



대규모 와 모사에 의한 1피치 소형 나선형 축류팬의 운전부하에 따른 난류유동장 구조에 대한 연구

A Study on the Structure of Turbulent Flow Fields according to the Operating Load of One-pitched Small-size Helical Axial Fan by Large Eddy Simulation

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

(Received 23 September 2019, Revision received 03 December 2019, Accepted 03 December 2019)

Abstract: The unsteady-state, incompressible and three-dimensional large eddy simulation (LES) was performed to analyze the structure of turbulent flow fields according to the operating load of one-pitched small-size helical axial fan (SSHAF). The static pressure coefficient distribution according to the flow coefficient of SSHAF does not include stall, and the maximum static pressure efficiency is about 13% higher than that of conventional small-size axial fan. The typical axial flow developed downstream of SSHAF decreases with increasing operating load, and external axial flow outside the fan center develops radially. There is a reverse flow in the internal flow developed downstream from the hub of SSHAF. As the operating load increases, the absolute velocity of the reverse flow increases and its space gradually increases to approach the hub side. Even with increasing operating load, the flow that develops downstream of SSHAF does not include full radial flow, unlike conventional small-size axial fan.

Key Words : Flow coefficient, Large eddy simulation (LES), Small-size helical axial fan (SSHAF), Static pressure coefficient, Static pressure efficiency

— 기 호 설 명 —

D_2 : 팬의 외경 [m]	p_s : 정압력 [Pa]
D_h : 팬의 허브직경 [m]	Q : 유량 [m^3/min]
N : 회전수 [rpm]	T : 토크 [$N \cdot m$]
	V_z : 축방향 평균속도 [m/s]

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

*† Jang-Kweon Kim(ORCID:<http://orcid.org/0000-0003-0412-023X>) : Professor, Department of Power System 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.

$$\eta_s : \text{축류팬의 정압효율 [\%], } \{ \eta_s = \frac{50p_s Q}{\pi NT} \}$$

π : 원주율 [-]

ρ : 공기의 밀도 [kg/m^3]

$$\phi : \text{유량계수 [-], } \{ \phi = \frac{4Q}{\pi^2(D_2^2 - D_h^2)D_2 N} \}$$

$$\psi_s : \text{정압계수 [-], } \{ \psi_s = \frac{7200p_s}{\pi^2 \rho D_2^2 N^2} \}$$

1. 서 론

전형적인 축류팬(axial fan)은 다수개의 독립된 동일 형상의 날개들을 허브(hub)상에 특정 피치각(pitch angle)으로 결합된 형태로 일명 프로펠러(propeller) 팬이라고도 부른다. 이로 인해 고정 피치각을 갖는 축류팬의 유동은 각 날개들을 통과하는 과정에서 운전부하에 따라 다른 형태의 유동이 발생되면서 소음크기도 역시 달라진다. 지금까지 부하변동에 따른 일반적인 축류팬의 하류에서 발생하는 난류유동장의 구조는 저 유량영역에서 주로 반경방향으로 형성되는 유동영역과 실속(stall)이 발생하는 불안정한 유동영역, 그리고 고 유량영역에서 주로 유동이 축방향으로 향하는 전형적인 축류영역으로 나타난다고 잘 알려져 있다.^{1,2)} 이것은 축류팬의 공력성능이 다른 종류의 팬들에 비해 풍량 대비 매우 낮은 정압 성능을 가지므로, 부하변동에 따라 발생하는 현상이다. 따라서 축류팬은 높은 정압을 요구하는 환경에서는 사용할 수 없는 단점이 있다. 이를 만회하기 위해 Kim 등은 정압성능을 높이면서 축류팬의 기능도 발휘할 수 있도록 나선형 날개의 피치 숫자를 달리할 수 있는 새로운 나선형 축류팬을 고안한 바가 있다.³⁾ 또한 Kim 등은 수치계산의 시간이 너무 많이 걸리는 단점이 있지만, 기존의 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes) 방법보다는 수치해석의 정확도가 더 높다고 잘 알려진 대규모 와 모사(large eddy simulation, 이하 LES라고 함)기법을 도입하여 소형 나선형 축류팬(small-size helical axial fan, 이하 SSHAF라고 함)을 연구한 결과 기존의 축류팬과 같은 유동을 발휘한다는 것을 파악하였다.^{4,5)}

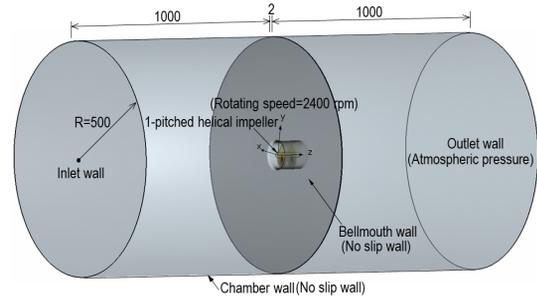


Fig. 1 Geometry configuration for the numerical analysis of 1-pitched helical impeller

한편, CFD에 의한 축류팬의 연구는 컴퓨터의 발달과 더불어 격자를 실제 회전시키지 않고서도 팬의 회전효과를 수치계산에 반영할 수 있도록 정지영역과 회전영역 사이의 데이터를 보간(interpolation)하는 미끄럼격자(sliding mesh) 방식을 탑재한 상용소프트웨어를 통해 주로 이루어지고 있다. 즉, Zhou 등⁶⁾과 Kim 등⁷⁾ 및 Hurault 등⁸⁾은 각각 RNG k- ϵ 과 벽(wall) 근처영역에서 저레이놀즈수(low-Reynolds number)를 반영한 SST(shear stress transport)모델 및 레이놀즈응력(Reynolds stress)모델들을 적용하여 축류팬의 날개한쪽만을 포함한 모델을 3차원 정상상태로 해석한 바 있다. 또 Han 등⁹⁾과 Ito 등¹⁰⁾ 및 Liu¹¹⁾는 각각 MP k- ϵ ¹²⁾, Standard k- ϵ , RNG k- ϵ 모델들을 이용하여 완전한 형태의 3차원 축류팬 모델을 가지고 비정상상태로 유동을 해석한 바 있다.

이번 연구에서는 1피치 나선형 날개를 갖는 완전한 형태의 3차원 SSHAF의 하류(downstream)에서 발생하는 다양한 유동장의 특성들이 부하변동에 따라 어떻게 변하는지를 파악하고자 비압축성, 비정상상태에서 LES로 수치 해석한 벡터(vector) 분포를 분석하였다. 여기서 LES의 수치해석에는 유한체적법에 기초한 상용소프트웨어인 SC/Tetra (ver.12)¹²⁾를 이용하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 1은 1피치 나선형 날개를 갖는 SSHAF를 LES로 해석하기 위해 사용한 챔버(chamber)의 기

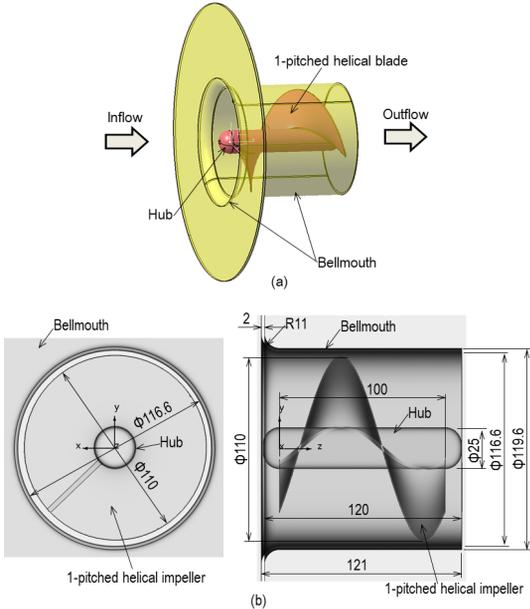


Fig. 2 Geometry arrangement of 1-pitched SSHAF

하학적 형상과 크기 그리고 경계조건들을 나타내고 있다. 여기서 벨마우스(bellmouth) 앞뒤에 붙인 챔버들의 크기는 SSHAF의 주 유동이 계산영역의 크기에 크게 영향을 받지 않도록 설정하였다. 한편, SSHAF와 벨마우스의 해석모델들은 상용소프트웨어인 CATIA(V5R18)로 만들었으며, 나머지 챔버들은 SC/Tetra의 전처리 기능을 이용하여 만들었다.

Fig. 2는 Fig. 1에서 적용한 1피치 날개를 갖는 SSHAF와 벨마우스의 설치기준 및 상세제원들을 나타내고 있다. 여기서 SSHAF는 유동축 방향의 깊이(Fig. 1의 Z방향)가 100 mm가 되도록 나선형으로 허브 둘레를 감아 만든 것들이다. 또한 SSHAF의 벨마우스는 기존 소형축류팬¹³⁻¹⁵의 벨마우스를 이용하여 곡률반경(11 mm)이 끝나는 위치를 시작해서 축방향으로 깊이를 110 mm 더 늘려 수정해서 사용하였다.

Fig. 3은 Fig. 1의 각 구성요소들에 SC/Tetra의 전처리 소프트웨어로 경계조건을 부여한 다음 격자크기를 제어할 수 있는 "Octree"기능을 이용하여 기존 소형축류팬^{14,15}과 동일하게 팬의 최소 격자크기를 0.684 mm까지 세분해서 만든 1피치 날개를 갖는 SSHAF의 비정형 격자그림이다. 여기서

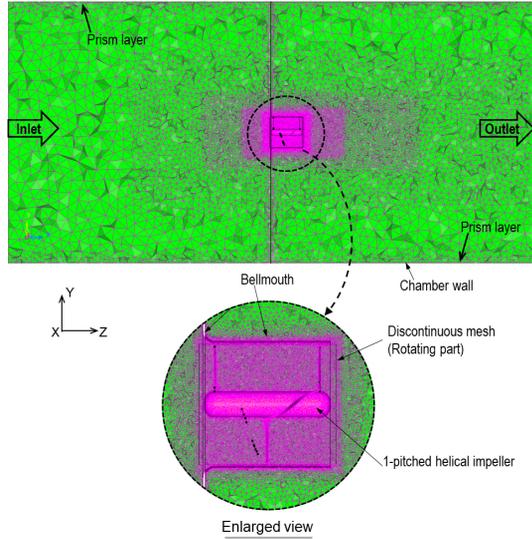


Fig. 3 Unstructured mesh configuration for the numerical analysis of 1-pitched SSHAF

사용한 팬의 최소 격자크기는 전형적인 소형축류팬의 실험에 의한 공력성능 결과¹³가 LES로 해석한 수치결과^{14,15}와 일치한다고 Kim 등이 발표한 적이 있다. 따라서 이번 연구에서는 기존 소형축류팬의 격자정보^{14,15}를 바탕으로 SSHAF에서는 격자를 더 세밀하게 적용하였다. 그 결과, 총 요소(element)수는 9,489,371개이며, 총 교점(node)수는 2,215,040개가 생성되었다. 여기서 SSHAF와 벨마우스 및 챔버 벽면들에는 해의 수렴성을 높이기 위해 2개의 프리즘층(prism layer)을 각각 삽입하였다.

2.2 수치기법

이번 연구에서 적용한 Fig. 1의 경계조건들을 살펴보면, 벨마우스와 챔버의 벽 조건은 모두 점착(no-slip)조건으로 설정하였으며, 입구벽면은 압력에 의한 부하를 다양하게 부여할 수 있도록 정압조건으로, 그리고 출구벽면은 대기압조건으로 각각 설정하였다. 또 SSHAF는 회전수를 2,400 rpm으로 설정하여 회전체 조건¹²을 반영하였다.

LES의 난류모델에는 동적 아격자척도(dynamic subgrid-scale) 모델을 사용하였으며, 시간미분항은 2차 Implicit기법을, 대류항(convection)은 2차 중앙차분(central difference)기법을 각각 적용하였다.

또 이산화된 방정식들의 압력보정에는 모두 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다. 또 초기시간 간격은 회전수 2400 rpm에 대한 SSHAF의 원주속도와 최소격자크기를 고려하여 4.95×10^{-5} 초로 정하였으며, 어떠한 시간간격(time interval)에도 영향을 받지 않는 해석결과를 얻기 위해서 Courant 수¹²⁾는 1로 정하였다. 이를 토대로 질량유량(mass flux)이 충분히 안정을 보이는 10만회까지 비정상 상태로 계산을 한 다음, 이것을 바탕으로 통계학적 난류특성의 평균값들을 얻기 위해서 동일한 시간간격으로 다시 10만회를 시간평균(time average)하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 정압계수 및 정압효율 분포

Fig. 4는 LES로 해석한 무차원 공력성능인 유량계수(ϕ)에 따른 정압계수(ψ_s)들과 정압효율(η_s)들을 상호 비교한 그림이다. 참고로 정압계수와 정압효율의 분포들을 2차원 상용소프트웨어인 TableCurve2D¹⁶⁾로 각각 커브피팅(curve-fitting)하여 얻은 근사식들은 식 (1)과 식 (2)로 주어진다. 여기서 근사식들을 만족하는 각 계수들은 모두 Table 1에 나타내었다.

$$\psi_s = \frac{a + c\phi + e\phi^2 + g\phi^3}{1 + b\phi + d\phi^2 + f\phi^3 + h\phi^4} \quad (1)$$

$$\eta_s = \frac{a + c\phi + e\phi^2 + g\phi^3 + i\phi^4}{1 + b\phi + d\phi^2 + f\phi^3 + h\phi^4 + j\phi^5} \quad (2)$$

SSHAF의 정압성능 분포를 나타낸 Fig. 4의 가장 큰 특징은 유량이 변화함에 따라 기존 소형축류팬¹³⁻¹⁵⁾이 갖는 곡률분포와는 매우 다른 모습을 보여주고 있다는 것이다. 즉, 기존 소형축류팬에서 나타난 정압계수의 분포에서는 작은 정압변화에도 큰 유량차이를 보이는 실속(stall)을 나타내는 불안정한 유동영역이 항상 존재하였다.^{1,2,6-11,13-15)} 그런데 SSHAF에서는 실속이 전혀 존재하지 않으며, 특히 $\phi \geq 0.0257$ 에서는 유량변화폭에 따라 정압도

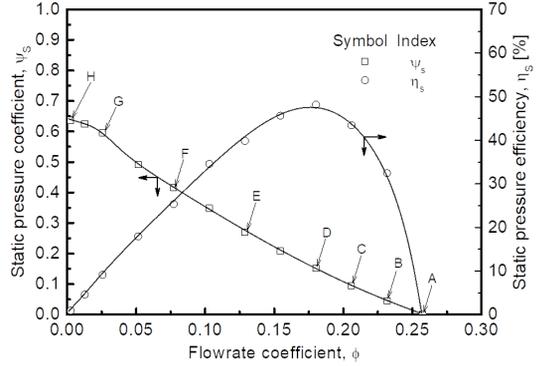


Fig. 4 Static pressure coefficient and efficiency profiles obtained by LES analysis

Table 1 Curve-fit coefficient values of equation (1) and equation (2)

Curve-fits	Coefficient values	
Eq. (1), (ψ_s)	a = 0.64112525	e = 839.34879
	b = -55.297363	f = -380.27689
	c = -37.033379	g = -2736.074
	d = 1142.7673	h = 8495.1867
Eq. (2), (η_s)	a = 0.24366694	f = -7924.8682
	b = 36.358049	g = -52208.928
	c = 249.16	h = 35596.398
	d = 578.46836	i = -144422.12
	e = 22037.277	j = -58501.693

Table 2 Various values of operating points

Operating points	Non-dimensional values		
	ϕ	ψ_s	η_s
A	0.2574	0	0
B	0.2317	0.0451	32.46
C	0.2059	0.0945	43.43
D	0.1802	0.1521	48.16
E	0.1287	0.2697	39.85
F	0.0772	0.4162	25.36
G	0.0257	0.5960	9.12
H	0.0026	0.6367	0.91

일정한 변화폭을 갖는 특징을 보이고 있다. 또 기존 소형축류팬^{13,14)}의 정압효율은 축류팬과 벨로우즈의 배치 관계에 따라 최대 약 35%를 보인 반면에

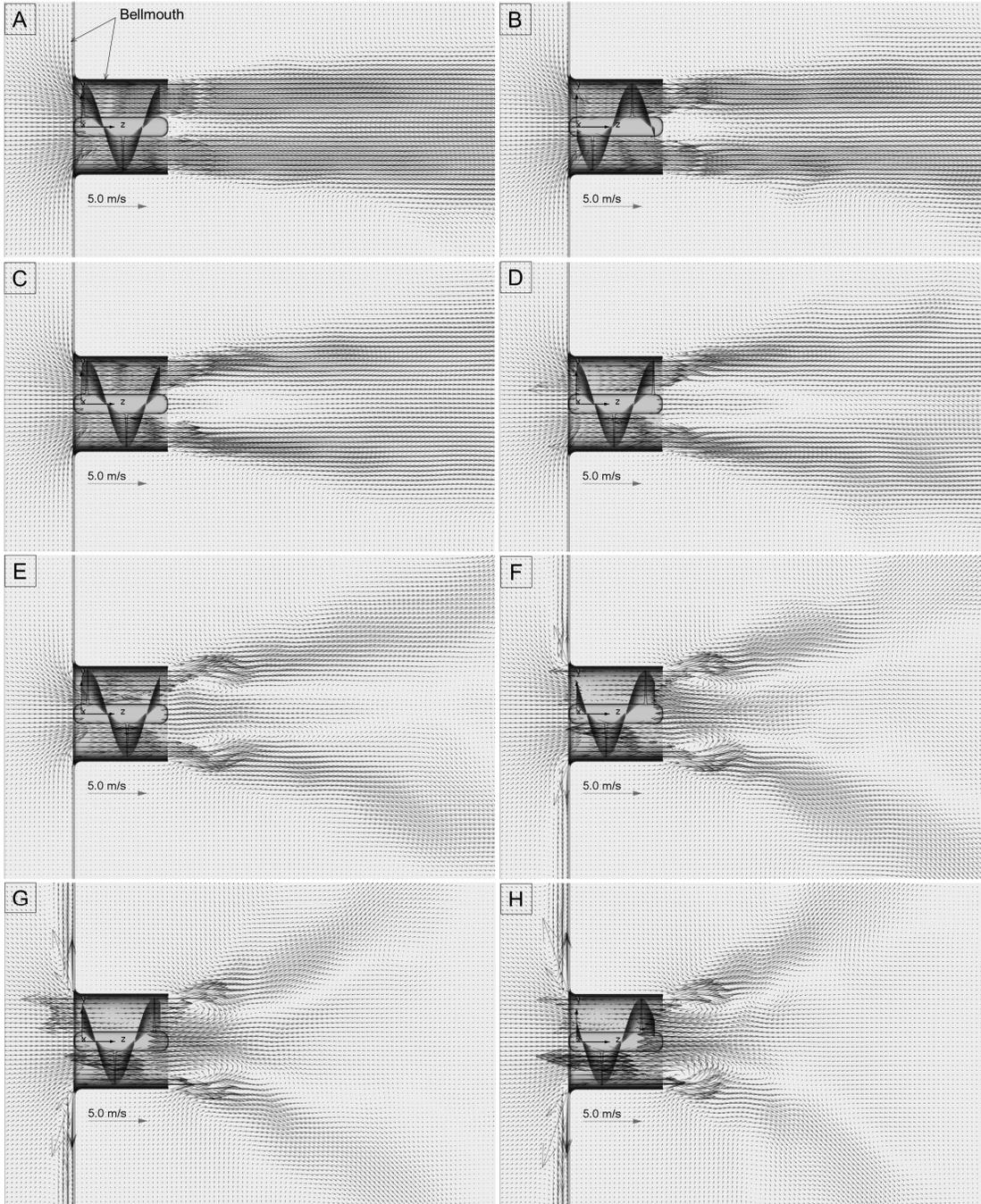


Fig. 5 Vector profiles obtained by the LES analysis of SSHAF

Fig. 4에서 나타난 정압효율의 분포는 유량계수 약 $\phi=0.18$ 에서 가장 큰 약 48%를 보여주고 있다. 이것은 기존 소형축류팬에서는 4개의 날개가 분

리되어 있는 반면, SSHAF에서는 주어진 축방향 깊이에서 나선형날개 형상이 하나로 부드럽게 이어져 있어 유동이 부드럽게 흐르게 되어 효율이

더 높다고 판단된다.

한편, 이번 연구에서는 운전부하에 따른 난류유동장의 유동 구조를 비교 분석하기 위해 Fig. 4에서 8개의 운전점(operating point)들을 선택하였다. 참고로 Table 2는 8개의 운전점들(A~H)에 대한 상세한 무차원계수 값들을 보여준다.

3.2 벡터유동장 및 평균속도 분포

Fig. 5는 운전 부하별로 형성되는 SSHAF에서 하류의 유동장 특징들을 파악하고자 LES로 해석한 Fig. 4에서 제시한 8개의 운전점들(A~H)을 만족하는 각 벡터유동장들을 나타낸 그림이다. 또 Fig. 6은 SSHAF의 벨마우스 끝단으로부터 축방향(Z방향)으로 10 mm 떨어진 Y-Z평면 내 수평(반경)방향 거리 $X=0$ 의 위치에서 수직(반경)방향 거리(Y방향)에 따라 나타낸 축방향 평균속도분포이다. 이것은 SSHAF의 벡터분포만은 허브 하류에서 형성된 역류(reverse flow)의 속도크기가 명확치 않기 때문에 별도로 나타낸 것이다.

최대유량인 운전점 A에서 SSHAF의 하류는 허브 인접영역에서만 가장 작은 속도크기를 나타내지만, 허브를 벗어나서 날개끝단까지는 속도가 크게 형성되어 하류방향을 향해 똑바로 진행하는 전형적인 축류유동을 보이고 있다. 그러나 운전부하가 증가(정압상승)함에 따라 허브 주변의 하류에서 형성된 역류의 세기는 더 커지게 되며, 역류

가 점유하는 반경방향의 범위도 더 확산되어 나타나고 있다. 이로 인해 나선형 날개에서 발달한 축류유동은 반경방향으로 밀려서 확산 발달하게 된다. 따라서 SSHAF의 하류유동은 크게 역류를 나타내는 내부유동과 이를 둘러싼 외부유동으로 나뉜다는 것을 알 수 있다. 특히 그 양상은 운전부하가 증가할수록 더 크게 발달하여 나타난다. 즉, 외부영역에서 발달하는 외부유동은 전형적인 축류유동으로 출발하여 어느 정도 하류로 형성되다가 운전부하가 증가하는 운전점 C부터는 점차 반경방향으로 확산하면서 하류로 발달한다. 반면에 웬 중심부근의 하류에서 발달한 내부유동은 Fig. 6과 같이 운전부하가 증가하면서 웬쪽으로 향하려는 역류의 속도가 더 커지면서 그 공간도 점차 커져 허브 쪽으로 접근한다. 결과적으로 주류와 역류의 경계부근에서는 재순환하는 와류(vortex)가 존재함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 기존의 소형축류팬¹⁵⁾에서도 감지된 현상이다. 그러나 고부하 운전점에서 기존 소형축류팬¹⁵⁾의 유동은 축류유동에서 완전한 반경유동¹²⁾으로 바뀌어 존재하지만, SSHAF에서는 전 유량에 걸쳐 반경유동은 존재하지 않는다는 점이 가장 근본적인 차이점이다. 이것은 날개형상으로부터 나오는 차이로 볼 수 있다. 즉, 기존 소형축류팬은 4개의 독립된 날개로 구성되어 있지만, SSHAF는 날개가 단절되지 않고 나선형으로 길게 하나로 이어져 있기 때문에 운전부하를 잘 이겨내는 것으로 판단된다.

4. 결론

완전한 3차원 형태의 1피치 SSHAF모델을 LES로 전산 해석한 난류유동장의 구조 특성은 다음과 같다.

- 1) SSHAF의 유량계수에 따른 정압계수 분포는 실속을 포함하지 않으며, 최대 정압효율도 기존 축류팬보다 약 13% 더 높다.
- 2) 유량계수에 따른 정압계수 및 정압효율분포들은 각각 하나의 근사식으로 나타낼 수 있다.
- 3) SSHAF의 하류에서 발달한 전형적인 축류유

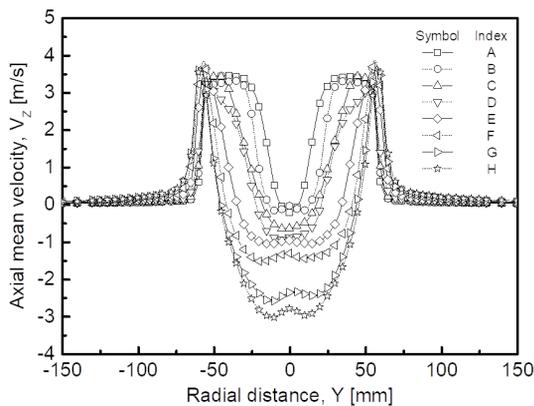


Fig. 6 Axial mean velocity profiles obtained by LES analysis

동은 운전부하가 증가함에 따라 그 영향이 점점 줄어들면서 허브를 벗어난 외부유동은 반경방향으로 휘면서 발달한다.

4) SSHAF의 허브를 중심으로 하류에서 발달하는 내부유동에는 역류가 흐르면서 운전부하가 증가함에 따라 그 절대속도가 더 커지면서 그 공간도 점차 커져 허브 쪽으로 접근한다.

5) 운전부하가 증가하여도 SSHAF의 하류에서 발달한 유동은 기존 소형축류팬과 달리 완전한 반경유동은 포함하지 않는다.

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. T. Adachi, M. Yamashita, K. Yasuhara, and T. Kawai, 1996, "Effects of Operating Conditions on the Flow in the Moving Blade Passage of a Single Stage Axial-Flow Fan", Proceedings of the 6th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vol. 2, pp. 199-208.
2. S. C. Morris, J. J. Good and J. F. Foss, 1998, "Velocity Measurements in the Wake of an Automotive Cooling Fan", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 17, pp. 100-106.
3. J. K. Kim and S. H. Oh, 2016, "A Blowing Device Having a Helix Fan", Korean Patent No. 10-1657352 (in Korean), Industry-Academia Collaboration Foundation, Kunsan National University.
4. J. K. Kim and S. H. Oh, 2019, "Large Eddy Simulation on the Characteristics of Turbulent Flow Fields at the Maximum Flowrate of a Three-Dimensional Helical Axial Fan with the Different Depth of Bellmouth", Journal of the Korean Society of Power System Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 12-19. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2019.23.2.012>)
5. J. K. Kim and S. H. Oh, 2019, "A Study on the Structure of Instantaneous Flow Fields of One-Pitched Small-Size Helical Axial Fan by Large Eddy Simulation", Journal of the Korean Society of Power System Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 27-35. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2019.23.3.027>)
6. J. H. Zhou and C. X. Yang, 2008, "Design and Simulation of the CPU Fan and Heat Sinks", IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies, Vol. 31, No. 4, pp. 890-903.
7. J. W. Kim, J. H. Kim, and K. Y. Kim, 2010, "Flow Analysis and Performance Evaluation of a Ventilation Axial-Flow Fan Depending on the Position of Motor", Journal of Fluid Machinery, Vol. 13, No. 4, pp. 25-30.
8. J. Hurault, S. Kouidri, F. Bakir, and R. Rey, 2010, "Experimental and Numerical Study of the Sweep Effect on Three-Dimensional Flow Downstream of Axial Flow Fans", Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 21, pp. 155-165.
9. J. O. Han, S. Y. Lee, S. H. Yu, and J. K. Lee, 2006, "The Study on Performance of an Axial Fan with Centrifugal Type Blades in Duct Flow", Proceedings of The 4th National Congress on Fluids Engineering, August 23-25, pp. 213-216, Kyungju, Korea.
10. T. Ito, G. Minorikawa, and Q. Fan, 2009, "Experimental Research for Performance and Noise of Small Axial Fan", International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 2, No. 2, pp. 136-146.
11. S. H. Liu, R. F. Huang, and C. A. Lin, 2010,

- "Computational and Experimental Investigation of Performance Curve of an Axial Flow Fan Using Downstream Flow Resistance Method", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, pp. 827-837.
12. SC/Tetra(Version 12), 2015, User's Guide, Software Cradle Co., Ltd.
13. J. K. Kim and S. H. Oh, 2013, "Experimental Study on the Aerodynamic Performance Characteristics of a Small-Size Axial Fan with the Different Depths of Bellmouth", *Journal of the Korean Society of Power System Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 73-78.
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 of Power System Engineering*, Vol. 19, No. 6, pp. 19-25.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2015.19.6.019>)
15. J. K. Kim and S. H. Oh, 2015, "A Study on the Structure of Turbulent Flow Fields According to the Operating Loads of Three-Dimensional Small-Size Axial Fan by Large Eddy Simulation", *Journal of the Korean Society of Power System Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 80-85.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2015.19.5.080>)
16. SYSTAT Software Inc., 2002, TableCurve2D User's Manual, Version 4 for Windows.