

슬랫-슬롯을 적용한 임펠러 형상이 송풍기 유동 특성에 미치는 영향

윤종웅* · 강현수* · 김윤제**†

Effect of Impeller Configuration with Slat-Slot in the Flow Characteristics of a Fan

Jong-Woong Yoon*, Hyun-Su Kang*, Youn-Jea Kim**†

Key Words : Fan(송풍기), Slat-Slot(슬랫-슬롯), Airfoil Impeller(에어포일 임펠러), Aerodynamic Performance(공력성능)

ABSTRACT

A centrifugal fan is commonly used in many industrial applications. This study identified the flow characteristics around the blades applied with slat-slot through a computerized numerical analysis. The impeller with slat-slot and NACA model has goal of to delay the flow separation, and to improve aerodynamic performance. As an indicator for performance evaluation, outlet pressure and mass flow coefficients were selected. The numerical results of the optimized model are graphically analyzed with the coefficients compared with the reference model using the ANSYS CFX. The results show that the optimized model has a better aerodynamic performance than the reference model.

1. 서 론

송풍기는 회전축을 고속으로 회전시켜 기계적 에너지를 유체에 공급하여 압력을 상승시키고 유량을 공급하는 장치이다. 원심형 송풍기는 공조용 장치로써 전체 이용 에너지의 상당 부분을 담당하며 반도체, 자동차, 발전소 등 산업 전반에 걸쳐 사용되고 있다.

송풍기는 배출되는 출구 압력에 따라 팬(fan), 블로워(blower)로 나뉘고 공기의 이송 방향과 블레이드 축의 각도에 따라 축류형과 원심형으로 구분되며, 원심형 송풍기는 블레이드의 형상과 이에 따른 특성으로 나뉘는 방사형, 전향깃, 후향깃, 익형 등의 종류가 있다. 일반적으로 국내에서는 용도에 맞춰, 전향깃은 가정용으로 후향깃, 익형은 산업용으로 사용되고 있다. 최근 에너지 효율에 대한 사회적인 관심이 증가하고 있고 이에 대한 중요성이 부각됨에 따라 팬에 관련된 소형화 및 최적화에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

특히, 익형팬은 동일 원주 속도 대비 성능이 우수하고 소

음 및 진동이 작다는 장점과 안전성으로 지속적인 수요 및 발전 가능성이 있다. 본 연구에서는 사용자의 목적에 적합하도록 원심형 송풍기의 작동 영역을 확장하기 위한 수치해석적 연구를 진행하였고, 익형의 공력 특성 향상 및 유동박리(flow separation)를 지연하는 것을 목표로 임펠러 전단에 슬롯 형상을 적용하였다.

송풍기 성능을 높이고자 하는 연구는 이전부터 활발하게 이루어져 왔으며 슬롯을 활용한 형태의 임펠러가 제안되었다. Fowler⁽¹⁾는 실험을 통해 슬롯을 적용한 익형과 플랫형 임펠러 형상이 송풍기 성능에 미치는 영향 및 유동 특성에 대해 고찰하였으며 1단 슬롯과 2단 슬롯의 형상을 제안하였다. Kang과 Hu⁽²⁾는 NACA 65-810 모델 에어포일의 임펠러 Span 길이와 같은 형상에 따른 송풍기 유동 특성을 고찰하는 실험을 진행하였다. Pan 등⁽³⁾은 수치해석 및 실험을 통해 터보 기계에서 임펠러 끝단에 Fowler 플랩 및 슬롯의 작동원리를 적용하여 유동박리를 제어하고 송풍기 효율이 증가하는 것을 확인하였다. Rong 등⁽⁴⁾은 다양한 입사 각도에서 슬

* 성균관대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

** 성균관대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

† 교신저자, E-mail : yjkim@skku.edu

롯이 경계층 분리를 지연하고 공력 성능을 향상시킨다는 수치해석적 연구를 수행하였다. Ni 등⁽⁵⁾은 수치해석을 통해 원형 슬롯의 형상을 가진 블레이드가 풍력터빈 유동박리 지연에 일조한다는 연구결과를 발표하였다. Su 등⁽⁶⁾은 수치해석을 통해 슬롯의 받음각에 따른 소음 및 유동 특성에 대해 고찰하였다.

본 연구에서는 송풍기 유동박리 지연과 내부유동 안정화 및 공력 성능의 향상을 위해 익형 임펠러 전단에 슬랫-슬롯 형상을 적용하였다. 슬랫-슬롯은 항공기 날개의 앞전에서 추가적인 캠버를 제공하고 날개의 면적을 넓힘으로써 더 나은 공력 성능과 양력을 증가시키는 고양력장치로 공기의 흐름을 슬롯으로 유도하여 유동 박리를 지연시키는 장점이 있다. 따라서 슬랫-슬롯을 적용한 임펠러가 소형 송풍기의 내부유동 안정에 미치는 영향과 이에 따른 에너지 손실 및 난류 운동에너지의 경향성 확인을 목표로 한다.

송풍기 성능 평가 지표로는 Kang과 Hu⁽²⁾가 수행한 익형 송풍기의 성능 실험연구를 바탕으로 입구와 출구의 전압 차이에 대한 압력 변화 값을 무차원화 하여 압력계수와 손실계수를 선정하였으며, 이를 바탕으로 압력, 유량계수의 성능곡선을 도출하였고 해당 곡선에서 작동 영역을 비교, 분석하고 각각의 설계 변수가 송풍기 성능에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 또한, 최적의 슬롯 형상을 찾기 위해 여러 변수를 적용한 임펠러 형상을 비교하며 성능을 평가하였고 송풍기 내

부유동 흐름을 고찰하였다.

Table 1 The impeller configuration

| Classification | Value |
|---|---------|
| Diameter of impeller inner point [D_1] | 170 mm |
| Diameter of impeller outer point [D_2] | 104 mm |
| Impeller span [B] | 26.5 mm |
| Angle of impeller installation [θ] | 12° |
| Outlet angle of impeller [β_2] | 36.2° |
| Number of blades | 12 |
| Specific velocity [n_s] | 182.77 |

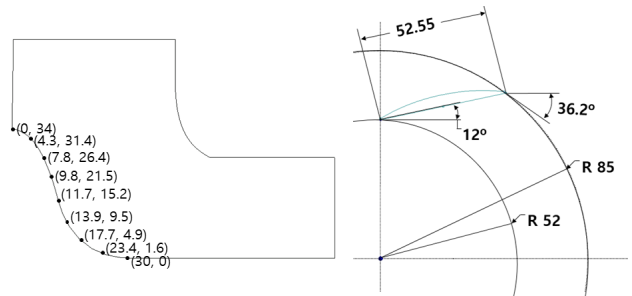


Fig. 1 Meridional plane with the hub configuration and schematic drawing of the fan and impeller

2. 수치해석

2.1 해석모델

해석모델은 크게 입구, 웬, 출구의 세 구역으로 나누었고, 해석모델에 관한 자세한 정보는 Fig. 1에 도시하였다. 웬 영역 내부의 임펠러는 참고문헌⁽²⁾의 규격에 따라 NACA 65 계열의 밀폐형 타입(shrouded type) 익형을 참고하였고, 허브에서 쉬라우드까지 비틀림각(stagger angle)이 없이 일정한 형태이다. 비속도 n_s 는 182.77이며 임펠러 내경과 외경 D_1 , D_2 임펠러 설치 각도 및 입, 출구 각도 등의 정보는 Table 1로 정리하였다. 흡입구 직경은 86 mm이고, 흡입구 쉬را우는 단축과 장축의 비가 1:2.1인 4분 타원으로 설계되었고 최종적으로 Fig. 2로 나타내었다.

2.2 격자계 구성

ANSYS Mesh를 사용하여 격자계를 구성하였다. 복잡한 형상에 대해 원활한 격자 생성 및 곡면에서 발생하는 유동을 고려하기 위하여 입구와 출구 부분은 정렬격자계를 사용했고, 웬 부분은 비정렬격자계를 이용하여 생성하였다. 또한, 블레이드 벽면에서의 유동을 고려하기 위해 계산중첩층

(inflation layer) 조건을 설정하였다.

격자의 개수에 따른 영향을 최소화하기 위해 격자 의존성 시험을 진행하였다. 격자 의존성 시험 결과는 Fig. 3에 도시하였으며, 송풍기의 성능평가 지표로 압력계수를 선정하였기 때문에 격자 개수에 따른 압력계수 변화를 확인하였다. 약 310만 개부터 결과값의 변화가 크지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 정확성과 계산 경제성을 고려하여 약 310만 개의 격자계를 구성하며 수치해석을 수행하였고, 영역에 따른 각각의 격자는 Fig. 4에 나타내었다.

2.3 경계조건

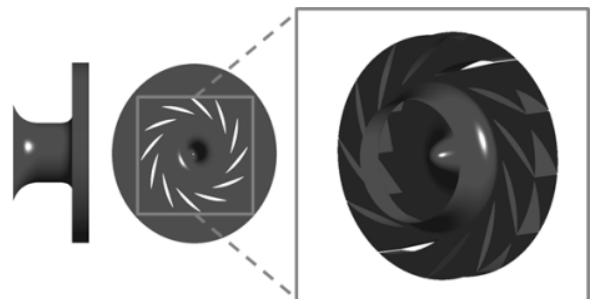


Fig. 2 Schematic of the fan model with NACA 65-airfoil

수치해석은 상용코드인 ANSYS CFX를 사용하였고, 각 경계면에는 회전기계의 유동해석에 적용되는 Moving Reference Frame(MRF) 기법을 사용하여 회전운동을 모사하였다. 또한 추후 연구에서 비대칭 벌류트 케이싱 및 임펠러 형상을 도입하여 성능시험을 비교하고 공력특성 분석을 위한 데이터베이스화를 위하여 블레이드 전체 영역을 설정하여 해석을 수행하였다. 난류 모델은 벽 영역 근처의 유동 박리현상 등을 잘 모사하는 것으로 알려진 SST(Shear Stress Transport) 모델을 사용하였으며, 일반적인 대기조건에 해당하는 조건을 부여하기 위해 입구는 대기압 1.0 atm의 전압을, 출구는 질량유량 값 0.067 kg/s을 설정하였다. 자세한 경계조건은 Table 2에 기술하였다.

특히, 출구 조건의 질량유량 값은 참고문헌⁽²⁾의 실험값과 비교를 위하여 동일한 질량유량을 추가로 설정하여 수치해석을 진행하였다. 이를 통해 압력 및 유량계수를 도출하여 무차원 성능곡선을 Fig. 5와 같이 도시하였다. 본 연구에서 참고한 airfoil 형태의 임펠러 모델은 벌류트를 제외한 임펠러에 대한 실험값이며, 성능곡선에서 볼 수 있듯이 각 질량유량 값에서 유량계수는 평균 0.08의 차이를 보였고 동일한 경향을 보였기에 참고 모델로 선정되었다.

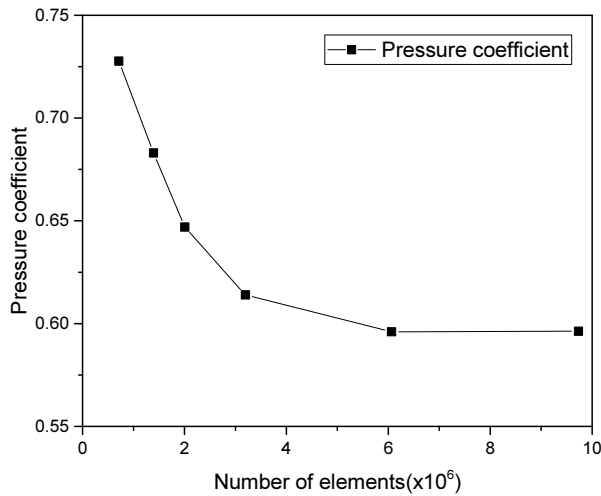


Fig. 3 Results of grid dependency test of reference model

Table 2 Boundary conditions applied in this study

| Analysis state | Steady State |
|----------------------|---------------|
| Turbulence model | SST |
| Working fluid | Air Ideal Gas |
| Reference pressure | 0 atm |
| Total pressure inlet | 1 atm |
| Mass flow outlet | 0.067 kg/s |
| Rotational speed | 1,800 rev/min |
| Interface | frozen rotor |

3. 성능평가 및 최적모델

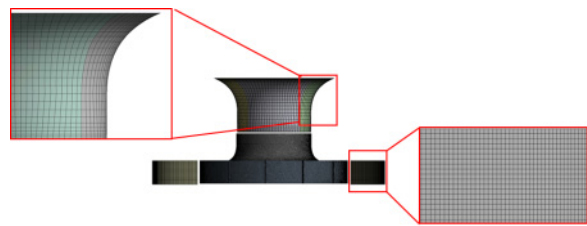
3.1 성능평가

송풍기 성능은 다음 식으로 주어지는 유량계수(ϕ), 압력계수(ψ)를 사용하여 분석하였다.

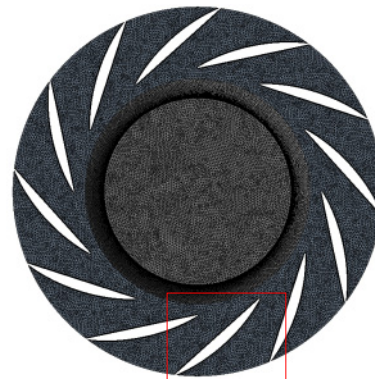
$$\phi = Q / (\pi D_2 B U_2) \tag{1}$$

$$\psi = \Delta P_t / (\rho U_2^2 / 2) \tag{2}$$

유량계수(ϕ)의 Q , D_2 , B , U_2 는 각각 유량, 임펠러 출구 직경, 스펠길이, 임펠러 출구의 회전방향 속도를 의미한다. 압력계수, ψ 는 입구와 출구의 전압차이를 동압으로 나눈 값으로 이를 통해 임펠러가 유량 손실에 미치는 영향을 파악하고 에너지 손실을 비교하였다.



(a) Inlet, fan, diffuser domain



(b) Fan domain

Fig. 4 Computational grid systems

3.2 최적모델

3.2.1 슬랫-슬롯

일반적으로 슬랫은 분리된 앞전 날개를 의미하고 슬롯은 분리된 틈을 의미한다. 본 연구에서는 슬랫-슬롯의 기본적인 형상을 위치(x_1), 간극(t_1), 각도(θ)로 정의하였다. 이때 에어포일의 코드(chord) 길이를 1.0으로 무차원화 하여 각 변수의 범위로서 코드 길이의 2.5배 등으로 사용하였다.

또한, 각 형상 변수가 성능에 미치는 효과를 고찰하기 위

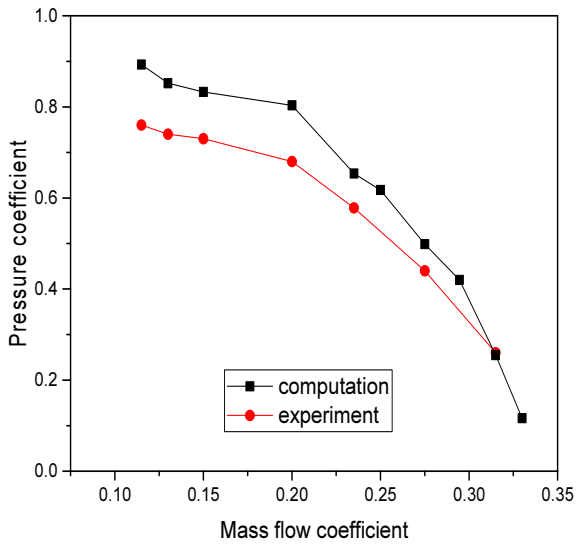


Fig. 5 Pressure, mass flow coefficient performance curve

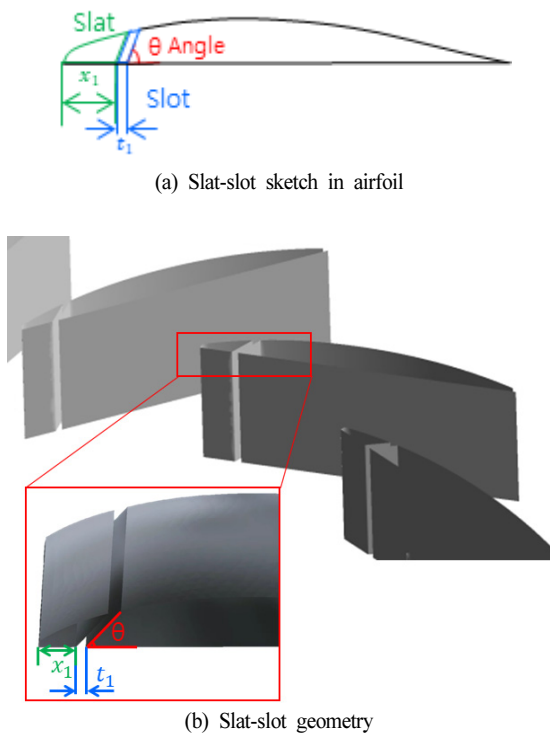


Fig. 6 Configuration of slat-slot in the airfoil

Table 3 Various design parameters of the slat-slot model

| | ① Location, x_1 | ② Clearance, t_1 | ③ Angle, θ |
|--------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| dp.1 | 2.6 | 1.0 | 44 |
| dp.2 | 3.9 | 1.6 | 46 |
| dp.3 | 5.2 | 2.1 | 48 |
| dp.4 | 6.5 | 2.6 | 50 |
| dp.5 | 7.9 | 3.1 | 52 |
| dp.6 | 9.2 | 4.5 | 54 |
| Displacement | $\Delta x_1 = 2.5\%C$ | $\Delta t_1 = 1.0\%C$ | $\Delta \theta = 2^\circ$ |

하여 세 가지 변수에 대해 각 5개의 모델을 선정하여 총 15 케이스에 대한 해석을 수행하였다. 형상 변수에 대한 정보는 Fig. 6과 Table 3에 기술하였고 각 형상 변수에 따른 다양한

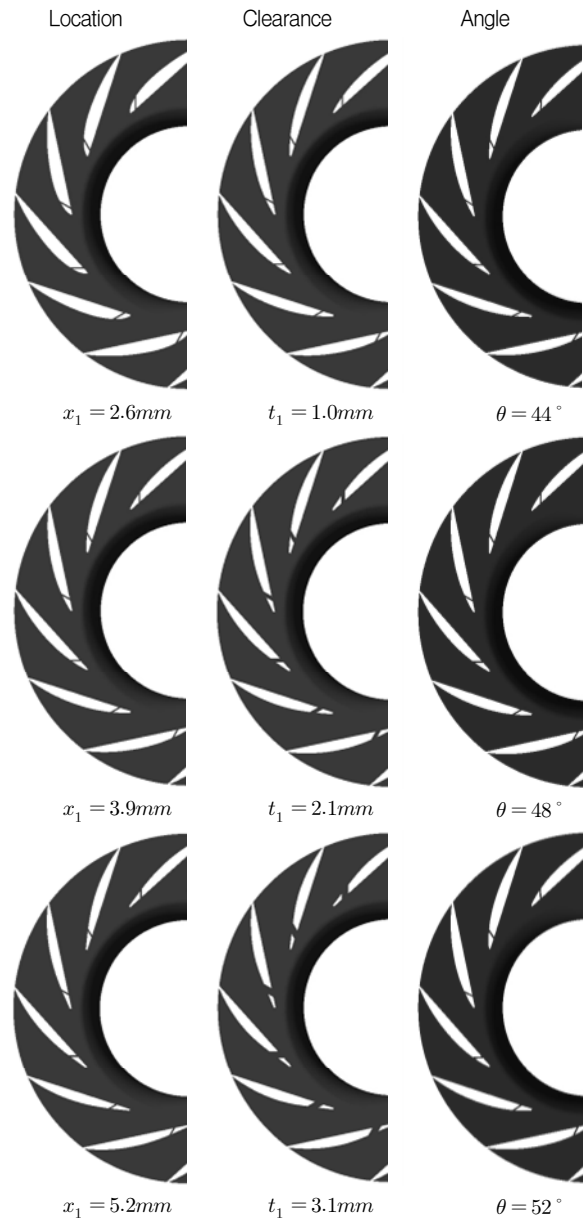


Fig. 7 Examples of slat-slot impellers

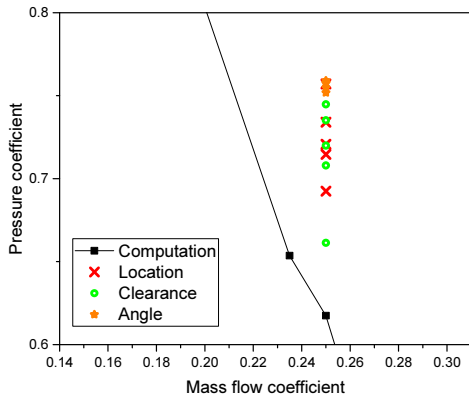


Fig. 8 Comparisons of reference and variable models at $\phi = 0.25$

임펠러 형상을 Fig. 7과 같이 모사하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 형상변화에 따른 성능 분석

Figure 8에서 볼 수 있듯이 각 형상 변수를 적용한 슬랫-슬롯 임펠러는 설계지점에서 전반적으로 참고 모델보다 높은 압력계수 값을 갖는 것으로 확인되었다. 형상 변수 중 각도 변수가 가장 높은 압력계수 값을 가졌지만, 변위에 따른 성능 변화량은 대체적으로 둔감한 특징이 있었다. 위치 변수는 chord의 10%에 해당하는 5.2 mm에서 압력계수가 가장 높았고 그 이후부터는 급격히 감소하였다. 또한, 간극은 대

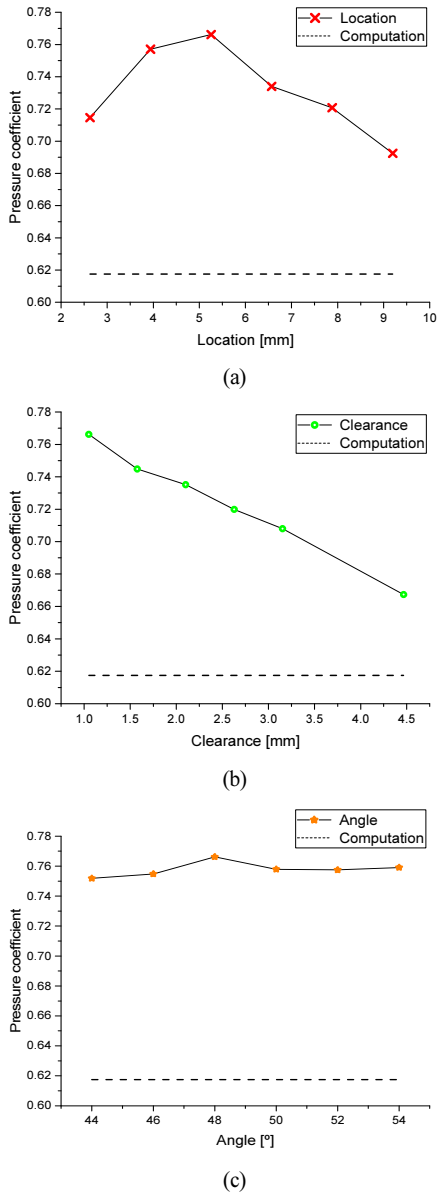


Fig. 9 Effects of configuration variables on the pressure coefficient

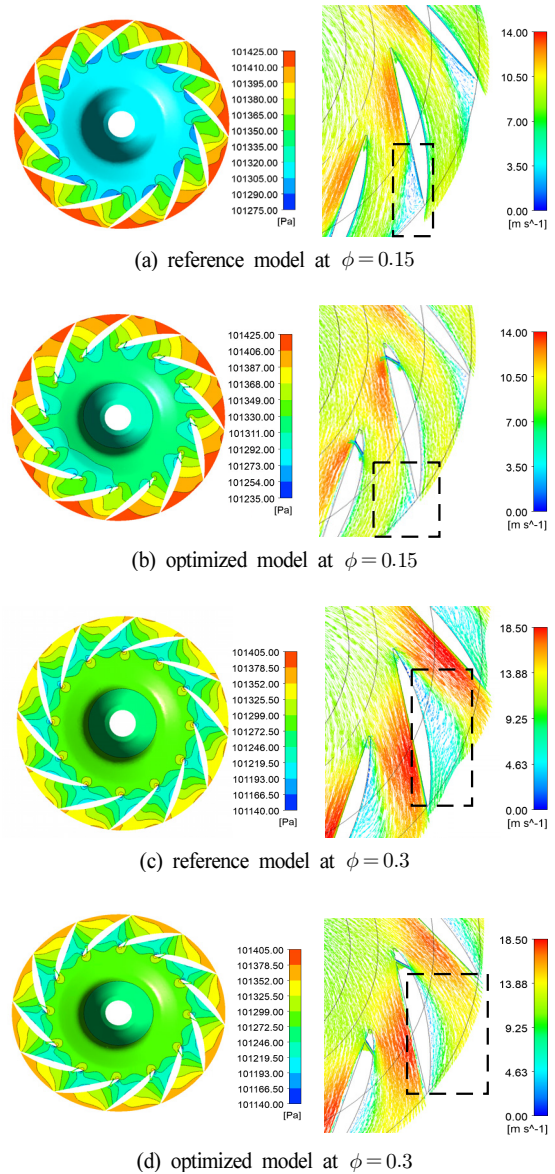


Fig. 10 Contours of pressure and velocity at $\phi = 0.15$, $\phi = 0.3$

체적으로 좁을수록 좋은 성능을 보였다. 최종적으로 $x_1=3.9$ mm, $t_1=1.05$ mm, $\theta=48^\circ$ 인 경우에서 최적의 성능을 확인하였고, 각각의 형상 변수에 대한 결과 비교는 Fig. 9와 같이 정리하였다.

4.2 유동 특성 분석

슬랫-슬롯 모델을 적용하여 동일 질량유량 조건에서 유동 박리가 지연됨을 확인할 수 있었다. Figure 10은 유량계수가 0.15와 0.35인 조건에서 참고 모델과 최적 모델의 속도 벡터를 나타낸다. 참고 모델의 경우(Fig. 10a), 흡입면(suction side)에서 유동의 분리를 확인할 수 있다. 슬랫-슬롯을 적용한 최적 모델(Fig. 10b)에서는 이 분리가 개선됨을 확인하였다. 참고 모델(Fig. 10c)의 경우, 압력면(pressure side)에서 유동의 분리를 확인할 수 있고, 최적 모델(Fig. 10d)에서 유동의 분리가 상당 부분 개선되었고 출구 면적 확보 및 압력 상승 또한 확인하였다.

4.3 내부 흐름 안정화

압력면과 흡입면 사이에서 발생한 저속 영역 및 와류의 감소는 유동의 안정을 의미한다. 유량계수(ϕ)가 $\phi \geq 0.25$ 혹은 $\phi \leq 0.15$ 일 경우, Fig. 10 (a)와 (c)에서 각각 흡입면(suction side)과 압력면(pressure side)의 유동의 분리를 확인하였다. 특히 임펠러 압력면(pressure side)에서 reverse flow가 형성되는 것을 확인할 수 있었고 이것은 역압력구배로 인하여 발생되고 압력항력의 원인이 되어, 유동의 흐름을 막아

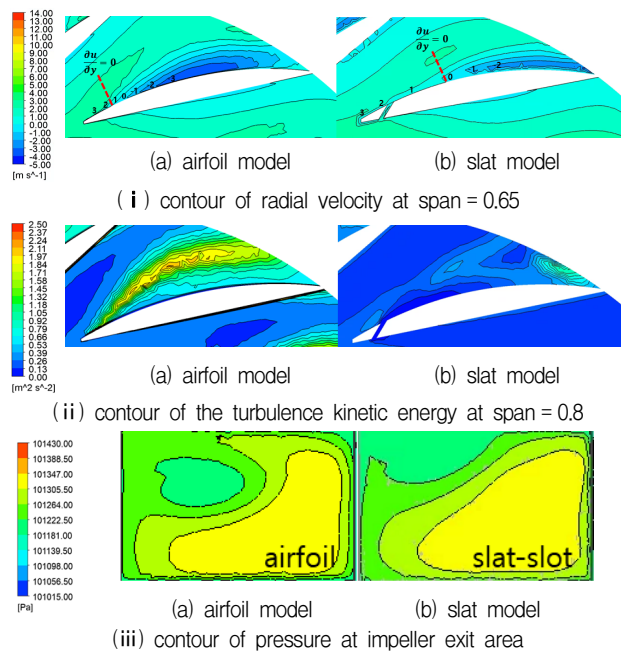


Fig. 11 Contours of velocity in the slat-slot model at $\phi=0.3$

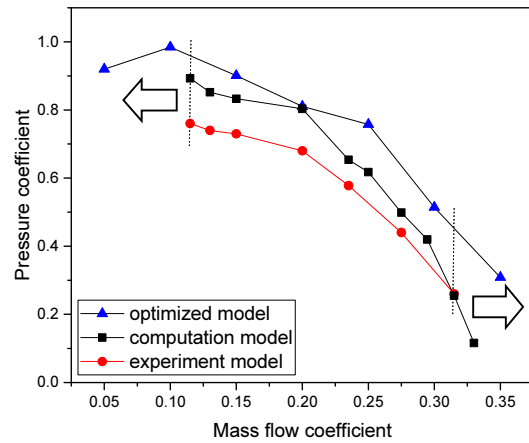


Fig. 12 Performance curve of the reference and optimized models

오버로드 현상을 발생시키는 주원인이라고 고찰하였다.

반면, Fig. 11 (a)의 슬랫-슬롯 형상을 적용한 모델에서는 슬롯을 통과하는 유동의 흐름이 임펠러 상단부에 추가적인 관성력을 전달하였고, 압력면(pressure side)에서 상대적으로 압력항력을 줄이고 attached flow를 강화하였기 때문에 박리를 지연시켰다고 고찰하였다. 또한, $\partial u/\partial y=0$ 이 되는 박리점이 슬랫-슬롯모델에서 출구영역으로 이동한 것을 확인할 수 있다.

박리점 지연과 함께 Fig. 11 (b)에서 난류에너지의 감소를 확인하였다. 또한, Fig. 11(c)에서 유동의 분리가 쉬라우드에서 먼저 발생하는 것을 알 수 있었고, 이로 인하여 출구 압력은 허브에서 더 높았다. 결론적으로 슬랫-슬롯 형상은 같은 비설계지점의 유량 조건에서 유동박리를 지연함으로써 난류 에너지 감소 및 출구 유동영역을 확보하였고 성능을 향상할 수 있었다. 이는 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 성능곡선을 통하여 확인할 수 있고, 기존의 참고 모델에 비해 슬랫-슬롯 임펠러를 적용한 것이 비교적 안정적인 성능을 확보할 수 있으며 박리가 발생한 유량을 기준으로 더 넓은 작동영역을 가진다고 고찰할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 송풍기 내부의 흐름 안정과 난류 운동에너지를 감소시키기 위하여 슬랫-슬롯을 적용한 임펠러 형상을 고안하였으며 수치해석적 연구를 통해 비교 검증을 수행하였다. 그 결과는 다음과 같이 요약되었다.

- 1) 슬랫-슬롯 임펠러 성능에 영향을 미치는 요인은 슬롯의 간격이었으며 형상 변수가 각각 $x_1=3.94$ mm, $t_1=1.05$ mm, $\theta=48^\circ$ 일 때 가장 좋은 성능을 보였고, 이 모델은 참고 모델보다 출, 입구에서의 전압 차이가 큰 것으로 확인되었다.

- 2) 참고 모델의 특정 유량계수(ϕ)의 값($\phi \geq 0.3$, $\phi \leq 0.15$)에서 유동 분리를 확인할 수 있었고, 이 분리는 역압력 구배로 인한 감속 영역으로써 효율 저하의 원인이 됨을 알 수 있었다.
- 3) 슬랫-슬롯 모델은 특정 유량계수(ϕ)의 값($\phi \geq 0.3$, $\phi \leq 0.15$)에서 선회류가 소멸 혹은 감소되었고, 이는 슬롯으로 유입된 공기가 추가적인 관성력을 전달하여 압력면에서 attached flow를 강화함으로써 유동의 분리를 지연시킨 것을 알 수 있었다.

향후 최적 설계 기법의 적용과 유효성 검증을 위해 실험적 연구결과와 비교할 수 있기를 기대한다.

References

- (1) Fowler, H. S., (1980), The Influence of Blade Profile and Slots on the Performance of a Centrifugal Impeller
- (2) Kang, S. H., Hu, S., (1998), "Performance of NACA 65-810 Radial Airfoil Impellers", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 1, No .5, pp. 24~31.
- (3) Pan, X., Xinyuan, C., Jianghong, D., Liangcai, Z., & Feng, Z., (2021), Application of slotted blade in the improvement of turbomachinery performance. AIP Advances, 11(4), 045017.
- (4) Rong, R., Cui, K., Li, Z., & Wu, Z., (2015), Numerical study of centrifugal fan with slots in blade surface. Procedia Engineering, 126, 588-591.
- (5) Ni, Z., Dhanak, M., & Su, T. C., (2019), Improved performance of a slotted blade using a novel slot design. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 189, 34-44.
- (6) Pott-Pollenske, M., Alvarez-Gonzalez, J., & Dobrzynski, W., (2003), Effect of slat gap/overlap on farfield radiated noise. In 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit p. 3228.
- (7) Shin, Y. H., Kim, K. H., & Son, B. J. (1998), Experimental study on impeller discharge flow of a centrifugal compressor. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 10(4), 483-494.