow

Chi Young Lee^{*†}

* Dept. of Fire Protection Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received October 14, 2015 ; Revised December 29, 2015 ; Accepted January 18, 2016)

Key Words: Rod Bundle Flow(봉다발 유동), Twist-vane Spacer Grid(비틀림 혼합날개), Convective Heat Transfer (대류열전달)

초록: 봉다발 유동에서 비틀림 혼합날개 지지격자의 대류열전달 성능을 실험적으로 평가하였다. 시험부는 4×4 정사각 배열의 봉다발로 제작하였고, 모의 봉다발에서 봉 중심 간 거리와 봉 외경의 비는 ~1.35 이다. 대류열전달 성능 평가를 위해 혼합날개 지지격자 하류에서 봉 벽면 온도의 원주방향 및 축방향 분포를 측정하였다. 원주방향의 경우, 지지격자 하류에서 비틀림 혼합날개 끝이 향하는 벽면의 온도가 가장 낮게 나타났는데 이는 비틀림 혼합날개에 의해 왜곡된 유동 때문으로 판단된다. 반면, 축방향의 경우, 혼합날개 지지격자 근처에서 벽면의 온도가 크게 낮아졌는데, 이는 비틀림 혼합날개에 의해 대류열전달이 향상됨을 의미한다. 비틀림 혼합날개 지지격자에 의해 대류열전달 성능은 지지격자 상류에 비해 지지격자 근처 하류에서 ~35 % 향상되었고, 실험데이터를 기반으로 비틀림 혼합날개 지지격자에 대한 열전달 성능 예측 상관식을 제안하였다.

Abstract: The performance of convective heat transfer in rod bundle flow was experimentally evaluated using a twist-vane spacer grid. A 4×4 square-arrayed rod bundle was prepared as the test section, with a pitch-to-diameter ratio(P/D) of ~1.35. To check the convective heat transfer performance, the circumferential and longitudinal variations in rod-wall temperatures were measured downstream of the twist-vane spacer grid. In the circumferential measurements, the rod-wall temperature toward the twist-vane tip showed the lowest value, which might be due to the deflected water flow caused by the twist-vane. On the other hand, the wall temperature of the longitudinal measurements near the twist-vane spacer grid decreased dramatically, which implies that the convective heat transfer performance was enhanced. A heat transfer enhancement of ~35 % was achieved near downstream of the twist-vane spacer grid, as compared with the upstream value. Based on the present experimental data, a correlation for predicting the heat transfer performance of a twist-vane spacer grid was proposed.

- 기호설명 -

A : 혼합날개에 의한 막힘율 (-)
 D : 봉 직경 (mm)
 d_h : 수력직경 (mm)
 h : 대류열전달계수 ($W/m^2 \cdot K$)

k : 열전도도 ($W/m \cdot K$)
 Nu : 누셀트 수 ($=hd_h/k$) (-)
 P : 봉 중심 간 거리 (mm)
 q'' : 열유속 (kW/m^2)
 Re : 레이놀즈 수 ($=\rho U d_h/\mu$) (-)
 T : 온도 ($^{\circ}C$)
 ΔT : 온도차 ($^{\circ}C$)
 U : 축방향 평균유속 (m/s)

† Corresponding Author, cylee@pknu.ac.kr

z : 축방향 위치 (mm)

그리스문자

ϵ : 혼합날개 지지격자의 유동단면 막음비 (-)

μ : 점도 (Pa·s)

ρ : 밀도 (kg/m³)

\emptyset : 혼합날개 굽힘 각도 (°)

하첨자

cor : 상관식

exp : 실험데이터

in : 입구

wall : 벽면

1. 서 론

일반적으로 가압경수로(PWR; Pressurized Water Reactor) 내 핵연료 집합체(nuclear fuel assembly)에는 지지격자(spacer grid)가 설치된다. 지지격자는 핵연료와 핵연료 간 거리를 일정하게 유지시키고 부수로(subchannel)를 형성한다. 부수로를 통해 냉각수가 흐르고, 핵연료가 효과적으로 냉각된다. 일반적으로, 봉다발 냉각수 유동의 부수로 간 혼합을 증진시키고, 열전달 성능을 향상시키기 위하여 지지격자 상부에는 혼합날개(mixing-vane)가 설치된다. 혼합날개는 부수로 내 선회류(swirl-flow)나 부수로 사이의 교차류(cross-flow)를 발생시켜 부수로와 부수로 사이의 엔탈피(enthalpy) 교환을 활발하게 하여 핵연료 집합체 내 열전달 성능 향상에 기여하고, 핵연료 집합체의 임계 열유속(CHF; Critical Heat Flux)을 증가시키는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁻³⁾

다양한 종류의 혼합날개 중 분할 혼합날개 지지격자(split-vane spacer grid)에 대한 연구가 많이 이루어져왔다. 분할 혼합날개는 핵연료 집합체 내 냉각수의 교차류, 즉 부수로와 부수로 간 유동 혼합을 증대시킬 수 있는 형태이다. 분할 혼합날개 지지격자를 이용하여 Shen 등⁽⁴⁾ Yang and Chung,⁽⁵⁾ McClusky 등^(6,7) Holloway 등^(8,9) Conner 등⁽¹⁰⁾은 봉다발 유동에서의 유동 혼합, 난류 특성, 열전달 성능에 대한 실험을 수행하여 보고하였다. 하지만 분할 혼합날개는 주로 부수로 간 혼합을 증대시키는 형태로, 부수로 간 혼합뿐 아니라 부수로 내에서도 혼합을 증대시킬 수 있는, 성능이 더욱 향상된 혼합날개를 제안한다면 원자로 내 핵연료 집합체의 안전성을 향상시키고 더욱 높은 열적 여유도(thermal margin)를 확보할 수 있다.

한편, 일부 연구자들은 봉다발 유동에서 혼합날개 지지격자에 대하여 열전달 상관식을 제안하였다. Holloway 등⁽⁸⁾은 지지격자와 혼합날개의 열전달 성능 향상에 대한 기여도를 중첩(superposition)하여 상관식을 제안하였다. Yao 등⁽¹¹⁾은 선회류 혼합날개 지지격자(swirling-vane spacer grid)를 이용하여 지지격자 하류에서의 누셀트 수(Nusselt number, Nu) 증대에 관한 상관식을 제안하였다. Miller 등⁽¹²⁾도 봉다발 유동에서 혼합날개 지지격자에 적용 가능한 열전달 상관식을 제안하였는데 그들은 지지격자 혼합날개에 의한 열전달 성능 향상은 지지격자의 막힘율(spacer grid blockage ratio)뿐 아니라 레이놀즈 수(Reynolds number, Re)에 영향받는다고 보고하였다.

한국원자력연구원의 In 등⁽¹³⁾은 새로운 형태의 혼합날개인 비틀림 혼합날개 지지격자 (twist-vane spacer grid)를 제안한 바 있다. Fig. 1에 비틀림 혼합날개의 개략도를 나타내었다. 비틀림 혼합날개 지지격자는 부수로 간 냉각수 혼합 뿐 아니라 부수로 내에서도 혼합을 증대시킬 수 있는 새로운 개념의 혼합날개 지지격자이다.

이러한 비틀림 혼합날개 지지격자에 대하여 In 등⁽¹⁴⁾은 4×4 모의 핵연료집합체를 이용, LDV (Laser Doppler Velocimetry)와 PIV(Particle Image Velocimetry) 방법을 적용하여 유동 혼합에 대한 실험을 수행하였다. 이 실험을 통하여 비틀림 혼합날개에 의해 부수로 간 교차류와 부수로 내 큰

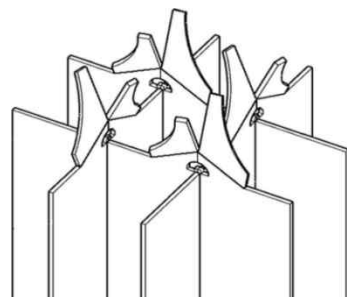


Fig. 1 Shape of twist-vane spacer grid⁽¹³⁾

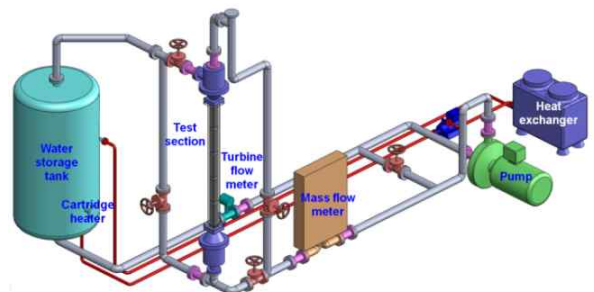


Fig. 2 Schematic diagram of OFEL^(14,15)

선회류가 발생함을 관찰 할 수 있었고, 부수로 내 횡방향 평균 속도 및 축방향 RMS(root-mean-square) 속도가 비틀림 혼합날개 지지격자 하류에서 급격하게 증가하는 것을 확인하였다. 그러나 해당 연구⁽¹⁴⁾에서는 유동만을 측정하였을 뿐 비틀림 혼합날개 지지격자의 열전달 성능에 대한 실험은 수행하지 않았다.

일반적으로 새롭게 제안된 혼합날개 지지격자가 실제 원자로 내 핵연료 집합체에 적용되기 위해서는 해당 지지격자의 다양한 성능(예를 들면 압력강하, 유동혼합, 열전달 등)이 실험적으로 반드시 평가되어야 한다. 이에 따라, In 등⁽¹⁵⁾은 비틀림 혼합날개 지지격자의 대류열전달 성능에 대하여 선행연구를 수행하였고, 비틀림 혼합날개 지지격자가 실제 핵연료 집합체에 적용되기 위해서는 보다 다양한 실험조건에서의 실험이 수행되어야 함을 언급한 바 있다.

본 논문에서는 비틀림 혼합날개 지지격자의 열전달 성능을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 4×4 모의 핵연료 집합체와 부분 가열 단일봉 (partially heated single rod)을 이용하여 지지격자 하류에서 원주방향 및 축방향 봉의 벽면 온도 분포를 측정하였다. 본 실험을 통해 얻은 데이터는 비틀림 혼합날개 지지격자의 열전달 성능을 평가하는데 사용될 뿐만 아니라, 붕다발 집합체 내 혼합날개 지지격자에 의해 나타나는 복잡한 유동 및 열전달 현상을 모사하기 위한 전산유체역학(CFD; Computational Fluid Dynamics) 코드(code) 검증에도 사용 가능할 것으로 생각된다.

2. 실험장치

본 연구에서는 In 등⁽¹⁵⁾이 사용한 실험장치를 활용하여 실험을 수행하였다. 열전달 실험을 위해서 Fig. 2에 나타난 종합 유동 실험 장치(OFEL; Omni Flow Experimental Loop)를 이용하였다. OFEL은 저장 수조, 시험부, 주순환 펌프, 유량계, 배관 및 계측장치 등으로 구성된다. 시험유체는 물을 이용하였고, 유량은 VFD(Variable Frequency Drive)를 이용하여 조절하였으며, 유량 측정은 주순환 펌프 하류에 설치된 질량유량계(Rheonik)를 이용하였다.

Fig. 3에 시험부(test section), 지지격자(support grid) 및 모의 비틀림 혼합날개 관련 개략도 및 사진을 나타내었다. 모의 붕다발 집합체를 위하여, 외경 25.4 mm, 길이 200 mm 인 아세탈(acetal) 재질의

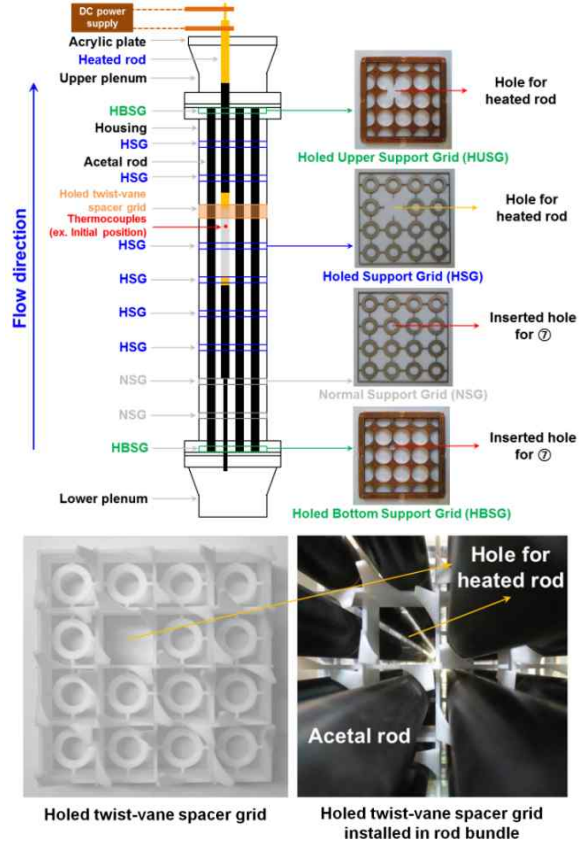


Fig. 3 Schematic diagrams and pictures of test section, support grids, and twist-vane spacer grid

단위봉(unit rod)을 제작하였고, 단위봉 10개를 연결하여 총 길이가 2000 mm인 하나의 봉을 만들었다. 이러한 봉 15개를 4×4의 정사각 형태로 배열하여 모의 붕다발 집합체를 구성하였다. 나머지 하나의 봉 자리에는 아래에 설명할 부분 가열 단일봉을 설계하여 제작, 설치하였다(Figs. 4-6 참고). 모의 붕다발 집합체에서 봉 중심 간 거리와 봉 외경의 비(P/D ; Pitch-to-Diameter ratio)는 ~1.35이다. 봉 사이 간격을 일정하게 유지하기 위하여 두께 3 mm 스테인리스스틸(stainless steel) 재질로 만든 지지격자를 제작하여 아세탈 단위봉 사이마다 설치하였고, 상부에는 구멍이 있는 상부지지격자(HUSG; Holed Upper Support Grid)와 구멍이 있는 지지격자(HSG; Holed Support Grid)를 설치하여 추후 설명할 Fig. 5의 부분 가열 단일봉을 구멍 위치에 삽입하여 설치할 수 있도록 하였다. 집합체의 아래 부분에는 일반지지격자(NSG; Normal Support Grid)와 구멍이 있는 하부지지격자(HBSG; Holed Bottom Support Grid)를 배치하였는데 가공한 구멍을 통해서 Fig. 5에 나타난 작은 직경의 아세탈봉(⑦)이 삽입될 수 있도록 하였다. 준비한 모의 봉

다발 집합체를 미리 제작한 142 mm×142 mm 정사각 투명 폴리카보네이트 채널(polycarbonate channel) 안에 설치하였다. 한편, 실험을 위한 모의 비틀림 혼합날개 지지격자는 3차원 프링팅(3D printing) 기법을 이용하여 제작하였다. 제작한 혼합날개 지지격자의 지지격자 판(strap) 높이는 40 mm, 두께는 2 mm, 혼합날개 굽힘 각도는 35°, 유동단면 막음비는 0.4이다.

본 실험에서는 가용한 전원(power)을 고려하여 부분적으로 가열이 되는 부분 가열 단일봉을 제작하여 실험을 수행하였으며, 기존 연구⁽⁶⁻¹⁰⁾에서도 부분 가열 방법을 이용하여 봉다발 유동의 열전달 실험이 수행된 바 있다. 부분 가열 단일봉에서 가열부로는 두께 1.23 mm, 길이 400 mm인 스테인리스스틸튜브(stainless steel tube)를 이용하였다. 벽면 온도 측정을 위한 열전대 설치를 위하여, 가열부의 원주 방향 0°~90° 사이에 폭 1 mm, 깊이 1 mm, 길이 5 mm의 긴 구멍(slot)을 5개 가공하였다. 튜브 안쪽에서부터 sheath T-type 열전대를 삽입하여 튜브 안쪽과 바깥쪽을 관통한 구멍에 통과시켜서 가공한 긴 구멍에 열전대 선단을 위치시킨 후 벽면에 설치하였다.

Fig. 5에 부분 가열 단일봉의 개략도를 나타내었다. 부분 가열 단일봉은 다음과 같은 방법으로 제작하였다. 길이 15 mm, 직경 25.4 mm 인 구리봉(copper rod, ①)을 준비하여 중심에 직경 12 mm 나

사 모양 구멍(screwed hole)을 관통하여 가공하였다. 길이 2000 mm, 외경 12 mm인 또 다른 긴 구리봉(②)을 준비하여 한쪽 끝 약 30 mm 길이를 구리봉(①) 중심에 돌려서 끼울 수 있도록 나사 모양으로 기계 가공하였다. 이후, 구리봉(②)을 짧은 구리봉(①)에 돌려 끼운 후 브레이징(brazing)하였다. Fig. 4에 나타낸 가열부(heated section, ③) 한쪽은 짧은 구리봉(①)과 브레이징하였고, 다른 한쪽은 길이 1517 mm, 외경 25.4 mm, 두께 3 mm인 구리튜브(copper tube, ④)와 브레이징하였다. 이후, 구리봉(②)의 외부에는 내경 12 mm의 테플론튜브(Teflon tube, ⑤)를 설치하여, 구리봉(②)과 구리튜브(④) 및 가열부(③)가 직접적으로 접촉할 수 없도록 전기적으로 절연하였다. 구리봉(①)을 관통한 구리봉(②)의 길이 15 mm 나사 모양 부분에 나사 가공이 된 길이 600 mm, 직경 25.4 mm의 큰 직경의 아세탈봉(acetal rod, ⑥)을 돌려 끼웠다. 이후, 큰 직경의 아세탈봉(⑥)은 직경 14.5 mm, 길이 600 mm의 작은 직경의 아세탈봉(⑦)과 결합하였다. 작은 직경의 아세탈봉(⑦)을 이용하는 이유는, 추후 봉다발 집합체에 부분 가열 단일봉이 삽입될 때 Fig. 3에 나타낸 일반지지격자(NSG; Normal Support Grid)의 구멍에 작은 직경의 아세탈봉(⑦)을 끼워 넣어서, 봉다발 집합체에서 부분 가열 단일봉이 되도록 정확하게 $P/D \sim 1.35$ 를 유지할 수 있도록 하기 위함이다. 또한 Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 구리튜브(④)의 외측에 고무튜브(⑧)를 설치하였는데 이는 일반지지격자와 부분 가열 단일봉의 구리튜브(④)가 직접 접촉하지 않도록 하고, Fig. 3에 나타낸 구멍이 있는 상부 지지격자(HUSG) 및 구멍이 있는 지지격자(HSG)의 큰 구멍에 부분 가열 가열봉을 위치시켰을 때 좌우 흔들림을 최소화하여 봉다발 집합체에서 가열봉이 $P/D \sim 1.35$ 를 유지할 수 있도록 하기 위한 것이다. 한편, Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 구리튜브(④)와 구리봉(②)을 직류전원 공급장치(DC power supply)에 연결하여 가열부를 가열하였다.

실험 시에는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 구멍이 있는 상부 지지격자(HUSG), 구멍이 있는 지지격자(HSG), 구멍이 있는 비틀림 혼합날개 지지격자(holed twist-vane spacer grid)의 구멍 부분에 Fig. 5에 나타낸 부분 가열 단일봉을 삽입하였다. 이때, 작은 직경의 아세탈봉(⑦)은 일반지지격자(NSG)의 구멍과 구멍이 있는 하부 지지격자(HBSG)의 구멍을 관통하게 되어(Fig. 3 참고) 봉다발 집합체에서 부분 가열 단일봉이 다른 아세탈봉들과의 간격을

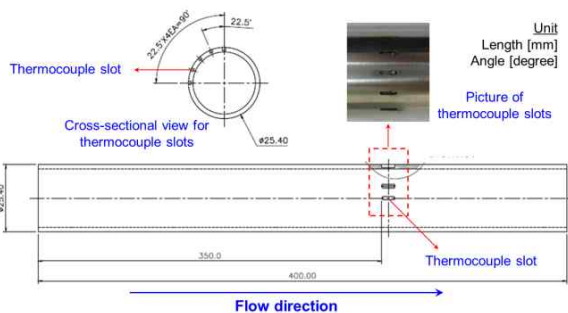


Fig. 4 Design of heated section

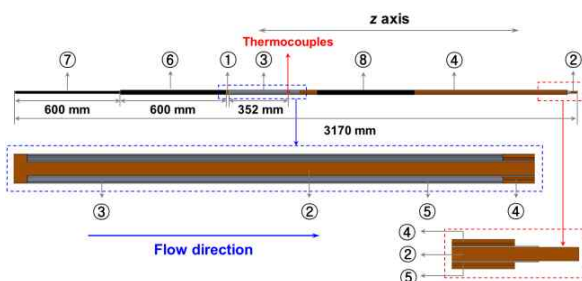


Fig. 5 Schematic diagram of partially heated single rod

일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 비틀림 혼합날개 지지격자의 하류에서 축방향 벽면 온도 분포 측정 시, 부분 가열 단일봉을 위쪽 방향으로 뽑아 내면서 가열부 벽면에 위치한 열전대가 축방향 원하는 곳에 위치할 수 있도록 고정시키고 실험을 수행하였다.

Fig. 6은 비틀림 혼합날개가 설치된 모의 봉다발 집합체 단면의 개략도이다. 부분 가열 단일봉은 중심 부수로(center subchannel) 주위에 삽입하였고 벽면에 설치된 5개의 열전대 중, 열전대 1번과 5번은 봉 간격 중심(rod-gap center)에, 열전대 3번은 부수로 중심(subchannel center)에 위치하도록 하였다.

실험은 봉다발 유동의 축방향 평균속도가 1.5 m/s, 열유속은 $\sim 26 \text{ kW/m}^2$ 인 조건에서 수행하였다. Kline⁽¹⁶⁾이 제안한 방법으로 측정 불확도(measurement uncertainty)를 평가한 결과, 벽면온도, 대류열전달계수, 누셀트 수의 불확도는 $\sim 5\%$, $\sim 8\%$, $\sim 9\%$ 로 평가되었다.

3. 실험결과

Fig. 7에 비틀림 혼합날개 지지격자 하류에서의 원주방향 가열봉 벽면온도 분포를 나타내었다. 모든 축방향 측정 지점(즉, 모든 z/d_h 조건)에서 열전대 2번의 경우가 가장 낮은 온도를 나타내었다. 여기서, z 는 지지격자 판의 상부 끝(top end of strap in spacer grid)으로부터 하류방향으로 축방향 위치, 즉 떨어진 거리를 나타내고, d_h 는 부수로의 수력직경을 나타낸다. Fig. 6을 보면 열전대 2번의 위치는 비틀림 혼합날개의 끝(tip)이 향하는 곳이다. 혼합날개에 의해 유동의 형태가 결정되는데 열전대 2번 위치는 혼합날개에 의해 다른 부수로로부터 유동이 유입되는 위치로, 이후 일부는 다른 부수로

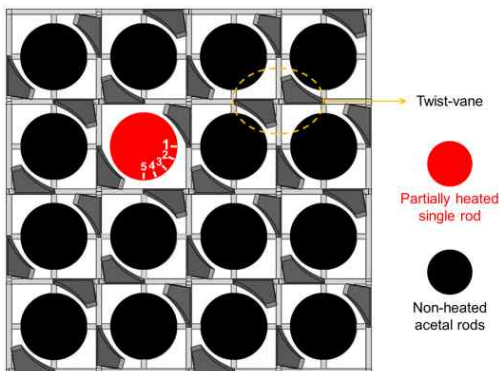


Fig. 6 Cross-sectional view of test section

를 통해 나가게 되고 일부는 부수로 중심에서 회전하면서 선회류를 만들게 된다. 즉, 혼합날개에 의해 왜곡된 유동에 의해 비틀림 혼합날개의 끝에 대응하는 벽면에서 온도가 가장 낮게 나타날 수 있다. 이러한 온도 분포는 비교적 하류(예를 들면 $z/d_h \sim 9.1$)까지 지속되는 것을 관찰 할 수 있다.

Fig. 8은 축방향 z/d_h 에 따른 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 지지격자를 지난 이후 온도가 급격하게 떨어지는 것을 관찰할 수 있고, 이후 점차적으로 온도가 회복되는 경향이 나타났다. 본 실험 영역에서, $z/d_h \sim 1.9$ 의 위치에서 모든 열전대의 측정온도가 가장 낮은 것으로 나타났고, 이는 비틀림 혼합날개 지지격자에 의해 열전달 성능이 향상됨을 의미한다.

Fig. 9에 식 (1)을 이용하여 계산한 대류열전달계수(convective heat transfer coefficient, h)의 축방향 분포를 나타내었다.

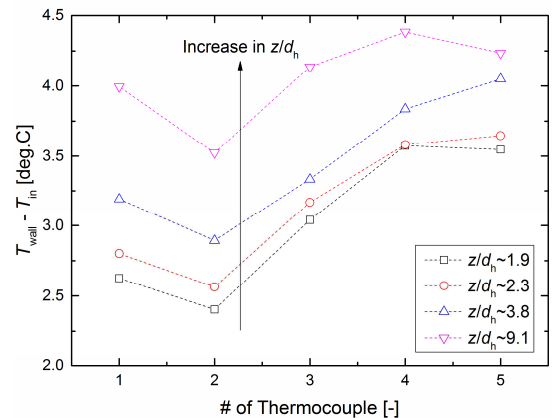


Fig. 7 Circumferential distribution of temperature difference between rod-wall and inlet flow downstream of spacer grid

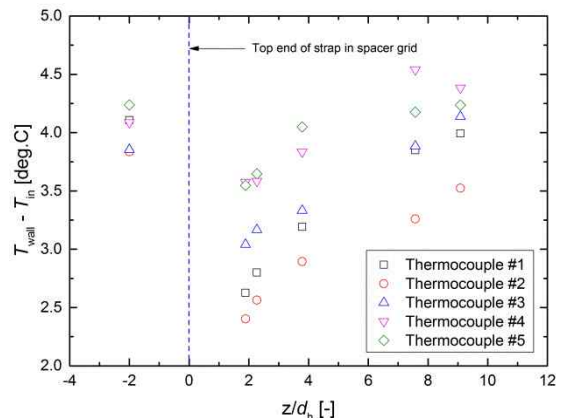


Fig. 8 Axial distribution of temperature difference between rod-wall and inlet flow

$$h = \frac{q''}{\Delta T} \quad (1)$$

식 (1)에서 q'' 는 열유속, ΔT 는 온도차를 나타낸다. $z/d_h \sim 1.9$ 의 위치에서 대류열전달계수는 최대치를 나타내었다. 이는 Fig. 8에서 나타낸 바와 같이 비틀림 혼합날개 지지격자에 의해 벽면의온도가 해당 위치에서 가장 낮아지기 때문이다.

Fig. 10에 Fig. 9를 이용하여 누셀트 수 비 (Nu/Nu_{in})의 축방향 변화를 나타내었다. 즉, 지지격자 하류에서의 누셀트 수를 지지격자 상류에서의 누셀트 수로 나누어서 축방향에 따른 변화를 나타내었다. Fig. 10을 토대로 볼 때, 지지격자 상류에 비해 비틀림 혼합날개 지지격자에 의해 지지격자 부근 하류에서 ~35 %의 대류열전달 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 10에 본 실험데이터와 함께 아래와 같은 Yao 등,⁽¹¹⁾ Miller 등⁽¹²⁾이 제안한 기존 상관식에 의한 예측치를 나타내었다.

Yao 등⁽¹¹⁾은 선회류 혼합날개 지지격자를 이용, 지지격자에 의한 막힘율과 혼합날개 굽힘 각도를 고려하여 지지격자 하류에서의 누셀트 수의 증대에 관한 아래와 같은 상관식을 제안하였다.

$$\frac{Nu}{Nu_{in}} = \frac{[1 + 5.55\varepsilon^2 e^{-0.13(z/d_h)}]}{[1 + A^2 \tan^2 \varnothing e^{-0.034(z/d_h)}]} \quad (2)$$

여기서, ε 는 혼합날개 지지격자에 의한 막힘율 (blockage ratio), A 는 혼합날개에 의한 막힘율, \varnothing 는 혼합날개의 굽힘 각도를 의미한다. 한편, Miller 등⁽¹²⁾은 지지격자에 의한 열전달 증대가 지지격자의 막힘을 뿐만 아니라 레이놀즈 수에 의해서도

영향받는다는 것을 보고하고 분할 혼합날개 지지격자의 실험데이터를 이용하여 다음과 같은 상관식을 제안하였다.

$$\frac{Nu}{Nu_{in}} = 1 + 465.4(Re)^{-0.50} \cdot \varepsilon^2 e^{-7.31 \times 10^{-6} Re^{1.15} (z/d_h)} \quad (3)$$

본 실험데이터를 기존 상관식과 비교하여 볼 때, Yao 등⁽¹¹⁾이 제안한 상관식은 본 실험데이터를 과대평가하였고, 반면, Miller 등⁽¹²⁾이 제안한 상관식은 본 실험데이터를 과소평가하였다. 이처럼, 본 실험데이터와 기존 상관식들 간 불일치가 나타난 이유 중 하나는 기존 상관식에서 사용한 지지격자가 본 실험에서 이용한 비틀림 혼합날개 지지격자와 다르기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같은 방법으로 비틀림 혼합날개 지지격자에 대한 누셀트 수 증대 상관식을 제안하였다.

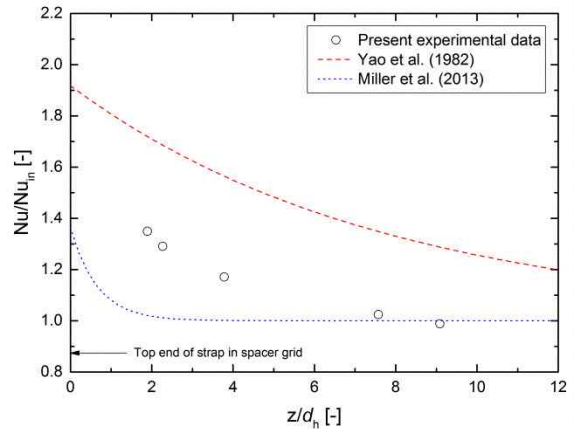


Fig. 10 Axial distribution of Nu/Nu_{in}

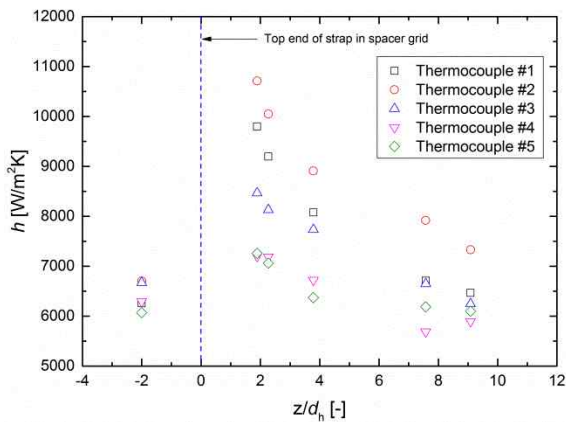


Fig. 9 Axial distribution of convective heat transfer coefficient

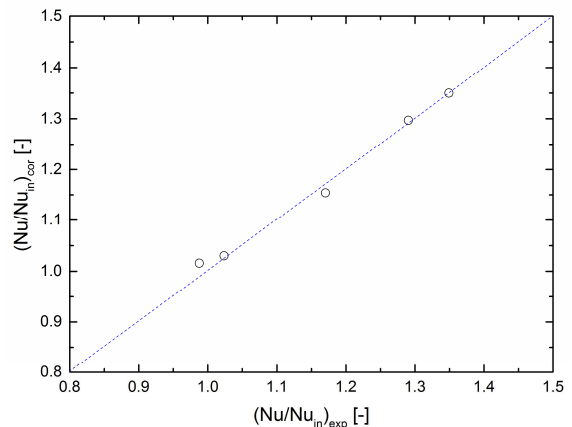


Fig. 11 Comparison of Nu/Nu_{in} between the present experimental data and proposed correlation

기존 상관식인 식 (2)와 식 (3)을 토대로 볼 때 공통적으로 누셀트 수 증대 상관식은 축방향 거리에 따라 감소하고 막힘율의 제곱의 함수로 표현될 수 있음을 알 수 있다. 이를 바탕으로 비틀림 혼합날개 지지격자의 대류열전달 증대 예측 상관식을 아래와 같은 간단한 형태로 표현하였다.

$$\frac{Nu}{Nu_{in}} = 1 + a\varepsilon^2 e^{-b(z/d_h)} \quad (4)$$

이후, 본 실험데이터를 기반으로 상수 a , b 값을 4.963과 0.433로 결정하였다.

Fig. 11에 본 실험데이터와 제안한 상관식을 비교하여 나타내었다. 본 연구에서 제안한 비틀림 혼합날개 지지격자에 대한 누셀트 수 증대 상관식인 식 (4)는 본 실험데이터를 최대 ~3 % ($=|(Nu/Nu_{in})_{cor} - (Nu/Nu_{in})_{exp}| / ((Nu/Nu_{in})_{exp}) \times 100 \%$) 이내로 잘 표현하고 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 봉다발 유동에서 비틀림 혼합날개 지지격자의 열전달 성능을 실험을 통하여 평가하였다. 비틀림 혼합날개 지지격자 하류에서 원주방향 봉의 벽면 온도의 경우, 비틀림 혼합날개 끝이 향하는 벽면의 온도가 가장 낮게 측정되었다. 축방향 온도 변화의 경우, 비틀림 혼합날개 지지격자 근처 하류에서 벽면의 온도가 크게 낮아졌고, 이는 혼합날개에 의해 대류열전달이 증대됨을 의미한다. 본 실험조건에서 비틀림 혼합날개 지지격자에 의해 대류열전달 성능은 지지격자 상류에 비해 지지격자 근처 하류에서 ~35 % 증대되는 것으로 측정되었다. 기존의 누셀트 수 증대 예측 상관식은 본 실험데이터와 큰 차이를 보였고, 이러한 결과를 보인 이유 중 하나는 본 실험에서 사용한 비틀림 혼합날개와 기존 상관식에서 사용한 혼합날개의 차이 때문으로 판단된다. 최종적으로, 본 실험데이터를 기반으로 비틀림 혼합날개 지지격자에 대한 새로운 누셀트 수 증대 예측 상관식을 제안하였다.

기존 상관식인 식 (2), (3)을 토대로 볼 때 혼합날개 지지격자에 의한 봉다발 유동 열전달 현상은 혼합날개 지지격자의 막힘율, 혼합날개의 굽힘 각도, 레이놀즈 수 등에 의해 영향받을 수 있다. 따라서 추후 다양한 비틀림 혼합날개 형상 및 실험 조건 하에서 비틀림 혼합날개 지지격자에 대한 열전달 성능 실험이 수행되어야 한다. 이를 토대로

비틀림 혼합날개의 특성을 고려한 진보된 열전달 상관식 개발을 위한 연구가 수행될 예정이다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2015년, 과제번호: C-D-2015-0856)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

(References)

- (1) Oh, D. S., 2002, "Measurement of Flow Structure in Rod Bundle downstream of Split Vaned Spacer Grid," *Proceedings of 2002 SAREK Summer Annual Conference*, pp. 138~144.
- (2) In, W. K., Oh, D. S. and Chun, T. H., 2001, "CFD Application to Development of Flow Mixing Vane in a Nuclear Fuel Assembly," *Proceedings of 2001 KSME Spring Annual Conference*, pp. 482~487.
- (3) In, W. K., Oh, D. S. and Chun, T. H., 2001, "Optimum Design of Hybrid Mixing Vane in a Nuclear Fuel Bundle by the CFD Method," *Proceedings of 2001 KSME Autumn Annual Conference*, pp. 224~229.
- (4) Shen, Y. F., Cao, Z. D. and Liu, Q. G., 1991, "An Investigation of Crossflow Mixing Effect Caused by Grid Spacer with Mixing Blades in a Rod Bundle," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 125, pp. 111~119.
- (5) Yang, S. K. and Chung, M. K., 1996, "Spacer Grid Effects on Turbulent Flow in Rod Bundles," *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol. 28, pp. 56~71
- (6) McClusky, H. L., Holloway, M. V., Beasley, D. E. and Conner, M. E., 2002, "Development of Swirling Flow in a Rod Bundle Subchannel," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 124, pp. 747~755.
- (7) McClusky, H. L., Holloway, M. V., Conover, T. A., Beasley, D. E., Conner M. E. and Smith, L. D., 2003, "Mapping of the Lateral Flow Field in Typical Subchannels of a Support Grid with Vanes," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 125, pp. 987~996.
- (8) Holloway, M. V., McClusky, H. L., Beasley, D. E. and Conner, M. E., 2004, "The Effect of Support Grid Features on Local, Single-phase Heat Transfer Measurements in Rod Bundles," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 126, pp. 43~53.
- (9) 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," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 127, pp. 598~605.

- (10) Conner, M. E., Smith III, L. D., Holloway, M. V. and Beasley, D. E., 2005, "Heat Transfer Coefficient Testing in Nuclear Fuel Bundles with Mixing Vane Grids," *2005 Water Fuel Performance Mtg.*, Kyoto, Japan.
- (11) Yao, S. C., Hochreiter, L. E. and Leech, W. J., 1982, "Heat-transfer Augmentation in Rod Bundles Near Grid Spacers," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 76~81.
- (12) Miller, D. J., Cheung, F. B. and Bajorek, S. M., 2013, "On the Development of a Grid-enhanced Single-phase Convective Heat Transfer Correlation," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 264, pp. 56~60.
- (13) In, W. K., Kang, H. S., Yoon, K. H., Jung, Y. H., Kim, H. H., Oh, D. S., Chun, T. H. and Song, K. N. (KAERI), 2008, "Twisted Deflector for Enhancing Coolant Mixing in a Nuclear Fuel Assembly," EP 1139348.
- (14) In, W. K., Shin, C. H. and Lee, C. Y., 2014, "Experimental Observation of Forced Flow Mixing in Tight-lattice Rod Bundle," *Trans. ANS*, Reno, Nevada, USA, pp. 662~664.
- (15) In, W. K., Shin, C. H. and Lee, C. Y., 2015, "Convective Heat Transfer Experiment of Rod Bundle Flow with Twist-vane Spacer Grid," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 295, pp. 173~181.
- (16) Kline, S. J., 1985, "The Purposes of Uncertainty Analysis," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 153~160.