2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자로 부수로내의 혼합날개 최적 설계

Design Optimization of Mixing Vane in A Subchannel of Nuclear Reactor

서준우, 김광용

인하대학교
인천광역시 남구 용현동 253 번지

요 약

본 연구에서는 삼차원 RANS해석기법을 이용하여 혼합날개를 지나는 유동과 열전달을 계산하여 혼합날개의 형상을 최적화하였다. 난류모델로는 표준 k-ε모델을 사용하였고 최적설계기법으로는 반응면기법을 사용하였다. 목적함수는 열전달율과 마찰손실로 인한 압력강하의 역수를 혼합한 형태로 정의하였다. 설계변수로는 혼합날개의 굽힘각과 비틀림각을 선정하였다. 최적화된 혼합날개는 기존의 상용 혼합날개 보다 좋은 성능을 보여주었다.

Abstract

In the present work, shape of mixing vane is optimized numerically using three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis of flow and heat transfer. Standard k-ε model is used as a turbulence closure. Response surface method is employed as an optimization technique. The objective function is defined as a combination of heat transfer rate and inverse of friction loss. Bend and twist angles of mixing vane are selected as design variables. Optimum shape of mixing vane shows the better performance than the commercialized split vane,

1. 서 론

가압 경수로형 원자로에 장전되는 핵연료 집합체는 각 핵연료봉의 구조적 형태를 유지하기 위해 축 방향으로 여러 지점에 지지격자를 설치한다. 최근에는 유동의 강제혼합을 유도하여 임계열유속의 증진을 목적으로 혼합날개를 지기격자에 부착하는 경우가 있다.

이러한 유동혼합날개는 핵연료봉을 고정시켜주는 지지격자의 끝단에 위치하며 핵연료 집합체의 열수력적 성능에 많은 영향을 미친다. 특히 압력강하와 열전달에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 유동혼합날개의 개량을 통하여 유동혼합성능을 향상시키고 임계열유속을 증진시키고자 하는 노력이 활발히 이루어지고 있다. 임계열유속 실험은 많은 비용과 시간이 소요되므로, 유동혼합날개의 형상에 따른 유동특성을 먼저 평가하고 혼합날개의 형상을 최적화하는 작업이 먼저 수행되어야 한다. Karoutas[1] 은 유동혼합날개가 부착된 핵연료다발내의 난류유동을 실험 및 CFD 코드인 CFDS-FLOW3D 를 사용하여 분석하였으며, In 등[2]은 CFD 코드인 CFX-4.2 를 사용하였다. In 등[3]은 CFD 를 이용하여 혼합날개의 굽힘각도에 따른 부수로 유동특성을 분석하여 상용화된 혼합날개인 split vane 의 경우 최적 굽힘각이 30 ° 35 ° 이고, swirl vane 의 경우에는 35 ° 40 ° 라고 제안하였다. Imaisumi 등[4]은 가압경수로 핵연료다발의 삼차원 유동특성을 평가하기 위한 유동해석 방법을 제시하였다. Cui 와 Kim[5]은 일정한 굽힘각을 가지는 혼합날개에서 비틀림각이 열전달에 미치는 영향을 연구하였다.

본 연구에서는 CFD 코드인 CFX-TascFLOW 를 사용하여 유동특성을 분석하였으며 수리통계적 설계기법인 반응면기법을 이용하여 혼합날개의 최적형상을 도출하고자 하였다

2.유동해석 방법

핵연료봉과 봉사이 2 개의 부수로를 계산영역으로 선정하였으며 봉과 봉사이의 간격은 9.53mm 이다.지지격자의 높이는 35mm 이고 전체 계산영역은 지지격자 45mm 후방에서부터 지지격자 상부 500mm 까지이고 전체 해석영역은 축방향길이 580mm 이다. 상용 split-vane 의 경우 대략 축방향으로 높이 7mm, 굽힘각 25°로 수치실험을 실시하였다. 유로막힘율은 17.3%이고 유로막힘율은 모든 유동해석에서 동일하게 적용하였다. 또한 혼합날개의 밑변의 길이도 모든 유동해석에서 4mm 로 고정하였다.수력직경은 약 D_h =12mm 이다.

본 연구에서는 CFD 코드인 CFX-TASCflow 를 사용하여 계산을 수행하였다. 대류항의 이산화방법으로 LPS(Linear Profile Skewed Upstream Differencing Scheme) 수치기법과 난류모델로 Launder 와 Spalding[6]의 표준 k- ε 모델을 사용하였다. 경계조건으로 입구경계에서 균일유동 조건을 주고 출구경계에서는 일정압력 조건을 주었다.혼합날개와 지지격자의 표면에는 점착 (no-slip)조건과 단열조건을 적용하였고 연료봉 벽면에는 점착조건과 일정열유속(heat flux; 30kW/m^2)을 주었다. 부수로 측면경계에서는 혼합날개로 인한 횡류혼합을 고려한 주기경계조건 (periodic condition)을 적용하였다. 주기경계조건에서는 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 이다.

3.최적설계 기법

3.1 반응면 기법

반응면기법은 목적함수를 매끄러운 다항 함수로 모델링 하기 위해 물리적 또는 수치적 실험을 통하여 도출된 결과들을 이용하는 일련의 수리통계적 기법이다[7] .반응면을 구성하

는 반응면 함수는 일반적으로 다항식의 형태를 갖고 있으며, 각 항의 미지 상수는 회귀 분석 (regression)을 통하여 구하게 된다. 이차 다항식으로 반응면 모델을 형성할 경우, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^{n} \beta_j x_j + \sum_{j=1}^{n} \beta_{jj} x_j^2 + \sum\sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j \qquad (1)$$

여기서 x_i는 설계변수, η는 측정된 반응값이고, n은 설계변수의 수를 나타내며, 다항식의 계수 (β_0, β_1 등)의 개수는 $(n+1)(n+2)/2$이다. 일반적으로 다항식의 계수는 실험 데이터로부터 최소자승법(least square method)을 사용하여 결정된다. 주어진 설계공간 상에서 반응면을 구성하는데 필요한 정보를 얻기 위해 정해진 실험점을 대상으로 수치실험이 수행되어야 한다.

3.2 설계변수 및 목적함수

수치최적화를 위해서는 기본적으로 설계변 수와 목적함수의 선정이 우선 되어야 한다. 설계 변수는 Fig. 1 과 같이 굽힘각 (α)과 비틀림각 (γ)으로 선정하였으며, 3^k-완전 계승법 (3^k-full factorial method)를 이용하여 Table 1 과 같이 무차원화 하였다. 목적함수는 열전달 효과와 압력강하를 동시에 고려하기 위해서 Nusselt 수와 마찰계수로 구성하였다. 목적함수의 값이 최대가 되는 값을 최적 설계점으로 선정하였다. 목적함수는 다음과 같다.

$$F = F_N + W_f \left(1/F_f\right) \qquad (2)$$

여기서,

$$F_N = \frac{1}{L}\int_0^L \frac{\overline{Nu_l}}{\overline{Nu_o}} dl = \frac{1}{L}\int_0^L \frac{\overline{(T_{wo} - T_{bo})}}{\overline{(T_w - T_b)}} dl \qquad (3)$$

$$F_f = \frac{1}{L}\int_0^L \left(\frac{f}{f_0}\right)^{1/3} dl \qquad (4)$$

로 나타낸다.

한편 f_o와 Nu_0는 각각 혼합날개가 없는 경우 마찰계수와 평균 Nusselt 수를 나타낸다. 위 식에서 W_f는 설계자의 의도에 따라 조절이 가능한 가중계수 (friction factor)이다.

4.결과 및 검토

4.1 유동 특성

Fig 2.에서는 속도장에 대해 Karoutas[1]의 실험결과와 비교하였다. 굽힘각과 비틀림각의 변화에 따른 유동해석 결과를 축방향으로 $2D_h$와 $10D_h$에서 속도분포로 Fig. 3 과 4 에 나타내었다. Fig. 3 과 4 에서 보여지는 속도분포는 굽힘각과 비틀림각이 속도장에 어떤 영향

을 미치는지를 나타낸다.우선 Fig. 3 에서는 굽힘각도가 일정할때 혼합날개의 비틀림 각도가 유동장에 어떤 영향을 미치는지 보여준다. 일정한 굽힘각도에서 비틀림 각도를 증가시켰을 때 부수로 후류에서 부수로간의 유동흐름이 향상되는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 4 에서는 비틀림 각도가 일정할때 굽힘각도의 증가가 유동장에 어떤 영향을 미치는지를 보여준다. 부수로 중심에 위치한 원형의 회전유동을 타원형의 회전 유동으로 변화시킨다. 이러한 유동장의 변화는 비틀림각의 변화에서도 나타나지만 굽힘각에의한 변화가 더 많이 나타남을 알 수 있다. 이러한 유동장의 변화들이 부수로내의 열전달과 압력강하에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4.2 최적설계

최적설계에 앞서 설계변수와 목적함수는 Table 1 과 식(2)와 같이 선정하였다. Fig. 5 는 굽힘각도와 비틀림각도가 목적함수의 인자인 열전달률과 압력강하에 미치는 민감도를 Te 검증한 결과이다. $1/F_f$ 는 식(4)에 정의한 마찰계수에 역수를 취한 값이고 이 값이 크면 마찰손실에 의한 압력강하가 작은 것으로 판단한다. 또한 F_N 는 식(3)에 정의한 Nusselt 수의 비로써 이 값 역시 크면 열전달율이 좋은 것으로 판단한다. Fig 5.(a)를 살펴보면 굽힘각이 커지면 열전달율은 좋아지지만 마찰손실은 증가하게된다. 또한 Fig 5(b)에서는 비틀림각이 커지면 열전달율은 떨어지지만 마찰손실은 감소하게 된다. 이러한 이유로 열전달률과 압력강하를 목적함수로 하는 최적설계에서 두 인자간의 타협점이 필요하다. 본 연구에서는 압력강하에 가중계수 (w_f =0.4)를 곱하여 최적설계를 하였다. Table 1 에서는 설계변수를 무차원 변수로 변환 하였고 아홉가지 설계변수에 대해서 얻는 수치실험을 하였다. 계산의 정확성을 높이고자 네개 정도의 실험점을 추가하였다.Table 1 에서 얻은 설계변수와 목적함수를 이용하여 반응면을 구성하였다. 반응면을 구성하기 위한 2 차 polynomial 함수를 얻기 위해서 상용통계프로그램인 SPSS 를 사용하였다. 2 차 다항함수를 구하기 위해 필요한 다항식의 계수(β_0, β_1 등)는 회귀분석을 통해 얻어진다. Table 2 는 가중계수가 0.4 인 경우 회귀분석의 결과를 나타낸다. 완성된 반응함수는 adjusted R^2 법을 사용하여 신뢰도를 향상하였다. 반응면기법에 의한 반응값이 정확히 예측된 경우 $0.9 \le R^2{}_{adj} \le 1.0$ 을 갖는다. 따라서 본 연구에서 얻어진 반응면은 신뢰할만한 수준인 것으로 판단된다. 목적 함수의 반응면은 Fig. 6 을 통해 나타냈다. 반응면을 통해서 얻어진 최적값은 (0.3,-0.4)이다. 이것을 각도로 환산하면 굽힘 각도는 29.5° 비틀림 각도는 16° 이다. 이렇게 만들어진 혼합날개는 Fig. 7 에서 보듯이 열효율 측면에서 좀더 나은 결과를 나타낸다. 또한 압력강하를 포함하는 목적함수에서도 Table 3.에서 보듯이 상용 혼합날개인 split-vane 보다 좋은 성능을 가지는 것으로 판단된다.

한편, 가중계수의 변화가 최적 설계점에 미치는 영향을 계산하였다. 가중계수를 0 과 1.0 사이의 값으로 변화시켰을때의 최적형상의 변화를 Fig. 8 에 나타내었다. 가중계수가 증가함에 따라서 굽힘각은 감소하고 비틀림각은 증가함을 알수 있었다. 일정한 유로막힘을 가지는 혼합날개에서는 열전달측면과 압력강하측면을 모두 고려하면 굽힘각을 줄이고 비틀림각을 증가시키는 것이 혼합날개의 성능을 향상시키는데 도움이 된다고 판단된다.

5.결 론

혼합날개의 기하학적 변수들을 체계적으로 최적화하여 혼합날개의 성능을 개선하기 위

해 본 연구에서는 삼차원 유동해석과 수치최적화기법인 반응면기법을 사용하여 최적설계를 시도하였다. 혼합날개의 성능에 민감한 것으로 분석된 굽힘각도와 비틀림각도를 설계변수로 채택하였고, 목적함수는 열전달계수와 마찰계수를 고려하여 혼합날개의 성능을 최대화하고자 하였다. 최적화된 혼합날개는 기존의 상용 혼합날개와 비교하여 성능이 효과적으로 향상되었음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2001 년 과학기술부 원자력연구기반 확충사업에 의해 지원을 받았으며 이에 감사드린다. 아울러 본 연구수행에 있어 많은 조언을 주신 인왕기, 전태현 박사께 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 Subchanel of Nuclear Reactor by Mixing Vane Shapes, *Proceedings of the KNS Spring Meeting*, pp. 514~522

(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) 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

(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, *NTHAS3*, Kyeongju, Korea, paper no. 103, pp. 152-155; also *Journal of Nuclear Science and Technology*, **Vol. 40**, No. 10, Oct. 2003, to be published.

(6) Launder, B. E. and Spalding, D. B., 1972, The Numerical Computation of Turbulent Flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **Vol. 3**, pp. 269-289.

(7) Shyy, W., Papila, N., Vaidyanathan, R, and Tucker, K., 2001, Global Design Optimization for Aerodynamics and Rocket Propulsion Components, *Progress in Aerospace Science*, **Vol. 37**, pp. 59-118.

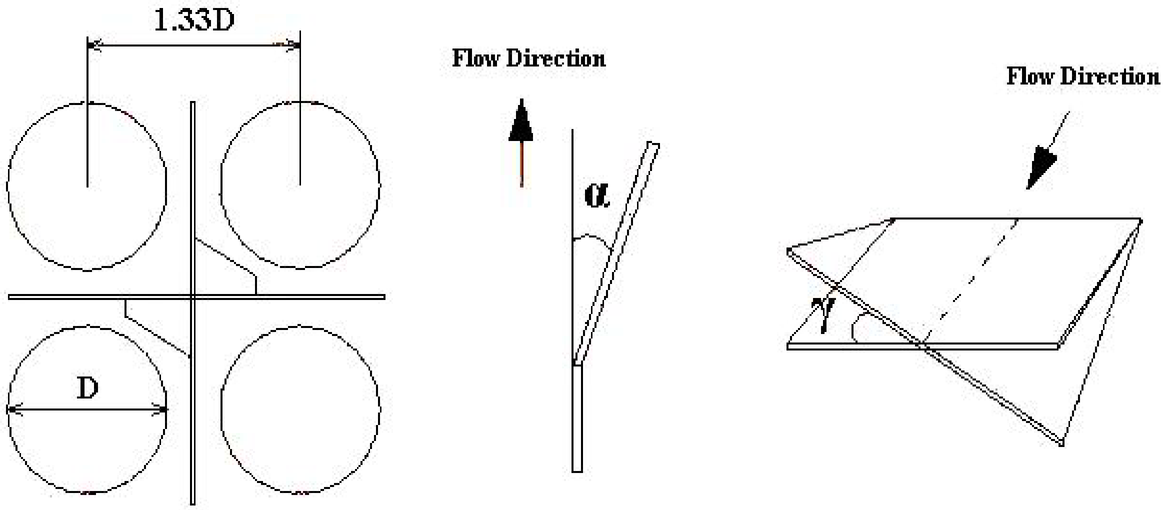


Fig. 1Geometry of mixing vane

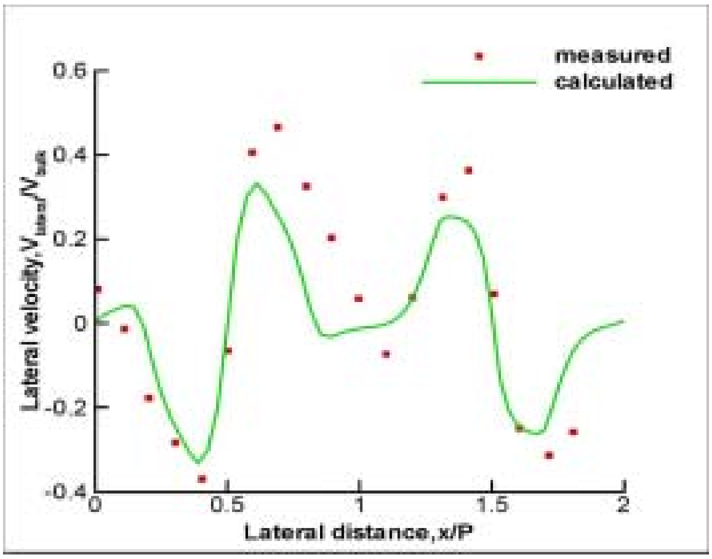
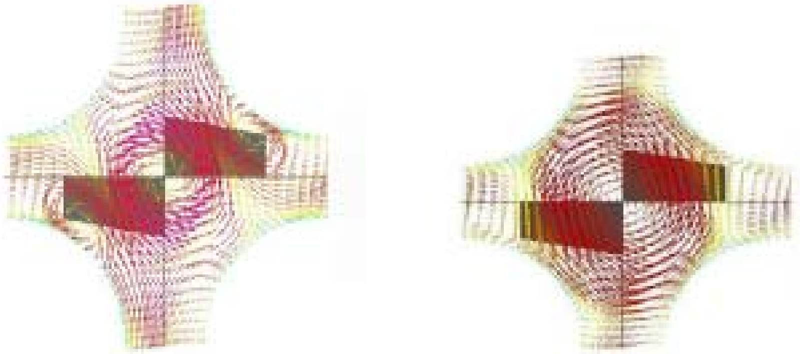
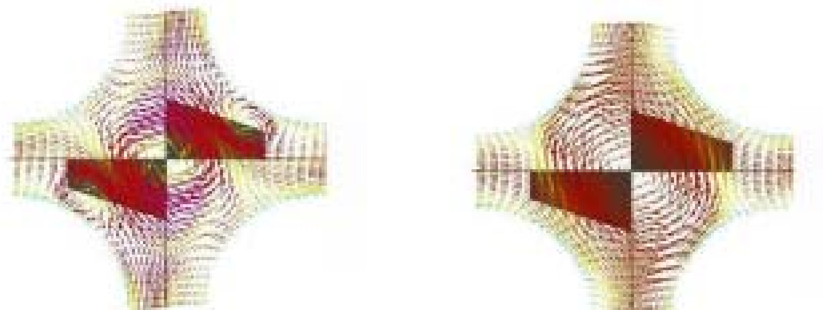


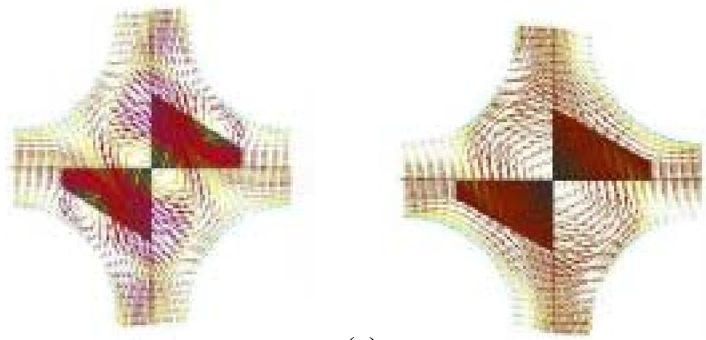
Fig. 2 Comparison of computational results with experimental data at z/D_h =1.1



(a)



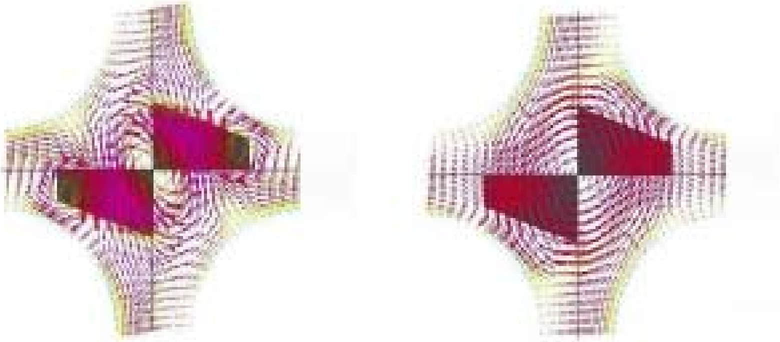
(b)



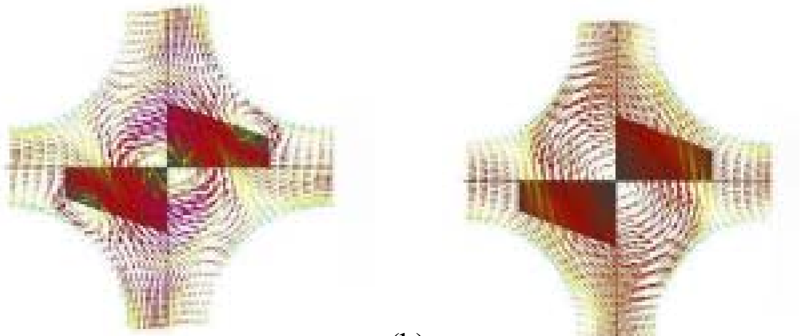
(c)

Fig. 3 Changes of velocity vectors with twist angle at z/D_h =2, and z/D_h =10 (from left)

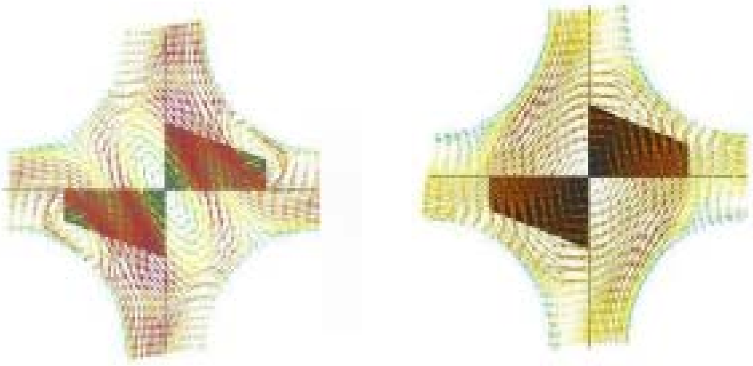
(a) α = 25°, γ = 10°, (b) α = 25°, γ = 20° ,(c) α = 25°, γ = 30°



(a)



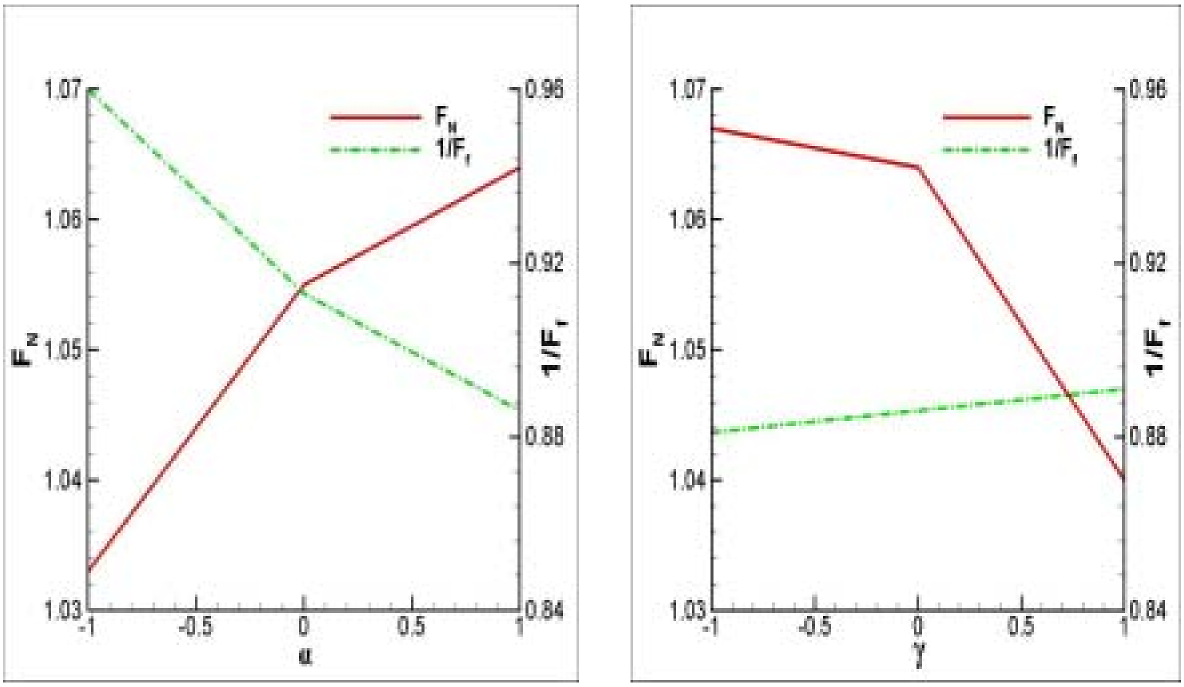
(b)



(c)

Fig. 4 Changes of velocity vectors with bend angle at z/D_h =2, and z/D_h =10 (from left)

(a) α = 10°, γ = 20° (b) α = 25°, γ =20° (c) α = 40°, γ = 20°



(a) (b)

Fig. 5 Effects of design variables on objective function, (a) bend angle (b) twist angle

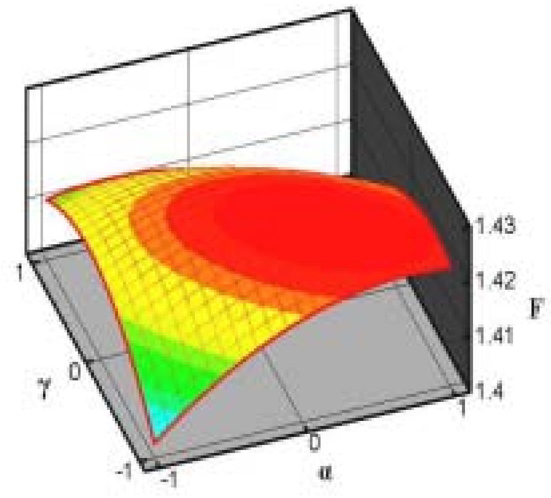


Fig. 6 Response surface with W_f=0.4

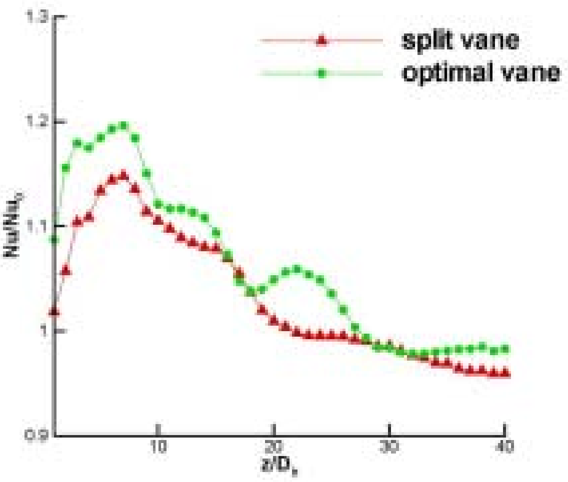


Fig. 7 Comparision of Nusselt number distribution between split vane and optimal vane

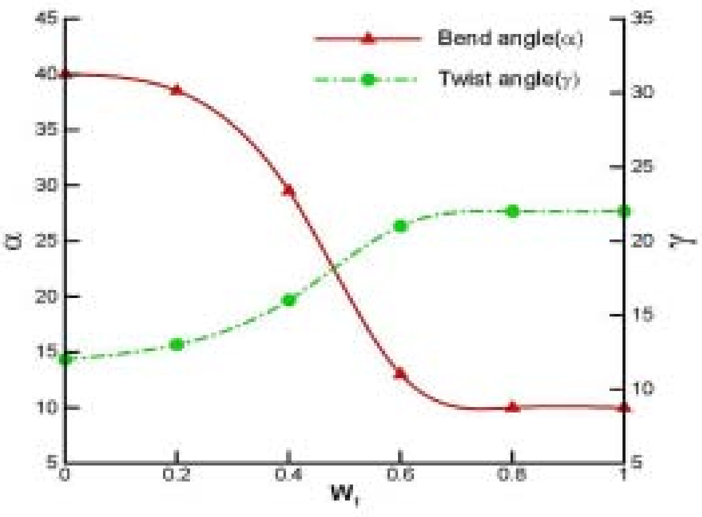


Fig. 8 Optimal Values according to weighting facots

Table 1 Dimensionless design variables

α \ γ	10°	20°	30°
0°	(-1,-1)	(-1,0)	(-1,1)
25°	(0,-1)	(0,0)	(0,1)
40°	(1,-1)	(1,0)	(1,1)

Table 2 Results of regression analysis

W_f	R	R square	Adjusted R square	Std. error of the estimate
0.4	0.977	0.954	.921	2.3242678E-03

Table 3 Values of objective function of split vane and optimal mixing vane (β=17.8% and W_f=0.4)

	F_N	$1/F_f$	F
split-vane	1.03247	0.92725	1.40337
optimal mixing vane	1.06171	0.90163	1.42237