



날개 피치수가 다른 소형 나선형 축류팬의 공력성능에 대한 대규모 와 모사

Large Eddy Simulation on the Aerodynamic Performance of Small-size Helical Axial Fan with the Different Number of Blade Pitches

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

(Received 21 August 2019, Revision received 14 October 2019, Accepted 14 October 2019)

Abstract: Large eddy simulation (LES) was performed in unsteady-state, incompressible and three-dimensional coordinate systems to analyze the aerodynamic performance of two types of small-size helical axial fans (SSHAF) and small-size axial fans (SSAF). Regardless of the number of blade pitches, the SSHAF does not have an unstable region representing the stall in the static pressure performance distribution, unlike the SSAF. At the same axial depth, doubling the number of blade pitches in SSHAF results in approximately twice the maximum flow rate and a significant reduction in static pressure performance, but reversal in low flow regions with a flow coefficient of less than 0.02. The maximum total pressure efficiency of the SSHAF with one-pitch blade is the greatest at about 54% at a flow coefficient of about 0.2. On the other hand, the maximum total pressure efficiency of the SSAF is about 36%. As a result, SSHAF has similar aerodynamic characteristics to SSAF and can be considered as an alternative to the new axial fan.

Key Words : Aerodynamic Performance, Courant Number, Dynamic Subgrid-Scale, Large Eddy Simulation (LES), Small-Size Helical Axial Fan (SSHAF)

— 기 호 설 명 —

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

*† 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.

$$\eta_t : \text{축류팬의 전압효율} [\%], \{ \eta_t = \frac{50p_t Q}{\pi NT} \}$$

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

축류팬(axial fan)은 각종 제품군에서 가장 많이 사용되고 있는 송풍기 중 하나이며, 우리 주변에서도 쉽게 볼 수 있는 형식이다. 특히 축류팬은 다른 팬에 비해 제한된 공간 내에서 배치가 용이하고, 가격이 저렴하기 때문에 현재까지도 많이 사용되고 있다. 그러나 축류팬의 공력성능은 다른 종류의 팬들에 비해 풍량 대비 매우 낮은 정압 성능을 가지므로, 높은 정압을 요구하는 환경에서는 사용할 수 없는 단점이 있다. 이를 만회하기 위해 Kim 등¹⁾은 정압성능을 높이면서 축류팬의 기능도 발휘할 수 있도록 나사(screw)형상에 착안하여 나선형 날개의 피치(pitch) 숫자를 달리할 수 있는 새로운 나선형 축류팬(helical axial fan)을 고안한 바가 있다. 또한 Kim 등은 계산시간이 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 나선형 축류팬을 연구한 결과 기존의 축류팬과 같은 유동을 발휘한다는 것을 파악하였다.^{2,3)}

전산유체역학에 의한 축류팬의 해석은 컴퓨터의 발달과 더불어 해석모델의 격자에 팬의 회전 효과를 반영하는 미끄럼격자(sliding mesh) 방식을 갖춘 상용소프트웨어를 주로 이용하고 있다. Zhou 등⁴⁾은 RNG k- ϵ 난류모델을, 또 Kim 등⁵⁾은 벽(wall) 근처영역에서 저 레이놀즈수(low-Reynolds number)를 반영한 SST(shear stress transport) 난류모델을, 또 Hurault 등⁶⁾은 레이놀즈응력(Reynolds stress)의 난류모델들을 각각 사용하여 날개 한쪽

만의 모델들을 가지고 3차원 정상상태(steady-state)로 해석하여 평균유동장을 분석한 바 있다. 또 Han 등⁷⁾과 Ito 등⁸⁾ 그리고 Liu⁹⁾들은 각각 MP k- ϵ , Standard k- ϵ , RNG k- ϵ 난류모델들을 이용하여 완전한 형태의 3차원 축류팬의 모델들을 가지고 비정상상태(unsteady-state)로 해석하여 평균유동장을 분석한 바가 있다. 또 Kim 등은 그동안 실험으로 얻어진 전형적인 축류팬의 공력성능의 결과¹⁰⁾가 LES로 해석한 수치결과¹¹⁾와 일치한다고 발표한 적이 있다.

따라서 이번 연구에서는 실험에 앞서 소형 나선형 축류팬(small-size helical axial fan, 이하 SSHAF라고 함)의 LES 수치해석을 통해 얻은 풍량 대비 정압 등의 공력특성들이 기존 소형 축류팬(small-size axial fan, 이하 SSAF라고 함)¹¹⁾과 유사한지 여부를 파악함과 동시에 SSHAF가 새로운 축류팬으로서도 대체가능한지를 파악하고자 하였다. 또 이번 연구에서는 LES로 해석한 기존 SSAF의 격자정보¹¹⁾를 바탕으로 새로운 SSHAF에서도 격자를 더 세밀하게 적용하여 공력특성을 해석하였다. (Table 1 참조) 한편, 나선형 날개가 동일한 축방향 길이를 가지면서 피치수가 1개 또는 2개 일 때도 SSHAF들이 갖는 공력특성들이 어떤 특징들을 갖고 있는지도 밝히고자 하였다. 이를 위해 유한체적법에 기초한 상용소프트웨어인 SC/Tetra(ver.12)¹²⁾를 이용하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 1은 SSHAF를 LES로 해석하기 위해 사용한 챔버(chamber)의 기하학적 형상과 크기 및 경계조건들을 나타내고 있다. 벨마우스(bellmouth) 앞뒤에 붙인 챔버들의 크기는 SSHAF의 주 유동이 계산영역의 크기에 크게 영향을 받지 않도록 설정하였다. 또 SSHAF와 벨마우스의 해석모델들은 상용소프트웨어인 CATIA(V5R18)로 만들었으며, 나머지 챔버들은 SC/Tetra의 전처리 기능을 이용하여 만들었다. 한편, Fig. 2는 Fig. 1에서 적용한 SSHAF의 상세제원 및 설치조건들을 나타내고

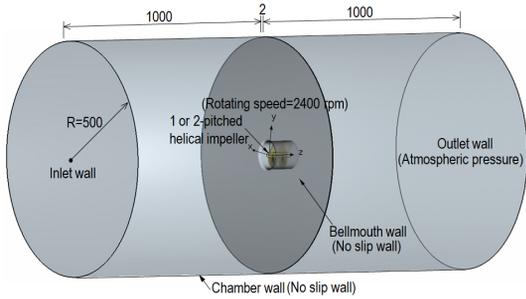


Fig. 1 Geometry configuration for the numerical analysis of 1 or 2-pitched helical impeller

있다. 여기서 날개가 1피치 또는 2피치를 갖는 SSHAF들은 유동축 방향의 깊이(Z방향)가 모두 100 mm가 되도록 나선형으로 허브 둘레를 감아 만든 것들이다. 또 SSHAF의 벨마우스들은 SSAF의 경우¹¹⁾와 달리 벨마우스 곡률반경이 끝나는 위치를 시작으로 축방향 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

Table 1 Mesh specification for numerical analysis

Fan type	Total element number
	Total node number
SSAF	4,395,460
	867,051
1-pitched SSHAF	9,489,371
	2,215,040
2-pitched SSHAF	9,747,981
	2,310,727

SSAF¹¹⁾와 동일하게 웬의 최소 격자크기들을 모두 0.684 mm까지 세분해서 각각 만든 1피치 또는 2 피치인 SSHAF들의 비정형 격자그림이다.

Table 1은 이번 연구에서 사용한 격자 정보들이며, 실험으로 검증된 SSAF의 경우보다도 격자를 더 세밀하게 만든 결과이다. 또 SSHAF와 벨마우스 및 챔버 벽면들에는 해의 수렴성을 높이기 위해 2개의 프리즘층(prism layer)을 각각 삽입하였다.

2.2 수치기법

Fig. 1에서 적용된 경계조건들을 살펴보면, 벨마우스와 챔버의 벽 조건들은 모두 점착(no-slip)

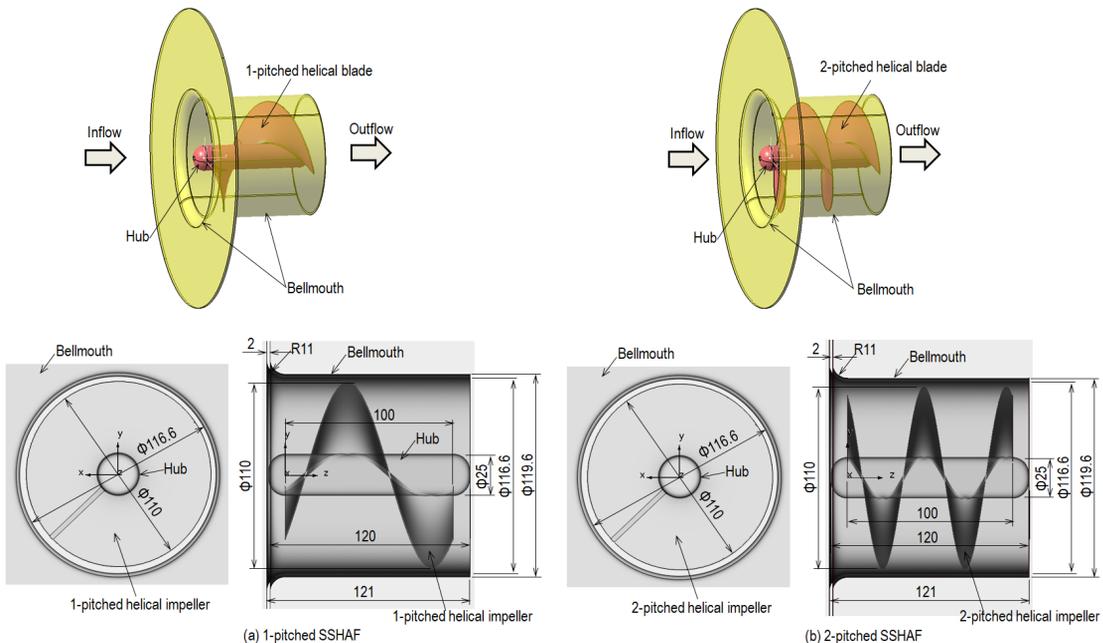


Fig. 2 Geometry arrangement of 1 or 2-pitched SSHAF

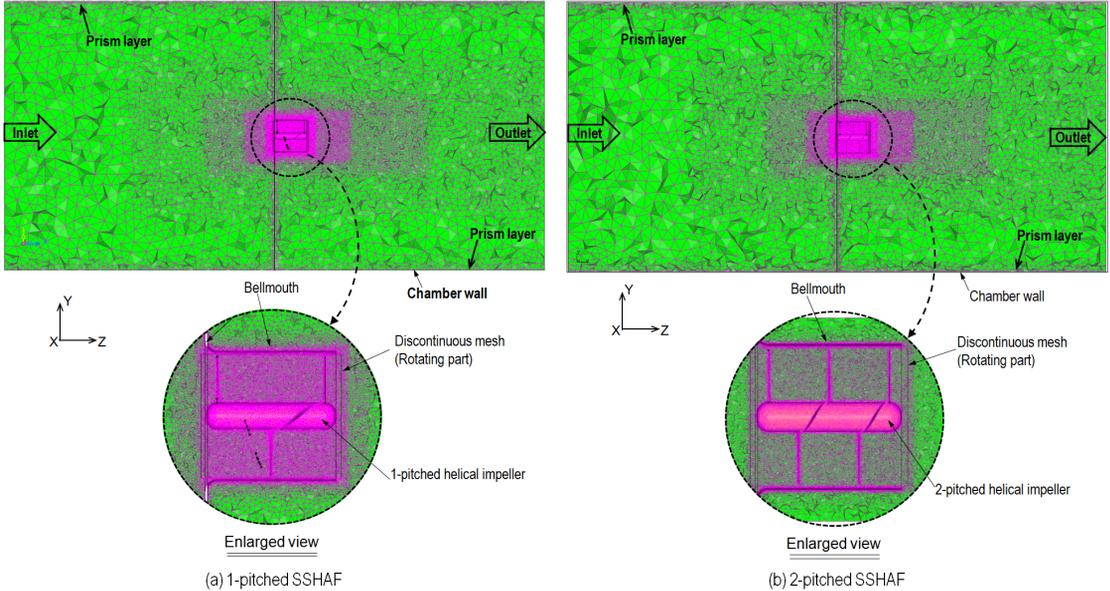


Fig. 3 Unstructured mesh configuration for the numerical analysis of 1 or 2-pitched SSHAF

조건들로 설정하였다. 챔버의 입구와 출구벽면은 각각 유량과 대기압조건들을 적용하였으며, 수치 해석을 완료한 후에는 챔버 입구에서 형성된 정압을 확보하였다. 이때, 최대유량은 챔버의 입구 및 출구벽면을 모두 대기압조건들로 설정하여 확보하였다. 한편, SSHAF의 회전수는 $SSAF^{11)}$ 와 동일하게 2400 rpm 으로 설정하여 미끄럼격자기법¹²⁾을 적용하였다. 또 LES 해석의 Subgrid-scale 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.¹²⁾ 또 이산화된 방정식들의 압력보정에는 모두 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다.

한편, 초기 시간간격은 SSHAF의 회전수와 최소 격자크기를 고려하여 4.95×10^{-5} 로 결정하였으며, 어떤 시간간격(time interval)에도 영향을 받지 않는 해석결과를 얻기 위해서 꾸랑수(Courant number)는 1로 적용하였다.¹²⁾ 이를 토대로 최대 반복주기(iteration cycle)는 질량유량(mass flux)이 충분히 안정을 보이는 10만회까지 비정상상태로 계산한 다음, 다시 10만회를 더 비정상상태에서

시간평균(time average)의 계산을 하여 그 결과들을 분석하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 정압계수 분포

Fig. 4는 SSAF와 날개 피치수가 다른 2개의 SSHAF를 LES로 각각 해석하여 얻어진 무차원 공력성능의 하나로 유량계수(ϕ)에 따른 정압계수

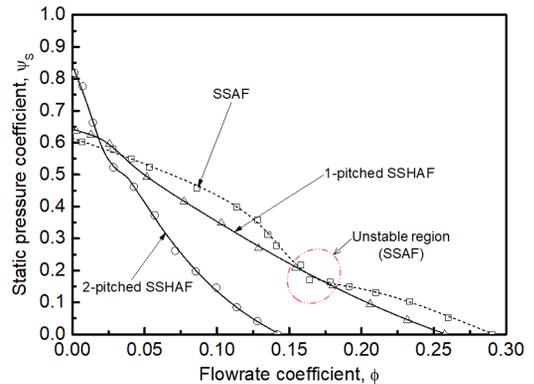


Fig. 4 Static pressure coefficient profiles obtained by LES analysis

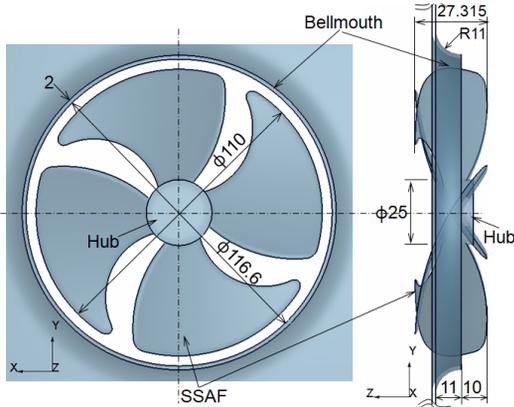


Fig. 5 Geometry arrangement of SSAF

(ψ_s)들의 분포를 상호 비교한 그림이다. 여기서 SSAF는 SSHAF와 날개의외경 및 허브직경이 같으며, 고정된 벨마우스로부터 팬을 유동 출구쪽(Z방향)으로 10 mm만큼 밀어 넣은 상태이다.^{10,11)} 이 조건은 SSAF에서 가장 많이 사용되는 것으로 자세한 기하학적 크기는 Fig. 5와 같다.

Fig. 4에서 1피치 날개를 갖는 SSHAF의 유량 대비 정압성능은 약 $\phi < 0.03$ 인 저유량영역을 제외하면 전체적으로 SSAF의 경우보다도 약간 떨어지게 나타난다. 그러나 나선형 날개의 1피치에 해당하는 축방향(axial) 깊이를 현재의 체원(100 mm)보다 더 늘리게 되면, 유체가 벨마우스를 통과하는 단면적이 더 커져 정압성능은 유량상승과 더불어 더 쉽게 늘어날 수 있다고 판단된다. 한편, SSHAF의 유량대비 정압성능 분포에서는 동일한 축방향 깊이에서 날개 피치수가 2배가 되면, 유체가 벨마우스를 통과하는 단면적이 약 2배가 작아져 최대유량은 약 2배가 감소되며, 정압성능도 크게 작아짐을 알 수 있다. 다만 약 $\phi < 0.025$ 인 저유량영역에서는 반전을 보여주고 있다. 또 SSHAF의 정압성능 분포에서 나타난 가장 큰 특징은 유량이 변화함에 따라 정압계수의 곡률이 크게 변화하는 실속(stall)을 나타내는 불안정한 영역(즉, $0.13 \leq \phi \leq 0.2$)이 항상 존재하는 SSAF와는 다르다는 것이다. 참고로 유량계수별 정압계수의 LES 해석값들을 2차원 상용소프트웨어인 TableCurve-2D¹²⁾로 커브피팅(curve-fitting)하여 근사식들을 얻

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

Fan type	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	-
1-pitched SSHAF	a = 0.64112525	e = 839.34879
	b = -55.297363	f = -380.27689
	c = -37.033379	g = -2736.074
	d = 1142.7673	h = 8495.1867
2-pitched SSHAF	a = 0.84330639	e = 1506.2035
	b = -61.584486	f = 3435.7626
	c = -63.420815	g = -7705.145
	d = 975.69694	h = 57844.88

은 결과, SSAF와 SSHAF의 경우 각각 식 (1)과 식 (2)의 형태로 주어진다. 여기서 식 (1)과 식 (2)들을 만족하는 계수들은 Table 2와 같다.

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

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

3.2 동력계수 분포

Fig. 6은 SSAF와 날개 피치수가 다른 2개의 SSHAF들을 LES로 해석하여 얻어진 무차원 공력 성능의 하나로 유량계수에 따른 동력계수(λ)들을 상호 비교한 그림이다. 1피치 날개를 갖는 SSHAF의 동력계수는 2피치를 갖는 SSHAF의 경우보다도 전 유량계수에 걸쳐 약 2배 작게 분포되어 나타난다. 반면에 이들 SSHAF의 유량계수에 따른 동력계수들은 SSAF의 경우보다도 훨씬 작게 나타나는데, 이것은 날개 형상이 일정한 축방향 깊이에서 하나로 부드럽게 이어져 있어 유동이 부드럽게 흐르는 결과로 판단된다. 즉, 결과론적인 분석이지만, 4개의 날개가 분리되어 있는 기존 SSAF는 동일 정압 대비 유량의 크기차이로 인해

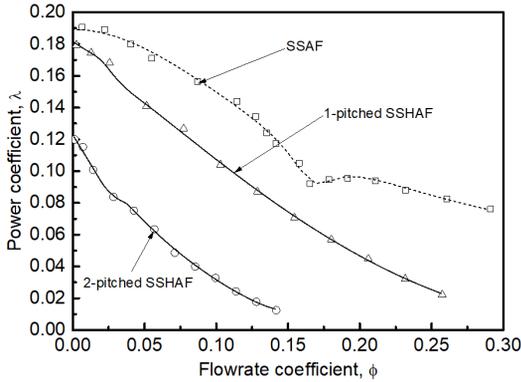


Fig. 6 Power coefficient profiles obtained by LES analysis

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

Fan type	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	-
1-pitched SSHAF	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	-
2-pitched SSHAF	a = 0.12323869	f = 1574.2536
	b = -67.143547	g = -2163.909
	c = -9.8109796	h = -41142.545
	d = 1190.7898	i = 5768.2
	e = 255.99459	-

팬 회전 시 각 날개가 받는 부하가 SSHAF에서보다도 더 크게 나타나며, SSHAF에서도 1피치 날개의 부하가 2피치 날개보다도 더 크게 나타나는 것으로 판단된다. 참고로 유량계수별 동력계수의 LES 해석값들을 TableCurve2D¹²⁾로 얻은 근사식들은 SSAF와 2피치 날개를 갖는 SSHAF의 경우 식 (3)으로, 그리고 1피치 날개를 갖는 SSHAF의 경우 식 (4)로 각각 주어진다. 이때, 식 (3)과 식 (4)들을 만족하는 계수들은 모두 Table 3에 나타내었다.

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

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

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

3.3 전압효율 분포

Fig. 7은 SSAF와 날개 피치수가 다른 2개의 SSHAF를 LES로 해석하여 얻은 무차원 공력성능의 하나로 유량계수에 따른 전압효율(η_t)들을 상호 비교한 그림이다.

Fig. 7에서 유량계수에 따른 전압효율의 분포는 1피치 날개를 갖는 SSHAF가 유량계수 약 $\phi \approx 0.2$ 부근에서 약 54%로 가장 효율이 높으며, 그 다음은 2피치 날개를 갖는 SSHAF가 유량계수 약 $\phi \approx 0.1$ 부근에서 약 48%를 보이고 있다. 반면에 SSAF의 전압효율은 넓은 유량계수에 걸쳐 최대 약 36%를 보이고 있다. 참고로 모든 팬들에 대하여 유량계수별 전압효율의 LES 해석값들을 Table-Curve2D¹²⁾로 커브피팅한 근사식들은 모두 식 (5)로 확보하였다. 여기서 식 (5)를 만족하는 각각의 팬들에 대한 계수들은 모두 Table 4에 나타내었다.

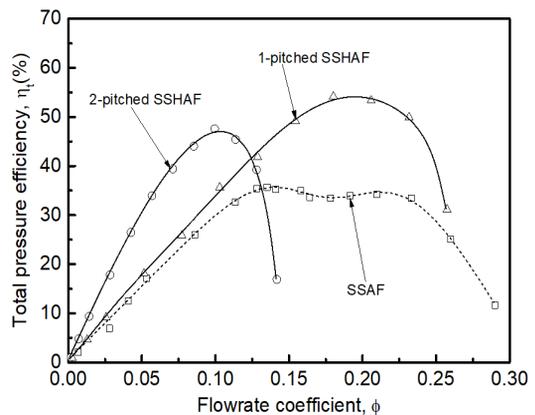


Fig. 7 Total pressure efficiency profiles obtained by LES analysis

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

Fan type	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
1-pitched SSHAF	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
2-pitched SSHAF	a = 0.087998596	f = -2153.3349
	b = -6.5451523	g = 275960.42
	c = 659.96163	h = 3935.6662
	d = 397.31262	i = -1846393.8
	e = -5351.9525	j = -33938.921

4. 결 론

피치수가 다른 완전한 형태인 3차원 SSHAF의 모델들을 가지고 LES로 전산 해석한 결과는 다음과 같다.

1) 날개 피치수에 관계없이 SSHAF의 유량계수별 정압성능 분포는 SSAF와 달리 실속을 나타내는 불안정한 영역을 갖지 않는다.

2) 동일한 축방향 깊이에서 SSHAF의 날개 피치수가 2배가 되면, 최대유량은 약 2배가 감소되며, 정압성능도 크게 작아지지만, 약 $\phi < 0.025$ 인 저 유량 영역에서는 반전을 보여준다.

3) 1피치 날개를 갖는 SSHAF의 동력계수는 2피치를 갖는 SSHAF의 경우보다도 전 유량계수에 걸쳐 약 2배 작게 분포되며, 이들 모두 SSAF의 경우보다도 훨씬 작게 나타난다.

4) 1피치 날개를 갖는 SSHAF의 최대 전압효율은 유량계수 약 $\phi \approx 0.2$ 부근에서 약 54%로 가장 높으며, 그 다음은 2피치 날개를 갖는 SSHAF가 유량계수 약 $\phi \approx 0.1$ 부근에서 약 48%를 보이고 있다. 반면에 SSAF의 최대 전압효율은 약 36%를 나타낸다.

5) SSHAF는 SSAF와 유사한 공력특성을 갖고

있어 새로운 축류팬의 대안으로 충분하다고 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, 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>)
3. 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>)
4. 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.
5. 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.
6. 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.
 7. 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.
 8. 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.
 9. 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.
 10. 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.
 11. 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>)
 12. SC/Tetra(Version 12), 2015, User's Guide, Software Cradle Co., Ltd.
 13. SYSTAT Software Inc., 2002, TableCurve2D User's Manual, Ver.4 for Windows.