

<응용논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.1.053>

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

## 이중냉각 환형핵연료 집합체를 위한 비틀림 혼합날개 지지격자의 강제대류열전달 성능 검토

이 치 영\*†

\* 부경대학교 소방공학과

### Examination of Forced Convection Heat Transfer Performance of a Twist-Vane Spacer Grid for a Dual-Cooled Annular Fuel Assembly

Chi Young Lee\*†

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

(Received June 8, 2016 ; Revised October 20, 2016 ; Accepted November 6, 2016)

**Key Words:** Rod Bundle Flow(봉다발 유동), Dual-cooled Annular Fuel(이중냉각 환형핵연료), Twist-vane Spacer Grid(비틀림 혼합날개 지지격자), Convection Heat Transfer(대류열전달)

**초록:** 이중냉각 환형핵연료 집합체를 위한 비틀림 혼합날개 지지격자의 강제대류열전달 성능을 실험적으로 평가하였다. 비틀림 혼합날개 지지격자는 부수로 간 혼합뿐 아니라 부수로 내 혼합을 동시에 증대시킬 수 있도록 설계되었다. 실험을 위한 이중냉각 환형핵연료 모의 집합체로, 봉 중심 간 거리와 봉 외경의 비가 1.08인 봉 간격이 좁은 4×4 정사각 배열의 봉다발을 준비하였다. 실험은 봉다발 유동의 축방향 평균속도가 1.5 m/s, 열유속은 26 kW/m<sup>2</sup>인 조건에서 수행하였다. 원주방향 온도 분포의 경우, 지지격자 상류에서는 부수로 중심 벽면에서, 하류에서는 비틀림 혼합날개 끝이 향하는 벽면에서 온도가 가장 낮게 나타났다. 축방향 온도 분포의 경우, 지지격자 하류 근처에서 온도가 급격하게 감소하는 것으로 측정되었고, 비틀림 혼합날개에 의해 누셀트 수는 최대 56% 증대되는 것으로 나타났다. 본 실험결과를 토대로 봉 간격이 좁은 이중냉각 환형핵연료 집합체에서 비틀림 혼합날개 지지격자에 의해 강제대류열전달 성능이 효과적으로 증대될 수 있음을 확인하였다.

**Abstract:** The forced convection heat transfer performance of a twist-vane spacer grid for a dual-cooled annular fuel assembly was examined experimentally. The twist-vane spacer grid was uniquely designed to enhance mixing inside subchannels and mixing between adjacent subchannels. For testing, a 4 × 4 square-arrayed rod bundle with narrow gaps between rods was prepared as the dual-cooled annular fuel assembly to be simulated. The pitch-to-rod diameter ratio of simulated dual-cooled annular fuel assembly was 1.08. The experiments were performed under the following conditions: axial bulk velocity, 1.5 m/s and heat flux, 26 kW/m<sup>2</sup>. With regard to the circumferential temperature distribution, the lowest rod-wall temperatures upstream and downstream were measured at the subchannel center and the position toward the tip of twist-vane, respectively. With regard to the axial temperature distribution, behind the twist-vane spacer grid, the rod-wall temperature decreased drastically, and the Nusselt number was enhanced by up to 56%. The present measured data indicate that the twist-vane spacer grid can effectively improve the forced convection heat transfer in the dual-cooled annular fuel assembly with narrow gaps.

- 기호설명 -

$A$  : 혼합날개에 의한 막힘율(-)

$D$  : 지름(mm)

$h$  : 대류열전달계수(W/m<sup>2</sup>·K)

$k$  : 열전도도(W/m·K)

$L$  : 길이(mm)

$N$  : 데이터 수(-)

† Corresponding Author, cylee@pknu.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

- Nu : 누셀트 수(= $hD_v/k$ ) (-)
- $P$  : 봉 중심 간 거리(mm)
- $q''$  : 열유속( $\text{kW/m}^2$ )
- Re : 레이놀즈 수(= $\rho U D_v/\mu$ ) (-)
- $t$  : 두께(mm)
- TC : 열전대(-)
- $\Delta T$  : 온도차( $^{\circ}\text{C}$ )
- $U$  : 축방향 평균유속(m/s)
- $z$  : 축방향 위치(mm)

Greek symbol

- $\varepsilon$  : 혼합날개 지지격자의 유동단면 막음비(-)
- $\mu$  : 점도(Pa·s)
- $\rho$  : 밀도( $\text{kg/m}^3$ )
- $\oslash$  : 혼합날개 굽힘 각도( $^{\circ}$ )
- $\theta$  : 열전대의 원주방향 위치( $^{\circ}$ )

Subscript

- cor : 상관식
- exp : 실험데이터
- h : 수력직경
- in : 입구
- o : 외경

1. 서 론

원자력 발전소의 원자로 내에는 핵연료 장전이 용이하도록 다수의 핵연료를 일정한 형태의 배열로 묶어서 만든 핵연료 집합체를 구성하여 설치한다. 이러한 배열을 구성하기 위하여 핵연료 집합체에는 지지격자가 설치된다. 지지격자는 핵연료봉과 핵연료봉 간 거리를 일정하게 유지시켜 줄 뿐만 아니라 핵연료봉 사이에 비원형의 부수로(subchannel)를 형성시킨다. 핵연료 집합체 하부에서 주입된 냉각수는 핵연료봉 사이에 형성된 부수를 통해 흐르면서 고온의 핵연료를 냉각시킨다.

한국원자력연구원에서는 원자로의 대규모 출력증강을 위해 새로운 개념의 이중냉각 환형핵연료(dual-cooled annular fuel)를 제안하였다.<sup>(1,2)</sup> Fig. 1에 기존 원통형 핵연료(cylindrical solid fuel)와 이중냉각 환형핵연료의 개략도를 나타내었다. 기존 원통형 핵연료의 경우 외부 부수로에 의해서만 냉각이 되는 구조인 반면, 새로운 개념의 이중냉각 환형핵연료의 경우 기존 원통형 핵연료와는 달리 내측 수로를 가지고 있어서 외측 수로 뿐 아니라 내측 수로에 의해서 핵연료가 냉각 될 수 있는 구조이다. 한국원자력연구원에서는 기존의 16×16 배열의 원통형 핵연료 집합체와 구조적으로 양립성을 갖

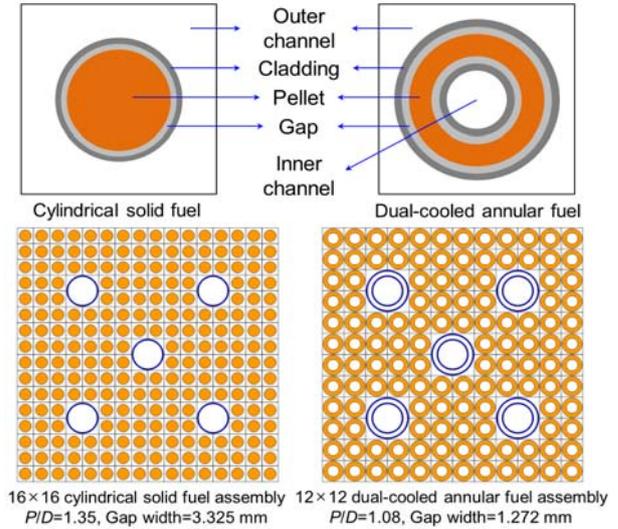


Fig. 1 Comparison of cylindrical solid and dual-cooled annular fuels, and their assemblies

도록 12×12 배열의 이중냉각 환형핵연료 집합체를 제안하였다. 이 경우 내측 수로를 가진 이중냉각 환형핵연료의 외경 증가로 인해 핵연료봉과 핵연료봉 사이의 간격이 좁아질 수 밖에 없다. 핵연료봉과 핵연료봉 사이의 간격 변화는 봉다발 유동의 열수력적 성능에 크게 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이중냉각 환형핵연료 집합체를 실제 원자로에 적용하기 위해서는 이에 대한 다양한 연구가 수행되어야 한다.

일반적으로 지지격자 상부에는 혼합날개를 설치하는데 혼합날개는 부수로 내 유동이나 부수로 간 유동 혼합을 증진시켜서 열전달 성능을 향상시키고 핵연료 집합체의 임계열유속을 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(3)</sup> 반면, 혼합날개 지지격자의 경우 부수를 일부 막게 되므로 핵연료 집합체의 압력 강하를 증가시킬 수 있다.<sup>(3)</sup> 따라서 압력 강하는 작으면서 임계열유속을 포함한 열전달 성능은 증가시킬 수 있도록 혼합날개 지지격자를 설계하는 것이 중요한 목표가 될 수 있다. 새로운 혼합날개 지지격자를 개발하여 실제 핵연료 집합체에 적용하고자 할 경우, 새로운 혼합날개 지지격자의 압력 강하와 열전달 성능에 대한 실험적 검증이 반드시 수행되어야 한다.

기존에는 분할 혼합날개 지지격자(split-vane spacer grid)를 이용한 다양한 성능 평가 실험이 이루어졌다.<sup>(4-10)</sup> 분할 혼합날개 지지격자는 부수로 간 유동 혼합을 증대시키기 위해 개발된 지지격자이다. 한편, 원자력연구원의 In 등<sup>(11)</sup>은 냉각수의 부수로 간 혼합 뿐 아니라 부수로 내 혼합을 효과



Fig. 2 Schematic diagram of twist-vane spacer grid<sup>(11)</sup>

적으로 증대시킬 수 있는 새로운 형태의 혼합날개 지지격자, 즉 비틀림 혼합날개 지지격자(twist-vane spacer grid)를 제안하였다. Fig. 2에 비틀림 혼합날개 지지격자의 개략도를 나타내었다. 이러한 새로운 개념의 비틀림 혼합날개 지지격자를 실제 핵연료 집합체에 적용하기 위해서는 앞서 언급한 바와 같이 다양한 열수력 평가 실험을 통하여 그 성능을 검증해야 한다.

비틀림 혼합날개 지지격자를 제안한 이후 이를 이용한 열수력 성능 평가 실험이 일부 진행되었다. 비틀림 혼합날개 지지격자의 압력 강하 성능의 경우, 봉 간격이 좁은 모의 이중냉각 환형핵연료 집합체에서 측정되어 평가되었다.<sup>(12)</sup> 12×12 배열의 모의 이중냉각 환형핵연료 집합체와 모의 비틀림 혼합날개 지지격자를 이용하여 압력 강하 실험을 수행하였고, 이를 혼합날개 지지격자가 설치된 16×16 배열의 원통형 핵연료 집합체와 비교하였다. 압력 강하를 비교하여 본 결과, 비틀림 혼합날개 지지격자가 설치된 이중냉각 환형핵연료 집합체의 압력 강하는 기존의 혼합날개 지지격자가 설치된 원통형 핵연료 집합체에 비해 약 8 % 증가하는 것으로 평가되었다. 따라서, 압력 강하 성능 면에서는 비틀림 혼합날개 지지격자와 이중냉각 환형핵연료가 기존의 혼합날개 지지격자와 원통형 핵연료를 대체하여 상용화될 수 있는 가능성을 확인하였다. 또한, In 등<sup>(13)</sup>은 현재 국내 원자력 발전소에서 널리 적용되고 있는 핵연료 집합체에 대한 모의 집합체를 구성하고 모의 비틀림 혼합날개 지지격자를 설치하여 유동 혼합 측정 실험을 수행하였다. 모의 실험 집합체는 4×4 정사각 배열이고 봉과 봉 사이 거리와 봉 외경이 비( $P/D$ = Pitch between rods/Rod diameter)는 1.35였다. 유동 혼합 측정을 위하여 비접촉식 유동계측 방법인

LDV(Laser Doppler Velocimetry)와 PIV(Particle Image Velocimetry) 방법을 이용하였다. 실험을 통하여 부수로 간 유동 혼합 및 부수로 내 유동 혼합이 효과적으로 발생함을 관찰할 수 있었다. In 등<sup>(14)</sup>과 Lee<sup>(15)</sup>는  $P/D=1.35$ 의 4×4 정사각 배열 모의 집합체에 부분 가열 단일봉을 이용하여 비틀림 혼합날개 지지격자의 단상 대류열전달 관련 선행 실험을 수행하였고, 비틀림 혼합날개에 의해 단상 대류열전달 계수가 크게 증대되는 것을 확인하였다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 봉다발 유동에서 봉과 봉 사이의 간격(즉,  $P/D$ )은 봉다발 유동의 열수력 성능에 지대한 영향을 미치는 중요 변수이다. 따라서 비틀림 혼합날개 지지격자의 성능을 일반화하고, 비틀림 혼합날개 지지격자를 봉 간격이 좁은 이중냉각 환형핵연료 집합체에 실제로 적용하기 위해서는 더욱 다양한 조건에서 열수력적 성능에 대한 실험적 검증이 수행되어야 한다.

한편, 일부 연구자들에 의해서 혼합날개 지지격자에 의한 단상 대류열전달 증대에 대한 상관식이 제안된 바 있다. Yao 등<sup>(16)</sup>은 부수로 내 혼합을 효과적으로 증대시킬 수 있는 선회류 혼합날개 지지격자(swirl-vane spacer grid)를 이용하여 아래와 같은 누셀트 수(Nu; Nusselt number) 증대 상관식을 제안하였다.

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

여기서,  $\varepsilon$ ,  $A$ ,  $\varnothing$ 는 각각 혼합날개 지지격자에 의한 막힘율, 혼합날개에 의한 막힘율, 혼합날개의 굽힘 각도를 의미한다.  $z$ 와  $D_h$ 는 축방향 위치와 수력직경을 나타낸다.  $Nu_{in}$ 은 지지격자 상류에서의 누셀트 수(즉, 혼합날개 지지격자의 영향이 없는 영역에서의 누셀트 수)를 나타낸다. Miller 등<sup>(17)</sup>은 혼합날개 지지격자에 의한 열전달 증대가 지지격자의 막힘율과 레이놀즈 수(Re; Reynolds number)에 의해서 결정된다고 보고하였고, 부수로 간 혼합에 초점을 두어 개발된 분할 혼합날개 지지격자에 대해 아래와 같은 상관식을 제안하였다.

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

이러한 혼합날개 지지격자의 열전달 성능 관련 기존 예측 상관식을 실제 핵연료 집합체에 적용하기 위해서는 다양한 실험데이터와의 비교를 통해

서 기존 상관식의 정확도 및 적용 가능성 등에 대한 검토가 이루어져야 한다. 특히, 혼합날개의 형태와 집합체의 P/D는 봉다발 유동의 열수력 현상에 지대한 영향을 미칠 수 있는 바, 비틀림 혼합날개 지지격자를 이중냉각 환형핵연료 집합체에 적용하기 위해서는 봉 간격이 좁은 봉다발 유동에서 비틀림 혼합날개 지지격자를 이용한 다양한 열전달 실험데이터가 확보되어야 하고, 이를 토대로 기존 상관식에 대한 검토가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 이중냉각 환형핵연료 집합체에 신개념 비틀림 혼합날개 지지격자 적용을 위하여, 봉 간격이 좁은 이중냉각 환형핵연료 모의 집합체를 이용하여 비틀림 혼합날개의 강제대류열전달 성능 측정 실험을 수행하였다. 가열봉의 원주방향 및 축방향 온도 분포 측정을 통하여 봉 간격이 좁은 조건에서 비틀림 혼합날개 지지격자의 대류열전달 성능을 평가하였다. 또한 본 실험데이터를 토대로 기존 봉다발 유동의 누셀트 수 증대 상관식을 비교 및 검토하였다.

2. 실험장치

본 연구에서는 모의 봉다발 시험부를 제외하고 기존의 Lee<sup>(15)</sup>에서 사용한 실험장치를 활용하여 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 실험장치 중 중요한 내용만을 간략하게 소개하겠다. Fig. 3에 나타난 종합 유동 실험 장치(OFEL; Omni Flow

Experimental Loop)를 이용하여 열전달 실험을 수행하였다. OFEL은 저장 수조, 시험부, 주순환 펌프, 유량계, 배관 및 계측장치 등으로 구성된다. 실험 유체로는 물을 이용하였다.

본 실험에서는 전기 설비 용량의 제한으로 인해 부분 가열 단일봉(partially heated single rod)을 이용하여 실험을 수행하였으며 이에 대한 설명은 기존 참고문헌<sup>(15)</sup>에 자세하게 설명되어 있다. Fig. 4와 Fig. 5에 부분 가열 단일봉 및 가열부(heated section)의 개략도를 나타내었다. 부분 가열 단일봉의 전체 길이는 3170 mm이며, 가열부, 구리 튜브 및 구리봉, 외경이 다른 아세탈 봉 등을 결합하여 제작하였다. 가열부는 길이 400 mm, 외경 25.4 mm, 두께 1.23 mm의 스테인레스 스틸 튜브(stainless steel tube)를 이용하였다. 이 부분에 전기를 공급, 직접적으로 가열하기 위하여 스테인레스 스틸 튜브 양 끝단에 구리봉(copper rod, L=15 mm, D=25.4 mm)과 구리 튜브(copper tube, L=1517 mm, D<sub>o</sub>=25.4 mm, t=3 mm)를 각각 brazing 방법을 이용하여 연결하고, 가열이 되지 않는 나머지 부분은 아세탈봉(acetal rod)을 이용하였다. 봉다발 유동의 축방향 온도 분포 측정 시 부분 가열 단일봉을 상하로 움직인 이후 특정 위치에 고정하여 실험하게 되는데 아세탈봉을 사용하는 경우 부분 가열 단일봉의 무게를 줄일 수 있어서 실험 시 조작이 편한 장점이 있다. 가열부인 스테인레스 스틸 튜브에 연결된 구리봉(L=15 mm, D=25.4 mm)을 또 다른 구리봉(L=2000 mm, D=12 mm)에 연결하였으며, Fig. 9에서

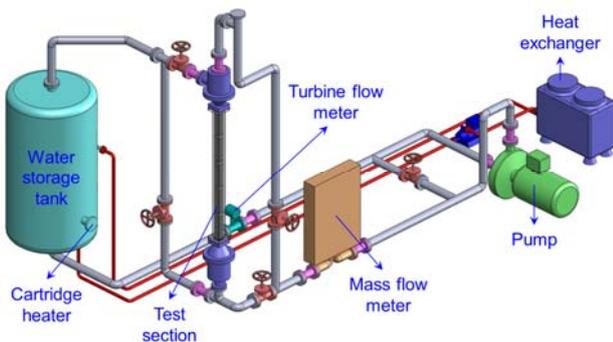


Fig. 3 Schematic diagram of OFEL<sup>(15)</sup>

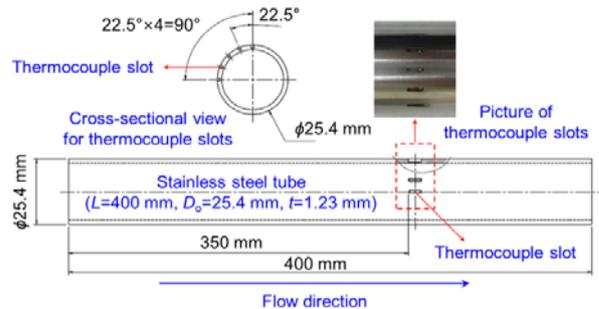


Fig. 5 Schematic diagram of heated section<sup>(15)</sup>

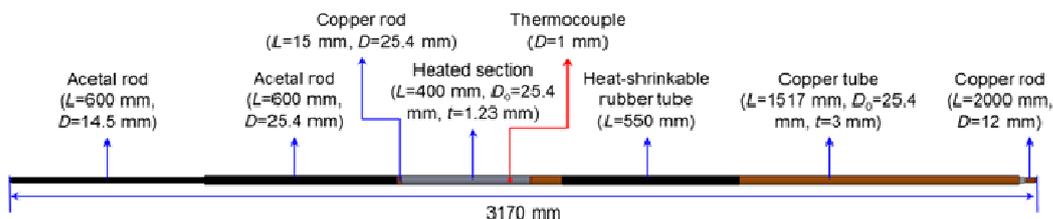


Fig. 4 Schematic diagram of partially heated single rod<sup>(15)</sup>

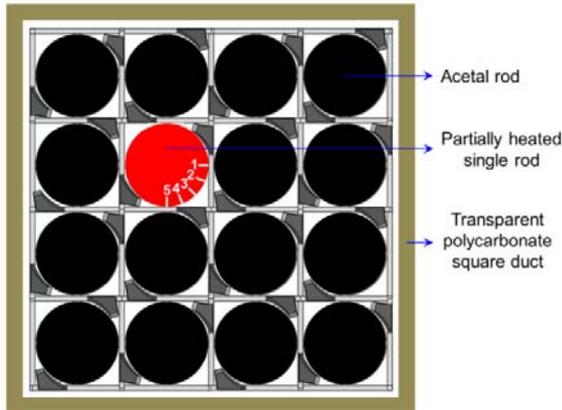


Fig. 6 Cross-sectional view of test assembly

나타낸 바와 같이 구리봉과 구리 튜브에 직류 전원 공급기(DC power supply)를 연결하여 스테인레스 스틸 튜브에 전기를 공급, 가열하였다. 한편, heat-shrinkable rubber tube로 구리 튜브( $L=1517$  mm,  $D_o=25.4$  mm,  $t=3$  mm)를 감싼 이유는 다음과 같다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 부분 가열 단일봉을 집합체 상부에서부터 삽입하게 되는데 이 때 부분 가열 단일봉과 다른 봉들 간에 일정한 간격을 유지하도록 하기 위하여 다양한 지지격자(support grid)를 설치하였다. 지지격자에는 부분 가열 단일봉이 삽입되는 설치홀(installation hole)이 가공되어 있는데 삽입된 부분 가열 단일봉이 되도록 설치홀의 중심에 있도록 하고, 전기가 공급되고 있는 부분 가열 단일봉과 금속 재질의 지지격자 간 직접적인 접촉을 막기 위하여 heat-shrinkable rubber tube를 이용하였다. 즉, 홀이 있는 지지격자(holed support grid)의 설치홀 지름은 27.4 mm이고 heat-shrinkable rubber tube로 감싼 부분의 외경은 26.7 mm이므로 부분 가열 단일봉이 집합체의 다른 봉들과 비교적 정확하게 봉 간격을 유지할 수 있다. 가열부의 벽면 온도를 측정하기 위한 열전대 설치를 위하여 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 스테인레스 스틸 튜브에 폭과 깊이는 1 mm, 길이는 5 mm의 슬롯(slot) 5개를 원주방향으로 0°에서 90° 사이 일정한 간격으로 가공하였다. 튜브 안쪽에서부터 지름 1mm의 sheath T-type 열전대를 삽입할 수 있도록 가공하였으며, 설치한 열전대를 해당 슬롯에 위치시킨 이후 sliver soldering을 이용하여 고정시켰다.

Fig. 6은 본 실험에서 사용한 봉 간격이 좁은 4×4 모의 봉다발 집합체의 단면 형상으로, 부분 가열 단일봉 및 가열부의 열전대 위치, 모의 봉다발 집합체에 모의 비틀림 혼합날개 지지격자 설치

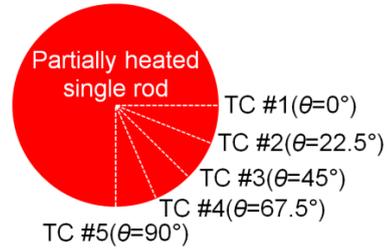


Fig. 7 Number and position of thermocouple embedded in heated section of partially heated single rod

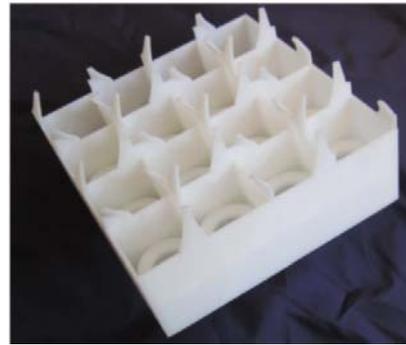


Fig. 8 Simulated twist-vane spacer grid

시 혼합날개의 형상 등을 나타내었다. 본 실험에서 사용한 4×4 모의 봉다발 집합체에서의 봉 외경은 25.4 mm, 봉 중심 간 거리는 27.44 mm로  $P/D$ 는 1.08이고 부수로의 수력직경은 12.32 mm이다. 모의 비틀림 혼합날개 지지격자가 설치된 모의 봉다발 집합체를 114 mm×114 mm의 투명한 폴리카보네이트 정사각형 덕트(transparent polycarbonate square duct)에 설치하였다. 가열부에 설치된 열전대는 중심 부수로 주위에 위치하도록 하였다.

Fig. 7에 Fig. 6에 나타낸 부분 가열 단일봉의 가열부에 설치된 열전대의 번호 및 위치를 확대하여 나타내었다. 열전대 1번의 위치를 0°라고 할 때 열전대 2번, 3번, 4번, 5번은 시계 방향으로 22.5°, 45°, 67.5°, 90° 위치이고, 비틀림 혼합날개의 끝은 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 열전대 2번을 향하고 있다.

모의 비틀림 혼합날개는 3D printing 방법을 이용하여 제작하였으며, 격자판(strap)의 높이는 40 mm, 비틀림 혼합날개의 굽힘 각도는 35°, 막힘율은 0.49이다. Fig. 8에 본 실험에 사용한 모의 비틀림 혼합날개 사진을 나타내었다.

Fig. 9에는 시험부의 개략도를 나타내었다. 실험시 축방향 온도 분포를 측정하기 위해서 부분 가열 단일봉의 가열부에 설치된 5개의 열전대가 비틀림 혼합날개 지지격자 상류 및 하류의 원하는

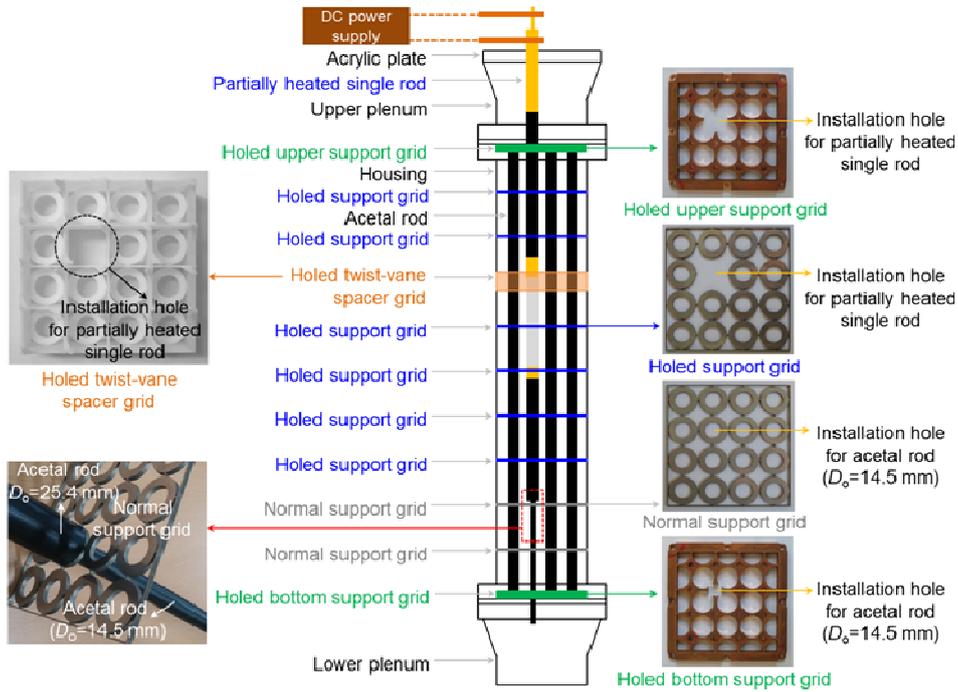


Fig. 9 Schematic diagram of test assembly

위치에 있도록 축방향으로 이동시켜 고정시킨 이후 실험을 수행하였다. 모의 봉다발 집합체 및 부분 가열 단일봉이 일정한  $P/D=1.08$ 로 유지될 수 있도록 모의 봉다발 집합체에 유동의 흐름을 방해하지 않는 지지격자(support grid)를 200 mm 간격으로 설치하였다.<sup>(15)</sup>

실험은 봉다발 유동의 축방향 평균속도가 1.5 m/s, 열유속은 26 kW/m<sup>2</sup>인 조건에서 수행하였다. Kline<sup>(18)</sup>이 제안한 측정 불확도 평가 방법을 토대로 볼 때, 벽면온도, 누셀트 수의 불확도는 5 %, 9%로 평가되었다.

### 3. 실험결과

Fig. 10에 일부 축방향 위치( $z/D_h$ )에 대해 가열부 벽면에 설치한 열전대에서 측정한 온도와 유체(물)의 온도차를 비교하여 나타내었다. x-축에는 열전대 번호와 함께 열전대의 원주 방향 위치를 각도로 나타내었으며, 열전대 번호 및 위치에 관해서는 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 10에서 나타난 바와 같이 비틀림 혼합날개 지지격자를 지나기 전 ( $z/D_h = -5.4$ )에는 열전대 3번에서 가장 낮은 온도차를 나타내었고, 열전대 1번과 5번에서 가장 높은 온도차를 나타내었다. 이러한 결과가 나타난 이유는 열전대 3번의 위치가 유로가 넓고 유동 저항이 작아서 유량이 많고 축방향 유속이 빠른 반면, 열

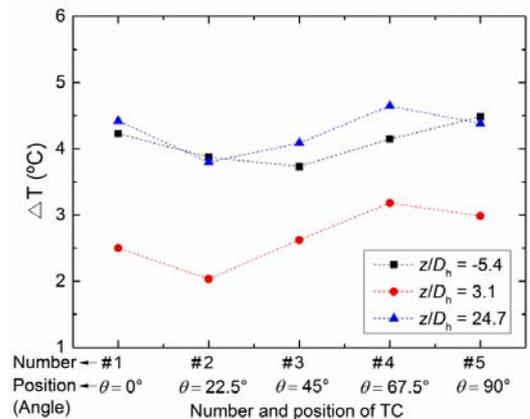


Fig. 10 Circumferential distribution of temperature difference

전대 1번과 5번의 위치는 유로가 좁은 곳으로 유동 저항이 커서 유량이 적고 유속이 느리기 때문이다. Lee 등<sup>(19)</sup>의 기존 연구에서 PIV 방법을 이용하여 봉다발 유동의 축방향 속도를 측정한 결과, 유로가 넓은 부수로 중심(subchannel center)에서의 속도가 유로가 좁은 봉과 봉 사이 간격(rod-to-rod gap center)에서의 속도보다 빠르다는 측정결과를 보고하였다. 한편, 봉다발 유동이 비틀림 혼합날개 지지격자를 지나자마자( $z/D_h=3.1$ ) 온도차는 급격하게 감소하였다. 지지격자 상류에서는 열전대 3번에서의 온도차가 가장 작았으나 지지격자 하류에

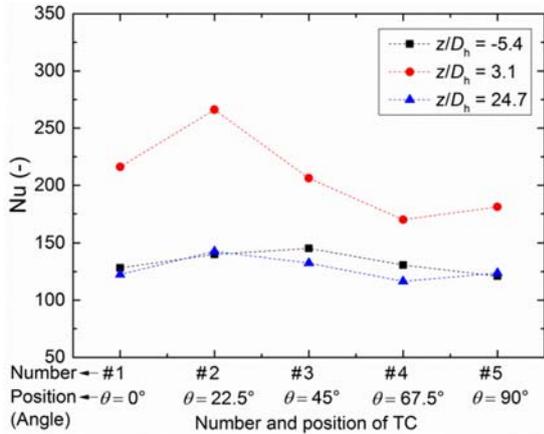


Fig. 11 Circumferential distribution of Nusselt number

서는 열전대 2번에서의 온도차가 가장 작게 나타났다. 열전대 2번의 위치는 비틀림 혼합날개 끝이 향하는 벽면으로, 열전대 2번의 위치에서 온도가 가장 낮게 측정된 이유는 비틀림 혼합날개에 의한 유동의 왜곡 때문이라 판단된다. 지지격자에서 비교적 멀리 떨어진 위치( $z/D_h=24.7$ )에서는 온도차가 증가하였으나 온도차의 전체적인 경향은  $z/D_h=3.1$  지점에서와 유사하였다. 즉, 여전히 열전대 2번에서의 온도차가 가장 작게 나타났다.

Fig. 11에는 Fig. 10의 온도차 측정 데이터를 가지고 일부 축방향 위치에 대해 누셀트 수의 원주방향 분포를 나타내었다. 누셀트 수는 아래와 같은 식을 이용하여 구하였다.

$$Nu = \frac{(q'' / \Delta T) D_h}{k} \quad (3)$$

여기서  $q''$ ,  $\Delta T$ ,  $k$ 는 각각 열유속, 온도차, 유체의 열전도도를 나타낸다. 비틀림 혼합날개 지지격자 상류에서는 열전대 3번 위치에서 누셀트 수가 가장 크게 측정되었다. 그러나 하류에서는 열전대 2번 위치에서 누셀트 수가 가장 크게 측정되었다.  $z/D_h=3.1$  지점에서 열전대 2번 위치의 누셀트 수는 266이었고 누셀트수가 가장 큰 곳과 작은 곳의 차이는 96으로 나타났다. 반면, 비틀림 혼합날개에서 비교적 멀리 떨어진  $z/D_h=24.7$  지점에서의 경우 열전대 2번 위치의 누셀트 수는 140이었고, 누셀트 수가 가장 큰 곳과 작은 곳의 차이는 23이었다. 즉, 비틀림 혼합날개 하류에서의 경우, 혼합날개에서 멀어짐에 따라 누셀트 수의 최댓값과 최솟값 차이가 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 12에 벽면 온도와 유체 온도 간 온도차에

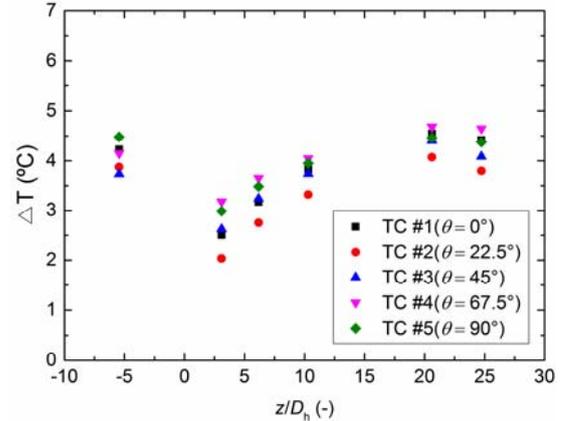


Fig. 12 Axial distribution of temperature difference

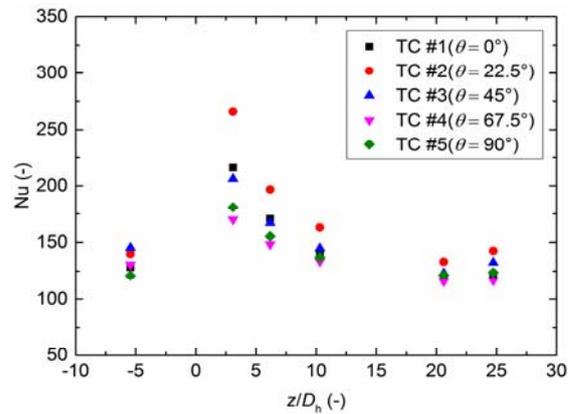


Fig. 13 Axial distribution of Nusselt number

대한 축방향 분포를 나타내었다. 지지격자 상류에서의 평균 온도차는 4.1°C이었다. 지지격자를 지나자마자 온도차는 급격하게 감소하였으며 평균 온도차는 2.7°C이었다. 지지격자에서 멀어짐에 따라 온도차는 상승하는 경향을 나타냈고, 상류에서의 온도차와 유사한 값으로 회복되어갔다. 앞서 언급한 바와 같이 Fig. 12를 통해서도 지지격자 상류에서는 열전대 3번이 가장 낮은 온도차를 나타내고, 지지격자 하류에서는 열전대 2번이 가장 낮은 온도차를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 13에 축방향 위치에 따른 누셀트 수 분포를 나타내었다. 지지격자 상류에서 평균 누셀트 수는 133이었다. 지지격자를 지난 이후 누셀트 수는 급격하게 증가하였으며,  $z/D_h=3.1$ 에서 평균 누셀트 수는 208이고, 최대 누셀트 수는 열전대 2번에서 266으로 측정되었다. 혼합날개 지지격자에서 멀어짐에 따라 누셀트 수는 점차 감소하는 경향을 나타냈다.

Fig. 14에 Fig. 13을 바탕으로 누셀트 수의 비

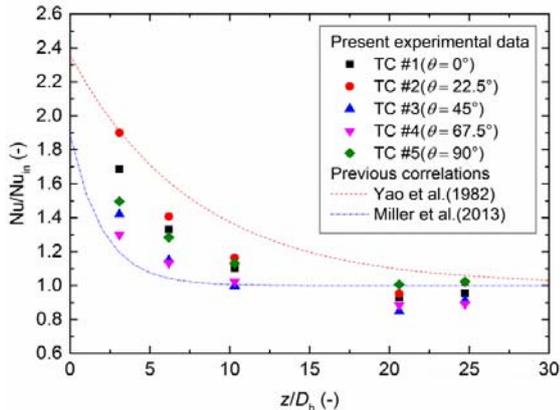


Fig. 14 Variation of  $Nu/Nu_{in}$  and their comparison with the previous correlations

(Nusselt number ratio= $Nu/Nu_{in}$ )를 나타내었다. 누셀트 수의 비는 지지격자 하류 축방향 위치에서의 누셀트 수를 지지격자 상류에서의 누셀트 수로 나누어 구하였다. 따라서 누셀트 수의 비는 혼합날개 지지격자에 의해 강제대류열전달이 얼마나 증대되었는지를 나타내는 척도가 된다. 또한, Fig. 14에 본 실험데이터와 함께 식 (1)에 나타낸 Yao 등<sup>(16)</sup> 상관식과 식 (2)에 나타낸 Miller 등<sup>(17)</sup> 상관식에 의한 예측값을 비교를 위해 함께 나타내었다. 본 실험데이터를 살펴보면, 비틀림 혼합날개 지지격자 근처 하류( $z/D_h=3.1$ )에서 누셀트 수는 지지격자 상류에 비해 평균 56% 증대되는 것으로 측정되었다. 가장 큰 누셀트 수 증대는 열전대 2번에서 측정되었으며 입구와 비교하여 90% 증대되었다. 이후  $Nu/Nu_{in}$  값은 비틀림 혼합날개 지지격자에서 멀어짐에 따라 점차적으로 감소하였다. 기존 누셀트 수 증대 예측 상관식과 비교한 결과를 살펴보면, Yao 등<sup>(16)</sup> 상관식의 경우 본 실험데이터를 과대 예측하고 있음을 알 수 있고, Miller 등<sup>(17)</sup> 상관식의 경우 현재 실험데이터를 과소 예측하고 있음을 알 수 있다. 실험데이터와 Yao 등<sup>(16)</sup> 상관식은  $22\% (=1/M[(Nu/Nu_{in})_{cor} - (Nu/Nu_{in})_{exp}] / ((Nu/Nu_{in})_{exp} \times 100\%))$ , Miller 등<sup>(17)</sup> 상관식은 12.2%의 차이를 나타내었다. 비틀림 혼합날개 지지격자의 영향이 비교적 강하게 나타난다고 판단되는  $z/D_h=6.2$  이내의 영역에서, 본 실험데이터와 Yao 등<sup>(16)</sup> 상관식의 경우 27%, Miller 등<sup>(17)</sup> 상관식의 경우 19%로 차이가 커졌다. 본 실험데이터와 기존 상관식 간 이러한 차이가 나타난 이유는 Yao 등<sup>(16)</sup> 상관식과 Miller 등<sup>(17)</sup> 상관식이 개발될 때 고려된 혼합날개와 봉다발의  $P/D$ 가 본 연구에서 이용한 비틀림 혼합날개와 봉 간격이 좁은 조건의 봉다발 집합체

형상이 아니기 때문으로 판단된다.

본 연구를 통하여 봉 간격이 좁은 이중냉각 환형핵연료 집합체에서 신개념 비틀림 혼합날개 지지격자에 의해 강제대류열전달 성능이 크게 증대될 수 있음을 확인하였다.

혼합날개에 의한 강제대류열전달 증대는 매우 복잡한 현상으로 봉다발 집합체의 형상(배열 및  $P/D$  등) 및 혼합날개 지지격자의 세부 형태(막힘율 및 혼합날개 굽힘각도 등)에 영향을 받을 수 있다. 비틀림 혼합날개 지지격자의 열전달 관련 선행 연구<sup>(14,15)</sup>와 본 연구 결과를 통해 볼 때, 같은 비틀림 혼합날개 지지격자라 하더라도 집합체의  $P/D$ 에 의해 강제대류열전달 성능 향상이 다르게 나타나는 것으로 판단된다. 따라서 비틀림 혼합날개가 실제 다양한 종류의 핵연료 집합체에 적용되기 위해서는 다양한 형태의 집합체 형상 및 조건에서 실험데이터가 확보되어야 하며, 더 나아가 비틀림 혼합날개 지지격자의 형상 최적화를 위한 연구가 수행되어야 한다.

한편, 기존의 상관식들을 살펴보면 Yao 등<sup>(16)</sup> 상관식[식 (1)]의 경우 누셀트 수 증대는 막힘율과 혼합날개의 굽힘각도에 의해서 영향받는다고 되어 있는 반면, Miller 등<sup>(17)</sup> 상관식[식 (2)]은 막힘율과 레이놀즈 수에 의해 누셀트 수 증대가 영향받는 것으로 표현되고 있다. 기존 상관식을 토대로 볼 때 혼합날개 지지격자에 의한 누셀트 수 증대에 대한 일반화가 아직 부족한 상황이다. 따라서 추후 더욱 다양한 실험데이터 확보가 이루어져야 하고 그러한 실험데이터를 토대로 비틀림 혼합날개 지지격자에 대한 누셀트 수 증대 상관식이 제안되어야 할 것으로 판단된다.

봉다발 유동에서 혼합날개 지지격자에 의해 야기되는 열전달 현상을 CFD(Computational Fluid Dynamics) 방법을 이용하여 예측하려는 연구는 매우 활발하게 진행되고 있으나 열유동 현상이 매우 복잡하여 현재까지도 정확한 예측을 하는 것이 쉽지 않다. 비틀림 혼합날개 지지격자를 실제 이중냉각 환형핵연료 집합체에 적용하기 위해서는 열수력적 성능을 최적화하고 일반화하는 연구가 필요하며, 이를 위해서는 실험적 연구 뿐 아니라 CFD 방법을 이용한 연구가 동시에 이루어져야 한다. 이를 위하여 본 실험데이터가 CFD 방법의 검증에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 현재, 확보된 비틀림 혼합날개 지지격자의 열수력 실험데이터를 토대로 관련 CFD 계산을 수행중이며, 추후 이와 관련한 결과를 보고할 계획이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 신개념 비틀림 혼합날개의 이중냉각 환형핵연료 집합체 적용을 위하여 봉 간격이 좁은 모의 봉다발에서 비틀림 혼합날개 지지격자의 강제대류열전달 성능 평가에 대한 실험을 수행하였다. 본 연구를 통하여 도출한 주요 결과를 아래에 정리하였다.

(1) 원주방향 온도 분포의 경우, 비틀림 혼합날개 지지격자 상류에서는 부수로 중심에서, 하류에서는 비틀림 혼합날개 지지격자 끝이 향하는 지점에서 벽면 온도가 가장 낮게 측정되었다.

(2) 축방향 온도 분포의 경우, 비틀림 혼합날개를 지나자마자 모든 벽면 온도는 급격히 감소하였고, 비틀림 혼합날개에서 하류로 멀어짐에 따라 온도는 점차 증가하는 경향을 보였다.

(3) 본 실험조건에서 비틀림 혼합날개 지지격자에 의해 지지격자 하류에서 누셀트 수는 입구 대비 최대 56% 증대되었다.

(4) 본 실험결과와 기존 누셀트 수 증대 상관식을 비교한 결과, Yao 등<sup>(16)</sup> 상관식은 22%, Miller 등<sup>(17)</sup> 상관식은 12.2%로 본 실험데이터를 예측하였다.

(5) 본 실험결과를 토대로, 봉 간격이 좁은 이중냉각 환형핵연료 집합체에 비틀림 혼합날개 지지격자를 적용하였을 때 강제대류열전달 성능이 효과적으로 증대될 가능성을 확인하였다.

#### 후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌 (References)

(1) Chun, T. H., Shin, C. H., In, W. K., Lee, K. H., Park, S. Y., Kim, H. T., Bae, K. H. and Song, K. W., 2009, "A Potential of Dual-cooled Annular Fuel for OPR-1000 Power Uprate," *Proceedings of 2009 LWR Fuel Performance*, Paris, France, Paper 2185.

(2) In, W. K., Shin, C. H., Oh, D. S. and Chun, T. H., 2010, "Thermal-hydraulic and Thermomechanical Assessment of Dual-cooled Annular Fuel for the OPR-1000 Application," *Proceedings of 2010 LWR Fuel Performance*, Orlando, FL, USA, Paper 031.

(3) Lee, C. Y., Shin, C. H., Park, J. Y. and In, W. K., 2012, "Experimental Study on Pressure Loss of

Flow Parallel to Rod Bundle with Spacer Grid," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 36, No. 7, pp. 689~695.

(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) 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.

(12) In, W. K., Oh, D. S., Lee, C. Y., Kwak, Y. K., Shin, C. H., Chun, T. H., Park, J. Y., Hwang, D. H., Kwon, H. and Kim, S. J., 2015, "Nuclear Fuel Thermal-Hydraulic Technology Development," KAERI/RR-3922/2014.

(13) 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, 662~664.

(14) 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.
- (15) Lee, C. Y., 2016, "Evaluation of Convective Heat Transfer Performance of Twist-Vane Spacer Grid in Rod Bundle Flow," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 40, No. 3, pp. 157~164.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) Kline, S. J., 1985, "The Purposes of Uncertainty Analysis," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 153~160.
- (19) Lee, C. Y., Shin, C. H., Park, J. Y. and In, W. K., 2013, "An Experimental Investigation on Turbulent Flow Mixing in a Simulated 3×3 Dual-cooled Annular Fuel Bundle Using Particle Image Velocimetry," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 260, pp. 134~144.