

## 원자로 부수로내 혼합날개를 지나는 삼차원 열유동 해석

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

최상철\*<sup>1</sup>, 김광용\*<sup>2</sup>  
S.C.Choi, K.Y.Kim

The present work analyzed the effect 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. NJ15, NJ25, NJ35, NJ45, 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(  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$ , RSM) were compared with experimental data.

**Key Words** : 유로막힘율(blockage ratio), 부수로(subchannel), 혼합날개(mixing vane), 난류강도(turbulent intensity), 횡류( cross flow), 비틀림각도(twist angle)

## 1. 서 론

원자로 부수로 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 난류(turbulence)를 발생시켜 유동혼합을 촉진시킴으로써 열전달을 증진시키는 방법을 사용하고 있다.

혼합날개를 이용한 열전달 증진에 관한 실험적인 연구로서 *Rehme*<sup>[1]</sup>은 여러 가지 형태의 지지격자에 대한 압력강하를 측정하여 지지격자에 관련된 압력강하특성 관계식을 제시하였다.

*Shen* 등<sup>[2]</sup>은 LDV를 이용하여 봉다발 지지격

자에 부착된 ripped-open 날개에 의한 횡류혼합 효과를 고찰하여 가장 적절한 횡류혼합을 위한 전향날개의 주유동방향 굽힘각도를 25° 라고 주장하였다. 최근에 *Chun* 과 *Choi*<sup>[3]</sup>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 소요 되므로 핵연료다발 유동혼합 증진장치 개발에 유용하다. 이에 대한 연구를 살펴보면 *In* 등<sup>[4,5,6]</sup>은 CFD코드인 CFX-4.2를 이용하여 다양한 유동 전향날개가 부착된 봉다발 난류유동을 분석함으로써 핵연료다발 유동혼합증진장치 개발을 위한 CFD코드의 유용성을 보였다.

\*1 인하대학교, 기계공학과 대학원

\*2 인하대학교, 기계공학부

Gu 등<sup>[7]</sup>은 유동혼합날개가 부착된 핵연료다발 부수로 내 3차원 난류유동을 CFD코드인 CFDS- FLOW3D를 이용하여 수치해석하여 결과와 실험결과를 비교함으로써 핵연료다발 부품 개발을 위한 CFD코드의 유용성을 보였다.

In 등<sup>[8]</sup>은 CFD를 이용하여 혼합날개의 굽힘각도에 따른 부수로 유동특성을 분석하여 최적의 굽힘각도가 split vane의 경우 30° ~ 35° 이고 swirl vane의 경우에는 35° ~ 40° 라고 제안하였다. 아울러 In 등<sup>[9]</sup>은 또 다른 연구에서 CFD를 이용하여 상용화가 이루어진 대표적인 유동혼합날개와 한국원자력연구소가 개발중인 3종의 유동혼합 날개의 핵연료다발 유동특성을 비교분석하였다. 위 연구 결과들에서 알 수 있듯이 부수로 내 열전달계수를 향상시키는데 있어 중요한 인자들은 난류의 지속적인 생성, 부수로 간의 횡류혼합 증가, 2차유동의 발달 등이며, 지지격자와 혼합날개의 최적설계는 이러한 인자들을 개선하는 데 있어 매우 중요한 역할을 한다.

본 연구에서는 CFD 코드인 CFX-TASCflow<sup>[10]</sup>를 이용하여 자체 설계한 혼합날개인 NJ15, NJ25, NJ35, NJ45의 삼차원 열유동 해석을 통하여 비틀림각도에 따른 횡류발생, 선회유동발생, 난류강도, 열전달에 미치는 영향을 비교분석하는 것이 목적이다. 아울러 split vane에 대해  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  및 RSM 등 세 가지 난류모델을 사용하여 계산하여 실험데이터와 비교함으로써 계산결과에 대한 난류모델의 영향을 검토하였다.

## 2. 열유동 해석방법

### 2.1 혼합날개 모델

혼합날개의 형상은 Fig.1과 같이 설계하였고 각 치수는 Table 1에 명시하였다. 여기서  $\alpha$ -굽힘각도이고  $\beta$ -유로막힘율(Blockage ratio)이고

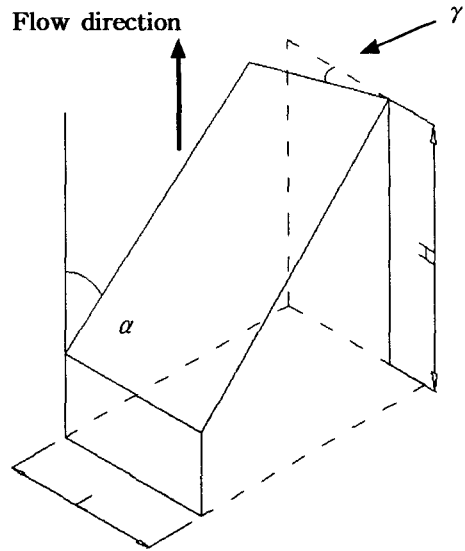


Fig. 1 Dimension of mixing vane

Table 1. Dimensions of mixing vanes

Type	$\alpha$	$\gamma$	$\beta$	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

$\gamma$ -비틀림각도(Twist angle)이다. NJ45의 비틀림각도가 가장 크고 유로막힘율은 일정하다. 효율적인계산을 위하여 지지격자와 혼합날개의 두께를 무시하였고 유동의 대칭성을 고려하여 지지격자를 포함하는 단일 부수로 영역을 수치해



Fig. 2 mixing vane Models: NJ series and split vane(from left)

석의 계산영역으로 설정하였다. 핵연료다발의 지지격자의 높이는 40mm이고 간격은 600mm로 하였다. 수력직경 ( $D_h$ )는 11.468mm이고 연료봉직경(D)는 9.5 mm이며 연료봉 중심사이거리는 12.7 mm이다. Fig.2 는 NJ series 혼합날개와 split vane의 CFD모델형상이다.

### 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(heat flux=30000W/m<sup>2</sup>)을 주었다. 부수로 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 횡류방향을 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

본 연구에서는 범용 CFD코드인 CFX-TASC flow를 사용하여 계산을 수행하였다. 대류항의 이산화방법으로 LPS(Linear Profile Skewed Upstream Differencing Scheme)수치기법과 난류모델로는 Launder 와 Spalding<sup>[11]</sup> 표준  $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 반복수치계산은 질량보존방정식의 잉여값(Residual) 10<sup>-3</sup> 이하가 될 때까지 계산되었고 계산시간은 5시간 정도 소요되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 격자테스트

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

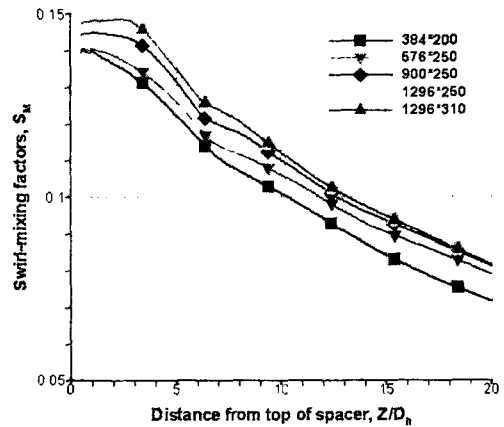


Fig. 3 Grid test for NJ15

있듯이 격자수가 1296×250일 때 까지 계산치들은 차이를 보이고 있지만 그 이상은 차이가 없음을 알 수 있다. 본 계산에서는 격자테스트하여 얻은 최적의 격자수 1296×250(32,400개)를 사용하였다.

### 3.2 난류모델비교

본 연구에서는 세 가지 난류모델을 사용하여 계산을 하고 그 결과를 비교하여 계산결과에 대한 난류모델의 영향을 검토하였다. 사용된 난류

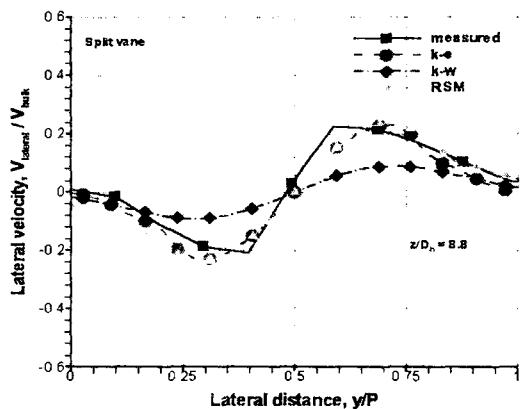


Fig. 4 Comparison of turbulence models 모델들은 2-방정식모델로써 Launder와 Spalding

의 표준  $k-\epsilon$  모델, Wilcox<sup>[12]</sup>의  $k-\omega$  모델 및 RSM 모델(Reynolds Stress Model)<sup>[13]</sup>이다. RSM 모델인 경우에 계산시간이 가장 많이 소요되었다. Fig.4에서 알 수 있듯이  $k-\epsilon$  모델이 RSM 모델과 비슷한 결과를 나타내고 있고 계산 시간도 적게 들었다.

### 3.3 속도분포

Fig.5는 축방향으로  $z/D_h=4$ ,  $z/D_h=30$ 인



Fig. 5 Velocity vectors in the subchannel: NJ15, NJ25, NJ35, NJ45(from top) 두 단면에서 네 가지 유형의 혼합날개에 대한

속도벡터를 나타낸 것이다. 여기서  $z=0$  위치는 혼합날개 밑면부분을 나타낸다.  $4D_h$ 에서 NJ15인 경우 선회유동과 횡류발생이 가장 잘 나타나고 있다. 기타 세 가지 혼합날개는 비슷한 속도분포를 갖는다. 즉 부수로 중심과 인접부수로 사이에 와류동이 발생하므로 횡류발생이 미미하다.  $30D_h$ 에서는 NJ15와 NJ25는 비슷한 속도분포(동심원형태의 선회유동)를 갖고 NJ35와 NJ45는 횡류속도분포가 비슷하였다. 즉 NJ15, NJ25은 NJ35, NJ45 보다 선회유동발생이 좋으나 횡류발생은 못하다는 것을 예측할 수 있다. 이로부터 비틀림각도가 커짐에 따라 횡류가 잘 발생한다는 것을 알 수 있고 혼합날개 폭이 넓을수록 선회유동이 잘 발생한다는 것을 알 수 있다.

### 3.4 압력분포

Fig.6은 여러 가지 혼합날개가 부착된 지지격자 봉다발 부수로의 압력계수를 나타낸다. 지지격자 전후에서 압력강하가 크게 발생하고 하류에서는 직선적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 네 가지 혼합날개에 대한 부수로 압력계수는 거의 비슷하게 나타났다. 이로부터 유로막힘을 일정하게 주었을 때 압력강하도 일정하다는 것을 알 수 있다.

Fig.7은  $z/D_h=4$ 와 30인 단면에서 네 가지

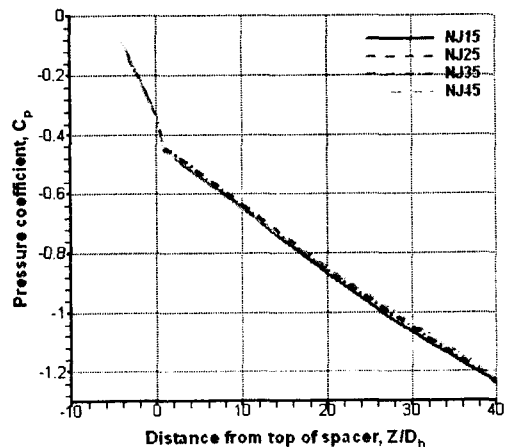


Fig. 6 Pressure distributions in subchannel

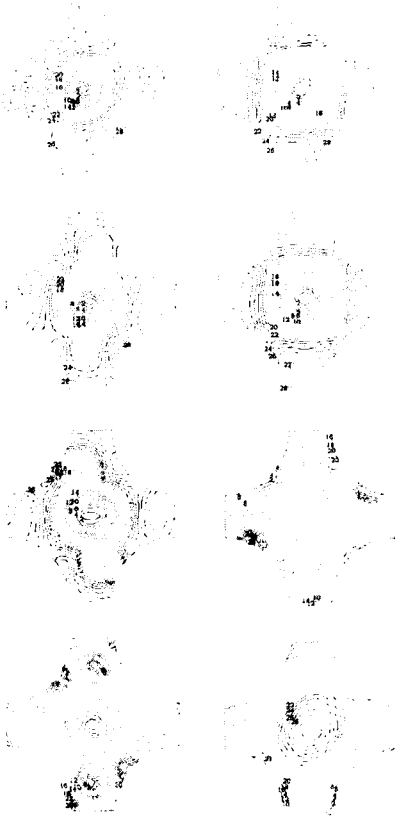


Fig. 7 Pressure contours in subchannel:  
NJ15, NJ25, NJ35, NJ45(from top)

유형의 혼합날개에 대한 부수로 등압선을 나타낸 것이다. 그림에서 숫자가 큰 구역이 압력이 높은 부분이다.  $4D_h$ 에서는 큰 차이가 없으나  $30D_h$ 에서 NJ45인 경우 부수로 중심선에서의 압력이 가장 높게 나타나므로 유동이 연료봉벽면 및 부수로 방향으로 유동하는데 유리한 것으로 사료된다. NJ15와 NJ25는 중심선상의 압력이 낮고 주변의 압력이 높아서 유동이 중심선으로 집중되는 것으로 판단되며 아울러 선회유동이 존재할 수 있으나 횡류는 미미한 것으로 판단된다.

### 3.5 유동혼합인자

유동혼합에 미치는 선회영향을 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 부수로내 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.8 은 지지격자 하류에서 부수로 선회계수의 변화를 나타낸 것이다. NJ15 의 경우 선회가 가장 잘 일어나고 NJ45 의 경우에 가장 작게 유발되었다. 이것은 혼합날개의 밀면 넓이(L)이 클수록 선회계수가 커진다고 판단할 수 있다. 약  $10D_h$  까지 선회계수가 급격하게 변하다가 그 이후로는 직선적으로 감소한다는 것을 알 수 있다.

인접부수로 사이 유동혼합에 미치는 횡류영향을 평가하기 위해 횡류계수(cross-flow factor)를 다음과 같이 정의하였다.

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

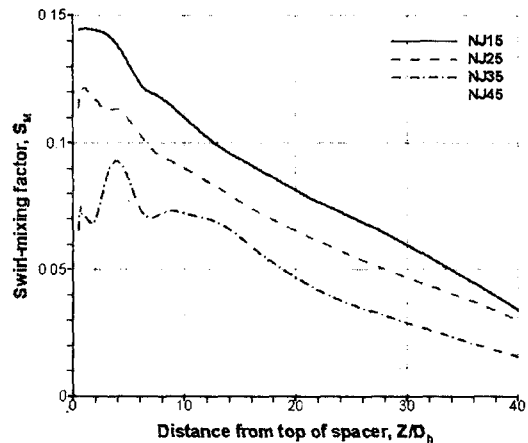


Fig. 8 Axial variations of swirl factor

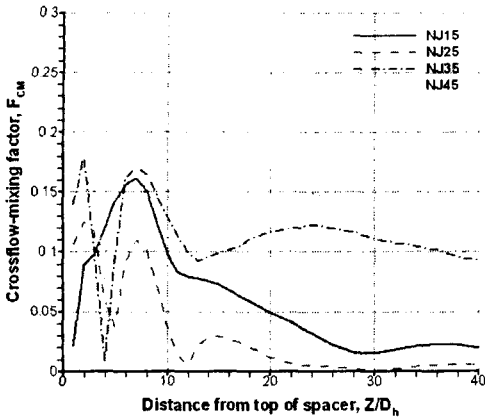


Fig.9 Axial variations of crossflow factor

여기서  $s$  는 연료봉 간격을 나타내고  $V_{cross}$  는 횡류속도이며  $V_{bulk}$  는 부수로 평균유속이다. Fig.9 는 축방향의 횡류계수변화를 나타낸 것이다. 약  $4D_h$ 에서 횡류의 최저점이 나타난다. 이는 NJ15를 제외한 세 가지 형상에 대하여 속도벡터 그림에서도 볼 수 있듯이 인접 부수로 사이에 강한 와류동이 생성됨으로써 횡류의 발생을 저해하는 작용으로 횡류가 최저로 되는 것으로 판단된다. 약  $7\sim 10D_h$ 에서 인접 부수로 사이의 와류동이 소멸되고 횡류발생이 최대치에 도달한 후 그 이후로 차츰 감소하는 경향을 보였다. 전반적으로 NJ45인 경우 횡류가 가장 잘 발생되고 있음을 알 수 있다. 이로부터 비틀림각도가 횡류 발생에 대하여 효과적임을 알 수 있다.

### 3.6 마찰계수

마찰로 인한 손실을 평가하기 위하여 마찰계수를 다음과 같이 정의하였다.

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

여기에서  $\Delta P$  는 부수로내 일정구간내의 압력손실이고  $L$  은 마찰길이  $D_h$  는 수력직경이다.  $\rho$  는 냉각재의 밀도이고  $V$  는 평균유속이다.

Fig.10 은 네 가지 혼합날개가 부착된 봉다발

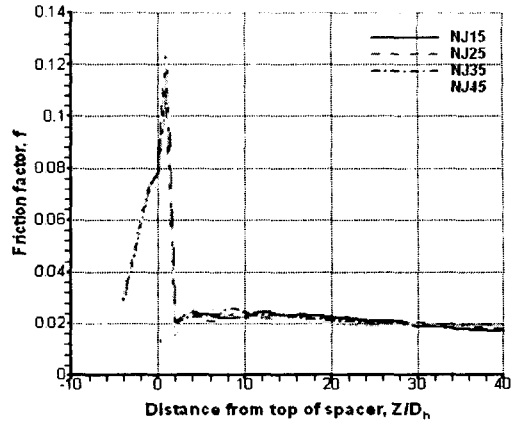


Fig.10 Friction factor distributions for the rod bundles

지지격자의 부수로내 축방향으로의 마찰계수의 변화를 비교한 것이다. 네 가지 혼합날개에 대한 마찰계수는 거의 비슷한 경향을 보여주었다. 이로부터 유로막힘율이 일정하고 비슷한 기하학적 형상을 갖는 혼합날개에 대하여 마찰계수변화도 비슷하다는 것을 알 수 있다.

### 3.7 난류강도

축방향의 난류강도는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서  $k$  는 난류운동에너지이며  $V$  는 부수로 평균유속이다.

Fig.11 는 네 가지 혼합날개가 부착되어 있는 경우의 축방향 난류강도변화를 나타내고 있다. 난류강도의 변화는 거의 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그 중에서 NJ45인 경우 난류강도가 가장 크게 나타나고 있다. 이는 유동이 연료봉벽면과의 정면 충돌이 가장 많기 때문이다. 약  $20D_h$ 까지 난류의 작은 scale들이 소멸되고 에너지 역전, 축방향속도의 가속 등에 의해 축방향 난류에너지가 감소된다.  $20D_h$  이후에서 축방향난류에너지가 증가되는 것은 난류 scale이 커지

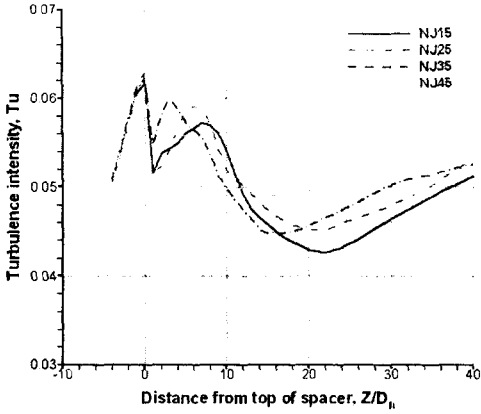


Fig. 11 Axial turbulence intensity decay behind Grid spacer

게 되어 연료봉 벽면으로부터의 난류에너지 확산에 의한 것이라 볼 수 있다. 유동이 더욱 진행되면 난류에너지는 확립된 값에 도달하게 될 것이다.

3.8 열전달계수

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

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \frac{T_{b_0} - T_{w_0}}{T_b - T_w} \quad (5)$$

여기서  $T_{b_0}$  와  $T_{w_0}$  는 각각 혼합날개가 없는 경우의 각 단면에서의 부수로 냉각재의 평균온도 (Bulk temperature)와 벽면평균온도이고  $T_b$  와  $T_w$  는 각각 혼합날개가 있는 경우의 부수로 냉각재의 평균온도(Bulk temperature)와 벽면평균온도이다. Fig.12 는 네 가지 혼합날개의 축방향 열전달계수변화를 나타내었다.  $20D_h$ 까지 강제혼합에 의한 열전달은 난류강도와 비슷한 경향으로 나타난다. NJ45대부분의 영역에서 열전달계수가 가장 높게 예측되었다.  $20D_h$  이후에서 NJ15와 NJ25는 열전달증진이 어렵다. NJ35

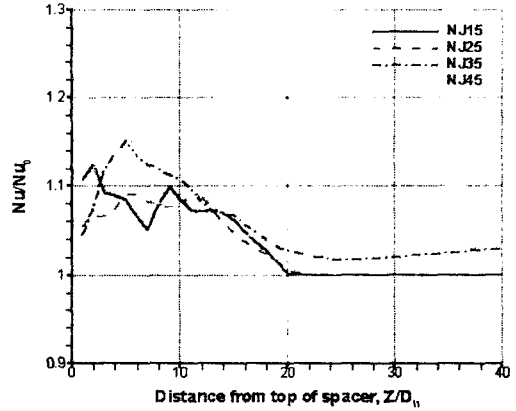


Fig. 12 Nusselt number distribution for the different four mixing vanes

가 접근적으로 NJ45의 열전달계수에 접근해 감을 알 수 있다.

본 연구에서 계산된 결과를 Yao 등<sup>[14]</sup>이 제시한 열전달계수 실험식과 비교하여 보았다. 그들은 열전달계수를 유로막힘율(Blockage ratio)과 선회계수의 함수로 다음과 같이 나타내었다.

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

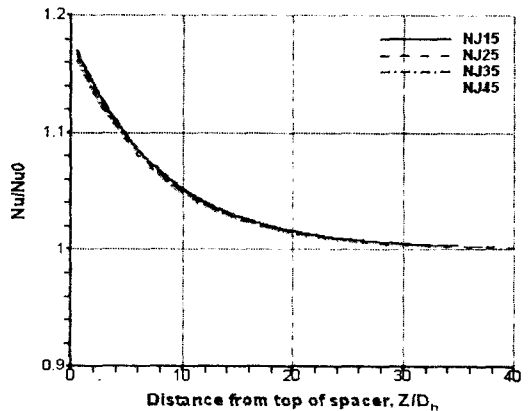


Fig. 13 Nusselt number distribution for the different four mixing vanes calculated by Yao et al. correlation

여기에서는  $\beta$ 는 유로막힘율이고  $S_M$ 는 선회계수이다. Fig.13은 실험식(6)을 이용해 계산한 네 가지 혼합날개의 축방향 열전달계수변화를 나타냈다. 열전달계수는 네 가지 모두 일치하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이 실험식은 횡류계수나 난류강도 등의 중요한 변수의 영향을 반영하지 않음으로써 부정확한 식이 되고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 원자로 부수로 내 혼합날개를 지나는 삼차원 열유동해석을 수행하여 형상변화가 열전달계수와 마찰계수에 미치는 영향을 속도와 압력분포, 선회계수 및 횡류계수, 난류강도 등을 통하여 검토하였다. 또한 계산의 정확성을 검증하기 위하여 상용화된 혼합날개 split vane에 대하여 계산하고 실험치와 비교하였다. 난류 모델선정의 타당성을 파악하기 위하여 split vane에 대하여 세 가지( $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$ , RSM) 난류모델로 계산하고 실험치와 비교하였다.  $k-\epsilon$ 와 RSM 난류모델이 비슷한 수준으로 실험치와 잘 맞는다. 본 연구에서는  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하였다. 혼합날개는 자체 설계한 NJ15, NJ25, NJ35, NJ45로 유로막힘율을 일정하게 하고 비틀림각도를 각각 15도, 25도, 35도, 45도로 주었을 때 횡류발생, 선회유동발생, 난류강도, 열전달계수에 대하여 고찰하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 열전달에 주된 영향은 지속적인 횡류발생과 난류강도이다. 비틀림각도가 횡류발생에 효과적이라는 것을 판단할 수 있다.
- 2) 선회계수는 열전달증진에 효과적이지 못하다. 그러나 타원형형태의 선회는 지속적인 횡류를 발생시키는데 일정하게 작용한다. 선회계수 크기는 혼합날개 밑변폭(L)에 의해 영향을 받는다.
- 3) 유로막힘율이 일정하고 형상이 비슷한 경우 마찰계수도 일정하다.

향후 혼합날개 형상의 최적설계에는 열전달계수와 마찰계수가 혼합된 목적함수를 사용하여 지속적인 횡류혼합을 발생시킴으로써 열전달을 증진시키는 방향으로 최적화가 이루어져야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 2001 과학기술부 원자력연구기반확충사업에 의해 지원을 받았으며 이에 감사드린다. 아울러 본 연구수행에 있어 많은 조언을 주신 원자력연구소의 인왕기, 전태현박사께 감사드린다.

#### 참고문헌

- [1] K. Rehme, "Pressure Drop Correlation for Fuel Element Spacer," 1973, *Nucl. Technol. Vol.17*, pp15-23.
- [2] Shen Y.F., Cao Z.D. and Lu Q.G., "An investigation of crossflow mixing effect caused by grid spacer with mixing blades in a rod bundle," *Nuclear Engineering and Design, Vol.125(1991)*, pp.111-119
- [3] 전진호, 최영돈, "지지격자의 형상변화에 따른 원자로 냉각재 난류 열효율 증진에 관한 연구" 대한기계학회 1999년도 추계학술대회 논문집 B pp. 645-650.
- [4] 인왕기, 오동석, 황대현, 전태현, "지지격자 형상에 따른 봉다발부수로 난류유동 CFD 분석," (1998) '98춘계학술대회, 한국원자력학회, pp.514-522
- [5] 인왕기, "유동혼합 향상 핵연료다발 부수로 난류유동 특성 수치해석," (1999) '99추계학술대회, 대한기계학회. pp.608-613
- [6] In W.K., Oh D.S., Chun T.H. and Jung Y.H., "Numerical Examination of Coolant Flow Mixing in Nuclear Fuel Assembly with Mixing Promoters," (2000) 8<sup>th</sup> Int. Conference on Nuclear Engineering, Baltimore, USA, April 2-6.
- [7] C. Y. Gu, Wei Ji, Z Karoutas and B, 1995 Scholin "3D flow Analyses for Design of Nuclear Fuel Spacer" *Proceedings of The Int. Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics*, New York, United States, September 10-15.
- [8] 인왕기, 오동석, 전태현, "CFD방법에 의한 핵연료다발의 유동 전향날개 최적화," *Proceedings of The First National*





*Congress on Fluids Engineering  
September 1-2, 2000, Muju, Korea,  
pp.467-470.*

- [9] 인왕기, 오동석, 전태현, "핵연료다발 유동혼합날개 개발을 위한 CFD응용," *대한기계학회 2001년도 춘계 학술대회 논문집 E*, pp.482-487.
- [10] CFX-TASCflow Computational Fluid Dynamics Software, *AEA Technology Engineering Software Ltd*, (1999)
- [11] B. E. Launder and D. B. Spalding. The numerical computation of turbulent flows. *Comp Meth Appl Mech Eng*, 3:269-289, 1974.
- [12] D.C. Wilcox. Multiscale model for turbulent flows. In *AIAA 24th Aerospace Sciences Meeting*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986.
- [13] Launder B. E., Reece, G.J., and Rodi, W., "Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure," *J. Fluid Mech*, Vol.68, Part3, 1975, pp. 537-566.
- [14] S.C.Yao, L.E.Hochreiter and W.J.Leech, *Heat Transfer Augmentation in Rod bundles near Grids, J.of Heat Transfer, Trans.of the ASME, Vol.104*.pp.76-81(1982)