

핵연료 집합체에서의 대형 이차 와류 혼합날개의 난류생성 특성에 관한 연구

안 정 수, 최 영 돈*

고려대학교 기계공학과 대학원, *고려대학교 기계공학과

A Study of Turbulence Generation Characteristics of Large Scale Vortex Flow Mixing Vane of Nuclear Fuel Rod Bundle

Jeong Soo An, Yong Don Choi*

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

(Received June 10, 2005; revision received September 5, 2006)

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 $35D_h$ after the spacer grid. The streamwise vorticity generated by LSVF sustain two times more than that split mixing vane.

Key words: Nuclear fuel rod bundle(핵연료 집합체), LSVF(대형 이차 와류), Mixing vane(혼합 날개)

1. 서 론

원자로 연료봉 집합체 내의 지지격자는 연료봉 다발의 간격을 일정하게 유지시켜 냉각재의 유로를 확보하고 유체 유인진동으로 인한 연료봉의 손상을 방지해 줄 뿐만 아니라 유동혼합을 촉진하여 열전달 성능을 증가시킨다. 유동혼합은 지지격자 근처에서 가장 활발하게 일어나며 하류방향으로 빠르게 감소하여 일정한 수준의 유동혼합을 유지한다. 열전달 성능을 향상시키기 위한 적극적

인 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 유동혼합을 촉진시켜 연료봉 부수로의 열전달을 증진시키거나 부가적인 유동저항으로 인해 수송동력을 증가시키기도 한다.

더욱 강한 유동혼합과 열전달증진을 위해 Rehme et al.⁽¹⁾은 다양한 형태의 지지격자의 압력강하를 측정하였으며, Rowe et al.⁽²⁾은 횡류혼합현상을 관찰하여 봉간격이 가장 중요한 인자임을 관찰하였고, Ibragimov et al.⁽³⁾은 벽면 전단응력과 열전달에 있어서 구배전달이 유동장을 지배하는 역할을 함을 설명하였다. Shen et al.⁽⁴⁾은 혼합날개의 각

† Corresponding author

Tel.: +82-2-926-5908; fax: +82-2-926-9290

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

도 25에서 가장 좋은 혼합률을 가지는 것으로 관찰하였으며, Yang and Chung⁽⁵⁾은 활발한 난류 혼합거리는 지지격자로부터 $Z/D_h=10$ 까지이고 하류 부분 난류는 상류부분보다 등방성을 가지고 있음을 규명하였다. Karoutas et al.⁽⁶⁾은 전산프로그램을 이용하여 선회계수(swirl factor)를 조사하였고, In et al.⁽⁷⁾은 비틀림베인(twisted vane)을 제안하여 혼합률과 압력강하를 해석하였다.

지지격자와 혼합날개의 새로운 형상에 관한 연구는 궁극적으로 부수로의 열전달 성능향상을 위해 수행되고 있으나 과도한 유동저항으로 인한 압력강하의 급격한 상승이나 유체유인 진동으로 인한 열수력 건전성을 해치지 않는 범위 내에서 수행되어야 한다. 이에 본연구에서는 부수로 전체에 대형 이차 와류를 생성시키는 새로운 개념의 LSVF 혼합날개를 제안하고 부수로에 대한 전산 해석을 수행하여 LSVF 혼합날개의 적용 가능성을 확인하고자 한다.

2. 대형 이차 와류 혼합날개

2.1 대형 이차 와류 혼합날개의 개념

기존의 split 형태의 혼합날개는 부수로 중심에 와류를 발생시키나^(2,4,6) 이 와류에 의해서 생성되는 난류는 길이척도(length scale)가 대단히 작기 때문에 바로 소멸되어 혼합날개에 의한 열전달 성능 증진효과가 단거리에 제한된다.⁽⁵⁾ 지속적인 난류 생성효과를 얻으려면 지지격자의 설치간격을 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 적

기 때문에 부수로와 부수로 간의 난류 증진효과 및 열전달효과를 크게 기대할 수 없다.⁽⁴⁾ 단일 부수로 내에서만 선회류(swirl)를 생성시키는 기존의 방식에서 벗어나 부수로 전체에 대하여 지지격자에 부착된 혼합날개들의 각도를 일정한 방향으로 조정하면 대형 이차 와류(Large Scale Vortex Flow, LSVF)를 발생시킬 수 있다. Park⁽⁸⁾은 이 LSVF에 의한 대형 이차 와류는 단일 부수로 중심에서의 와류에 비해 서서히 소멸되기 때문에 기존 펌프 구동력의 변화 없이 열전달 성능을 증진하는 효과를 가져올 수 있다고 하였다. 또한 부수로 내의 유동이 아닌 부수로 전체에 대한 유동을 일으키므로 교차류(cross flow)가 비약적으로 확대되어 냉각수 유로단면 전체의 유체온도의 균등화에 크게 기여할 것으로 여겨져 평균 열전달 성능의 향상과 더불어 원자로의 건전성 확보에 도움을 줄것으로 기대된다.⁽⁹⁾

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 냉각재의 유로를 잡아주는 정사각 덕트형태의 하우스징(housing)과 그 내부에 6×6 연료봉으로 구성되어 있고, 반경방향으로는 순환조건(cyclic condition)을 도입하여 3×3 연료봉만을 전산해석하였다.

부수로 내부는 지지격자가 $60 D_h$ 간격으로 설치된 봉다발 형태를 가지고 있으며, 지지격자를 중심으로 앞뒤로 각각 $10 D_h$, $50 D_h$ 로 배치하였

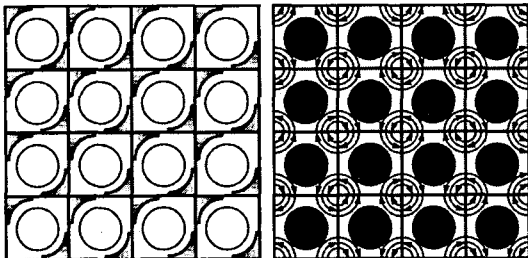


Fig. 1 Schematic fig. of split mixing vane & swirl flow.

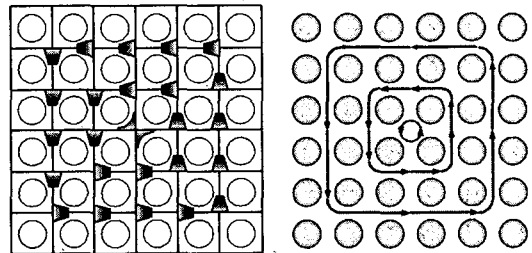


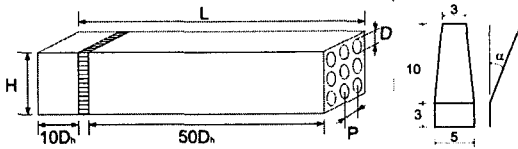
Fig. 2 Schematic fig. of LSVF mixing vane & large scale vortex flow.

Table 1 Rod bundle channel data

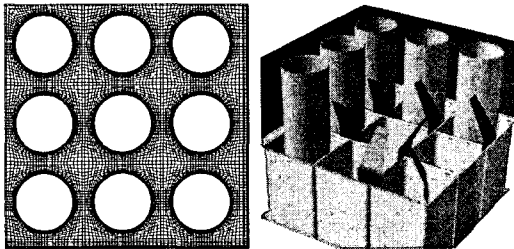
Rod diameter (mm)	D	10.0
Rod pitch (mm)	P	13.3
Spacer grid pitch (mm)	L	720
Housing (mm)	H	85.3
Hydraulic diameter (mm)	D _h	12.09
Reynolds number	Re	61,400

다. 유동조건을 획득하기 위하여 한국 표준형 원자력 발전소인 울진원자력 3/4호기의 노심 열수력자료⁽¹⁰⁾를 참조하여 위의 조건을 만족하는 완전 발달된 유동장을 기준으로 질량유량을 계산하고, 입·출구의 경계조건으로 위의 질량유량을 만족시키는 주기조건(periodic condition)을 가정하였다.

Table 1에 원자로 부수로 내 해석영역에 대한 상세한 재원과 유동조건을 기술하였다. 본 연구에 사용된 격자계는 Fig. 3(b)에 나타내었으며, 해석에 사용된 node 수는 1,356,850이다. 경계조건으로 벽합수를 사용하지 않고 벽면 미세격자법을 적용하고자 벽면에 격자를 밀집시키기 위해 다중영역법을 이용하여 유동장을 여러 영역으로 나눠 각 영역 내에 정렬격자 형태로 격자를 생성하도록 하여 벽면 첫번째 격자를 $y^+ \leq 10$ 으로 조절하였다.



(a) Schematic fig. of overall domain



(b) Spanwise direction grid (c) Fuel assembly

Fig. 3 Computational domain.

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 벽반사항을 사용하지 않고 불변항을 사용하기 때문에 위와 같이 복잡한 형상에 대한 모형으로 적합하다고 알려져 있다.

연속방정식

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

운동량방정식

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

레이놀즈 응력방정식

$$U_j \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + D_{ij}^T + \Phi_{ij} - \epsilon_{ij} \tag{3}$$

$$D_{ij}^T = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} \right) \tag{4}$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{2}{3} \rho \epsilon \delta_{ij} \left(1 + \frac{2k}{\nu RT} \right) \tag{5}$$

압력변형률 모형

$$\begin{aligned} \Phi_{ij} = & -a_{ij} \left(C_1 + C_1' \frac{P}{\epsilon} \right) \frac{k}{T} \\ & + C_2 \left(a_{ik} a_{kj} - \frac{1}{3} A_2 \delta_{ij} \right) \frac{k}{T} \\ & + (C_3 - C_3' \sqrt{A_2}) S_{ij} k \\ & + C_4 \left(a_i S_{kj} + a_{jk} S_{ki} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \right) k \\ & + C_5 \left(a_{ik} \Omega_{kj}^A + a_{jk} \Omega_{ki}^A \right) k \end{aligned} \tag{6}$$

Table 2 Turbulence model constance

C_μ	σ_k	σ_ϵ	σ_T	σ_θ	C_{e1}	C_{e2}	C_1	C_1'	C_2	C_3	C_3'	C_4	C_5
0.09	0.82	1.3	1	0.85	1.44	1.83	3.4	1.8	4.2	0.8	1.3	1.25	0.4

난류소산율방정식

$$\frac{\partial(\rho \epsilon U_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{P_{ii}}{2} \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (7)$$

3. 대형 이차 와류 혼합날개의 난류 특성

3.1 평균 유동장

Fig. 4는 주유동 방향으로 혼합날개에 의해 발생된 이차 유동의 강도의 단면 평균값의 변화를 보여주고 있다. 유동혼합은 부수로에서 횡방향 속도 절대값, 즉 이차 유동의 합으로 정의되므로 이차 유동은 부수로 사이의 유동혼합의 정도를 설명하는 주요 인자이다.

혼합날개가 부착되어 있지 않은 부수로에서는 지지격자 하류에서 이차 유동이 미약하게 나타나고 있으나 이는 지지격자에 의한 유로 단면적의 변화로 인한 것으로 생성과 동시에 급격히 소멸하게 된다. 따라서 지지격자는 유동의 혼합에 거의 영향을 주지 못하며 유동혼합에 의한 열전달 증진도 기대할 수 없을 것으로 여겨진다.

LSVF 혼합날개가 부착된 부수로에서는 강하게 발생하는 대형 이차 와류로 인해 지속적으로 이차 유동이 일어나며 그 영향이 하류까지 유지되고 있다. LSVF 혼합날개에서 발생하는 이차 유동의 강도는 split 혼합날개의 경우와 크게 차

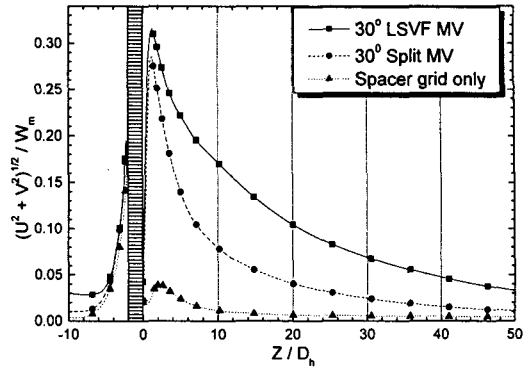
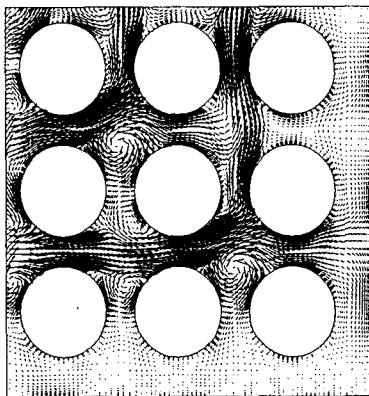


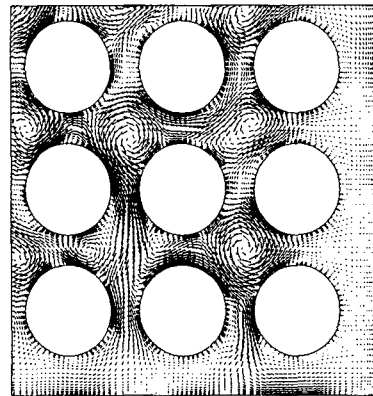
Fig. 4 Variation of cross-sectional averaged secondary flow intensity.

이가 나지 않으나 쉽게 소멸되지 않고 20 Z/D_h 이후에도 10% 이상 지속되어 split 혼합날개보다 2배 이상 지속되는 것을 알 수 있다. 따라서 유동혼합에 의한 열전달 성능향상도 split 혼합날개의 경우보다 더 클것으로 예상되어진다.

Fig. 5는 혼합날개가 부착된 부수로에 대해 유로단면의 이차 유동의 변화를 속도벡터로 보여주고 있다. split 혼합날개의 경우는 단일 부수로 내에 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 벽



(a) LSVF M/V



(b) Split M/V

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

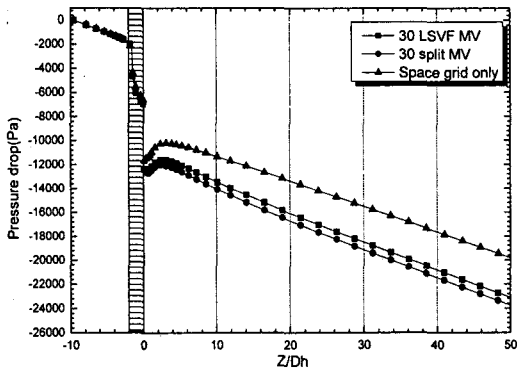


Fig. 6 Variation of pressure drop after spacer grid.

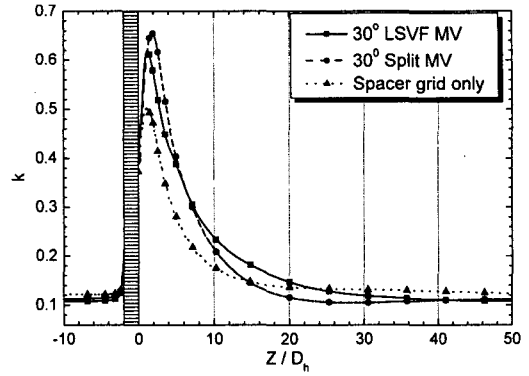


Fig. 7 Variation of cross-sectional averaged turbulence kinetic energy.

면효과의 영향으로 현저하게 유동장이 발달하지 못하고 있다.

단일 부수로에 독립적으로 이차 유동을 형성하는 split 혼합날개와 달리 LSVF 혼합날개는 의도한 바와 같이 전체 부수로에 대해 이차 유동을 형성하고 있다. 따라서 교차류가 비약적으로 증가되어 각 부수로간 온도 균등화에 큰 기여를 할 것으로 여겨져 평균 열전달 성능의 향상과 더불어 원자로의 건전성 확보에 도움을 줄 것으로 기대된다.

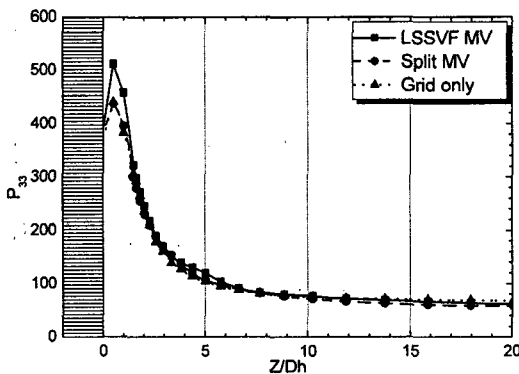
Fig. 6은 봉다발 부수로 유동장에서 압력분포를 보여주고 있다. 압력은 펌프구동력에 직접 영향을 끼치므로 혼합날개 최적설계에 중요한 인자이나 혼합날개의 형상에 따른 압력손실의 차이는 크게 나타나지 않고 있다. 선행연구에 따르면 압력손실의 차이는 혼합날개의 날개각에 민감하다.

3.2 난류생성 메카니즘

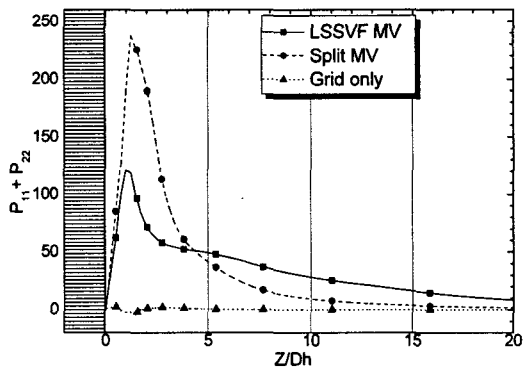
혼합날개가 없는 경우 부수로 내에서의 난류공급은 지지격자에 의한 것이 거의 유일하다고 할 수 있다. 지지격자에 의해 평균 유동장이 교란되고 이로 인해 전단응력이 발생하여 난류가 발생하게 되나 그 이후로는 점성소산에 의해 감쇠되는 양상을 보인다.

혼합날개를 장착한 경우 또다른 난류공급원은 혼합날개에 의해 발생한 이차 유동이다. 즉, 혼합날개에 의해 발생하는 와류, 선회유동 등의 전단응력에 의해 난류가 생성된다. 이차 유동으로 발생하는 난류는 지지격자의 경우와는 달리 이차 유동이 지속되는 한 연속적으로 발생하게 된다.

Fig. 7는 주유동방향으로 난류운동에너지의 단면 평균값의 변화를 보여주는데 Split 혼합날개의 경



(a) Axial Reynolds-stress production



(b) Tangential Reynolds-stress production

Fig. 8 Variation of cross-sectional averaged production.

우, 오히려 LSVF 혼합날개에 비해 더 작은 이차 유동을 생성시킴에도 불구하고 더 큰 난류운동에너지를 생성되나 급격히 소멸된다. 이는 난류생성이 이차 유동에 직접 연관되지 않고, 이차 유동에 의해 발생한 와류(vortex)에 의해 발생하는 전단응력으로 이루어지기 때문이다.

LSVF 혼합날개의 경우, split 혼합날개보다 약간 작게 난류운동에너지를 생성되나 그 지속은 더 뛰어난 것을 알 수 있다.

연료봉 부수로 내 난류생성 메커니즘에 대한 명확한 설명을 위해 Fig. 8에서 주유동방향 레이놀즈 응력의 생성함과 횡방향 레이놀즈 응력의 생성함 단면 평균값의 변화를 나타내었다. 지지격자에 의한 격자난류(grid turbulence)는 주유동방향 속도성분의 전단응력을 발생시키므로 주유동방향의 레이놀즈 응력만을 크게 발생시킨다. 따라서 주유동방향 레이놀즈 응력함은 혼합날개의 유무와 관계없이 모든 경우에 대해서 같은 경향을 보이고 있다. 즉, 지지격자 내에서는 격자난류를 생성하고 지지격자 출구에서는 단면증가에 의한 난류생성이 이루어지다가 유동이 발달됨에 따라 주유동방향 레이놀즈 응력의 생성은 사라지게 된다.

이와 달리 횡방향 레이놀즈 응력은 이차 유동의 와류, 선회유동 등에서 발생하는 전단응력에 의해 발생된다. split 혼합날개의 경우는 선회유동이 더 작은 영역에서 이루어지므로 전단응력은 크게 나타나 횡방향 레이놀즈 응력의 생성이 더 크게 나타난다. 하지만 이러한 선회유동은 이후 급격히 감소하여 10 Z/Dh 이후에는 거의 소멸하며

이에 따라 횡방향 레이놀즈 응력의 생성도 급격히 감소하게 된다.

LSVF 혼합날개의 경우는 이차 유동이 전 부수로 내의 큰 영역에서 이루어지므로 전단응력은 더 작고 초기에 횡방향 레이놀즈 응력의 생성이 작게 나타난다. 하지만 이차 유동의 지속이 split 혼합날개에 비해 2배 이상 되기 때문에 횡방향 레이놀즈 응력의 생성도 지속적으로 이루어져 결국은 전체 난류운동에너지를 하류까지 유지시킬 수 있게 된다.

3.3 난류구조의 변화

Fig. 9은 주유동방향에 따라 축방향 와도(vorticity)의 단면 평균한 값을 보여주고 있다. 와도는 와류(vortex)의 강도를 나타내며 레이놀즈 응력의

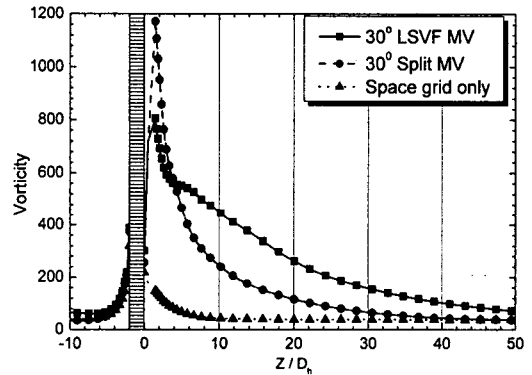
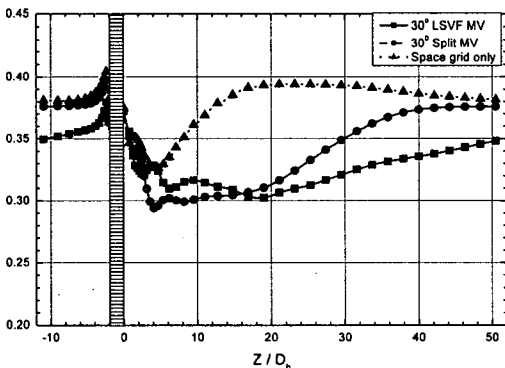
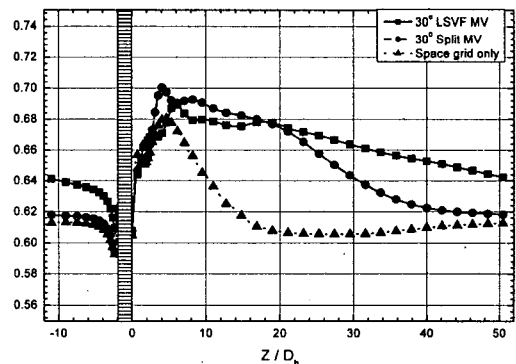


Fig. 9 Variation of cross-sectional averaged axial vorticity intensity.



(a) Second invariance



(b) Flatness parameter

Fig. 10 Variation of cross-sectional averaged turbulence invariance.

생성에 직접적인 연관이 있다. 또한 와류는 난류 운동에너지를 하류로 전달하는 역할을 하므로 축방향 와도의 분석을 통해 횡방향 레이놀즈 응력의 거동을 살펴볼 수 있다.

Split 혼합날개의 경우 생성된 와도는 급격히 감소하며 점성소산과 같이 x^{-1} 에 비례하고 있다. LSVF 혼합날개의 경우 큰 영역에서의 이차 유동으로 인해 와도는 상대적으로 작게 예측된다. 하지만 바로 소멸되지 않고 어느 정도 지속된 후에야 소멸되고 있다. 특히 Z/D_h 6~20 영역에서는 이차 유동의 순환고리가 유지되고 있으며 이러한 순환고리의 회전도는 선형적으로 감소하고 있다. $30 Z/D_h$ 이후에 순환고리가 파괴되면서 이차 유동이 균질화되면 와도 역시 x^{-1} 에 비례로 감소하게 된다.

Fig. 10은 주유동방향에 따라 난류성분의 등방성을 평가할 수 있는 불변항의 변화를 나타내고 있다. 여기서 불변항은 다음 식에 의해 구해진다.

$$A_2 = a_{ij}a_{ji} \quad (8)$$

$$A_3 = a_{ij}a_{jk}a_{ki} \quad (9)$$

$$A = 1 - 9(A_2 - A_3)/8 \quad (10)$$

이차 불변항 A_2 는 작을수록 평면변수 A 는 클수록 등방성 난류에 가까게 된다.

혼합날개가 부착되지 않은 부수로는 지지격자 후방에서 약간의 등방성화가 보이다가 바로 비등방성화하고 split 혼합날개 부착 부수로는 5~20 Z/D_h 에서 등방성화가 크나 그후 급격히 비등방성이 커진다. 이것은 이차 와류의 소멸에 따라 벽면난류가 전체를 지배하기 때문이다. LSVF 혼합날개 부착 부수로는 20 Z/D_h 까지 등방성화가 지속되다가 그후에 서서히 비등방성화가 된다. 이것은 LSVF 혼합날개에 의해서 강한 이차 유동이 발생해서 서서히 소멸되기 때문에 비등방성화가 서서히 진행되는 것이다.

열전달 측면에 보면 부수로 벽면에 수직방향의 레이놀즈 응력 \overline{vv} , \overline{uw} , \overline{vw} 등이 커야 열전달이 커지는데, 난류생성은 주로 \overline{uu} 에 의해서 되므로 등방성화가 많이 이루어질수록 열전달 촉진이 크다. 따라서 난류구조면에서 LSVF 혼합날개가 split 혼합날개보다 우수함을 알 수 있다.

4. 결 론

LSVF MV의 경우 기존의 Split MV보다 큰 길이척도의 이차 와류를 발생시키고 지속성도 2배 이상 증가되었으며 인접 부수로와의 유동혼합이 활발하였다.

난류운동에너지는 1차로 지지격자의 유로축소 등에 의해 생성하고 이차로 혼합날개로 발생된 와류에 의해 생성되었다 주방향 속도성분은 유로의 축소에 의한 난류발생에 영향을 주나 이차 유동으로 발생된 난류가 난류의 지속에 기여한다. 유로축소의 영향은 모든 경우가 비슷하나 이차 유동에 의한 영향은 보다 큰 길이 차원의 난류를 포함하는 LSVF MV가 뛰어나고 지속성도 크다. 난류운동에너지를 전달하는 역할을 하는 와도의 경우 LSVF MV가 2배 이상 지속성이 뛰어나다.

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 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, 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 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

- 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* 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*.