

< 논문 >

## 핵연료집합체에서의 대형이차와류 혼합날개의 열전달 특성에 관한 연구

안정수\* · 최영돈\*

(2005년 6월 13일 접수, 2005년 11월 7일 심사완료)

### A Study of Heat Transfer Characteristics of Large Scale Vortex Flow Mixing Vane of Nuclear Fuel Rod Bundle

Jeong Soo An and Young Don Choi

**Key Words:** Nuclear Fuel Rod Bundle(핵연료 집합체), LSVF(대형이차와류), Mixing Vane(혼합날개)

#### Abstract

Mixing vanes have been installed in the space grid of nuclear fuel rod bundle to improve turbulent heat transfer. Split mixing vanes induce the vortex flow in the cooling water to swirl in sub-channel of fuel assembly. But, The swirling flow decays rapidly so that the heat transfer enhancing effect limited to short length after the mixing vane. In the present study, the large scale vortex flow(LSVF) is generated by rearranging the mixing vanes to the coordinated directions. This LSVF mixing vanes generate the most strong secondary flow vortices which maintain about 35  $D_H$  after the spacer grid. The streamwise vorticity generated by LSVF sustain two times more than that split mixing vane. Heat transfer in the rod bundle occurs greatly at the same direction to cross flow, and maximum temperature at the surface of bundle drops about 1.5K

#### 1. 서론

원자로 연료봉 집합체내의 지지격자는 연료봉 다발의 간격을 일정하게 유지시켜 냉각재의 유로를 확보하고 유체 유인진동으로 인한 연료봉의 손상을 방지해줄 뿐만 아니라 유동혼합을 촉진하여 열전달 성능을 증가시킨다. 열전달 성능을 향상시키기 위한 적극적인 방법으로 냉각수의 흐름방향을 조절하고 혼합할 수 있도록 곡선형의 지지격자판 형상을 사용하거나 지지격자에 혼합날개를 부착하고 있다. 혼합날개는 부수로 내에 와류(vortex flow)를 발생시켜 난류를 생성하고 유동

혼합을 촉진시켜 연료봉 부수로의 열전달을 증진시키나 부가적인 유동저항으로 인해 수송동력을 증가시키기도 한다.

지지격자와 혼합날개의 새로운 형상에 관한 연구는 궁극적으로 부수로의 열전달 성능 향상을 위해 수행되고 있으나 열수력 건전성을 해치지 않는 범위 내에서 수행되어야 한다. 특히 연료봉은 인체에 해로운 방사능 물질을 함유하고 있어 연료봉 표면의 열수력 건전성은 원자로 안전운전에 매우 중요하다. 연료봉표면에 국부적으로 나타나는 열점(hot spot)은 임계열유속(Critical heat flux)조건을 야기하여 막비등(film boiling)에 의해 이상유동을 발생시키고 이는 연료봉의 파손으로 연결된다. 따라서 동일한 냉각재 온도에서 연료봉 표면 최고온도가 낮을수록 연료봉의 건전성 확보가 용이하며 원자로의 운전여유도가 향상되므로, 연료봉 최고 표면온도는 원자로 안전 운전과 연료봉에서 얻을 수 있는 최고의 열유속에 관계 되는 중요한 파라미터가 된다.

\* 책임저자, 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : anjsoo42@hotmail.com  
TEL : (02)926-5908 FAX : (02)926-9290

\* 회원, 고려대학교 기계공학과

더욱 강한 유동 혼합과 열전달증진을 위해 Rehme 등<sup>(1)</sup>은 다양한 형태의 지지격자의 압력강하를 측정하였으며 Rowe 등<sup>(2)</sup>은 횡류혼합현상을 관찰하여 봉간격이 가장 중요한 인자임을 관찰하였고 Ibragimov 등<sup>(3)</sup>은 벽면 전단응력과 열전달에 있어서 구배전달이 유동장을 지배하는 역할을 함을 설명하였다. Shen 등<sup>(4)</sup>은 혼합날개의 각도 25에서 가장 좋은 혼합율을 가지는 것으로 관찰하였으며 Yang과 Chung<sup>(5)</sup>은 활발한 난류혼합거리는 지지격자로부터  $Z/DH = 10$ 까지 이고 하류 부분 난류는 상류 부분보다 등방성을 가지고 있음을 규명하였다. Karoutas 등<sup>(6)</sup>은 전산프로그램을 이용하여 선회계수(swirl factor)를 조사하였고, In 등<sup>(7)</sup>은 비틀림베인(twisted vane)을 제안하여 혼합율과 압력강하를 해석하였다.

그러나 기존의 연구는 단순히 혼합날개의 형상을 변형시킴으로서 부수로 내의 선회류를 증가시키는 방향으로 진행되어왔다. 이에 본 연구에서는 부수로 전체에 대형 2차 와류를 생성시키는 새로운 개념의 LSVF 혼합날개를 제안하고 부수로에 대한 전산해석을 수행하여 연료봉 표면 최고온도를 해석함으로써 LSVF 혼합날개의 적용가능성을 확인하고자 한다.

## 2. 대형 2차와류 혼합날개

### 2.1 대형 2차와류 혼합날개의 개념

기존의 Split 형태의 혼합날개는 부수로 중심에 와류를 발생시킨다<sup>(2,4,6)</sup> 이 와류에 의해서 생성되는 난류는 길이척도(length scale)가 대단히 작기 때문에 바로 소멸되어 혼합날개에 의한 열전달 성능 증진효과가 단거리에 제한된다.<sup>(5)</sup> 지속적인 난류 생성 효과를 얻으려면 지지격자의 설치 간격을 좁혀야 하나 이는 유동 방해물이 많아져서 펌프 구동력을 크게 증가시키는 요인이 된다.

더욱이 부수로 내의 유동이 지배적이며 인접 부수로간 유동인 교차류(cross flow)의 변화가 적기 때문에 부수로와 부수로간의 난류 증진효과 및 열전달 효과를 크게 기대할 수 없다.<sup>(4)</sup> 단일 부수로 내에서만 선회류(swirl)를 생성시키는 기존의 방식에서 벗어나 부수로 전체에 대하여 지지격자에 부착된 혼합날개들의 각도를 일정한 방향으로 조정하면 대형 2차 와류(Large Scale Vortex Flow, LSVF)를 발생시킬 수 있다. Park<sup>(8)</sup>은 이 LSVF에 의한 대형 2차 와류는 단일 부수로 중심

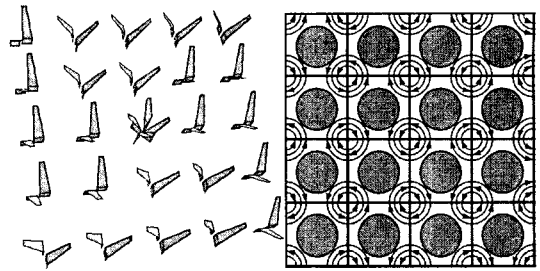


Fig. 1 Schematic figure of split mixing vane & swirl flow

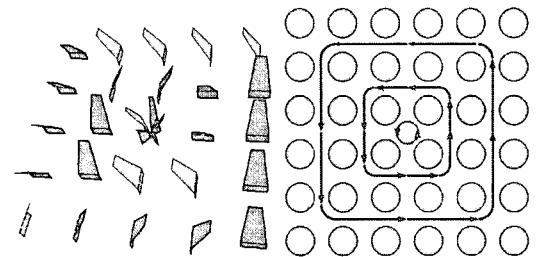


Fig. 2 Schematic figure of LSVF mixing vane & Large Scale Vortex flow

에서의 와류에 비해 서서히 소멸되기 때문에 기존 펌프 구동력의 변화 없이 열전달 성능을 증진하는 효과를 가져 올 수 있다고 하였다. 또한 부수로 내의 유동이 아닌 부수로 전체에 대한 유동을 일으키므로 교차류(cross flow)가 비약적으로 확대되어 냉각수 유로단면 전체의 유체 온도의 균등화에 크게 기여할 것으로 여겨져 평균 열전달 성능의 향상과 더불어 원자로의 건전성 확보에 도움을 줄 것으로 기대된다.<sup>(9)</sup>

### 2.2 냉각수 유로의 열전달 해석

#### 2.2.1 유동조건 및 경계조건

가압경수형 원자력발전소에서 사용하고 있는 연료봉 집합체는 발전용량에 따라 14×14, 16×16, 17×17 등 다양한 형태의 봉다발을 사용하고 있으나 본 연구에 사용한 모의 연료봉 집합체는 실험용량과 전산해석의 능력을 고려하여 냉각제의 유로를 잡아주는 정사각덕트형태의 하우징(housing)과 그 내부에 6×6 연료봉으로 구성되어 있고, 반경방향으로는 순환조건(cyclic condition)을 도입하여 3×3 연료봉만을 전산해석 하였다.

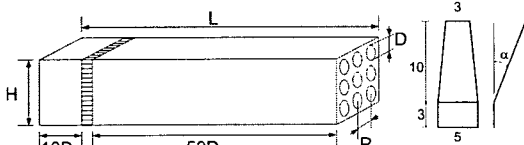
해석영역은 지지격자가  $60D_H$  간격으로 설치된

봉다발 형태를 가지고 있으며 지지격자 앞뒤로 각각  $10D_H$ ,  $50D_H$ 의 부수로를 배치하였고 Fig. 3(a)에 도시하였다. 지지격자는 유동 방해물로서 격자 난류를 생성시키고 유로의 단면축소를 일으키는 등 blunt body로 일정두께를 가지나 혼합날개는 유동의 방향을 변화시키는 안내날개(guide vane)의 역할을 하므로 박편격자(thin wall)로 모형화 하였다.

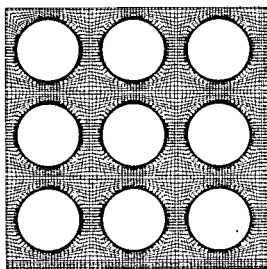
열 및 유동조건을 획득하기 위하여 한국 표준형 원자력 발전소인 울진원자력 3/4호기의 노심 열수력자료<sup>(10)</sup>를 참조하여 위의 조건을 만족하는 완전발달된 유동장을 기준으로 질량유량을 계산하고, 입·출구의 경계조건으로 위의 질량유량과 상류평균온도(Upstream bulk temperature)를 만족시키는 주기조건(periodic condition)을 가정하였다. 연료봉은 일정열유속(constant heat flux) 조건으로 열량을 공급한다.

Table 1 Rod bundle channel data

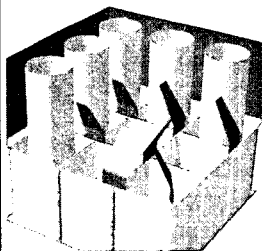
Rod Diameter (mm)	D	10.0
Rod Pitch (mm)	P	13.3
Spacer Grid Pitch (mm)	L	720
Housing (mm)	H	85.3
Hydraulic Diameter (mm)	$D_h$	12.09
Reynolds Number	Re	61,400
Upstream Bulk Temperature (°C)	T	296
Fuel Rod Heat Flux (KW/m <sup>2</sup> )	Q	567.039
Vane Bending Angle (degree)	$\alpha$	30



(a) Configuration and dimension of domain



(b)Spanwise direction grid



(c) Fuel assembly

Fig. 3 Computational domain

Table 1에 원자로 부수로 내 해석영역에 대한 상세한 재원과 유동조건을 기술하였다.

본 연구에 사용된 격자체는 정렬격자 형태의 육면체 격자로서 Fig. 3(b)에 나타내었으며 유동의 변화가 가장 크게 나타나는 부분인 지지격자의 입·출구와 혼합날개 및 그 하류영역에 집중적으로 삽입하였다. 지지격자에서부터 입출구까지의 격자는 배율 1.15으로 선형 확장되는 간격을 가지고 있다. 전 해석영역에 사용된 node수는 1,356,850이다.

경계조건으로 벽함수(wall function)를 사용하지 않고 벽면 미세격자(fine grid)법을 적용하고자 벽면에 격자를 밀집시키기 위해 다중영역법을 이용하여 유동장을 여러 영역으로 나눠 각 영역내에 격자를 생성하도록 하여 구조적으로 가장 복잡한 영역인 혼합날개부분에서도 비대칭도(skewness)가 0.7 이하이고 벽면 첫 번째 격자를  $y^+ \leq 10$ 에 위치하도록 조절하였다.

2.2.2 지배방정식 및 난류모델

본 연구에서는 FLUENT Code를 사용하여 유동을 해석하였으며 난류모형으로 실제 열전달이 이루어지는 저레이놀즈수 영역을 정확히 해석하기 위해 저레이놀즈수 RSM을, 압력변형을 모형으로 SSG(Speziale, Sarkar, Gaski) model을 사용하였으며 사용된 수식과 모형상수는 다음과 같다.

이때 SSG 모형은 벽면사항을 사용하지 않고 불변항을 사용하기 때문에 위와 같이 복잡한 형상에 대한 모형으로 적합하다고 알려져 있다.

해의 수렴은 충분히 반복수행(iteration)하여 잔차(Residual)가 변하지 않을 때를 기준으로 하였으며 반복수행 1500 회에 질량 잔차 기준  $1e-4$  이하를 유지 하였다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

Table 2 Turbulence model constance

$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$\sigma_T$	$\sigma_\theta$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$
0.09	0.82	1.3	1	0.85	1.44	1.83
$C_1$	$C_1'$	$C_2$	$C_3$	$C_3'$	$C_4$	$C_5$
3.4	1.8	4.2	0.8	1.3	1.25	0.4

운동량방정식

$$\frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right] - \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (2)$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial \rho U_i \theta}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i \theta} \right) \quad (3)$$

$$\overline{u_i \theta} = - \frac{\nu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \quad (4)$$

레이놀즈 응력 방정식

$$U_j \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + D_{ij}^T + \phi_{ij} - \epsilon_{ij} \quad (5)$$

$$D_{ij}^T = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} \right) \quad (6)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{2}{3} \rho \epsilon \delta_{ij} \left( 1 + \frac{2k}{\gamma R T} \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \phi_{ij} = & -a_{ij} \left( C_1 + C_1' \frac{P}{\epsilon} \right) \frac{k}{T} + C_2 \left( a_{ik} a_{kj} - \frac{1}{3} A_2 \delta_{ij} \right) \frac{k}{T} \\ & + (C_3 - C_3' \sqrt{A_2}) S_{ij} k \\ & + C_4 \left( a_i S_{kj} + a_{jk} S_{ki} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \right) k \\ & + C_5 \left( a_{ik} \Omega_{kj}^A + a_{jk} \Omega_{ki}^A \right) k \end{aligned} \quad (8)$$

난류소산율 방정식

$$\frac{\partial (\rho \epsilon U_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{P_{ii}}{2} \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (9)$$

3. 대형 2차와류 혼합날개의 열전달특성

3.1 평균 유동장과 난류구조

Fig. 4는 주유동 방향으로 혼합날개에 의해 발생된 2차 유동의 강도의 단면평균 값의 변화를 보여주고 있다. LSVF 혼합날개가 부착된 부수로에서 강하게 발생하는 대형 2차 와류로 인해 지속적으로 2차 유동이 일어나며 그 영향이 하류까지 유지되고 있다.

LSVF 혼합날개에서 발생하는 2차 유동의 강도는 split 혼합날개의 경우와 크게 차이가 나지 않으나 쉽게 소멸되지 않고 20 Z/Dh 이후에도 10% 이상 지속되어 split 혼합날개보다 2배이상 지속되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5은 혼합날개가 부착된 부수로에 대해 유

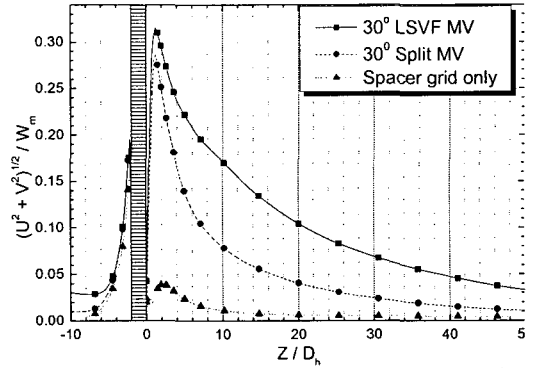
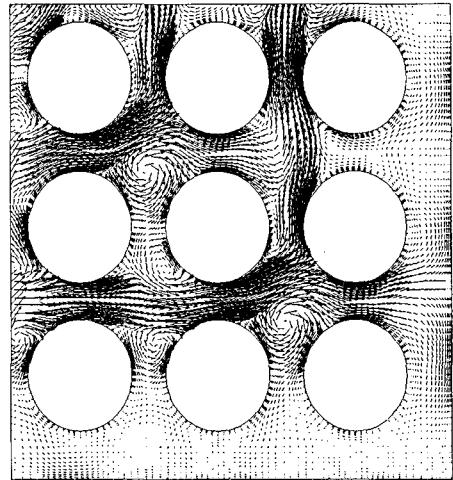
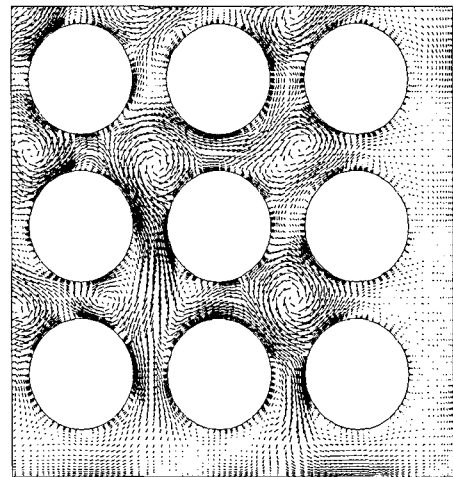


Fig. 4 Variation of cross-sectional averaged secondary flow intensity



(a) LSVF M/V



(B) Split M/V

Fig. 5 Distribution of secondary flow vector at 6 Z/Dh

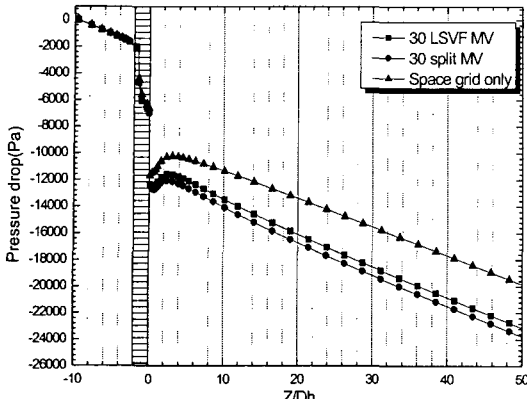


Fig. 6 Variation of pressure drop after spacer grid

로 단면의 2차 유동의 변화를 속도벡터로 보여주고 있다. split 혼합날개의 경우는 단일 부수로내에 부수로의 중심을 중점으로하는 독립적인 선회류(swirl)를 형성하고 다시 선회류와 연료봉 사이에 조그만 와류(vortex)를 형성하고 있다. 인접 부수로 사이에서의 유동은 서로 대칭이 아니고 교차류(cross flow)도 나타나고 있으나 그 정도는 크지 않다. 하우징(housing) 벽면 부수로에서는 혼합날개가 없으므로 유동혼합이 거의 없으며 벽면효과 의 영향으로 현저하게 유동장이 발달하지 못하고 있다. 단일 부수로에 독립적으로 2차 유동을 형성하는 split 혼합날개와 달리 LSVF 혼합날개는 의도한 바와 같이 전체 부수로에 대해 2차 유동을 형성하고 있다. 따라서 교차류가 비약적으로 증가되어 각 부수로간 온도 균등화에 큰 기여를 할 것으로 여겨져 평균 열전달 성능의 향상과 더불어 원자로의 건전성확보에 도움을 줄것으로 기대된다.

Fig. 6 은 봉다발 부수로 유동장에서 압력 분포를 보여주고 있다. 압력은 펌프구동력에 직접영향을 끼치므로 혼합날개 최적설계에 중요한 인자이나 혼합날개의 형상에 따른 압력손실의 차이는 크게 나타나지 않고 있다. 선행연구에 따르면 압력손실의 차이는 혼합날개의 날개각에 민감하다.

### 3.2 난류생성구조

부수로 내에서의 난류공급원은 지지격자에 의한 것과 혼합날개에 의해 발생한 2차유동으로 발생하는 와류, 선회유동등에서 발생하는 전단응력에 의해 발생된다. 특히 2차 유동으로 발생하는 난류는 지지격자의 경우와는 달리 2차 유동이 지

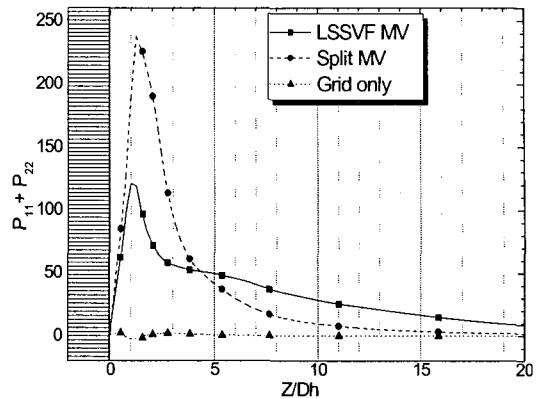


Fig. 7 Variation of cross-sectional averaged Tangential Reynolds-stress production

속되는 한 연속적으로 발생하게 된다.<sup>(11)</sup> 그런데 지지격자에 의한 격자난류(grid turbulence)는 주유동 방향속도성분의 전단응력을 발생시키므로 주유동 방향의 레이놀즈 응력만을 크게 발생시키고 횡방향 레이놀즈 응력은 2차 유동의 와류, 선회유동등에서 발생하는 전단응력에 의해 발생된다. 이와 같이 난류공급원에 따라 발생하는 난류구조와 성분이 바뀌기 때문에 등방성 모형인 k-ε 모형으로는 충분한 해석을 할 수 없고 2차 모멘트 모형인 RSM을 사용하여야 한다.

Fig. 7에서 횡방향 레이놀즈 응력의 생성량 단면평균값의 변화를 나타내었다.

지지격자에 의한 격자난류(grid turbulence)는 주유동방향 속도성분의 전단응력을 발생시키므로 주유동방향의 레이놀즈 응력만을 크게 발생시키나 횡방향 레이놀즈 응력은 2차 유동의 와류, 선회유동 등에서 발생하는 전단응력에 의해 발생된다. split 혼합날개의 경우는 선회유동이 더 작은 영역에서 이루어지므로 전단응력은 크게 나타나 횡방향 레이놀즈응력의 생성이 더 크다. 하지만 이러한 선회유동은 이후 급격히 감소하여 10 Z/Dh 이후에는 거의 소멸하며 이에 따라 횡방향 레이놀즈 응력의 생성도 급격히 감소하게 된다. LSVF 혼합날개의 경우는 2차 유동이 전 부수로내의 큰 영역에서 이루어지므로 전단응력은 더 작고 초기에 횡방향 레이놀즈 응력의 생성이 작다. 하지만 2차 유동의 지속이 split 혼합날개에 비해 2배 이상 되기 때문에 횡방향 레이놀즈 응력의 생성도 지속적으로 이루어져 전체 난류운동 에너지를 하류까지 유지시킬 수 있게 된다.

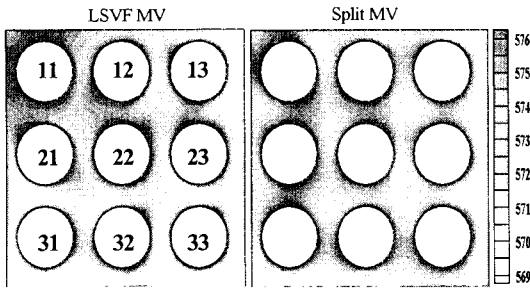


Fig. 8 Distribution of temperature at 50 Z/Dh

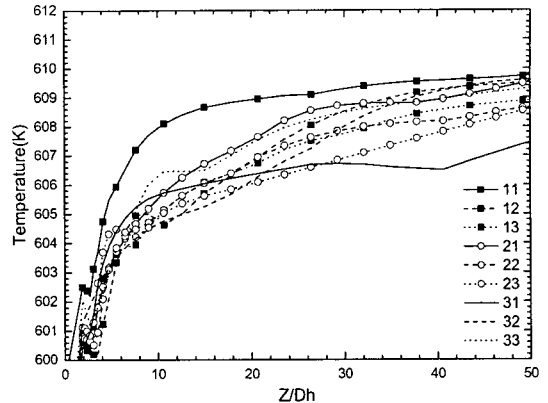
3.3 열전달 특성

Fig. 8는 혼합날개가 부착된 부수로에 대해 온도장의 분포를 보여주고 있다. Split 혼합날개의 경우나 LSVF 혼합날개의 경우 유동장내에서는 모두 내부 연료봉 주변이 더 높은 온도장을 나타내는 경향을 보이는데 이는 최외각에 열공급이 없는 Housing 영역이 존재하기 때문이다. Split 혼합날개가 설치된 부수로는 특별한 경향 없이 부수로 사이에 거의 차이가 없는데 비해 LSVF 혼합날개를 설치한 경우는 혼합날개에 의해 생긴 대형 이차와류의 순환고리에 따라 온도장이 발달하는 경향을 보이고 있다.

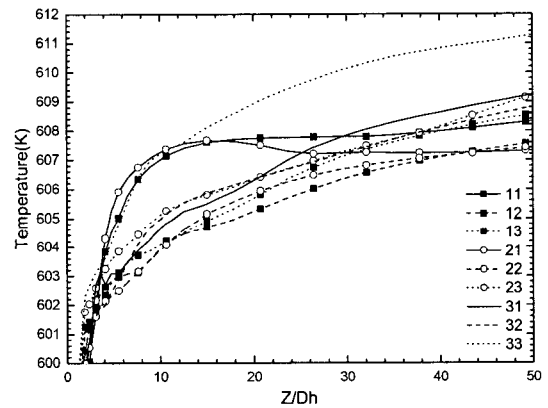
Split 혼합날개의 경우는 교차류가 상대적으로 적기 때문에 각 부수로의 중심에서 최고온도를 나타내는 분포를 가지게 되나 LSVF 혼합날개의 경우는 풍부한 교차류로 인해 순환고리 내에서 균일한 온도분포를 나타내고 있다.

Fig. 9은 각 연료봉 표면의 최고온도를 보여주고 있다. LSVF 혼합날개의 경우는 대형 이차와류의 순환고리가 형성되지 않은 11번 연료봉을 제외하고는 대체적으로 균일한 온도분포를 나타내고 있어 연료봉의 건전성에 크게 좋은 결과를 제시하고 있다. 11번 연료봉 주변은 대형이차와류의 순환고리가 형성되지 않아 이차유동이 약할 뿐 아니라 주변 유동장도 높은 온도 분포를 보이므로 연료봉 표면의 최고온도를 보이는 것으로 사료된다.

이에 비해 Split 혼합날개의 경우는 연료봉 표면의 최고 온도가 내부의 11번 연료봉이 아니라 최외각의 33번 연료봉에 존재한다. 이는 상대적으로 빈약한 이차유동으로 인해 최외각 Housing 영역 등에 이차유동이 존재하지 않는 Dead Zone 이 형성되고 이 영역에서 열전달효율이 떨어지기 때문이다.



(a) LSVF mixing vane



(b) Split mixing vane

Fig. 9 Maximum temperature variation of each Fuel rod

Table 3 Maximum, minimum fuel rod surface temperature

	Max	Min	$\Delta T$
LSVF	610.02	599.71	10.31
Split	611.66	600.39	11.27

Table 3에서 보는 바와 같이 최고 온도가 LSVF 혼합날개의 경우는 610.02°K, Split 혼합날개의 경우는 611.66°K로 1.5°K 이상의 차이를 보이고 있다. 연료봉 표면온도를 낮추기 위해서는 유동장의 유량을 증가시켜야 하며 이는 펌프 구동력의 증가로 연결된다. 따라서 동일한 유동조건하에서 추가적인 펌프 구동력의 증가가 필요 없는 LSVF의 경우가 경제적인 측면에서 이득이 있을 것으로 사료된다.

Fig. 10과 11은 각각 33번 연료봉의 원주방향의

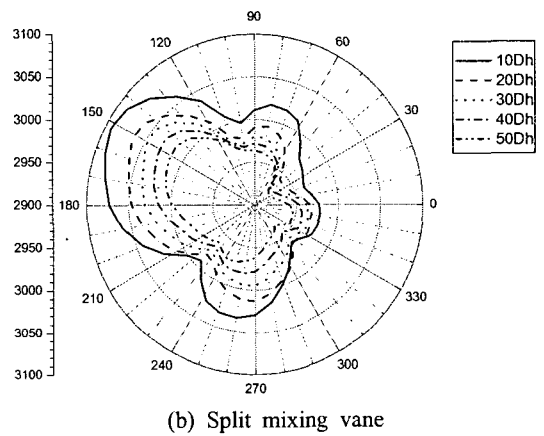
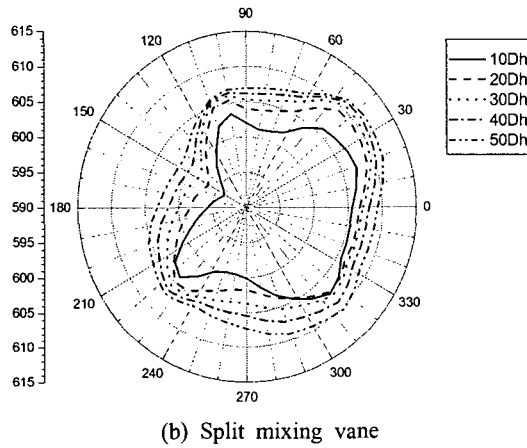
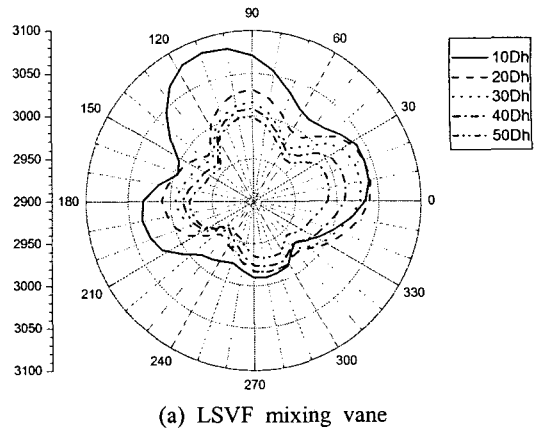
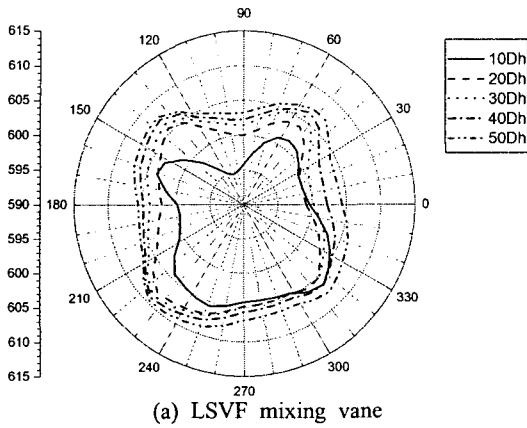


Fig. 10 Azimuthal Temperature distribution on fuel rod #33

Fig. 11 Azimuthal Nuselt number distribution on fuel rod #33

온도분포와 원주방향 열전달율을 Nuselt Number로 보여주고 있다. 여기서 Nuselt Number는 다음의 식으로 구해진다.

$$Nu_w = \frac{q_w D_h}{k(T_w - T_{bulk})} \quad (10)$$

Split 혼합날개의 경우는 대부분의 이차 유동이 부수로에서만 존재하므로 부수로 방향인 150°에서 열전달이 활발히 이루어져 가장 낮은 온도를 보이고 이차유동이 거의 없는 270°~0° 사이의 Housing 영역에서 열전달율이 가장 낮고 온도도 높게 나타나 이 영역에서 연료봉 표면 최고온도를 기록하는 것을 알 수 있다. 반면 LSVF 혼합날개의 경우는 교차류가 존재하는

90°, 180°에서 열전달이 활발히 이루어져 가장 낮은 온도를 보이는 반면 Housing 영역도 어느 정도의 이차유동으로 Split 혼합날개보다는 높지 않은 온도를 보인다.

#### 4. 결 론

LSVF MV의 경우 기존의 Split MV 보다 큰 길이척도의 2차와류를 발생시키고 지속성도 2배 이상 증가되었으며 인접부수로와의 유동혼합이 활발하였다.

Split 혼합날개를 설치한 경우는 특별한 경향 없이 부수로 사이에 거의 차이가 없는데 비해 LSVF 혼합날개를 설치한 경우는 혼합날개에 의해 생긴 대형 이차와류의 순환고리에 따라

온도장이 발달하는 경향을 보이고 있다

LSVF 혼합날개를 설치한 경우가 Split 혼합날개를 설치한 경우보다 연료봉 표면 최고온도가 1.5°K 이상 낮기 때문에 연료봉 건전성 측면에서 뛰어나고 추가적인 펌프 구동력의 증가도 없기 때문에 경제적인 측면에서 이득이 있다.

Split 혼합날개를 설치한 경우는 이차유동이 존재하는 부수로 방향으로 열전달이 활발히 이루어지는 반면 LSVF 혼합날개를 설치한 경우는 교차류가 존재하는 방향으로 열전달이 이루어진다.

## 후 기

위 연구는 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업(R-2002-0234)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Rehme, K. and Trippe, G., 1980, "Pressure Drop and Velocity Distribution in Rod Bundle with Spacer Grids," *Nucl. Engng And Design*, Vol. 62, pp. 349~359.
- (2) Rowe, D.S., Johnson, B.M. and Knudsen, J.G., 1974, "Implications Concerning Rod Bundle Cross Flow Mixing Based on Measurements of Turbulent Flow Structure," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 17, pp. 407~419.
- (3) Ibragimov, M.K., Isupov, I.V., Kobzar, L.L. and Subbotin, V.I., 1966, "Calculation of the Tangential Stresses at the Wall in a Channel and the Velocity Distribution in a Turbulent Flow of Liquid," *Atomic Energy*, Vol. 21, pp. 731~739.
- (4) Shen, Y.F., Cao, Z.D. and Lu, Q.G., 1991, "An Investigation of Crossflow Mixing Effect Caused by Grid Spacer with Mixing Blades in a Rod Bundle," *Nucl. Engng 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," *J. of KNS*, Vol. 28, No. 1, p. 56.
- (6) Karoutas, Z., Gu, C.Y. and Scholin, B., 1995, "3-D Flow Analyses for Design of Nuclear Fuel Spacer," *Proceedings of the NURETH-7* (NUREG/CP-0142, Vol. 4), pp. 3153~3174.
- (7) In, W.K., Oh, D.S. and Chun, T.H., 2001, "Flow Analysis for Optimum Design of Mixing Vane in a PWR Fuel Assembly," *J. of KNS*, Vol. 33, No. 3, p. 327.
- (8) Park, J.S., 2001, "A Study of Turbulent Heat Transfer Performance Enhancement in Rod Bundle Subchannel by the Large Scale Secondary Vortex Flow," Ph. D. thesis, The University of Korea. pp. 13~15, 64~66.
- (9) Sha, W.T., 1980, "An Overview On Rod-Bundle Thermal Hydraulic Analysis," *Nucl. Engng And Design*, Vol. 62, pp. 1~24.
- (10) KEPCO, 1998, Final Safety Analysis Report For Uljin NPP 3/4, Table 4.4 1, Fig. 4.1~2.
- (11) An, J.S. and Choi, Y.D., 2004, "A Study of Turbulence Characteristics of Large Scale Vortex Flow Mixing Vane of Nuclear Fuel Rod Bundle," *Proceeding of KSME Spring Annal Meeting*.