

날개 길이가 다른 1피치 소형 나선형 축류팬의 공력성능에 관한 대규모 와 모사

Large Eddy Simulation on the Aerodynamic Performance of One-pitched Small-size Helical Axial Fan with the Different Blade Lengths

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

(Received 4 March 2020, Revision received 9 June 2020, Accepted 9 June 2020)

Abstract : To analyze the aerodynamic performance of three types of small-size helical axial fans (SSHAF) and small-size axial fan (SSAF), large eddy simulation (LES) was performed using unsteady-state, incompressible and three-dimensional rectangular coordinate systems. The static pressure and power coefficients for the flow coefficient of the SSHAF increase with increasing blade length, and unlike the SSAF, there are no unstable regions of stall. In addition, the increasing rate of power coefficients in SSHAF is about twice that of the same flowrate as the blade length increases. The static and total pressure efficiencies for the flow coefficient of SSHAF are distributed higher than those of SSAF regardless of blade length, and the maximum values at the blade length of 100 mm are about 48% and 54%, respectively. As a result, SSHAF is considered sufficiently replaceable with a new axial fan because it can exhibit similar aerodynamic characteristics as SSAF by changing the blade length.

Key Words : Aerodynamic performance, Courant number, Dynamic subgrid-scale, Large eddy simulation (LES), Small-size helical axial fan (SSHAF)

— 기 호 설 명 —

η_s : 정압효율 [%], $\{\eta_s = 100p_s Q / (60L)\}$	ϕ : 유량계수 [-], $\{\phi = Q / (60AU_2)\}$
η_t : 전압효율 [%], $\{\eta_t = 100p_t Q / (60L)\}$	ψ_s : 정압계수 [-], $\{\psi_s = 2p_s / (\rho U_2^2)\}$
λ : 동력계수 [-], $\{\lambda = 2L / (\rho U_2^3 A)\}$	A : 공기통과 단면적 [m^2], $\{A = \pi(D_2^2 - D_h^2) / 4\}$
	D_2 : 임펠러(impeller) 외경 [m]
	D_h : 임펠러 허브(hub) 직경 [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.

- L : 동력 [W], $\{L = 2\pi NT/60\}$
- ℓ_b : 임펠러의 날개 길이 [m]
- N : 팬의 회전수 [rpm]
- p_s : 정압력 [Pa]
- p_t : 전압력 [Pa]
- Q : 유량 [m^3/min]
- T : 토오크(torque) [$N\cdot m$]
- U_2 : 임펠러 원주속도 [m/s], ($U_2 = \pi D_2 N/60$)
- π : 원주율 [-]
- ρ : 공기의 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

기존의 축류팬(axial fan)은 다른 팬들에 비해 제한된 공간 내에서 배치하기가 용이하고, 상대적으로 가격이 저렴하기 때문에, 현재까지도 각종 제품군에서 많이 사용되고 있는 송풍기이다. 그러나 축류팬의 공력성능은 원심송풍기 등에 비하면 풍량 대비 매우 낮은 정압 성능과 실속(stall)을 나타내는 공력성능을 가지므로, 높은 정압을 요구하며 안정된 공력성능을 요구하는 환경에서는 사용될 수 없다는 단점이 있다. 따라서 저자들¹⁾은 축류팬의 이런 단점들을 극복하기 위해 나선형 축류팬(helical axial fan)을 고안한 바가 있다.

그 후 저자들은 나선형 축류팬의 유동 특성을 고찰하기 위해 계산시간이 많이 걸린다는 단점이 있지만, RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes) 모델²⁾보다는 수치해석의 정확도가 더 높다고 잘 알려진 대규모 와 모사(large eddy simulation, 이하 LES라고 함) 기법^{3,4)}을 사용해 왔다. 이런 사실을 저자들도 그동안 실험으로 얻어진 전형적인 축류팬의 공력성능의 결과⁵⁾가 RANS 모델보다는 LES로 수치 해석한 결과³⁾와 더 일치한다고 발표한 적이 있다. 한편, LES기법은 다양한 크기의 척도(scale)를 갖는 난류 와(eddy)들에 의해 조직화된 난류유동을 정확히 해석하기 위해 주어진 격자크기의 필터(filter)보다 더 큰 대규모 와(large scale eddy)는 어떠한 가정이나 모델들 없이 직접 계산하고, 필터보다 더 작은 소규모 와(small scale

eddy)는 아격자 척도(sub-grid scale)라는 난류모델을 도입하여 해를 구하는 방법이다.⁴⁾

그동안 저자들은 LES로 기존의 소형 축류팬(small-size axial fan, 이하 SSAF라고 함)³⁾에 대해 다양한 수치연구를 진행한 후, 소형 나선형 축류팬(small-size helical axial fan, 이하 SSHAF라고 함)에 대해서도 수치연구를 진행해 왔다.⁶⁻⁹⁾ 즉, 2피치(pitch) SSHAF와 벨마우스(bellmouth)의 최적 깊이를 찾기 위한 난류유동장 특성 연구⁶⁾, 또 1피치 SSHAF의 순간유동장 구조과악 연구⁷⁾, 또 날개 피치 수에 따른 SSHAF의 공력성능 연구⁸⁾, 그리고 운전부하에 따른 1피치 SSHAF의 난류유동장 구조 연구⁹⁾들을 발표해 왔다. 이런 연구들을 통해 저자들은 SSHAF가 기존 SSAF의 단점을 극복하면서 축류팬의 유동특성을 발휘한다는 사실을 파악하였다.

이번 연구에서는 같은 1피치를 갖는 SSHAF들이 날개 길이가 변했을 때, LES 수치해석을 통해 얻어진 풍량 대비 정압 등의 공력성능들이 SSAF와 어떻게 다르게 나타나는지 여부를 파악하고자 하였다. 동시에 SSHAF가 새로운 축류팬으로 대체 가능한지도 검토하고자 하였다. 또한 SSHAF의 격자들은 실험결과⁵⁾와 일치를 본 기존 SSAF의 LES 해석 격자정보³⁾를 바탕으로 더 세밀하게 확대하여 적용하였다. (Table 1 참조) 한편, SSHAF들의 LES해석에는 격자를 실제로 회전시키지 않고서도 팬의 회전효과를 계산에 반영할 수 있도록 정지영역과 회전영역 사이의 데이터를 보간(interpolation)하는 미끄럼격자(sliding mesh) 방식을 이용하였으며, 또 유한체적법에 기초한 상용소프트웨어인 SC/Tetra(ver.12)⁴⁾를 사용하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 1은 SSHAF를 LES로 해석하기 위해 사용한 팬테스터(fan tester) 챔버(chamber)의 기하학적 형상과 크기를 나타내고 있으며, 동시에 설치된 SSHAF의 종류와 설치기준 및 기하학적 크기들을 나타내고 있다. 여기서 벨마우스 앞뒤에 붙인 원

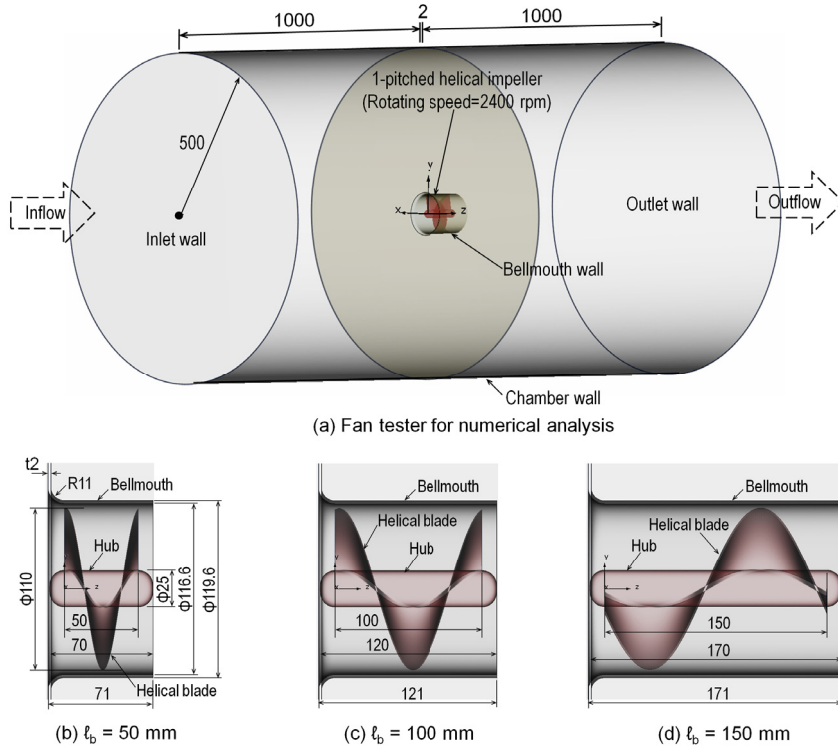


Fig. 1 Geometry configuration for the numerical analysis of 1-pitched SSHAF

통형 챔버들의 크기는 SSHAF의 주 유동이 계산 영역의 크기에 크게 영향을 받지 않도록 반경 500 mm, 길이 1000 mm로 각각 설정하였다. 한편, SSHAF와 벨마우스의 해석모델들은 상용소프트웨어인 CATIA(V5R18)로 만들었으며, 나머지 챔버들은 SC/Tetra의 전처리 기능을 이용하여 만들었다. Fig. 1에서 1피치 날개를 갖는 SSHAF들은 모두 동일한 날개 직경과 허브 직경들을 가지며, 날개와 허브 및 벨마우스 길이들만 서로 다르다. 특히 날개 길이는 각각 50 mm, 100 mm, 150 mm로 변화를 주었다. 또 SSHAF의 벨마우스들은 그 곡률반경이 끝나는 위치를 시작으로 허브길이까지 축방향으로 늘려 만들었다.

Fig. 2는 Fig. 1(a)를 X=0을 기준으로 절단된 Y-Z단면의 비정형 격자 그림이다. 여기서 웬테스터를 구성하는 각 표면 요소들에는 SC/Tetra의 전처리 소프트웨어로 경계조건을 부여하였으며, 격자는 크기를 제어할 수 있는 SC/Tetra의 "Octree" 기능을 이용하였다. 여기서 SSHAF의 세부적인 격

자 크기는 SSAF³⁾와 동일하게 웬의 최소 격자크기가 모두 0.684 mm가 될 때까지 세분화해서 각각 만들었다. Table 1은 이번 연구에서 사용한 SSHAF의 격자 정보들이며, 실험으로 검증된 SSAF³⁾의 경우보다도 격자를 2배 이상으로 더 세밀하게 만든 결과이다. 또한 SSHAF와 벨마우스 및 챔버 벽면들에는 해의 수렴성을 높이기 위해 2개의 프리즘층(prism layer)을 각각 삽입하였다.

Table 1 Mesh specification for numerical analysis

Fan types		Total element number
		Total node number
SSHAF	$l_b = 50$ mm	8,410,022
		1,892,388
	$l_b = 100$ mm	9,489,371
		2,215,040
	$l_b = 150$ mm	12,192,802
		2,857,486
SSAF		4,395,460
		867,051

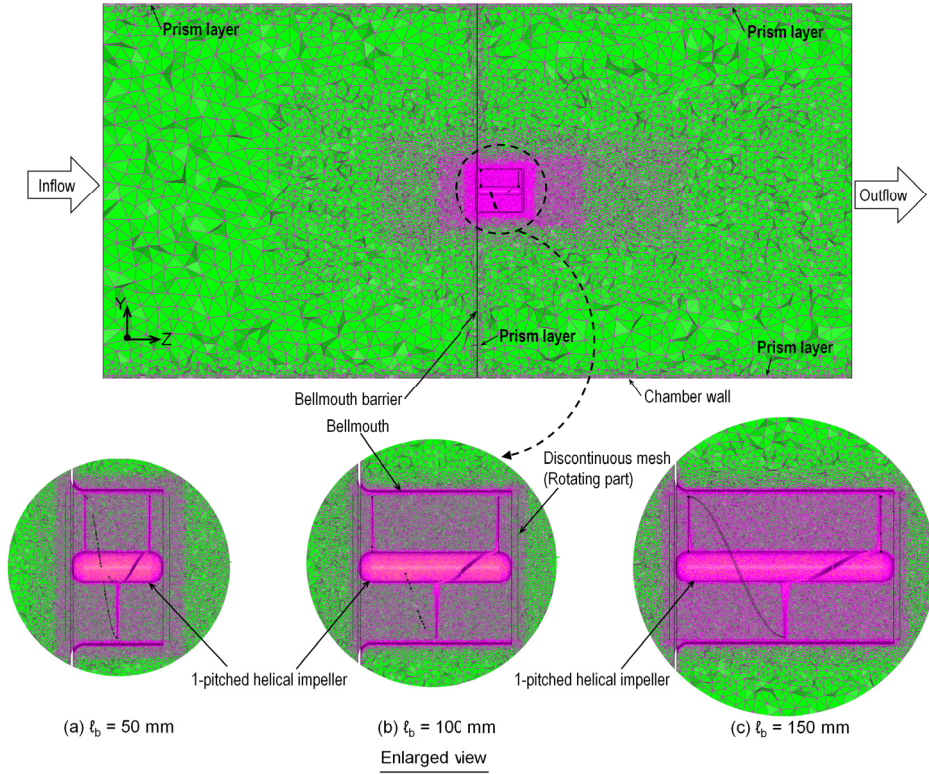


Fig. 3 Unstructured mesh configuration for the numerical analysis of 1-pitched SSHAF

2.2 수치기법

Fig. 1(a)의 랜테스터를 구성하는 각종 표면들에 적용된 경계조건들을 살펴보면, 벨마우스와 챔버의 벽면 조건들은 모두 점착(no-slip)조건들로 설정하였다. 챔버의 입구와 출구벽면은 각각 유량과 대기압조건들을 적용하였으며, 수치해석을 완료한 후에는 챔버 입구에서 형성된 정압을 확보하였다. 이때, 최대유량은 챔버의 입구 및 출구벽면을 모두 대기압 조건들로 설정하여 확보하였다.

한편, 모든 SSHAF의 회전수는 SSAF³⁾와 동일하게 2,400 rpm 으로 설정하여 미끄럼격자기법⁴⁾을 적용하였다. 또 LES 해석의 아격자 척도 모델에는 Dynamic Smagorinsky model을 사용하였다. 시간 미분항은 2차 음형(implicit) 기법을 적용하였으며, 대류항(convection)은 2차 중앙차분(central difference)기법과 1차 풍상(upwind)차분기법을 혼용한 기법에서 안정성(stability) 조건을 적용하였다.⁴⁾ 또 이산화된 방정식들의 압력보정에는 모두

SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다. 또 SSHAF의 초기시간 간격은 회전수와 최소격자 크기를 고려하여 4.95×10^{-5} 로 결정하였으며, 어떤 시간간격(time interval)에도 해에 영향을 받지 않는 해석결과를 얻기 위해서 꾸랑수(Courant number)는 1로 적용하였다.⁴⁾ 이것을 토대로 최대의 반복주기(iteration cycle)는 질량유량(mass flux)이 충분히 안정을 보이는 10만회까지 비정상상태로 계산한 다음, 마지막 계산 결과를 바탕으로 다시 10만회를 더 비정상상태로 시간평균(time average)하여 그 결과들을 분석하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 정압계수 분포

Fig. 4는 SSAF와 날개 길이가 서로 다른 3개의 SSHAF들을 LES로 해석하여 얻어진 무차원 공력 성능의 하나로 유량계수(ϕ)에 따른 정압계수(ψ_s)

들의 분포를 상호 비교한 그림이다. 여기서 SSAF³⁾의 날개직경이나 허브직경들은 SSHAF와 같다.

Fig. 4에서 나타난 가장 큰 특징은 날개 길이가 축방향으로 증가함에 따라 벨마우스와 나선형 임펠러 사이의 공간은 더 넓어지므로, 유체는 보다 더 쉽게 빠져나가게 되어 SSHAF의 정압은 더 상승하며, 유량 또한 더 증가함을 알 수 있다. 특히 같은 날개 직경과 허브 직경을 가짐에도 불구하고 1피치 SSHAF의 날개 길이가 100 mm일 때는 정압성능이 SSAF의 정압성능보다 떨어지지만, 날개 길이가 150 mm일 때는 SSAF의 정압성능보다 더 우위에 있다는 점을 알 수 있다. 따라서 SSHAF는 날개 길이가 제한되는 공간에 설치할 때는 SSAF보다는 제약이 있지만, 그렇지 않는 경우라면 유량계수에 대한 정압계수의 변화를 날개 길이만을 변화시킴으로써도 가능하다는 사실을 알 수 있다. 또한 SSAF의 유량계수 대비 정압계수의 곡선에서는 곡률이 크게 변화하는 실속을 나타내는 불안정한 영역(즉, $0.13 \leq \phi \leq 0.2$)이 항상 존재하는 반면에, SSHAF에서는 존재하지 않는다는 것이다. 이것은 팬의 구조 및 형상에서 나오는 현상으로 판단된다. 즉, SSAF의 경우는 제한된 숫자의 날개가 서로 분리되어 있으므로 모든 운전부하에 대응하여 누설이나 날개 떨림 등이 커서 일률적인 정압성능의 발휘가 어려우나, 날개가 일체화되어 있는 SSHAF의 경우에는 상대적으로 모든 운전부하에 대하여 일정한 정압성능 발휘가 가능하기 때문에 판단된다.

한편, 유량계수별 정압계수의 LES 해석값들을 만족하는 근사식들은 2차원 상용소프트웨어인 TableCurve-2D¹⁰⁾로 커브피팅(curve-fitting)한 결과, SSAF의 경우에는 식 (1)로 주어지며, SSHAF의 경우에는 모두 식 (2)의 형태로 나타낼 수 있다. 여기서 식 (1)과 식 (2)들을 만족하는 각 계수들은 Table 2와 같다.

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

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

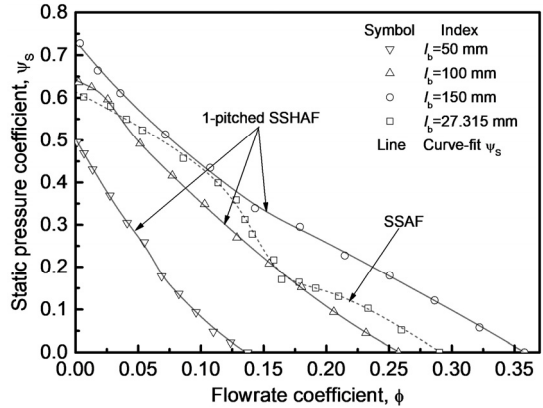


Fig. 4 Static pressure coefficient profiles obtained by LES analysis

Table 2 Coefficient values satisfied with the curve-fit of static pressure coefficient

Fan types		Coefficient values	
SSAF		a = 0.61289505	g = -0.018537941
		b = -10.87901	h = 193.41474
		c = -8.1470624	i = -32.447299
		d = 26.186608	j = -42.7252
		e = 29.280966	k = -234.60854
		f = 3.5169013	-
SSHAF	$\ell_b = 50$ mm	a = 0.50393768	e = 264.11964
		b = -30.197078	f = 64.089628
		c = -20.475475	g = -1037.4671
		d = 199.07838	h = 6996.9626
	$\ell_b = 100$ mm	a = 0.64112525	e = 839.34879
		b = -55.297363	f = -380.27689
		c = -37.033379	g = -2736.074
		d = 1142.7673	h = 8495.1867
	$\ell_b = 150$ mm	a = 0.73435372	e = 50.966807
		b = -9.3595965	f = 135.59676
		c = -10.59359	g = -75.762643
		d = 6.4174215	h = -176.10459

3.2 동력계수 분포

Fig. 5는 SSAF와 날개 길이가 서로 다른 3개의 SSHAF들을 LES로 해석하여 얻어진 무차원 공력 성능의 하나로 유량계수에 따른 동력계수(λ)들을 상호 비교한 그림이다. 1피치 날개만을 갖는 SSHAF들의 동력계수는 날개 길이가 증가함에 따라 전 유량계수에 걸쳐 거의 약 2배씩 증가함을

알 수 있다. 이것은 1피치를 구성하는 SSHAF들의 날개 길이가 늘어남에 따라 날개 표면적이 그만큼 증가하므로 축에 걸리는 토크도 더 증가하기 때문이다. 특히 날개 길이가 50 mm와 100 mm를 갖는 SSHAF들의 경우에는 전 유량계수에 걸쳐 SSAF의 동력계수보다는 작게 나타나지만, 날개 길이가 150 mm인 SSHAF의 경우에는 SSAF의 동력계수보다는 더 크게 분포되어 나타난다.

한편, 유량계수별 동력계수의 LES 해석값들을 TableCurve2D¹⁰⁾로 커브피팅하여 얻은 결과를 살펴보면, SSAF의 근사식은 식 (3)으로 주어지며, SSHAF의 경우에는 날개 길이 50 mm, 100 mm, 150 mm에 따라 각각 식 (4), 식 (5), 식 (6)으로 주어진다. 이때, 식 (3) ~ 식 (6)들을 만족하는 계수들은 모두 Table 3에 나타내었다.

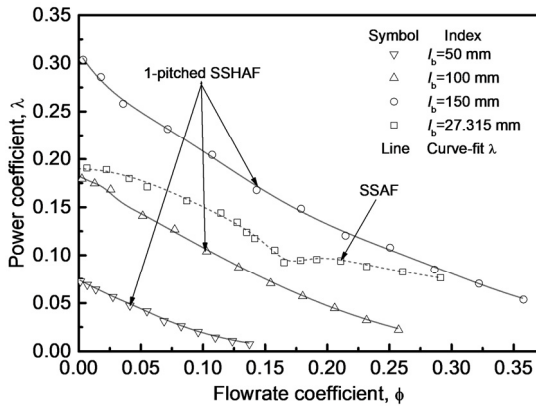


Fig. 5 Power coefficient profiles obtained by LES analysis

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

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

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

$$\lambda = a + b\phi + c\phi^2 + d\phi^3 + e\phi^4 + f\phi^5 + g\phi^6 + h\phi^7 \quad (6)$$

Table 3 Coefficient values satisfied with the curve -fit of power coefficient

Fan types		Coefficient values	
SSAF		a = 0.19297123	f = -320.45763
		b = -16.172347	g = -68.843927
		c = -3.3889621	h = 499.71182
		d = 100.66758	i = 89.659929
		e = 22.38114	-
SSHAF	l _b =50 mm	a = 0.073373816	f = -2453.9169
		b = -36.849833	g = -461.31365
		c = -3.3614248	h = 22511.852
		d = 552.17237	i = 1103.3922
		e = 63.979008	j = -120119.12
	l _b =100 mm	a = 0.18177719	g = -1166.6712
		b = -72.429595	h = 7493.2085
		c = -13.801363	i = 585.08197
		d = 1385.2598	j = -21424.881
		e = 298.72995	k = 1903.2251
		f = -1627.6281	-
	l _b =150 mm	a = 0.31252909	e = 2127.4933
b = -2.1778335		f = -6769.6233	
c = 31.389934		g = 10921.28	
	d = -355.93461	h = -7032.293	

3.3 정압효율 분포

Fig. 6은 SSAF와 날개 길이가 서로 다른 3개의 SSHAF들을 LES로 해석하여 얻은 무차원 공력성능의 하나로 유량계수에 따른 정압효율(η_s)들을 상호 비교한 그림이다. Fig. 6에서 SSHAF들의 유량계수에 따른 정압효율의 분포는 전체적으로 SSAF의 경우보다 높게 나타난다. 즉, SSAF의 정압효율은 비교적 넓은 유량계수에 걸쳐 분포되며, 유량계수 $\phi \approx 0.13$ 에서 최대 약 34%를 보이고 있으나, 날개 길이가 50 mm인 SSHAF의 경우, 정압효율은 유량계수 $\phi \approx 0.09$ 에서 약 45%로, 또 날개 길이가 100 mm인 경우에는 유량계수 $\phi \approx 0.18$ 에서 약 48%, 또 날개 길이가 150 mm인 경우에는 유량계수 $\phi \approx 0.25$ 에서 약 42%를 보이고 있다. 이것은 SSHAF들의 날개 형상이 축방향으로 부드럽게 하나로 이어져 있어 유동이 SSAF보다 상대적으로 부드럽게 흐르는 결과로 판단된다.

한편, 모든 팬들에 대하여 유량계수별 정압효율의 LES 해석값들을 TableCurve2D¹⁰⁾로 커브피팅한

결과, SSAF와 날개 길이가 100 mm인 SSHAF의 근사식들은 모두 식 (7)로 주어지며, 날개 길이 50 mm와 150 mm를 갖는 SSHAF들의 경우에는 식 (8)로 나타낼 수 있다. 여기서 식 (7)과 식 (8)을 만족하는 계수들은 모두 Table 4에 나타내었다.

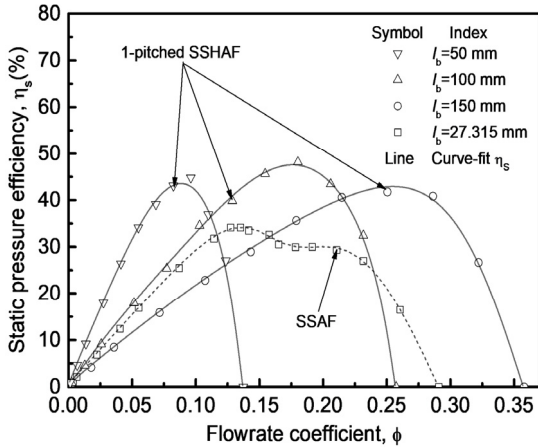


Fig. 6 Static pressure efficiency profiles obtained by LES analysis

$$\eta_s = \frac{a + c\phi + e\phi^2 + g\phi^3 + i\phi^4}{1 + b\phi + d\phi^2 + f\phi^3 + h\phi^4 + j\phi^5} \quad (7)$$

$$\eta_s = \frac{a + c\phi + e\phi^2 + g\phi^3 + i\phi^4 + k\phi^5}{1 + b\phi + d\phi^2 + f\phi^3 + h\phi^4 + j\phi^5} \quad (8)$$

3.4 전압효율 분포

Fig. 7은 SSAF와 날개 길이가 서로 다른 3개의 SSHAF들을 LES로 해석하여 얻은 무차원 공력 성능의 하나로 유량계수에 따른 전압효율(η_t)들을 상호 비교한 그림이다. Fig. 7에서 유량계수에 따른 전압효율의 분포는 날개 길이에 관계없이 SSHAF들이 모두 SSAF보다 더 높게 나타난다. 즉, SSAF의 전압효율은 넓은 유량계수에 걸쳐 분포되며, 유량계수 φ ≈ 0.135에서 최대 약 36%를 보이고 있으나, 날개 길이 50 mm를 갖는 SSHAF의 전압효율은 약 φ ≈ 0.1 부근에서 약 48%를 보이며, 또 날개 길이 100 mm를 갖는 SSHAF의 전압효율은 유량계수 약 φ ≈ 0.2 부근에서 약 54%로 가장 효

율이 높다. 그리고 날개 길이 150 mm를 갖는 SSHAF의 전압효율은 유량계수 약 φ ≈ 0.29 부근에서 약 51%를 나타내고 있다.

한편, 모든 팬들에 대하여 유량계수별 전압효율의 LES 해석값들을 TableCurve2D¹⁰)로 커브피팅한 결과, SSAF와 날개 길이가 100 mm인 SSHAF의 근사식들은 모두 식 (9)로 확보하였다. 또 날개 길이 50 mm와 150 mm를 갖는 SSHAF들의 경우에는 식 (10)으로 나타낼 수 있다. 여기서 식 (9)와 식 (10)을 만족하는 각각의 팬들에 대한 계수들은 모두 Table 5에 나타내었다.

Table 4 Coefficient values satisfied with the curve-fit of static pressure efficiency

Fan types	Coefficient values		
SSAF	a = 0.088192275	f = -422.70505	
	b = -15.124091	g = 17607.796	
	c = 287.16181	h = 1023.7315	
	d = 102.93267	i = -26197.281	
	e = -3893.9262	j = -986.71583	
SSHAF	l _b =50 mm	a = -0.67326333	g = -5168318.3
		b = 1526.7951	h = 900827.33
		c = 1238.6991	i = -12077415
		d = -6986.032	j = -4044657.4
		e = 987922.34	k = -22765855
		f = -53329.545	-
	l _b =100 mm	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
	l _b =150 mm	a = -8.40525	g = -1774434.1
		b = 4269.0267	h = -356891.61
		c = 2984.0364	i = -1639210.3
		d = -13191.252	j = 565730.2
	e = 887130.71	k = -1105026.5	
	f = 69676.381	-	

$$\eta_t = \frac{a + c\phi + e\phi^2 + g\phi^3 + i\phi^4}{1 + b\phi + d\phi^2 + f\phi^3 + h\phi^4 + j\phi^5} \quad (9)$$

$$\eta_t = \frac{a + c\phi + e\phi^2}{1 + b\phi + d\phi^2 + f\phi^3} \quad (10)$$

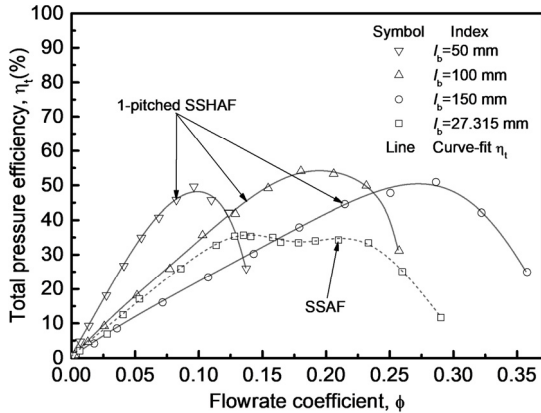


Fig. 7 Total pressure efficiency profiles obtained by LES analysis

Table 5 Coefficient values satisfied with the curve-fit of total pressure efficiency

Fan types		Coefficient values	
SSAF		a = 0.21741601	f = 89.70093
		b = -13.412742	g = 19673.38
		c = 299.8101	h = -918.96518
		d = 49.303227	i = -29725.882
		e = -4197.1083	j = 1641.4104
SSHAF	l _b =50 mm	a = 0.2558314	d = 60.770515
		b = -9.5083838	e = -4254.4058
		c = 621.29921	f = -245.50719
	l _b =100 mm	a = 0.22417627	f = -6126.8779
		b = 7.6415933	g = -6188.5444
		c = 266.61134	h = 27350.049
		d = 524.08261	i = -134392.05
		e = 9869.6241	j = -46362.711
	l _b =150 mm	a = 0.18251096	d = -18.269088
		b = 0.43888504	e = -668.23989
		c = 264.46618	f = 33.590875

4. 결론

날개 길이가 서로 다른 3차원 SSHAF의 모델들을 LES로 전산 해석한 결과는 다음과 같다.

1) SSHAF들의 유량계수별 정압성능은 날개 길이가 증가함에 따라 증가된 분포를 보이며, SSAF와는 달리 실속을 나타내는 불안정한 영역은 존재하지 않는다.

2) SSHAF들의 유량계수별 동력계수는 날개 길이가 증가함에 따라 증가되는 분포 모습을 보여 주며, 동일유량 대비 약 2배씩 증가한다.

3) SSHAF들의 유량계수에 따른 정압효율 및 전압효율들의 분포는 날개 길이에 관계없이 모두 SSAF의 경우보다 더 높게 나타나며, 정압효율은 날개 길이가 100 mm인 경우에 유량계수 $\phi \approx 0.18$ 에서 약 48%로, 전압효율은 유량계수 약 $\phi \approx 0.2$ 에서 약 54%로 가장 크게 나타난다.

4) 결과적으로 SSHAF는 날개 길이를 변화시킴으로써 SSAF와 유사한 공력특성을 발휘할 수 있어 새로운 축류팬으로서 충분히 대체 가능하다고 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. 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.
2. J. K. Kim and S. H. Oh, 2013, "Evaluation of the Turbulence Models on the Aerodynamic Performance of Three-Dimensional Small-Size Axial Fan", Journal of the Korean Society of Power System Engineering, Vol. 18, No. 6, pp. 13-20.
3. 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>)
4. SC/Tetra(Version 12), 2015, User's Guide, Software Cradle Co., Ltd.
 5. 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.
 6. 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>)
 7. 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>)
 8. J. K. Kim and S. H. Oh, 2019, "Large Eddy Simulation on the Aerodynamic Performance of Small-Size Helical Axial Fan with the Different Number of Blade Pitches", Journal of the Korean Society of Power System Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 57-64.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2019.23.5.057>)
 9. J. K. Kim and S. H. Oh, 2019, "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", Journal of the Korean Society of Power System Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 48-55.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2019.23.6.048>)
 10. SYSTAT Software Inc., 2002, TableCurve2D User's Manual, Ver.4 for Windows.