2002 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 111~115
연세대학교 2002. 12. 6~7.

원심다익송풍기의 미끄럼 계수에 대한 연구

구오 엔민*, 김광용*, 서성진**

Study on The Slip Factor Model for Multi-Blades Centrifugal Fan

En-min GUO*, Kwang-Yong KIM*, Seoung-Jin SEO**

Key Words : Slip Factor(미끄럼 계수), Multi-Blade Centrifugal Fan(원심다익송풍기), CFD(전산유체역학), Blockage Effect(차단효과)

ABSTRACT

The objective of this work is to develop improved slip factor model and correction method to predict flow through impeller in forward-curved centrifugal fan by investigating the validity of various slip factor models. Both steady and unsteady three-dimensional CFD analyses were performed with a commercial code to validate the slip factor model and the correction method. The results show that the improved slip factor model presented in this paper could provide more accurate predictions for forward-curved centrifugal impeller than the other slip factor models since the presented model takes into account the effect of blade curvature. The comparison with CFD results also shows that the improved slip factor model coupled with the present correction method provides accurate predictions for mass-averaged absolute circumferential velocity at the exit of impeller near and above the flow rate of peaktotal pressure coefficient

1. 서론

원심다익송풍기는 그 크기에 비해 상대적으로 고풍량, 저소음의 특성으로 인해 공기조화시스템에서 널리 사용되고 있다. 원심다익송풍기는 크게 전향 날개를 갖는 원심 임펠러와 스크롤로 구성되어 있으며, 특징은 0.8이상의 큰 반경비 (D_1/D_2) 0.25이상의 큰 폭 대 반경비 (b_1/D_2), 짧고 단순한 전향 날개, 그리고 많은 수의 (forward-curved) 날개를 갖는다는 데 있다.

다른 형태의 원심송풍기와 마찬가지로 송풍기의 설계는 대개 1차원 속도선도 분석을 통해 이루어진다. 그리고 설계 과정에서 입구 및 출구 직경, 날개각, 날개폭, 스크롤 각 그리고 컷 오프 간격 등의 주요한 기하학적 변수들이 최적화된다. 이러한 설계과정은 미끄럼 계수(1)와 손실(2)에 대한 다양한 모델들의 성능분석에 기초한다. 그러나, 복잡한 내부 유동장으로 인해 일부 모델들은 송풍기의 성능을 합리적을 예측하지 못하고 있다. Kim과 Kang(3)의 실험에서 측정된 미끄럼 계수들은 대부분의 유량범위에서 기존의 모델들과 잘 일치하지 않고 있다. 그러므로, 이들 모델들을 사용해 정확하게 성능을 예측한다는 것은 쉽지 않다.

Yamazaki(4-6)는 실험적 연구에 기초하여 미끄럼 계수모델과 손실모델을 개발하였다. 그러나, Yamazaki 모델은 미끄럼 계수 및 이론적인 전압 상승을 상당히 과소평가함으로써 대부분의 경우에 성능에 대한 정확한 예측을 하지 못한다.

* 인하대학교 기계공학부
** 인하대학교 대학원
E-mail : kykim@inha.ac.kr

그러므로 전향 원심다익송풍기에 대한 1차원 모델분석 방법을 개발하기 위해 본 연구에서는 다양한 미끄럼 계수에 대한 모델들의 성능을 분석하고 점성효과를 고려한 새로운 수정 방법을 제공함으로써 향상된 미끄럼 계수에 관한 모델을 개발하고자 하였다. 그리고, 정상 및 비정상 3차원 CFD 계산을 수행, CFD결과와 비교함으로써 슬립계수 모델과 수정 방법의 예측성능이 타당함을 입증하였다.

2. 유동해석

상용코드 Navie-Stokes 코드인 CFX-TASCflow를 사용해 전향 원심다익송풍기의 정상 및 비정상 3차원 유동해석을 수행하였다. 난류계산에는 $k-\epsilon$모델이 사용되었다. 총 794,435개의 H형 격자를 사용하여 계산을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 송풍기의 사양을 Table 1에 나타내었다. 원심다익송풍기는 양흡입의 구조를 가지고 있으나 계산 수행시간을 줄이기 위해서 임펠러의 한면만을 계산영역으로 설정한 후, 중간에서 대칭조건을 사용하였다.

3. 미끄럼 계수 모델

지금까지 개발된 미끄럼 계수에 대한 모델들 중 Yamazaki(5)와 Weisner(1)는 실험적 자료와 경험적 상관관계에 기초해서 모델을 개발한 반면에 Stodola(7)와 Eck(2)에 의해 제시된 모델들은 이론적인 과정에 기초해 개발되었다. Stodola는 미끄럼 속도는 날개 통로를 지나는 상대적인 와류 혹은 날개의 통로를 지나는 유동의 상대적인 회전에 의해 야기된다고 가정하였으며 미끄럼 속도를 예측하기 위해 다음의 식을 제안하였다.

$$\Delta C_u = \frac{a}{2}\omega \qquad (1)$$

여기서 a는 임펠러 출구에서 효과적인 날개 폭이다. 비록, 이 모델이 날개의 곡률 효과를 고려하지는 않았지만 미끄럼 속도를 날개 통로에서 상대 와류에 연관시킨 개념은 널리 사용되고 있으며 본 연구에서도 이러한 기본적인 개념을 채택하였다.

단순한 날개 형상을 갖는 전향 원심다익송풍기에 대해서 날개 통로를 지나는 유동의 상대적인 회전은 날개 통로 내 유체 입자의 평형상태를 고려함으로써 날개 곡률과 관련시킬 수 있다. Fig. 1은 날개 통로를 움직이고 있는 유체 입자를 보여주고 있다.

본 연구에서 원심다익송풍기에 대한 미끄럼 계수는 운동량 방정식과 에너지 방정식을 고려하여 다음과 같이 유도되었다.

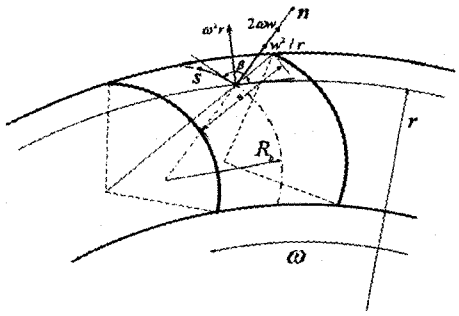


Fig. 1 Force equilibrium on fluid particle within the blade passage

Table 1 Geometric parameters of the fan

Impeller		Blade		Scroll	
D_1	0.1283m	β_1	86.8	α_v	3.4
D_2	0.159m	β_2	151.3	W	0.111m
B	0.1m	t	0.5mm	θ_c	71.6
Z	36	Shape	Single circular arc	r_c	3.8mm

$$\mu = \frac{C'_{u2}}{C_{u2}} = \frac{C_{u2}-\Delta C_{u2}}{C_{u2}} = 1-\frac{\frac{U_2}{D_2}a+\frac{Q}{4zb_2R_b}}{U_2-\frac{Q}{\pi D_2 b_2 \tan\beta_2}}$$

$$= 1-\frac{a/D_2+\varphi\pi D_2/4zR_b}{1-\varphi/\tan\beta_2} \qquad (2)$$

위의 미끄럼 계수 모델은 곡률 효과를 고려하였으므로 전향 날개를 갖는 원심 임펠러의 출구에서의 원주방향 절대속도의 합리적인 예측이 가능할 것으로 기대된다.

Senoo등(8)은 미끄럼 계수와 질량평균된 속도는 유로의 차단, 캠버라인의 변화 그리고 마찰력 등을 포함하는 점성 효과에 의해 영향을 받고 있음을 규명하였다. 앞판 근처에서의 역류와 날개 흡입면의 유동박리에 기인한 유동차단은 전향 날개를 갖는 원심송풍기의 성능에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 왔다. 따라서 질량평균된 원주방향 절대속도를 예측하기 위해서 본 연구에서는 점성효과를 고려한 수정 방법이 제시되었다.

앞판 근처에서 역류에 의한 차단인자(B_F)를 예측하기 위해 Yamazaki에 의해 제시된 차단인자(B_F)의 수정 방법(4)이 사용되었다.

전향 날개를 갖는 원심다익송풍기에 대해서 Eck (2)는 날개의 흡입면으로부터 발생하는 박리 위치를 결정하기 위한 방법을 제시했다. 본 연구에서는 차단효과를 고려한 실제 절대속도의 원주방향성분의 수정식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\Delta C'_{u2} = w'_2 \cos(\pi - \beta'_2)\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \qquad (3)$$

여기서,

$$\varepsilon = B_F + (1-B_F)B_S$$

$$\beta'_2 = \pi - \tan^{-1}\frac{C_{m2}}{w'_{u2}}$$

B_s는 후류 및 경계층 박리에 기인한 차단인자이다. 그러므로, 질량평균 절대 원주방향 속도는 다음과 같이 표현될 수 있다

$$\bar{\bar{C}}u2 = C'_{u2} + \Delta C''_{u2} \qquad (4)$$

4. 결과 및 토의

본 연구에서 제시된 미끄럼 계수 모델의 성능에 대한 타당성을 검증하기 위해서 CFD 결과 뿐만 아니라 기존에 Weisner(1), Eck(2), Yamazaki(5) 그리고 Stodola등이 제시한 모델들과 예측성능을 비교하였다.

정상상태에서의 CFD계산결과로부터 얻어진 임펠러 출구 및 스크롤에서의 전압계수를 Fig. 2(a)에 나타내었다. 임펠러 출구에서 전압계수의 최대값은 유량계수 j = 0.265 에서 나타났다.

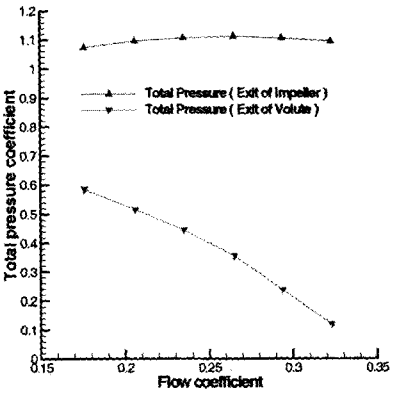
비록 임펠러가 본 연구에서 고려한 전체적인 유량계수 범위에서는 안정된 양상을 보이고 있으나 전압계수 곡선의 전체적인 윤곽을 살펴볼 때 스크롤과 임펠러가 서로 부적절하게 배치되었음을 알 수 있다.

Fig. 2(b)에 유량계수의 변화에 따른 정상상태의 CFD계산결과로부터 원주방향을 따라 평균한 미끄럼 계수의 변화를 나타내었다.

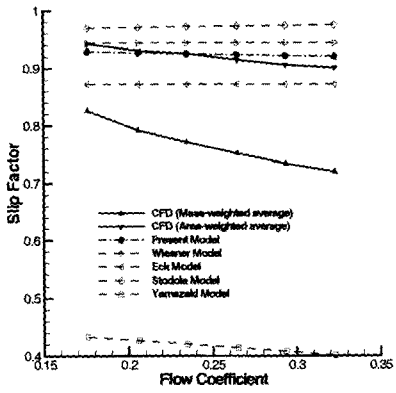
여기에서 미끄럼 계수를 계산하는 방법은 다음과 같다.

$$\bar{\bar{\mu}} = \frac{\bar{\bar{C}}u2}{U_2 + \bar{\bar{C}}m2/\tan\beta_2} \quad ; \text{질량평균}$$

$$\bar{\mu} = \frac{\bar{C}u2}{U_2 + \bar{C}m2/\tan\beta_2} \quad ; \text{면적평균}$$



(a) Total pressure coefficient



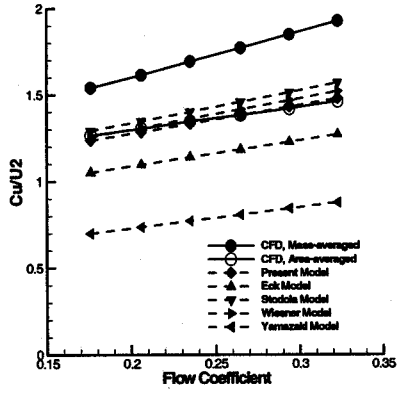
(b) Slip factor

Fig. 2 Predicted performance curves

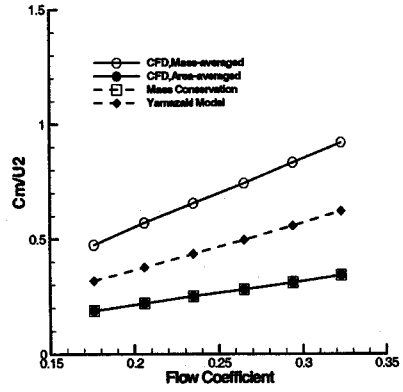
Fig. 2(b)를 살펴보면 질량평균 미끄럼 계수($\bar{\bar{\mu}}$)와 면적평균 미끄럼 계수($\bar{\mu}$)는 공히 유량계수가 증가함에 따라 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 절대적인 크기는 $\bar{\bar{\mu}}$가 $\bar{\mu}$보다 훨씬 더 작으며, 유량계수에 따라 질량평균 미끄럼 계수가 면적평균 미끄럼 계수보다 가파르게 변화하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 고려한 유량의 전 범위에 걸쳐 Yamazaki 모델을 제외한 모델들에 의한 값들은 CFD 계산 결과로부터 얻어진 질량평균 보다 면적평균 미끄럼 계수에 더 가깝다는 것을 알 수 있다. 비록, Yamazaki 모델이 전향 깃의 송풍기에 대해 특별히 개발되었지만 가장 나쁜 예측을 하고 있음을 알 수 있다.

위의 분석에서는 미끄럼 계수 모델과 CFD의 결과를 비교할 때 가능한 혼동을 피하기 위해서 질량평균과 면적평균 방법 모두를 사용하였다. 특히 본 연구에서 대상이 되는 송풍기 처럼 큰 역류 영역이 존재하는 원심 송풍기에 있어서는 비균일한 유동장에 기인한 이론



(a) Absolute circumferential velocity



(b) Meridional velocity

Fig.3 Comparison of predicted circumferential averaged velocity components at exit of impeller

적인 전압 상승을 계산하는 데 원주방향 속도의 질량평균 방법이 면적평균 방법 보다 중요하다는 것이 잘 알려져 왔다. 그러나, 임펠러의 출구에서 실제 속도를 예측하기 위해 Yamazaki 모델을 제외한 미끄럼 계수 모델들이 적용될 때, 유동장의 비균일성 효과를 고려하는 것은 어렵고, 이론적인 절대 원주방향 속도를 계산하기 위해 사용되는 자오선 속도성분은 대개 질량보존의 원칙을 가지고 결정된다. 그리고 질량보존의 원칙이 CFD결과 혹은 실험적 측정으로부터 임펠러 출구에서 질량평균 자오선 속도성분과 같음이 증명될 수 있다.(Fig.3(b))

$$\mu = \frac{C'_{u2}}{C_{u2}} = \frac{C'_{u2}}{U_2 - \dfrac{Q}{\pi D_2 b_2 \tan\beta_2}} = \frac{C'_{u2}}{U_2 - \dfrac{C_{m2}}{\tan\beta_2}} \qquad (5)$$

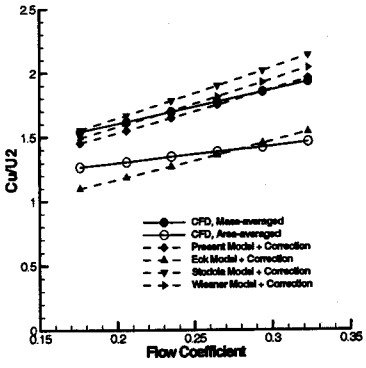


Fig. 4 Predicted at exit of impeller

전향 원심다익송풍기에 대해서 큰 역류 혹은 유동박리가 유동장에서 질량평균과 면적평균 값 사이에 커다란 차이를 가져온다(Fig. 2). 이러한 이유 때문에 기존의 미끄럼 계수 모델에 의해 예측된 값이 CFD결과 중 질량평균보다는 면적평균에 가깝게 된다. Yamazaki 모델의 경우 비록 차단인자가 앞판 근처에서 역류의 효과를 고려하기 위해 사용되었지만 차단 효과와 슬립계수의 상관관계로부터 발생한 오차가 커져 실제 질량평균된 자오선 속도(Fig. 3(b))와 슬립계수에 대한 좋지 않은 결과를 초래한다.

미끄럼 계수 모델로부터 예측된 원주방향 절대 속도 성분과 CFD결과로부터 얻어진 질량평균 및 면적평균 속도가 비교되었다. Fig. 3(a)에서 보여진 바와 같이 CFD결과로부터 계산된 질량평균된 원주방향 절대 속도는 면적평균된 속도보다 20%이상 크고, 유량계수가 증가함에 따라 그 차이가 증가한다. 이는 유량계수가 증가함에 따라 임펠러 내에서의 역류가 더 강하게 됨을 의미한다. 다양한 미끄럼 계수 모델로부터 예측된 모든 원주방향 절대 속도들은 전체 유량 범위에서 면적평균된 값에 더 가깝다. 비록 Eck의 모델로부터 얻어진 미끄럼 계수가 Fig. 2에서 질량평균된 값에 더 가까울지라도 Fig. 3(a)에서 보여진 절대 원주방향 속도 성분에 대한 경우에서 Eck모델은 오히려 더 좋지 않은 결과를 나타내었다.

Fig. 2(b)와 Fig. 3(a)에서 본 연구에서 제시된 미끄럼 계수 모델은 미끄럼 계수와 절대 원주방향 속도 성분에 대해 여러 미끄럼 계수 모델들 중에서 면적평균 값에 가장 접근하는 결과를 보여준다. 특히, 임펠러 전압계수의 최고치가 발생하는 유량(j=0.265)에서 제시된 모델에 의한 원주방향 절대 속도는 면적평균된 값과 매우 잘 일치하고 있다. 제시된 모델에서 예측한 원주방향 절대 속도와 CFD에 근거한 면적 평균된 값 사이의 오차는 전 유량범위에서 대략 2.3% 정도이다.

현 모델의 예측이 질량평균보다는 오히려 면적평균된 값과 잘 일치한다는 사실은 현재의 미끄럼 계수 모델

이 날개 통로에서 유량이 균일 분포를 갖는 경우에 오히려 절대속도를 정확하게 예측할 수 있다는 것을 의미한다.

본 연구에서 개발된 수정방법은 Fig. 4에서 원주방향 절대속도를 예측하기 위해 미끄럼 계수 모델들과 결합되었다. Fig. 3(a)에서 비교해 보면 수정된 방법에 의해 미끄럼 계수 모델들의 예측성능이 향상되었음을 알 수 있다. 그러므로 Eck모델을 제외한 모델들의 예측이 면적평균 값 보다는 오히려 질량평균 값에 더 가깝게 됨을 알 수 있다. 대부분의 유량 범위에서 수정된 방법과 더불어, Stodola와 Weisner모델은 질량평균 원주방향 절대속도를 미세하게 크게 평가하였다. 전 유량범위에서 모델에 의한 예측과 CFD결과사이는 Stodola모델의 경우 10.7% 이내, Weisner의 경우 5.6%였다. 본 연구에서 제시된 수정방법과 결합된 현 미끄럼 계수모델을 사용하여 예측한 질량평균 원주방향 절대속도는 전압계수의 최고치 유량 근처나 이상에서 잘 일치하고 있었다. 그러나 유량이 낮은 경우에는 미끄럼 계수 모델과 결합된 수정방법의 예측 정확성은 감소하였다. 즉, 상대오차가 j=0.265에서 5.7%까지 증가하였다. 이러한 이유는 낮은 유량에서 커다란 입사각에 의해 발생되는 흡입면으로부터의 큰 유동박리의 효과가 현재의 수정방법에서 완전하게 고려되지 않았기 때문으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 날개의 곡률효과를 고려한 전향 원심다익송풍기에 대한 미끄럼 계수 모델을 제시하였다. 제시된 모델에 의한 예측은 면적평균 미끄럼 계수 및 원주방향 절대속도의 유동해석 결과와 잘 일치하였다. 이러한 사실로부터 제안된 미끄럼 계수 모델이 다른 미끄럼 계수 모델들보다 날개 통로에서 균일유동을 갖는 전향의 원심 임펠러에 대해 더 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있었다.

점성효과를 고려하기 위해 도입한 수정방법과 미끄럼 계수 모델을 결합함으로써 미끄럼 계수 모델의 예측결과가 향상됨을 CFD결과와의 비교를 통해 알 수 있었다. 본 연구에서 제시된 수정방법과 결합된 미끄럼 계수 모델은 전압계수의 최대 유량 근처나 더 큰 유량에 대해 임펠러의 출구에서의 질량 평균된 원주방향의 절대속도를 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) Wiesner, F. J., 1967, Review of Slip Factors for Centrifugal Impellers, ASME Journal of Engineering for Power, Oct., pp. 558-572.

(2) Eck, B., 1973, Fans, 1st ed., Pergamon Press, New York.

(3) Kim, J. K., and Kang, S. H., 1997, Effects of the Scroll on the Performance and Flow Field of a Sirocco Fan, ISROMAC-7, Hawaii, pp. 1318-1327.

(4) Yamazaki, S., 1986, An Experimental Study on the Aerodynamic Performance of Multi-Blade Blowers (1st Report), Transactions of JSME(B), Vol. 52, No. 484, pp. 3987-3992.

(5) Yamazaki, S., 1987a, An Experimental Study on the Aerodynamic Performance of Multi-Blade Blowers (2nd Report), Transactions of JSME(B), Vol. 53, No. 485, pp. 108-113.

(6) Yamazaki, S., 1987b, An Experimental Study on the Aerodynamic Performance of Multi-Blade Blowers (3rd Report), Transactions of JSME(B), Vol. 53, No. 490, pp. 1730-1735.

(7) Stodola, A., 1927, Steam and Gas Turbines, McGraw-Hill, New York.

(8) Senoo, Y., Maruyama, S., Koizumi, T., and Nakase, Y., 1974, Viscous Effects on Slip Factor of Centrifugal Blowers, ASME Journal of Engineering for Power, January, pp. 59-65.