

**블레이드 곡률반경과 기울기가
가정용 레인지후드 시로코 팬 유동 특성에 미치는 영향**

Effects of Blade Curvature & Inclination Angle
on the Flow Characteristics of a Sirocco Fan for the Residential
Range Hood

조 흥 기 (건축소방설비과)

Honggi Cho (Dept. of Architecture & Fire-Protection Equipment)

Key Words : Blade Curvature(블레이드 곡률반경), Blade Inclination
Angle(블레이드 기울기), Sirocco Fan(시로코 팬),
Range Hood(레인지후드), CFD(전산유체역학)

ABSTRACT : The objective of present study is to investigate the effects of blade curvature and blade inclination angle on the flow characteristics of a sirocco fan, such as flow velocity, static pressure rise and volume flow rate by using a CFD commercial simulation program ; Star CCM+. The RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) Equations with κ - ε turbulence model has been applied to analyze the three-dimensional internal flow of the sirocco fan which consisted of an impeller with 36 forward-curved blades and a scroll housing with the air inlet diameter of 154 mm and air outlet diameter of 115mm. The blade length and width is 64.5mm and 16mm, respectively.

From the CFD simulation results, the velocity distribution of air passing through blades and the streamline of internal flow had been represented. It was found that re-circulation flow and vortex flow were located at the near cut-off region. The static pressure rise and volume flow rate increased as the blade curvature decreased due to the scooping mechanism originated

from the change of blade cross section. It was noted that both volume flow rate and static pressure rise improvements could be obtained, respectively, by 25.6% and 56.7% at maximum under the present simulation conditions. For the blade inclination, the volume flow rate and the static pressure rise showed best performance at the blade inclination angle of 12° .

1. 서론

가정용 레인지후드는 세계보건기구(WHO)에서 1급 발암물질로 지정한 초미세먼지인 요리매연을 제거하기 위해 주방의 가스레인지나 전기레인지 위에 설치되어 조리과정에서 발생하는 에어로졸, 냄새, 수증기는 물론 연소 가스 등을 제거하는 주방용 환기 제품으로 다양한 방식과 형태의 제품이 출시되고 있다. 이러한 레인지후드에는 효율은 낮지만 비교적 소형으로 많은 풍량을 낼 수 있는 시로코 팬(Sirocco Fan)을 주로 사용한다.

Fig.1은 가정용 주방 환기 제품인 레인지후드와 시로코 팬 유동 구조를 나타낸 것이다. 시로코 팬은 원심형 팬(Centrifugal Fan)의 한 종류로서, 다수의 블레이드(Blades)를 가진 임펠러(Impeller)와 임펠러에 의해 흡입되어 토출된 공기를 안내하는

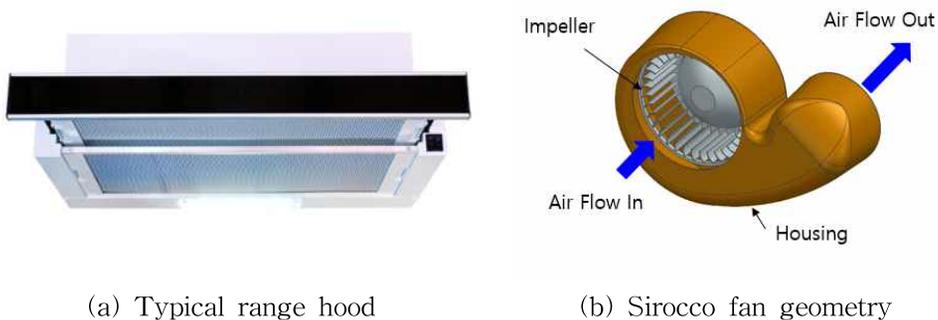


Fig. 1 Residential range hood and sirocco fan geometry

스크롤 하우스(Scroll housing)으로 구성된다. 블레이드는 팬의 회전 방향 쪽으로 기울어져 있기 때문에 전향익(Forward-curved Blades)이라고도 부르며, 블레이드 형상

및 치수 등은 시로코 팬 성능을 결정짓는 주요한 설계 변수라고 할 수 있지만, 유동 구조가 복잡하여 실험적인 접근보다는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 상용 해석 프로그램을 이용한 연구가 많이 진행되고 있다.

시로코 팬 유동 해석 관련 연구로 강정석 등⁽¹⁾은 CFD 상용 해석 프로그램(Star CCM+)을 이용하여 시로코 팬의 3차원 유동해석 및 소음원에 관한 연구를 수행하였는데, 속도 분포의 경우, 블레이드 표면과 유동이 토출되는 Cut-off(임펠러 블레이드 출구를 나온 공기가 스크롤 하우징을 따라 직선운동 구간으로 이동할 때 임펠러와 스크롤 하우징 경계에 있는 곡선부) 영역 부분에서 속도가 컸고, 압력 분포의 경우, 블레이드 상부 표면에서 가장 높게 발생했으며, Cut-off 영역 뒤 벽면에서 압력이 가장 높게 나타남을 보고하였다. 김진혁 등⁽²⁾은 CFD 상용 해석 프로그램(ANSYS CFX-11.0)을 이용하여 정상 및 비정상 상태 삼차원 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 해석을 수행하였는데, 공기의 회전 방향을 따라 스크롤 각 단면에서의 속도벡터 분포해석을 통하여 하류로 갈수록 2개의 순환 유동이 형성되는 것을 관찰할 수 있었고, 원주 방향으로 선택된 케이싱에서의 벽 압력 소음수준과 스펙트럼을 분석한 결과, 피크 소음은 설부(Cut-off 영역)와 임펠러 간의 강한 상호작용에 의해 발생하는 것을 확인할 수 있었다고 보고하였다.

시로코 팬 스크롤 하우징 형상에 관한 연구로 이종원 등⁽³⁾은 시로코 팬 입구 크기 및 형상이 팬 성능에 미치는 영향에 대해 연구하였는데, 하우징 입구 직경이 감소하더라도 풍량이 오히려 증가함을 확인하였는데, 이는 입구 직경 감소 시 하우징이 블레이드 부분을 약간 덮음으로서 내부 2차 유동을 감소시킨 결과라고 설명하였다. 이러한 관점에서 케이싱과 블레이드 사이 간격 변화에 따른 영향을 검토할 필요성을 제시하였다. 한병윤 등⁽⁴⁾은 레인지후드 시로코 팬의 하우징 형상 변경에 따른 유동 해석을 수행하였는데, 하우징의 Cut-off 간격을 30.59mm에서 12.88mm로 감소시킨 경우, 블레이드 익간 유동에서 2차유동이 줄어들음을 확인하였고, 이로 인해 소음과 유량에 관한 성능이 향상됨을 예측할 수 있었으며, 하우징 와류실 반경(축 중심에서 와류곡선까지의 반지름) 결정 시, 아르키메데스 나선을 적용함으로써 약 8~10%의 흡입효율(흡입 기체를 흡입 상태에서의 체적으로 환산한 가스양과, 밀어낸 용적과 단위 시간당 밀어내는 횟수의 곱으로 계산하는 이상적인 양의 비)이 향상됨을 보고하였다. 또한, 와선 각도(와선 시작점으로부터 임펠러 회전방향으로의 각도) 360°인 지점에서 출구 방향으로 5° 정도의 안내각을 적용하는 것보다 직선 형태로 공기를 배출하는 경우가 더 많은 출구 면적을 확보할 수 있으며 흡입효율 상승을 얻을 수 있다고 보고

하였다. 이종원 등⁽⁵⁾은 시로코 팬 스크롤 하우징 Cut-off 후단부에 안내 깃(Guide Vane)을 설치하고, 안내 깃의 설치 위치(Guide Vane Distance), 시위 길이(Chord Length) 및 각도(Guide Vane Angle)에 따른 시로코 팬 성능과 내부 유동에 관한 2차원 CFD 해석 연구를 수행하였는데, 하우징 Cut-Off 중심점과 안내 깃 시작 중심점과의 거리가 44mm로 가장 가까운 경우 풍량이 최대였고, 시위 길이(Chord Length)가 길어질수록 안내 깃(Guide Vane)을 따라 흐르는 유동의 영향으로 재순환 영역이 감소하여 풍량이 증가했고, 안내 깃의 각도가 16~17°일 때, 풍량이 최대임을 보고하였다. 또한, 안내 깃의 형상을 익형으로 만들거나 재순환 영역이 발생하는 지점에 추가적인 안내 깃을 장착하여 최적화한다면 추가적인 팬 성능 향상이 가능하다고 제안하였다.

한편, 시로코 팬 설계용 프로그램 개발 관련 연구로 김장권과 오석형⁽⁶⁾은 선행 연구자들의 임펠러 설계 이론과 임펠러 내 제반 손실 계산식을 이용하여, 임펠러 및 하우징 형상에 따른 시로코 팬 성능 계산 프로그램을 개발하였다. 이를 통하여 시로코 팬 전압 및 전압효율에 큰 영향을 미치는 인자는 케이싱 목 면적의 크기를 결정하는 설단각도(Cut-off angle)임을 보고하였고, 선행 연구자들의 실험 결과값과 계산값 비교 시 약 ±6.15% 이하의 정확도를 나타냈다고 보고하였다.

본 연구와 유사한 블레이드 형상 관련 연구로, 허남건 등⁽⁷⁾은 Star-CD(Star CCM+ 이전 버전)를 이용하여 Cross Flow Fan 내부 유동장에 대한 비정상상태 난류 유동 연구를 수행하였는데, 팬의 정압-풍량 특성 곡선에 미치는 블레이드 단면 형상 변화의 영향을 파악하기 위하여 블레이드 현을 단일호 및 타원으로 생성시켜 유동 해석을 수행하였다. 단일호를 갖는 블레이드 형상의 경우, 블레이드 출구 각도(β_1 : 임펠러 외경과의 접점과 접속 각도)에 따라 블레이드 입구 각도(β_2 : 임펠러 내경과의 접점과 접속 각도)가 변화하기 때문에 두 각도의 영향을 분리하여 경향성 파악은 어렵다고 보고하였고, 타원형을 갖는 블레이드 형상의 경우, 블레이드 출구 각도(β_1)가 클수록 유량이 증가하고, 블레이드 입구 각도(β_2)가 작을수록 유량이 증가한다고 보고하였다. Shaosong 등⁽⁸⁾은 CFD 상용 해석 프로그램(ANSYS-Fluent)을 이용하여 블레이드 경사(블레이드 상단부는 그대로 유지하고 블레이드 하단부를 회전축과 경사지게 깎아서 만든 각도)를 0°에서 10.5°까지 변화시키면서 시로코 팬 내부 유동 특성을 연구하였는데, 블레이드 경사가 7.0° 일 때 가장 큰 정압 상승을 보였다고 보고하였다. 최우석⁽⁹⁾은 고성능 레인지 후드 개발을 위한 성능 시험 및 유동 해석 연구를 진행하였는데, 스크롤 하우징 중심축과 하우징 Cut-off 중심축 사이의 거리를 중심축에서 바깥

방향으로 이동시킴에 따라 풍량이 약 4% 정도 감소했고, 블레이드 기울기(블레이드 단면 중심축이 수직선과 이루는 각도) 변화에 따른 유동 해석 결과로부터 블레이드 기울기가 15°인 경우 더 나은 풍량-정압 특성을 보였다라고 보고하였다.

상기의 문헌 조사 결과, 주방 환기 필요성에 대한 소비자들의 관심 증가와 요리매연을 효과적으로 제거하기 위한 다양한 형태의 가정용 레인지후드 제품이 출시되고 있으나 레인지후드 시로코 팬 유동 특성에 관한 연구는 많이 진행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 CFD 상용 해석 프로그램(독일 SIEMENS사의 Star CCM+)을 이용하여 블레이드 곡률반경 및 기울기가 유동 특성에 미치는 영향을 고찰함으로써 시로코 팬 성능개선을 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

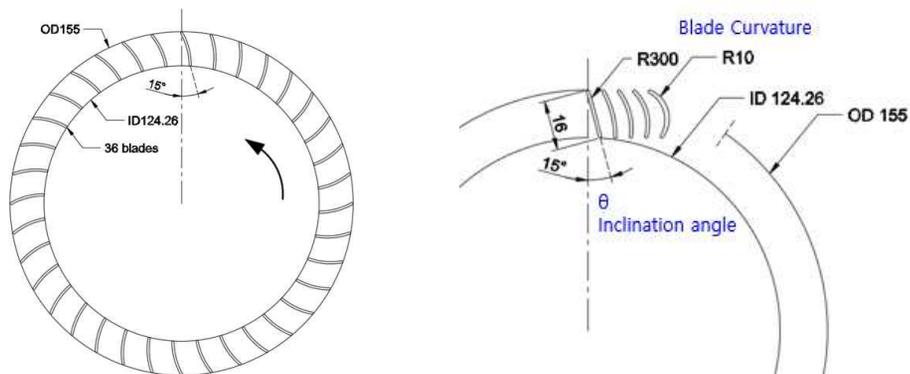
2. 수치해석 방법

2.1. 수치해석 모형

본 연구에서 사용된 수치해석 모형은 Fig. 2와 같다. 시로코 팬 내부의 임펠러는 그림 Fi.g. 2(a)와 같이 외경이 155mm이고, 내경은 124.26mm이며, 총 36개의 전향익 블레이드로 구성되어 있다. 임펠러는 반시계 방향으로 회전하고, 공기는 하우징 입구를 통해 들어오고 임펠러 블레이드 사이를 통과하여 하우징의해 가압되면서 출구 방향으로 나가는 구조이다. Fig. 2(b)는 블레이드의 곡률반경과 블레이드 기울기를 나타낸 것으로 곡률반경이 가장 큰 R300mm인 경우 공기는 평판 위아래로 유동하고 있다고 볼 수 있고, 곡률반경이 감소함에 따라 블레이드는 점점 스푼(Spoon) 모양으로 변하게 되어 공기를 좀 더 쉽게 스쿠핑(Scooping)할 수 있도록 단면 형상이 바뀌게 되며 이 때 곡률반경 값은 R10mm이다. 블레이드 기울기는 임펠러로 유입·유출되는 공기 흐름에 영향을 미치는 주요 인자로 기울기 6°에서 21°까지 변화시키면서 유동 특성을 고찰하였다. 시로코 팬 내부 유동 해석을 위하여 SIEMENS 사의 CFD 해석 프로그램인 Star CCM+(16.06.010-R8)을 사용하였다. 내부 유동은 3차원 정상상태 비압축성 난류 유동 조건이며, 적용된 난류모델은 일반적인 공기 유동에서 가장 많이 사용되는 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식과 k-ε 난류 모형을 사용하였다. 벽면 경계층에서는 Two-Layer All y+ 방정식이 적용되었다⁽¹⁰⁾.

Table 1에 시로코 팬 주요 사양을 정리하였고, Fig. 3은 시로코 팬 하우징 치수를 나타낸 것으로 실제 제품의 주요 치수부를 측정하여 3차원 CAD 프로그램(SIEMENS

NX)을 이용하여 형상화하였다.



(a) Cross section of impeller

(b) Blade curvature & inclination angle

Fig. 2 Numerical analysis model

Table 1. Specification of the sirocco fan

Sirocco fan		Specification		Remarks
Impeller	Body	Max diameter	162	
		Height	66	
		Number of blade	36	
	Blades	OD(outer diameter)	155	
		ID(inner diameter)	124.26	
		Width	16	
		Thickness	1-1.52	depend on curvature
		Height	64.5	
	Tip radius	1		
Housing	Air inlet diameter	154		
	Air outlet diameter	115		
	Height	88.5		

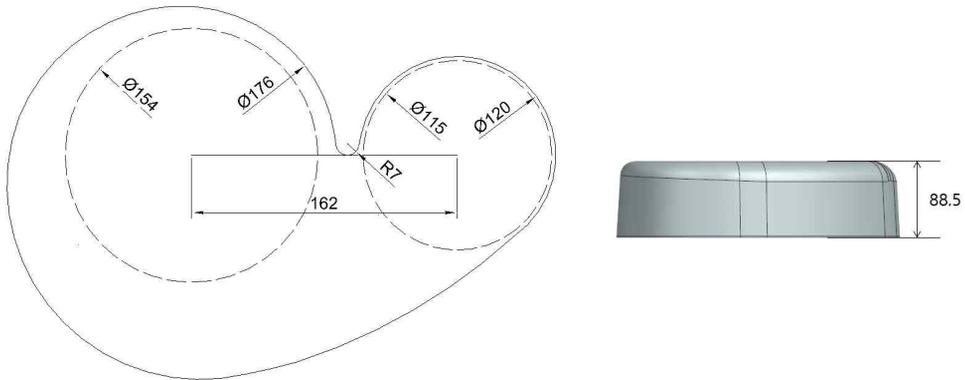
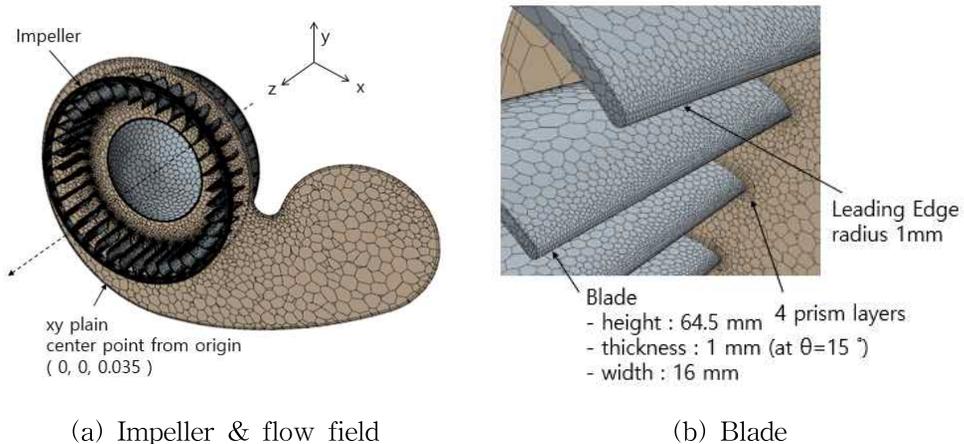


Fig. 3 Housing dimensions

2.2. 격자계 및 경계 조건

시로코 팬 유동 해석을 위한 격자계 및 경계조건을 Fig. 4와 Table 2에 나타내었다. 임펠러 회전축은 절대 좌표계의 z축과 동일하고 반시계 방향으로 1,800rpm으로 회전하고 있으며, 임펠러 블레이드 주위의 유동 특성을 고찰하기 위하여 Fig. 4(a)와 같이 가상의 유동면을 선정하였다. 또한, 블레이드 벽면 주위에는 Fig. 4(b)와 같이 수치해석 안정화와 계산 정밀도 향상을 위한 4개의 prism layer를 추가하였고, 유동장 내 총 격자의 수는 대략 260만 개였다.



(a) Impeller & flow field

(b) Blade

Fig. 4 Mesh generation for the sirocco fan

Table 2. Boundary condition

Sirocco fan	Condition		Remarks
Impeller	Rotation speed	1,800 rpm	
Housing	Air inlet	Stagnation inlet	
	Air outlet	Pressure outlet	

3. 수치해석 결과

3.1. 속도 분포 및 유선 해석

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 유동장 내 공기의 속도 분포와 유선을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에 도시된 바와 같이 공기는 xy 평면과 yz 평면 상에서 전체적으로 임펠러 회전 방향과 동일하게 반시계 방향으로 이동하고 있음을 알 수 있고, 임펠러 중심부에서 유입되는 저속의 공기는 블레이드를 통과하면서 가속되어 Fig. 5(b)에서처럼 끝단부 (Trailing edge)에서 속도가 크게 가속되는 것을 알 수 있다. 또한, 상부측 블레이드 보다는 하부측 블레이드에서 보다 빠른 속도로 공기가 이동하는 것을 알 수 있다. 하우징의 Cut-off 영역은 공기의 회전 운동이 직선 운동으로 전환되는 시작 구간이라고 할 수 있는데 이 영역에서 임펠러 쪽으로 재순환(Recirculation) 되는 공기 흐름과 2차 유동에 의한 와류(Vortex flow)가 형성되는 구간이 존재함을 알 수 있다. 이러한 특성은 Fig. 6의 유선의 해석 결과에서도 명확히 나타남을 알 수 있었고, 공기의 재순환 및 와류 특성을 고려하여 하우징을 설계한다면 시로코 팬 성능 및 소음을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

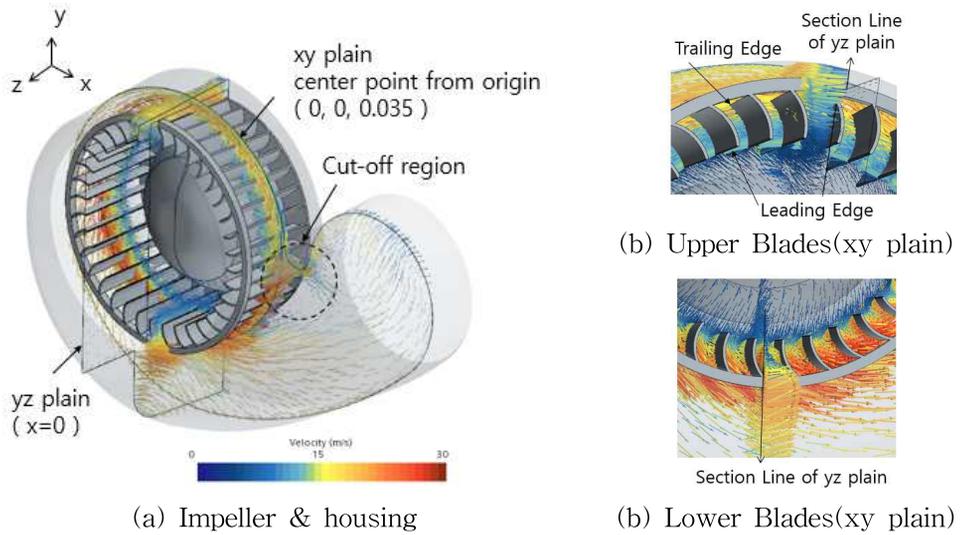


Fig. 5 Velocity distribution in the flow field

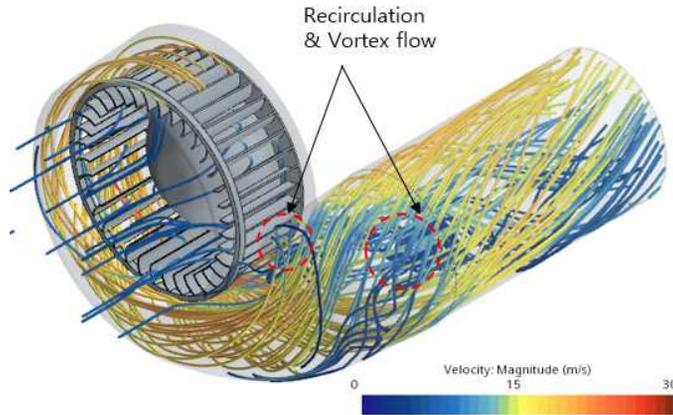


Fig. 6 Streamlines in the flow field

3.2. 블레이드 곡률반경 영향

Fig. 7과 Table 3은 블레이드 기울기(θ)가 15° 로 일정한 경우, 블레이드 곡률반경 (Curvature)에 따른 공기의 속도, 정압 및 풍량 해석 결과값을 나타낸 것이다. 곡률 반경이 가장 큰 경우는 Fig. 2(b)에 도시된 바와 같이 R값이 300mm로 블레이드는

거의 평판에 가까운 형태가 되고, R값이 가장 작은 10mm인 경우, 블레이드는 스푼(Spoon)과 같은 단면 형상이 된다. 따라서, 곡률반경이 감소할수록 블레이드의 스푼핑(Scooping) 효과로 인해 공기 풍량은 점진적으로 증가함을 보였고, 정압도 풍량과 함께 상승하는 경향을 보였다. 또한, 입구 및 출구 공기 속도는 공기 유동 단면적이 일정하기 때문에 풍량과 비례하여 증가함을 보였다. 곡률반경 변화에 따른 풍량의 최대값은 R값이 10mm인 경우로 6.28 CMM이고, 최소값은 R값이 300mm인 경우로 5.00 CMM으로 계산되었는데, 이때 풍량의 최대 증가폭은 25.6%임을 알 수 있었다. 동일한 방법으로 비교했을 때 정압의 최대 증가폭은 56.7%임을 보였다. 레인지후드는 설치 조건에 따라 적절한 정압과 풍량을 확보해야 하기 때문에 이러한 해석 결과를 활용하면 좀 더 개선된 환기 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

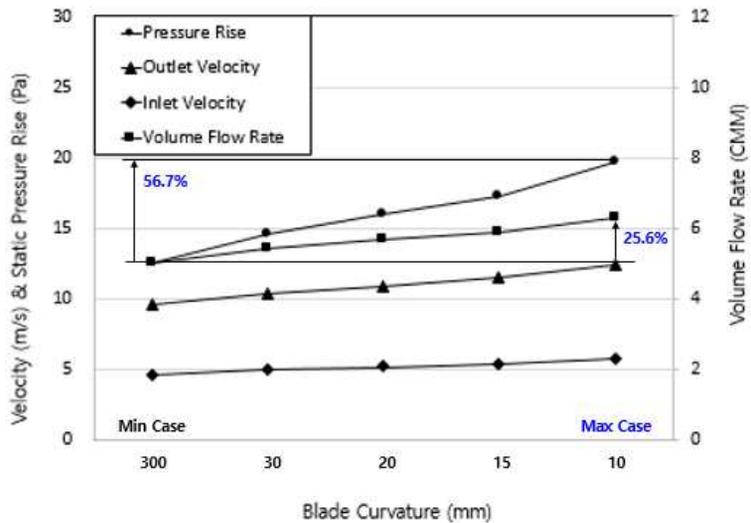


Fig. 7 Effects of blade curvature (at blade inclination angle of $\Theta=15^\circ$)

Table 3. Flow rate and static pressure rise results for the blade curvature

Curvature (mm)	Flow rate		Static pressure rise	
	CMM	% vs R300	Pa	% vs R300
300	5.00	0.0	12.56	0.0
30	5.41	8.2	14.60	16.2
20	5.66	13.2	15.98	27.2
15	5.88	17.5	17.22	37.1
10	6.28	25.6	19.68	56.7

3.3. 블레이드 기울기 영향

Fig.8과 Table 4는 블레이드 곡률반경이 15mm로 일정한 경우, 블레이드 경사각 (Inclination angle)에 따른 공기의 속도, 정압 및 풍량 해석 결과값을 나타낸 것이다. 블레이드 기울기가 증가함에 따라 팬 풍량은 서서히 증가하다가 기울기 12°를 기준으로 최대 풍량을 보였고, 이후 감소하는 경향을 나타냈다. 공기 입구 및 출구 속도는 앞서 설명한 바와 같이 시로코 팬 공기 유입구와 출구 면적이 일정하기 때문에 풍량과 비례함을 알 수 있었다. 팬 정압의 경우, 블레이드 기울기가 증가함에 따라 점진적으로 증가하다가 기울기 12°에서 최대 정압 상승을 보였고, 이후 풍량 그래프와 동일하게 감소하였으나 감소 폭은 조금 더 큼을 알 수 있었다. 블레이드 곡률반경 해석 결과와 마찬가지로 최대 풍량 조건(Max case, $\theta=12^\circ$)에서 최대 정압 상승이 나타났지만, 기울기 변화 시 풍량과 정압이 최대가 되는 구간이 존재함을 알 수 있었다. 블레이드 기울기 변화에 따른 풍량의 최대값은 기울기 12°에서 5.96 CMM이고, 최소값은 기울기 21°에서 5.39 CMM으로 계산되었는데, 두 가지 경우를 비교했을 때 풍량의 최대 증가폭은 10.6%임을 알 수 있었다. 동일한 방법으로 비교했을 때 정압의 최대 증가폭은 22.8%였다.

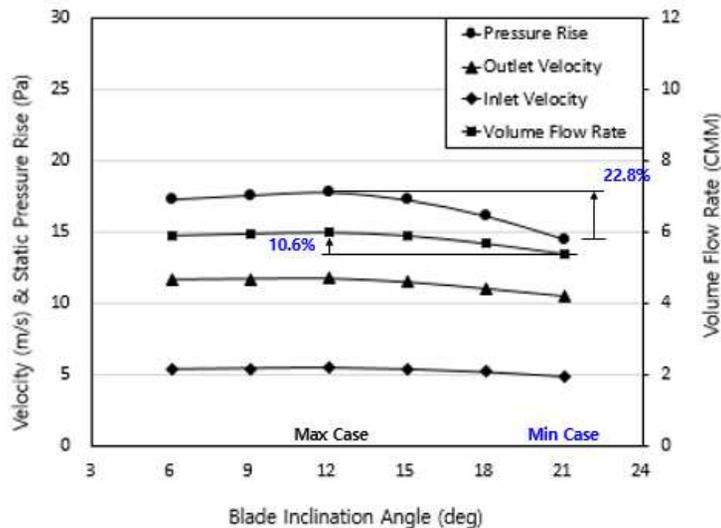


Fig. 8 Effects of blade inclination angle (at blade curvature of R=15mm)

Table 4. Flow rate and pressure rise results for the blade inclination angle

Inclination angle (°)	Flow rate		Static pressure rise	
	CMM	% vs 21°	Pa	% vs 21°
6	5.88	9.1	17.27	19.5
9	5.93	10.1	17.55	21.4
12	5.96	10.6	17.75	22.8
15	5.88	9.0	17.22	19.2
18	5.67	5.1	16.08	11.3
21	5.39	0.0	14.45	0.0

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 CFD 상용 해석 프로그램(Star CCM+)을 이용하여 가정용 레인지후드 시로코 팬의 3차원 정상상태, 난류 유동 해석을 수행하였고, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 시로코 팬 내부 유동장에 대한 속도 분포 및 유선 해석을 통하여 임펠러 내부 공기 유속 분포를 제시하였고, 스크롤 하우징 Cut-off 영역에서의 공기 재순환 영역 및 와류가 존재함을 확인하였다.

둘째, 블레이드 곡률반경에 따른 공기 유속, 정압 및 풍량 해석 결과를 제시하였고, 블레이드 곡률반경이 감소함에 따라 시로코 팬의 정압 및 풍량은 점진적으로 증가함을 알 수 있었다. 본 연구의 해석 조건 범위 내에서는 블레이드 곡률반경을 조정함으로써 풍량은 최대 25.6%, 정압은 최대 56.7%까지 상승시킬 수 있었다.

셋째, 블레이드 기울기에 따른 공기 유속, 정압 및 풍량 해석 결과를 제시하였고, 블레이드 기울기가 약 12°인 경우 시로코 팬의 정압과 풍량이 최대임을 알 수 있었다. 또한, 본 연구의 해석 조건 범위 내에서는 블레이드 기울기를 조정함으로써 풍량은 최대 10.6%, 정압은 최대 22.8%까지 상승시킬 수 있었다.

끝으로, 수치 해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 시로코 팬에 대한 시험 결과와의 비교가 필수적이기 때문에 향후 연구에서는 시로코 팬 풍량-정압 특성 곡선을 시험으로부터 구하고, 해석 결과 비교를 통하여 시로코 팬 설계를 위한 설계 기초 자료를 제시하고자 한다.

5. 참고문헌

- (1) 강정석, 김진택, 이철형, 백병준, 2018, 시로코 팬의 3차원 유동해석 및 소음원에 관한 연구, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 19, No. 12, pp. 896-902.
- (2) 김진혁, 송우석, 이승배, 김광용, 2010, 주거환기용 시로코팬의 공력 및 소음 특성 연구, 유체기계저널, 제13권, 제2호, 18-23.
- (3) 이종원, 이정수, 이현규, 조이상, 조진수, 2018, 시로코팬의 입구형상이 유동에 미치는 영향 및 개선, 한국항공우주학회 2018 춘계학술대회 논문집, 58-59.
- (4) 한병운, 박진우, 이명수, 박형구, 2008, 렌지후드의 성능개선을 위한 시로코 팬 주위의 유동해석, 한국전산유체공학회지, 제13권, 제4호, 72-79.
- (5) 이종원, 이정수, 이현규, 조진수, 2019, 안내 깃이 장착된 시로코 팬 성능과 내부 유동 연구, 한국유체기계학회 논문집, 제22권, 제3호, 12-18.
- (6) 김장권, 오석형, 2021, 시로코팬 설계용 프로그램이 개발 및 응용에 대한 연구, 동력시스템공학회지 제25권 제2호, 48-56.
- (7) 허남건, 김욱, 강신형, 1997, Cross Flow Fan의 유동 해석 : Blade 형상의 변화에 대한 영향 연구, 유체기계연구개발협회, '97 강연회 및 연구개발 발표회 논문집, pp. 125-132.
- (8) Shansong Ni, Wenbin Cao, Jun Xu, Yingdong Wang and Wei Zhang, 2019, Effect of an Inclined Blade on the Performance of a Sirocco Fan, Applied Sciences, 9(15), 3154.
- (9) 최우석, 2023, “고성능 레인지 후드 개발을 위한 성능 시험 및 유동 해석 연구”, 강릉원주대학교 대학원, 박사학위논문, 63-90.
- (10) Simcenter SRAR-CCM+ 2021.2 User Guide, pp. 7840-7841.