



대규모와 모사에 의한 1피치 나선형 소형축류팬의 순간유동장 구조에 대한 연구

A Study on the Structure of Instantaneous Flow Fields of One-Pitched Small-Size Helical Axial Fan by Large Eddy Simulation

김장권*† · 오석형**

Jang-Kweon Kim*† and Seok-Hyung Oh**

(Received 8 February 2019, Revision received 13 June 2019, Accepted 14 June 2019)

Abstract: The large-eddy simulation (LES) was carried out to investigate the instantaneous flow fields of one-pitched small-size helical axial fan (SSHAF). The initial flow of SSHAF shows short axial flow as in the case of a small-size axial fan (SSAF), and shows vortex distribution near the end of flow. On the other hand, in sufficiently developed flow, the downstream flow of SSHAF exhibits a longer axial flow than SSAF, even though the mass flowrate of SSHAF is about 11.3% less than that of SSAF. The magnitude of the instantaneous vorticity distribution of SSHAF is smaller than that of SSAF, and all of them show periodic several contour lines developed around the intermittency. As a result, it is considered that SSHAF can be used enough as a new axial flow fan type.

Key Words : Courant number, Initial time interval, Large eddy simulation (LES), Small-size axial fan (SSAF), Small-size helical axial fan (SSHAF)

1. 서 론

지금까지 축류팬(axial fan)의 공력성능은 다른 종류의 팬들에 비해 풍량 대비 매우 낮은 정압 성능을 갖는 것으로 잘 알려져 있어 높은 정압을 요구하는 환경에서는 사용할 수 없다는 단점이 있다. 이에 따라 Kim 등¹⁾은 나사(screw)형상에 착안하여 정압성능을 높이면서 축류유동을 발휘할 수

있도록 피치(pitch) 숫자를 달리한 다양한 형태의 나선형 날개(helical blade)를 갖는 새로운 축류팬을 고안하여 2016년도에 국내특허를 취득한바가 있다. 이와 같은 나선형 축류팬(helical axial fan)은 원형의 나선형 날개를 허브(hub)에 피치수를 높여 부착시킬수록 정압성능을 더 크게 높일 수 있기 때문에 고안된 것이다. 그런데 이 나선형 축류팬은 현재의 사출형 금형기술로는 쉽게 만들 수 없

*† 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 기계융합시스템공학부

*† 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.

었으나, 최근에는 3D 프린터가 활발히 개발 보급되면서 이제는 보다 쉽게 만들 수 있게 되었다.

그동안 수치해석에 의한 기존 축류팬의 연구는 컴퓨터의 발달과 더불어 팬(fan)의 회전효과를 수치계산에 반영하는 미끄럼격자(sliding mesh) 방식을 가진 상용소프트웨어를 통해 주로 이루어져 왔다. Zhou 등²⁾은 RNG k-ε 난류모델을, 또 Kim 등³⁾은 벽(wall) 근처영역에서 저 레이놀즈수(low-Reynolds number)를 반영한 SST(shear stress transport) 난류모델을, 또 Hurault 등⁴⁾은 레이놀즈 응력(Reynolds stress)의 난류모델들을 각각 사용하여 날개한쪽만의 형상모델들을 3차원 정상상태(steady-state)로 해석하여 평균유동장을 분석한 바 있다. 또 Han 등⁵⁾과 Ito 등⁶⁾ 및 Liu⁷⁾들은 각각 MP k-ε, Standard k-ε, RNG k-ε 난류모델들을 이용하여 완전한 형태의 3차원 축류팬의 모델을 가지고 비정상상태(unsteady-state)로 해석하여 평균유동장을 분석한 바가 있다. 또한 Kim 등은 그동안 실험에 의한 전형적인 축류팬의 공력성능의 결과⁸⁾가 대규모와 모사(large-eddy simulation, 이하 LES라고 함)로 해석한 수치결과⁹⁾와 일치한다고 발표한 적이 있으며, 또 많은 LES 수치해석들⁹⁻¹³⁾을 통해 하류에서 일어나는 난류유동장의 구조 및 난류특성치들을 다양한 각도에서 분석한 바가 있다.

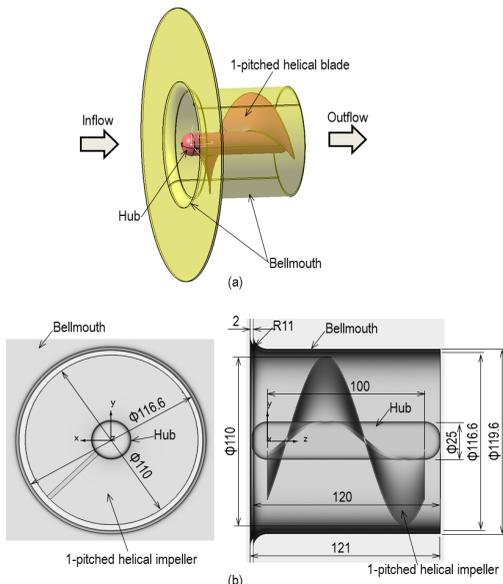


Fig. 1 Geometry arrangement of SSHAF

이번 연구에서는 실험에 앞서 소형 나선형 축류팬(small-size helical axial fan, 이하 SSHAF라고 함)의 LES 수치해석을 통해 시간변화에 따라 얻어진 순간적인 유동양상과 특징들이 기존 소형 축류팬(small-size axial fan, 이하 SSAF라고 함)¹⁴⁾과 유사한지 여부를 파악하여 그 응용성을 찾고자 하였다. 특히 이번 연구에 사용한 SSHAF는 Kim 등이 이전에 연구 발표한 소형 축류팬⁸⁻¹⁴⁾의 날개직경과 허브 직경 등의 크기가 동일하면서 1피치의 나선형 날개를 갖도록 설계하였다. 또 이번 연구에서는 SSHAF의 최대유량조건에서 시간변화에 따라 하류영역에서 얻어진 순간유동장의 벡터와 와도분포들을 SSAF¹⁴⁾의 경우와 상호 비교하였다. 이때 사용한 상용소프트웨어는 유한체적법에 기초한 SC/Tetra(ver.12)¹⁵⁾이며, LES 수치해석에 사용한 방법은 격자생성의 제원을 제외하곤 이전에 연구 발표한 SSAF의 경우⁹⁻¹⁴⁾와 동일하게 수행하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 1(a)는 벨마우스(bellmouth) 내에 설치된 SSHAF의 입체모습을 보여준 그림이며, Fig. 1(b)는 이번 연구에서 사용한 유동축 방향의 깊이(Z방향)가 100 mm인 나선형 날개를 허브 둘레를 따라 1피치를 감아 만든 SSHAF의 크기 제원을 나타낸 그림이다. 여기서 벨마우스는 기존의 SSAF의 경우⁹⁻¹⁴⁾와 달리 곡률반경이 끝나는 위치를 시작으로 깊이를 110 mm 더 늘려 수정해서 사용하였다.

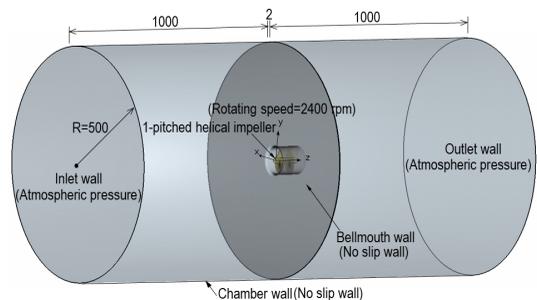


Fig. 2 Geometry configuration for the numerical analysis of SSHAF

Fig. 2는 Fig. 1의 SSHAF를 LES로 수치해석하기 위해 사용한 챔버(chamber)의 기하학적 형상과 크기 및 경계조건들을 나타내고 있다. 여기서 벨마우스 앞뒤에 붙인 챔버들의 크기는 SSHAF의 주된 유동이 계산영역의 크기에 크게 영향을 받지 않도록 결정하였다. 한편, SSHAF와 벨마우스의 해석을 위한 형상 모델(model)들은 상용소프트웨어인 CATIA(V5R18)로 만들었으며, 나머지 챔버들은 SC/Tetra의 전처리 기능을 이용하여 만들었다. 또 Fig. 3은 Fig. 2의 각 구성요소들에 경계조건을 부여한 다음 총 교점(node)수가 약 222만개, 총 요소(element)수가 약 950만개가 되도록 SC/Tetra의 전처리 기능으로 만들어진 비정형 격자그림이다. 여기서 SSHAF와 벨마우스 및 챔버 벽면들에는 해의 수렴성을 높이기 위해 2개의 프리즘층(prism layer)을 각각 삽입하였다.

2.2 수치기법

Fig. 2의 경계조건들을 살펴보면, 벨마우스와 챔버의 벽 조건들은 모두 점착(no-slip)조건으로 설정하였으며, 챔버의 입구 및 출구벽면은 최대유량이 발생하도록 대기압조건으로 각각 설정하였다.

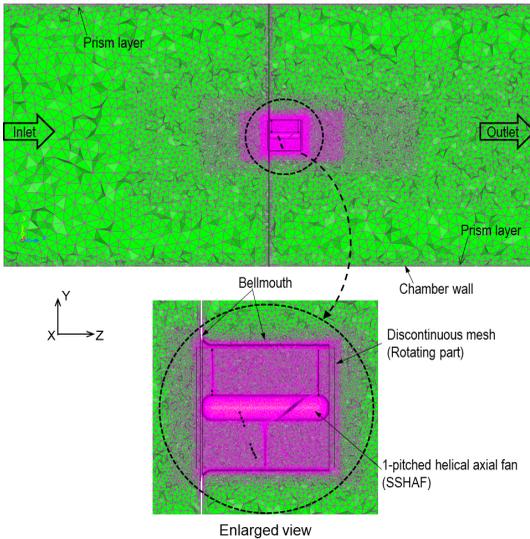


Fig. 3 Unstructured mesh configuration for the numerical analysis of SSHAF

또 SSHAF의 회전수는 SSAF9-14)와 동일하게 미끄럼격자기법¹⁵⁾을 적용하여 2400 rpm으로 설정하였다. 또 LES 해석의 Subgrid-scale 모델에는 Dynamic Smagorinsky model을 사용하였다. 또 시간 미분항은 2차 Implicit기법을 적용하였으며, 대류항(convection)¹⁵⁾은 2차 중앙차분기법과 1차 풍상(upwind)차분기법을 혼용한 기법에서 안정성(stability) 조건을 적용하였다. 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.¹⁵⁾ 이를 토대로 최대 반복주기(iteration cycle)는 질량유량이 충분히 안정을 보이는 10만회까지 비정상상태로 계산하였다. (Fig. 4 참조)

3. 계산결과 및 고찰

3.1 벡터 및 축방향 속도성분들의 분포특성

Fig. 4는 SSHAF와 과거 연구 발표¹⁴⁾한 SSAF를 비정상상태에서 LES로 해석한 과정에서 반복시간(iteration time)별로, 그리고 반복주기별로 각각 나타난 질량유량들의 이력을 보여준 그림이다. 이번 연구에서 나타난 SSHAF의 최대 질량유량은 약 0.03865 kg/s를 보인 반면, SSAF의 경우에는 0.04359 kg/s를 보여줘, SSHAF의 현재 제원으로서는 질량유량이 SSAF의 경우보다 약 11.3% 적음을 알 수 있다. 그러나 나선형 날개의 1피치에 해당하는 축방향(axial) 깊이를 현재의 제원(100 mm)보다 더 늘리면, 질량유량은 더 쉽게 늘릴 수 있다고 판단된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 X=0인 Y-Z평면 내 SSHAF와 SSAF의 하류에서 반복시간의 변화에 따라 얻어진 순간벡터분포와 축방향 순간속도성분들을 각각 나타난 그림들이다. 이것들은 모두 Fig. 4에서 질량유량이 일정하게 나타난 반복시간들에서 얻어진 결과이다. 특히 축방향 순간속도성분들의 분포는 최댓값과 최솟값을 50개로 균등 분할하여 나

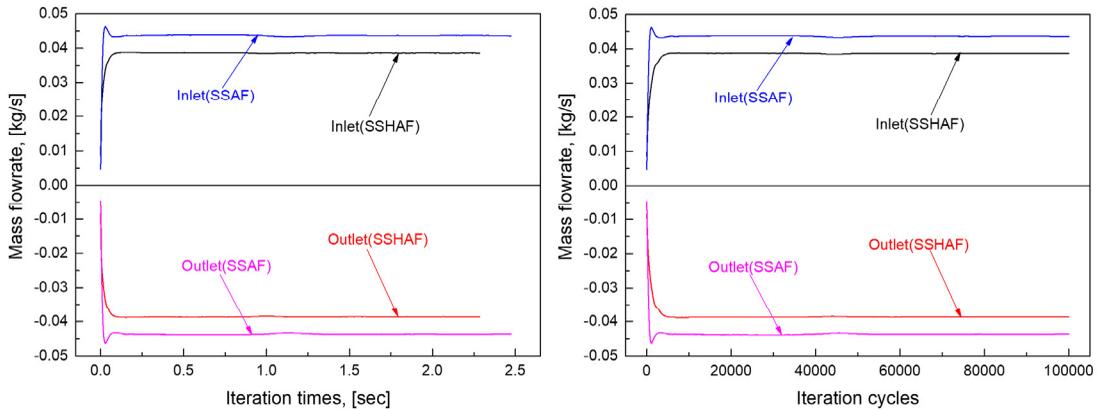


Fig. 4 History of mass flowrate obtained by the LES analysis of SSHAF and SSAF

타낸 결과이다. 비교적 유동 초기에 해당하는 Fig. 5(1a)와 Fig. 5(2a)에서 SSHAF와 SSAF의 벡터분포들은 모두 허브영역을 제외한 날개표면으로부터 발달한 유속들에 의해 비교적 짧은 축류유동을 보이다가 이후에는 반경방향으로 확대 발달되면서 유동 끝부분 가장자리에서는 휘말리는 듯한 와류(vortex)를 보이고 있다. 이것은 속도가 센 주유동이 정지된 주변유동과의 혼합과정에서 나타난 간섭현상의 결과라 판단된다. 시간이 더 경과되면서 반복주기가 3만회까지 나타난 벡터분포는 더 길어진 뚜렷한 축류유동을 보이거나 유동 끝부분 가장자리에서는 여전히 반경방향으로 확대 발달되면서 세력이 매우 약해진 와류분포를 보인다. 한편, 유동이 충분히 발달한 반복주기가 10만회에서 나타난 벡터분포는 허브 하류에서도 유동이 존재하는 전형적인 축류유동이 더 길게 형성되며, 속도가 현저히 줄어든 유동 끝부분의 가장자리에서는 SSHAF에 비해 SSAF에서 반경방향으로 더 확산된 형태를 보인다. 한편, SSHAF의 벡터분포는 유동 초기부터 반복시간이 경과함에 따라 질량유량이 SSAF의 경우보다도 작음에도 불구하고 축류유동이 더 길게 나타나는 특징을 보여주고 있다. 특히 Fig. 5(1e)에서 벡터분포는 SSAF의 경우보다도 반경방향으로 덜 확대되면서 전형적인 축류유동을 보여주고 있다. 결과적으로 SSHAF는 축류팬의 한 종류로 간주할 수 있다고 판단된다. 한편, 반복주기가 2만회 이상부터 나타난

SSAF의 벡터분포는 속도크기가 센 축방향유동의 길이가 비슷하게 나타나지만, 축류유동을 보이는 주유동과 정지된 유동의 경계인 가장자리에서는 일종의 주기적이면서 간헐적으로 형성된 벡터분포가 SSHAF의 경우보다도 더 강하게 나타나고 있다. 이것은 SSAF의 풍속이 SSHAF보다 더 세고, 4개의 날개들이 분리되어 있기 때문에 주유동과 정지유동과의 혼합현상으로 나타난 간헐성 현상(intermittency)으로 판단된다. 한편, Fig. 6의 축방향 순간속도성분의 분포에서 나타난 가장 뚜렷한 하류유동장의 특징은 SSAF의 경우 날개 끝단부(tip)를 중심으로 발달한 속도크기가 센 유동이 간헐성 현상이 나타난 주변의 영역에서 주로 국부적으로 보이는 반면에 SSHAF의 경우 날개면 전체를 중심으로 발달한 속도크기가 센 유동이 넓게 발달한다는 것이다. 또 SSHAF의 허브 하류에서 발달한 유동분포는 유동이 충분히 발달한 반복주기가 10만회에서 축방향 거리 증가에 따라 SSAF의 경우보다 주유동에 훨씬 혼합되지 못하여 후류의 영향이 크게 나타나 있다. 따라서 향후 SSHAF의 설계 시에는 나선형 날개가 허브면에 접촉하는 면적이 SSAF보다 훨씬 크기 때문에 동일한 날개의 부착강도를 고려한다면, SSHAF의 허브직경크기를 SSAF의 경우보다 더 작게 설계함으로써 질량유량은 더 늘리면서 동시에 이런 현상은 쉽게 해결될 수 있다고 판단된다.

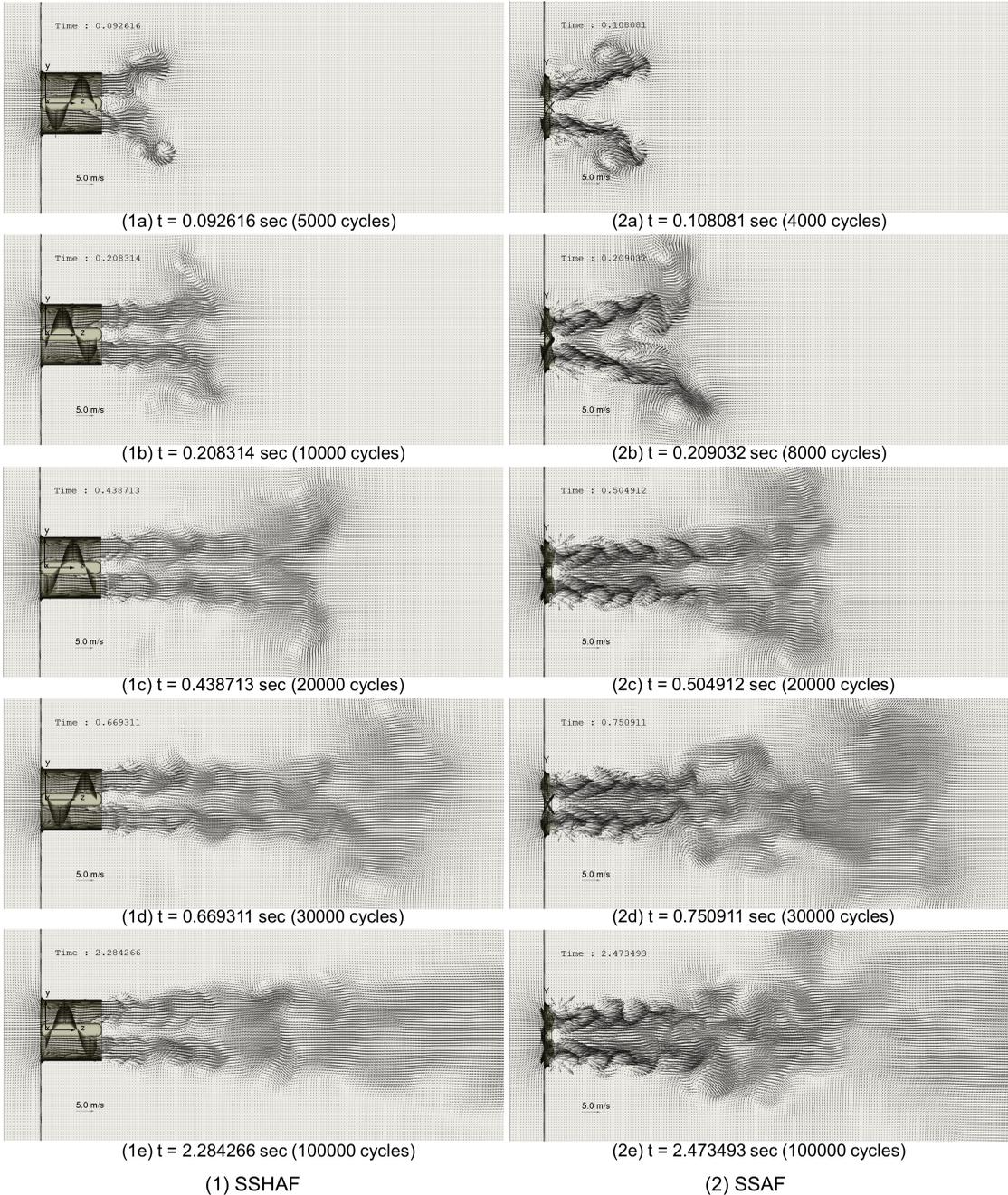


Fig. 5 Instantaneous vector profiles obtained by the LES analysis of SSHAF and SSAF

3.2 와도 분포 특성

Fig. 7은 X=0인 Y-Z평면 내 SSHAF와 SSAF14)의 하류에서 반복시간변화에 따라 나타낸 X방향 성분의 순간와도(vorticity, ω_x)들을 나타낸 그림이

다. 여기서 ω_x 는 식 (1)로 정의된다. 단, v 와 w 는 Y방향 및 Z방향 성분의 순간속도 값들이다. 특히 ω_x 의 분포는 최댓값과 최솟값을 100개로 균등 분할하여 나타낸 결과이다.

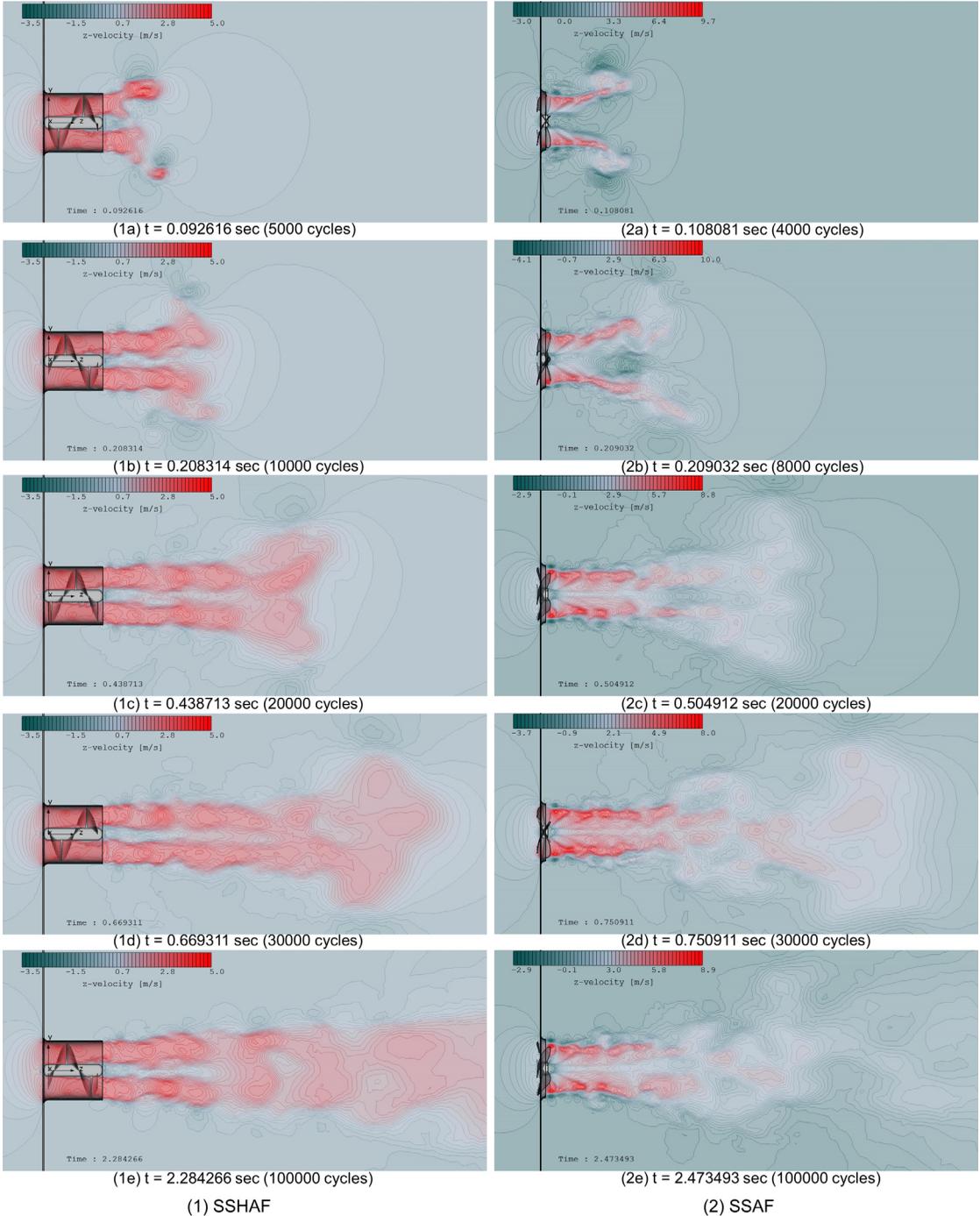


Fig. 6 Instantaneous axial velocity component profiles obtained by the LES analysis of SSHAF and SSAF

$$\omega_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

(1) SSHAF와 SSAF의 순간와도 ω_x 의 분포들은 모두 Fig. 5의 순간벡터분포와 Fig. 6의 축방향 순간

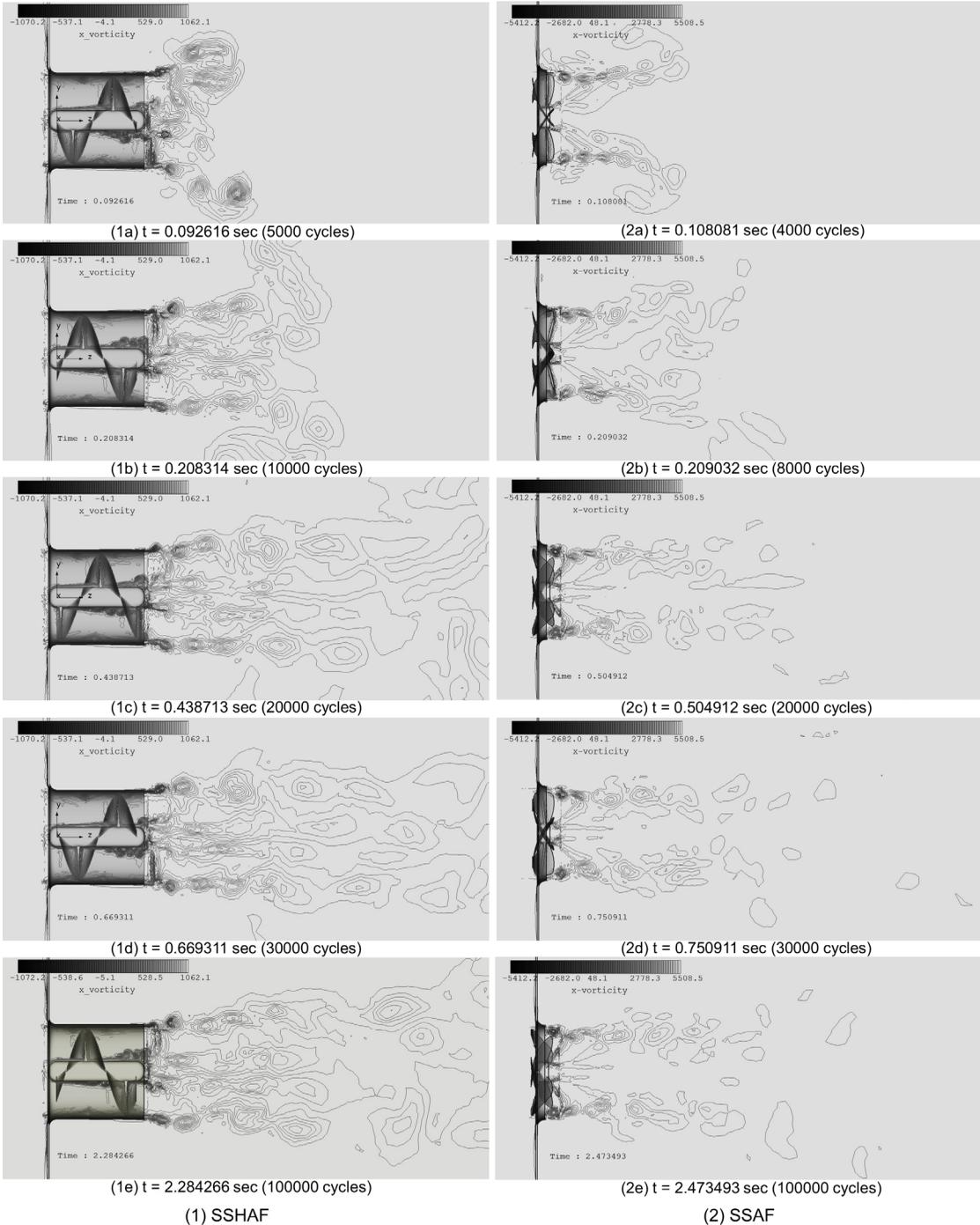


Fig. 7 Instantaneous vorticity(ω_x) profiles obtained by the LES analysis of SSHAF and SSAF

속도성분의 분포에서도 잘 나타난 유동장 외곽의 간헐성 현상이 나타난 주변의 영역을 중심으로

발달하는 다수의 주기적인 원군(circle group)형태의 등고선들을 보여준다. 특히 SSAF의 원군들에

서 분포윤곽이 SSHAF의 경우보다 더 뚜렷하게 존재함을 알 수 있다. 이것은 간헐성 현상이 나타난 주변의 영역에서 발달한 SSAF의 속도기울기가 SSHAF의 경우보다 더 크기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 또한 SSHAF의 ω_x 는 나선형 임펠러 (impeller) 내부에서도 발달하며, 특히 허브주변에서 발달한 SSHAF의 ω_x 는 전체적으로 주류에 미치는 영향이 SSAF의 경우보다 더 크게 나타난다. 이것은 SSHAF에서 허브길이가 SSAF의 경우보다 훨씬 더 커 나타난 영향으로 판단된다. 여기서 ω_x 의 크기는 SSHAF의 경우가 SSAF보다 더 작게 나타나 와도에 의한 유동소음이 SSHAF의 경우가 SSAF보다 더 작을 것으로 예상된다. 이것은 SSHAF의 경우 나선형 날개가 연속적으로 1피치를 이루고 있어 부드럽게 유동을 하류로 내보내는 반면에 SSAF의 경우 날개가 4개로 독립되어 있어 날개를 거친 하류유동이 서로 충돌 혼합하면서 허브영역에서 날개 끝단부까지 반경방향으로 속도크기 차이가 커 와도의 크기를 증대시키기 때문으로 판단된다. 그러나 이것은 추후 실험으로 확인할 필요가 있다고 본다.

Author contributions

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

4. 결 론

실물 크기의 3차원 1피치 날개를 갖는 SSHAF 모델을 3차원, 비압축성 상태에서 LES로 수치 해석하여 SSAF와 비교한 결과들은 다음과 같다.

1) SSHAF의 유동초기에는 SSAF의 경우와 마찬가지로 짧은 축류유동을 보이며, 유동 끝부근에서는 휘말리는 듯한 와류분포를 나타낸다.

2) 충분히 발달한 유동에서 SSHAF의 하류유동은 SSAF보다 풍량이 약 11.3% 감소했는데도 불구하고,

SSAF보다 더 긴 축류유동을 보여준다.

3) 유동장 외곽의 간헐성 현상이 나타난 주변에서 발달하는 SSHAF의 축방향 속도성분의 크기분포는 SSAF의 경우보다 작게 나타난다.

4) SSHAF의 순간와도 ω_x 의 크기분포는 SSAF의 경우보다 작게 나타나며, 모두 간헐성 현상이 나타난 주변에서 다수의 주기적인 원군형태의 등고선들을 보여준다.

5) 결과적으로 SSHAF는 새로운 축류팬으로서 충분히 사용할 수 있다고 판단되며, 추후 나선형 날개가 차지하는 피치숫자나 깊이에 따른 공력성능의 확보 연구가 더 필요하다고 본다.

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. 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.
3. 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.
4. J. Hurault, S. Kouidri, F. Bakir and R. Rey, 2010, "Experimental and Numerical Study of the Sweep Effect on Three-Dimensional Flow Down-stream of Axial Flow Fans", Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 21, pp. 155-165.
5. 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.
6. 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.
 7. 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.
 8. 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.
 9. 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. (DOI:10.9726/kspse.2015.19.6.019)
 10. J. K. Kim and S. H. Oh, 2017, "Large Eddy Simulation on the Drag and Static Pressure Acting on the Blade Surface of Three-Dimensional Small-Size Axial Fan with Different Operating Loads", *Journal of the Korean Society of Power System Engineering*, Vol. 21, No. 2, pp. 57-63. (DOI:10.9726/kspse.2017.21.2.057)
 11. J. K. Kim and S. H. Oh, 2016, "An Investigation on Turbulent Flow Characteristics 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. 20, No. 1, pp. 50-56. (DOI:10.9726/kspse.2016.20.1.050)
 12. J. K. Kim and S. H. Oh, 2016, "Large Eddy Simulation on the Vorticity Characteristics of Three-Dimensional Small-Size Axial Fan with Different Operating Points", *Journal of the Korean Society of Power System Engineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 64-70. (DOI:10.9726/kspse.2016.20.6.064)
 13. 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. (DOI:10.9726/kspse.2015.19.5.080)
 14. J. K. Kim and S. H. Oh, 2018, "A Study on the Structure of Instantaneous Flow Fields of a Small-Size Axial Fan by Large Eddy Simulation", *Journal of the Korean Society of Power System Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp. 28-35. (DOI:10.9726/kspse.2018.22.6.028)
 15. SC/Tetra (Version 12), 2015, *User's Guide*, Software Cradle Co., Ltd.