

시로코팬 설계용 프로그램의 개발 및 응용에 대한 연구 A Study on the Development and Application of a Design Program for Sirocco Fan

김장권*† · 오석형**
Jang-Kweon Kim*† and Seok-Hyung Oh**

(Received 13 January 2021, Revised 1 March 2021, Accepted 19 March 2021)

Abstract : This study deals with the process of developing a computer program based on the design theory of sirocco fan with forward-curved blades. Also, the developed sirocco fan design program was based on experimental performance data. Here, each model of sirocco fan shows an accuracy of less than $\pm 6.15\%$ in the experimental and calculated values for shaft power, static pressure efficiency, and total efficiency, respectively. As a result, this fan design program shows a good performance result that can be easily utilized in terms of economy and convenience, and is expected to be a very useful design tool.

Key Words : Contraction coefficient, Forward-curved blade, Pressure loss factor, Single circular blade, Sirocco fan

— 기 호 설 명 —

- | | |
|--|---|
| A : 임펠러(impeller) 흡·토출 단면적 [m^2] | N : 회전수 [rpm] |
| B_s : 케이싱(casing) 폭(깊이) [m] | n_s : 비속도($=N\sqrt{Q}/H^{3/4}$) [$m^3/min, m, rpm$] |
| b : 임펠러 깃(익, blade) 폭(깊이) [m] | p_s : 정압 [mmH ₂ O] |
| D : 임펠러 직경 [m] | p_t : 전압 [mmH ₂ O] |
| g : 중력가속도 [m/s^2] | P_{th} : 깃 수 한정된 조건의 이론전압 [mmH ₂ O] |
| H : 전양정 [m] | $P_{th\infty}$: 깃 수 무한정 조건의 이론전압 [mmH ₂ O] |
| h_c : 캠버(camber) 최대높이 [m] | Q : 유량 [m^3/min] |
| L_{sh} : 축동력 [W] | Q_{th} : 이론유량 [m^3/min] |
| ℓ : 깃 현(chord)길이 [m] | R : 임펠러 반경 [m] |
| m : 현길이에 대한 깃 최대높이 비 | R_s : 설단(cutoff) 곡률반경 [m] |
| | s : 설단부 틈새 [m] |

*† 김장권(ORCID:http://orcid.org/0000-0003-0412-023X) : :
교수, 군산대학교 마린엔지니어링 전공
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848
**오석형(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-2012-5084) :
교수, 군산대학교 기계융합시스템공학부

*† Jang-Kweon Kim(ORCID:http://orcid.org/0000-0003-0412-023X)
: Professor, Major of Marine Engineering, Kunsan National
University.
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848
**Seok-Hyung Oh(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-2012-5084)
: Professor, School of Mechanical Convergence System
Engineering, Kunsan National University.

- t_θ : 원주방향의 날개두께 [m]
- u : 접선속도(tangential velocity) [m/s]
- v : 절대속도(absolute velocity) [m/s]
- v_m : 반경방향(radial) 절대속도 [m/s]
- v_u : 접선방향 절대속도 [m/s]
- w : 상대속도(relative velocity) [m/s]
- Z : 임펠러 깃 수 [-]
- α : 유동각도 [°]
- α_c : 케이싱 팽창각도 [°]
- β : 깃 각도 [°]
- ΔL_{df} : 디스크(disk) 마찰손실동력 [W]
- ΔL_m : 기계손실동력 [W]
- ΔL_{rec} : 재순환 손실동력 [W]
- δ_b : 케이싱과 임펠러 사이 틈새 [m]
- δ_i : 벨마우스(bellmouth) 입구 틈새 [m]
- ϵ : 속도계수(또는 미끄럼 속도) [-]
- $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$: 압력손실계수 [-]
- η_s : 정압효율 [%]
- η_{hyd} : 수력효율 [%]
- η_{mec} : 기계효율 [%]
- η_s : 정압효율(= $p_s Q / L_{sh}$) [%]
- η_{tot} : 전압(총)효율 [%]
- η_{vol} : 체적효율 [%]
- θ : 케이싱 전개각도 [°]
- θ_a : 깃 취부각도 [°]
- θ_c : 설단 각도 [°]
- θ_A, θ_B : 깃 휨(deflection) 각도 [°]
- ρ : 밀도 [kg/m^3]
- μ_c : 수축계수(contraction coefficient) [-]
- ν_a : 동점성계수 [m^2/s]
- ϕ : 유량계수 [-]
- ω : 각속도 [s^{-1}]

하첨자

- 0 : 벨마우스{또는 오리피스(orifice)}
- 1 : 임펠러 깃 입구

- 2 : 임펠러 깃 출구
- 3 : 한정된 깃 수

1. 서 론

시로코팬(sirocco fan)은 다익(multi-blade) 팬으로도 불리며, 그 주요 특징은 흡입·토출의 직경비와 깃 폭(깊이)이 상대적으로 커서 다수의 전경깃(forward-curved blade)을 갖는 것으로 지금까지 잘 알려져 있다.¹⁾ 따라서 이 팬은 상대적으로 많은 유량을 확보할 수 있으며, 압력대비 소음에 유리하고, 큰 유효양정을 발휘하므로 각종 환기시설이나 에어컨 등에서 많이 사용되고 있다.²⁾

지금까지 각종 팬(fan)들의 설계 원리는 Balje, Eckert, Erk, Galva, Pfeleiderer, Stepanoff 등¹⁻⁵⁾에 의해 주도적으로 발전되어 왔다. 그러나 산업현장에서는 아직도 경험을 바탕으로 한 팬 설계방법에 주로 의존하고 있으며, Erk¹⁾, Ikui 등²⁾이 저술한 각종 팬의 설계이론 문헌들을 참조하고 있는 실정이다. 그런데 이들 문헌에서 다루는 내용들은 너무나 다양하고, 포괄적이며, 추상적으로 산만하게 나열되어 있기 때문에, 실제 해당 팬들을 구체적으로 설계할 때에는 각 문헌들에 흩어져 있는 관련내용들¹⁻⁵⁾을 하나로 모아 일련의 설계과정을 만들어야 할 필요가 있다.

일찍이 Kim⁶⁻⁹⁾은 저소음 운전을 목적으로 패키지 에어컨(package air-conditioner)에 시로코팬을 새롭게 설계하여 적용한 연구결과들을 발표한바 있다. 또 저자들¹⁰⁾은 실제 다수의 터보팬(turbo fan)을 실험한 공력성능자료를 통해 정확성을 확인하는 터보팬의 설계과정과 전산프로그램을 완성한 논문도 발표한 바 있다.

따라서 이번 연구에서는 시로코팬의 설계경험⁶⁻⁹⁾과 이미 발표한 터보팬의 설계과정¹⁰⁾을 바탕으로 이미 확보된 다수의 공력성능 실험결과들⁶⁻⁹⁾을 이용하여 새로운 시로코팬의 설계과정을 완성하고자 하였다. 또한 시로코팬을 설계하는데 있어, 매번 설계인자들을 수기로 반복 계산하는 비용을 줄이고, 편리성을 갖기 위한 설계용 전산프로그램도 만들고자 한다.

2. 시로코헨 설계이론

2.1 임펠러 설계¹⁻⁵⁾

Fig. 1은 시로코헨의 회전운동에 의해 기류가 임펠러를 빠져나갈 때, 입구 및 출구에서 형성된 속도 3각형의 구성제원들을 나타낸 그림이다. 먼저, 시로코헨 설계에 필요한 이론적 수식의 전개는 임펠러가 무한정한 깃 수를 갖는 반면, 깃 두께는 무시할 수 있다는 깃 수 무한이론으로부터 출발한다. 이 외에도 임펠러 깃 사이의 유동은 비점성, 비압축성으로 가정한다. 이에 따라 임펠러 입구와 출구의 유동흐름에 연속방정식과 각운동량이론을 각각 적용하면, 깃 수 무한대의 이론전압 $P_{th\infty}$ 는 식 (1)로 주어진다.

$$P_{th\infty} = \rho(u_2 v_{2u} - u_1 v_{1u}) \quad (1)$$

여기서 케이싱 내 임펠러에 유입되는 기류가 예선회(pre-swirl) 없이 반경방향으로만 형성된다면, 즉 $\alpha_1 = 90^\circ$ 이므로, $v_{1u} = 0$ 이 성립된다. 따라서 식 (1)의 이론 전압은 식 (2)와 같이 주어진다.

$$P_{th\infty} = \rho u_2 v_{2u} \quad (2)$$

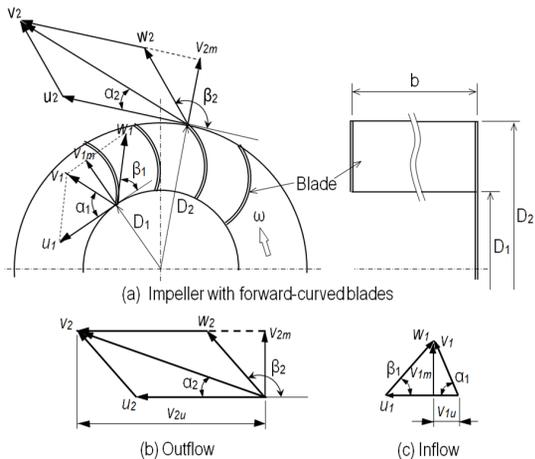


Fig. 1 Velocity triangle configuration for sirocco impeller with forward-curved blades

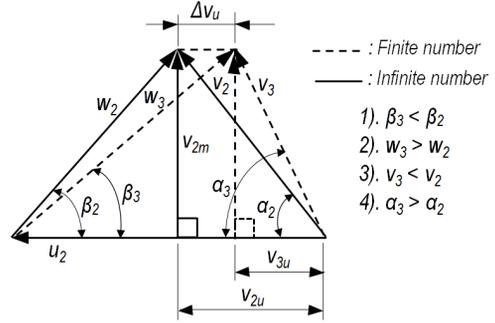


Fig. 2 Comparison of velocity triangles between finite number of blades and infinite ones

그러나 실제 임펠러는 한정된 숫자의 깃들로 지는 결과, 임펠러 회전 시 깃 내에 흐르는 유동 인해 깃 통로가 넓어져 기류의 안내효과가 떨어의 박리 및 지연현상이 발생하며, 또 코리올리력 (Coriolis force)에 의한 2차유동(secondary flow) 등으로 인해 Fig. 2와 같이 절대속도의 감소($v_3 < v_2$)가 초래하게 된다. 이에 따라 무차원 속도계수 (slip factor)인 $\epsilon = v_{3u}/v_{2u}$ 를 도입하면, 깃 수 유한인 흐름의 이론전압 P_{th} 는 식 (3)으로 정의할 수 있다.

$$P_{th} = \epsilon P_{th\infty} = \epsilon \rho u_2 v_{2u} = \rho u_2 v_{3u} \quad (3)$$

한편, Erk¹⁾는 Stodola의 상대순환 개념과 깃 곡률에 따른 영향을 고려하고, 깃 내에서 반경방향의 평균압력은 일정하다는 가정을 단순화시켜 속도계수 ϵ 을 식 (4)로 정의하였다.

$$\epsilon = 1 / \left(1 + \frac{\pi D_2^2 b \sin \beta_2}{8SZ} \right), S = D_2^2 \frac{b}{8} \left\{ 1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

여기서 Erk¹⁾는 고효율 팬을 목적으로 식 (4)에서 $\pi \sin \beta_2$ 를 $a' + b' \beta_2 / 90$ 로 수정하여 속도계수를 식 (5)로 제시하였다.²⁾

$$\epsilon = 1 / \left[1 + \frac{a' + b' \beta_2 / 90}{Z \left\{ 1 - (R_1/R_2)^2 \right\}} \right] \quad (5)$$

한편, Erk¹⁾는 출구각이 $\beta_2 = 20^\circ \sim 170^\circ$ 로 넓은 범위에서 흡입·도출의 깃 깊이(b)가 일정한 웨에 적용하기 위해 많은 실험 자료들을 정리하여 식 (5)에서 $a' = 1.5$, $b' = 1.1$ 로 제시²⁾하였지만, 이번 시로코웨의 연구에서 저자들은 $a' = 0.6$, $b' = 0.2$ 로 새롭게 적용하였다.

2.2 임펠러의 제반손실¹⁻⁵⁾

앞서 언급하였던 속도계수(ϵ)의 개념은 단지 임펠러 내 깃 수만의 영향을 고려한 것이지 임펠러 입구 및 출구에서 발생하는 이론 전압의 감소를 초래하는 제반손실들을 고려한 것은 아니다. 따라서 시로코웨이 설계점(design point)에서 작동할 때, 무충돌유입(shock-free entrance) 조건에서 발생할 수 있는 모든 제반손실들을 고려하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

첫째로 기류의 임펠러 유입손실은 기류가 깃 통로로 들어가기 전, 축방향으로 향하던 기류가 약 90° 로 방향 전환하면서 임펠러로 유입 시 발생하는 압력손실로서 Eckert^{2,5)}는 식 (6)으로 제시하였다.

$$\Delta p_1 = \zeta_1 \rho \frac{v_{1m}^2}{2}, (\zeta_1 \doteq 0.15 \sim 0.25) \quad (6)$$

둘째로 깃 통로 유동손실은 깃 통로 내에서 점성의 영향으로 발생하는 표면마찰과 유동박리 및 지연에 의해 발생하는 압력손실로서 Eck^{1,2)}는 식 (7)로 제시하였다.

$$\Delta p_2 = \rho C_f \left[\frac{\{Z\ell b + \pi(R_2^2 - R_1^2)\}}{\pi D_1 b \sin \beta_1} \right] \frac{\overline{w}^3}{w_1} + \zeta_2 \rho \frac{(w_1^2 - w_2^2)}{2} \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_f = 0.004 \sim 0.0045, \zeta_2 \doteq 0.1 \sim 0.2 \\ w = (w_1 + w_2)/2 \end{array} \right.$$

셋째로 케이싱 손실압력들¹⁾은 임펠러를 빠져나온 기류가 공간면적이 확대된 웨케이싱을 통과할 때, 확장된 공간으로 인해 운동에너지가 정압으로 회복하는 과정에서 마찰과 유동박리 및 확산부

(diffuser)에 의해 발생하는 것들로서 식 (8)과 식 (9)로 각각 나타낼 수 있다.

$$\Delta p_3 = \zeta_3 \rho \frac{v_{3u}^2}{2}, (\zeta_3 \doteq 0.15 \sim 0.25) \quad (8)$$

$$\Delta p_4 = \rho \frac{v_{2m}^2}{2} \left[1 - \left(\frac{b}{B_s} \right)^2 \right] \quad (9)$$

넷째로 재순환손실동력²⁾ ΔL_{rec} 은 임펠러입구 및 출구에 국부적으로 역류가 발생하면, 임펠러 내에서 각운동량을 얻은 기류가 외부로 각운동량을 줄인 후, 다시 임펠러내로 유입할 때 발생하는 축동력의 증가분으로 식 (10)으로 정의된다.

$$\Delta L_{rec} = 0.02 \rho Q_{th} D_f^2 u_2^2 \sqrt{\cot \alpha_2} \quad (10)$$

$$\left\{ D_f = 1 - \frac{w_2}{w_1} + \frac{1.5 \left(1 - \frac{Q}{\pi D_2 b u_2 \tan \beta_2} \right)}{\frac{2w_1}{u_2} \left[\frac{Z}{\pi} \left(1 - \frac{D_1}{D_2} \right) + \frac{2D_1}{D_2} \right]} \right\}$$

다섯째로 디스크 마찰손실동력²⁾ ΔL_{df} 은 케이싱과 임펠러 표면을 감싸는 공간 내의 정지 상태인 유체 중에 회전하는 원판 양면에서 발생하며, 식 (11)로 정의된다.

$$\Delta L_{df} = K \rho R_2^5 \omega^3 / 2,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K = 2 \times 1.935 Re^{-1/2}, Re = \frac{R_2^2 \omega}{\nu_a} < 10^5 \\ K = 2 \times 0.0729 Re^{-1/5}, Re > 10^5 \end{array} \right. \quad (11)$$

2.3 임펠러의 주요치수 결정¹⁻⁵⁾

기류가 깃을 통과할 때, 깃 입구 및 출구에서 형성된 면적들과 Fig. 1의 속도 3각형으로부터 절대속도의 반경방향성분들과 원주방향 속도들은 각각 다음 식들로 정의된다.

$$A_1 = (\pi D_1 - t_{1\theta} Z) b, A_2 = (\pi D_2 - t_{2\theta} Z) b \quad (12)$$

$$v_{1m} = Q_{th} / (60 A_1), v_{2m} = Q_{th} / (60 A_2) \quad (13)$$

$$u_1 = \pi D_1 N / 60, \quad u_2 = \pi D_2 N / 60 \quad (14)$$

한편, 깃 입구 측으로 유입하는 기류의 상대속도 성분 w_1 은 예선회가 없는 경우($v_{1u} = 0$), 속도 3각형으로부터 식 (15)로 주어진다.

$$w_1 = \sqrt{v_{1m}^2 + u_1^2} \quad (15)$$

시로코팬에서는 $D_1/D_2 > 0.8$ 을 만족하므로 깃 통로가 짧고, 또한 깃 깊이(폭)도 임펠러 입·출구에서 동일하게 사용한다. 따라서 깃 출구 측으로 빠져나가는 기류의 상대속도 w_2 는 임펠러 직경비에 따라 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_2 = w_1 D_1 / D_2 \quad (16)$$

또 깃 입구 및 출구각도들은 Fig. 1의 속도 3각형으로부터 식 (17)로 각각 주어진다.

$$\beta_1 = \sin^{-1}(v_{1m}/w_1), \quad \beta_2 = \cos^{-1}(v_{2m}/w_2) + 90^\circ \quad (17)$$

또 깃을 빠져나가는 토출기류가 갖는 절대속도의 원주방향속도 성분과 출구유동각도는 각각 식 (18)과 식 (19)로 주어진다.

$$v_{2u} = u_2 + w_2 \cos(180^\circ - \beta_2^\circ) \quad (18)$$

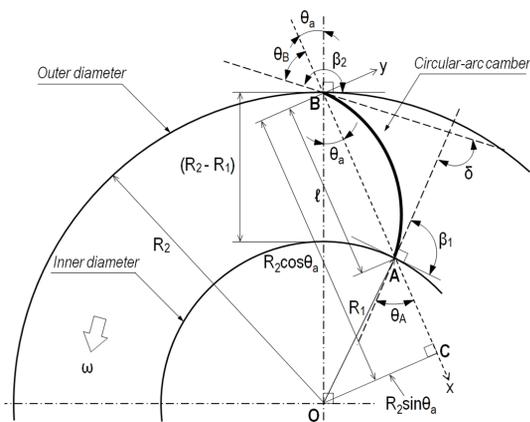


Fig. 3 Drawing configuration of circular-arc blade for sirocco fan

$$\alpha_2 = \tan^{-1}(v_{2m}/v_{2u}) \quad (19)$$

한편, 이번 연구에서는 Fig. 3과 같이 시로코팬의 깃 캠버형상을 단일원호로 사용하였을 때, 깃의 현길이($l = \overline{AB}$)와 깃 취부각(θ_a) 및 깃 휨각들(θ_A, θ_B)의 관계식들은 식 (20)과 식 (21)로 각각 정의할 수 있다.

$$l = R_2 \cos \theta_a - \sqrt{R_1^2 - (R_2 \sin \theta_a)^2} \quad (20)$$

$$\theta_a = \beta_2 - 90^\circ - \theta_B, \quad \delta = \theta_A + \theta_B \quad (21)$$

또한 Fig. 3에서 단일원호 깃의 캠버를 Fig. 4와 같이 나타냈을 때, 캠버 곡선을 만족하는 방정식²⁾과 깃 휨각들은 각각 식 (22)와 식 (23)으로 주어진다.

$$\frac{y}{l} = \sqrt{\left(\frac{1+4m^2}{8m}\right)^2 - \left(\frac{x}{l} - \frac{1}{2}\right)^2} - \frac{1-4m^2}{8m} \quad (22)$$

$$\theta_B = \tan^{-1} \left\{ \frac{0.5}{\sqrt{\left(\frac{1+4m^2}{8m}\right)^2 - \frac{1}{4}}} \right\} = \theta_A \quad (23)$$

여기서 m 값이 주어지면, 차례로 식 (23)에서 깃 휨각 θ_A, θ_B 들을 알 수 있으므로 식 (21)로부터의 취부각을 얻을 수 있고, 또 식 (20)으로부터 깃 현길이 l 도 구할 수 있으므로, 깃 캠버의 x 값에 따른 y 값의 윤곽선도 식 (22)로부터 구할 수 있다.

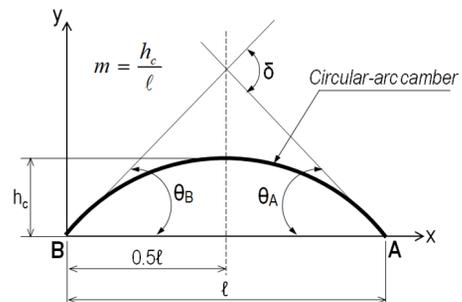


Fig. 4 Contour of circular-arc blade

따라서 깃의 최종 형상은 캠버에 일정두께를 반영해서 균일두께의 깃을 결정하거나 또는 익형(aerofoil)형상을 적용할 수도 있다.

2.4 팬 효율과 무차원계수의 정의^{1,2)}

팬케이싱의 벨마우스와 임펠러 입구 측과의 틈새 등으로 인해 발생한 역류 및 누설 등으로 얻어진 체적효율에 대해 Eck¹⁾는 식 (24)로 제시하였다.

$$\eta_{vol} = \frac{1}{1 + \frac{4\sqrt{2/3}\mu_c\delta_i D_1}{D_2^2\phi}}, \quad \phi = \frac{4Q}{\pi D_2^2 u_2} \quad (24)$$

또 수력효율은 손실압력들을 고려하여 식 (25)로 정의하였다.

$$\eta_{hyd} = \frac{P_{th} - (\Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4)}{P_{th}} = \frac{p_t}{P_{th}} \quad (25)$$

따라서 임펠러 전체효율¹⁾은 체적효율, 수력효율과 함께 식 (26)으로 주어진다.

$$\eta_{tot} = \frac{p_t Q}{L_{sh}} = \frac{p_t Q}{P_{th} Q_{th} + \Delta L_{df} + \Delta L_m}, \quad (26)$$

$$\Delta L_m = \left(\frac{1}{\eta_{mec}} - 1 \right) (P_{th} Q_{th} + \Delta L_{df})$$

한편, 실제 축동력은 식 (26)으로부터 구할 수 있다. 여기서 실제로 모터가 필요로 하는 동력 L_{motor} 은 임펠러 입구 및 출구에서 재순환손실동력이 존재한다면, 식 (27)로 나타낼 수 있다.

$$L_{motor} = L_{sh} + \Delta L_{rec} \quad (27)$$

2.5 팬케이싱의 설계²⁾

본 연구에서 채택한 Fig. 5와 같은 시로코팬 케이싱의 형상은 식 (28)로 설계하였다.

$$R = (R_2 + s) \left\{ 1 + \frac{(\tan\alpha_c)\pi D_2 \theta}{180} \right\} \quad (28)$$

다만, 팬케이싱 설계 시 주의할 점은 Fig. 5와 같이 팬케이싱 폭 W_L 과 출구폭 W_e 는 유로시스템에 적합하도록 각각 팽창각도와 설단각도를 고려하여 선택하여야 한다. 이때 설단틈새와 설단곡률 반경은 깃통과주파수(blade-passing-frequency) 소음을 최소화하도록 결정해야 한다.

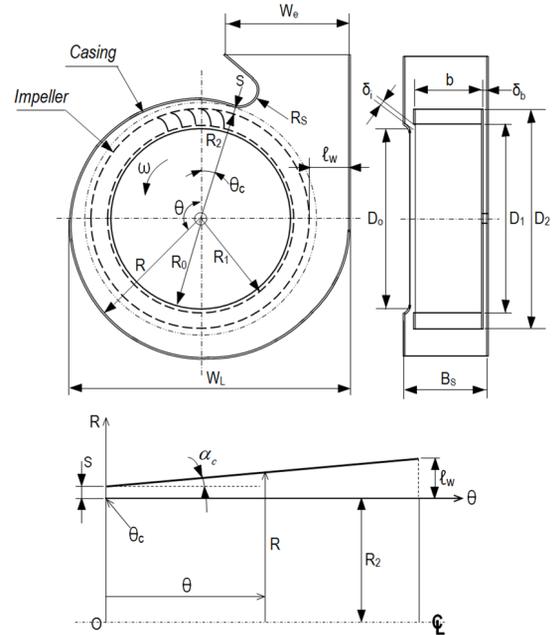


Fig. 5 Configuration of sirocco fan casing

Sirocco Impeller Data Input Item	Data
1. Fan Air Flowrate (O.P.), Q (m ³ /min)	20
2. Fan Static Pressure (O.P.), Ps (mmHg)	9.51
3. Fan Revolution, N (RPM)	650
4. Outer Impeller Diameter, D2 (mm)	300
5. Inner Impeller Diameter, D1 (mm)	255
6. Blade Number, Z (ea.)	50
7. Impeller Width, B (mm)	156
8. Blade Maximum Thickness, T (mm)	2
9. Scroll Type (Archimedic (A) OR Expon. (E))	A

[CF.1 : Archimedic (A or a), Exponential (E or e)

Fig. 6 Example of input data for fan impeller

Archimedic Scroll Data Input Item	Data
1. Scroll (Housing) Expansion Angle (Deg)	6.3
2. Scroll Depth, Bs (mm)	100
3. Cut-off Angle (deg)	0
4. Cut-off Radius Ratio, Rc/D2 (< %)	6.36
5. Bellmouth (or Orifice) Clearance (mm)	5
6. Bellmouth (or Orifice) Diameter (mm)	292
7. Cut-off Clearance Ratio, s/D2 (< %)	3.67

Fig. 7 Example of input data for fan casing

3. 전산프로그램 개발

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 시로코팬의 설계인자들을 계산하기 위해서 임펠러와 케이싱에 필요한 입력 자료들을 전산프로그램에 입력한 일레이며, 실험 및 이론분석에 사용된 각 팬 모델별 설계에 필요한 구체적인 입력 자료들은 Table 1과 같다.

Table 2는 Table 1의 입력 자료들을 바탕으로 시로코팬의 설계이론을 적용한 전산프로그램의 계산결과들이다. 여기서 식 (12)에 있는 원주방향의 깃 두께 $t_{1\theta}$, $t_{2\theta}$ 들은 모두 깃 두께와 동일하다고 간주하였다. 또 식 (6), (7), (8), (24)에서 사용한 각 팬들의 모델별 압력손실계수들¹⁻⁵⁾과 수축계수¹⁾는

Table 1 Essential input data for sirocco fan design

Items	Sirocco fan			
	Model A	Model B	Model C	Model D
Flowrate, Q [m ³ /min]	20	13.5	8	5.3
Static pressure, p_s [mmAq]	9.51	11.93	8.25	4.47
Number of revolution, N [rpm]	650	1050	950	900
Outer diameter, D_2 [mm]	300	205.7	206	191.2
Inner diameter, D_1 [mm]	255	181	177.4	155.5
Orifice diameter, D_θ [mm]	292	193.5	203	190
Blade depth, b [mm]	156	103	105	85
Number of blade, Z [-]	50	42	60	36
Blade thickness, t_b [mm]	2	3	2	2
Casing width, B_s [mm]	180	127	122	102.5
Casing throat area, A_t [cm ²]	423	215.9	219.6	233.85
Cutoff angle, θ_c [°]	0	-14	0	38
Bellmouth clearance, δ_r [mm]	5	5	5	5
Cutoff clearance ratio, s/D_2 [%]	8.7	5.9	9.7	8.8
Max. camber height ratio, m [%]	12	12	12	12

Table 2 Various output data for sirocco fan design

Items	Sirocco fan			
	Model A	Model B	Model C	Model D
Total pressure, p_t [mmAq]	13.52	17.88	11.30	5.25
Slip factor, ϵ [-]	0.9356	0.9098	0.9419	0.9274
Specific speed, n_s [m ³ /min.m.rpm]	474	510	501	687
Blade chord length, l_c [mm]	33.44	15.79	21.36	27.06
Blade inlet angle, β_1 [°]	20.67	28.32	20.39	21.40
Blade outlet angle, β_2 [°]	159.78	152.69	160.39	159.30
Shaft power, L_{sh} [W]	73.53	61.82	31.75	15.58
Blade attachment angle, θ_a [°]	42.79	35.70	43.39	42.31
Blade deflection angle, θ_β [°]	26.99	26.99	26.99	26.99
Total efficiency, η_{tot} [%]	60.28	63.97	46.69	29.33
Volumetric efficiency, η_{vol} [%]	93.08	92.03	88.51	86.88
Hydraulic efficiency, η_{hyd} [%]	65.42	70.21	53.29	34.10

Table 3 Various factors adopted in this study

Items	Loss factor			Contraction factor, μ_c
	ζ_1	ζ_2	ζ_3	
Model A	0.25	0.2	0.38	0.7
Model B	0.25	0.2	0.30	
Model C	0.25	0.2	0.52	
Model D	0.25	0.2	0.80	

Table 3에 나타내었다. 참고로 수축계수 $\mu_c = 0.7$ 은 팬의 벨마우스 개구부 테두리가 날카로울 때 Eck¹⁾가 제시한 값으로 이번 연구에서 적용하였다.

4. 팬 성능 실험결과 및 고찰

Fig. 8은 시로코팬의 전산프로그램을 개발하고자 사용한 4가지 종류의 시로코팬들을 팬테스터 (fan tester)⁶⁻⁹⁾로 측정된 공력성능의 곡선들을 나타낸 그림이다. 여기서 토크(torque)와 회전수의 측정은 토크검출기(Onosokki, SS-050)와 회전수감지기(Onosokki, MP-981)가 연결된 전용 신호지시기(Onosokki, TS-3600)를 통해 이루어졌다. 또 정압 측정은 전기식 미세압력계(Furness, FCO-012)를 이용하였다. 한편, 전압은 측정된 정압에 계산된 동압을 더해 계산하였다. 여기서 동압의 계산은 측정된 유량으로부터 시로코팬의 입·출구를 거치면서 단면적이 가장 작은 케이싱 목(throat) 면적 (Table 1 참조)을 고려하여 얻었다.

Fig. 8로부터 측정된 정압곡선의 분포는 모델 D를 제외하곤 비슷한 특징을 보이고 있다. 다만 모델 D에서 정압곡선은 상대적으로 유량증가에 따라 완만한 구간 없이 가파른 감소 분포를 보이고 있다. 이것은 모델 D가 상대적으로 높은 비속도 (Table 2 참조)를 갖기 때문에 나타난 차이점으로 판단된다. 이와 같은 현상은 전압분포의 곡선에서도 찾아볼 수 있다. 즉 모델 D를 제외하곤 모두 산고곡선(山高曲線)의 형태를 보이지만, 모델 D에서는 사류팬(mixed flow fan)의 곡선형태를 보이고 있다. 반면에 정압효율 및 축동력 분포는 모든 팬 모델들에서 시로코팬의 전형적인 모습을 보이고 있다. 특히 축동력 분포는 유량이 증가함에 따라

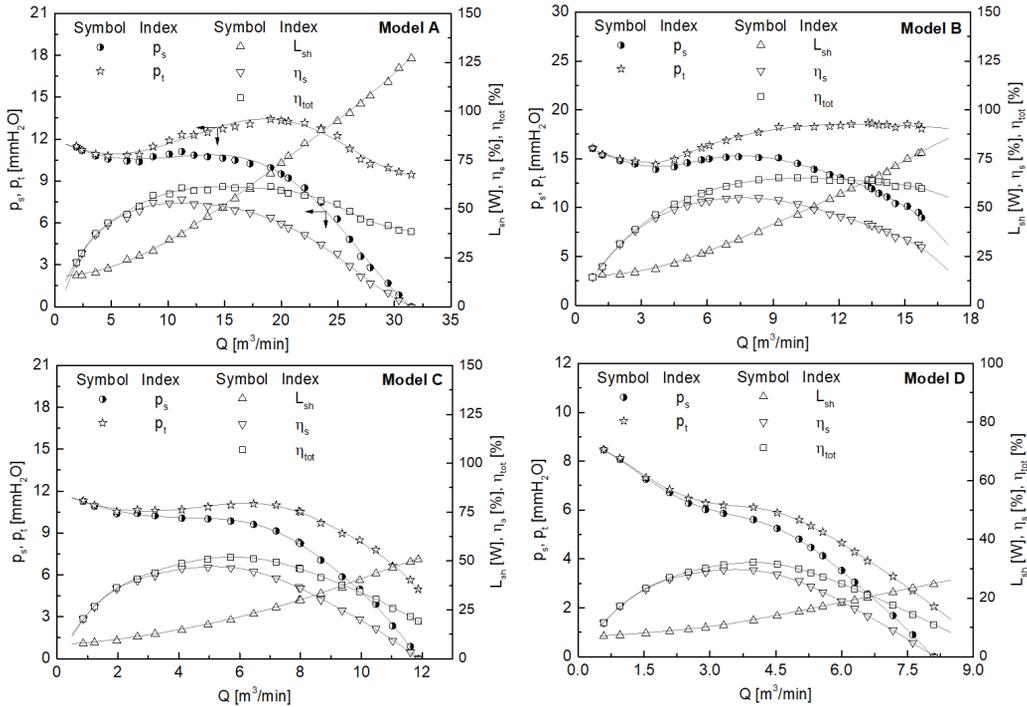


Fig. 8 Four kinds of the aerodynamic performance curves of sirocco fan

모든 모델들에서 증가하는 모습을 보여 준다. 또 Table 2에서와 같이 설계점에서 각 모델 별로 나타난 전압과 전압효율의 크기순서는 모델 B>A>C>D의 순서를 보이고 있다. 이것은 모델 B의 설단각도(Fig. 5, Table 1 참조)가 -14°로 케이싱 목 면적이 줄어들어 동압이 상대적으로 크게 확보

되었고, 설계 운전점에서 상대적으로 높은 정압으로 전압이 크게 반영된 결과로 판단된다. 반면에 모델 D의 설단각도는 38°로 케이싱 목 면적이 상대적으로 크게 확대되어 동압의 영향은 작게 반영되므로 전압 및 전압효율이 가장 작게 나타나고 있다. 이처럼 전압 및 전압효율에 영향을 미치는 인자는 설단각도에 의한 목 면적의 크기가 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Table 4 Comparison data between experiment and calculation

Items		Shaft power, L_{sh} [W]	Static pressure efficiency, η_s [%]	Total efficiency, η_{tot} [%]
Model A	Experiment	73.39	42.35	59.38
	Calculation	73.53	42.15	60.28
	Error (%)	-0.19	0.47	-1.52
Model B	Experiment	64.41	40.86	63.73
	Calculation	61.82	42.48	63.97
	Error (%)	4.02	-3.96	-0.38
Model C	Experiment	29.91	36.07	45.95
	Calculation	31.75	33.85	46.69
	Error (%)	-6.15	6.15	-1.61
Model D	Experiment	16.22	23.87	28.57
	Calculation	15.58	24.74	29.33
	Error (%)	3.95	-3.64	-2.66

한편, Table 4는 시로코팬의 공력성능실험에서 얻어진 축동력, 정압효율 및 최대전압효율을 전산 프로그램으로 계산한 결과들과 비교한 표이다. 여기서 팬의 총효율은 식 (26)으로 계산하였고, 실험으로 얻어진 전압효율과 비교하였다. Table 4로부터 시로코팬의 모델별로 축동력, 정압효율 및 총효율은 각각 실험값과 계산값이 약 $\pm 6.15\%$ 이하의 정확도를 보이고 있다. 물론 비속도에 맞춰 각 모델별로 제원 및 성능특성들을 고려하여 압력손실계수들을 조정하면, 전산프로그램의 성능 정확도는 더 높여서 활용될 수 있다. 결과적으로 시로코팬을 새로 개발할 때, 경제성과 편리성을 위해

이번에 개발한 전산프로그램을 충분히 사용할 수 있다고 판단된다. 다만 이번 압력손실계수들 중 ζ_3 만이 식 (8)의 추천 값을 벗어나 각 팬 모델별로 차이점을 나타내는데, 이것은 이들 대부분의 손실 계수들이 후향깃(backward-curved blade)을 갖는 팬이나 터보형 압축기 등의 실험결과들과 비교를 통해 얻어졌기 때문이다.²⁾ 따라서 시로코헨의 축동력과 총효율 및 손실계수들을 더 정확히 확보하여 정확성을 재정립하기 위해서는 실험 시 계측오차 등이 내재되어 있을 수 있기 때문에 보다 많은 팬들의 성능실험결과들을 반영할 필요가 있으며, 향후에는 3차원 전산유체역학의 해석을 통해서도 재정립할 필요가 있다고 사료된다.

5. 결 론

전경깃을 갖는 원심 시로코헨의 설계이론을 바탕으로 전산프로그램을 개발하는 과정에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 시로코헨을 설계하는 일련의 과정에서 새로운 속도계수가 제안되었다.

2) 전압 및 전압효율에 큰 영향을 미치는 인자는 케이싱 목 면적의 크기를 결정하는 설단각도이다.

3) 각 시로코헨 모델별로 체적유량을 결정하는 수축계수는 모두 0.7을 만족하며, 압력손실계수는 ζ_3 만이 추천값을 벗어난다.

4) 시로코헨의 모델별로 축동력, 정압효율 및 총효율은 각각 실험값과 계산값이 약 $\pm 6.15\%$ 이하의 정확도를 보인다.

5) 시로코헨 설계용 전산프로그램은 경제성과 편리성 측면에서 쉽게 활용될 수 있는 좋은 도구로 판단된다.

Author contributions

J. K. Kim; Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Funding acquisition, Investigation, Project administration, Supervision, Validation, Visualization, Writing-original draft, Writing-review & editing. S. H. Oh; Methodology, Software, Resources.

References

1. B. Eck, 1973, "FANS (Design and Operation of Centrifugal, Axial-Flow and Cross-Flow Fans)", Pergamon Press, pp. 3-155.
2. T. Ikui and M. Inoue, 1988, "Turbo-Blowers and Compressors", Corona Publishing Co., LTD, pp. 193-296.
3. A Board of Editing, 1979, "Handbook of Pneumatic Machinery Engineering (Basic Part)", Corona Publishing Co., LTD, pp. 214-228.
4. A Board of Editing, 1980, "Handbook of Pneumatic Machinery Engineering (Application Part)", Corona Publishing Co., LTD, pp. 30-40.
5. W. C. Osborne, 1977, "Fans", Pergamon Press LTD, pp. 122-141.
6. J. K. Kim, 1995, "Study on the Development for Low Noise Package Air-Conditioner", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 19, No. 10, pp. 2710-2719.
7. J. K. Kim, 1996, "Study on the Development for Low Noise Indoor and Outdoor Package Air-Conditioner", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers(A), Vol. 20, No. 6, pp. 1913-1920.
8. J. K. Kim, 1999, "An Experimental Study on the Optimum Design of Sirocco Fan by using Taguchi Method", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers(B), Vol. 23, No. 6, pp. 761-768.
9. J. K. Kim and S. H. Oh, 2013, "Experimental Study on the Aerodynamic Performance of Double Inlet Sirocco Fan for a Package Air Conditioner", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 52-57.
10. J. K. Kim and S. H. Oh, 2016, "A Study on the Development and Application of a Design Program for Centrifugal Turbo Fan", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 20, No. 6, pp. 71-79. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2016.20.6.071>)