

날개의 스윙과 레이크각의 변화에 따른 튜브 축류팬의 설계 운전점에서 하류 난류 유동장 특성 비교

Comparison of Downstream Turbulent Flow Field Characteristics at the Design Operating Point of a Tube Axial Fan according to Changes in Blade Sweep and Rake Angle

김장권*†
Jang-Kweon Kim*†

(Received 03 April 2024, Revision received 21 June 2024, Accepted 25 June 2024)

초록 : 이번 연구는 3차원 튜브 축류팬을 스윙과 레이크 각도를 4가지로 변화시켜 그 유동을 비압축성 상태에서 대규모 와 모사로 해석하였다. 그 결과 설계 운전점에서 나타난 하류 난류유동장의 분포 특성은 다음과 같다. 스윙과 레이크 각도가 20°인 튜브 축류팬이 정압과 정압 효율 및 전압 효율의 성능에서 가장 우수하다. 또 스윙과 레이크 각도가 증가하면, 튜브 축류팬의 내부 유동장에 존재하는 역유동과 재순환유동의 영역은 더 작아지며, 유동을 축방향으로 더 유도한다. 또한 외부 유동장과 내부 유동장에서 존재하는 2차 유동인 회전 속도의 크기 차이는 현저히 줄어들며, 튜브 축류팬의 내부 영역으로 위치가 옮겨진 난류운동에너지의 피크값은 점차 줄어든다.

키워드 : 꾸랑수, 대규모와 모사, 레이크, 스윙, 튜브 축류팬

Abstract : In this study, the sweep and rake angles of a three-dimensional tube axial fan were changed to four ways and the flow was analyzed using large eddy simulation in an incompressible state. As a result, the distribution characteristics of the downstream turbulent flow field at the design operating point are as follows. A tube axial fan with a sweep and rake angle of 20° has the best performance in terms of static pressure, static pressure efficiency and total pressure efficiency. Additionally, as the sweep and rake angles increase, the area of reverse flow and recirculation flow existing in the internal flow field of the tube axial fan becomes smaller, leading the flow further in the axial direction. In addition, as the sweep and rake angles increase, the size difference in rotational speed, which is a secondary flow that exists in the external flow field as well as the internal flow field, is significantly reduced, and the peak value of the turbulent kinetic energy relocated to the inner area of the tube axial fan gradually decreases.

Key Words : Courant Number, Large Eddy Simulation (LES), Rake, Sweep, Tube Axial Fan

*† 김장권(<http://orcid.org/0000-0003-0412-023X>) : 교수,
국립군산대학교 기관공학과
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848

*† Jang-Kweon Kim(<http://orcid.org/0000-0003-0412-023X>) :
Professor, Department of Marine Engineering, Kunsan National
University.
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848

— 기 호 설 명 —

N	: 회전수 [rpm]
p_s	: 정압 [Pa]
p_t	: 전압 [Pa]
Q	: 유량 [m^3/min]
r_h	: 튜브 축류팬의 허브(hub) 반경 [mm]
r_t	: 튜브 축류팬의 끝단(tip) 반경 [mm]
T	: 토크(torque) [$\text{N}\cdot\text{m}$]
t	: 날개 두께 [mm]
Z	: 날개 수
η_s	: 정압 효율 [%], $\{\eta_s = p_s Q / (2\pi N T)\}$
η_t	: 전압 효율 [%], $\{\eta_t = p_t Q / (2\pi N T)\}$

1. 서 론

축류팬(axial fan)의 설계에는 소음과 풍량 및 효율을 높일 목적으로 날개 허브에서 끝단까지 스윙(sweep)과 레이크(rake) 또는 린(lean)을 반영하여 날개 형상을 변화시키는 방법이 있다.¹⁻⁹⁾ 여기서 스윙은 보통 날개 허브에서 끝단까지 각도로 주어지는데, 회전 방향으로 주어지는 전방(forward) 스윙과 회전하는 반대 방향으로 주어지는 후방(backward) 스윙으로 나누어진다. 또 레이크(또는 린)는 회전축 방향 상류 쪽이나 하류 쪽으로 경사 각도를 부여해 만들어진다.

Vad¹⁾, Neise²⁾, Khiabani 등³⁾과 Masi 등^{4,5)}은 모두 전방 스윙이 경계층의 유체입자가 더 짧은 거리를 이동하여 날개 후단에 도달하도록 축류팬의 효율을 증대시키고, 실속(stall)의 한계를 확장해 준다고 언급하였다. 또 Masi 등⁵⁾은 허브비($=r_h/r_t$)가 낮은 축류팬에서 전방 스윙이 순환(circulation) 구배가 높은 비자유 와류(non-free vortex) 방법으로 설계한 축류팬에서 압력과 효율성을 모두 개선하는 효과를 보이며, 특히 자유 와류(free vortex)로 설계한 축류팬에서는 실속 한계를 확장하여 저유량 성능을 개선한다고 밝혔다.^{6,7)} 또 Vad⁸⁾는 스윙이 날개 끝단에서 누설과 표면 마찰 손실을 감소시킨다고 밝혔다. 또 Seo 등⁹⁾은 스윙

이 축류팬의 저유량 영역에서 공력 성능을 확장하며, 린은 축류팬 내부에서 회전축 방향 속도 성분을 날개 스패(span) 방향으로 균일화시키고, 날개 끝단 와류를 감쇄하는 반면, 반경 방향 속도 성분의 기울기를 변경시킴으로써 회전에 의한 날개 내부의 2차 유동(secondary flow)에 영향을 미쳐 스윙과 린이 날개 흡입면 허브 근처에서 유동 박리와 날개 끝단 영역에서 누설 와류를 약화한다고 하였다.

지난 연구에서는 Pascu^{10,11)}가 제안한 설계 방법을 적용하여 외경과 허브 직경을 각각 110 mm, 45 mm로 하여 허브비가 0.409인 튜브(tube) 축류팬을 설계한 후, 대규모 와 모사(LES, Large Eddy Simulation)로 공력 성능을 확보¹²⁾하였다. 그 결과, 전방 스윙과 상류 쪽으로 주어진 레이크 각도가 증가할수록 튜브 축류팬의 최대 풍량은 증가하며, 최대 풍량의 약 60% 크기까지의 풍량 영역에서 정압 및 정압 효율의 분포는 스윙과 레이크각이 반영되지 않을 때보다도 더 증가한 성능을 보여 주었다.¹³⁾

본 연구에서는 지난 연구¹³⁾의 후속 연구로서 전방 스윙과 레이크각이 반영되었을 때 튜브 축류팬의 설계 운전점(design operating point)에서 나타난 하류 난류유동장의 특성들을 스윙과 레이크각이 없을 때의 결과와 서로 비교 분석하여 스윙과 레이크각이 난류유동장 분포 특성에 어떤 영향을 미치는지를 검토하고자 한다. 이를 위해 과거 연구¹⁴⁾에서 축류팬의 공력 성능을 효과적으로 예측하였던 LES를 유한체적법에 기초한 상용소프트웨어인 SC/Tetra¹⁵⁾를 통해서 활용하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 1은 Table 1의 설계 명세로 만들어진 Fig. 1(a)의 3차원 튜브 축류팬의 형상 이외에 이를 바탕으로 3종류의 스윙과 레이크각을 각각 10°, 20°, 30°씩 같은 각도로 변화시켜 설계한 형상들을 모두 나타낸 그림이다.¹³⁾ 여기서 모든 튜브 축류팬의 형상은 상용소프트웨어인 CATIA(V5R18)로 모형화하였다.

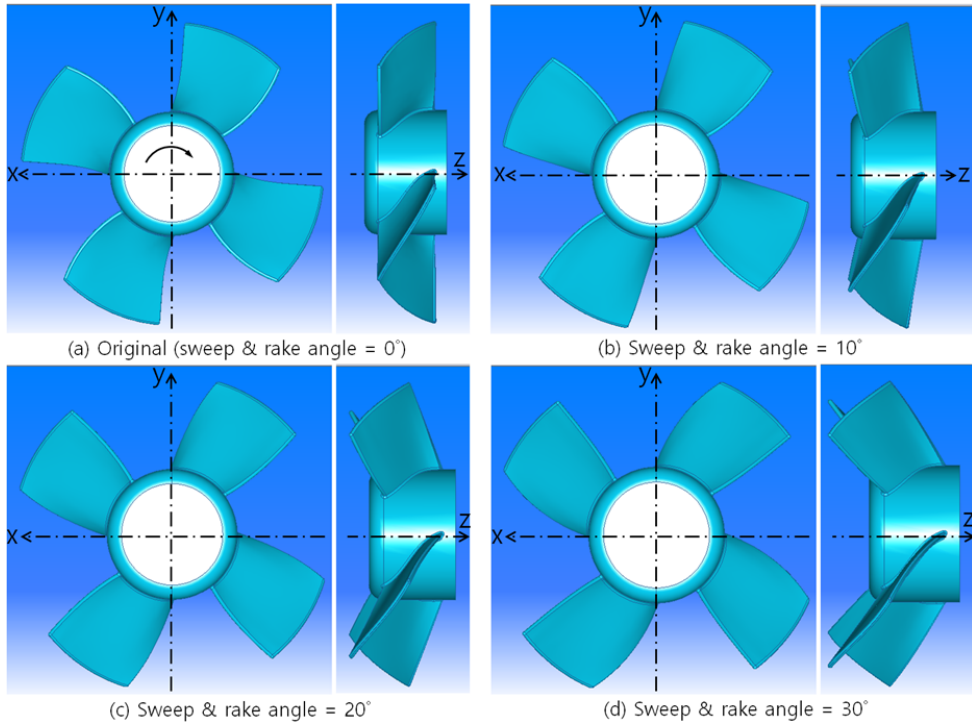


Fig. 1 Configurations of a tube axial fan according to the angle variation of sweep and rake¹³⁾

Table 1 Design specification of a tube axial fan

Item	Specification
Flowrate, Q [m^3/min]	1.35
Number of revolution, N [rpm]	2400
Tip radius, r_t [mm]	55
Hub radius, r_h [mm]	22.5
Blade thickness, t [mm]	1.5
Blade number, Z	4

또 Fig. 2는 Fig. 1의 모든 종류의 튜브 축류팬을 LES로 해석하기 위해 사용한 팬테스터(fan tester) 모델의 크기와 수치해석을 위한 경계조건을 나타낸 그림이다. 여기서 팬테스터 공간을 구성하는 챔버(chamber)는 벨마우스와 튜브를 설치한 벽면을 기준으로 앞뒤에 2개의 원형 덕트를 붙였으며, 그 크기는 각각 반경 500 mm, 길이 1,000 mm이다. 이것은 튜브 축류팬의 주 유동이 계산

영역의 크기에 크게 영향을 받지 않도록 튜브 축류팬의 직경 대비 약 9배 이상으로 키운 크기이다.¹²⁻¹⁴⁾

참고로 Fig. 3은 Fig. 1(a)의 튜브 축류팬을 벨마우스와 배치하여 Fig. 2의 팬테스터에 설치한 기하학적 치수를 나타낸 그림이다. 여기서 튜브 축류팬의 축방향 날개 깊이와 벨마우스에 연결한

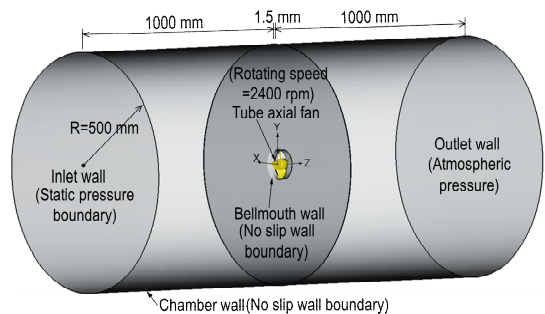


Fig. 2 Geometry configuration of a fan tester including a tube axial fan¹³⁾

튜브 깊이는 서로 일치하게 설계하였다.¹³⁾ 또한 Fig. 1의 나머지 튜브 축류팬도 같은 방법으로 설계하여 웬테스터에서 사용하였다.

Fig. 4는 Fig. 1(a)의 튜브 축류팬을 포함한 웬테스터 챔버의 계산 영역을 보여주기 위해 참고로 나타낸 비정형 격자(unstructured mesh) 형상의 그림이다.¹³⁾ 이 형상은 SC/Tetra¹⁵⁾의 전처리 소프트웨어를 이용하여 각각의 튜브 축류팬을 설치한

Table 2 Mesh characteristics of a fan tester

Sweep & rake angle	Total element number	Total node number	Max. size	Min. size
0°	18,214,618	3,361,021	43.78 mm	0.684 mm
10°	19,228,461	3,546,265		
20°	20,902,920	3,859,729		
30°	24,883,990	4,575,893		

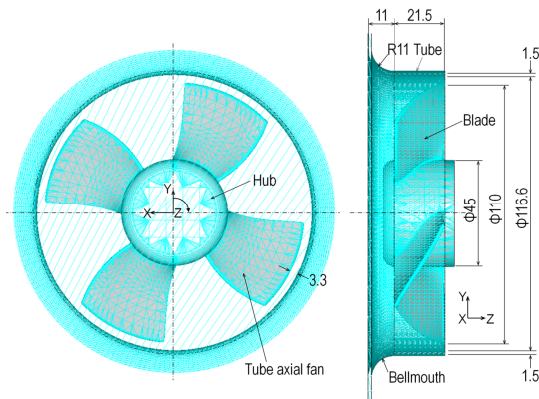


Fig. 3 Geometry and arrangement configuration between the tube axial fan of Fig. 1(a) and bellmouth [unit : mm]

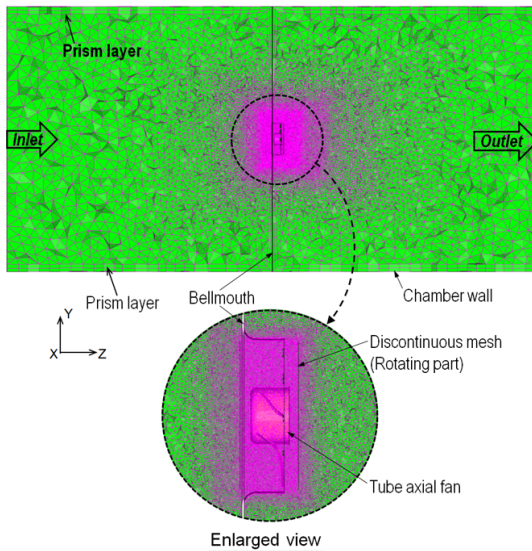


Fig. 4 Mesh configuration of a fan tester including the tube axial fan of Fig. 1(a)

웬테스터 표면들에 경계조건들을 부여한 다음, 격자 크기를 제어하는 "Octree" 기능을 이용하여 각각의 튜브 축류팬을 포함한 회전부 영역으로 갈수록 격자 크기를 웬 자체의 최소격자 크기가 약 0.684 mm가 될 때까지 더 작게 세분화하여 만들었다.¹²⁻¹⁴⁾ 같은 방법으로 하여 Fig. 1의 튜브 축류팬을 포함한 웬테스터의 격자를 모두 만든 결과, 요소(element) 총수와 교점(node) 총수는 각각 Table 2와 같이 생성되었다.¹³⁾ 여기서 스윙과 레이크각이 증가함에 따라 Fig. 1에서처럼 날개 형상이 더 커지게 되므로 이를 반영한 격자수는 Table 2에서 나타낸 바와 같이 더 커지게 된다.

이와 같은 LES 격자 생성방법은 이전에 발표한 축류팬의 공력 성능¹⁴⁾에서 실험값과 LES 해석값이 서로 잘 일치하였던 방법을 따랐다. 한편, 튜브 축류팬을 에워싼 회전부 영역인 불연속 격자(discontinuous mesh) 내부는 웬의 회전효과가 적용되는 미끄럼(sliding) 격자의 영역을 나타내며, 해의 수렴성을 높이기 위해 고체(solid)와 유체가 접하는 경계면인 튜브 축류팬과 벨마우스, 튜브 및 챔버 벽면들의 표면에는 SC/Tetra에서 기본적으로 주어지는 2개의 프리즘층(prism layer)을 각각 넣었다.¹³⁻¹⁵⁾

2.2 수치기법

Fig. 2의 웬테스터 챔버를 구성하는 표면들의 경계조건들을 살펴보면, 벨마우스와 튜브 및 챔버 표면들의 고체 벽면은 모두 마찰력을 갖는 점착(no-slip) 조건으로 설정하였다. 또 입구의 벽면은 압력변화를 반영할 수 있도록 정압력 조건으로, 그리고 출구의 벽면은 대기압 조건으로 각각 설

정하였다.¹²⁻¹⁴⁾ 또 튜브 축류팬의 회전수는 2400 rpm으로, 그리고 회전 방향은 Fig. 1과 같이 시계 방향으로 각각 설정하여 튜브 축류팬을 감싸는 불연속 격자는 회전체 해석 조건인 이동 격자(moving mesh)로 반영하였다.^{13,15)}

한편, LES 해석에서 사용한 아격자 척도(sub-grid scale)의 난류 모델에는 Dynamic Smagorinsky 모델을 사용하였으며, 시간 미분(derivative) 항은 2차 음함수기법(2nd order implicit scheme)을, 그리고 대류항(convection)은 2차 중앙차분기법(2nd order central difference scheme)을 각각 적용하였다. 또 이산화된 방정식들의 압력보정에는 모두 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다. 여기서 초기 시간 간격(initial time step)은 튜브 축류팬의 회전수에 대한 원주속도와 최소격자 크기를 고려하여 4.95×10^{-5} 초로 정하였으며, 해석 결과가 어떠한 시간 간격(time interval)에도 영향을 받지 않도록 쿨랑수(Courant number)¹⁵⁾를 1로 정하였다. 이를 토대로 반복(iteration) 계산은 질량유량(mass flux)이 충분히 안정을 보이는 10만 회까지 비정상상태로 해석한 다음, 마지막 결과를 바탕으로 다시 앙상블(ensemble) 평균 계산을 10만 회 더 해석하여 그 결과를 분석에 사용하였다.¹³⁾

3. 계산결과 및 고찰

3.1 정압 및 전압효율의 성능 비교

Fig. 5는 스윙과 레이크각의 변화에 따라 Fig. 1의 튜브 축류팬 설계 운전점에서 나타난 정압과 정압 효율 및 전압 효율의 크기 분포 그림이다. 여기서 설계 운전점은 Table 1에 나타낸 바와 같이 풍량 $1.35 \text{ m}^3/\text{min}$ 이다. Fig. 5(a)에서 나타난 정압의 크기는 스윙과 레이크각이 20° 일 때가 가장 크게 나타나며, 스윙과 레이크각이 없을 때보다도 약 30%의 정압 성능이 개선된 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 5(b)에서 나타난 정압 효율의 크기도 스윙과 레이크각이 20° 일 때가 가장 크게 나타나며, 스윙과 레이크각이 없을 때보다도 약 12.2%의 정압 효율의 성능이 개선된 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 5(c)에서 나타난 전압 효율의 크기 역시 스윙

과 레이크각이 20° 일 때가 가장 크게 나타나며, 스윙과 레이크각이 없을 때보다도 약 5.6%의 전압 효율의 성능이 개선되는 것을 알 수 있다.

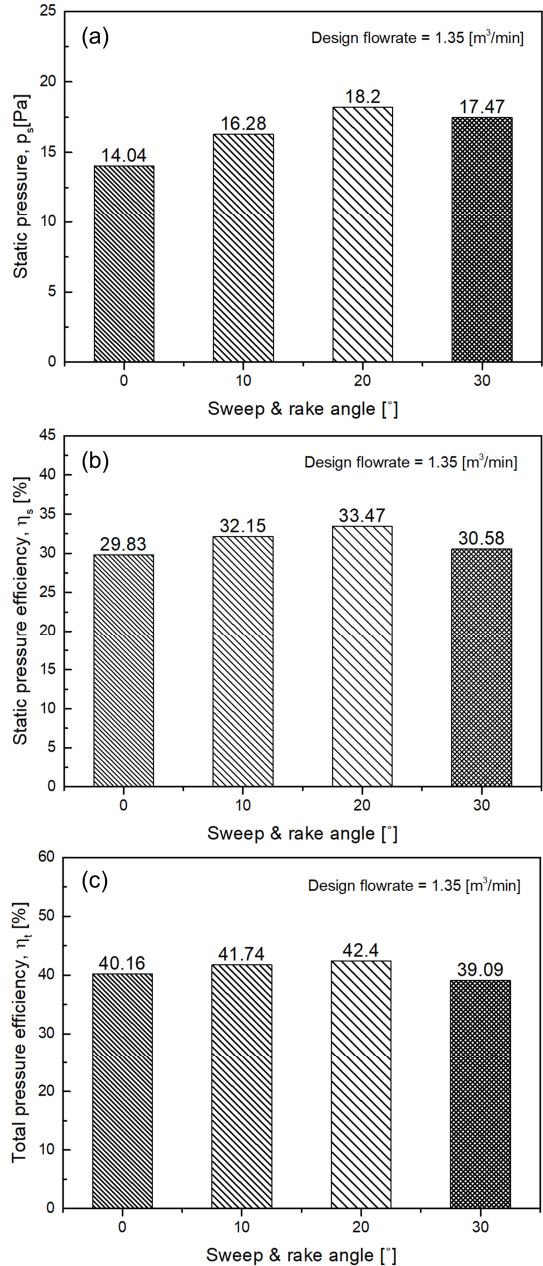


Fig. 5 Distributions of the aerodynamic performance data of a tube axial fan according to the angle variation of sweep and rake

이와 같은 현상들은 Vad¹⁾, Neise²⁾, Khiabani 등³⁾과 Masi 등^{4,5)}이 언급한 전방 스융이 축류팬의 효율을 증대시키고, 정압 성능을 개선하여 실속의 한계를 확장해 준다고 주장한 사실과도 일치한다.

3.2 벡터 및 축방향 성분의 속도분포 비교

Fig. 6은 튜브 축류팬의 설계 운전점에서 스융과 레이크 각도가 변할 때 하류 난류유동장에서 나타난 벡터 분포를 보여준 그림이다. 여기서 스융과 레이크각이 없는 Fig. 6(a)의 하류 벡터 분포는 설계 운전점에서 존재하는 정압 부하를 맞아

축방향 유동 속도가 하류로 곧바로 뺏지 못하고 상대적으로 유동 속도가 반경 방향으로 더 확산하여 허브를 포함한 내부 유동장에서는 역유동(reverse flow)과 재순환 유동이 존재하며, 큰 공간을 차지하는 모습을 보여주고 있다. 반면에 스융과 레이크각이 증가함에 따라 더 커진 정압 부하를 맞이하면서도 허브를 포함한 내측 하류에서의 유동장 공간은 훨씬 작아지며, 내부 공간을 둘러싼 유동 속도는 더 빠르게 되어 축방향으로 곧게 흐르는 것을 알 수 있다. 따라서 스융과 레이크각이 반영된 튜브 축류팬에서는 축방향 유동 속도

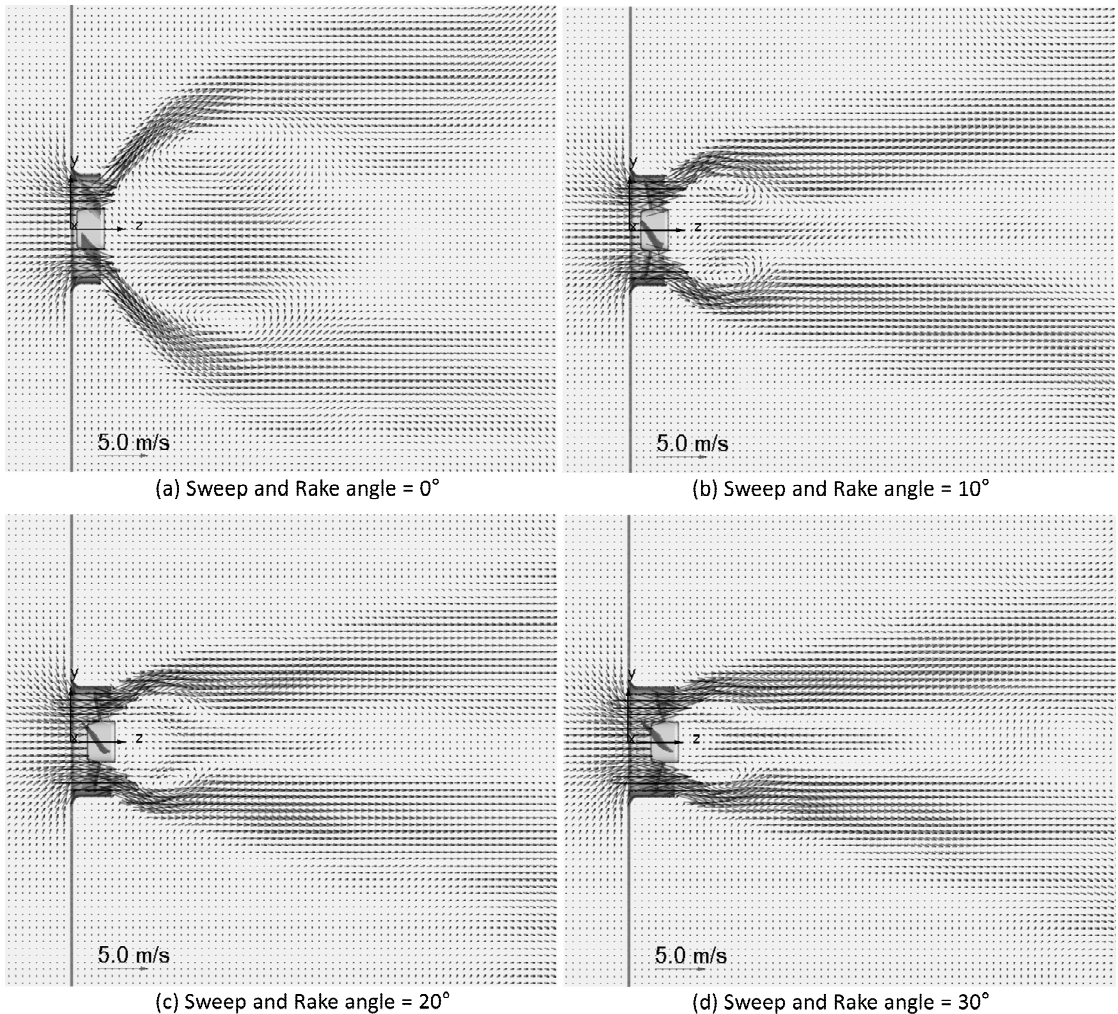


Fig. 6 Distributions of the vector profiles of a tube axial fan in the Y-Z plane according to the angle variation of sweep and rake

를 빠르게 하여 내부 유동장(internal flow field) 영역을 축소함과 동시에 유동을 축방향으로 뺏도록 유도해 준다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 7은 스윕과 레이크각의 변화에 따라 튜브 축류팬의 설계 운전점에서 날개로부터 하류로 20 mm 떨어진 축방향 위치에서 2차 유동의 회전 유동을 보여준 벡터 분포이다. 여기서 축방향 하류 위치의 기준점은 벨마우스의 튜브 깊이가 날개와

만나는 곳이다. 스윕과 레이크각이 없는 Fig. 7(a)의 경우 날개 끝을 벗어난 반경 위치에서 바깥쪽으로 큰 속도 값의 회전 유동을 나타내는 외부 유동이 형성되고 있는 반면에 허브 영역을 포함한 내부 유동장에서는 매우 작은 회전 속도 크기를 보여주어 외부 유동장과 내부 유동장의 회전속도는 큰 차이를 보여 주고 있다. 그러나 스윕과 레이크각이 증가하게 되면, 외부 유동장과 내부 유

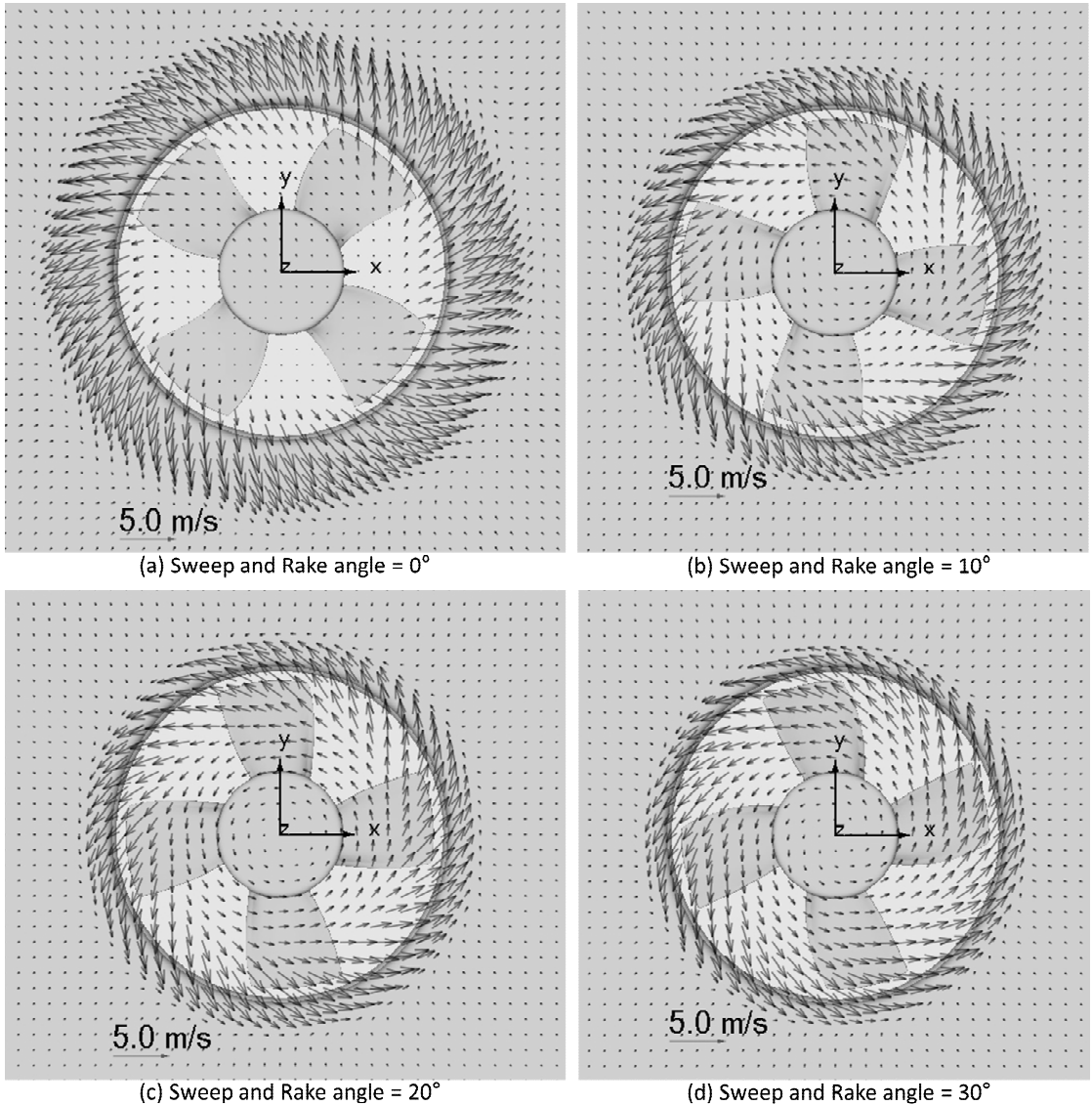


Fig. 7 Distributions of the vector profiles of a tube axial fan in the X-Y plane according to the angle variation of sweep and rake

동장에서 보여 주는 회전 속도의 크기 차이는 현저히 줄어들을 알 수 있다. 즉 스윙과 레이크각이 증가하면 Fig. 6에서와 같이 내부 유동장의 영역도 줄어들며, 상대적으로 회전 유동의 세력은 더 크게 형성함을 알 수 있다. 이것은 Vad⁸⁾가 주장한 스윙이 날개 끝단에서 누설과 표면 마찰손실을 감소시키고, Seo 등⁹⁾이 주장한 린(레이크)이 축류팬 내부에서 회전축 방향 속도 성분을 날개 스팬 방향으로 균일화시켜 날개 끝단 와류를 감쇄하는 반면, 반경 방향 속도 성분의 기울기를 변경시킴으로써 회전에 의한 날개 내부의 2차 유동에 영향을 미치므로 스윙과 린이 날개 흡입면(suction surface)의 허브 근처에서 유동 박리와 날개 끝단

영역에서 누설 와류를 약화한다는 사실이 연관되어 나타난 현상이라 판단된다.

3.3 난류운동에너지 분포의 비교

Fig. 8은 스윙과 레이크각의 변화에 따라 튜브 축류팬의 설계 운전점에서 날개로부터 하류로 떨어진 축방향 위치에 따라 난류운동에너지를 나타낸 그림이다. 날개로부터 떨어진 초기거리에서 난류운동에너지 분포는 비교적 큰 값을 형성하다가 날개로부터 20 mm 떨어진 이후부터는 크기가 현저히 감소하여 일정 크기를 유지하다가 점차 소멸해 가는 모습을 보여 준다. 스윙과 레이크각이 증가하게 되면, 날개 끝단부 주변에서 형성된 센

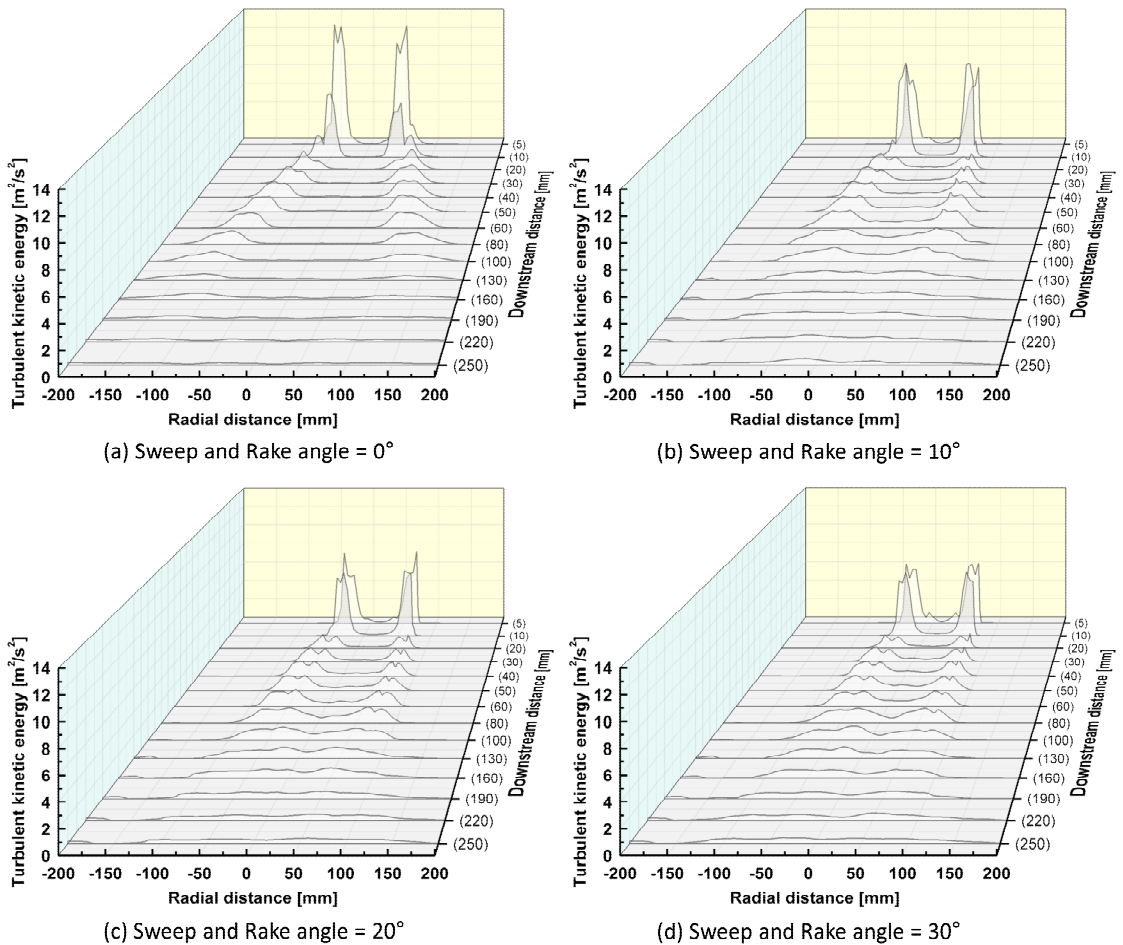


Fig. 8 Distributions of the turbulent kinetic energy profiles of a tube axial fan in the Y-Z plane according to the angle variation of sweep and rake

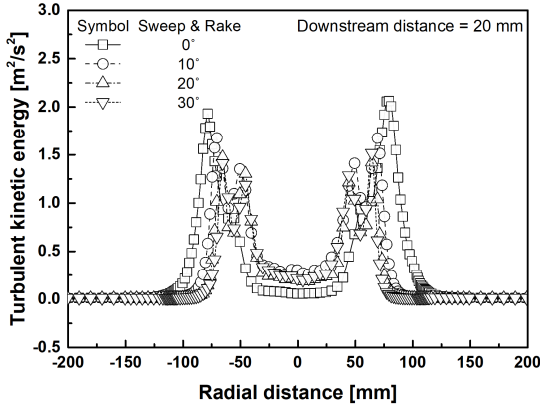


Fig. 9 Turbulent kinetic energy profiles of a tube axial fan according to the angle variation of sweep and rake

속도분포의 기울기로 인해 발생하는 난류운동에너지의 피크(peak) 값은 점차 감소하며 그 크기 차이는 매우 작다. 특히 스윙과 레이크각이 존재하면, 튜브 축류팬 내부에서 발생하는 섀 회전 유동으로 인해 난류운동에너지 역시 스윙과 레이크각이 없을 때보다 더 크게 분포됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 스윙과 레이크각의 변화에 따라 튜브 축류팬의 설계 운전점에서 날개로부터 20 mm 떨어진 축방향 하류 위치에서 난류운동에너지의 크기를 명확하게 비교하기 위해서 나타낸 그림이다. 스윙과 레이크각이 증가하게 되면, 난류운동에너지의 피크값은 줄어들며 튜브 축류팬의 내부 영역으로 위치는 옮겨지게 된다. 반면에 내부 영역에서 난류운동에너지는 스윙과 레이크각이 없는 경우보다도 미소한 차이지만 더 큰 크기를 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

3차원 튜브 축류팬을 스윙과 레이크각을 변화시켜 비압축성 상태에서 LES로 해석한 결과, 설계 운전점에서 나타난 하류 난류유동장 분포 특성은 다음과 같다.

1) 정압과 정압 및 전압 효율의 성능으로 볼 때, 스윙과 레이크 각도가 20°인 튜브 축류팬이

가장 우수하다.

2) 스윙과 레이크 각도가 증가하면 튜브 축류팬의 내부 유동장에 존재하는 역유동과 재순환유동의 영역은 더 작아지며, 유동을 축방향으로 더 유도한다.

3) 스윙과 레이크 각도가 증가하면 튜브 축류팬의 외부 유동장과 내부 유동장에서 존재하는 2차 유동인 회전 속도의 크기 차이는 현저히 줄어든다.

4) 스윙과 레이크 각도가 증가하면 튜브 축류팬의 내부 영역으로 위치가 옮겨진 난류운동에너지의 피크값은 점차 줄어든다.

Author contributions

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

References

1. J. Vad, 2008, "Aerodynamic Effects of Blade Sweep and Skew in Low-Speed Axial Flow Rotors at the Design Flow Rate: An Overview", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 222(1), 69-85. (DOI:10.1243/0957650JPE471)
2. W. Neise, 1992, "Review of Fan Noise Generation Mechanisms and Control Methods", International Symposium on Fan Noise, Publications CETIM, Senlis, France, 45-56.
3. A. Khiabani, D. A. Alanis, 2020, "Cooling Fan Optimization for Heavy Electrified Vehicles - A Study on Performance and Noise", Master's Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
4. M. Masi, A. Lazzaretto and S. Castegnaro, 2018, "Effectiveness of Blade Forward Sweep in

- a Small Industrial Tube-Axial Fan”, International Conference on Fan Noise, Aerodynamics, Applications and Systems, Darmstadt, Germany, FAN 2018, April. 1-12.
5. M. Masi and A. Lazzaretto, 2015, “A Simplified Theory to Justify Forward Sweep in Low Hub-to-Tip Ratio Axial Fan”, Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. Montréal, Canada, June 15-19, Paper No. GT2015-43029, V001T09A011. (DOI:10.1115/GT2015-43029)
6. A. Corsini and F. Rispoli, 2004, “Using Sweep to Extend the Stall-Free Operational Range in Axial Fan Rotors”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 218(3), 129-139. (DOI:10.1243/095765004323049869)
7. M. B. Wilkinson, 2017, “The Design of an Axial Flow Fan for Air-Cooled Heat Exchanger Applications”, Master Degree Thesis, Stellenbosch University, South Africa.
8. J. Vad, 2012, “Forward Blade Sweep Applied to Low-Speed Axial Fan Rotors of Controlled Vortex Design: An Overview”, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 135(1), Paper No. GPT-12-1152, 012601-1:012601-9. (DOI:10.1115/1.4007428)
9. S. J. Seo, S. M. Choi and K. Y. Kim, 2006, “Design of an Axial Flow fan with Shape Optimization”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (B), 30(7), 603-611. (<http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2006.30.7.603>)
10. M. T. Pascu, 2009, “Modern Layout and Design Strategy for Axial Fans”, Ph.D. Thesis, Institute of Fluid Mechanics LSTM Erlangen- Nuremberg University, Erlangen, Germany.
11. M. Pascu, M. Miclea, P. Eppele, A. Delgado and F. Durst, 2009, “Analytical and Numerical Investigation of the Optimum Pressure Distribution along a Low-Pressure Axial Fan Blade”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 643-657. (DOI: 10.1243/09544062JMES1023)
12. J. K. Kim and S. H. Oh, 2022, “Design and Aerodynamic Performance Estimation of an Axial Fan according to the Total Pressure Ratio of Blade Span Length”, Journal of Power System Engineering, 26(1), 29-37. (DOI:10.9726/kspse.2022.26.1.029)
13. J. K. Kim and S. H. Oh, 2023, “Aerodynamic Performance Evaluation of Tube Axial Fan according to Changes in Blade Sweep and Rake Angle”, Journal of Power System Engineering, 27(5), 67-74. (DOI:10.9726/kspse.2023.27.5.067)
14. J. K. Kim and S. H. Oh, 2015, “Large Eddy Simulation on the Aerodynamic Performance of Three-Dimensional Small-Size Axial Fan with the Different Depth of Bellmouth”, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, 19(6), 19-25. (DOI:10.9726/kspse.2015.19.6.019)
15. SC/Tetra(Version 12), 2015, User's Guide, Software Cradle Co., Ltd.