

핵연료 봉다발내 Y 혼합날개의 형상최적설계

정 상 호¹ 김 광 용,² 김 강 훈,³ 박 성 규³

SHAPE OPTIMIZATION OF A Y-MIXING VANE IN NUCLEAR FUEL ASSEMBLY

S.H. Jung,¹ K.Y. Kim,^{*2} K.H. Kim³ and S.K. Park³

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 taken tolerance into consideration by using the analysis results. Response surface method is employed as an optimization technique. The objective function is defined as a combination of heat transfer rate and inverse of pressure drop. 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.

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

1. 서 론

가압 경수형 원자로 내 핵연료 집합체 중 지지격자는 연료 봉의 구조적 형태를 유지하기 위해서 유동 방향으로 일정 간격으로 설치된다. 지지격자의 상단에 부착되어 있는 혼합날개는 원자로 부수로 내 유동의 강제 혼합을 통해 선회류와 횡류를 유발시키고 연료봉과 냉각수간의 열전달을 증진시켜서 연료봉 표면의 국부적인 과열 현상을 방지한다. 연료봉 표면 온도가 과열되는 현상인 임계열유속 발생은 핵연료봉 재료의 용융점까지 표면온도의 상승을 가져와 연료봉 파손까지 이를 수 있다. 따라서 정상 운전조건에서 임계열유속까지의 열적 여유를 충분히 갖게 하여 임계열유속의 발생을 억제해야 한다. 따라서 이를 억제할 수 있는 적절한 혼합날개의 설계는 원자로의 안전성을 확보하기 위해서 필수조건이다.

연료봉의 기하학적 형상과 열발생률이 동일한 조건이라면

부수로 내의 열전달 성능은 혼합날개에 의해 좌우되며, 혼합날개에 의한 열전달 성능은 날개의 기하학적 형상에 의해 결정된다. 그러나 임계열유속 실험은 고온, 고압 조건에서 실험되어야 하므로 많은 시간과 비용을 요하게 되어 설계과정에서 혼합날개의 성능을 다양하게 시험하기 위해서 전산유체역학(CFD)적 유동해석 방법은 이미 널리 사용되고 있다.

Shen 등[1]은 혼합날개 밑변의 굽힘 각도를 설계변수로 가지는 'SPLIT' 혼합날개가 25°에서 가장 좋은 혼합률을 가지는 것을 관찰하였으며, Karoutas 등[2]은 'SPILT' 혼합날개가 부착된 원자로 내의 선회계수를 실험과 수치해석을 통해 분석하였다. In 등[3]은 비틀림 혼합날개를 제안하고, 각도에 따른 유동혼합률과 압력강하를 'SPLIT' 혼합날개와 비교분석하였다. Cui와 Kim[4]은 혼합날개의 비틀림각이 열전달에 미치는 영향을 수치해석 하였다. Kim과 Kim[5], Kim과 Seo[6]는 한전 원자력연료(주)와 Westinghouse사가 공동 개발한 'PLUS7' 혼합날개의 형상 최적화를 연구하였다. 이 두 형상 이외에 다양한 형상의 혼합날개의 수치해석과 실험을 통한 개괄적인 연구가 In 등[7], 신창환 등[8], Lee와 Choi[9], 그리고 Nematollahi와 Nazifi[10]에 의해 진행되었다. 또한 안정수와 최영돈[11]은 대형 이차 와류를 발생시키는 혼합날개의 열전달 능력을 수치해석 하였다.

위와 같이 새로운 혼합날개 개발과 형상 최적화에 대한 연

접수일: 2008년 12월 19일, 수정일: 2009년 6월 12일,

게재확정일: 2009년 6월 19일.

1 학생회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 인하대학교 기계공학과

3 한전원자력연료(주), 선임연구원

* Corresponding author, E-mail: kykim@inha.ac.kr

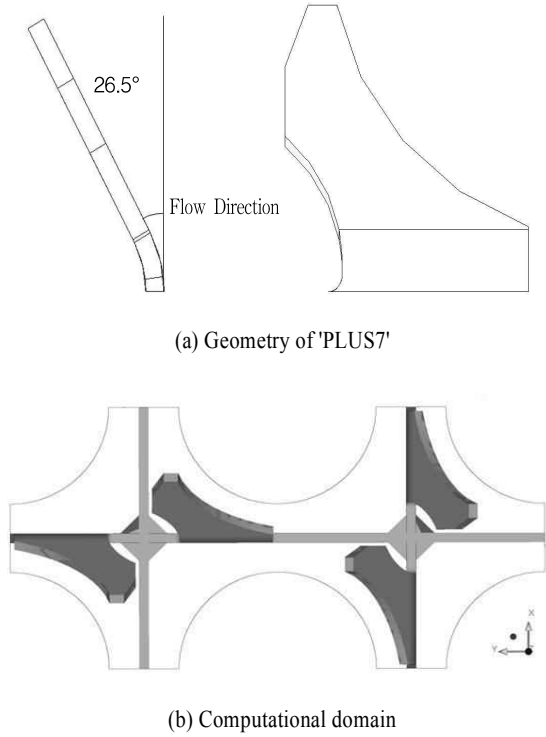


Fig. 1 Geometry and computational domain of 'PLUS7' mixing vane

구들이 진행되고 있으나 제조 시 발생하는 공차를 고려한 연구는 이루어지지 않고 있다. 최근 국내 대부분 원자로에 한전 원자력연료(주)와 Westinghouse사가 공동 개발한 'PLUS7' 혼합 날개가 부착되어 있다. 본 연구에서는 한전원자력연료(주)가 제공한 'PLUS7' 혼합날개의 형상을 기준형상으로 하고, 삼차원 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) 해석을 이용한 수치실험을 기반으로 수리통계적 최적화 기법을 이용하였다. 한전원자력연료(주)에서 'PLUS7' 혼합날개 차후 후보 모델로써 'Y1029' 혼합날개를 제안하였으며, 그 목적은 'PLUS7' 혼합날개와 동등한 열전달능력을 가지면서 에너지 소비를 줄이는 즉, 보다 적은 압력강하를 갖는 것이다. 따라서 본 연구에서는 한전원자력연료(주)의 요구조건에 맞는 최적설계를 수행하였으며, 이를 수행함에 있어 실제 지지격자 제조 시에 발생하는 공차를 고려하였다.

2. 유동해석방법

본 연구에서는 삼차원 RANS 방정식의 수치계산을 통해 원자로 봉다발 부수로내 지지격자 혼합날개 주위의 정상상태 비압축성 난류유동 및 열전달 현상을 해석하기 위해 유한체

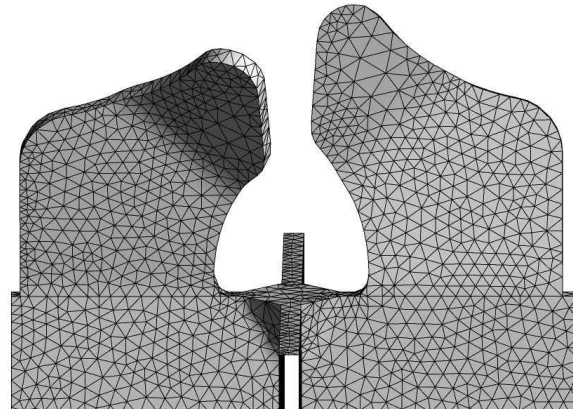


Fig. 2 Example grids

적법을 사용한 이산화방법과 비정규격자계를 채택하는 상용 전산유체역학 코드인 ANSYS CFX-11.0[12]을 사용하였다.

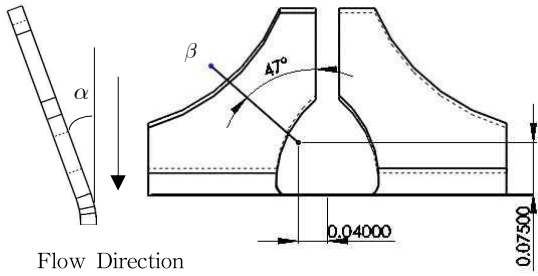
수치최적설계의 기준형상이 되는 'PLUS7' 혼합날개 형상과 계산영역은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 혼합날개는 지지격자의 상단, 즉 유동 방향 하류 측에 부착되어 있으며, 계산영역은 혼합날개 배열에 따른 유동 현상을 고려해 주기경계조건(periodic boundary condition)을 사용하여 '1×2영역'에 대하여 계산을 수행하였다.

혼합날개의 굽힘 각도는 26.5°, 밀변길이는 4.7752 mm, 그리고 혼합날개와 지지격자의 두께는 0.4572 mm이다. 봉의 직경은 9.4996 mm이고 봉과 봉 중심 사이의 거리는 12.8524 mm, 지지격자의 높이는 41.148 mm이다. 전체 계산영역의 길이는 지지격자 상류 25.4 mm를 포함하여 유동 방향으로 398.78 mm이다. 작동유체는 Table 1에 나타난 바와 같이 고온 고압의 물이며, 표에 나타난 유동조건은 실제 원자로 내에서 구동되는 것과 같은 조건이며, 혼합날개와 지지격자 표면은 단열조건과 점착(no-slip)조건을 주었으며, 연료봉 표면에는 0.5935 W/m²의 열유속과 점착조건을 주었다.

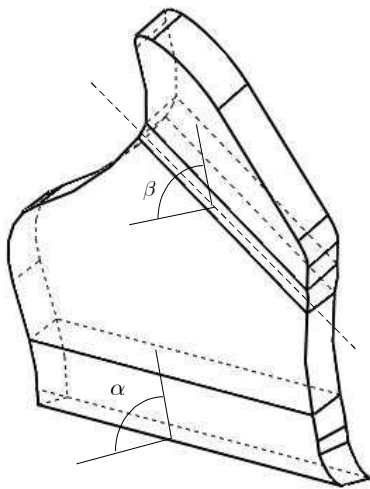
경계조건으로 혼합날개와 지지격자의 표면에는 단열조건을 주었으며, 연료봉 벽면에는 일정 열유속 조건을 주었다. 부수로 내의 유동현상 해석에는 'k-ε' 난류모델과 'k-ω' 난류

Table 1 Boundary conditions

Boundary		Value
Fuelrod	Heatflux	0.5935 [MW/m ²]
Inlet	Velocity	4.9987 [m/sec]
Inlet	Reynolds No.	80,000
Inlet	Temperature	599.82 [K]
Outlet	Pressure	15.513 [MPa]



(a) 2-D view of design variables

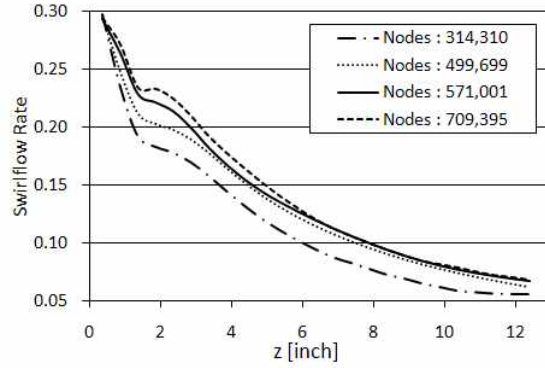


(b) 3-D view of design variables

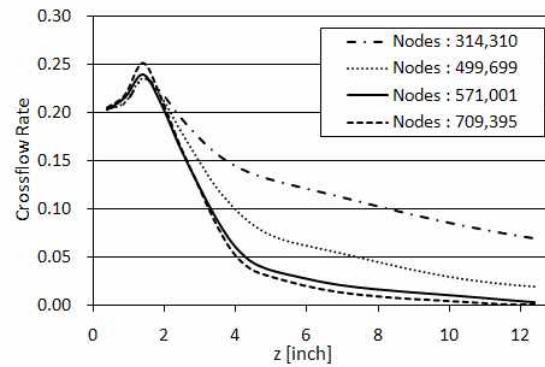
Fig. 3 Design variables of 'Y1029' mixing vane

Table 2 F_N , F_P values of 'Y1029' according to design variables

α	β	F_N	F_P
8°	26°	0.8957	0.9401
8°	29°	0.9380	0.9581
8°	32°	0.9704	0.9640
10°	26°	0.9654	0.9760
10°	29°	1.0131	0.9820
10°	32°	1.0379	1.0000
12°	26°	1.0389	0.9940
12°	29°	1.0661	1.0000
12°	32°	1.0793	1.0240



(a) Swirlflow rate



(b) Crossflow rate

Fig. 4 Results of grid dependency test

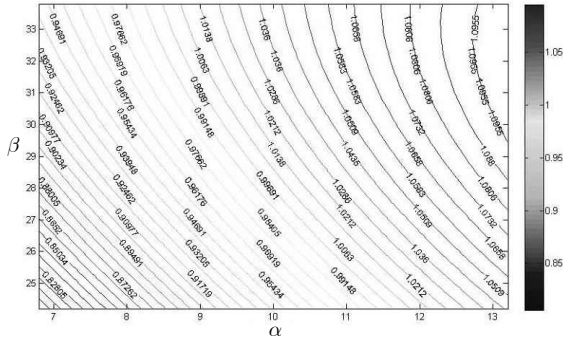
모델의 장점을 결합하여 유동의 박리와 재순환유동을 해석함에 있어 정확성이 뛰어난 'SST' 난류모델[13]을 사용하였다. 수치해를 얻기 위하여 LPS 도식(Linear Profile Skewed Upstream Differencing Scheme)를 사용하였으며, 질량보존방정식의 잉여값(residual)이 10^{-6} 이하가 될 때까지 계산을 수행하였다.

Fig. 2는 계산에 사용된 같이 사면체의 비정렬격자계의 한 예를 보여주고 있다.

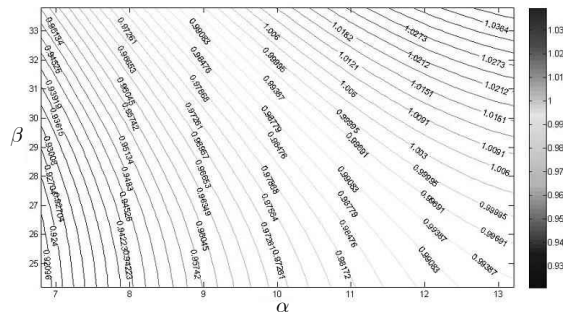
3. 최적설계기법

3.1 반응면기법

반응면기법은 실제 반응함수를 근사적인 다항 함수로 모델링하기 위해 물리적 또는 수치적인 실험으로 얻어진 결과들을 이용하는 일련의 수리통계적 기법이다[14]. 원래는 물리적 실험을 통해 관찰된 값들로부터 단지 경험적인 관계식을 만들기 위해 이용되었지만, 한정된 수의 실험만으로도 임의의 공



(a) F_N



(b) F_P

Fig. 5 The values from RSA

간 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[12]을 사용하여 삼차원 RANS 해석을 사용하였다.

3.2 설계변수 및 목적함수

수치최적설계를 하기 위해서는 설계변수와 목적함수를 선정 후, 반응면기법과 같은 최적설계 기법을 사용하여 최적화된 설계변수의 값을 찾아야 한다. 혼합날개의 형상은 제작상의 한계로 인해 자유로운 형상변경이 곤란하다. 본 연구에서는 한전원자력연료주식회사에서 제시한 ‘Y1029’ 혼합날개의 아랫부분 굽힘각(α)과 윗부분 굽힘각(β)을 설계변수로 선택하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 α 각도는 기준형상인 ‘PLUS7’의 굽힘각 위치와 같은 지지격자와 혼합날개가 접하는 면에서의 굽힘각이며, β 각도는 특정한 위치에서 47° 방향

Table 3 The values taken tolerance into consideration

(a) Averaged F_N

$\alpha \backslash \beta$	27°	28°	29°	30°	31°
8°	0.9065	0.9221	0.9362	0.9477	0.9601
9°	0.9461	0.9609	0.9733	0.9849	0.9940
10°	0.9832	0.9956	1.0080	1.0171	1.0261
11°	1.0163	1.0270	1.0385	1.0451	1.0526
12°	1.0451	1.0550	1.0641	1.0691	1.0748

(b) Averaged F_P

$\alpha \backslash \beta$	27°	28°	29°	30°	31°
8°	0.9453	0.9483	0.9517	0.9561	0.9605
9°	0.9625	0.9652	0.9692	0.9736	0.9787
10°	0.9767	0.9794	0.9841	0.9881	0.9939
11°	0.9878	0.9908	0.9956	1.0000	1.0057
12°	0.9956	0.9996	1.0040	1.0096	1.0148

Table 4 Averaged F_{Object} and F_N / F_P

(a) Averaged F_{Object} values ($W_f = 1.0$)

$\alpha \backslash \beta$	27°	28°	29°	30°	31°
8°	1.9644	1.9767	1.9870	1.9937	2.0013
9°	1.9851	1.9970	2.0051	2.0120	2.0157
10°	2.0071	2.0167	2.0242	2.0291	2.0323
11°	2.0286	2.0362	2.0430	2.0452	2.0469
12°	2.0496	2.0554	2.0601	2.0601	2.0603

(b) Averaged F_N / F_P values

$\alpha \backslash \beta$	27°	28°	29°	30°	31°
8°	0.9590	0.9724	0.9837	0.9913	0.9996
9°	0.9830	0.9956	1.0042	1.0116	1.0156
10°	1.0067	1.0166	1.0243	1.0293	1.0325
11°	1.0288	1.0365	1.0432	1.0452	1.0466
12°	1.0498	1.0554	1.0599	1.0595	1.0592

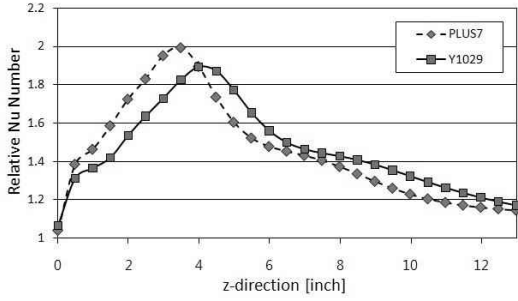


Fig. 6 Relative Nusselt number

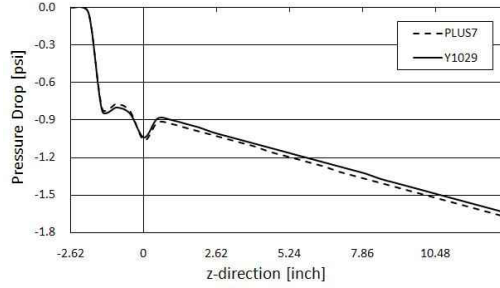


Fig. 8 Pressure drop

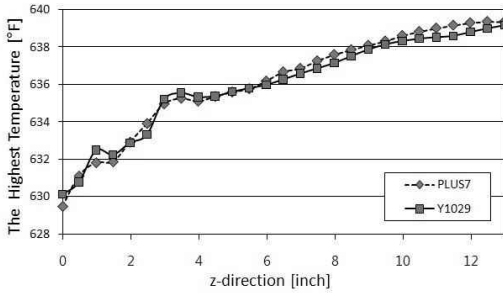


Fig. 7 Maximum temperatures on the fuel surface

으로 그린 선과 접하는 면에서의 굽힘각이다. 혼합날개의 끝단이 외부 충격이나 냉각수에 의하여 핵연료봉 표면과 접촉하는 것을 방지하기 위하여 최소 0.762 mm 이상의 간극을 유지하도록 하였다. 본 연구에서의 목적함수는 다음과 같이 정의된다.

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

$$F_P = \frac{Pressure\ Drop}{Pressure\ Drop_R} = \frac{Outlet_P - Inlet_P}{Outlet_{PR} - Inlet_P} \quad (2)$$

$$F_{object} = F_N + W_f(1/F_P) \quad (3)$$

Table 5. Comparison between data by RSA and calculation data

(a) F_N

$\alpha \backslash \beta$	27°		29°		31°	
	RSA	Cal.	RSA	Cal.	RSA	Cal.
9°	0.9469	0.9376	0.9766	0.9605	0.9989	1.0015
10°	0.9841	0.9678	1.0138	1.0131	1.0286	1.0244
11°	1.0212	1.0140	1.0435	1.0304	1.0583	1.0504

(b) F_P

$\alpha \backslash \beta$	27°		29°		31°	
	RSA	Cal.	RSA	Cal.	RSA	Cal.
9°	0.9635	0.9581	0.9696	0.9701	0.9787	0.9820
10°	0.9756	0.9760	0.9848	0.9820	0.9939	0.9880
11°	0.9878	0.9880	0.9969	0.9940	1.0060	1.0000

(c) The error of design optimized 'Y1029'

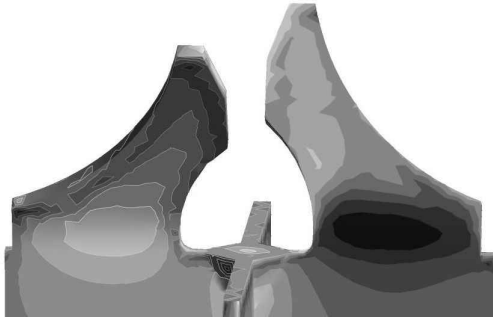
Design optimized 'Y1029'		Error
Averaged F_N (RSA)	1.0080	-
Averaged F_P (RSA)	0.9841	-
Averaged F_N (Cal.)	1.0000	0.7937%
Averaged F_P (Cal.)	0.9820	0.2134%

위 식에서 P 와 Nu 는 각각 특정단면에서의 압력과 국부 Nusselt 수를 나타내고, 하첨자 R 은 지지격자에 'PLUS7' 혼합날개가 부착되어 있는 상태를 나타낸다. 벽면온도(T_W)와 냉각수 온도(T_{∞})의 차이와 국부 Nusselt 수는 연료봉 표면에 따라 평균된 값을 사용하였다. L 은 축 방향 전체길이이며, l 은 축방향 위치를 나타낸다. 목적함수는 열전달과 압력강하를 동시에 고려하기 위해서 식 (3)과 같이 정의하였으며, 목적함수가 최대가 되는 점이 최적설계점이 되도록 하였다. W_f 는 설계자의 의도에 따라 조절이 가능한 가중계수이다.

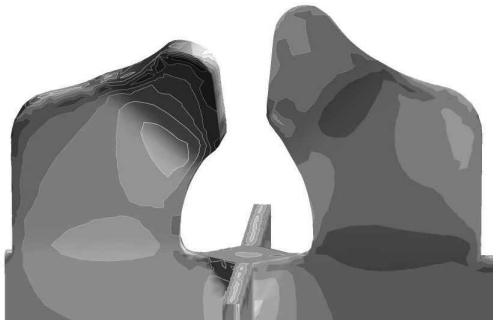
설계 범위 내의 열전달과 압력강하를 평가한 후, 'PLUS7' 혼합날개보다 압력강하가 적은 영역에서의 평가 신뢰도를 높이기 위해서 설계 범위를 재설정하여 Table 2에 나타내었다.

4. 결과 및 검토

우선 수치실험에 앞서 최적의 격자수를 찾기 위하여 'PLUS7' 혼합날개에서 선회계수와 횡류계수[2]를 기준으로 하여 격자의존성 테스트를 시행하였다. 선회계수와 횡류계수의



(a) 'PLUS7' mixing vane



(b) 'Y1029' mixing vane

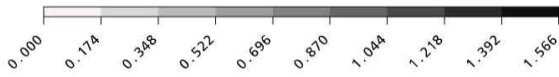


Fig. 9 Shear stress on the mixing vane [psf]

정의는 각각 다음과 같다.

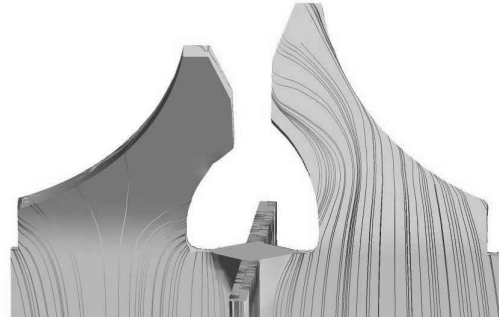
$$S_{rate} = \frac{1}{a} \int \frac{|V_{Swirl}|}{V_{Bulk}} dx \quad (4)$$

$$C_{rate} = \frac{1}{b} \int \frac{|V_{Cross}|}{V_{Bulk}} dx \quad (5)$$

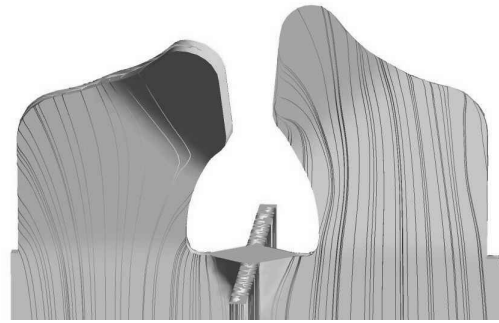
위 식에서 a 는 V_{Swirl} 을 측정된 선의 길이, b 는 V_{Cross} 을 측정된 선의 길이, V_{Swirl} 은 a 에 수직인 속도성분의 크기이고, V_{Cross} 는 b 에 수직인 속도성분의 크기이며, V_{Bulk} 는 축

Table 6 Total force on the mixing vane

PLUS7	Y1029
7.321 [kN]	6.786 [kN]



(a) 'PLUS7' mixing vane



(b) 'Y1029' mixing vane

Fig. 10 Streamlines on the mixing vane

방향의 평균유동속도 (6.79 m/s)를 나타낸다.

선회계수와 횡류계수는 부수로 내의 열전달과 압력강하에 가장 큰 영향을 미치는 요소라고 Karoutas 등[2]의 연구를 포함한 많은 연구들에 의해 밝혀진 바 있으며, Fig. 3에서 'z=0'은 혼합날개와 지지격자가 교차하는 단면을 나타내고 z는 주 유동방향의 좌표이다. 격자의존성 테스트 결과를 Fig. 4에 나타냈으며, 이 수행결과를 바탕으로 약 58 만개를 최적의 격자수로 선택하였다.

4.1 공차를 고려한 최적설계 및 검증

기계부품 및 형상들은 실제 제조 시에 공차를 가진다. 한 전원자력연료(주)에 의하면 'Y1029' 혼합날개의 경우는 아랫부분 각도인 α , 윗부분 각도인 β 가 각각 1°, 2°의 공차를 가진다. 이 공차를 고려하기 위해서 Table 2에 표시된 F_N , F_P 값들을 반응면기법을 통해 1° 차이마다 F_N , F_P 값을 Fig. 4와 같이 나타내었다. Fig. 5를 통하여 얻어진 값들을 일정한 방식으로 평균화하여 Table 3에 나타내었다. 즉 Table 3의 각 하나의 셀은 9개 형상에 대한 값을 평균한 값을 나타낸다. 예를 들어 Table 3의 (10°, 29°)셀은 Table 3-4의 (9°, 27°), (9°,

29°), (9°, 31°), (10°, 27°), (10°, 29°), (10°, 31°), (11°, 27°), (11°, 29°), (11°, 31°) 이 총 9개의 셀을 평균한 값이다.

본 연구의 목적은 'PLUS7' 혼합날개와 동등한 열전달능력을 가지면서 보다 작은 압력강하를 갖는 것이다. Fig. 5와 Table 3을 통해 설계변수들의 굽힘 각도가 커질수록 압력강하가 커지고, 또한 열전달능력도 증가하는 경향을 가짐을 알 수 있다. 따라서 Table 3에서 진한 색으로 표시한 셀 영역을 최적설계를 위한 고려 대상으로 선택하였다. 가중치 W_f 를 1.0 을 주어서 얻은 목적함수 값을 Table 4에 평가하였다. 그 결과 고려대상 중에서 F_{object} 값이 가장 큰 형상은 (10°, 29°)이다. F_N , F_P 모두 기준형상인 'PLUS7' 혼합날개에 대한 'Y1029' 혼합날개의 상대 열전달능력과 압력강하이기 때문에 F_N/F_P 를 통해서 압력강하에 상대적으로 어느 정도의 열전달능력을 가지는지를 평가할 수 있으며, 목적함수를 통해 얻은 최적형상과 동일한 형상이 가장 큰 값을 가진다.

Table 4는 총 9개의 형상을 수치 해석하여 반응면기법을 통해 얻은 예상값들을 평균화하여 공차를 고려한 최적설계를 한 것이다. 따라서 공차를 고려하여 최적설계된 (10°, 29°) 형상이 실제 수치해석을 하여 구한 값과 얼마나 차이가 나는지를 확인해야 한다. 실제 계산을 통해 검증해 본 결과를 Table 5에 나타냈으며, 평균 F_N 계산값과 평균 F_P 계산값 모두 예상치에 대한 오차율이 1% 미만임을 알 수 있다. 반응면기법을 통해 최적설계된 'Y1029' 혼합날개가 최적형상임을 검증하였다.

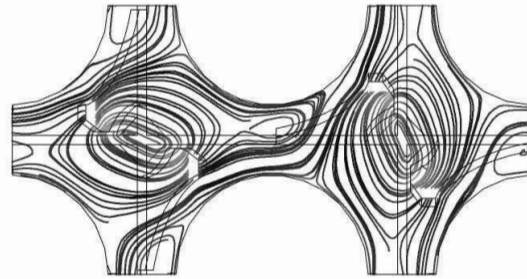
4.2 기준형상 'PLUS7'과 'Y1029'비교

Fig. 6에 혼합날개가 부착되지 않은 경우를 기준으로 하여 'PLUS7' 혼합날개와 최적설계 된 'Y1029' 혼합날개에 대해 각 단면에서의 상대 Nusselt 수를 비교해 보았다.

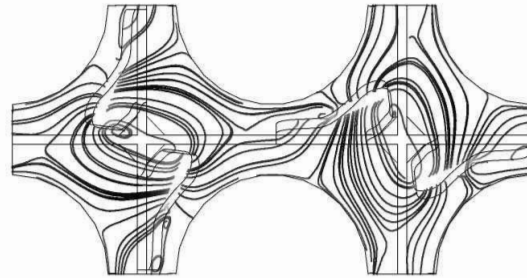
$$\frac{Nu}{Nu_0} = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{Nu}{Nu_0} = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{(T_{w0} - T_{\infty 0})}{(T_w - T_{\infty})} \quad (6)$$

여기서 T_b 와 T_w 는 각각 혼합날개가 있는 경우이며, T_{b0} 와 T_{w0} 는 혼합날개가 없는 상태를 나타낸다. 그림을 통해 최적설계한 'Y1029' 혼합날개를 장착하였을 경우가 'PLUS7' 혼합날개가 장착된 경우보다 열전달능력이 하류 유역까지 잘 보존됨을 알 수 있다. 이를 통해 하류에서의 임계열유속까지의 열적여유가 상승되는 가능성의 제공을 Fig. 7을 통해서 확인할 수 있다.

본 연구의 목적은 동등한 열전달능력을 가지면서 압력강하를 줄임으로써 에너지 소비를 줄이는 것이었으므로 압력강하가 줄어드는 것에 대해 분석하였다. Fig. 8에서 확인할 수 있



(a) Cross section of 'PLUS7' mixing vane



(b) Cross section of 'Y1029' mixing vane

Fig. 11 Streamlines for 'PLUS7' and 'Y1029'

듯이 혼합날개가 시작되는 지점인 'z=0'인 점을 기점으로 두 형상의 압력강하가 차이를 보이게 된다. 'PLUS7' 혼합날개를 지나면서 소모되는 에너지가 'Y1029' 혼합날개를 지나면서 소모되는 에너지보다 상대적으로 크기 때문에 일어나는 현상을 쉽게 예상할 수 있다. Fig. 9과 Table 6에 각각 혼합날개에 생기는 전단력과 지지격자 전체에 걸리는 힘에 대해 나타났다. 두 경우 모두 'PLUS7'에서 큰 값을 가짐을 알 수 있으며, 그로 인해 'PLUS7'의 압력강하가 'Y1029'보다 큼을 알 수 있다. Fig. 10는 각 혼합날개에서의 유선을 비교해보았다. 'Y1029' 혼합날개의 경우가 'PLUS7' 혼합날개에 비해 날개 전반에 걸쳐 유선이 날개면을 따라 잘 형성됨을 알 수 있다. 새로운 혼합날개의 경우 날개면이 넓어 마찰저항이 커짐에도 불구하고 압력저항을 줄임으로써 총저항의 감소를 통해 압력강하를 저감하였음을 확인할 수 있다. Fig. 11은 'PLUS7' 혼합날개와 'Y1029' 혼합날개의 x-y 평면에서의 유선분포를 나타낸다. 'PLUS7'은 날개상부의 2단 굴곡의 영향으로 'Y1029'와 비교해 더 좁은 재순환 영역이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이로 인해 혼합날개를 통과한 후의 유동이 'Y1029'와 비교해 박리가 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 'PLUS7' 혼합날개의 유로막힘률은 18.0%, 그리고 'Y1029' 혼합날개의 유로막힘률은 17.8%로 거의 같은 유로막힘률을 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 삼차원 열유동해석과 반응면기법을 사용하여 원자로 내의 지지격자 상단에 부착되는 혼합날개의 형상을 제조 시의 공차를 고려하여 최적설계 하였다. 기준형상은 기존의 'PLUS7' 혼합날개이며, 최적설계를 수행한 형상은 두 굽힘각도를 가진 'Y1029' 혼합날개이다. 목적함수에서 열전달 계수와 마찰계수를 모두 고려하였으며, 두 가지 굽힘각도를 설계변수로 택하였다. 'Y1029' 혼합날개의 경우, 아랫부분 각도인 α , 윗부분 각도인 β 가 각각 1°, 2°의 공차를 가진다. 공차를 고려한 반응면기법을 통해 최적설계한 'Y1029' 혼합날개는 각각 10°, 29° 각도를 가진 형상이다. 최적설계한 'Y1029' 혼합날개는 기준형상에 비해 하류영역까지 열전달능력이 보존되며, 이를 통해 하류에서의 임계열유속까지의 열적 여유가 상승되는 가능성이 제공된다. 'Y1029' 혼합날개는 기준형상과 동등한 열전달능력을 가지면서 압력강하는 1.8% 정도 감소하였다.

일반적으로 가압 경수로 원자로에는 9개 정도의 지지격자가 일정간격을 두고 설치된다. 본 연구에서는 혼합날개가 부착된 지지격자의 한 간격을 계산범위로 정하여 최적설계를 수행하여 'Y1029' 혼합날개 형상을 도출하였다. 도출된 형상은 기준형상과 유사한 수준의 열전달능력을 가지는 반면 압력강하는 1.8% 정도 감소하였으며, 이를 실제 원자로에 설치할 경우에 'PLUS7' 혼합날개가 부착되어 있는 원자로에 비해 약 15% 이상 압력강하를 줄임으로써 15% 이상의 에너지 절감효과를 얻을 수 있다.

후 기

본 연구는 연구비를 2005 지식경제부 (MKE) 지원과제 (No. R-2005-1-391)로부터 지원받았음을 밝힌다.

참고문헌

- [1] 1991, 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," *Nucl. Engng and Design*, Vol.125, pp.111-119.
- [2] 1995, Karoutas, Z., Gu, C.Y. and Scholin, B., "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.
- [3] 2001, In, W.K., Oh, D.S. and Chun, T.H., "Flow analysis for optimum-design of mixing vane in dda PWR fuel assembly," *J. of KNS*, Vol.33, No.3, pp.327-338.
- [4] 2003, Cui, X.Z. and Kim, K.Y., "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, pp.719-724.
- [5] 2002, Kim, Y.H. and Kim, K.T., "Advanced Spacer Grid Design for the PLUS7 Fuel Assembly," *Third Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS3)*, Kyeongju, pp.493-499.
- [6] 2005, Kim, K.Y. and Seo, J.W., "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.
- [7] 2000, In, W.K., Oh, D.S. and Chun, T.H., "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.
- [8] 2007, 신창환, 추연준, 문상기, 천세영, 전태현, "핵연료집합체 지지격자의 혼합날개 형상이 임계열유속에 미치는 영향," *대한기계학회 2007년 춘계학술대회 논문집*, pp.3049-3054.
- [9] 2007, Lee, C.M. and Choi, Y.D., "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.
- [10] 2008, Nematollahi, M.R. and Nazifi, M., "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.
- [11] 2006, 안정수, 최영돈, "핵연료 집합체에서의 대형 이차 와류 혼합날개의 난류생성 특성에 관한 연구," *설비/공학 논문집*, 제18권, 제10호, pp.811-818.
- [12] 2006, *CFX-11.0 Solver Theory*, Ansys inc.
- [13] 2001, Menter, F. and Esch, T., "Elements of industrial heat transfer prediction", *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering(COBEM)*, Uberlandia, Brazil, 2001.
- [14] 2001, Shyy, W., Papila, N., Vaidyanathan, R. and Tucker, K., *Progress in Aerospace Science*, Vol.37, pp.59-118.