

# 핵연료 봉다발내 비틀린 혼합날개의 형상최적설계

정상호\* · 김광용\*\*†

## Shape Optimization of A Twist Mixing Vane in Nuclear Fuel Assembly

Sang-Ho Jung\*, Kwang-Yong Kim\*\*†

Key Words : Shape Optimization(형상최적화), Mixing Vane(혼합날개), Spacer Grid(지지격자), Nuclear Reactor(원자로), Fuel Assembly(연료봉다발), Response Surface Method(반응면 기법)

### ABSTRACT

The purposes of present work are to analyze the convective heat transfer with three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis, and to optimize shape of the mixing vane using the analysis results. Response surface method is employed as an optimization technique. The objective function is defined as a combination of inverse of heat transfer rate and friction loss. Two bend angles of mixing vane are selected as design variables. Thermal-hydraulic performances have been discussed and optimum shape has been obtained as a function of weighting factor in the objective function. The results show that the optimized geometry improves the heat transfer performance far downstream of the mixing vane.

### 1. 서론

가압 경수형 원자로의 핵연료 집합체는 핵연료봉, 상단과 하단의 고정체, 그리고 지지격자로 구성된다. 그 중 지지격자는 연료봉의 구조적 형태를 유지하고 외부 충격을 견디며, 유동에 의한 진동을 억제하는 기본적인 역할 이외에 임계열유속(CHF, Critical Heat Flux)을 향상시키는 역할을 하고 있다. 임계열유속이란 연료봉 표면의 열유속이 증가할 때, 특정조건에 도달하면 연료봉 표면과 냉각수 간의 열전달이 급격히 감소하여 연료봉 표면 온도가 급격히 올라가는 현상이다. 원자로 내에서 임계열유속의 발생은 핵연료봉 재료의 용융점까지 표면온도의 상승을 가져와 연료봉 파손까지 이를 수 있다. 따라서 정상 운전조건에서 임계열유속까지의 열적여유를 충분히 갖게 하여 임계열유속의 발생을 억제하여야 한다. 이를 위해 지지격자의 하류 측 끝단에 혼합날개를 부착하는데, 이 혼합날개는 원자로 부수로 내 유동의 강제 혼합을 통해 선회류와 횡

류를 유발시키고 난류생성을 촉진하여 대류열전달을 증진시키는 역할을 수행한다.

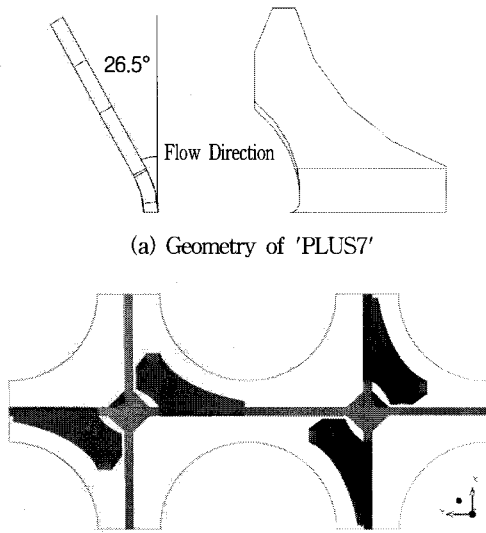
혼합날개의 성능은 날개의 기하학적 형상에 의해 결정된다. 그러나 임계열유속 성능을 평가하기 위해서는 고온, 고압 조건에서 실험이 수행되어야 하므로 많은 시간과 비용을 요한다. 그러므로 설계과정에서 혼합날개의 성능을 다양하게 시험하기 위해서는 전산유체역학(CFD)적 유동해석 방법이 선행되는 것이 경제적이고 유용하다.

Karoutas 등<sup>[1]</sup>은 혼합날개가 부착된 핵연료다발 내 난류유동의 구조를 실험과 수치해석을 통해 분석하였고, Imaizumi 등<sup>[2]</sup>은 혼합날개에 의한 삼차원 유동 특성을 평가하기 위한 유동해석 방법을 제시하였다. In 등<sup>[3]</sup>은 수치해석을 통해 몇 가지 혼합날개에 대해 최적 굽힘각을 제시하였으며, In 등<sup>[4]</sup>은 비틀림 혼합날개를 제안하며, 'SPLIT' 혼합날개와 비틀림 혼합날개의 각도에 따른 유동 혼합물과 압력강하를 비교분석하였다. Cui와 Kim<sup>[5]</sup>은 혼합날개의 비틀림각이 열전달에 미치는 영향을 수치해석 하였다. Kim과 Kim<sup>[6]</sup>, Kim과 Seo<sup>[7]</sup>는 'PLUS' 혼합날개의 형상 최적화를 연구하였다. 안정수와 최영돈<sup>[8]</sup>은 대형 이차 외류 혼합날개의 열전달 능력을 수치해석 하였으며,

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학부

† 교신저자, E-mail: kykim@inha.ac.kr



(a) Geometry of 'PLUS7'  
 (b) Computational domain (flow direction is +z direction)  
 Fig. 1 Geometry and computational domain of 'PLUS7' mixing vane

신창완 외 4명<sup>[9]</sup>과 Lee와 Choi<sup>[10]</sup>는 각각 실험과 수치해석을 통해 단순지지격자, 복합날개와 분리날개 지지격자에 대해서 비교분석하였다. Nematollahi와 Nazifi<sup>[11]</sup>은 5가지의 2-D 혼합날개와 4가지의 3-D 혼합날개에 대해 비교분석하였다.

이상과 같이 새로운 혼합날개를 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는데 반해, 형상 최적화에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 최근 국내에서는 Kim과 Kim<sup>[6]</sup>이 보고한 바와 같이 한전원자력연료(주)와 Westinghouse사가 공동연구하여 'PLUS7' 혼합날개를 개발한 바가 있다. 본 연구에서는 한전원자력연료(주)가 제공한 'PLUS7'의 형상을 기준형상으로 하고, 삼차원 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) 해석을 이용한 수치실험을 기반으로 수리통계적 최적화 기법을 이용하여 혼합날개의 형상을 최적화하였다.

Table 1 Boundary condition

Boundary		Value
Fuelrod	Heatflux	0.188251 [Mbtu/hr-ft <sup>2</sup> ]
Inlet	Velocity	16.4 [ft/sec]
Inlet	Pressure	2250 [psi]
Inlet	Temperature	620 [°F]

## 2. 유동해석방법

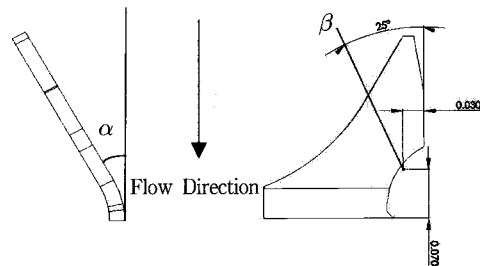
본 연구에서는 삼차원 RANS 방정식의 수치계산을 통해 원자로 붐다발 부수로내 지지격자 혼합날개 주위의 정상상태 비

압축성 난류유동 및 열전달 현상을 해석하기 위해 유한체적법을 사용한 이산화방법과 비정규격자계를 채택하는 상용 전산유체역학 코드인 ANSYS CFX-11.0<sup>[12]</sup>을 사용하였다.

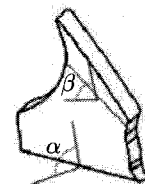
수치최적설계의 기준형상이 되는 'PLUS7' 혼합날개 형상과 계산영역은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 유동은 Fig. 1(b)를 기준으로 볼 때 +z축 방향으로 유입된다. 혼합날개는 지지격자의 상단, 즉 유동 방향 하류 측에 부착되어 있으며, 계산영역은 혼합날개 배열에 따른 유동 현상을 고려해 주기경계조건 (periodic boundary condition)을 사용하여 전체 유동장 중 1행 2열을 구성하는 지지격자에 대해서만 계산을 수행하였다.

혼합날개의 굽힘 각도는 26.5°, 밀변길이는 0.188 inch, 그리고 혼합날개와 지지격자의 두께는 0.018 inch 이다. 봉의 직경은 0.374 inch 이고 봉과 봉 중심 사이의 거리는 0.506 inch, 지지격자의 높이는 1.62 inch 이다. 전체 계산영역의 길이는 지지격자 상류 1 inch를 포함하여 유동 방향으로 15.7 inch 이다. 작동유체는 Table 1에 나타난 바와 같이 고온 고압의 물이며, 표에 나타난 유동조건은 실제 원자로 내에서 구동되는 것과 같은 조건이다.

경계조건으로 혼합날개와 지지격자의 표면에는 단열조건을 주었으며, 연료봉 벽면에는 일정 열유속 조건을 주었다. 부수로 내의 유동현상 해석에는 'k-ε' 난류모델과 'k-ω' 난류모델의 장점을 결합하여 유동의 박리와 재순환유동을 해석함에 있어 정확성이 뛰어난 'SST' 난류모델<sup>[13]</sup>을 사용하였다.



(a) 2-D view of design variables



(b) 3-D view of design variables

Fig. 2 Design variables of 'TWIST' mixing vane

### 3. 최적설계기법

#### 3.1 반응면기법

반응면기법은 실제 반응함수를 근사적인 다항 함수로 모델링하기 위해 물리적 또는 수치적인 실험으로 얻어진 결과들을 이용하는 일련의 수리통계적 기법이다.<sup>[14]</sup> 원래는 물리적 실험을 통해 관찰된 값들로부터 단지 경험적인 관계식을 만들기 위해 이용되었지만, 한정된 수의 실험만으로도 임의의 공간 내의 반응을 모델링함으로써 실험의 시행횟수를 줄일 수 있다는 특징이 방대한 해석을 필요로 하는 최적설계에 적용되면서 효율적인 방법으로 인정되어 널리 이용되기 시작했다.

반응면을 구성하는 반응면 함수는 일반적으로 다항식의 형태를 갖고 있으며, 각 항의 미지상수는 회귀분석(regression analysis)을 통하여 구하게 된다. 본 연구에서는 이차 다항식으로 반응면 모델을 형성하였다. 이 경우  $n$ 을 설계변수의 수라고 하면, 다항식 계수의 개수는  $(n+1)(n+2)/2$ 이다. 일반적으로 다항식의 계수는 실험 데이터로부터 최소자승법을 사용하여 결정한다. 주어진 설계공간 상에서 반응면을 구성하는데 필요한 정보를 얻기 위해 정해진 실험점을 대상으로 수치실험이 수행되어야 한다. 이 수치실험을 위해 본 연구에서는 상용코드인 CFX 11.0<sup>[12]</sup>을 사용하여 삼차원 RANS 해석을 사용하였다.

Table 2 Dimensionless design variables range

$\alpha \backslash \beta$		$\beta$		
		10°	15°	20°
$\alpha$	25°	(-1, -1)	(-1, 0)	(-1, 1)
	20°	(0, -1)	(0, 0)	(0, 1)
	33°	(1, -1)	(1, 0)	(1, 1)

#### 3.2 설계변수 및 목적함수

수치최적설계를 하기 위해서는 설계변수와 목적함수를 선정한 후, 반응면기법과 같은 최적설계 기법을 사용하여 최적화된 설계변수의 값을 찾아야 한다. 혼합날개의 형상은 제작상의 한계로 인해 자유로운 형상변경이 곤란하다. 본 연구에서는 한전 원자력연료주식회사에서 제시한 'TWIST' 혼합날개의 아랫부분 굽힘각( $\alpha$ )과 윗부분 굽힘각( $\beta$ )을 설계변수로 선택하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이  $\alpha$ 각도는 기준형상인 'PLUS7'의 굽힘각 위치와 같은 지지격자와 혼합날개가 접하는 면에서의 굽힘각이며,  $\beta$ 각도는 특정한 위치에서 25° 방향으로 그린 선과 접하는 면에서의 굽힘각이다. 혼합날개의 끝단이 외부 충격이

나 원자로 노심 내를 흐르는 냉각수에 의하여 핵연료봉 표면과 접촉하는 것을 방지하기 위하여 최소 0.03 inch 이상의 간극을 유지하도록 하였다. 이를 통하여 설계 범위를 정하였으며, Table 2와 같이 무차원화 하였다.

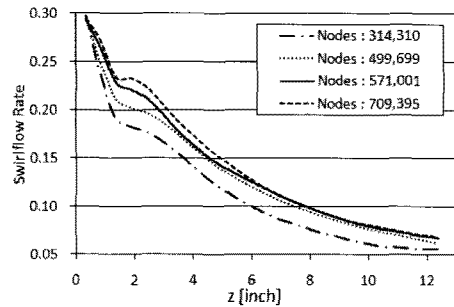
목적함수는 열전달과 압력강하를 동시에 고려하기 위해 다음과 같이 정의하였으며, 목적함수의 값이 최소가 되는 점이 최적설계점이 되도록 하였다.

$$F_{object} = 1/F_N + \omega F_f \quad (1)$$

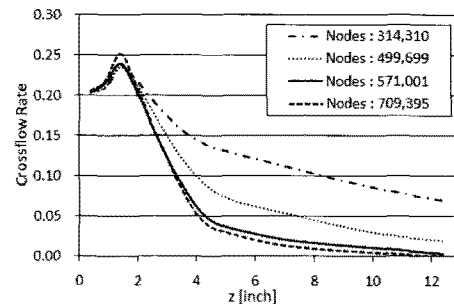
$$F_N = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{Nu}{Nu_R} dl = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{(T_{WR} - T_{\infty R})}{(T_W - T_{\infty})} dl \quad (2)$$

$$F_f = \frac{1}{L} \int_0^L \left( \frac{f}{f_R} \right)^{\frac{1}{3}} dl = \frac{1}{L} \int_0^L \left( \frac{-dp^*}{dz} \right)^{\frac{1}{3}} dl \quad (3)$$

위 식에서  $f$ 와  $Nu$ 는 각각 마찰계수와 국부 누셀트수를 나타내고, 하첨자  $R$ 은 지지격자에 'PLUS7' 혼합날개가 부착되어 있는 상태를 나타낸다. 벽면온도( $T_W$ )와 냉각수 온도( $T_{\infty}$ )의 차이와 국부 누셀트수는 연료봉 표면에 따라 평균된 값을 사용하였다.  $L$ 은 축방향 전체길이이며,  $l$ 은 축방향 위치를 나타낸다.  $\omega$ 는 설계자의 의도에 따라 조절이 가능한 가중계수이다.



(a) Swirlflow rate



(b) Crossflow rate

Fig. 3 Results of grid dependency test

### 4. 결과 및 검토

우선 수치실험에 앞서 최적의 격자수를 찾기 위하여 'PLUS7' 혼합날개에서 선회계수와 횡류계수<sup>14</sup>를 기준으로 하여 격자테스트를 시행하였다. 선회계수와 횡류계수는 부수로 내의 열전달과 압력강하에 가장 큰 영향을 미치는 요소라고 Karoutas 등<sup>14</sup>의 연구를 포함한 많은 연구들에 의해 밝혀진 바 있으며, Fig. 3에서 'z=0'은 혼합날개와 지지격자가 교차하는 단면을 나타내고 z는 주유동방향의 좌표이다. 격자테스트를 위해 약 31만개부터 약 71만개의 다양한 격자수를 지닌 격자에 대하여 계산을 수행한 결과 Fig. 3을 얻었다. 격자가 늘어갈수록 58만개의 격자를 사용한 결과값과 보다 많은 격자를 가진 결과값의 차이가 미비하였다. 이에 따라 최적격자수로 58만개를 선택하였다.

반응면기법을 사용한 최적설계를 수행하기 위해 Table 2에 나타난 9가지 형상에 대하여 수치실험을 수행하여 목적함수에 대한 반응면을 구성하였다. 반응면 다항식의 계수는 회귀분석을 통해 얻었으며, Fig. 4와 Table 3에 각각 가중계수가 1.0 일 경우 얻어지는 반응면과 그 값을 표로 정리한 것이다. 기준형상인 'PLUS7' 혼합날개를 기준으로 'TWIST' 혼합날개의 상대적인 목적함수값을 구한 것이므로  $F_N$ ,  $F_f$  값은 각각 1.00 이며  $F_{object}$  값은 2.00 이 된다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 최적점은 타원형 등고선의 내부에 존재하게 되며, 최적 설계 변수  $\alpha, \beta$  는 각각  $30.02^\circ$  와  $19.32^\circ$  이다. 최적점은  $\beta$ 의 상한 근처에 존재하며 최적점을 중심으로 등고선이 비교적 균일한 간

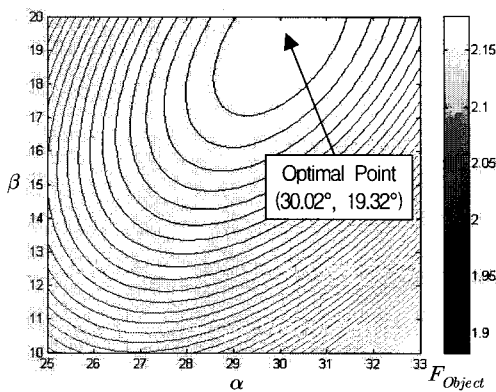


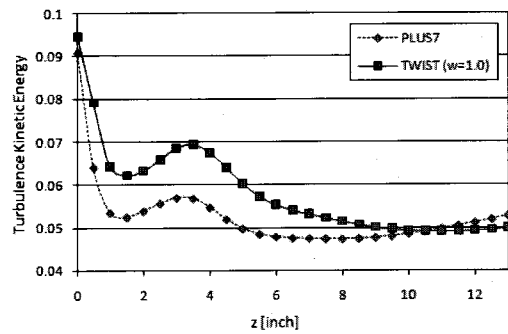
Fig. 4 Response surface ( $\omega = 1.0$ )

Table 3  $F_{Object}$  of optimal 'TWIST' mixing vane ( $\omega = 1.0$ )

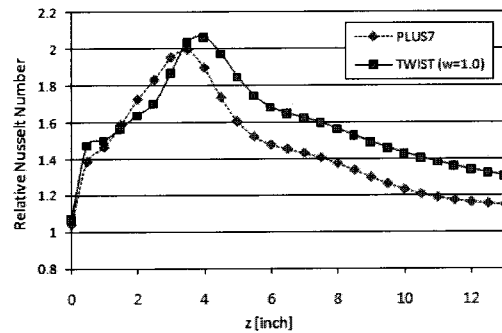
Vane type	$F_{Object}$
PLUS7	2.00
TWIST	1.87

격을 보임으로써 모든 방향으로 목적함수의 구배가 거의 일정한 특성을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 5에 혼합날개가 부착되지 않은 경우를 기준으로 하여 'PLUS7' 혼합날개와 최적설계된 'TWIST' 혼합날개에 대해 각 단면에서의 평균 난류 운동 에너지와 상대 누셀트수를 비교해 보았다. Fig. 5(a)에서 혼합날개의 높이가 1.62 inch이므로 두 경우 공히 혼합날개의 끝 부근에서 난류운동에너지가 최소값을 보이고 다시 상승하여 유동방향 하류 3 inch를 조금 지난 위치에서 최대가 됨을 알 수 있다. 최적설계한 'TWIST' 혼합날개를 장착하였을 경우가 'PLUS7' 혼합날개보다 장착된 경우보다 부수로 내의 전반적인 영역에서 난류 운동 에너지가 증가되었음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5(b)를 통해서 상대 누셀트수의 변화 양상을 비교하였다. 상대 누셀트수는 혼합날개가 장착되어 있지 않은 경우에 대한 상대적인 누셀트수 값이다. 이 그림



(a) Turbulence kinetic Energy

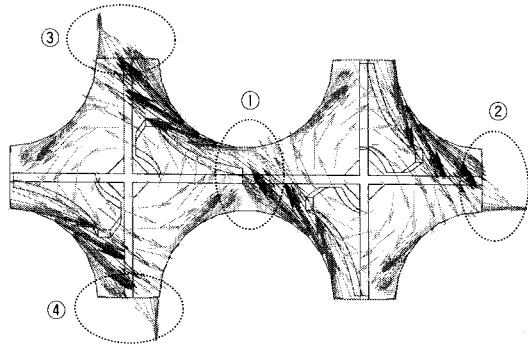


(b) Relative Nusselt number

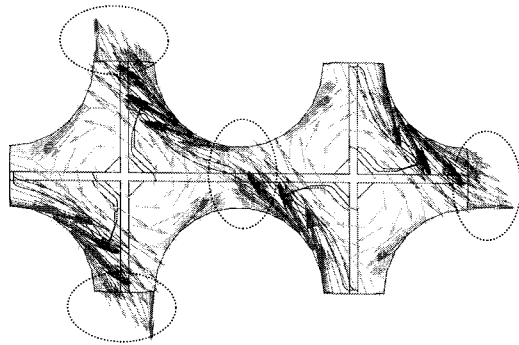
Fig. 5 Comparison between 'PLUS7' and optimized 'TWIST'

Table 4 Results of Optimization

Vane type	Averaged relative Nusselt number	Pressure drop [psi]
No vane	1	1.42
PLUS7	1.4460	1.67
TWIST	1.5785	1.76



(a) Cross section of 'PLUS7' at z=3.48inch



(b) Cross section of 'TWIST' at z=3.98inch

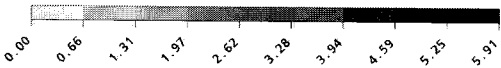
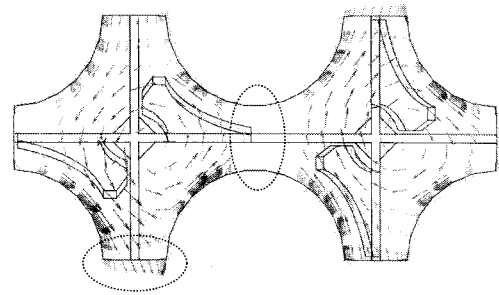


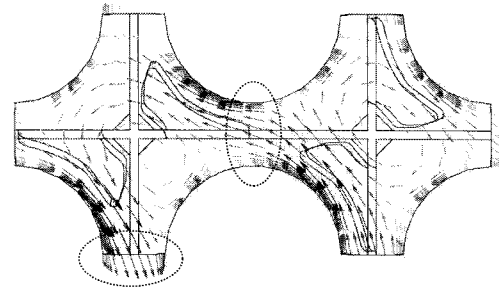
Fig. 6 Velocity vectors for 'PLUS7' and 'TWIST' [ ft/s ]

으로부터 최적설계한 'TWIST'가 유동방향 4inch 이후 하류영역에서 'PLUS7' 보다 향상된 열전달 능력을 가짐을 알 수 있다. 열전달 능력이 향상된 정도와 압력 강하 등을 확인하기 위해서 Table 4에 각 경우에 대한 평균상대 누셀트수와 압력강하 값을 나타냈다. 평균상대 누셀트수는 Fig. 5에 나타난 상대 누셀트수 값을 유동방향으로 평균한 것이다. 여기서 확인할 수 있듯이 'TWIST'는 'PLUS7'에 비해 평균상대 누셀트수는 9.23%가 향상된 반면 압력 강하는 5.39%만 증가하여 최적설계한 'TWIST' 혼합날개의 상대열전달 성능이 향상되었음을 확인할 수 있다.

최적설계한 'TWIST' 혼합날개가 기준형상 보다 열 전달 능력을 향상시킨 요인을 찾기 위해 Fig. 6에 각각 가장 상대 누셀트수가 가장 큰 단면 ('PLUS7'는 z=3.48 inch, 'TWIST'는 z=3.98 inch)에서의 속도벡터 분포를 확인해 보았다. 두 부수로 중심부분에서의 벡터 분포의 차이는 확연히 구분되지 않으나 눈금으로 표시한 부분을 통해 최적설계한 'TWIST' 혼합날개의 경우가 부수로 간의 횡류 (cross-flow)가 보다 활발하여



(a) The cross section of 'PLUS7' at z=12.98inch



(b) The cross section of 'TWIST' at z=12.98inch

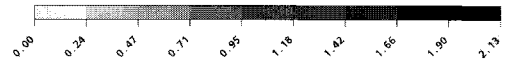


Fig. 7 The velocity vectors of 'PLUS7' and 'TWIST' [ ft/s ]

Table 5 The comparison of mass flow

Cross section	Mass flow of 'PLUS7' [ lb/s ]	Mass flow of 'TWIST' [ lb/s ]
1	0.4296	0.9225
2	0.6275	1.0104
3	0.5825	1.0603
4	0.4473	0.8349

냉각수의 혼합이 더 잘 이루어짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 7에서 알 수 있듯이 유동방향 하류 영역에서도 지속적으로 유지된다. 속도 벡터의 크기가 많이 줄었기 때문에 상류 부분의 속도 벡터 분포와 동일하진 않지만 Fig. 7(b) 경우가 (a)에 비해 부수로 간의 냉각수 혼합이 활발히 이루어짐을 확인할 수 있다. Fig. 6과 7을 통해 확인해 본 부수로 간 냉각수 혼합의 차이는 전체 계산 영역에 걸친 유량의 차이를 통해 정량적으로도 확인할 수 있다. Fig. 6(a)의 그림에 나타난 각 번호의 위치에서 유동방향 전 계산영역에 걸친 단면-예를 들어 1번 단면 같은 경우는 y=0.506 inch에서의 xz평면-에서 부수로 사이에 이동하는 횡류의 질량유량을 계산하여 Table 5에 나타내었다. Table 5를 통해 최적설계한 'TWIST' 혼합날개의 경우에 1-4번 모든 단면에서 기준형상에 비해 질량유량

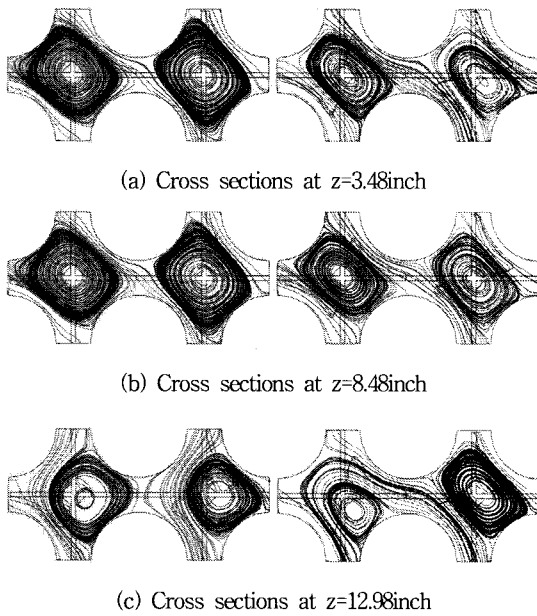


Fig. 8 Streamlines for 'PLUS7'(left) and 'TWIST'(right)

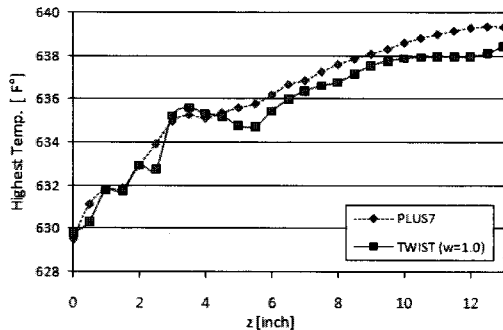


Fig. 9 Maximum temperatures on the fuel surface

이 크게 나타났다. 최적설계한 형상이 기준형상에 비해 부수로 간 유동혼합이 더 활발히 이루어지는 이유는 유선을 통해 명확히 파악할 수 있다. Fig. 8은 유동방향의 단면들에서 유선이 어떻게 변화되어 가는지를 나타내었다. 기준형상인 'PLUS7' 혼합날개는 부수로 중심부분에 유선이 집중되어 있다. 이는 유동하류 방향으로 갈수록 더욱 심화되어 Fig. 8(c)의 'PLUS7' 혼합날개의 경우에는 부수로 간의 경계를 통과하는 유선이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

임계열유속의 발생은 연료봉 표면 온도와 관련이 있으므로, 연료봉 표면의 최고 온도를 Fig. 9에 나타내어 확인하였다. 유동방향 하류 4 inch까지는 두 혼합날개가 비슷한 온도를 가지지만 4 inch 하류 영역에서는 최적설계한 'TWIST' 혼합날개가 더 낮은 최고 온도를 보임으로써 'PLUS7' 혼합날개에 비해 임

계 열유속까지 보다 큰 열적인 여유를 가진다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 삼차원 열유동해석과 반응면기법을 사용하여 원자로 내의 지지격자 상단에 부착되는 혼합날개의 형상을 최적설계 하였다. 기준형상은 기존의 'PLUS7' 혼합날개이며, 최적설계를 수행한 형상은 두 굽힘각도를 가진 'TWIST' 혼합날개이다. 목적함수에서 열전달 계수와 마찰계수를 모두 고려하였으며, 두 가지 굽힘각도를 설계변수로 택하였다. 반응면기법을 통해 최적설계한 'TWIST' 혼합날개는 각각 30.02°, 19.32°의 각도를 가진 형상이다. 최적설계한 'TWIST' 혼합날개는 기준형상에 비해 압력 강하가 5.39% 증가하였으나, 상대 누설수는 9.23% 향상되어 열전달 능력이 향상되었다. 열전달 능력이 향상된 이유가 최적화된 혼합날개의 경우 부수로 간의 횡류 질량유량이 기준형상의 경우에 비해 눈에 띄게 향상되었기 때문임을 확인할 수 있었다. 최적화된 혼합날개의 경우 연료봉 표면의 최고온도도 기준형상보다 낮은 값을 가짐으로써 임계 열유속까지의 열적여유가 향상되었다.

## 후 기

본 연구는 연구비의 일부를 2005 전력산업연구개발사업 (주관기관: 한전원자력연료주식회사)으로부터 지원받았음을 밝힌다. 혼합날개의 모형을 제공해 준 한전원자력연료주식회사 연구진에게 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) 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.
- (3) 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.
- (4) In, W. K., Oh, D. S. and Chun, T. H., 2001, "Flow

- analysis for optimum-design of mixing vane in a PWR fuel assembly, J. of KNS, Vol. 33, No. 3, pp. 327~338.
- (5) Cui, X. Z. and Kim, K. Y., 2002, "Three-Dimensional Analysis of Turbulent Heat Transfer and Flow Through Mixing Vane in A Subchannel of Nuclear Reactor," Journal of Nuclear Science and Technology," Vol. 40, No. 10, Oct. 2003, pp. 719~724.
- (6) Kim, Y. H. and 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.
- (7) 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.
- (8) 안정수, 최영돈, 2006, "핵연료 집합체에서의 대형 이차 와류 혼합날개의 난류생성 특성에 관한 연구," 설비공학논문집, 제 18권, 제 10호, pp. 811~818.
- (9) 신창환, 추연준, 문상기, 천세영, 전대현, 2007, "핵연료집합체 지지격자의 혼합날개 형상이 임계열유속에 미치는 영향," 대한기계학회 2007년 춘계학술대회 논문집, pp. 3049~3054.
- (10) Lee, C. M. and Choi, Y. D., 2007, "Comparison of thermo-hydraulic performances of large scale vortex flow (LSVF) and small scale vortex flow (SSVF) mixing vanes in 17x17 nuclear rod bundle," Nuclear engineering and design, Vol. 237, No. 24, pp. 2322~2331.
- (11) Nematollahi, M. R. and Nazifi, M., 2008, "Enhancement of heat transfer in a typical pressurized water reactor by different mixing vanes on spacer grids," Energy conversion and management, Vol. 49, No. 7, pp. 1981~1988.
- (12) CFX-11.0 Solver Theory, Ansys inc., 2006.
- (13) W. Liou, William, George Huang and Tsan-Hsing Shih, 2000, "Turbulence model assessment for shock wave/turbulent boundary-layer interaction in transonic and supersonic flows," Computers & Fluids, Vol. 29, pp. 275~299.
- (14) Shyy, W., Papila, N., Vaidyanathan, R, and Tucker, K., 2001, "Progress in Aerospace Science," Vol. 37, pp. 59~118.