

# 핵연료다발 유동혼합 날개 개발을 위한 CFD 응용

인왕기\*, 오동석, 전태현

## CFD Application to Development of Flow Mixing Vane in a Nuclear Fuel Assembly

W. K. In, D. S. Oh, T. H. Chun

**Key Words :** 전산유체역학(CFD), 유동혼합(flow mixing), 날개(vane), 지지격자(grid spacer).

### Abstract

A CFD study was conducted to evaluate the nuclear fuel assembly coolant mixing that is promoted by the flow-mixing vanes on the grid spacer. Four mixing vanes (split vane, swirl vane, twisted vane, hybrid vane) were chosen in this study. A single subchannel of one grid span is modeled using the flow symmetry. The three mixing vanes other than swirl vane generate a large crossflow between the subchannels and a skewed elliptic swirling flow in the subchannel near the grid spacer. The swirl vane induces a circular swirling flow in the subchannel and a negligible crossflow. The split vane and the twisted vane were predicted to result in relatively larger pressure drop across the grid spacer. Since the average turbulent kinetic energy in the subchannel rapidly decreases to a fully developed level downstream of the spacer, turbulent mixing caused by the mixing vanes appears to be not as effective as swirling flow mixing in the subchannel. In summary, the CFD analysis represented the overall characteristics of coolant mixing well in a nuclear fuel assembly with the flow mixing vanes on the grid spacer. The CFD study is therefore quite useful for the development of an advanced flow-mixing vane.

#### 기호설명

$D_h$	부수로 수력직경(m)
$V_{bulk}$	부수로 평균 유속(m/s)
$V_{cross}$	횡류 속도(m/s)
$V_{lateral}$	부수로 중심선의 수직방향 속도(m/s)
$p$	압력(Pa)

### 1. 서론

가압경수로에 사용되는 핵연료다발은 정방형 봉 다발로 봉 사이의 간격은 지지격자(grid spacer)에 의해 유지된다. 원자로 냉각수는 인접한 연료봉들 사이의 부수로(subchannel)를 축방향으로 흐른다. 핵연료 지지격자는 핵연료다발의 냉각수 유동 분포에 영향을 주므로 지지격자 형상은 핵연료

다발의 임계 열유속과 압력강하 등의 열수력 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 근래에는 지지격자에 유동혼합 날개를 일체형으로 부착하여 냉각수 혼합과 연료봉의 열전달을 향상시킴으로써 핵연료다발의 임계 열유속을 증가시키려는 노력이 시도되고 있다. 유동혼합 날개의 효과를 극대화 시키기 위해서는 날개의 형상과 위치 및 구부림 각도 등을 최적화해야 한다. 최적의 핵연료다발 유동혼합 날개의 개발을 위해서는 매우 많은 경우에 대한 열수력적 고찰이 필요하므로 검증실험을 위한 후보모형 선정을 위해 전산유체역학(computational fluid dynamics)을 이용한 방법이 필수적이다.

Karoutas 등<sup>(1)</sup>은 유동혼합 날개가 부착된 핵연료다발 부수로 3 차원 난류유동을 실험 및 수치적으로 분석하였다. 이들은 CFD 코드인 CFDS-FLOW3D 를 이용한 수치해석 결과를 실험결과와 비교함으로써 핵연료다발 부품개발을 위한 CFD 코드의 유용성을 보였다. Imaizumi 등<sup>(2)</sup>은 가압경수로 핵연료다발의 3 차원 유동특성을 평가하기

\* 한국원자력연구소, wkin@kaeri.re.kr

위한 CFD 방법을 제시하였다. In 등<sup>(3-5)</sup>은 CFD 분석을 통해 유동혼합 날개의 냉각수 유동혼합 특성을 잘 나타냈고 개량 유동혼합 날개의 개발을 위한 CFD 방법의 효율성을 확인하였다. Ikeda와 Hoshi<sup>(6)</sup>도 최적 유동혼합 날개 후보모형 선정을 위한 CFD 방법의 유용성을 확인하였다.

이 연구에서는 상용화가 이루어진 대표적인 유동혼합 날개와 한국원자력연구소가 개발중인 3종의 유동혼합 날개의 핵연료다발 유동특성을 CFD 방법을 이용하여 비교·분석하였다.

## 2. 유동혼합 날개

### 2.1 분리형 날개(split vane)

지지격자 판의 상부 교차점에 일체형으로 한 쌍(2개)의 날개를 고안하여 각 날개를 유로 안쪽으로 구부러 위쪽으로 흐르는 냉각수의 방향을 바꾸는 형상이다 (Fig. 1a). 두 날개 사이에는 홈이 있어서 서로 반대방향으로 구부릴 수 있고 인접한 부수로 사이의 횡류(crossflow) 및 부수로 내부의 회전유동을 발생시켜 냉각수 혼합을 증진시킨다. 이러한 유동혼합 날개는 Westinghouse 에 의해 개발되어 상용화가 이루어진 상태이다. 주 유동방향으로부터 구부러진 전향날개의 각도는 약 25° 정도인 것으로 추정된다.

### 2.2 회전유동 발생날개(swirl vane)

한국원자력연구소가 개발중인 회전유동 발생날개(swirl vane)는 각 격자 셀마다 네 개의 전향날개를 바람개비 모양으로 고안하여 측면 지지대로부터 같은 회전방향으로 구부린 것이다 (Fig. 1b). 각 전향날개는 삼각형으로 한 쪽 면은 날개 지지대와 연결되어 있으며 유효 전향면적이 날개 아래쪽은 작고 날개 위쪽으로 갈수록 증가하는 형상이다. 전향날개의 최적 구부림 각도는 약 40° 인 것으로 예측되었다<sup>(5)</sup>. 이러한 전향날개 형상은 선풍기 날개처럼 강력한 선회유동(축방향의 회전유동)을 발생시키고 유체 접촉면적도 최소화 시킴으로써 압력손실의 증가도 기존의 유동 전향날개보다 적을 것으로 예상된다.

### 2.3 엇갈림 전향날개(twisted vane)

지지격자 판 상부 각 교차점에 일체형으로 두 개의 전향날개를 산 모양의 지지대 경사면을 중심으로 반대방향으로 구부린 형상이다 (Fig. 1c). 인접한 부수로 및 부수로 내부로 냉각수를 전향시켜 부수로 내부 회전유동과 부수로 사이의 횡류를 동

시에 발생시키기 위한 유동혼합 날개이다. 전향날개가 주 유동방향을 따라 경사지게 구부려져 있으므로 전향날개로 인한 압력손실을 줄이고 나선형의 선회유동이 발생하여 유동혼합 효과가 지지격자 하류 멀리까지 지속될 수 있도록 고안된 것이다. 전향날개의 최적 구부림 각도는 약 35° 인 것으로 예측되었다<sup>(5)</sup>.

### 2.4 복합유동 전향날개(hybrid vane)

회전유동 발생날개와 엇갈림 전향날개를 조합한 유동혼합 날개로 각 지지격자 교차점에 4개의 전향날개로 구성된다 (Fig. 1d). 부수로 내부 회전유동 증진을 위한 회전유동 발생날개 2개와 인접한 부수로 사이의 횡류 증가를 위한 엇갈림 전향날개 2개를 혼합한 형상이다.

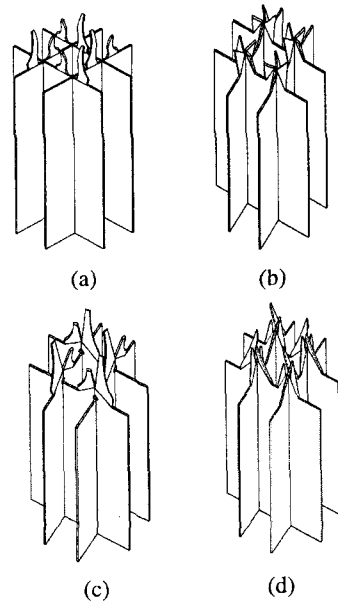


Fig. 1 Fuel grid spacers with: (a) split vane, (b) swirl vane, (c) twisted vane, and (d) hybrid vane

## 3. CFD 방법

### 3.1 CFD 모델

효율적인 CFD 계산을 위해 유동의 대칭성을 고려하여 한(1) 개의 지지격자를 포함하는 단일 부수로 형상을 수치해석 영역으로 설정하였다. 핵연료다발의 지지격자(높이 35 mm) 간격이 약 600 mm 이므로 특정 지지격자 상류 30 mm 지점으로부터 다음 지지격자 직전까지를 전체 CFD 모델

영역으로 선정하였다. 연료봉 지지를 위한 다른 지지격자 부착물(스프링, 덤플 등)은 유동에 미치는 영향이 크지 않으므로 여기서는 CFD 모델의 단순성을 위해 무시하였다. 또한 지지격자 판과 혼합날개의 두께도 무시하였다. 연료봉 직경( $D$ )은 9.5 mm 이고 봉 간격( $P$ )은 12.6 mm 이다.

분리형 날개에 대한 CFD 모델은 180 개의 블록으로 구성된 3 차원 정렬격자(structured grid) 모델이며 전산격자 셀 수는 약 247000 개이다. 회전유동 발생날개의 CFD 모델은 100 개의 블록으로 이루어진 정렬격자 모델이며 전산격자 셀 수는 약 224000 개다. 엇갈림 전향날개와 복합유동 전향날개의 CFD 모델은 각각 96 개와 136 개의 다중블록으로 구성되었으며 전산격자 셀 수는 약 250000 개와 220000 개이다. Fig. 2 와 Fig. 3 은 각각 유동혼합 날개가 부착된 지지격자 CFD 모델과 부수로 단면에서의 전산격자를 나타낸다.

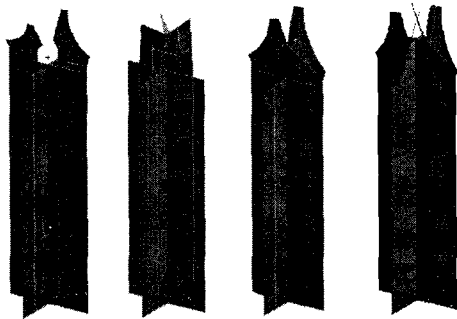


Fig. 2 Fuel spacer CFD models with: (from left) split vane, swirl vane, twisted vane, and hybrid vane

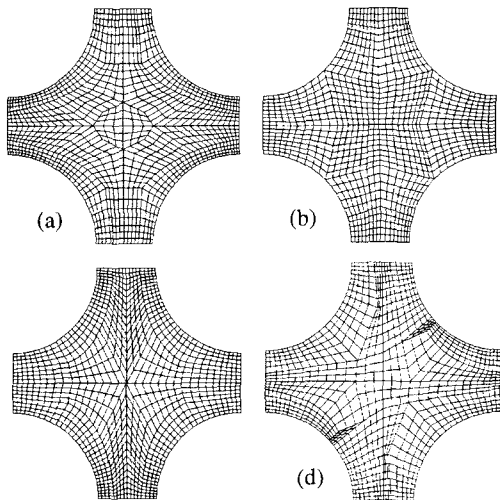


Fig. 3 Subchannel cross-sectional grids for: (a) split vane, (b) swirl vane, (c) twisted vane, and (d) hybrid vane

### 3.2 경계조건

CFD 모델의 입구경계에서는 균일유동 조건을 가정하고 출구경계에서는 일정한 압력 조건을 설정하였다. 입구경계의 균일유동 조건은 완전발달유동 조건과 수치해석 결과에 큰 차이를 나타내지 않았다. 부수로 측면경계에서는 인접 부수로와의 횡류 혼합을 고려한 특별한 연속 경계조건을 설정하였다. 즉 핵연료다발의 부수로 배열과 전향날개에 의한 횡류 방향을 고려하여 두(2) 개의 부수로 측면경계가 각각 연결된 조건으로 한쪽에서 나온 유체는 다른 한쪽으로 들어가게 된다. 연료봉 벽면에서는 no slip 경계조건을 사용하였다.

### 3.3 수치해석

유동혼합 날개를 포함하는 3차원 부수로 난류 유동을 수치적으로 분석하기 위해 공학적으로 많이 이용되고 있는 Launder와 Spalding의 표준  $k-\epsilon$  모델<sup>(7)</sup>을 사용하였다. 표준  $k-\epsilon$  모델은 벽 함수를 이용한 고 레이놀즈 수 에디 점성계수 모델로 회전유동의 예측에는 다소 부정확한 것으로 알려져 있으나 복잡한 유동 문제의 경우 수렴성이 뛰어나고 계산시간도 단축되므로 많이 이용되고 있다. 유한 차분도식은 Hybrid 차분도식을 이용하였으며 보다 안정된 해를 얻기 위해서 압력방정식은 AMG(algebraic multi-grid) 해법을 이용하였다. 반복 수치계산은 질량보존 방정식의 잉여 값(residual)이  $10^{-3}$  이하가 될 때까지 수행하였으며 수렴 해를 얻기 위해서는 약 5000회의 반복계산이 이루어졌다. 이 계산은 워크스테이션 HP9000 C200과 C180(PA8000 CPU, 512 MB RAM)에서 수행되었다.

작동유체는 상온의 물이며 부수로 평균 유속( $V_{bulk}$ )은 원자로 정상운전 조건과 비슷한 6.79 m/s ( $Re=80000$ )이다. 부수로의 수력직경( $D_h$ )은 약 12 mm 이다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 유동혼합 양식

유동혼합 날개의 형상에 따른 부수로 단면에서의 예측된 속도벡터는 Fig. 4 와 같다. 분리형 날개는 지지격자 가까이서( $z/D_h=2$ ) 인접한 부수로 사이에 많은 횡류와 부수로 내부에는 타원형의 회전유동을 발생시키는 것으로 나타났다. 하류로 갈수록 횡류는 감소하고 회전유동이 유동혼합의 주요 인자임을 알 수 있다( $z/D_h=20$ ). 회전유동 발생날개는

부수로 내부에 강력한 동심원 형태의 회전유동을 발생시키지만 인접한 부수로 사이의 횡류는 미미한 것으로 예측되었다. 지지격자에서 멀리 떨어진 하류( $z/D_h=20$ )에서도 동일한 형태의 회전유동만이 발생하고 있다.

엇갈림 전향날개의 경우에는 분리형 날개와 같이 지지격자 가까이서( $z/D_h=2$ ) 많은 횡류와 타원형의 회전유동이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 먼 하류( $z/D_h=20$ )에서 횡류는 사라지고 동심원 형태의 회전유동으로 변하는 것을 알 수 있다. 복합 유동 전향날개는 지지격자 가까이서( $z/D_h=2$ ) 부수로 위-아래로 길어진 타원형 회전유동과 많은 횡류를 발생시키는 것으로 나타났으며 먼 하류에서는 엇갈림 전향날개의 경우와 같이 횡류는 미미해지고 동심원 형태의 회전유동으로 변하는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 유동혼합 크기

유동혼합의 크기를 평가하기 위해 회전유동혼합 인자( $S_M$ )와 횡류혼합 인자( $F_{CM}$ )를 각각 다음과 같이 정의하였다.

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

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

여기서 변수  $U$  와  $r$  은 각각 부수로 중심선상의 국소 축방향 속도와 부수로 중앙으로부터의 거리를 나타낸다. 변수  $R_S$  는 유효 회전유동 반경으로 부수로 중앙으로부터 연료봉 벽면까지의 수직거리를 의미한다. 식 (2)의 변수  $s$  는 연료봉 간격을 나타낸다.

Fig. 5 는 지지격자 하류에서 부수로 회전유동혼합 인자의 변화를 나타낸 것이다. 지지격자 가까이서 회전유동에 의한 냉각수 혼합이 크게 증가하고 하류로 갈수록 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 지지격자 하류 먼 곳까지 부수로 내부 회전유동혼합 효과가 존재하는 것을 알 수 있다. 지지격자 하류 중간지점( $z=15-20D_h$ )까지는 분리형 날개와 엇갈림 전향날개의 경우가 회전유동혼합이 다소 크게 나타났으나 이후에는 유동혼합 날개의 형상에 따른 차이는 미미한 것으로 판단된다.

Fig. 6 은 부수로 횡류혼합 인자의 축방향 변화를 나타낸 것이다. 지지격자 근처에서 횡류가 크

게 발생하고 하류로 갈수록 급격히 감소하여 약  $z=20D_h$  이후에는 횡류혼합이 미미한 것을 알 수 있다. 분리형 날개가 다른 유동혼합 날개에 비해 다소 큰 횡류혼합을 발생시키는 것으로 보이며 회전유동 발생날개의 경우에는 횡류혼합이 미미하였다.

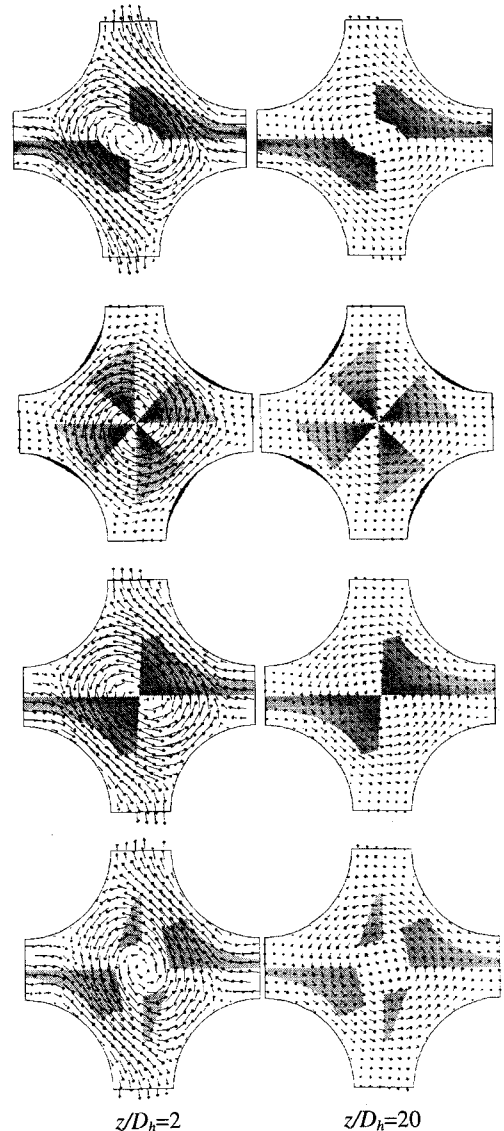


Fig. 4 Velocity vectors in the subchannel: (from top) split vane, swirl vane, twisted vane, and hybrid vane

#### 4.3 압력분포

유동혼합 날개가 부착된 지지격자에 의한 압력 강하는 개량 핵연료다발 지지격자의 개발에 매우

중요한 인자이다. 유동혼합 날개는 냉각수 혼합을 향상시킬 뿐만이 아니라 압력손실도 최소화해야 한다. 현재의 CFD 해석에서는 지지격자의 두께와 다른 지지격자 구성요소(스프링, 덤플)를 무시하였기 때문에 압력분포의 예측이 다소 부정확하다. 그러나 유동혼합 날개에 의한 유동의 가속 및 감속에 의한 압력손실을 상대적으로 비교하는 것은 적절한 한 것으로 판단된다.

Fig. 7 은 서로 다른 유형의 유동혼합 날개가 부착된 지지격자 봉다발 부수로의 압력분포를 나타내고 있다. 지지격자 전후에서 압력강하가 크게 발생하고 지지격자에서 다소 떨어진 하류에서는 선형적인 변화를 보이고 있다. 분리형 날개가 가장 큰 압력강하를 나타내고 있으며 복합유동 전향날개와 회전유동 발생날개가 비교적 작은 압력강하를 나타내고 있음을 알 수 있다. 분리형 날개의 경우 폭이 넓은 전향날개의 밑면을 기준으로 부수로 안쪽으로 구부러져 있어 급격한 유로막힘 현상이 일어나기 때문이다.

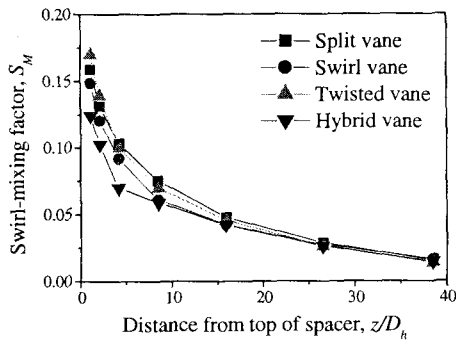


Fig. 5 Axial variation of swirl-mixing factor

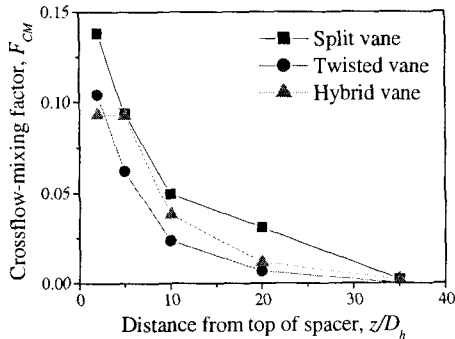


Fig. 6 Axial variation of crossflow-mixing factor

#### 4.4 난류에너지

Fig. 8 은 부수로 평균 난류에너지 분포를 각 유동혼합 날개에 대해 비교한 것이다. 지지격자 위치에서 유속 변화가 크므로 난류에너지가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 지지격자 하류에서는 난류에너지가 급격히 감소하여 부수로 수력직경의 약 5-10 배 되는 위치에서 완전발달 영역의 값으로 변하는 것이 예측되었다. 엇갈림 전향날개와 분리형 날개의 경우가 지지격자 근처에서 다소 높은 난류에너지를 나타내고 있으나  $z/D_h=10$  이후에는 다른 유동혼합 날개의 경우와 큰 차이가 없으며 날개가 없는 경우와도 비슷한 결과를 보이고 있다. 이는 유동혼합 날개에 의한 난류혼합이 부수로 회전유동혼합만큼 냉각수 혼합에 효과적이지 못하다는 것을 의미한다.

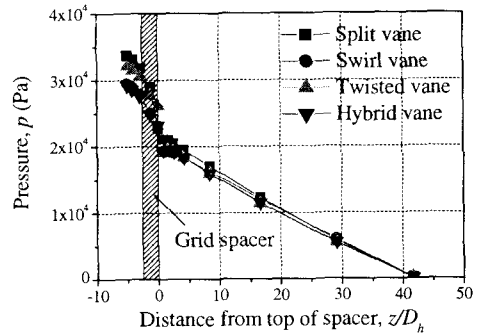


Fig. 7 Pressure distribution across the grid spacer

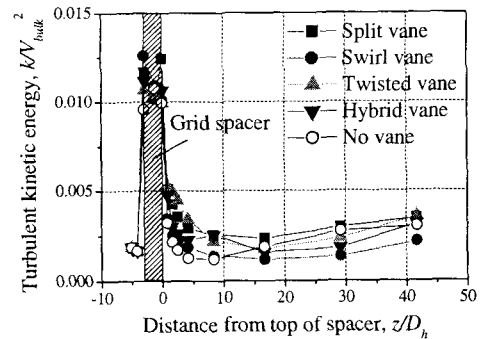


Fig. 8 Turbulent kinetic energy averaged in the subchannel

## 5. 결론

전산유체역학(CFD) 방법을 이용하여 핵연료다

발 유동혼합 날개의 수력적 특성을 분석하였다. 분리형 날개가 다른 유동혼합 날개에 비해 부수로 회전유동혼합과 횡류혼합을 다소 크게 발생시키지만 압력강하도 가장 큰 것으로 예측되었다. 회전 유동 발생날개의 경우에는 부수로 회전유동혼합이 분리형 날개와 비슷하고 압력강하도 작지만 횡류혼합이 미미하였다. 엇갈림 전향날개는 분리형 날개와 유사한 수력특성을 나타내었으며 복합유동 전향날개의 경우에는 부수로 회전유동혼합과 횡류혼합이 비교적 크게 발생하고 압력강하는 가장 작게 예측되었다. 한편, 유동혼합 날개에 의한 난류혼합의 증가는 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 향후에는 엇갈림 전향날개와 복합유동 전향날개의 형상 최적화와 임계열유속 성능시험이 필요한 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기연구개발사업의 일환으로 이루어졌으며 이에 대하여 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) Karoutas Z., Gu C.Y. and Scholin B., 1995, "3-D

- flow analyses for design of nuclear fuel spacer," *Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics*, New York, United States, September 10-15.
- (2) 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 13<sup>th</sup> International Conference on SMiRT*, Porto Alegre, Brazil, August 13-18.
- (3) 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", *8<sup>th</sup> Int. Conference on Nuclear Engineering*, Baltimore, USA, April 2-6.
- (4) In W. K., 2001, "Numerical study of coolant mixing caused by the flow deflectors in a nuclear fuel bundle," *Nuclear Technology*, **134**, to be issued in May.
- (5) In W. K., Oh D. S. and Chun T. H., 2001, "Flow analysis for optimal design of mixing vane in a PWR fuel assembly", *J. of KNS*, **33**(3), to be issued in June.
- (6) Ikeda K. and Hoshi M., 2001, "Development of Mitsubishi high thermal performance grid 1 - CFD applicability for thermal hydraulic design," *9<sup>th</sup> Int. Conference on Nuclear Engineering*, Nice, France, April 8-12.
- (7) Launder B. E. and Spalding D. B., 1974, "The numerical computation of turbulent flows," *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **3**, 269.