

가변의 축류 송풍기의 최적 설계 및 성능 특성

이찬*† · 김성룡* · 김승욱** · 변현택*** · 양상호****

The Optimal Design and Performance Characteristics of a Variable-pitch Axial Flow Fan

Chan Lee*†, Sung Yong Kim*, Seung Wook Kim**, Hyun Taek Byun***, Sang Ho Yang****

Key Words : Axial Flow Fan(축류 팬), Blade design angle(익렬 설계각), CFD Modelling(전산유체역학 모형화), Design Optimization(설계 최적화), Fan Efficiency(팬 효율), Performance Prediction(성능 예측), Variable-pitch Operation(가변의 운전)

ABSTRACT

This study proposes an optimal design method for the three-dimensional shape design of an axial flow fan and applied it to the design of a variable-pitch fan impeller. The FANDAS program developed by the authors is used as the design model for the optimal design, and hybrid metaheuristic algorithm is used as the optimization technique. As for the design variables of the fan impeller, the chord lengths, the camber angles and the setting angles at hub, mid-span and tip locations are handled, the problem of maximizing fan efficiency is constructed using design variables, and a number of design constraints are used. For an impeller obtained through the optimal design, the effects of improving the fan efficiency through optimization are examined by comparing the optimal design results with the initial design results. The reliability of this optimal design is verified through CFD modeling for the optimal impeller, and furthermore, the changes in total pressure, efficiency, and power of the fan during the variable-pitch operation are predicted through CFD calculation when the outlet guide vane is attached to the optimal impeller, and the change in the fan performance characteristics due to the variable-pitch operation is examined.

1. 서론

축류 팬은 많은 산업, 상업 및 주거 설비에서 적절한 유량과 압력의 공기를 공급하는 데 필수적인 기계이다. 현대 산업사회에서는 많은 수의 팬들이 다양한 적용 분야에서 사용되고 있으므로 그에 따른 팬의 전력 소모량도 매우 큰 것으로 보고되고 있다. 최근 들어 전 세계적으로 관심이 집중되고 있는 탄소중립 문제는 모든 기계 및 설비들의 고효율 설계 및 운전을 요구하고 있으며⁽¹⁾, 이러한 맥락 하에 축류 팬의 경우도 고효율화를 위한 설계 최적화 기술, 인버터 및 가변의 운전 기술 등이 활발히 개발, 적용되고 있다.

축류 팬의 고효율 설계를 위해서는 공기역학적으로 우수한

팬 회전차 날개 (impeller blade)의 3차원 형상을 결정하는 것이 우선적인 과제이며, 이를 위해서 다양한 팬 설계 이론 및 방법들이 제안, 적용되었다. 널리 알려진 고전적인 팬 회전차 날개 설계 방법은 자유 와류 (free vortex), 강제 와류 (forced vortex) 또는 혼합 와류 (combined vortex)의 설계 개념을 이용하여 3차원 회전차 날개 형상을 결정하는 방법들이 있으며^(2,3), 이 방법들은 단순하고 사용하기 쉬운 장점을 가지나 회전차 날개의 날개길이 방향에 따른 회전차 날개 각도 및 곡면의 효과를 팬 설계에 다양하게 반영할 수 없는 단점이 있다. 이러한 기존 방법들의 단점을 보완하기 위해 제안된 방법들이 제어 익렬 설계 (controlled blading design) 방식들로써 회전차 날개 단면 (blade section)의 캠버각, 설치각 및 시

* 수원대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, University of Suwon)

** 피도텍(PIDOTEC)

*** 경원테크(KW Tech.)

**** 삼원 E&B(Samwon E&B)

† 교신저자, E-mail : clee@suwon.ac.kr

위 길이 같은 설계 변수들의 최적화를 통해서 해당 회전차 날개의 양력계수 (lift coefficient), 확산 계수(diffusion factor) 또는 압력손실계수 (total pressure loss coefficient)와 같은 공기역학적 인자들을 조절하여 궁극적으로 고성능, 고효율의 팬을 설계하는 방식이다. Wallis⁽⁴⁾는 유동각과 회전차 날개 단면 양력계수의 상관관계를 이용하여 가변의 축류 팬의 회전차 날개를 설계하는 방법을 제안하였다. Spuy와 Backstrom⁽⁵⁾는 가변의 회전차 전용 축류 팬의 출구 운동에너지를 최소화하기 위한 최적의 팬 회전차 날개 각도 분포를 구하였다. Lee⁽⁶⁾는 축류 팬 설계를 위해서 회전차 날개의 날개 길이 방향에 따라 회전차 날개 단면의 캠버각, 설치각 및 시위 길이를 설계 변수들로 정의하여, 서로 다른 팬 회전차 날개 설계 방법에 따른 팬의 성능 특성들을 비교하였다. 그러나 앞서 언급한 제어 익렬 설계 방법들은 대부분 2차원 설계 이론 및 캐스캐이드 실험 결과들에 근거하므로, 이 방법에 의해 설계된 회전차 날개 단면들이 종합되어 3차원 회전차 날개 형상을 만들고 우수한 팬 성능과 효율을 가지려면 각 회전차 날개 단면 설계들을 종합함에 있어서 최적화의 개념과 방법이 요구된다^(7,8).

따라서 본 연구에서는 앞서 언급한 제어 익렬 설계 방법을 최적화 기법과 결합하여, 회전차 날개 단면 설계들을 효과적으로 결합하여 3차원 형상의 팬을 설계하고 설계된 축류 팬의 효율 최대화를 수행하였다. 이를 위하여 제어 익렬 설계 방식에 의해 3차원 팬 회전차 날개 형상을 구성하고 팬의 성능을 예측할 수 있는 설계 프로그램을 소개하고, 본 설계 프로그램에 적용한 최적화 기법 및 과정을 설명하였다. 본 연구에서 제안된 설계 최적화 방법을 가변의 축류 팬 회전차 설계에 적용하였고, 최적의 설계 결과를 초기 설계 결과들과 비교하여 최적화를 통한 팬 효율의 향상 효과를 검토하였다. 더 나아가 최적 설계된 팬 회전차에 출구 안내 깃이 결합된 가변의 팬에 대해 CFD 기법을 적용하여 가변의 운전조건에 따른 팬의 전압, 효율 및 동력의 특성을 예측하고 비교하여 가변의 운전이 팬에 미치는 영향을 규명하였다.

2. 팬 설계 및 성능예측 방법

본 연구에서 사용된 설계 프로그램은 저자들에 의해 개발된 FANDAS 프로그램⁽⁹⁾으로서 3차원 팬 회전차 날개 형상 설계 및 그에 따른 성능 예측이 가능하다. 본 연구의 설계 방법 및 성능 예측 방법에 대한 소개는 다음과 같다.

2.1 팬 설계 방법

Fig. 1에서 도시된 것처럼, 3차원 팬 형상 설계는 회전차 날개의 날개길이 방향으로 단면 (blade section)들의 설계를 수행하고 설계된 단면들을 날개길이 방향으로 축적 (spanwise stacking)하여 이루어진다.

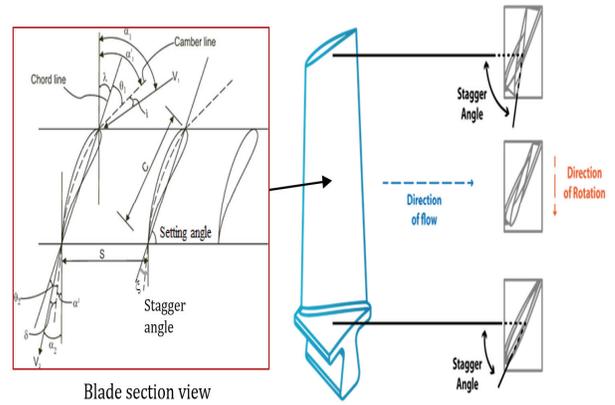


Fig. 1 Blade section and its design parameters

본 연구에서는 회전차 날개 단면 설계를 위하여 제어익렬 설계 방식을 채택하였고, 설계 변수로는 캠버각 (camber angle, θ_c), 설치각 (setting angle, μ) 및 시위길이 (chord length, c)를 고려하였다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 캠버각, 설치각 그리고 시위 길이가 주어지면 다음의 식들로부터 회전차 날개 단면의 전연 (leading edge)에서의 각도(α_1)와 후연 (trailing edge)에서의 각도(α_2)가 구해지며,

$$\theta_c = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (1)$$

$$\mu = \pi/2 - \xi, \quad \tan \xi = (\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2)/2 \quad (2)$$

이때 ξ 는 엇갈림각 (stagger angle)을 나타내며, 참고로 허브에서의 설치각이 회전차 날개의 피치각 (pitch angle)이다.

또한 회전차 날개 전연에서 입사각 (incidence angle, i) 은 다음과 같이 정의되며

$$i = \alpha_1 - \alpha_i \quad (3)$$

여기서 α_i 은 회전차 날개 입구의 유동각을 의미한다.

전연과 후연을 잇는 캠버선 (camber line)은 단일원호 (single circular arc)로 구해지고 캠버선 위에 NACA6309 에어포일 두께 분포 (thickness distribution)를 쌓아서 회전차 날개 단면 설계를 완성한다.

2.2 팬 성능 예측방법

본 연구에 사용된 성능 예측 방법은 설계된 팬 회전차 날개를 통과하는 공기의 유동에 대해 관통류 해석을 수행하여 구해진 유동장 계산 결과를 질량 평균하여 팬의 유량, 압력, 효율 및 동력을 산출하는 방식이다 (Fig. 2 참조). 본 연구의 관통류 해석에 사용된 모델들에 대한 상세한 설명은 참고문헌⁽¹⁰⁾에 상세히 기술되어 있다.

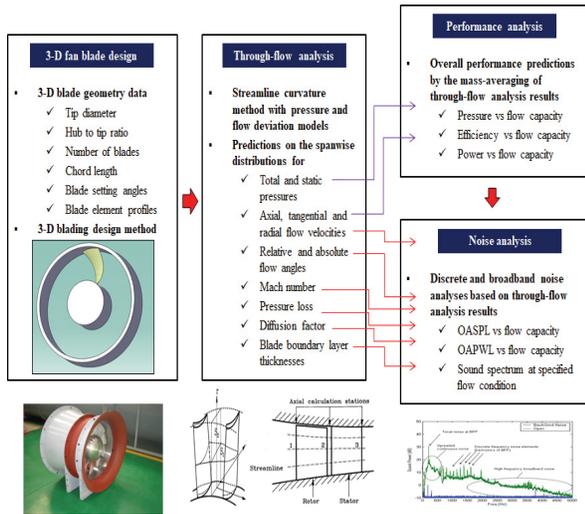


Fig. 2 Performance prediction method for axial flow fan

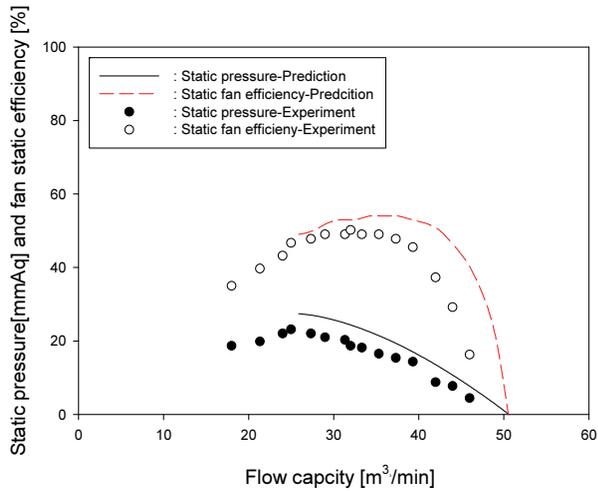


Fig. 3 Pressure and efficiency curves of axial flow fan

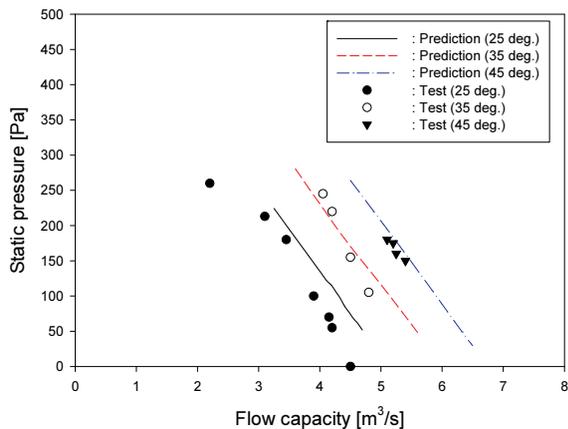


Fig. 4 Pressure curves of variable-pitch axial flow fan

본 성능 예측 방법에 의한 예측 결과와 측정 결과^(11,12) 간의 비교를 Figs. 3과 4에 나타내었다. 참고로 본 연구에서

비교 대상으로 삼은 측정 결과는 DIN24163에 따른 챔버형 시험설비⁽¹¹⁾와 BS848에 따른 D유형의 시험설비⁽¹²⁾에 의해 측정된 결과이다. 본 방법의 예측 결과가 실제 팬들의 전압이나 효율 측정 결과와 잘 일치함을 알 수 있으며 이러한 비교 결과들로부터 본 연구에 사용된 FANDAS 프로그램이 팬 설계 최적화를 위한 설계 모듈로 적합한 것으로 판단된다.

3. 설계 최적화 방법 및 결과

본 연구에서는 가변의 축류 팬 설계를 위하여 최적 설계 문제를 구성하였고 그때 적용된 최적화 방법 및 최적화를 통해 얻어진 설계 결과들은 다음과 같다.

3.1 최적화 문제 구성 및 방법

본 최적화의 목적은 축류 팬 회전차 (impeller)의 전압 효율을 최대화하는 것으로 설정하였고 이때 설계 변수로는 회전차의 날개길이 방향에 따른 캠버각, 설치각 및 시위 길이에 대해 총 13개의 설계 인자들을 다루었다. 또한 팬 설계를 위한 실제적인 제한 조건들 (constraints)도 최적화 문제에 반영하였다. 본 최적화 문제의 목적 함수 (objective function) 및 설계 변수들은 다음과 같다.

$$\text{Maximize } \eta_T = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_{13}) \quad (4)$$

이때 X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 는 회전차 날개 스펠 0, 25, 50, 75, 100 % 지점에서의 캠버각, $X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}$ 은 회전차 날개 스펠 0, 25, 50, 75, 100 % 지점에서의 설치각, X_{11}, X_{12}, X_{13} 은 회전차 날개 스펠 0 % 허브 (hub), 50 % 중간범위 (mid-span), 100 % 팁 (tip) 지점에서의 시위 길이를 의미한다.

최적화 시 사용된 14개의 설계 제한 조건들은 식 (5)-(9)에 정리되어 있으며,

$$600 < p_T < 700 [Pa] \quad (5)$$

$$0 < X_1, X_2, \dots, X_9, X_{10} < 90 [\text{deg.}] \quad (6)$$

$$0.3 < \frac{X_{11}}{(2\pi r_h/Z_b)} < 2.5 \quad (7)$$

$$0.3 < \frac{X_{12}}{(2\pi r_m/Z_b)} < 2.5 \quad (8)$$

$$0.3 < \frac{X_{13}}{(2\pi r_t/Z_b)} < 2.5 \quad (9)$$

이때 p_T 는 팬 회전차의 설계 전압, r_h, r_m, r_t 는 회전차의 허브, 중간범위, 팁의 반경, z_b 는 회전차 날개의 수를 나타낸다. 본 연구의 r_h, r_t 및 z_b 는 각각 0.25 m, 0.76 m 및 13이고, 팬의 회전수는 1200 rpm이다. 참고로 식 (5)는 설계 전압의 허용범위를, 식 (7)–(9)는 회전차 날개의 익률 충실도 (solidity)의 설계 제한조건을 표현하고 있다.

앞서 기술한 최적화 문제의 해결을 위해 팬 회전차의 설계 및 성능 예측은 FANDAS 프로그램을 사용하였고, FANDAS 설계/예측 결과들에 대해 하이브리드 메타휴리스틱 알고리즘 (hybrid metaheuristic algorithm) 의 최적화 기법을 적용하여 최적 설계해 (optimal design solution)를 구하였다. 본 연구에 사용된 최적화 기법에 대한 설명은 참고문헌(7,13,14)에 상세히 기술되어 있다.

3.2 최적 설계 결과 및 검토

본 최적화 연구를 통해 얻은 최적 설계 변수들을 Table 1에 정리하였고, 초기 설계 (initial design) 값들과 비교하였다. 참고로 최적 설계의 비교 대상인 초기 설계는 설계 전압 600 Pa의 조건에서 자유 와류 방식으로 설계된 경우이다.

최적 설계 변수들이 효율 향상에 미치는 설계 민감도 분석 결과에 의하면, 캠버각, 설치각, 시위길이 순으로 효율에 영향을 미친다. 캠버각은 X_3, X_2, X_5, X_4, X_1 순으로 설계 변수의 증가에 따라 효율이 향상되며, 설치각은 $X_{10}, X_8, X_9, X_6, X_7$ 순으로 설계 변수의 증가에 따라 효율이 향상된다. 또한 허브 시위길이 (X_{11})의 증가는 효율 향상을, 팁이나 중간범위 시위길이들 (X_{13}, X_{12})의 감소는 효율 향상을 가져옴을 알 수 있다. 본 연구의 설계민감도 분석 방법 및 기준에 대한 설명은 저자들의 이전 논문(14)에 상세히 기술되어 있다.

Table 1 Optimal design results

Design variable	Initial design	Optimal design
X_1 [deg.]	14.69	17.89
X_2 [deg.]	8.96	13.52
X_3 [deg.]	6.36	11.36
X_4 [deg.]	5.10	8.73
X_5 [deg.]	4.48	7.38
X_6 [deg.]	49.00	53.80
X_7 [deg.]	38.65	42.20
X_8 [deg.]	31.90	33.38
X_9 [deg.]	26.72	27.29
X_{10} [deg.]	23.92	23.94
X_{11} [m]	0.240	0.150
X_{12} [m]	0.240	0.162
X_{13} [m]	0.240	0.219

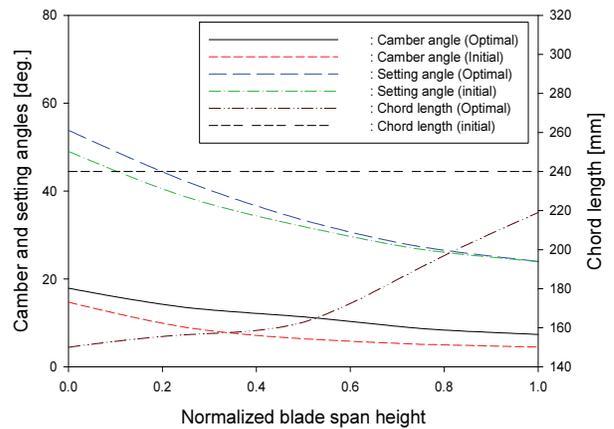


Fig. 5 Chord length, camber and setting angles of axial flow fans

최적화를 통해 얻은 설계 변수들 (캠버각, 설치각 및 시위길이)에 대한 회전차 날개길이 방향의 분포들이 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 최적의 캠버각은 초기 설계에 비해 전 스패 영역에 걸쳐 큰 경향을 보이며 이러한 결과는 최적 설계가 초기 설계에 비해 좀 더 높은 압력으로 설계되었음을 의미한다. 최적 설치각은 초기 설치각에 비해 허브에서 중간범위까지 영역에서 다소 높다. 그리고 최적의 시위 길이는 일정한 시위 길이를 가지는 초기 설계와 비교할 때 허브에서 팁으로 갈수록 증가하는 경향을 보인다.

본 최적 설계의 회전차 전연에서 설계 입사각 분포가 Fig. 6에 나타나 있다. 설계 입사각이 0도로 설계된 초기 설계에 비해 최적 설계는 중간범위 영역에서 -3도 정도의 설계 입사각을 가지도록 회전차가 설계되었음을 알 수 있다. Fig. 7은 최적 및 초기 설계안의 중간범위 지점에서 설계 입사각들을 팬 설계에 사용된 NACA 6309 익형의 형상저항 계수 곡선 (profile drag coefficient curve)상에 비교하고 있다(15). Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 최적 설계안은 설계점에서 부터 양의 실속 (positive stall) 한계까지 약 11도 정도의 입사각 범

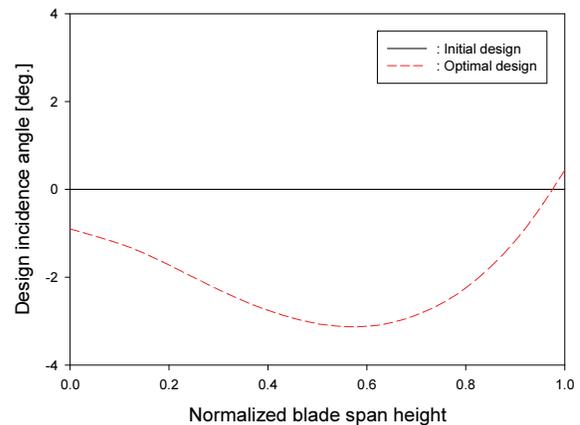


Fig. 6 Design incidence angle distributions of axial flow fans

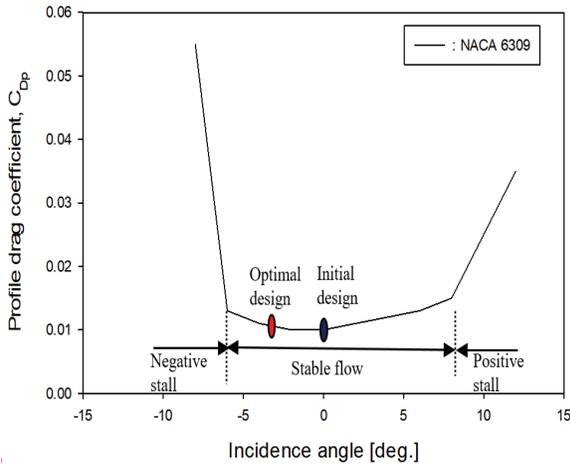


Fig. 7 Profile drag coefficient curves of axial flow fans

위를 가지며 이러한 범위에서는 비교적 낮은 압력 손실과 안정적인 유동을 확보하므로, 최적 팬 모델의 유량을 감소시키면 (또는 입사각을 증가시키면) 초기 설계에 비해 좀 더 높은 효율을 유지하며 실속이나 서지 같은 현상도 좀 더 낮은 유량 조건에서 발생하는 특성을 보일 것으로 예상된다.

Fig. 8은 본 연구에 의해 얻어진 최적 팬 회전차의 단면 설계들을 보여주고 있으며, Table 2는 최적 설계에 의한 팬 회전차의 성능 특성을 초기 설계와 비교하고 있다. Table 2에서 볼 수 있듯이, 최적 설계를 통해 얻어진 팬의 전압 및 효율이 초기 설계에 비해 89 Pa, 4.5 %만큼 증가되고 있다.

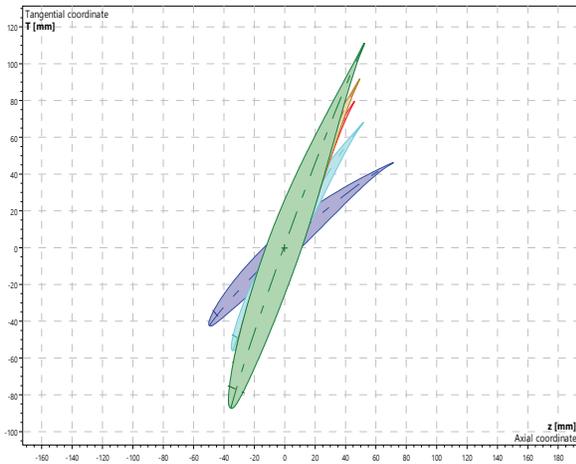


Fig. 8 Blade section designs of optimal fan impeller

Table 2 Performance data of optimal fan impeller

Parameter	Initial design	Optimal design
Flow [m ³ /min]	3,300	3,300
Pressure [Pa]	600	689
Efficiency [%]	79.1	83.6
Power [kW]	41.7	45.3

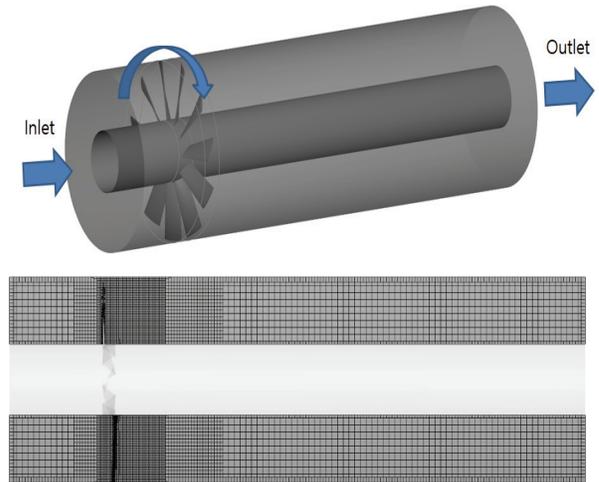


Fig. 9 Computational domain and mesh system of optimal fan impeller

4. 최적 설계 결과 검증 및 가변의 팬 적용

본 연구에서 얻어진 최적 회전차의 설계 결과를 검증하기 위하여 최적 회전차에 대해 CFD 모델링 및 전산 모사를 수행하였다. 수치 계산을 위해 SIMERICS MP 코드를 사용하였고, MRF scheme 과 $\kappa-\epsilon$ 난류 모델을 채택하였다⁽¹⁶⁾. Fig. 9는 본 연구에서 사용된 CFD 모델의 계산 영역과 격자계를 보여주고 있으며, 격자계는 다면체 세포 (polyhedron cell)를 사용하였고 격자의 수는 약 120만 개다.

더 나아가, 최적 회전차에 대한 CFD 계산을 통해 설계 결과의 검증을 마친 후, 본 연구는 최적 회전차를 삼원 E&B의 허브 설계에 맞추어 장착하고 회전차 후방에 삼원 E&B의 기존 출구 안내 깃 (OGV: Outlet Guide Vane)을 설치하여 가변의 축류 팬을 구성하였고, 회전차의 피치각 변화에 따른 가변의 축류 팬의 전압, 효율, 동력 곡선들을 SIMERICS MP⁽¹⁶⁾ 및 ANSYS CFX⁽¹⁷⁾ 코드와 최적 회전차에 사용한 CFD 기법들을 사용하여 예측하였다. 이때 출구 안내 깃은 기존의 유사한 팬에 사용된 날개길이 방향으로 일정한 캠버와 두께를 가지는 곡면 판 (curved plate) 이다.

Figs. 10과 11은 본 연구에서 사용한 CFD 모델의 해석 영역, 격자 시스템 (격자수: 약 330만개)과 전압력 분포를 보여주고 있으며, 최적 회전차에서 압력이 상승하고 후방의 출구 안내 깃을 거치며 압력이 다소 저하되는 현상을 보인다.

Figs. 12, 13과 14는 최적의 회전차가 적용된 축류 팬의 전압력, 효율과 동력 곡선들을 보여주고 있다. 최적의 회전차만이 작동하고 피치 각의 변화가 없는 경우 (Dpitch = 0 도 & impeller only)에 대해 CFD 방법으로 예측된 결과들이 최적 설계 결과들 (Optimal design & impeller only)과 매우 잘 일치하고 있으며, 이러한 결과들로부터 본 연구의 최적 설계 방법의 신뢰성을 확인할 수 있다.

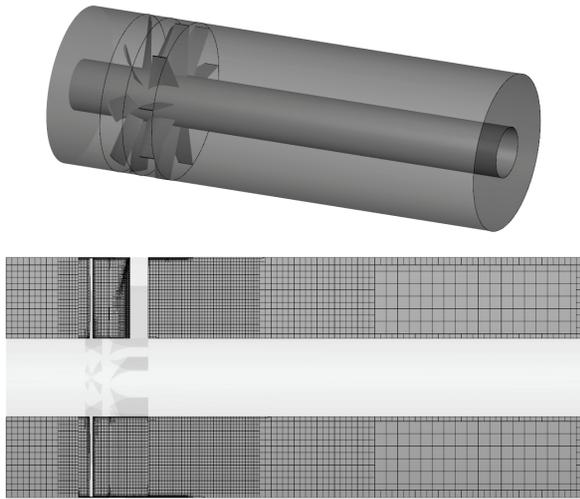


Fig. 10 Computational domain and mesh system of optimal fan impeller and outlet guide vane



Fig. 11 Total pressure distribution of optimal fan impeller and outlet guide vane

최적 설계된 회전차의 후방에 삼원 E&B 의 기존 출구 안내 깃을 설치하고, 회전차 피치각을 최적 설계 피치각 (Fig. 5 참조) 으로부터 -8, -4, +4, +8 도 조정할 때 팬의 전압, 효율 및 동력 특성이 Figs. 12, 13 및 14에 나타나 있다. 회전차만 설치된 경우 (Dpitch = 0 도 & impeller only)와 회전차와 출구 안내 깃이 같이 설치된 경우 (Dpitch = 0 도 & impeller+OGV)의 예측 결과 간의 차이는 출구 안내 깃의 압력 손실에 기인하는 것으로 보여진다. 이러한 압력 손실은 추후에 최적 회전차에 적합한 새로운 익형 출구 안내깃을 설계하여 설치하면 상당 부분 줄어들 것으로 기대된다.

Figs. 12, 13과 14에서 보여지듯이, 피치각의 변화가 양의 방향으로 증가할수록 팬의 유량 범위가 확대되고, 동력은 증가하며 효율은 다소 감소하는 추세를 보인다. 그러나 피치각의 변화를 가지는 가변의 축류 팬은 피치각이 고정된 축류 팬에 비해 넓은 유량 범위에서 비교적 일정한 압력과 높은 효율을 유지하며 사용될 수 있음을 알 수 있다. 특히 낮은 피치각과 유량 조건에서 팬의 효율이 향상되는 경향은, 앞서 Figs. 6과 7에서 살펴본 바와 같이, 본 연구의 최적 회전차가 음의 입사각을 가지고 설계된 관계로 낮은 유량 범위에서도 우수한 효율 특성을 보이는 것으로 판단된다.

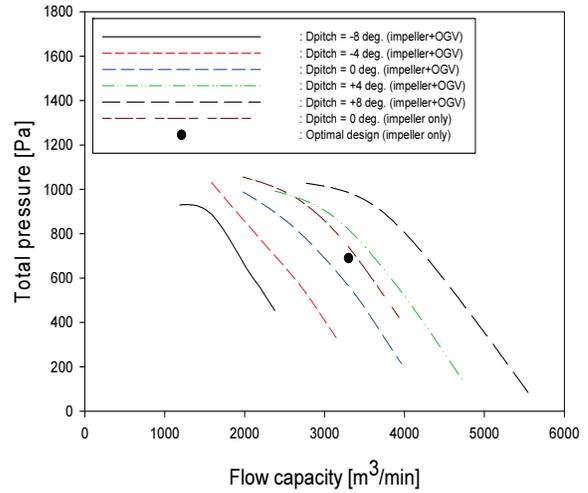


Fig. 12 Total pressure curves of a variable-pitch axial flow fan

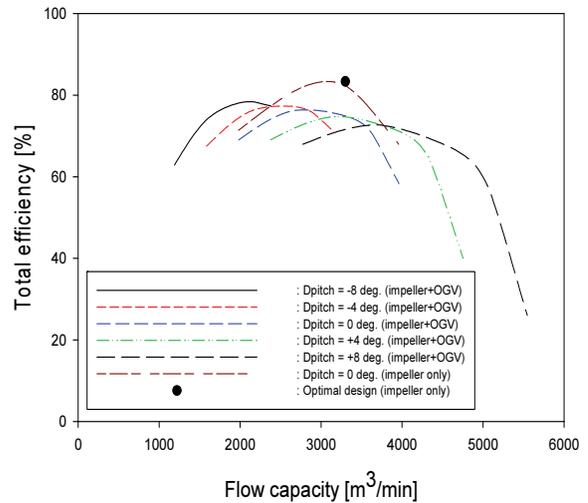


Fig. 13 Efficiency curves of a variable-pitch axial flow fan

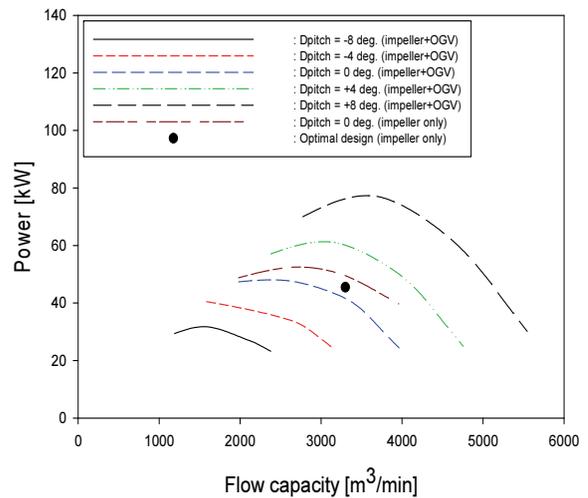


Fig. 14 Power curves of a variable-pitch axial flow fan

5. 결 론

본 연구는 고효율 가변의 축류 팬의 개발을 위한 최적 설계 방법과 과정을 제시하였다. 축류 팬의 3차원 형상 설계는 회전차 날개 단면 설계를 수행하여 날개길이 방향으로 축적하여 이루어지고, 설계된 팬의 성능 예측은 관통류 해석을 통해 이루어지도록 설계 프로그램을 구성하였다. 본 연구에서 제안된 설계 프로그램과 최적화 기법을 결합하여 회전차 날개의 최적 캠버각, 설치각 및 시위 길이 분포를 구하였고, 최적 회전차는 초기 설계에 비해 4.5 %의 효율 향상을 보여 주었다. 더 나아가, 본 연구에서는 CFD 모델링 및 전산모사를 통하여 최적 설계 결과의 신뢰도를 확인하였고, 최적 회전차와 출구 안내 깃을 결합하고 회전차의 피치각을 변화시킴으로써 넓은 유량 범위에서 작동하면서, 피치각이 고정된 팬에 비해 상대적으로 효율이 높은 가변의 팬의 구현이 가능하였다. 또한 본 연구의 최적 회전차는 낮은 유량의 운전조건에서 더욱 좋은 효율을 보임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2021202080026B).

References

- (1) G. Benson et al., 2003, Improving Fan System Efficiency, US Department of Energy.
- (2) S. L. Dixon, 1998, Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, 4th edition, Butterworth & Heinemann.
- (3) H. Cohen, G.F.C. Rogers, R. Stranznicky, H.I.H. Saravamuttoo and A. Nix, 2017, Gas Turbine Theory, Pearson.
- (4) R. A. Wallis, 1983, Axial Flow Fans and Ducts, 2nd edition, John Wiley & Sons.
- (5) S. J. Spuy and T. W. Backstorm, 2002, "Performance of rotor-only axial fans designed for minimum exit kinetic energy," R&D Journal, Vol.18, pp. 63-69.
- (6) C. Lee, 2016, Integrated computer program for design, performance and noise analyses of automotive cooling axial flow fans, Technical report, Hanon systems.
- (7) S.W. Kim, B.L. Choi, D.H. Choi, C. Lee and S.H. Yang, 2022, "A study on a screening method for dimensionality reduction of large fluid machine optimization problems," The KSFM J. of Fluid Machinery, Vol. 25, pp. 48-54.
- (8) S.W. Kim, B.L. Choi, D.H. Choi, C. Lee and S.H. Yang, 2023, "Multi-objective design optimization and data analysis considering the efficiency and variable environment of an axial fan," The KSFM J. of Fluid Machinery, Vol. 26, pp. 143-151.
- (9) FANDAS user manual, 2023, Kyungwon Tech.
- (10) C. Lee, 2021, "A performance prediction method of the axial flow fans with blade sweep," The KSFM J. of Fluid Machinery, Vol. 24, pp. 24-29.
- (11) K. Bamberger and T. Carolus, 2012, "Optimization of axial fans with highly swept blades with respect to losses and noise reduction," FAN2012 proceedings.
- (12) J. van der Spuy, 1997, "The Design of a Low-Noise Rotor-Only Axial Flow Fan Series," Master of Engineering Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Stellenbosch.
- (13) PIAO User manual, 2023, PIDOTEC.
- (14) S.W. Kim, B.L. Choi, D.H. Choi, C. Lee and S.H. Yang, 2022, "Design Optimization of an Axial Fan with Parameters and Establishment of Data Analysis Process," KSFM J. of Fluid Machinery, Vol. 25, pp. 23-29.
- (15) N. J. Eastman, E.W. Kenneth and M.P. Robert, 1935, The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel, NACA report No. 460.
- (16) SIMERICS MP user manual, 2023, Kyungwon Tech.
- (17) ANSYS CFX user manual, 2023, ANSYS Inc.