



대규모 와 모사에 의한 소형축류팬의 순간유동장 구조에 대한 연구 A Study on the Structure of Instantaneous Flow Fields of a Small-Size Axial Fan by Large Eddy Simulation

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

(Received 17 July 2018, Revision received 02 November 2018, Accepted 26 November 2018)

Abstract: The large-eddy simulation (LES) was carried out to evaluate the instantaneous vector and vorticity profiles of a small-size axial fan (SSAF) at the operating point of full-flowrate. The downstream flow of the SSAF exhibits a shorter axial flow when not fully developed, especially the stronger vortex appears at the edge near the flow end. On the other hand, the downstream flow of the SSAF exhibits a longer axial flow, and the weaker vortex appears at the edge near the flow end when the flow is sufficiently developed. Moreover, in the downstream of the SSAF, a periodic and intermittent flow pattern appears at the edge showing the axial flow, and the instantaneous vorticity contour lines showing the form of a circle group are distributed at specific intervals from the downstream region of the blade tip, which is considered to be the result of the intermittency phenomenon influenced by the number of blades and the number of revolutions.

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

1. 서 론

축류팬은 형상이 단순하고 제작비가 저렴하여 냉장고, 컴퓨터, 에어컨, 자동차, 건물환기 등에서 널리 활용되고 있다. 특히 소형축류팬(small-size axial fan, 이하 SSAF라고 함)은 다른 종류의 팬들과 달리 풍량 대비 낮은 정압의 공력성능을 갖고 있어 시스템저항이 작고, 상대적으로 많은 풍량을 요구하는 환경에서 주로 사용하고 있다. 그동안 축류팬의 유동장 특성은 실험과 수치해석으로 많

이 연구되어 왔으나 주로 평균유동장의 특징들이 분석되었다고 볼 수 있다.¹⁻²⁾ 최근까지 수치해석의 축류팬 연구는 컴퓨터의 발달과 더불어 팬의 회전효과를 계산에 반영하는 미끄럼격자(sliding mesh) 방식을 가진 상용소프트웨어를 통해 주로 이루어지고 있다. 즉, 축류팬의 대칭성을 이용하여 날개한쪽만의 모델을 3차원 정상상태(steady-state)로 해석하기 위해 Zhou 등¹⁾은 RNG k-ε 난류모델을, 또 Kim 등²⁾은 벽(wall) 근처영역에서 저 레이놀즈수(low-Reynolds number)를 반영

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

**오석형 : 교수, 군산대학교 기계공학부

*† Jang-Kweon Kim(ORCID: <https://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 : Professor, School of Mechanical Engineering, Kunsan National University.

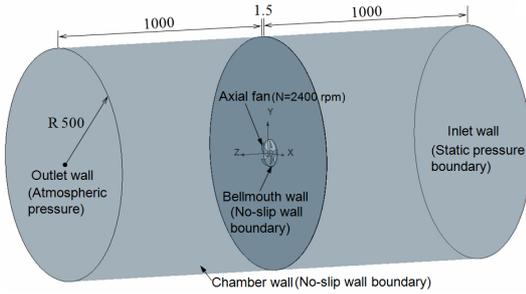


Fig. 1 Geometry configuration for the numerical analysis of SSAF

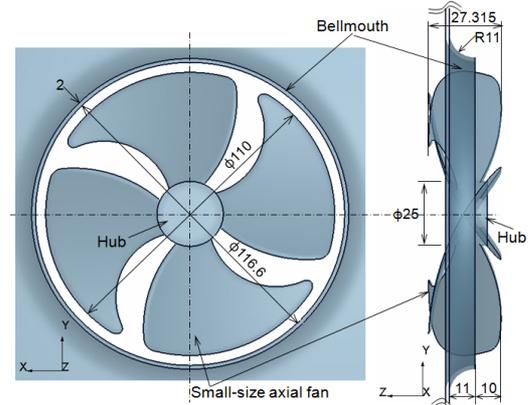


Fig. 2 Geometry configuration of SSAF

한 SST(shear stress transport) 난류모델을, 또 Hurault 등³⁾은 레이놀즈응력(Reynolds stress) 난류 모델들을 각각 적용하여 평균유동장을 분석한 바 있다. 또 Han 등⁴⁾과 Ito 등⁵⁾ 및 Liu⁶⁾는 각각 MP k-ε, Standard k-ε, RNG k-ε 난류모델들을 이용하여 완전한 형태의 3차원 축류팬 모델을 가지고 비정상상태(unsteady-state)로 해석하여 평균유동장을 분석한 바가 있다. 또 저자들⁷⁻⁹⁾도 냉장고용 SSAF의 공력성능을 해석하고자 실험결과들⁷⁾을 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식들의 난류 모델들⁸⁾과 비교했을 때, 그 정확성이 크게 떨어진다고 판단하여 대규모와모사(large eddy simulation, 이하 LES라고 함) 기법을 도입하여 비정상상태로 평균유동장을 분석한바가 있다. 그러나 SSAF의 시간변화에 따른 순간유동장의 특징들은 지금까지 충분히 다루어지질 않아 이번 연구에서는 LES로 기 연구한 SSAF⁷⁻⁹⁾의 후류에서 발생하는 다양한 유동장의 특성들을 최대유량 조건에서 시간변화에 따라 얻어진 순간유동장의 벡터(vector)분포 및 와도(vorticity)분포들을 통해 분석하였다. 또 이번 연구에서는 완전한 형태의 3차원 SSAF 모델을 3차원, 비압축성, 비정상상태로 해석하기 위해 유한체적법에 기초한 상용소프트웨어인 SC/Tetra (ver.8)¹⁰⁾를 이용하였다.

2. 수치해석⁷⁻⁹⁾

2.1 해석모델

Fig. 1은 SSAF를 해석하기 위해 사용한 챔버

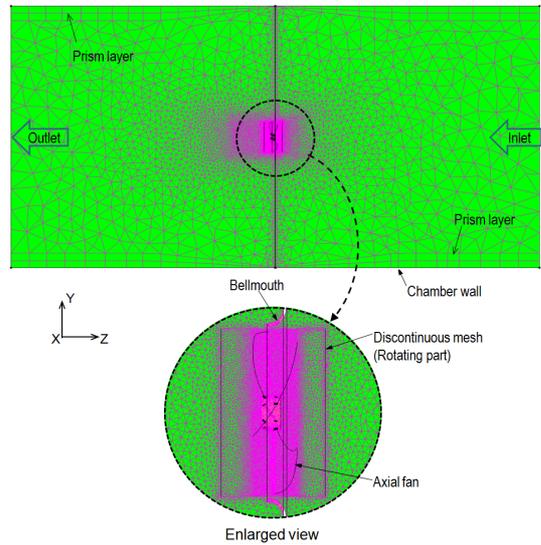


Fig. 3 Mesh configuration for the numerical analysis of SSAF

(chamber)의 기하학적 제원을 나타내고 있다. 여기서 SSAF와 벨마우스(bellmouth)의 설치기준은 Fig. 2와 같다. 또 벨마우스를 기준으로 앞뒤에 붙인 2개의 원통형 챔버의 크기는 각각 반경 500 mm, 길이 1000 mm이다. 이것은 SSAF의 주 유동이 계산영역의 크기에 영향을 받지 않도록 SSAF의 직경대비 약 9배 이상으로 키운 크기이다.

Fig. 1의 해석모델은 먼저 상용소프트웨어인 CATIA(V5R18)를 가지고 3차원형상으로 모델링을

하였다. 또 Fig. 1의 계산영역을 위한 비정형 격자(mesh)형상은 SC/Tetra의 전처리 소프트웨어를 이용하여 각각의 표면들에 경계조건들을 부여한 다음, 총 요소(element)수가 4,395,460개가 생성되도록 하여 Fig. 3과 같이 만들었다. 여기서 해의수렴성을 높이기 위해 SSAF와 벨마우스 및 챔버의 벽면에는 각각 프리즘층(prism layer)을 삽입하였다.

2.2 수치기법

Fig. 1에서 적용한 각종 표면들의 경계조건들을 살펴보면, 벨마우스와 챔버 표면의 벽들은 모두 점착(no-slip)조건으로 설정하였다. 또 입구벽면은 압력변화를 반영할 수 있도록 정압조건으로 설정하였으며, 출구벽면은 대기압조건으로 설정하였다. 또 SSAF는 회전수를 2400 rpm으로 설정하여 회전체 조건¹⁰⁾을 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 SIMPLEX 알고리즘을 사용하였다. 한편, 초기시간 간격은 회전수 2400 rpm에 대한 SSAF의 원주속도와 최소 격자크기를 고려한 4.95×10^{-5} 초로 정하였으며, 어떠한 시간간격(time interval)에도 영향을 받지 않는 해석결과를 얻기 위해서 쿠랑수(Courant number)¹⁰⁾는 1로 정하였다. 이를 토대로 질량유량(mass flux)이 충분히 안정을 보이는 10만회까지 비정상상태로 계산을 하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 벡터 분포

Fig. 4는 SSAF의 하류에서 시간변화에 따른 순간속도벡터들을 나타낸 그림들이다. 유동 초기인 Fig. 4(a)에서 벡터분포는 허브(hub)영역을 제외한 날개표면으로부터 발달하여 비교적 짧은 축류유동을 보이다가 이후에는 반경방향으로 확대 발달되면서 유동 끝부분 가장자리에서 휘말리는 듯한 와류(vortex)를 보인다. 이것은 속도가 센 주유동

이 정지된 주변유동과의 혼합과정에서 나타난 간섭현상의 결과라 판단된다. 시간이 더 경과되면서 Fig. 4(h)까지 나타난 벡터분포는 더 길어진 축류유동을 보이거나 유동 끝부근 가장자리에서는 여전히 반경방향으로 확대 발달되면서 속도가 약해진 뚜렷한 와류분포를 보인다. 한편, 유동이 충분히 발달한 Fig. 4(i)부터는 허브 하류에서도 유동이 존재하는 전형적인 축류유동이 더 길게 형성되며, 속도가 현저히 줄어든 유동 끝부근 가장자리에서는 여전히 와류를 보이거나 주유동과의 크기구분이 매우 어려운 속도로 매우 약하게 나타난다. 특히 축류유동을 보이는 주유동과 정지된 유동의 경계인 가장자리에서는 일종의 주기적이면서 간헐적으로 형성된 벡터분포도 나타나고 있다. 이것은 주유동과 정지유동과의 혼합현상으로 나타난 Intermittency현상으로 판단된다.

3.2 와도 분포

Fig. 5는 Y-Z평면의 SSAF 하류유동에서 시간변화에 따른 X방향성분의 순간와도(ω_x)들을 나타낸 그림들이다. 여기서 ω_x 는 식 (1)로 정의된다. 단, v 와 w 는 Y방향 및 Z방향 성분의 순간속도들이다.

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

유동초기인 Fig. 5(a)에서 순간와도 ω_x 의 분포는 Fig. 4(a)에서 보여준 와류의 형성과정을 더 명확하게 보여주고 있다. 즉 Fig. 5(a)에서 순간와도 ω_x 의 원군(circle group)형태의 등고선 중심부는 날개 끝단 부근에서 발견되고, 동시에 날개 끝단부와 벨마우스의 틈새를 빠져나오는 유동하류에서도 크게 확대되어 나타난다. 이것은 허브측 후류(wake)와 인접한 날개유동으로부터 발달한 ω_x 에 서로 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 시간이 더 경과되면서 날개 끝단부에서 형성된 순간와도의 등고선들은 특정 간격을 이루면서 개수가 더 늘어나 배치되어 Fig. 5(d)에서는 최대 7개의 쌍(pair)이 뚜렷이 발달됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 충분히 유동이 발달한 Fig. 5(k)에서도 나타난

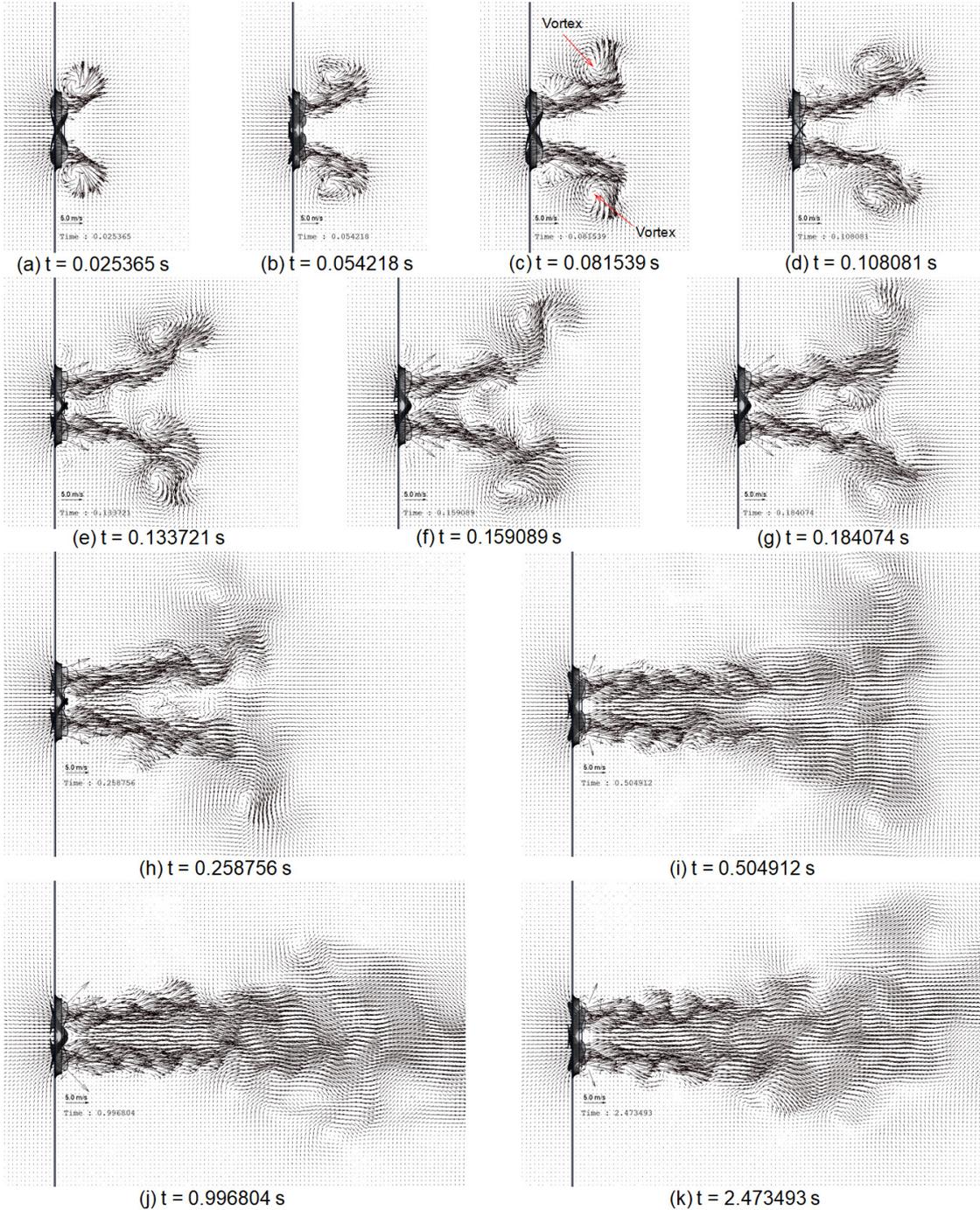


Fig. 4 Instantaneous vector profiles obtained by the LES analysis of SSAF

다. 이것은 날개수와 회전수에 영향을 받아 주유동과 정지유동의 혼합현상으로 나타나는 Intermittency

현상에 기인되어 나타난 결과로 사료된다. 한편, SSAF 날개의 안쪽 영역에서 나타난, 즉 허브측으

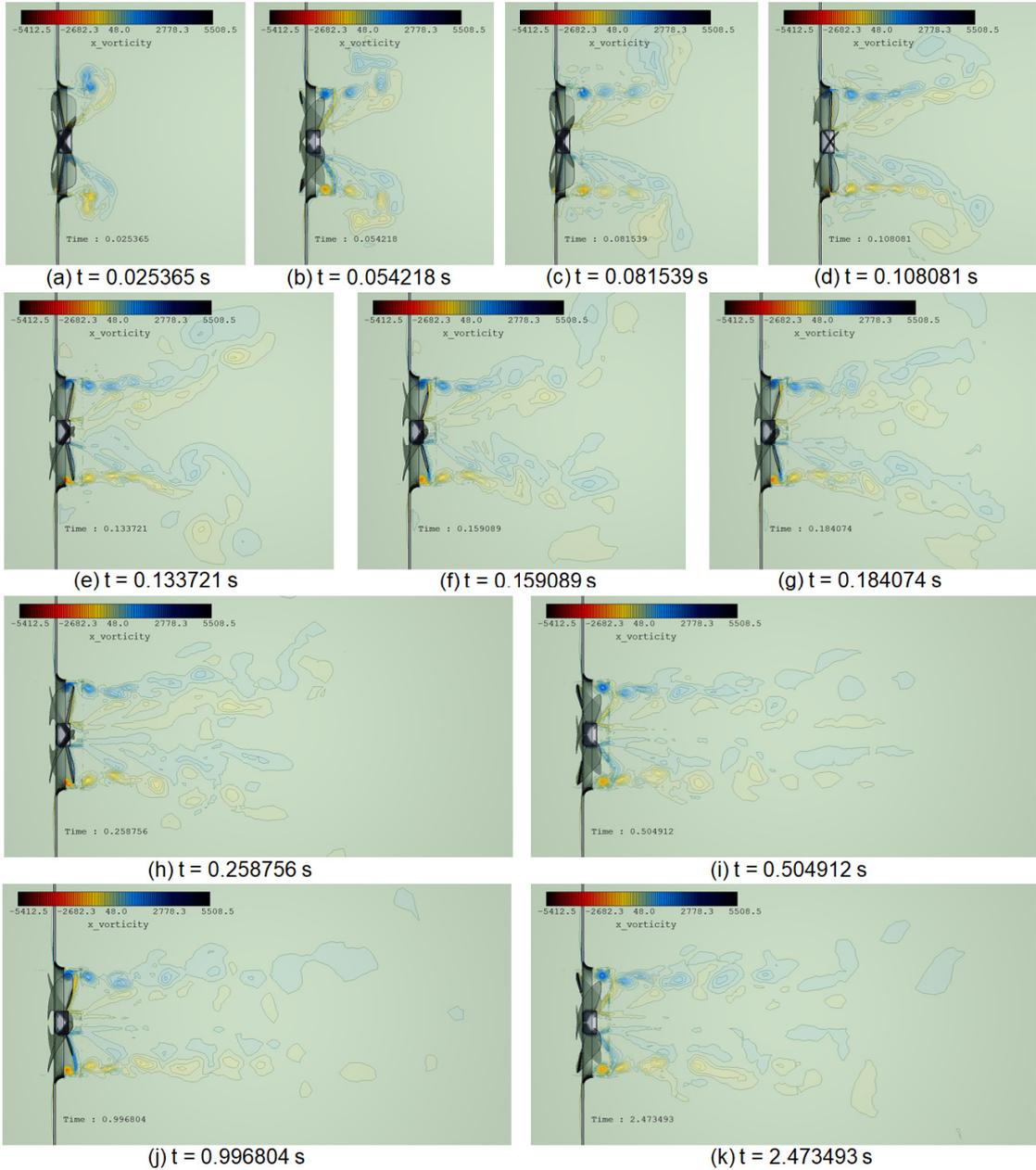


Fig. 5 Instantaneous vorticity profiles obtained by the LES analysis of SSAF

로부터 발달하는 순간와도는 그 영향이 반경방향으로 확대되어 날개 끝단부에서 발달한 순간와도와 유동 끝부근 가장자리에서 서로 혼합되어 나타난다. 이런 현상은 유동이 충분히 발달치 못하는 Fig. 5(h)까지에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 그러나

유동이 충분히 발달하는 Fig. 5(i)부터는 축류유동이 길게 형성되면서 허브측으로부터 발달한 순간와도는 날개 끝단부에서 발달한 순간와도와 혼합되어 그 영향이 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있다.

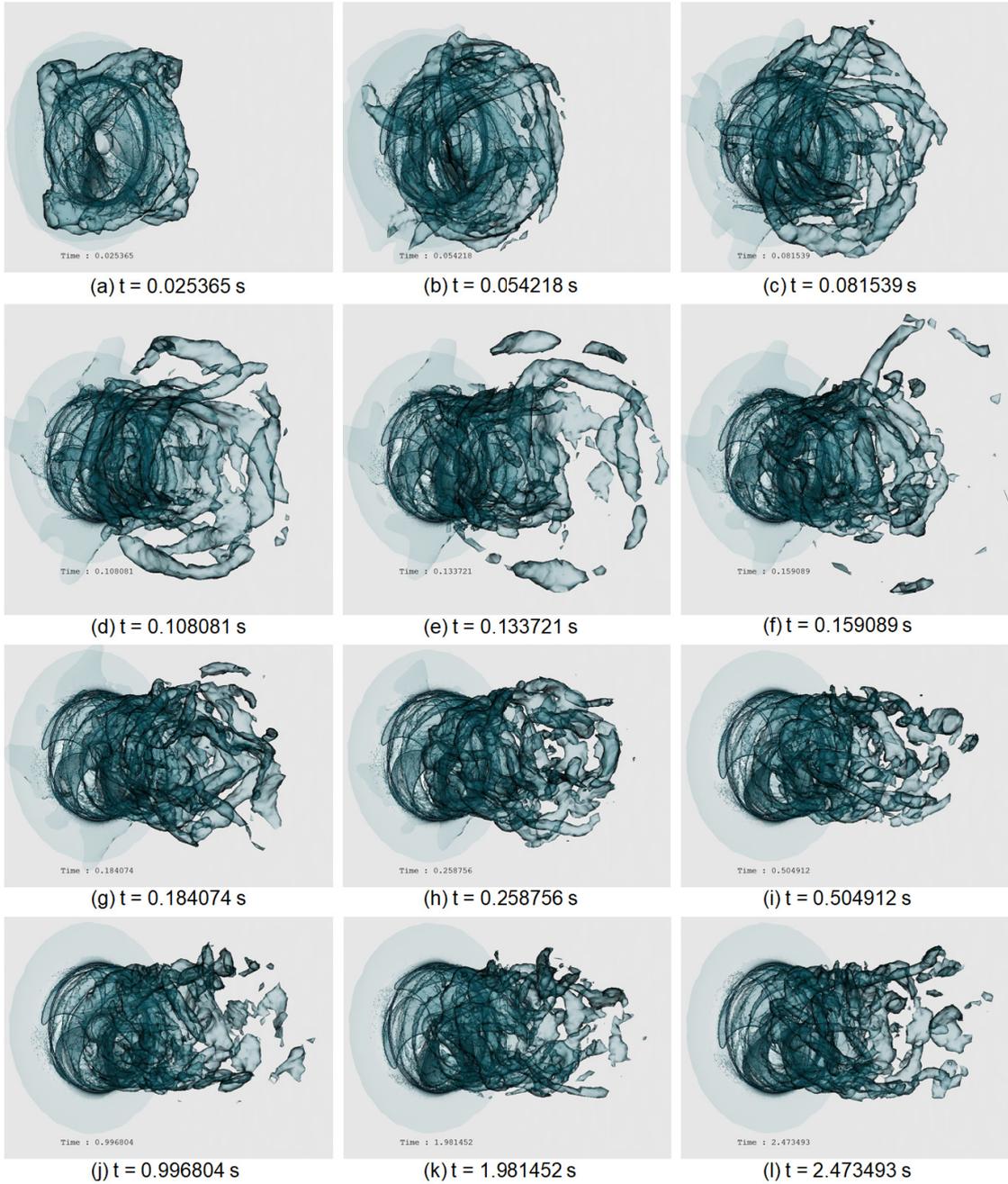


Fig. 6 Instantaneous total vorticity($\omega = 200 s^{-1}$) profiles obtained by the LES analysis of SSAF

Fig. 6은 SSAF 하류유동에서 시간변화에 따른 전체 순간와도(ω)에서 $\omega = 200 s^{-1}$ 의 크기를 나타낸 등표면(iso-surface)의 분포들이다. 여기서 ω 는

식 (2)로 정의된다. 단, ω_y 와 ω_z 는 Y방향 및 Z방향의 순간와도성분들이다.

$$\omega = \sqrt{\omega_x + \omega_y + \omega_z} \quad (2)$$

$\omega = 200 s^{-1}$ 의 전체 순간와도는 Fig. 6(a)의 유동 초기에서는 속도가 센 회전하는 날개끝단부로부터 발달하기 시작하며, 점차 시간이 흐르면서 축류유동으로 완전히 발달하지 못한 Fig. 6(f)까지는 반경 방향으로 크게 확대되면서 하류로 복잡하게 발달하며 유동 끝부근에서는 파열된 모습을 보인다. 또 Fig. 6에서는 명확하진 않지만, 허브 측으로부터 발달한 전체 순간와도도 날개 끝단부에서 발달한 순간와도와 서로 섞여 발달하는 것으로 보인다. 특히 전형적인 축류유동이 보이는 Fig. 6(i)부터는 날개끝단부에서 발달한 순간와도의 회전된 궤적이 유동 축방향으로 뻗어 나타나며, 유동 끝부근에서는 파열되어 소멸하는 모습을 담고 있다.

4. 결 론

실물 크기의 3차원 SSAF 모델을 3차원, 비압축성 상태에서 LES로 해석한 결과는 다음과 같다.

1) SSAF의 하류유동은 충분히 발달하지 못했을 때는 더 짧은 축류유동을 보이며, 동시에 반경방향으로 발달한 센 속도에 의해 유동 끝부근 가장자리에서 강한 와류를 나타낸다.

2) 반면, 유동이 충분히 발달해 갈 때는 SSAF의 하류유동은 더 긴 축류유동을 보이며, 상대적으로 유동 끝부근 가장자리에서는 속도가 약한 와류를 나타낸다.

3) SSAF의 후류에서 축류유동을 보이는 주유동과 정지된 유동의 경계인 가장자리에서는 시간변화에 따라 일종의 주기적이며, 간헐적인 유동모습이 잘 나타난다.

4) SSAF의 하류에서 발달한 원군형태의 순간와도 등고선들은 날개 끝단부 영역으로부터 특정 간격을 이루어 분포하며, 이것은 날개수와 회전수에 영향을 받아 나타난 Intermittency현상의 결과로 사료된다.

References

1. 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.

2. 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.

3. J. Hurault, S. Koudri, 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.

4. 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, Kyungju, Korea, pp. 213-216.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. J. K. Kim and S. H. Oh, 2014, "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. (DOI:10.9726/kspse.2014.18.6.013)
9. 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)
10. SC/Tetra(Version 8), 2010, User's Guide, Software Cradle Co., Ltd.