

핵연료 봉다발내 혼합날개에 의한 난류열전달 해석

정상호* · 김광용**

Turbulent Heat Transfer with Mixing Vane in Nuclear Fuel Assembly

Sang-Ho Jung*, Kwang-Yong Kim**

Key Words : 원자로(Nuclear Reactor), 연료봉다발(Fuel Assembly), 혼합날개(Mixing Vane), 유동혼합(Flow Mixing), 나비에-스톡스 방정식(Navier-Stokes Equations)

ABSTRACT

The purpose of present work is to analyze the convective heat transfer downstream of mixing vane in subchannel of nuclear reactor with three-dimensional Navier-Stokes equations. SST model is selected as a turbulence closure by comparing the performances of two different turbulent closures. Three different shapes of mixing vane are tested. And, thermal-hydraulic performances of these vanes are discussed. The results show that twist of the vane improves the heat transfer performance far downstream of the vane.

1. 서론

가압 경수형 원자로의 핵연료 집합체는 각 연료봉의 구조적 형태를 유지하기 위해 축방향 여러 지점에 지지격자를 설치한다. 그러나, 최근에는 지지격자에 혼합날개를 부착하여 냉각재 유동을 인공적으로 교란함으로써 열전달 성능을 개선할 수 있다는 점이 부각되어, 임계열 유속을 증진시키기 위해 지지격자에 혼합날개를 부착하는 것이 일반적인 설계가 되었다.

혼합날개는 지지격자의 하류 측 끝단에 부착되며 부수로 내 유동의 강제 혼합을 통해 선회류나 횡류를 유발하여 난류생성을 촉진해 대류열전달을 증진시키는 역할

을 수행한다. 그러므로 혼합날개의 성능은 날개의 기하학적 형상에 의해 결정된다. 그러나 임계열유속 실험은 많은 시간과 비용을 요하므로 설계과정에서 혼합날개의 성능을 다양하게 시험하기 위해서는 전산유체역학(CFD)적 유동해석 방법이 경제적이고 유용하다. 최근 혼합날개의 유동혼합성능을 향상시키고 유속을 증진시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. Karoutas 등⁽¹⁾과 In 등⁽²⁾은 혼합날개가 부착된 핵연료 다발내 난류유동의 구조를 실험과 수치해석을 통해 분석한 바 있으며, Imaizumi 등⁽³⁾은 혼합날개에 의한 삼차원 유동특성을 평가하기 위한 유동해석 방법을 제시하였다. Kim 과 Kim⁽⁴⁾은 'PLUS7' 연료집합체의 열수력학적 성능시험을 수행하였다.

본 연구에서 지지격자 혼합날개의 삼차원 열수력학적 해석을 수행하기 위해 기준형상으로 삼은 것은 Seo

* 인하대학교 대학원 기계공학과대학원

** 인하대학교 기계공학부

E-mail : kykim@inha.ac.kr

와 Kim⁽⁵⁾의 최적설계에 의해 최적화된 'PLUS7'의 혼합 날개 형상이다. 본 연구에서는 이 혼합날개 형상과 변형된 몇 가지 혼합날개에 대해 삼차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 사용한 열수력학적 해석을 수행하였다.

2. 유동해석 방법

2.1 계산영역

Figure 1(a)는 'PLUS7' 혼합날개의 배열과 형상을 보여준다. Fig. 1(b)의 좌측 그림은 기준형상인 최적화된 'PLUS7'에 대한 계산영역 (1×2)을 나타낸다. 혼합날개의 굽힘 각도는 20.5°이며, 밀변길이는 4.26mm이다. 봉의 직경은 9.53mm이고 봉과 봉 중심 사이의 거리 (P)는 12.7mm이며, 지지격자의 높이는 40mm이다. 전체 계산영역은 지지격자 상류 40mm에서부터 지지격자 하류 530mm까지이다. 따라서 전체 계산영역의 길이는 축방향으로 610mm이다. 그리고 지지격자의 두께는 0.4mm로 하였다. 작동유체는 상온의 물이며 부수로 평균 유속은 원자로 정상운전 조건과 비슷한 6.79 m/s (Re =

80,000) 이다.

2.2 수치해법

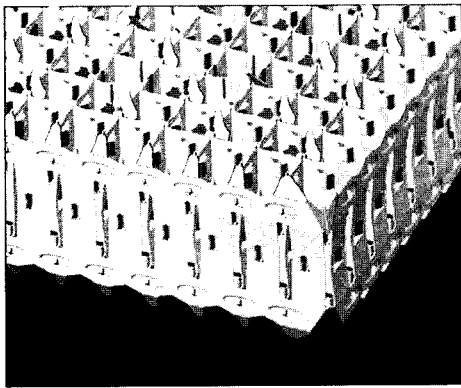
본 연구에서는 비압축성 삼차원 정상상태의 유동해석을 위해 비정렬격자계를 사용하는 상용 소프트웨어인 CFX-5.7⁽⁶⁾을 사용하여, 지배방정식인 레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식 (Reynolds-averaged Navier-Stokes equation)을 계산하였다.

입구경계조건은 균일유동 조건으로, 그리고 출구경계는 일정압력 조건으로 주었다. 입구에서의 난류운동에너지는 5% 강도로 계산되었다. 계산영역의 측면경계에서는 혼합날개를 기준으로 상류의 측면 경계조건은 유동혼합이 없는 대칭조건을 주었고, 혼합날개 하류 부수로 측면경계에서는 혼합날개로 인한 선회류와 횡류를 고려하기 위하여 주기경계조건 (periodic boundary condition)을 적용하였다. 아울러 연료봉표면에 581 kW/m의 균일 열전달 조건을 주었다.

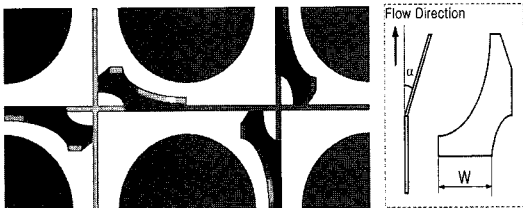
2.3 혼합날개의 형상

본 연구에서는 최적화 된 'PLUS7' 혼합날개와 함께 각각 굽힘각 (α)과 비틀림각 (γ)을 변화시킨 형상과 혼합날개의 수를 증가시킨 두 가지 형상에 대하여 열수력학적 해석을 수행하였다. 굽힘각은 Fig. 2(a)에서와 같이 연료봉과 평행한 유동방향과 혼합날개의 중심선이 이루는 각으로 정의되고, 비틀림 각은 Fig. 2(a)에서와 같이 혼합날개의 지지격자에 부착된 바닥면을 고정 한 채 중심선을 중심으로 비틀어진 각도로 정의된다. 이 그림에서는 편의상 혼합날개의 형상을 직사각형으로 단순화했다.

Figure 3(a)는 굽힘각이 20.5°인 기준 혼합날개 (최적화된 'PLUS7 Vane')에 18°의 비틀림 각을 준 형상을 나



(a)



(b)

Fig. 1 Geometry of 'PLUS7' mixing vane and Computational Domain

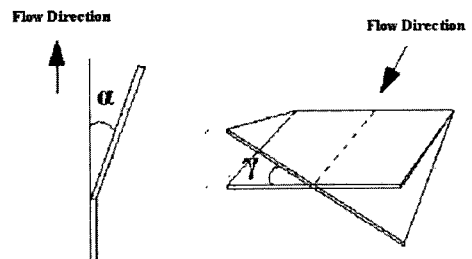


Fig. 2 Bend angle(α) and twist angle(γ)

타내고 있다. Fig. 3(b)는 각각의 혼합날개 형상은 'PLUS7'과 같고 각 혼합날개의 길이를 반으로 줄임으로써 각각의 혼합날개의 단면적을 1/4로 줄이는 대신 총 혼합날개의 수를 8배로 증가시킨 형상이다.

3. 결과 및 검토

3.1 격자의존성 시험

혼합날개를 가지는 지지격자의 해석을 위해 우선 격자의존성 시험을 통해 최적의 격자수를 선택하였다.

격자는 비정렬 격자를 사용하였으며, 벽 근처에서는 직육면체 격자를 사용하였다. 격자시험은 선회류 (swirl flow)와 횡류 (cross flow)에 대해 각각 수행하였다. 선회류의 강도 (swirl flow rate)와 횡류의 강도 (cross flow rate)는 각각 다음의 식 (1)과 식 (2)에 의해 정의된다.

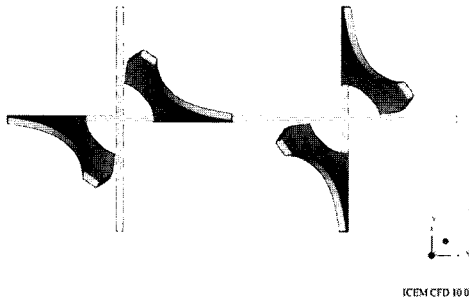
$$S_{rate} = \frac{1}{L} \int \frac{|V_{Swirl}|}{V_{Bulk}} dx \quad (1)$$

여기서 L 은 V_{swirl} 을 측정된 부수로 중심에서 연료봉 표면까지 이어진 선의 길이이며, V_{Swirl} 는 L 에 수직인 속도성분 (선회방향 속도성분)의 크기이고, V_{Bulk} 는 축 방향 평균 유동속도 (6.79 m/s)이다.

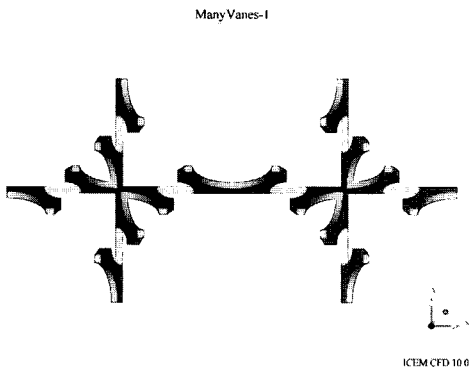
$$C_{rate} = \frac{1}{G} \int \frac{|V_{Cross}|}{V_{Bulk}} dx \quad (2)$$

여기서 G 는 V_{Cross} 를 측정된 연료봉표면과 인접한 연료봉표면 사이의 최소 연결선의 길이이며, V_{Cross} 는 G 에 수직인 속도성분 (횡방향 속도성분)의 크기이다.

선회류와 횡류는 혼합날개가 시작되는 평면을 기준으로 축 방향으로 12mm 간격으로 각각 총 40개의 선에

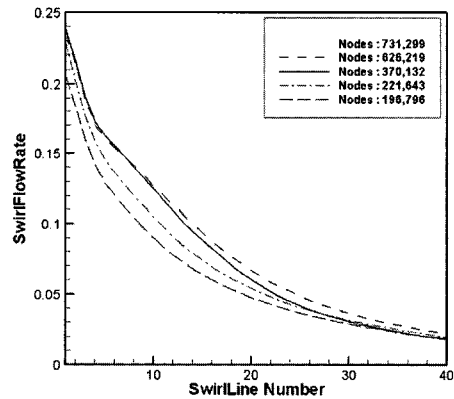


(a) Twist PLUS7-1

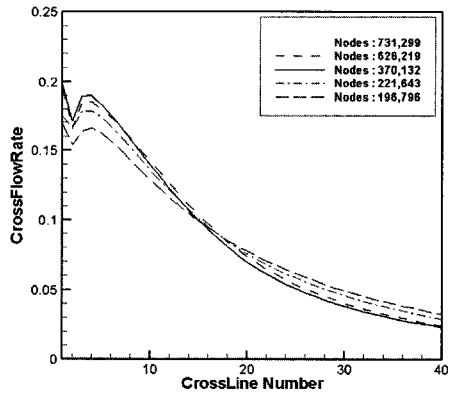


(b) Many Vanes

Fig. 3 Shapes of mixing vane



(a)



(b)

Fig. 4 Grid dependency test; (a) swirl flow rate, (b) cross flow rate

서 측정하였다. Fig. 4는 격자의존성테스트 결과를 그래프로 나타낸 것이며, 이를 통하여 최적 격자수는 370,132개로 정하였다.

3.2 난류모델 시험

본 연구에서는 난류모델로 두 가지의 2-방정식 모델을 검토하였는데, 이들은 그간 널리 사용되어 온 ' $k-\epsilon$ ' 모델과 최근 각광받고 있는 ' SST ' 모델이다.

일반적으로 ' $k-\epsilon$ ' 모델은 유동의 박리와 재순환유동을 해석하는데 정확성이 떨어지는 것으로 알려져 있다. 그에 반해 ' SST ' 모델은 ' $k-\epsilon$ ' 모델보다 벽 근처에서 계산의 정확성이 뛰어난 것으로 알려져 있다. ' SST ' 모델이 ' $k-\epsilon$ ' 모델과 ' $k-\omega$ ' 모델의 장점을 결합한 모델이기 때문이다. 특히 열전달 예측에 효과적이며, 높은 난류 레벨에서 경계층 안에서의 높은 열전달을 예측할 수 있다. 아울러, ' SST ' 모델은 다양한 종류의 박리 예측에 매우 효과적이다. ' SST ' 모델은 Wilcox의 ' $k-\omega$ ' 모델을 벽 근처에서 사용하며 자유류와 경계층의 모서리에서는 ' $k-\epsilon$ ' 모델을 사용한다. ' SST ' 모델은 역압력구배와 박리의 예측을 향상시키는 것으로 알려져 있다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 혼합날개를 지나는 유동에 대한 ' $k-\epsilon$ ' 모델과 ' SST ' 모델의 성능을 비교검토하기 위해서 Karoutas 등⁽¹⁾의 실험결과와 비교하였다. 이 실험은 연료봉에 열을 가하지 않은 'Split' 혼합날개의 속도장을 분석한 실험이다. Fig. 5는 두 가지 난류모델에 따른 수치 해석 결과를 실험치와 비교한 그림이다. 비교가 이루어진 선의 위치는 혼합날개를 기준으로 하여 상류 190.5

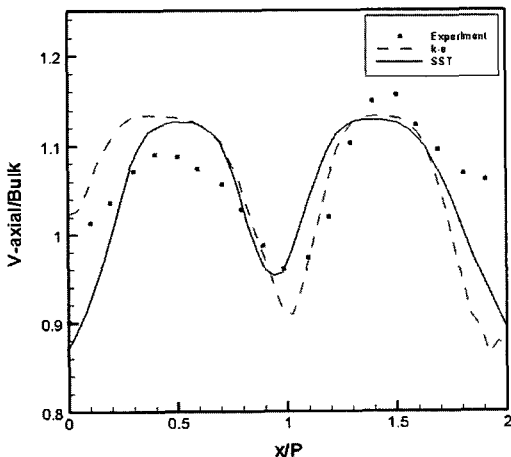


Fig. 5 Comparison of turbulence models

mm 인 위치이다. 비교결과 두 모델은 정성적으로 유사한 결과를 보여주고 있으나, ' SST ' 모델의 해석 결과가 ' $k-\epsilon$ ' 모델의 결과에 비해 실험값에 더 접근하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 혼합날개 유동 해석을 위한 난류모델로 ' SST ' 모델을 결정하였다.

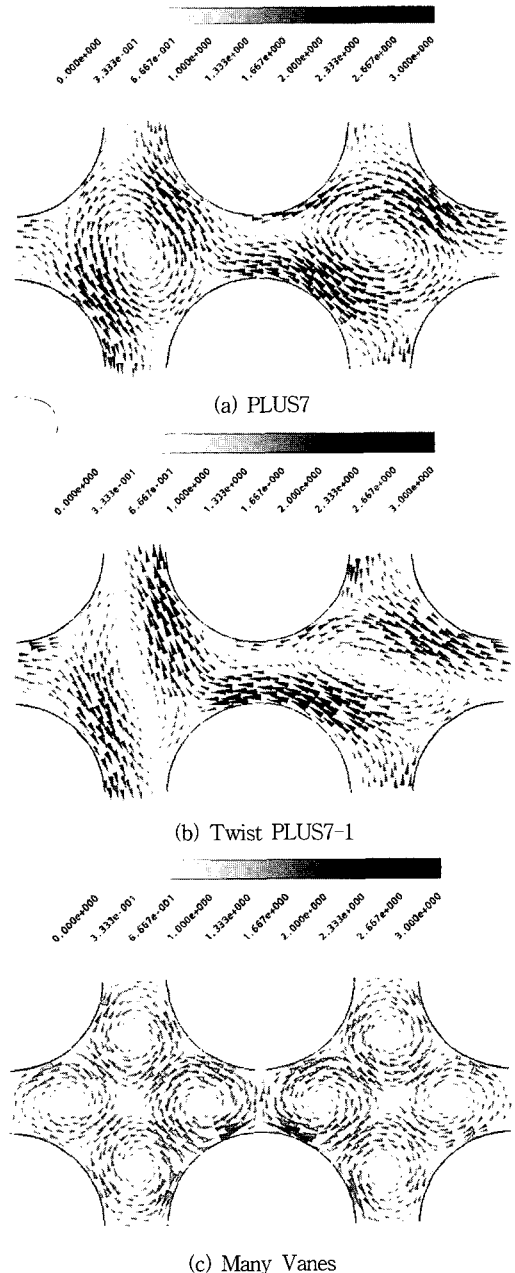


Fig. 6 Velocity Fields at Z=12mm

3.3 유동구조

Figure 6은 Fig. 1의 최적화된 'PLUS7' 혼합날개 형상과 Fig. 3에 주어진 Twist PLUS7-1 및 Many Vanes 형상에 대한 혼합날개 상류 12 mm인 위치에서 단면 내

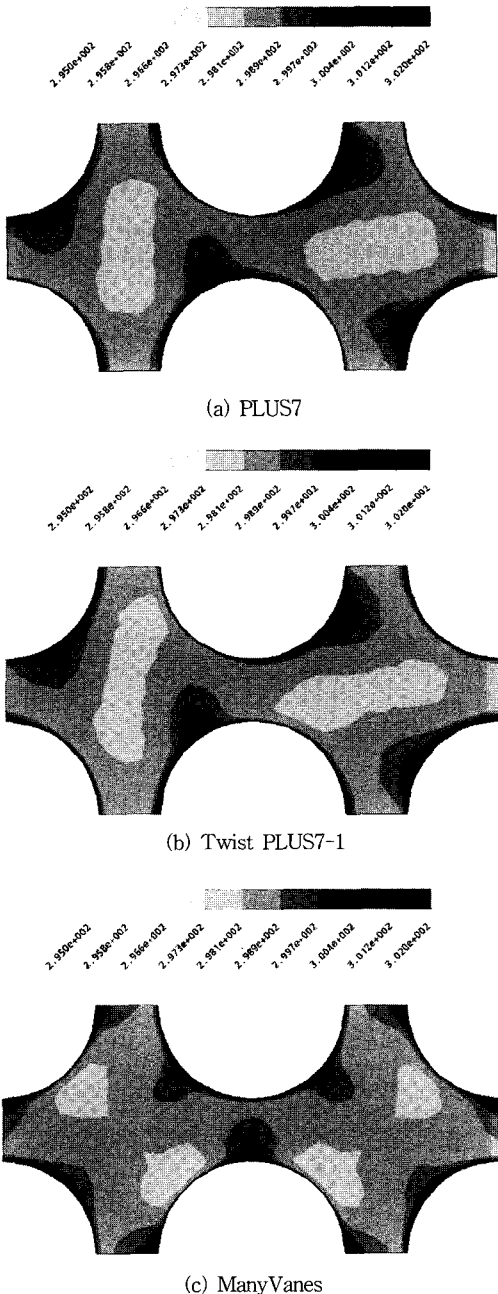


Fig. 7 Temperature Fields at Z=12mm

속도장을 보여준다. Fig. 6(a)는 굽힘각과 밀변을 변수로 하여 최적 설계된 'PLUS7' 혼합날개이다. 이 경우 부수로 중심에서 비교적 진원에 가까운 순환유동이 나타난다. 이에 반해, Fig. 6(b)에 나타난 'Twist PLUS7-1' 혼합날개는 타원형태의 유동구조를 가진다. Fig. 6(c)에 나타난 'Multi Vanes' 혼합날개의 경우 부수로 내에 네 개의 원형 유동이 나타나는데, 최대 속도는 'PLUS7'이나 'Twist PLUS7-1'에 비해 상당히 작은 수준이다.

3.4 온도장 및 열전달

Figure 7은 혼합날개 상류 12mm에서의 온도장이다. Figs. 7(a)와 (b)는 Fig. 6에 나타난 속도장과 유사한 형태의 온도장을 보여주고 있으며, Fig. 7(c)에서는 다른 경우와 달리 저온 구역이 둘로 분리되어 나타나고 있음을 알 수 있다.

Figure 8에서는 혼합날개 상류 60mm부터 하류 408mm까지의 영역에서 혼합날개로 인한 평균 열전달계수의 변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 간략히 표현한

Nu/Nu_0 은 $\frac{1}{L} \int_0^L \frac{\overline{Nu}}{Nu_0}$ 을 나타내며, L은 연료봉 표면의 둘레길이이고, D_h 는 지지격자의 수력직경으로 약 12mm이다. Fig. 8에서 전반적으로 가장 높은 열전달을 가져오는 형상은 'PLUS7'이다. 그러나, 주목할 것은 다른 혼합날개의 경우 열전달율이 혼합날개 하류에서 급격히 감소하는 반면 비틀림각이 주어진 'Twist PLUS7-1' 혼합날개의 경우 하류에서의 열전달율의 감쇠가 더디게 이루어져 z/D_h 가 약 20 보다 큰 하류에서 'PLUS7' 보다 큰 열전달율을 보임을 알 수 있다. "Multi-Vanes"은 혼

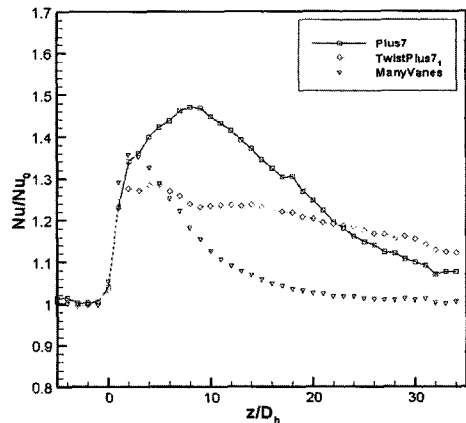


Fig. 8 Comparisons of Nusselt number distributions

합날개 바로 하류에서는 상대적으로 큰 열전달율을 나타내고 있으나, 그 후 급격히 감소하여 전반적으로 낮은 열전달율을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원자로 연료봉다발내 지지격자 혼합날개에 의한 난류열전달 특성을 해석하여 서로 다른 형상의 혼합날개의 성능을 분석하였다. 해석에 필요한 최적의 난류모델을 선정하기 위해 실험데이터가 존재하는 'Split' 혼합날개에 대해 'SST' 모델과 ' $k-\epsilon$ ' 모델의 성능을 비교한 결과, 'SST' 모델의 해석 결과가 ' $k-\epsilon$ ' 모델의 결과에 비해 다소 우수하게 나타났다. 기준형상인 최적화된 'PLUS7' 혼합날개와 여기에 비틀림각을 부여한 혼합날개, 그리고 유로막힘률을 변화시키지 않은 채널개의 개수를 네 배로 증가시킨 혼합날개 등 세가지 형상의 혼합날개를 시험하였다. 해석결과 전반적으로 가장 열전달율이 높은 형상은 'PLUS7'이었으나, 비틀림각을 준 혼합날개의 경우 유동이 축방향으로 진행함에 따라 열전달율의 감소가 더디게 이루어져 z/D_h 가 약 20보다 큰 하류에서는 국부적으로 가장 큰 열전달율을 보임을 알 수 있었다. 날개수를 네 배로 늘린 혼합날개는 혼합날개 하류에서는 열전달율이 급격히 감소하여 전반적으로 낮은 열전달율을 보였다.

후 기

본 연구는 한국전력 전력산업연구개발사업 (주관기관: 한전원자력연료주식회사)의 지원으로 수행되었음을 밝히고 이에 감사드린다.

참고문헌

- (1) 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, pp. 3153~3174.
- (2) 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. 514~552.
- (3) 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, pp. 3~14.
- (4) Kim, Y. H., Kim, K. T., 2002, "Advanced Spacer Grid Design for the PLUS7 Fuel Assembly," Third Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS3), Kyeongju, pp. 493~499.
- (5) Kwang-Yong Kim and Jun-Woo Seo, 2005 "Numerical Optimization for The Design of A Spacer Grid with Mixing Vanes in A Pressurized Water Reactor Fuel Assembly," Nuclear Technology, Vol. 149, No. 1, pp. 62~70.
- (6) CFX-10.0 Solver Theory, Ansys Inc., 2006.