

원자로 부수로내 혼합날개를 지나는 삼차원 열유동 해석

최상철* · 김광용†

(2002년 6월 27일 접수, 2003년 1월 25일 심사완료)

Numerical Analyses of Three-Dimensional Thermo-Fluid Flow through Mixing Vane in A Subchannel of Nuclear Reactor

Sang-Chul Choi and Kwang-Yong Kim

Key Words: Mixing Vane(혼합날개), Spacer Grid(지지격자), Nuclear Reactor(원자로), CFD(전산 유체역학), Heat Transfer(열전달), Friction Factor(마찰계수)

Abstract

The present work evaluates the effects of mixing vane shape on the flow structure and heat transfer downstream of mixing vane in a subchannel of fuel assembly. by obtaining velocity and pressure fields, turbulent intensity, flow-mixing factors, heat transfer coefficient and friction factor using three-dimensional RANS analysis. Four different shapes of mixing vane, which were designed by the authors, were tested to evaluate the performances in enhancing the heat transfer. Standard $k-\epsilon$ model is used as a turbulence closure model, and, periodic and symmetry conditions are set as boundary conditions. The flow blockage ratio is kept constant, but the twist angle of mixing vane is changed. The results with three turbulence models were compared with experimental data.

1. 서론

원자로 부수로(subchannel) 내에서 연료봉과 냉각재 사이의 열전달을 효과적으로 증가시키는 기술은 원자로의 열수력학적 설계에 있어서 중요한 과제 중의 하나이다. 기존의 부수로에서는 냉각재의 난류 열전달을 향상시킬 목적으로 연료봉의

지지격자(spacer grid)에 혼합날개(mixing vane)를 부착하여 난류를 발생시킴으로써 열전달을 증진시키는 방법을 사용하고 있다.

혼합날개를 이용한 열전달 증진에 관한 실험적인 연구로서 *Rehme*⁽¹⁾은 여러 가지 형태의 지지격자에 대한 압력강하를 측정하여 지지격자에 관련된 압력강하특성 관계식을 제시하였다. *Shen* 등⁽²⁾은 LDV를 이용하여 봉다발 지지격자에 부착된 *ripped-open* 날개에 의한 횡류혼합 효과를 고찰하여 가장 적절한 횡류혼합을 위한 전향날개의 주유동방향 굽힘각도를 25°라고 주장하였다. 양과 정^(3,4)은 LDV를 이용하여 축방향 및 횡방

* 인하대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학부

E-mail : kykim@inha.ac.kr

TEL : (032)872-3096 FAX : (032)868-1716

향속도, 난류강도등의 측정인자들을 측정하였고 압력강하를 측정하여 지지격자의 손실계수와 봉다발의 마찰계수를 구하였다. Hejna⁽⁶⁾는 세 가지 종류 혼합날개가 부착된 지지격자 후방 부수로 내에 공기가 흘러갈 때 유동구조를 열선풍속계를 사용하여 측정하고 난류인자, 열적 혼합인자와 혼합을 등을 평가하였다. 양선규 등⁽⁶⁾은 LDV로 측정하여 지지격자가 봉다발 난류유동에 미치는 영향과 지지격자 후방에서 증가된 난류강도의 감쇠에 대해 연구하였다. 최근에 전과 최⁽⁷⁾는 기존의 실험자료들을 근간으로 지지격자와 혼합날개의 형상변화에 따른 난류유동현상을 조사하고 지지격자와 혼합날개의 최적 설계조건을 찾았으며 난류구조가 핵연료다발 부수로 내 열전달을 증진시키는 현상을 연구하였다.

최근에는 전산유체역학(CFD) 해석기법의 발달과 컴퓨터 성능의 향상을 바탕으로 수치해석적 연구도 활발하게 진행되고 있다. 수치해석을 통한 핵연료다발 부수로 난류유동의 분석은 실험적 방법에 비해 소요시간이 훨씬 짧고 비용도 적게 소요되므로 핵연료다발 유동혼합 증진장치 개발에 유용하다. 이에 대한 연구를 살펴보면 인왕기 등^(8,9)은 CFD코드인 CFX-4.2를 이용하여 다양한 유동 전향날개가 부착된 봉다발 난류유동을 분석함으로써 핵연료다발 유동혼합날개 개발을 위한 CFD코드의 유용성을 보였다. Karoutas 등⁽¹⁰⁾은 유동혼합날개가 부착된 핵연료다발 부수로 내 삼차원 난류유동을 CFD코드인 CFDS- FLOW3D를 이용하여 수치해석하여 결과와 실험결과를 비교함으로써 핵연료다발 부품개발을 위한 삼차원 유동해석의 유용성을 보였다. 인왕기 등⁽¹¹⁾은 CFD를 이용하여 혼합날개의 굽힘각도에 따른 부수로 유동특성을 분석하여 최적의 굽힘각도가 상용화된 혼합날개인 split vane의 경우 30 ~ 35 이고, swirl vane의 경우에는 35 ~ 40 라고 제안하였다. Imaizumi 등⁽¹²⁾은 가압경수로 핵연료다발의 삼차원 유동특성을 평가하기 위한 유동해석방법을 제시하였다. 인왕기 등⁽¹³⁾은 CFD를 이용하여 상용화가 이루어진 대표적인 유동혼합날개와 한국원자력연구소가 개발중인 세가지 종류의 유동혼합날개의 핵연료다발 내 유동특성을 비교분석하였다. Ikeda 와 Hoshi⁽¹⁴⁾도 최적 유동

혼합날개 후보 모형 선정을 위한 CFD 방법의 유용성을 확인하였다.

위 연구 결과들에서 알 수 있듯이 부수로 내 열전달계수를 향상시키는 데 있어 중요한 인자들은 난류의 지속적인 생성, 부수로 간의 횡류혼합, 및 2차유동의 발달 등이며, 지지격자와 혼합날개의 최적설계는 이러한 인자들을 개선하는 데 있어 매우 중요한 역할을 한다.

본 연구에서는 Navier-Stokes 해석을 수행하는 CFD코드인 CFX-TASCflow⁽¹⁵⁾를 이용하여 자체 설계한 네가지 혼합날개, NJ15, NJ25, NJ35, NJ45과 기존의 상용화된 split vane에 대해 삼차원 열유동해석을 통하여 혼합날개의 비틀림각도가 횡류발생, 선회유동발생, 난류강도, 열전달에 미치는 영향을 비교분석하였다. 아울러, split vane에 대해 세 가지 난류모형을 사용하여 계산결과를 실험치⁽¹⁰⁾와 비교함으로써 난류모형의 영향을 검토하였다.

2. 열유동 해석방법

2.1 혼합날개 모델

혼합날개의 형상은 Fig. 1과 같이 설계하였고 각 치수는 Table 1에 명시하였다. 여기서, α 는 굽힘각도이고 β 는 유로막힘률(blockage ratio)이고 γ 는 비틀림각도이다. NJ45의 비틀림각도가 가장 크고 유로막힘률은 모든 형상에서 일정하게 유지하였다. 효율적인 계산을 위하여 지지격자와 혼합날개의 두께를 무시하였고 유동의 대칭성을 고려하여 지지격자를 포함하는 단일 부수로 영역을 수치해석의 계산영역으로 설정하였다. 핵연료다발의 지지격자의 높이는 40mm이고 간격은 600mm로 하였다. 수력직경(D_h)은 11.468mm이고 연료봉직경(D)는 9.5 mm이며 연료봉 중심사이거리는 12.7 mm이다. Fig. 2는 NJ series 혼합날개와 split vane의 형상을 보여준다.

2.2 경계조건

경계조건으로 입구경계에서 균일유동 조건을 주었고 출구경계에서는 일정압력 조건을 주었다. 혼합날개와 지지격자의 표면에는 점착(no-slip)조건과 단열조건을 적용하였고 연료봉 벽면에는 점착조건과 일정 열유속($30000 W/m^2$)을 주었다. 부

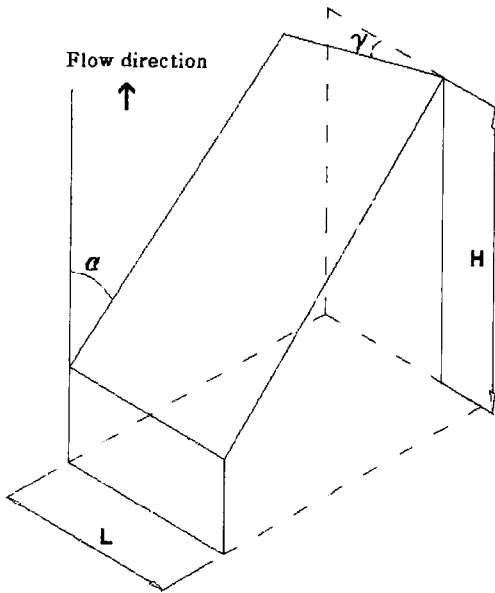


Fig. 1 Dimension of mixing vane

Table 1 Dimensions of mixing vanes

Type	α	γ	β	L(mm)	H(mm)
NJ15	25 °	15 °	17.6%	6.35	5.5
NJ25	25 °	25 °	17.6%	4.86	6.9
NJ35	25 °	35 °	17.6%	3.54	8.5
NJ45	25 °	45 °	17.6%	2.76	9.1
split vane	25 °	0 °	17.6%	3.70	8.9

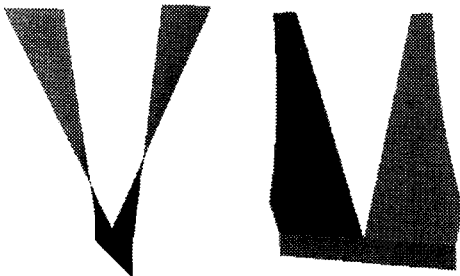


Fig. 2 Mixing vane models: NJ series and split vane(from left)

수로 측면경계에서는 혼합날개를 기준으로 혼합날개 상류의 측면경계조건은 유동혼합이 없는 대칭조건을 주었고 혼합날개 하류 부수로 측면경계에서는 혼합날개로 인한 횡류혼합을 고려한 주기경계조건(periodic condition)을 적용하였다.

주기경계에서는 핵연료다발의 부수로 배열과 전향날개에 의한 횡류를 고려하여 측면경계가 각각 연결된 조건으로 한쪽에서 나온 유체는 다른 한쪽으로 들어가게 된다. 작동유체는 상온의 물이며 부수로 평균유속은 원자로 정상운전 조건과 비슷한 6.79 m/s ($Re=80,000$)이다.

2.3 수치해석

범용 CFD코드인 CFX-TASC flow를 사용하여 계산을 수행하였다. 대류항의 수치도식으로 LPS 도식(Linear Profile Skewed Upstream Differencing Scheme). 난류모델로 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 반복수치계산은 질량보존방정식의 잉여값(residual)이 10^{-5} 이하가 될 때까지 계산되었고 계산시간은 5시간 정도 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 격자테스트

계산의 정확성을 위하여 NJ15의 계산영역에 대한 격자테스트를 진행하였다. 격자수 각각 384×200 , 576×250 , 900×250 , 1296×250 , 1296×310 에 대하여 계산하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 격자수 1296×250 이하에서는 계산치들이

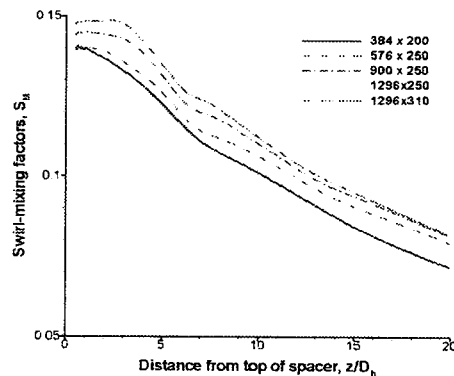


Fig. 3 Grid test for NJ15

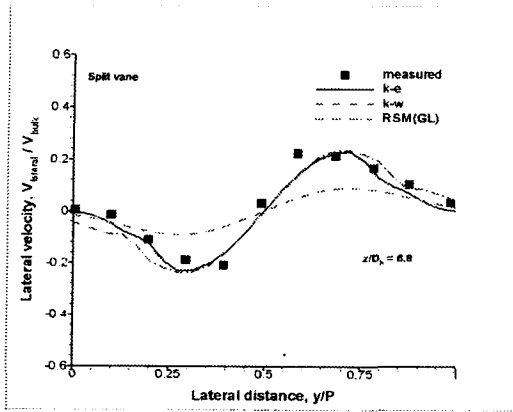


Fig. 4 Turbulence model test

차이를 보이고 있지만 그 이상은 차이가 없음을 알 수 있다. 본 계산에서는 여기서 얻은 최적의 격자수 1296×250 (32,400개)를 사용하였다. 그림에서 z 는 지지격자 상단으로부터 부수로를 따라 하류로 향하는 길이이다.

3.2 난류모델비교

본 연구에서는 세 가지 난류모델을 사용하여 계산을 하고 그 결과를 비교하여 계산결과에 대한 난류모델의 영향을 검토하였다. 사용된 난류 모델들은 2-방정식모델인 *Launder*와 *Spalding*의 표준 $k-\epsilon$ 모델과 *Wilcox*⁽¹⁶⁾의 $k-\omega$ 모델, 그리고 레이놀즈응력모델의 일종인 *Gibson*과 *Launder*⁽¹⁷⁾의 *GL*모델이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 $k-\epsilon$ 모델은 *Karoutas* 등⁽¹⁰⁾의 실험치와 비교해 *GL*모델과 유사한 정확성을 나타내고 있으나 계산시간은 훨씬 적게 소요되었으므로 본 계산에서는 $k-\epsilon$ 모델이 사용되었다. 그림에서 P 는 인접한 연료봉 중심축 사이의 거리이고 y 는 부수로 단면의 중심점을 포함하는 수평선 상의 좌표이다.

3.3 속도분포

Fig. 5는 축방향으로 $z/D_h=4$ 와 30인 두 단면에서 다섯 가지 유형의 혼합날개에 대한 속도 벡터를 나타낸 것이다. 여기서 $z=0$ 위치는 혼합날개 밀면부분을 나타낸다.

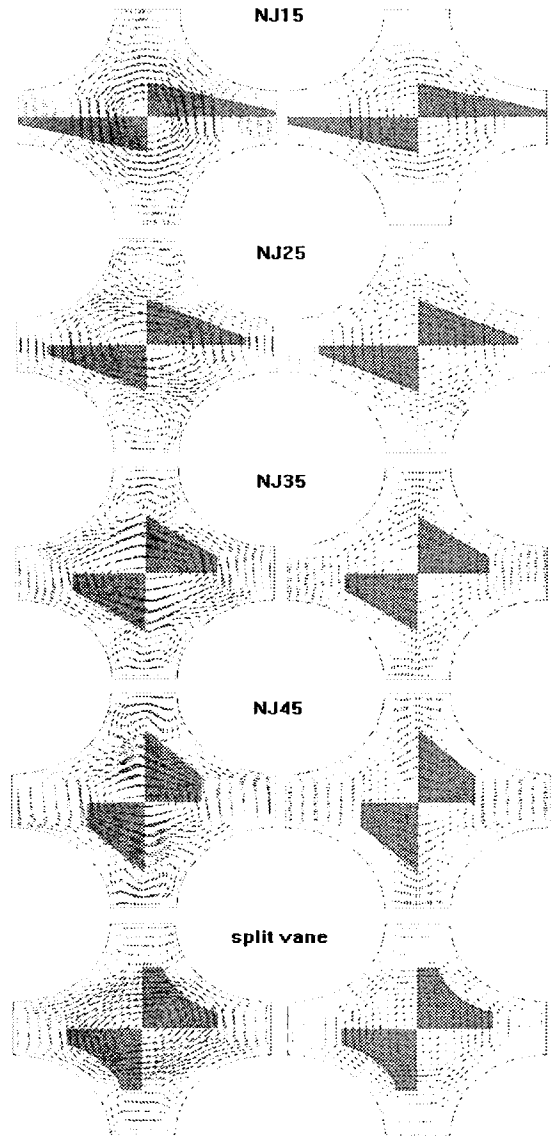


Fig. 5 Velocity vectors in the subchannel : NJ15,NJ25,NJ35,NJ45,and split vane (from top); $z/D_h=4$ and 30(from left)

Split vane인 경우는 타원형의 선회유동이 잘 발생되고 있으나 횡류발생은 미미한 것으로 보인다. NJ의 네 가지 혼합날개는 비슷한 형태의 속도분포를 보이고 있으나 비틀림각도가 커질수록 부수로 사이의 횡류발생은 커짐을 알 수 있다.

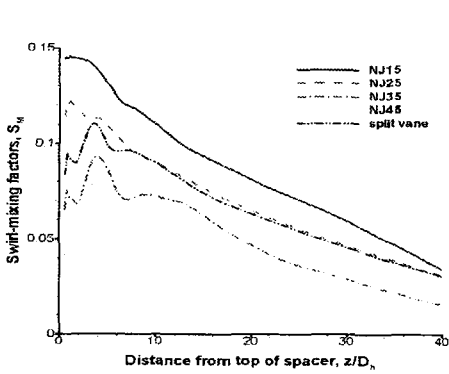


Fig. 6 Axial variations of swirl factor

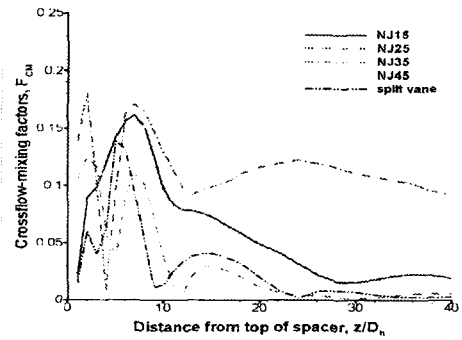


Fig. 7 Axial variations of crossflow factor

공통적으로 상류영역에서는 부수로 중심과 인접 부수로 사이에 와류(vortex)가 발생하여 횡류발생이 억제됨을 알 수 있다. NJ15와 NJ25, 그리고 split vane의 경우에는 하류에서 선회와 함께 횡류도 빠르게 소멸되고 있으나, NJ35와 NJ45의 경우에는 하류에서도 횡류의 감쇠가 두드러지지 않아 상당한 속도의 횡류가 지속됨을 알 수 있다.

3.4 유동혼합인자

유동혼합에 미치는 선회의 영향을 평가하기 위해 선회계수(swirl factor)를 다음과 같이 정의하였다.

$$S_M = \frac{\int r^2 V_{lateral} U dr}{R_s \int r U^2 dr} \quad (1)$$

여기서 변수 $V_{lateral}$ 은 부수로 내 선회를 유발하는 접선방향 속도이고 U 와 r 은 각각 국소 축방향 속도와 부수로 중앙으로부터의 거리를 나타낸다. 변수 R_s 는 유효선회반경으로 부수로 중앙으로부터 연료봉 벽면까지의 수직거리를 의미한다. Fig. 6은 지지격자 하류에서 다섯 가지 유형의 혼합날개에 의한 부수로 내 선회계수의 변화를 나타낸 것이다. NJ15의 경우 선회가 가장 잘 일어나고 NJ45의 경우에 가장 작게 발생되었다. 선회계수 크기의 순서가 Table 1에 나타난 혼합날개의 밑변 길이(L)의 순서(혹은 L/H의 순서)와 일치하는 것으로 보아, 밑변이 길수록 선회유동

이 잘 발달됨을 알 수 있다. 공통적으로 약 $10D_h$ 까지는 선회계수가 급격하게 변하여 split vane과 비틀림이 큰 날개들에서는 최대점이 두드러지게 나타나고 있으며, $10D_h$ 이후로는 선회계수가 직선적으로 감소한다는 것을 알 수 있다.

인접 부수로 사이 유동혼합에 미치는 횡류의 영향을 평가하기 위해 횡류계수(cross-flow factor)를 다음과 같이 정의하였다.

$$F_{CM} = \frac{1}{s} \int \frac{|V_{cross}|}{V_{bulk}} dy \quad (2)$$

여기서 s 는 연료봉 사이 간격이고, V_{cross} 는 횡류속도, V_{bulk} 는 단면내 평균축방향유속이다.

Fig. 7은 축방향 횡류계수의 변화를 나타낸 것이다. 약 $4D_h$ 에서 NJ15를 제외한 기타 네 가지 혼합날개에서 횡류발생은 최소가 된다. 이는 Fig. 5의 속도벡터 그림에서도 볼 수 있듯이 인접 부수로 사이에 강한 와류가 생성됨으로써 횡류의 발생이 저해되어 횡류가 최소화되는 것으로 판단된다. 약 $7 \sim 10D_h$ 에서 인접 부수로 사이의 와류가 소멸되고 횡류발생이 최대치에 도달한 후 그 이후로 차츰 감소하는 경향을 보인다. $20D_h$ 이후에 split vane과 NJ15 및 NJ25의 경우 횡류가 거의 소멸되고 있으나, NJ35와 NJ45의 경우에는 여전히 상당한 크기의 횡류가 지속되고 있음을 알 수 있다. 이로부터 30도 이상의 비틀림각도가 횡류발생에 대하여 매우 효과적임을 알 수 있다.

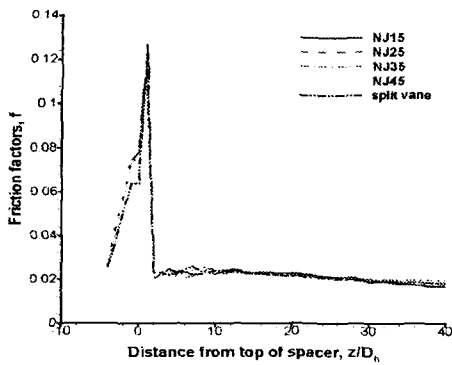


Fig. 8 Friction factor distributions for the rod bundles

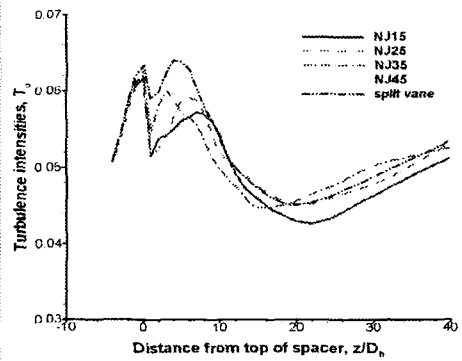


Fig. 9 Axial turbulence intensity decay behind Grid spacer

3.5 마찰계수

마찰로 인한 손실을 평가하기 위하여 마찰계수를 다음과 같이 정의하였다.

$$f = \Delta P \left(\frac{L}{D_h} \frac{1}{2} \rho V^2 \right)^{-1} \quad (3)$$

여기서, ΔP 는 부수로 내 일정구간 내의 압력 손실이고 L 은 이 구간의 길이, D_h 는 수력직경, ρ 는 냉각재의 밀도, V 는 부수로 평균유속이다.

Fig. 8은 다섯 가지 혼합날개에 대해 부수로 내 축방향으로의 마찰계수의 변화를 비교한 것이다. 여기에서 혼합날개구간의 압력강하 크기는 모든 경우에 비슷하고 이 압력강하에 비해 하류에서의 변화와 차이는 매우 작음을 알 수 있다. 이로부터 유로막힘율이 일정할 경우, 비슷한 기하학적 형상을 갖는 혼합날개에 대하여 마찰계수의 차이는 크지 않다는 것을 알 수 있다.

3.6 난류강도

축방향의 난류강도는 다음과 같이 정의된다.

$$T_u = \sqrt{\frac{2k}{3V^2}} \quad (4)$$

여기서 k 는 난류운동에너지이다.

Fig. 9는 다섯 가지 혼합날개에 대해 축방향 난류강도변화를 나타내고 있다. 정성적으로는 모든

분포가 비슷한 경향을 보이고 있으나, 정량적으로는 NJ45의 경우가 가장 큰 난류강도를 나타낸다. 약 $20D_h$ 까지는 혼합날개를 통과하며 생성된 난류가 급격히 소멸되어 감소로써 축방향 난류강도가 감쇠하고 있으나, 그 이후로는 벽마찰에 의한 난류에너지의 생성과 확산으로 난류강도가 다시 증가하는 현상을 보인다. 유동이 더욱 진행되면서 생성과 소멸이 균형을 이루게 되면 난류에너지는 확립된 값에 도달하게 될 것이다.

3.7 열전달계수

열전달 증진효과를 평가하기 위하여 열유속이 일정할 경우 다음과 같이 혼합날개가 없는 경우에 대한 있는 경우의 Nusselt수 비로 다섯 가지 타입(NJ15, NJ25, NJ35, NJ45, split vane)의 혼합날개에 의한 열전달을 비교하였다.

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \frac{T_{b_s} - T_{w_s}}{T_b - T_w} \quad (5)$$

여기서 T_b 와 T_w 는 각각 혼합날개가 있는 경우의 각 단면에서의 부수로 냉각재의 평균온도(bulk temperature)와 벽면온도이고 하첨자 0는 혼합날개가 없는 상태를 나타낸다.

Fig. 10은 열전달계수의 축방향 변화를 나타낸다. 혼합날개를 지나며 강제혼합에 의해 급격히 상승한 열전달계수는 Fig. 9의 난류강도분포와 유

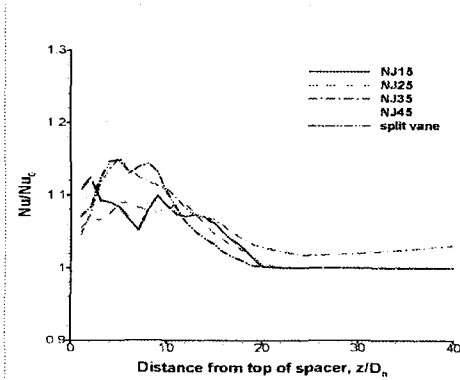


Fig. 10 Nusselt number distribution for the different five mixing vanes

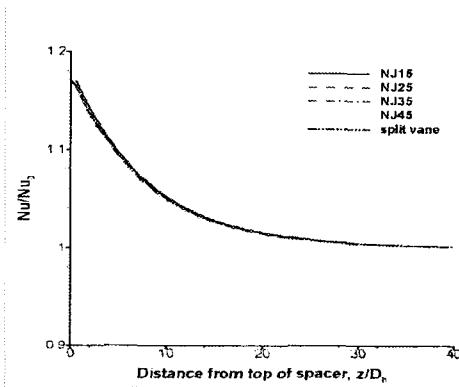


Fig. 11 Nusselt number distributions calculated by Yao et al.⁽¹⁸⁾ correlation

사하게 약 $20D_h$ 지점까지 감소하고 있다. 이 지점의 하류영역에서 NJ15와 NJ25 및 split vane의 경우 혼합날개의 효과가 거의 소멸됨을 보여주고 있다. 그러나, NJ35와 NJ45의 경우 이 영역에서도 여전히 혼합날개에 의한 열전달 증진효과는 지속되고 있는 것으로 예측되었으며, 비틀림각도가 가장 큰 NJ45가 전반적으로 열전달 증진효과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 이러한 하류에서의 열전달현상은 Fig. 7의 윙류계수와 비슷한 경향을 보여주고 있다.

Yao 등⁽¹⁸⁾은 실험을 통해 혼합날개에 의한 열전달계수를 유로막힘율(blockage ratio)과 선회계수의 함수로 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{Nu}{Nu_0} = [1 + 5.55\beta^2 e^{-0.13(z/D_h)}] [1 + S_M^2]^{0.4} \quad (6)$$

Fig. 11은 위 식을 이용해 계산한 다섯 가지 혼합날개의 축방향 열전달계수변화를 나타냈다. 선회계수가 다름에도 불구하고 유로막힘율이 동일함으로 인해 다섯 가지 열전달계수는 거의 일치하게 분포를 나타낸다. 이 식은 거시적으로 혼합날개의 가까운 하류를 제외하고는 Fig. 10과 정량적으로 큰 차이를 나타내지 않으나, 윙류계수나 난류강도 등의 중요한 영향을 간과함으로써 혼합날개들의 정확한 성능을 평가하지 못하고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 원자로 부수로 내 삼차원 열유동해석을 수행하여 혼합날개의 기하학적 형상이 열전달계수와 마찰계수에 미치는 영향을 검토하였다. 난류모델 시험에 사용된 세 가지 모델 중 $k-\epsilon$ 모델이 정확성과 계산시간의 측면에서 가장 우수한 성능을 보였으며, 속도분포에 대한 계산 결과는 실험지와 잘 일치하였다. 유로막힘율을 일정하게 하고 비틀림각도를 달리해 자체 설계한 네 가지 혼합날개와 기존의 상용화된 혼합날개에 대한 비교 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열전달에 주된 영향을 미치는 인자들은 윙류계수와 난류강도이다. $20D_h$ 이후에서 윙류 발생이 할수록 난류강도가 커지고 열전달도 촉진된다. 혼합날개의 비틀림각도가 할수록 윙류 발생은 커진다.

(2) 선회계수는 열전달증진에 큰 영향을 미치지 않는다. 혼합날개 밀변(L)이 길수록 선회유동은 잘 발달한다.

(3) 유로막힘율이 일정할 경우 선회계수와 윙류계수는 마찰 계수변화에 큰 영향을 미치지 않는다.

후 기

본 연구는 2001 과학기술부 원자력연구기반확충사업에 의해 지원을 받았으며 이에 감사드린다. 아울러 본 연구수행에 있어 많은 조언을 주

신 원자력연구소의 인왕기. 전태현박사께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Rehme. K., 1973. "Pressure Drop Correlation for Fuel Element Spacer." *Nucl. Technol.* Vol. 17. pp. 15~23.
- (2) 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." *Nuclear Engineering and Design.* Vol. 125. pp. 111~119
- (3) Yang, S. K. and Chung, M. K., 1996. "Measurements of Turbulent Flow a 6×6 Rod Bundle with Spacer Grids," *Journal of the Korean Nuclear Society.* Vol. 28. No. 2. pp. 162~174
- (4) 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. No. 1. pp. 56~71
- (5) Hejna J. et al., 1994. "Measurement Program for the Structure of turbulent Flows in a Square Rod Lattice. Part 2. Experimental Investigations of Flow in a Model of PWR Type Fuel Assembly paced by Systematical Vaned Grids." Nuclear Research Institute Rez. plc
- (6) Yang, S. K., Chun, S. Y., Chung, H. J., Cho, S., and Chung, M. K., 1999. "Turbulence Decay behind Grid Space in the Rod Bundles," *Proceedings of the KSME 1999 Fall Meeting.* pp. 199~207
- (7) Chun, K. H., and Choi, H., D., 1999. "Study on the Turbulent Thermal Efficiency Enhancement of Nuclear Reactor Coolant by Mixing Vane Shapes." *Proceedings of the KSME 1999 Fall Annual Meeting B.* pp. 645~650.
- (8) In, W.K., Oh, D.S., Hwang, D. H., Chun, T.H., 1998. "CFD Analyses of Turbulent Flow in a Subchannel of Nuclear Reactor by Mixing Vane Shapes." *Proceedings of the KNS Spring Meeting.* pp. 514~522
- (9) In, W.K., Oh, D.S., Chun, T.H., and Jung Y.H., 2000. "Numerical Examination of Coolant Flow Mixing in Nuclear Fuel Assembly with Mixing Promoters." *8th Int. Conference on Nuclear Engineering.* Baltimore, USA
- (10) Karoutas, Z., Gu, C. Y., and Scholin, B., 1995. "3D flow Analyses for Design of Nuclear Fuel Spacer." *Proceedings of The 7th Int. Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics.* New York, USA
- (11) In, W. K., Oh, D. S., and Chun, T. H., 2000. "Optimization of Flow Directing Vane in a Nuclear Fuel Rod Bundle by CFD Method." *Proceedings of The First National Congress on Fluids Engineering.* Muju, Korea. pp. 467~470.
- (12) Imaizumi M., Ichioka T., Hoshi M., Teshima H., Kobayashi H., and Yokoyama T., 1995, "Development of CFD method to evaluate 3-D flow characteristics for PWR fuel assembly." *Trans. of the 13th International Conference on SMiRT.* Porto Alegre, Brazil
- (13) 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 the KSME 2001 Spring Annual Meeting E.* pp. 482~487.
- (14) Ikeda K., and Hoshi M., 2001, "Development of Mutsubishi High Thermal Performance Grid I-CFD Applicability for Thermal Hydraulic Design." *9th Int. Conference on Nuclear Engineering.* Nice, France
- (15) CFX-TASCflow Computational Fluid Dynamics Software. AEAT Echnology Engneerng SoftwareLtd. 1999
- (16) Wilcox, D. C., 1986. Multiscale Model for Turbulent Flows. AIAA 24th Aerospace Sciences Meeting
- (17) Gibson, M. M., and Launder, B .E., 1978, "Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer." *J. of Fluid Mechanics.* Vol. 86. Part 3. pp. 491~511.
- (18) Yao, S. C., Hochreiter, L. E., and Leech, W. J., 1982. "Heat Transfer Augmentation in Rod Bundles Near Grids." *J. of Heat Transfer, Trans. of ASME.* Vol. 104. pp. 76~81.