2002년 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

봉다발 지지격자 혼합날개 하류의 유동구조 및 열전달 수치해석

Numerical Analyses of Flow Structure and Heat Transfer Downstream of Mixing Vane of Spacer Grid in Fuel Assembly

최상철*, 김광용
인하대학교
인천광역시 남구 용현동 253번지

요 약

본 연구에서는 삼차원 RANS해석기법을 이용하여 봉다발 지지격자와 혼합날개를 지나는 유동을 해석함으로써 속도장과 압력장, 유동혼합인자, 열전달계수 및 마찰계수 등을 구하여 혼합날개의 형상이 원자로 부수로 내 유동구조 및 열전달에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 대표적인 유동혼합날개인 Split vane과 본 연구에서 자체 설계한 혼합날개, SG1과 SG2의 유동해석을 통하여 이들 혼합날개의 열전달증진 성능을 비교하였다. 난류모델로는 표준$k-\varepsilon$ 모델을 사용하였고 부수로 측면 경계조건은 연속경계조건과 대칭경계조건을 주었다. 열전달은 유로막힘율에 의해서 영향을 받지만 혼합날개에 의해 유발되는 선회와 횡류 등의 유동구조에 의해서도 큰 영향을 받는다.

Abstract

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, flow-mixing factors, heat transfer coefficient and friction factor using three-dimensional RANS analysis. Split vane as a typical mixing vane and SG1 and SG2, which are designed by the authors, were tested to evaluate the performances in enhancing the heat transfer. Standard $k-\varepsilon$ model is used as a turbulence closure model, and, periodic and symmetry conditions are set as boundary conditions. It reveals that heat transfer rate is affected significantly by swirl and cross-flow as well as by the flow blockage.

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[1]은 여러가지 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. 그리고, 최근에 Chun과 Choi[3]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 난류유동 분석은 실험적 방법에 비해 소요시간이 훨씬 짧고 비용도 적게 소요되므로 핵연료다발 유동혼합 증진장치 개발에 유용하다. 이에 대한 연구를 살펴보면 In 등[4,5,6]은 CFD코드인 CFX-4.2를 이용하여 다양한 유동 전향날개가 부착된 봉다발 난류유동을 분석함으로써 핵연료다발 유동혼합증진장치 개발을 위한 CFD코드의 유용성을 보였다. Gu 등[7]은 유동혼합날개가 부착된 핵연료다발 부수로 내 3차원 난류유동을 CFD코드인 CFDS-FLOW3D를 이용하여 수치해석 결과와 실험결과를 비교함으로써 핵연료다발 부품개발을 위한 CFD코드의 유용성을 보였다. In 등[8]은 CFD를 이용하여 혼합날개의 굽힘각도에 따른 부수로 유동특성을 분석하여 최적의 굽힘각도가 Split vane의 경우 30°-35°이고 Swirl vane 의 경우에는 35°-40°라고 제안하였다. 아울러, In 등[9]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[10]를 이용하여 대표적인 혼합날개인 split vane과 자체 설계한 혼합날개인 SG1과 SG2의 삼차원 열유동 해석을 통하여 혼합날개의 형상이 하류 유동의 난류구조와 열전달에 미치는 영향을 비교분석하였다.

2. 열유동 해석방법

2.1 혼합날개 모델

혼합날개가 부착된 핵연료 부수로의 지지격자형상은 Fig.1과 같이 복잡하여 수치해석 상 한계가 있다. 본 연구에서는 효율적인 계산을 위하여 지지격자와 혼합날개의 두께를 무시하였고 유동의 대칭성을 고려하여 지지격자를 포함하는 단일 부수로 영역을 수치해석의 계산영역으로 선정하였다. 핵연료다발의 지지격자의 높이는 40mm이고 간격이 약600mm이다. 수력직경 (D_h)은 11.468mm 이고 연료봉 직경(D)은 9.5mm이며 봉 중심거리는 12.7mm이다. 혼합날개를 지나는 유동은 혼합날개로부터 약40 D_h 하류에서 완전발달되므로 지지격자 상류 약 3.5 D_h (40mm)에서

하류 약 50 D_h (560mm)까지를 계산영역으로 잡았다.

혼합날개의 형상변화에 따른 열전달성능을 비교하기 위하여 Fig.2 와 같이 3가지 혼합날개(SG1, SG2 및 Split vane)형상에 대하여 해석하였다. 여기서 SG1은 사각형모양을 갖는 한 쌍의 혼합날개를 서로 반대방향으로 구부렸고 구부러진 전향날개의 각도는 유동방향으로부터 15°이다. SG2는 횡류혼합을 발생시키기 위하여 SG1와 같이 반대방향으로 15°구부리고 혼합날개 밑변을 기준으로 인접 부수로 방향으로 25° 비틀림 각도를 주었다. Split vane의 굽힘각도는 25°이다. 혼합날개의 높이는 모두 10mm로 하였다. SG1, SG2 및 Split vane에 대한 CFD모델은 180개의 블록으로 구성된 3차원 정렬격자 모델이며 전산격자수는 약 150,000개이다. Fig.3은 3가지 모델의 부수로 단면에서의 전산격자를 나타낸다.

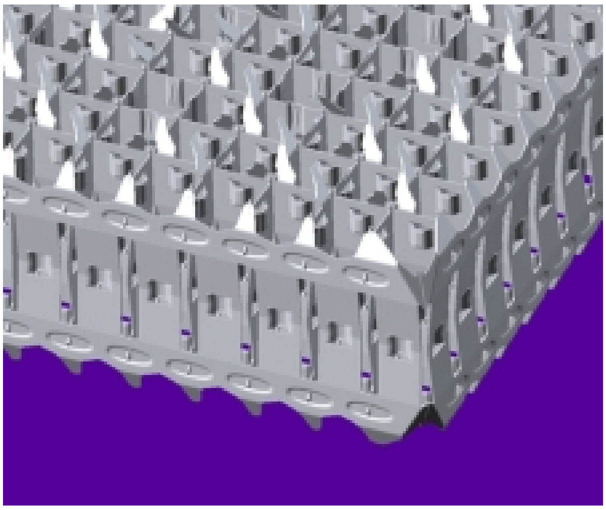


Fig. 1 Detail of the spacer grid with mixing vanes

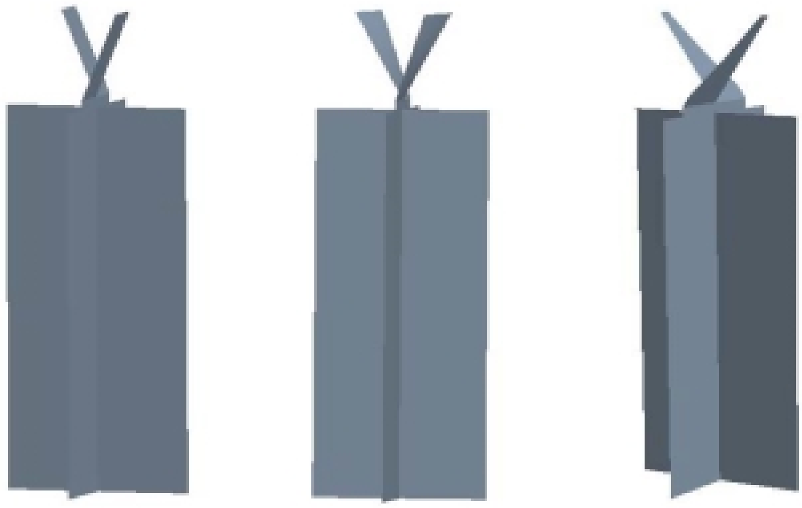


Fig. 2 Spacer grid CFD models: SG1, SG2, and split vane(from left)

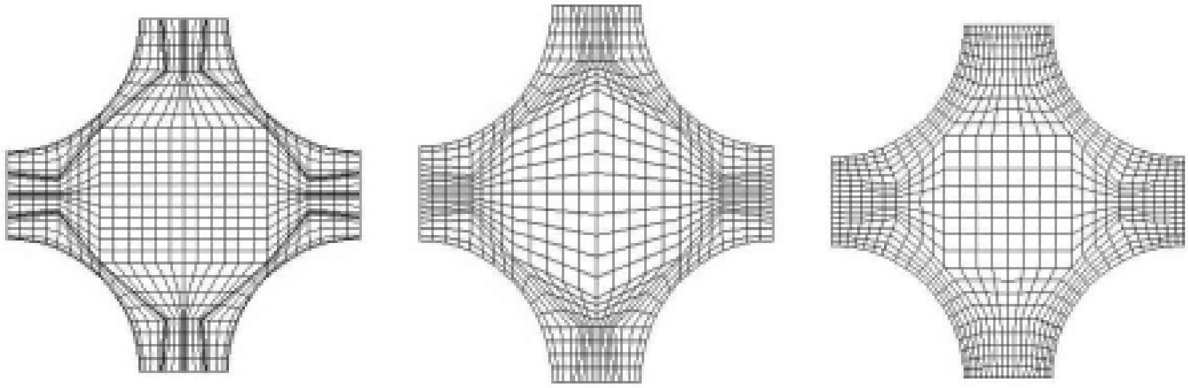


Fig. 3 Subchannel cross -sectional grids: SG1, SG2, and split vane(from left)

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; 30000 W/m^2)을 주었다. 부수로 측면경계에서는 혼합날개을 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.

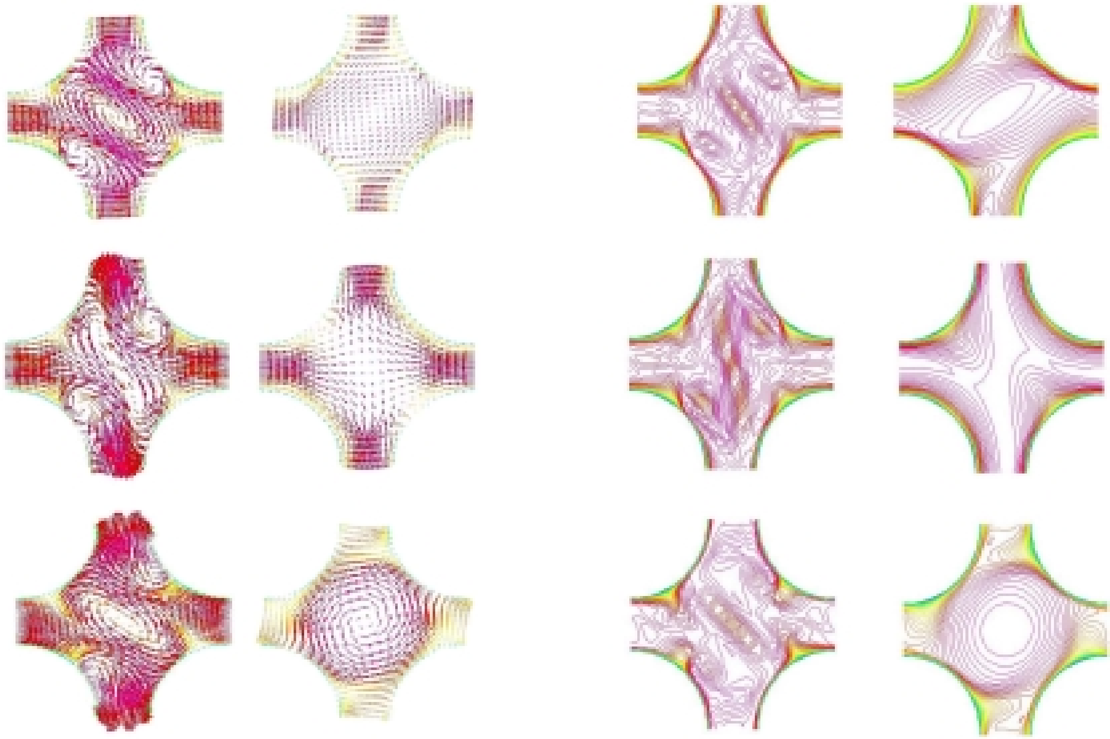
2.3 수치해석

본 연구에서는 CFD코드인 CFX -TASCflow를 사용하여 계산을 수행하였다. 대류항의 이산화방법으로 LPS(Linear Profile Skewed Upstream Differencing Scheme)수치기법과 난류모델로 Launder 와 Spalding[11] 의 표준 k - ε 모델을 사용하였다. 반복수치계산은 질량보존방정식의 잉여값(Residual) 10^{-3} 이하가 될 때까지 계산되었고 계산시간은 3시간 정도 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 속도분포

Fig.4 는 축방향으로 $Z/D_h = 2$ 와 $Z/D_h = 30$ 인 단면에서 3가지 유형의 혼합날개에 대한 속도벡터와 등속도선을 나타낸 것이다. (여기서 Z=0 위치는 혼합날개 밑면부분이다.) 속도벡터 그림으로부터 2 D_h 에서 SG1과 SG2는 사각형 기하형상으로 인하여 혼합날개 Tip부분과 연료봉사이에서 선회유동방향(시계방향)과 반대방향(반시계방향)의 와유동이 생성되는 것을 볼 수 있다. Split vane 의 경우 30 D_h 에서 동심원 형태의 강한 선회유동이 발생하지만 횡류의 발생은 미미한 것으로 예측된다. SG2의 경우는 선회유동의 발생은 미미하지만 인접한 부수로와의 횡류 발생이 가장 잘 되는 것을 예측할 수 있다. SG1 은 타원형 형태의 선회유동과 인접한 부수로와의



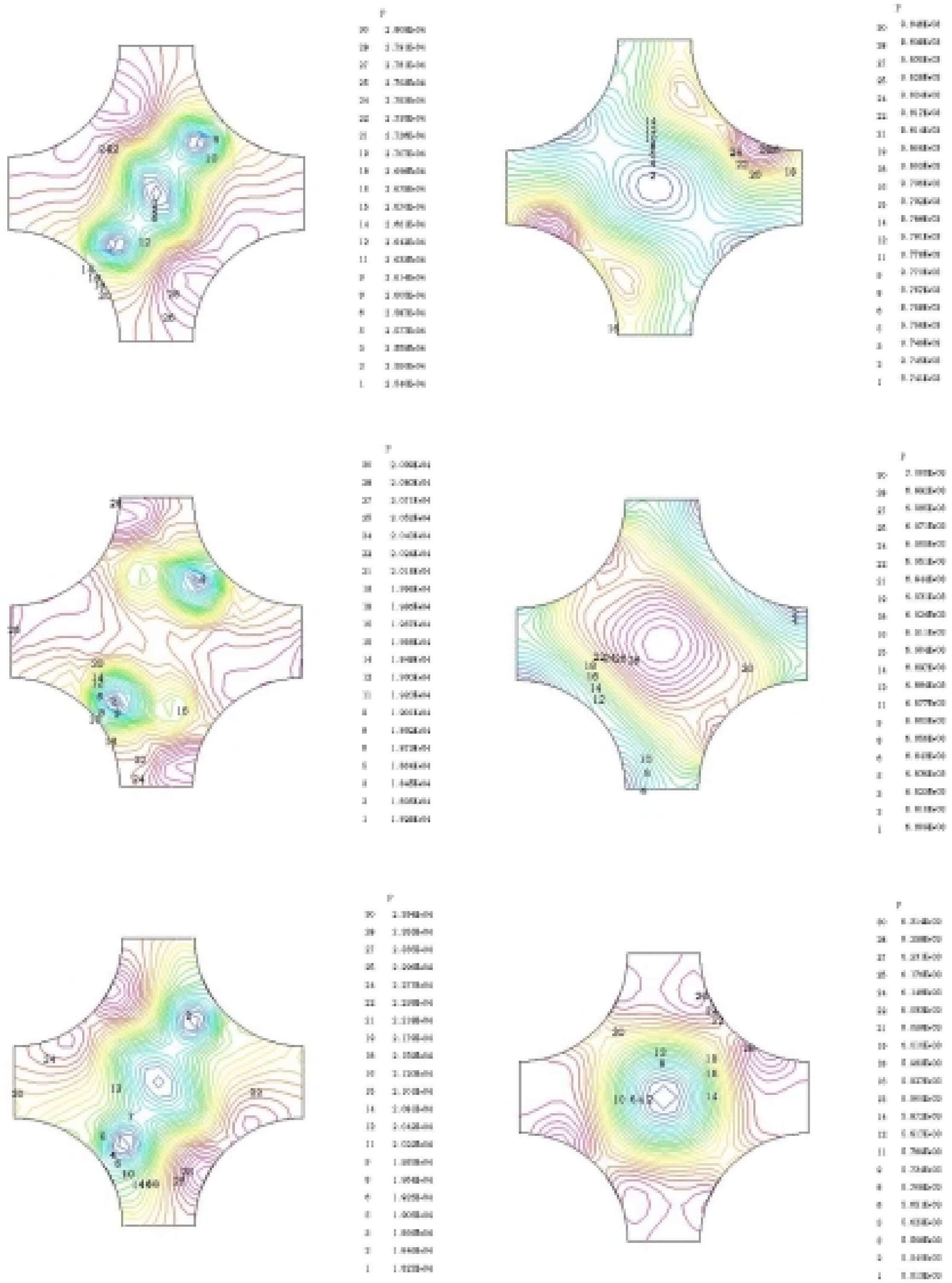
$Z/D_h = 2$ $Z/D_h = 30$ $Z/D_h = 2$ $Z/D_h = 30$

Fig.4 Velocity vectors and contours in the subchannel: SG1, SG2, and split vane(from top)

횡류가 발생하고 있지만 Split vane보다 선회유동혼합이 효과적이지 못하고 SG2 보다 횡류혼합이 효과적이지 못하다는 것을 예측할 수 있다. 이로부터 형상변화에 따른 속도분포가 두드러지게 다르다는 것을 파악할 수 있다.

3.2 압력분포

Fig.5는 축방향으로 각각 $Z/D_h = 2$ 와 $Z/D_h = 30$ 인 단면에서 3가지 유형의 혼합날개에 대한 등압선을 나타내고 있다. 그림에서 숫자로 압력의 크기를 나타내었다. 숫자가 클수록 압력이 높은 구역이다. $2D_h$ 에서는 큰 차이가 없다. $30D_h$ 에서 SG1 과 Split vane은 중심선에서의 압력이 가장 낮고 연료봉 벽면근처와 인접 부수로에서의 압력이 높은 것을 알 수 있다. SG2의 경우 중심선에서의 압력이 가장 높고 벽근처에서 압력이 낮다는 것을 관찰할 수 있다. 압력구배로부터 $30D_h$ 에서는 SG2의 횡류가 잘 발생되는 것을 예측할 수 있다. Split vane의 경우 유동이 부수로 중심에서 머물러 있어 횡류유동혼합이 어려울 것으로 사료된다. Fig.6는 3가지 유형의 혼합날개가 부착된 지지격자 봉다발 부수로의 압력분포를 나타내고 있다. 지지격자 전후에서 압력강하가 크게 발생하고 하류에서는 직선적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. Split vane이 가장 큰 압력강하를 나타내고 있다. Split vane의 경우 밑면을 기준으로 부수로 안쪽으로 25°구부러져 있고 유로막힘율(Blockage Ratio)이 가장 크기 때문이다. SG1인 경우 비틀림각도를 줌으로 유체가 부드럽에 흘러지나므로 유로막힘율이 SG1보다 크지만 압력강하는 도리어 작게 나타났다. 이로부터 형상변화가 압력손실에 직접적인 영향을 주는 것을 예측 할 수 있다.



$Z / D_h = 2$ $Z / D_h = 30$

Fig.5 Pressure contours in the subchannel: SG1, SG2, and split vane (from top)

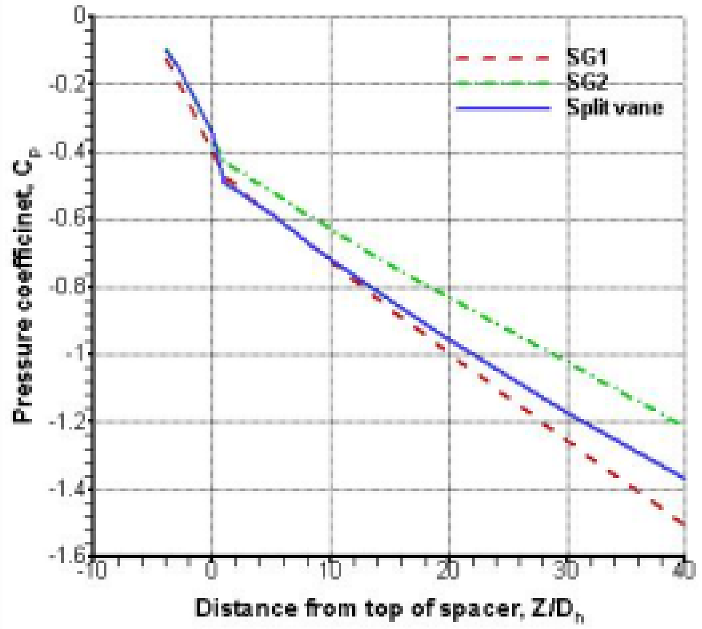


Fig.6 Pressure distributions in subchannel

3.3 유동혼합인자

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

$$S_M = \frac{\int r^2 V_{lateral} \ Udr}{R_S \int rU^2 dr} \qquad (1)$$

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.

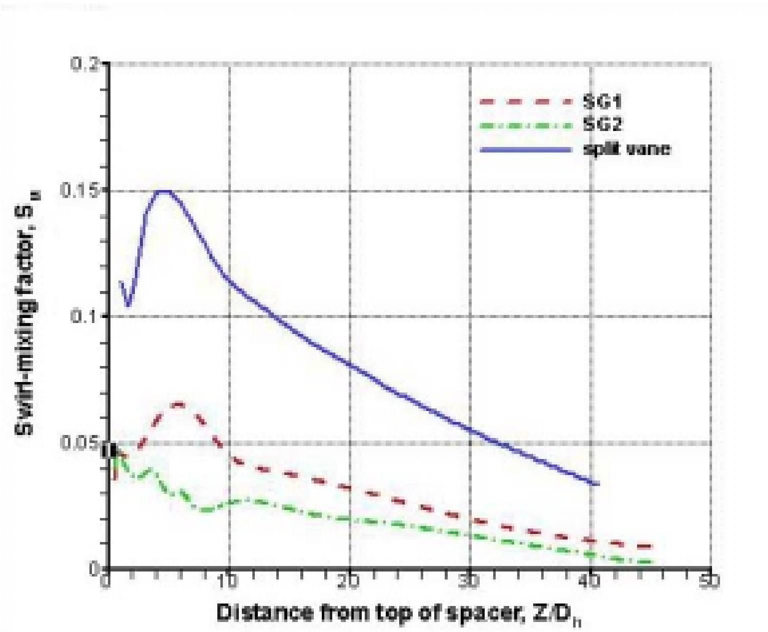


Fig.7 Axial variation of swirl -mixing factor

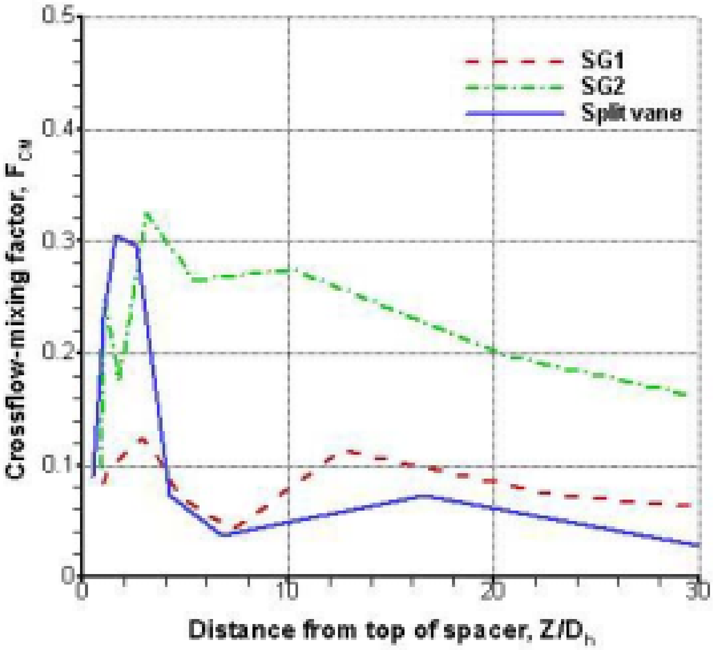


Fig.8 Axial variation of crossflow-mixing factor

Fig.7은 지지격자 하류에서 부수로 선회계수의 변화를 나타낸 것이다. Split vane의 경우 선회가 가장 잘 일어나고 SG2의 경우에 가장 작게 유발되었다.

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

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

여기서, s는 연료봉 간격을 나타내고 V_{cross} 는 횡류 속도이며 V_{bulk} 은 부수로 평균유속이다.

Fig.8은 축방향의 횡류계수변화를 나타낸 것이다. SG2인 경우의 횡류혼합이 약 $3D_h$ 이후로 가장 잘 일어나고 부수로 하류로 갈수록 Split vane의 횡류계수는 급격히 감소하여 가장 작게 나타나고 있다. 이로부터 형상변화에 따른 유동혼합의 변화는 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 아울러, Split vane과 SG2는 각각 선회와 횡류혼합을 유발하는 데 효과적인 형상임을 알 수 있다.

3.4 열전달계수

열전달 증진효과를 평가하기 위하여 열유속이 일정할 경우 혼합날개가 없는 경우에 대한 있는 경우의 Nusselt수 비로 세 가지 타입(SG1, SG2, Split vane)의 혼합날개에 의한 열전달을 다음과 같은 식으로 비교하였다.

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \frac{T_{b_0} - T_{w_0}}{T_b - T_w} \tag{3}$$

여기서 T_{b_0} 와 T_{w_0} 는 각각 혼합날개가 없는 경우의 각 단면에서의 부수로 냉각재의 평균온도

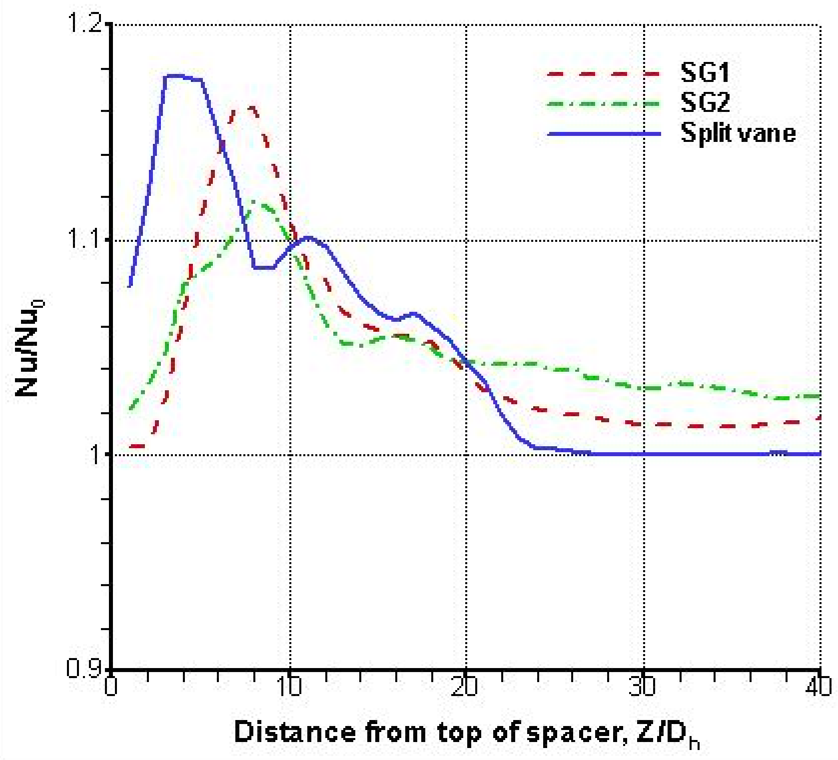


Fig.9 Nusselt number distributions for the different three mixing vanes

(Bulk temperature)와 벽면평균온도이고, T_b 와 T_w 는 각각 혼합날개가 있는 경우의 부수로 냉각재의 평균온도(Bulk temperature)와 벽면평균온도이다.

Fig.9은 3가지 혼합날개의 축방향 열전달계수 변화를 나타내었다. Split vane인 경우 열전달계수가 약 3D_h까지 증가하여 최고점에 도달한 후 약 22D_h 까지 지속적으로 감소한다. 22D_h 후류에서는 혼합날개가 없는 경우의 열전달계수값에 접근한다. SG1인 경우 약 7D_h에서 열전달계수 최고점이 나타나고 약 22D_h 까지 지속적으로 감소한다. SG2의 열전달계수변화 경향은 SG1과 비슷하다. 3가지 혼합날개에 의한 열전달을 전반적으로 비교하면 축방향 20D_h까지 Split vane의 경우 열전달이 가장 잘 되지만 20D_h이후는 SG2인 경우가 가장 잘 된다. 20D_h까지는 강제유동혼합영역으로 추측된다. 이 영역에서는 난류강도의 영향과 유로막힘율의 영향이 주요한 요인으로 판단된다. 유동이 완전발달됨에 따라 열전달에 기여하는 주요한 요소는 선회유동혼합보다 횡류혼합인 것으로 추측된다. 압력분포분석에서 언급했듯이 Split vane은 하류로 갈수록 중심선의 압력은 낮아지고 연료봉벽면 근처의 압력이 높아지므로 부수로 중앙에서 동심원형태의 강한 선회류가 발생하지만 열전달효과는 SG1이나 지속적인 횡류유동을 발생시키는 SG2보다 열전달효과가 못하다는 것을 발견할 수 있다.

본 연구에서 계산된 결과를 Yao 등[12]이 제시한 열전달계수 실험식과 비교하여 보았다. 그 들은 열전달계수를 유로막힘율(Blockage Ratio)과 선회계수의 함수로 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \left[1 + 5.55\beta^2 e^{-0.13(z/D_h)}\right]\left[1 + S^2_{w(z/D_h)}\right]^{0.4} \qquad (4)$$

여기에서 β 는 유로막힘율이고 S_W 는 선회계수이다. Z/D_h 는 혼합날개 밑면을 시작점으로 축방향으로의 거리를 나타낸다. Fig.10은 실험식(5)를 이용해 계산한 3가지 혼합날개의 축방향 열전달

계수변화를 나타낸다. Fig.9와 비교하여 보면 이 실험식은 열전달에 대한 유로막힘율과 선회계수의 영향만을 반영함으로써 횡류혼합의 영향이 큰 영역에서는 차이를 보이고 있다.

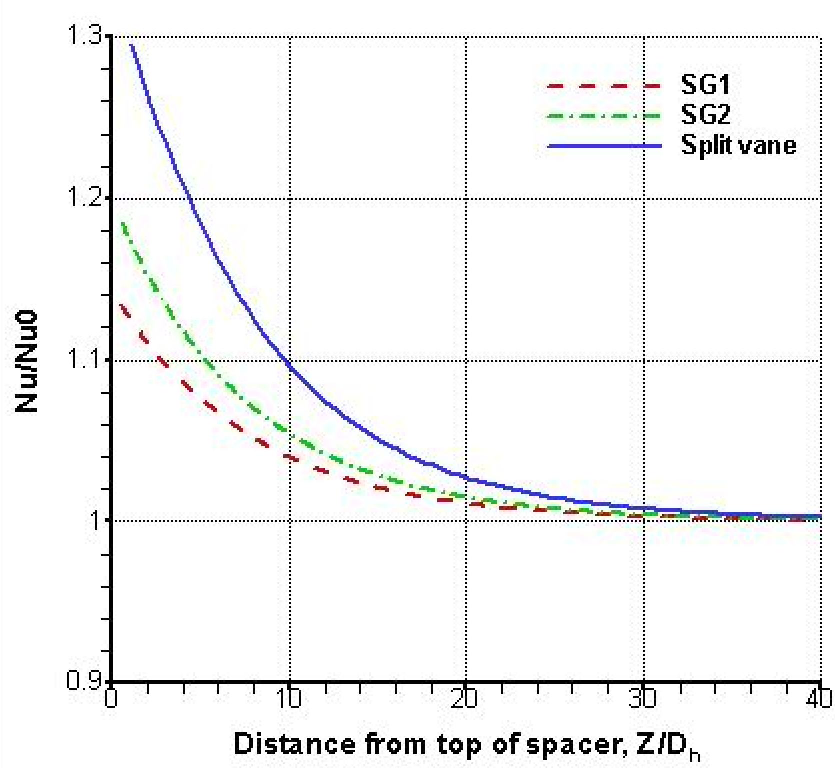


Fig.10 Nusselt number distributions for the different three mixing vanes calculated by Yao et al. correlation

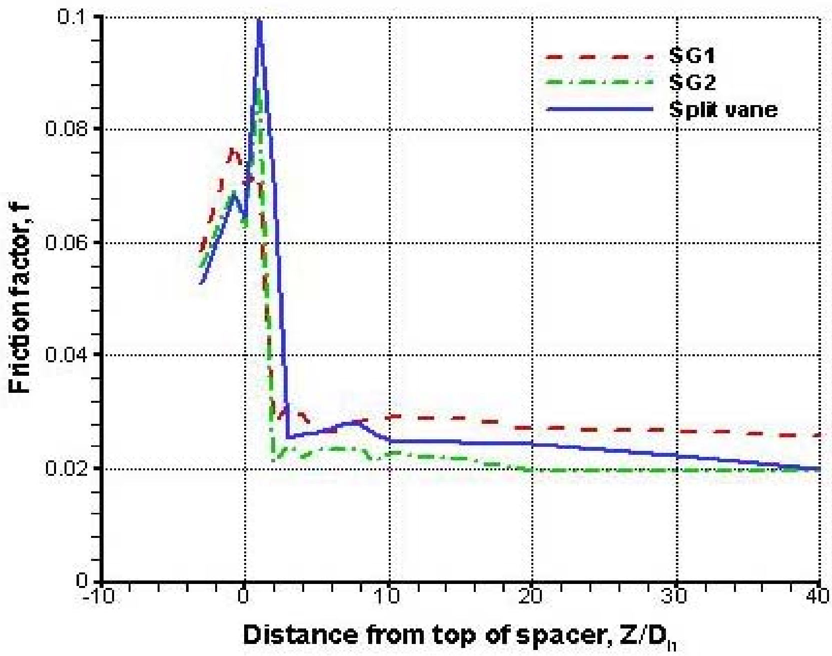


Fig.11 Friction factor distributions for the rod bundles

3.5 마찰계수

마찰로 인한 손실을 평가하기 위하여 마찰계수를 다음과 같이 정의하였다.

$$f = \Delta P \left(\frac{L}{D_h} \frac{1}{2} \rho V^2 \right)^{-1} \tag{5}$$

여기에서 ΔP 는 부수로 내 일정구간내의 압력손실이고 L 은 마찰길이 D_h 는 수력직경이다. ρ 는 냉각재의 밀도이고 V 는 평균유속이다.

Fig.11는 3가지 혼합날개가 부착된 봉다발 지지격자의 부수로내 축방향으로의 마찰계수의 변화를 나타냈다. 모든 경우에서 지지격자를 지나면서 마찰계수의 값은 급격하게 증가하였다가 감소한다. 이중에서 Split vane의 마찰계수변화가 가장 큰 것을 볼 수 있다. SG1, SG2, Split vane의 유로막힘율(β) 는 각각 16%, 19%, 21.4%이다. 이로부터 혼합날개에 근접한 하류에서 Split vane의 마찰계수가 큰 것은 유로막힘율이 크기 때문임을 알 수 있다. 그러나, SG1과 SG2의 경우를 비교하여 보면 SG2의 유로막힘율이 더 크지만 마찰계수는 SG1이 더 크다. 그 원인은 SG2 혼합날개가 비틀림각도를 줌으로써 유동의 마찰이 감소하기 때문이라고 판단된다. 약 8D_h 이후로 Split vane의 마찰계수는 SG1보다 작아지고 있다. SG1의 경우, 타원형의 선회유동구조로 인하여 연료봉 벽면과의 마찰이 상대적으로 커지기 때문으로 사료된다. 이상으로부터 마찰손실은 혼합날개의 유로막힘율 뿐 아니라 기하학적 형상에 의해서도 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원자로 부수로 내 혼합날개를 지나는 삼차원 열유동 해석을 수행하여 혼합날개 형상변화가 열전달계수와 마찰계수에 미치는 영향을 속도와 압력분포, 선회계수 및 횡류계수 등을 통하여 검토하였다. 혼합날개는 자체 설계한 두 가지 모델(SG1,SG2)과 상용화된 모델인 Split vane을 대상으로 하였다. SG1인 경우에는 사각형 형상때문에 모서리 부분에서 강한 유동교란으로 인해 혼합날개와 인접한 하류에서 열전달이 크게 증진되고 있으나 선회나 횡류 유발이 효과적이지 못하여 하류에서는 SG2 보다 작은 열전달계수를 나타낸다. SG2인 경우는 인접 부수로 방향으로 비틀림 각도를 주었기 때문에 지속적인 횡류로 인하여 혼합날개 하류 30D_h 이후로는 열전달이 잘 이루어짐을 알 수 있다. Split vane의 경우는 선회가 가장 잘 유발되고 유로막힘이 크므로 20D_h 까지 열전달이 전반적으로 SG1과 SG2 보다 크지만 20D_h 이후에는 열전달률이 급격히 저하되어 가장 작은 값을 보인다. 향후 혼합날개 형상의 최적설계에는 열전달계수와 마찰계수가 혼합된 목적함수를 사용하여 지속적인 횡류혼합을 발생시킴으로써 열전달을 증진시키는 반면 마찰계수를 줄일 수 있는 방향으로 혼합날개의 형상을 최적화하여야 할 것이다.

후 기

본 연구는 2001 과학기술부 원자력연구기반확충사업에 의해 지원을 받았으며 이에 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] 전건호, 최영돈, "지지격자의 형상변화에 따른 원자로 냉각재 난류 열효율 증진에 관한 연구" *대한기계학회 1999년도 추계학술대회논문집 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^{th} *Int. Conference on Nuclear Engineering, Baltimore, USA,* April 2-6.

[7] C. Y. Gu, Wei Ji, Z. Karoutas and B. Scholin "3D flow Analyses for Design of Nuclear Fuel Spacer" *Proceedings of The Tnt. Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics,* New York, United Sates, 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 유동혼합 날개 개발을 위한 CFD응용,” *대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 E* , pp. 482-487.

[10] CFX-TASCflow Computational Fluid Dynamics Software, *AEA Technology Engneerng Software Ltd,* (1999)

[11] Launder B.E. and Spalding D.B., 1974, “The numerical computation of turbulent flows,” *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering,* 3. pp.269-289.

[12] 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)