

제3차원 소형 나선형 축류팬의 운전부하에 따른 하류 난류운동에너지 분포에 대한 대규모 와 모사

Large Eddy Simulation on the Downstream Distribution of Turbulent Kinetic Energy according to the Operating Loads of Three-Dimensional Small-size Helical Axial Fan

김장권*† · 오석형**

Jang-Kweon Kim*† and Seok-Hyung Oh**

(Received 6 October 2020, Revised 1 March 2021, Accepted 19 March 2021)

Abstract : The characteristics of the downstream turbulent kinetic energy distribution were analyzed by large eddy simulation (LES) according to the operating load of a three-dimensional small-size helical axial fan (SSHAF). In an SSHAF, the curve of static pressure performance for each flow coefficient does not include an unstable region representing stall, but increases with increasing blade length. The peak value of the axial mean velocity component developed around the tip of the blade exists regardless of the operating load; it does not spread significantly to the periphery even if the operating load increases. Therefore, axial flow exists at all operating loads. As a result, regardless of the downstream distance, the turbulent kinetic energy generated at the tip of the blade is much smaller than that of the small-size axial fan (SSAF) at full flowrate; however, such energy develops largely as the operating load increases. Since this SSHAF is predicted to bring about a noise reduction effect at full flowrate, additional research is needed to confirm the noise effect by applying this SSHAF to the propulsion device of a ship or submarine that values noise.

Key Words : Aerodynamic performance, Courant number, Dynamic subgrid-scale, Large eddy simulation (LES), Small-size Helical Axial Fan (SSHAF)

— 기 호 설 명 —

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

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

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

*† 김장권(ORCID:http://orcid.org/0000-0003-0412-023X) : 교수, 군산대학교 마린엔지니어링전공
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.

KE : 난류운동에너지 [m^2/s^2]

$$\{KE = \frac{1}{2}(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)\}$$

D_2 : 팬(fan)의 외경 [m]

D_h : 팬의 허브직경 [m]

N : 팬 회전수 [rpm]

OP : 팬의 운전점(operating point)

p_s : 정압력 [Pa]

p_t : 전압력 [Pa]

Q : 유량(flowrate) [m^3/min]

T : 토오크(torque) [$N \cdot m$]

V_z : 축방향 평균속도성분 [m/s]

v_x, v_y, v_z : 축방향, 횡방향 및 수직방향의 변동속도 성분 [m/s]

Z_d : SSHAF의 날개 끝단부에서 유동 축방향으로 떨어진 하류측 거리(Fig. 1 참조)

π : 원주율 [-]

ρ : 공기의 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

지금까지 축류팬(axial fan)은 매우 다양한 분야에서 널리 사용되어 왔다. 즉, 선박이나 잠수함 등의 추진장치, 에어컨이나 자동차, 컴퓨터, 냉장고 등의 냉각장치, 그리고 환풍기, 선풍기 등의 공기 순환장치들이다. 이와 같은 선택은 작동유체의 흡·토출방향성에 따라 결정되거나 다른 팬들에 비해 제한된 공간 내에서 배치하기가 쉽고, 상대적으로 가격이 저렴하기 때문에 결정된다고 판단된다. 그러나 기존 축류팬은 원심송풍기 등에 비하면 풍량 대비 매우 낮은 정압성능과 실속(stall)구간을 가지기 때문에, 높은 정압성능을 요구하면서 안정된 공력성능을 필요로 하는 환경에서는 사용될 수 없다는 단점이 있다. 이를 위해 저자들¹⁾은 새로운 나선형 축류팬(helical axial fan)을 고안한 바가 있다.

그동안 저자들은 외경이 110 mm인 소형 나선형 축류팬(small-size helical axial fan, 이하 SSHAF라고 함)에 대하여 수치해석의 연구들⁶⁻¹¹⁾을 진행

해왔다. 모든 수치해석에는 계산시간이 많이 걸린다는 단점이 있지만, RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes) 모델²⁾보다는 해석의 정확도가 더 높다고 잘 알려진 대규모 와 모사(large eddy simulation, 이하 LES라고 함) 기법^{3,4)}을 사용해 왔다. 이런 사실은 저자들도 기존 축류팬에서 공력성능에 대한 실험결과⁵⁾가 RANS 모델보다는 LES로 수치 해석한 결과³⁾와 더 일치한다고 발표한 적이 있다.

그동안 저자들이 LES로 수치 해석한 SSHAF의 연구결과들⁶⁻¹⁰⁾을 살펴보면, 2피치(pitch) 날개를 갖는 SSHAF와 벨마우스(bellmouth)의 최적 깊이를 찾기 위한 난류유동장 특성 연구,⁶⁾ 또 1피치 날개를 갖는 SSHAF의 순간유동장 구조과악 연구,⁷⁾ 또 날개 피치 숫자에 따른 SSHAF의 공력성능 연구,⁸⁾ 운전부하에 따른 1피치 SSHAF의 난류유동장 구조 연구,⁹⁾ 그리고 날개 길이 변화에 따른 1피치 날개를 갖는 SSHAF의 공력성능 연구¹⁰⁾를 발표해 왔다. 그 결과, 저자들은 이런 연구들을 통해 새롭게 고안된 SSHAF가 기존의 소형 축류팬(small-size axial fan, 이하 SSAF라고 함)의 단점을 극복하면서 축류팬으로서도 유동특성을 발휘한다는 사실을 파악하였다.

한편, 1피치를 갖는 SSHAF들을 그동안 LES로 수치 해석하여 운전부하에 따른 새로운 축류팬의 가능성을 찾고자 SSHAF의 공력성능 및 하류에서 발달해가는 유동구조와 특징들을 주로 분석해 왔지만, 이번 연구에서는 SSHAF의 하류에서 발달해가는 난류운동에너지 분포들의 특징들을 SSAF의 경우¹¹⁾와 비교·분석하고자 하였다. 이를 위해 SSHAF의 격자들은 기존 SSAF에서 실험결과⁵⁾와 일치를 본 LES 해석 격자정보³⁾를 바탕으로 좀 더 세밀하게 확대하여 적용하였다. (Table 1 참조) 또 SSHAF들의 LES 해석에는 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 수치 해석하기 위해 사용한 팬테스터(fan tester) 챔버(chamber)의 기하학적 형상과 크기를 나타내고 있으며, 벨마우스(bellmouth) 내에 설치된 SSHAF의 종류와 설치기준 및 기하학적 크기들을 나타내고 있다. 여기서 벨마우스 앞뒤에 붙인 원통형 챔버들의 크기는 SSHAF의 주 유동이 계산영역의 크기에 영향을 받지 않도록 반경 500 mm, 길이 1,000 mm로 설정하였다. 한편, SSHAF와 벨마우스의 해석모델들은 상용소프트웨어인 CATIA(V5R18)를 이용하였으며, 나머지 챔버들은 SC/Tetra의 전처리 기능⁴⁾으로 만들었다. Fig. 1에서 1피치 날개를 갖는 SSHAF들은 모두 SSAF와 동일한 날개 직경과 허브 직경들을 가지며, 날개와 허브 및 벨마우스 길이들만 서로 다르다. 특히 날개 길이는 각각 100 mm, 150 mm로 변화를 주었다. 또 SSHAF의 벨마우스들은

그 곡률반경이 끝나는 위치를 시작으로 허브길이까지 축방향으로 늘려 만들었다. 이번 연구에서는 운전부하에 따른 유동특성치들을 비교하기 위해 Z축방향을 기준으로 벨마우스 끝부분으로부터 떨어진 하류측 위치들을 총 6개($Z_d=5, 10, 20, 30, 40, 50$ mm) 선정하였다.

Fig. 2는 Fig. 1(a)를 $X=0$ 을 기준으로 절단된 Y-Z단면의 비정형 격자 그림이다. 여기서 팬테스터를 구성하는 각각의 표면 요소들에는 SC/Tetra의 전처리 소프트웨어로 경계조건을 부여하였으며, 격자는 크기를 제어할 수 있는 SC/Tetra의 "Octree"기능을 이용하였다. 여기서 SSHAF들의 세부적인 격자 크기는 SSAF³⁾와 동일하게 환의 최소 격자크기가 모두 0.684 mm가 될 때까지 세분화해서 각각 만들었다.

Table 1은 이번 연구에서 사용한 SSHAF들의 격자 정보이며, 실험결과로 검증된 SSAF³⁾의 경우보다도 격자를 2배 이상으로 더 세밀하게 만든 결과이다. 또한 SSHAF와 벨마우스 및 챔버 벽면들

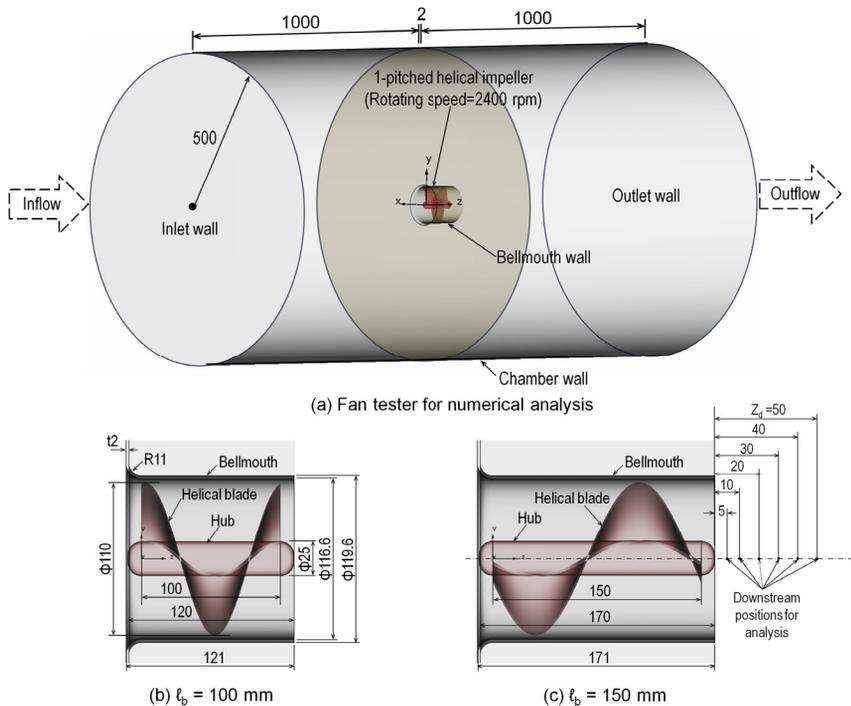


Fig. 1 Geometry configuration for the numerical analysis of 1-pitched SSHAF

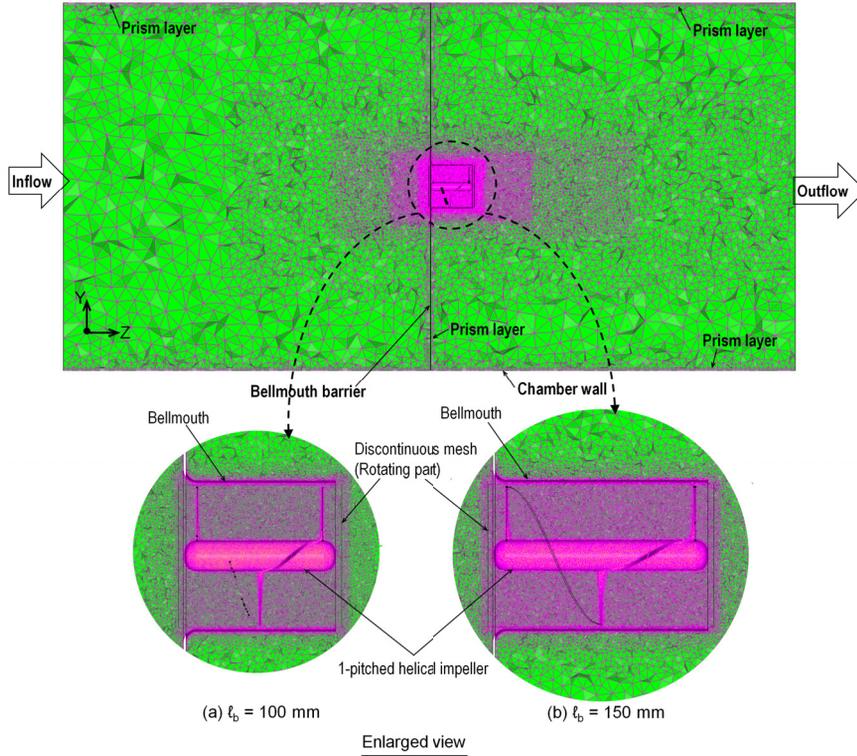


Fig. 2 Unstructured mesh configuration for the numerical analysis of 1-pitched SSHAF

Table 1 Mesh specification for numerical analysis

Fan types		Total element number
		Total node number
SSHAF	$\ell_b = 100\text{ mm}$	9,489,371
	$\ell_b = 150\text{ mm}$	2,215,040
SSAF		12,192,802
		2,857,486
		4,395,460
		867,051

에는 해(solution)의 수렴성을 높이기 위해 2개의 프리즘층(prism layer)을 각각 삽입하였다.

2.2 수치기법

Fig. 1(a)의 팬테스터를 구성하는 벨마우스와 챔버의 벽면 경계조건들은 모두 점착(no-slip)조건으로 설정하였으며, 챔버의 입구와 출구표면의 경계조건들은 각각 유량과 대기압조건들을 적용하였다.

또 수치해석을 완료한 후에는 챔버 입구에서 형성된 정압을 확보하였으며, 최대유량은 챔버의 입구 및 출구표면을 모두 대기압 조건들로 설정하여 확보하였다.

한편, 모든 SSHAF의 회전수는 SSAF³⁾와 동일하게 2400 rpm으로 설정하여 미끄럼격자기법⁴⁾을 적용하였다. 또 LES 해석의 Sub-grid 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.⁴⁾ 또 이산화된 방정식들의 압력보정에는 모두 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다. 한편, SSHAF의 초기시간(initial time) 간격은 회전수와 최소격자 크기를 고려하여 4.95×10^{-5} 으로 결정하였으며, 어떤 시간간격(time interval)에도 해에 영향을 받지 않는 해석 결과를 얻기 위해서 꾸랑수(Courant number)는 1

로 적용하였다.⁴⁾ 수치 해석에 필요한 최대의 반복 주기(iteration cycle)는 질량유량(mass flux)이 충분히 안정을 보이는 10만회까지 비정상상태로 계산한 다음, 마지막 계산 결과를 바탕으로 다시 10만회를 더 비정상상태에서 시간평균(time average)하여 그 결과들을 분석하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 정압계수 분포

Fig. 3은 SSHAF들을 LES로 해석하여 얻어진 무차원 유량계수(ϕ)에 따른 정압계수(ψ_s)의 분포들을 SSAF의 결과와 상호 비교한 그림이다. 이번 연구에서는 SSHAF의 하류측 유동 축방향(Z방향) 평균속도성분의 분포와 난류운동에너지 분포들을 비교 분석하기 위해서 저 유량에서 고 유량 영역까지 총 10군데(A~J)의 운전부하 위치들을 선정하였다.

Fig. 3에서 SSHAF의 유량 대비 정압성능에서 가장 큰 특징은 1피치 SSHAF의 날개 길이가 100 mm일 때는 정압성능이 SSAF의 정압성능보다 떨어지지만, 날개 길이가 150 mm일 때는 SSAF의 경우보다 더 성능우위에 있다는 점을 알 수 있다. 따라서 날개 길이가 제한을 받는 공간에 SSHAF를 설치할 때는 SSAF보다는 제약이 따르지만, 그렇지 않는 경우라면 유량에 대한 정압성능의 변

화를 췌의 날개 길이만을 변화시킴으로서도 가능하다는 사실을 알 수 있다. 또 SSAF의 정압계수 분포에서는 곡률이 크게 변하는 불안정한 실속영역($0.13 < \phi < 0.2$)이 항상 존재하는 반면에, SSHAF에서는 존재하지 않는다는 것이다. 이것은 제한된 숫자의 날개가 서로 분리되어 있는 SSAF의 경우에는 모든 운전부하에 대응하여 누설이나 날개 떨림 등이 커 일률적인 정압성능의 발휘가 어려우나, 날개가 일체화되어 있는 SSHAF의 경우에는 상대적으로 모든 운전부하에 대하여 일정한 정압성능 발휘가 가능하기 때문에 판단된다.

3.2 축방향 평균속도성분 분포

Fig. 4는 날개 길이가 150 mm인 SSHAF를 LES로 해석하여 얻어진 하류측으로 떨어진 거리(Z_0)마다 운전부하에 따라 발달하는 유량계수에 따른 축방향 평균속도성분(V_z)의 분포들을 서로 비교한 그림이다. SSHAF의 날개 끝단부를 중심으로 크게 발달하는 V_z 의 피크(peak)값들은 하류측으로 떨어진 거리에 관계없이 모든 운전점들에서 대칭적으로 나타나며, 하류측으로 떨어진 각각의 거리에서 형성된 V_z 의 피크 크기들은 운전부하가 증가하더라도 비슷한 크기들을 나타내고 있어 여전히 축류유동(axial flow)이 형성됨을 알 수 있다. 다만 하류측을 향해 거리가 멀어질수록 V_z 의 피크 크기들은 내·외부로 확산되면서 서서히 감소하고 있다. 한편, SSHAF의 내부에서 형성되는 V_z 의 분포는 허브에 맞붙은 나선형 날개 뿌리 부근에서 작게 형성되는 속도크기와 허브에 의한 후류 영향으로 하류측으로 떨어진 거리에 관계없이 가장 작은 크기를 보여 주며, 특히 운전부하가 증가함에 따라 음(-)의 크기를 나타내 역류(reverse flow)가 형성됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 기존의 SSAF에서 보여준 V_z 와는 완전히 다른 분포 모습¹¹⁾이다. 즉, Fig. 3에서 실속영역인 유량계수 $\phi \approx 0.17$ 이후의 운전부하에서는 SSHAF와 유사하게 V_z 의 피크값이 형성되지만, $\phi \approx 0.17$ 이전의 운전부하에서는 V_z 의 피크값이 현저히 줄어들며, 고부하 운전점으로 향할수록 소멸되어 나타난다.

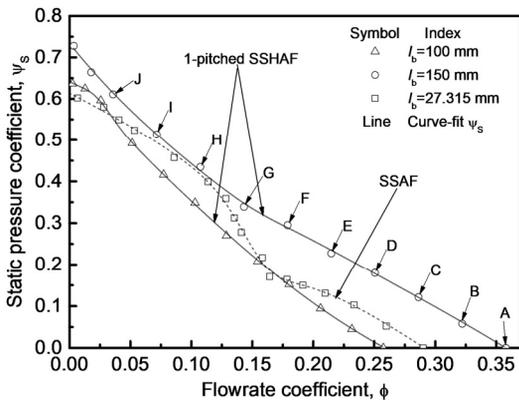


Fig. 3 Static pressure coefficient profiles obtained by LES analysis

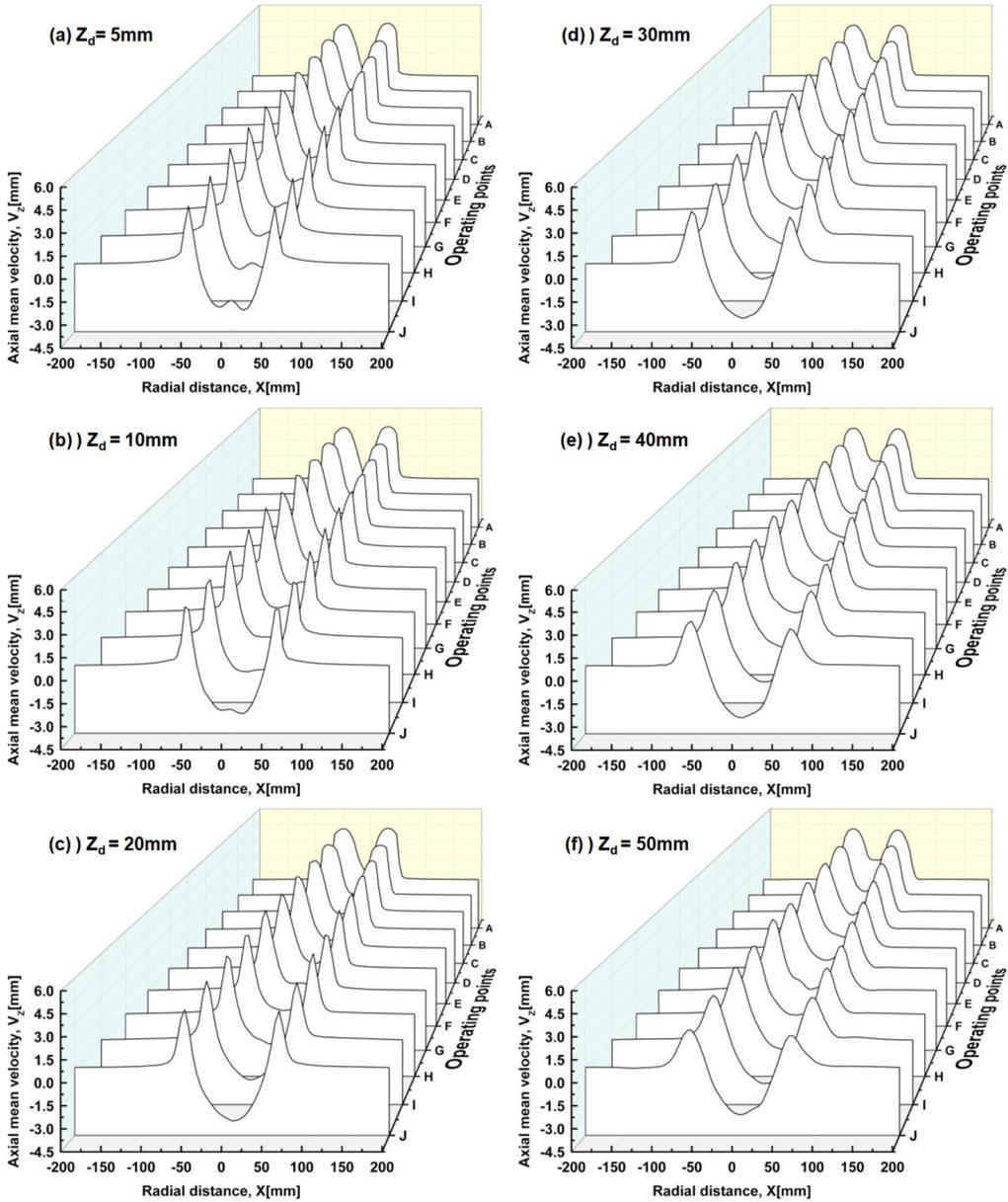


Fig. 4 Downstream axial mean velocity component profiles of SSHAF according to the operating points

이때, 허브를 포함한 SSAF의 내부영역에서 발달하는 V_z 는 하류측의 거리에 관계없이 음(-)의 크기로 나타나 반경방향으로 역류가 넓게 형성되고 있음을 알 수 있다. 이것은 SSAF가 고 부하를 맞이함에 따라 축류유동을 충분히 하류로 내보내지 못하고, 방사상으로 유동이 퍼지면서 반경유동

(radial flow)이 형성되기 때문이다. 이와 같은 현상 차이로 인해 SSHAF가 모든 운전부하에서 축류유동을 보이고 있어 기존의 SSAF보다 더 우수한 축류팬이라는 것을 알 수 있다. 이것은 날개 길이가 100 mm인 SSHAF에서도 동일하게 확인할 수 있었다.

3.3 난류운동에너지 분포

Fig. 5는 날개 길이가 150 mm인 SSHAF를 LES로 해석하여 얻어진 하류측으로 떨어진 거리마다 운전부하에 따라 발달하는 유량계수에 따른 난류운동에너지(KE)들을 상호 비교한 그림이다. 여기서 KE는 유동장이 완전히 발달되어 유동이 균질

(homogeneous)하다는 가정 하에 정의된 식으로 계산하였다.

Fig. 5에서 KE의 분포는 하류측 거리에 관계없이 날개 끝단부를 중심으로 크게 발달하는데, 이것은 V_z 의 기울기가 날개 끝단부를 중심으로 가장 크게 발달하여 난류강도가 커지기 때문이다.

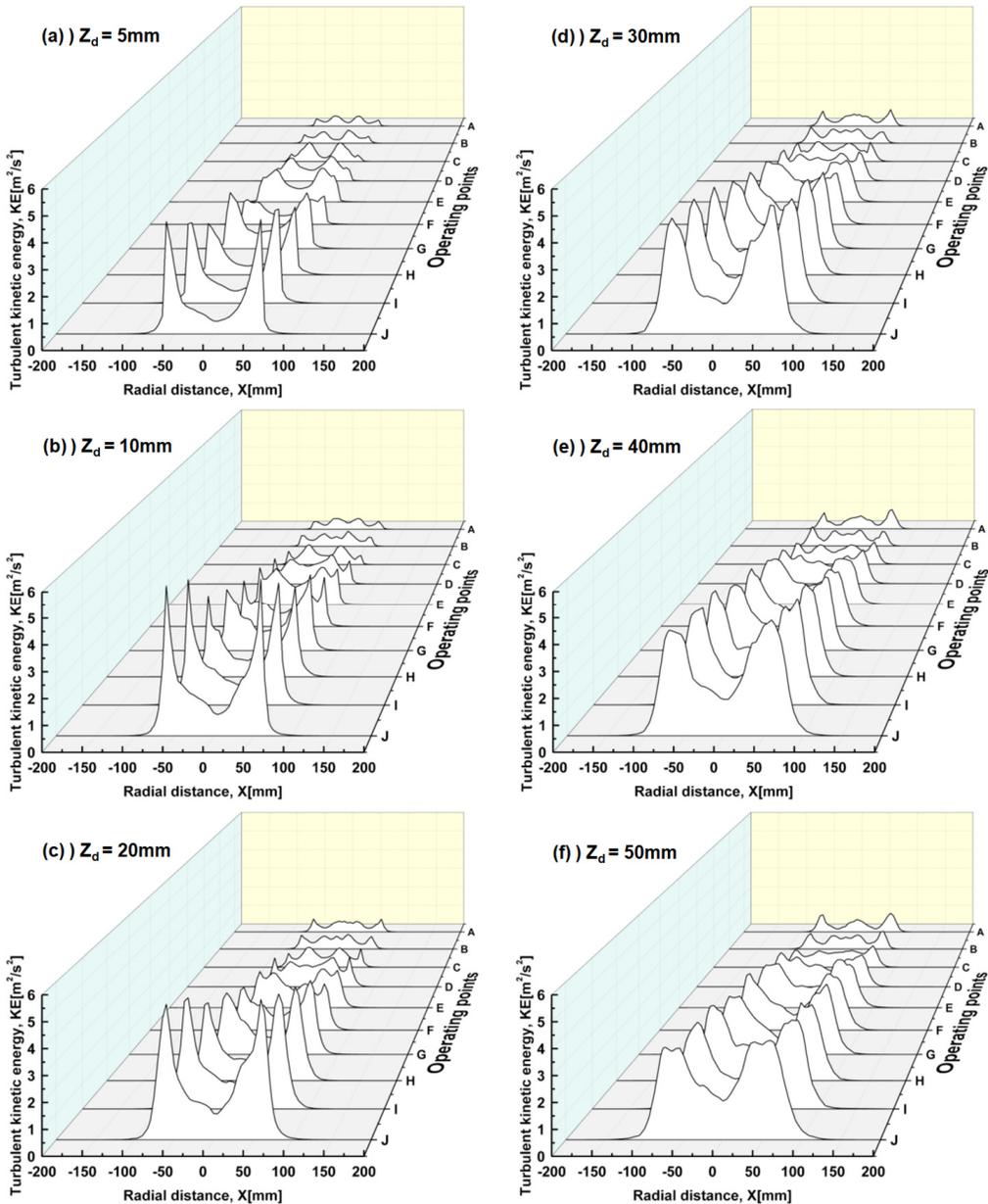


Fig. 5 Downstream turbulent kinetic energy profiles of SSHAF according to the operating points

또한 KE 의 분포에서 나타난 가장 큰 특징은 하류측 거리에 관계없이 날개 끝단부를 중심으로 발달한 KE 의 피크 크기는 운전부하가 증가할수록 더 크게 분포되어 뚜렷이 대칭적으로 나타난다는 것이다. 또한 SSHAF의 날개로부터 떨어진 거리가 증가할수록 모든 운전점들에서 KE 의 피크 크기는 서서히 줄어들지만 상대적으로 웬 내부로 확산되어 운전부하가 증가할수록 더 커지는 것을 알 수 있다. 특히 운전부하가 전혀 없는 최대유량에서 가장 작은 크기를 형성하는 KE 는 날개로부터 거리가 멀어질수록 서서히 증가하지만, 그 크기 분포는 같은 조건에서 기존 SSAF가 보여준 크기¹¹⁾에 비해선 현저히 작게 나타난다. 또한 기존 SSAF에서 운전부하가 작아도 축류유동을 보이는 유량계수 $\phi \approx 0.17$ 이후의 구간에서는 SSHAF의 경우보다도 V_z 의 기울기가 상대적으로 더 크게 작용하기 때문에, SSAF의 KE 는 현저히 큰 크기를 형성하지만, 축류유동에서 반경유동으로 변하는 $\phi \approx 0.17$ 보다 작은 고 부하에서는 날개로부터 떨어진 거리가 멀어질수록 크게 감소하여 결국 소멸되는 모습을 볼 수 있었다.¹¹⁾ 그러나 SSHAF에서는 Fig. 5에서와 같이 운전부하별로 SSAF의 경우와 정반대의 현상을 보여 주고 있는데, 이 현상은 날개 길이가 100 mm인 SSHAF에서도 동일하게 확인할 수 있었다. 이것이 SSHAF와 SSAF 사이에서 나타난 가장 큰 특징이라 볼 수 있다. 결국 KE 의 크기분포는 축방향 평균속도 성분 V_z 의 크기 발달에 따라 형성된 기울기에 가장 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

한편, Ma 등¹²⁾은 웬 내부에서 발생하는 소음과 난류운동에너지와의 상관관계를 조사하여 소음과 난류운동에너지는 비례한다는 점을 확인하였다. 따라서 Fig. 5에서 보여준 SSHAF의 KE 는 무부하 운전조건에서 SSAF의 경우¹¹⁾보다 더 작게 분포하는 것으로 볼 때, 소음 역시 더 작게 발생할 것으로 예측되어, 소음을 매우 중요시하는 선박이나 잠수함의 추진 장치에 이 SSHAF를 적용하여 소음효과를 확인해 볼 추가 연구가 필요하다고 본다.

4. 결론

3차원 SSHAF의 모델들을 가지고 LES로 전산 해석한 결과는 다음과 같다.

1) SSHAF에서 유량계수별 정압성능 곡선은 실속을 나타내는 불안정한 영역을 포함하지 않으며, 날개 길이가 증가함에 따라 증가한다.

2) 날개 끝단부를 중심으로 발달한 축방향 평균속도성분의 피크값은 운전부하에 관계없이 존재하며, 운전부하가 증가하더라도 주변으로 크게 확산되지 않아 모든 운전부하에서 축류유동이 존재한다.

3) 하류측 거리에 관계없이 날개 끝단부를 중심으로 크게 발달한 난류운동에너지는 운전부하가 전혀 없는 최대유량에서 SSAF의 경우보다 훨씬 작은 크기를 형성하지만, 운전부하가 증가할수록 크게 발달한다.

4) 축방향 평균속도성분이 가장 작게 발달하는 허브 중심부 후류에서는 운전부하가 증가함에 따라, 또 하류측으로 거리가 멀어질수록 내부유동이 확산되어 역류가 증가하며, 난류운동에너지의 피크 크기는 서서히 줄어들지만 상대적으로 웬 내부로 확산되어 더 커진다.

5) SSHAF의 축방향 평균속도성분이나 난류운동에너지의 크기 분포는 운전부하의 변동에 따라 축류유동의 존재여부가 결정되는 SSAF와는 정반대의 모습을 보여준다.

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. J. K. Kim and S. H. Oh, 2020, "Large Eddy Simulation on the Aerodynamic Performance of One-pitched Small-size Helical Axial Fan with the Different Blade Lengths", Journal of Power System Engineering, Vol. 24, No. 3, pp. 51-59.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.3.051>)
 11. J. K. Kim and S. H. Oh, 2020, "Large Eddy Simulation on the Downstream Distribution of Turbulent Kinetic Energy According to the Operating Loads of Three-dimensional Small-size Axial Fan", Journal of Power System Engineering, Vol. 24, No. 1, pp. 78-86.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.1.078>)
 12. S. B. Ma and K. Y. Kim, 2019, "Correlation between Turbulent Kinetic Energy and Noise of Fans", Proceedings of the Korean Society for Fluid Machinery Annual Meeting, July 3~5, pp. 40-41.