

운전부하에 따른 3차원 소형축류팬의 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 Axial Fan

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

(Received 15 January 2020, Revision received 10 February 2020, Accepted 10 February 2020)

Abstract: Large eddy simulation (LES) was introduced to analyze the characteristics of downstream turbulent kinetic energy distribution according to the operating load of the three-dimensional small-size axial fan (SSAF). LES was performed by incompressible and unsteady-state conditions. The turbulent kinetic energy of SSAF develops relatively large at all operating points as the downstream distance from the blade is closer, and dissipates faster toward the downstream and toward the higher load. The iso-surface pattern of the turbulent kinetic energy is gradually contracted and rounded because the flow cannot extend to the downstream axial direction as the operating load increases from the operating point A to the D, but appears flat and radially spreading after the operating point E.

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

— 기 호 설 명 —

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

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

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

KE : 난류운동에너지 [m^2/s^2]

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

D_2 : 팬의 외경 [m]

D_h : 팬의 허브직경 [m]

N : 회전수 [rpm]

OP : 운전점(operating point)

p_s : 정압력 [Pa]

*† 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.

- p_t : 전압력 [Pa]
- Q : 유량(flowrate) [m^3/min]
- T : 토크(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 : SSAF의 날개 끝단부에서 유동 축방향으로 떨어진 하류측 거리(Fig. 2 참조)
- π : 원주율 [-]
- ρ : 공기의 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

요즘 컴퓨터나 에어컨 등의 냉각장치로 가장 많이 사용되고 있는 축류팬(axial fan)은 다른 팬들에 비해 형상이 단순해 제한된 공간 내에서 배치가 용이하고, 가격이 저렴하기 때문에 현재까지도 우리주변에서 많이 볼 수 있는 송풍기 형식이다. 한편, 축류팬의 공력성능은 다른 팬들과 달리 풍량 대비 매우 낮은 정압성능을 가지므로, 높은 정압을 요구하는 환경에서는 사용할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 축류팬은 비교적 낮은 시스템 저항이 형성되는 환경에서 활용되고 있다.

그동안 축류팬의 공력성능이나 유동구조 및 난류특성치 등에 대한 수치해석은 컴퓨터의 발달과 더불어 해석모델의 격자에 팬의 회전효과를 반영하는 미끄럼격자(sliding mesh) 방식을 갖춘 상용 소프트웨어를 주로 이용하고 있다. Zhou 등¹⁾은 수치해석에 RNG k- ϵ 난류모델을 사용하였으며, Kim 등²⁾은 벽 근처영역에서 저 레이놀즈수(low-Reynolds number)를 반영한 SST(shear stress transport) 난류모델을 이용하였다. 또 Hurault 등³⁾은 레이놀즈응력(Reynolds stress)의 난류모델을 사용하였다. 특히 이들은 모두 날개 한쪽만의 모델들을 가지고 3차원 정상상태(steady-state)로 해석하여 평균유동장을 분석하였다. 한편, Han 등⁴⁾은 MP k- ϵ 의 난류모델을 사용하였으며, Ito 등⁵⁾은 Standard k- ϵ 의 난류모델을 사용하였다. 또 Liu 등⁶⁾은 RNG k- ϵ 의 난류모델을 이용하였다. 이들은

모두 완전한 형태의 3차원 축류팬의 모델들을 가지고 비정상상태(unsteady-state)로 해석하여 평균 유동장을 분석하였다. 이와 같이 이들 연구자¹⁻⁶⁾들은 기존의 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes) 방법을 주로 사용해 왔다. 반면에 Kim 등⁷⁻¹²⁾은 RANS 방법보다는 계산시간이 훨씬 많이 걸리는 단점이 있지만 수치해석의 정확도가 더 높다고 잘 알려진 대규모 와 모사(large eddy simulation, 이하 LES라고 함)기법을 소형축류팬(small-size axial fan, 이하 SSAF라고 함)의 해석을 위해 도입하였다. 결과적으로 Kim 등⁷⁻¹²⁾은 그동안 실험으로 얻어진 SSAF의 공력성능의 결과¹³⁾가 LES로 해석한 수치결과⁷⁾와 잘 일치한다고 발표한 적이 있다. 그 이외에도 Kim 등은 SSAF의 최대풍량 시 하류로 발달하는 벡터분포를 통한 순간유동장의 구조 분석⁸⁾, 운전부하(운전점)에 따라 하류로 발달하는 난류유동장의 구조 분석⁹⁾, 운전부하에 따른 날개 끝단부 직후의 유동장에서 난류유동 특성치 고찰¹⁰⁾ 및 와(vorticity) 분석¹¹⁾, 그리고 날개표면에 작용하는 정압특성의 분석¹²⁾ 등, 그동안 LES 해석을 통해 SSAF에 대한 다양한 연구내용들을 발표해 왔다.

한편, 그동안 LES 수치해석을 통해 운전부하에 따라 SSAF의 하류에서 발달해 가는 벡터분포들의 유동구조와 특징들을 분석해 왔지만, 난류운동에너지에 대한 정보가 벡터분포에서는 구체적으로 나타나지 않아, 이번 연구에서는 운전부하에 따라 SSAF의 하류에서 발달해 가는 난류운동에너지 분포들의 특징들을 분석하고자 하였다. 이를 위해 유한체적법에 기초한 상용소프트웨어인 SC/Tetra (ver.12)¹⁴⁾를 이용하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 1은 SSAF를 LES로 해석하기 위해 팬테스터(fan tester)와 같은 기능을 갖도록 사용한 챔버(chamber)의 기하학적 형상과 크기 및 경계조건들을 나타내고 있다. 여기서 벨마우스(bellmouth) 앞뒤에 붙인 챔버들의 크기는 반경 500 mm, 길이

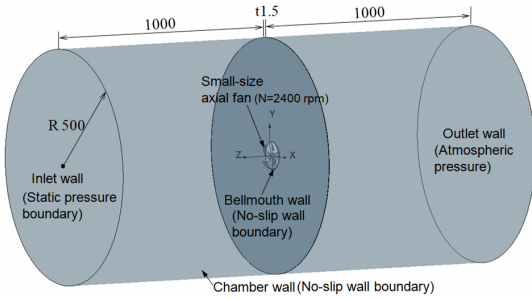


Fig. 1 Geometry configuration for the numerical analysis of SSAF

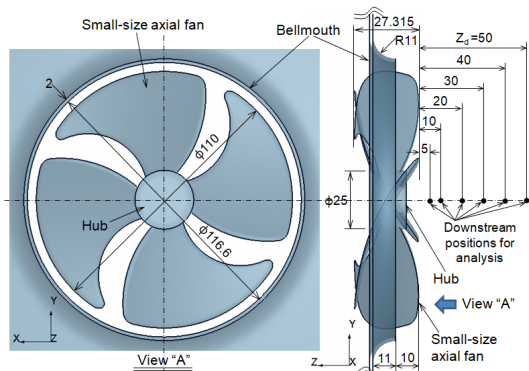


Fig. 2 Geometry arrangement of SSAF

1000 mm이다. 이것은 SSAF의 주 유동이 계산영역의 크기에 크게 영향을 받지 않도록 SSAF의 외경대비 약 9배 이상으로 키운 것이다. 또 SSAF와 벨마우스의 해석모델들은 모두 상용소프트웨어인 CATIA(V5R18)로 만들었으며, 나머지 챔버들은 SC/Tetra의 전처리 기능을 이용하여 만들었다.⁷⁻¹²⁾ 한편, Fig. 2는 Fig. 1에 적용한 SSAF의 상세제원 및 설치조건들을 나타내고 있다. 즉, SSAF의 외경과 허브(hub)직경은 각각 110 mm, 25 mm이며, 날개 축방향 폭은 27.315 mm이다. 이번 연구에서는 운전부하에 따른 유동특성치들을 비교하기 위해 Z축방향을 기준하여 날개 끝부분으로부터 떨어진 하류측 위치들을 총 6개($Z_d = 5, 10, 20, 30, 40, 50$ mm)로 선정하였다.

Fig. 3은 SC/Tetra의 전처리 소프트웨어로 Fig. 1의 각 구성요소들에 경계조건들을 부여한 다음 격자크기를 제어할 수 있는 "Octree"기능을 이용

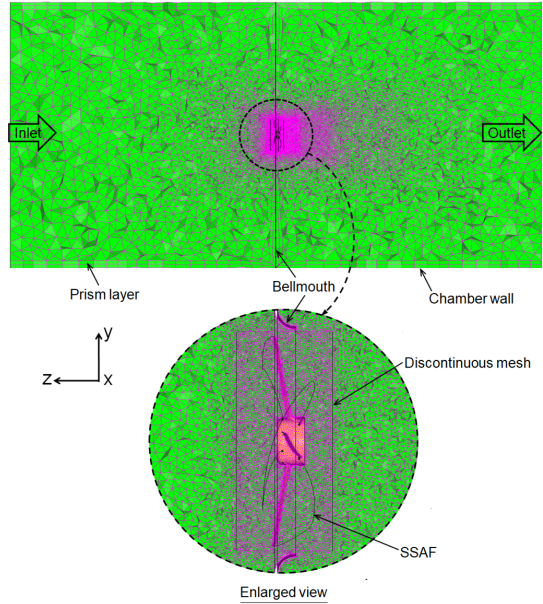


Fig. 3 Unstructured mesh configuration for the numerical analysis of SSAF

하여 팬 자체의 최소 격자크기가 0.684 mm가 될 때까지 점차 세분화해 가면서 만든 비정형 격자그림이다. 그 결과, 총 요소(element) 수와 총 교점(node) 수는 각각 4,395,460개와 867,051개가 생성되었다. 여기서 SSAF를 에워싼 불연속격자(discontinuous mesh) 내부는 미끄럼격자가 적용되는 영역이다. 또 SSAF와 벨마우스 및 챔버 벽면들의 표면에는 해의 수렴성을 높이기 위해 모두 2개의 프리즘층(prism layer)을 각각 삽입하였다.⁷⁻¹²⁾

2.2 수치기법

Fig. 1에서 적용된 경계조건들을 살펴보면, 벨마우스와 챔버의 벽 표면조건들은 모두 점착(no-slip)조건들로 설정하였다. 챔버의 입구와 출구벽 표면은 각각 정압과 대기압조건들을 적용하였으며, 수치 해석을 완료한 후에는 챔버 입구에서 형성된 유량을 확보하였다. 이때, 최대유량은 챔버의 입구 및 출구벽면을 모두 대기압조건들로 설정하여 확보하였다.⁷⁻¹²⁾ 한편, SSAF의 회전수는 2,400 rpm으로 설정하여 미끄럼격자기법¹⁴⁾을 적용하였다. 또 LES 해석의 Subgrid-scale 모델에는

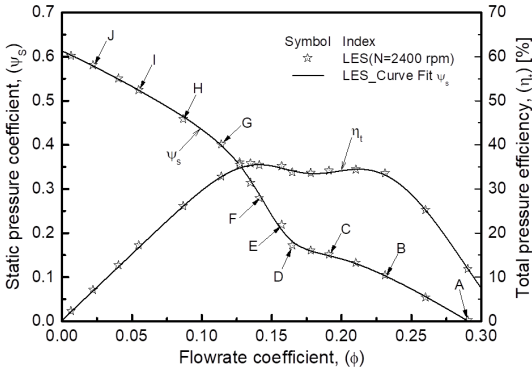


Fig. 4 Static pressure coefficient and total pressure efficiency profiles obtained by LES analysis

Dynamic Smagorinsky model을 사용하였다. 또 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.¹⁴⁾ 또 이산화된 방정식들의 압력보정에는 모두 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다.⁷⁻¹²⁾

한편, 비정상상태의 수치해석을 위한 초기 시간 간격은 SSAF의 회전수와 최소 격자크기를 고려하여 4.95×10^{-5} 초로 결정하였으며, 어떤 시간간격(time interval)에도 영향을 받지 않는 해석결과를 얻기 위해서 꾸랑수(Courant number)는 1로 적용하였다.¹⁴⁾ 이를 토대로 최대 반복주기(iteration cycle)는 질량유량(mass flux)이 충분히 안정을 보이는 10만회까지 비정상상태로 진행한 다음, 마지막 결과를 바탕으로 비정상상태에서 다시 10만회 더 시간평균(time average)처리하여 그 결과들을 분석하였다.⁷⁻¹²⁾

3. 계산결과 및 고찰

3.1 정압계수 및 전압효율 분포

Fig. 4는 SSAF를 LES로 해석하여 얻어진 무차원 유량계수(ϕ)에 따른 정압계수(ψ_s)와 전압효율(η_t)의 분포들을 상호 비교한 그림이다. 이번 연구에서는 SSAF의 하류측 유동 축방향(-Z방향) 평균 속도성분의 분포와 난류운동에너지 분포들을 비

교 분석하기 위해 저 유량에서 고 유량 영역까지 총 10군데(A~J)의 운전부하 위치들을 선정하였다.

Fig. 4에서 SSAF의 유량 대비 정압성능에서 가장 큰 특징은 유량이 변화함에 따라 정압계수의 곡률이 크게 변화하는 실속(stall)을 나타내는 불안정한 영역(즉, $0.13 < \phi < 0.2$)이 항상 존재한다는 것이다. 또 전압효율은 유량계수 $0.13 \leq \phi \leq 0.23$ 의 구간에서 가장 크게 분포되며, 곡률이 변하는 실속구간을 전후로 전압효율 역시 분포곡률이 변하고 있다. 한편, 실제 SSAF의 운전점으로 많이 사용되는 실속을 벗어난 $\phi = 0.2$ 부근의 전압효율은 최대 약 35%값을 보여주고 있다.

3.2 축방향 평균속도성분 분포

Fig. 5는 SSAF를 LES로 해석하여 얻어진 운전부하에 따라 하류측에서 발달하는 유량계수에 따른 축방향 평균속도성분(V_z)의 분포들을 비교한 그림이다. SSAF의 날개 끝단부를 중심으로 크게 발달하는 V_z 의 분포들은 하류측의 거리(Z_j)에 관계없이 운전점 D를 전후로 매우 다른 모습들을 보여준다. 즉, 운전점이 A에서 D까지 변함에 따라 V_z 의 피크(peak) 값은 운전점 B에서 가장 크게 발달하며, 운전점 D로 갈수록, 또 하류측 거리가 증가할수록 피크값은 반경방향으로 위치가 확대되면서 약간 크기가 감소하다가 운전점 E 이후부터는 크게 감소해 나타난다. 이런 현상은 하류측 거리가 증가함에 따라 더 명확해짐을 알 수 있다. 한편, 허브를 포함한 SSAF의 내부영역에서 발달하는 V_z 는 운전점 D이전까지는 하류측의 거리에 관계없이 양(+)의 크기 값 분포를 보여주고 있다. 그러나 운전점 E 이후부터 고 부하 영역인 운전점 J로 갈수록 V_z 의 피크값은 현저히 감소하며, SSAF의 내부영역에서조차도 하류측의 거리에 관계없이 음(-)의 V_z 값이 반경방향으로 넓게 형성되고 있다. 이것은 SSAF가 고 부하를 맞이함에 따라 축류유동(axial flow)을 충분히 하류로 내보내지 못하고, 바로 방사상으로 유동이 퍼지면서 반경유동(radial flow)이 형성되기 때문이다. 이와 같은 현상은 Kim 등^{9,10)}, Adachi 등¹⁵⁾과 Morris 등¹⁶⁾

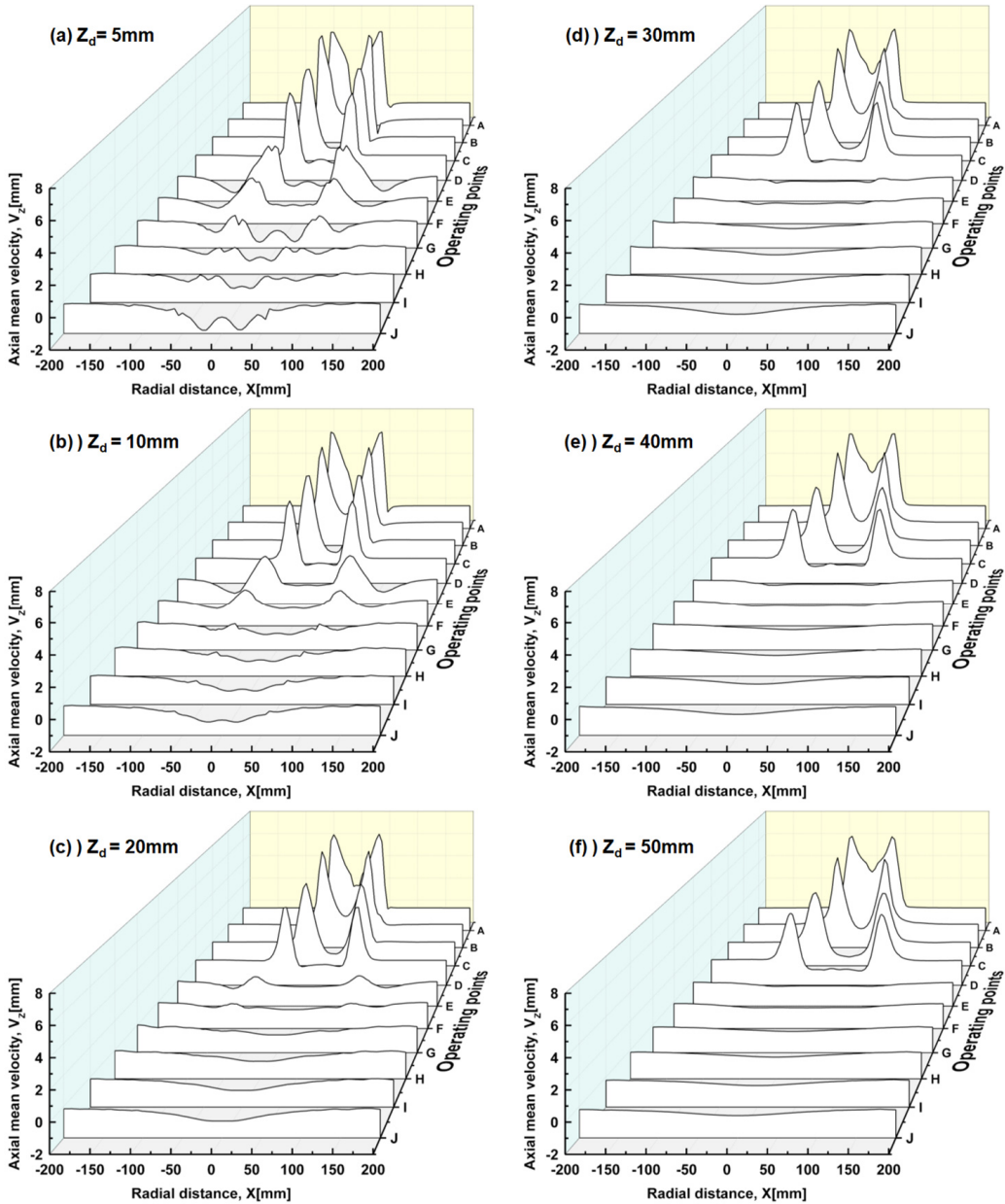


Fig. 5 Downstream axial mean velocity component profiles according to the operating points

이 축류팬은 운전부하에 따라 크게 3가지 유동영역, 즉 전형적인 축류유동, 축류유동과 반경유동이 혼재된 영역, 그리고 완전한 반경유동으로 구분된다고 밝힌 바 있다. 따라서 운전점 D(Fig. 4 참조)까지는 전형적인 축류유동이 형성되지만, 운

전점 E 이후부터는 축류유동에서 반경유동으로 변하며 더욱 더 발달한다고 볼 수 있다. 여기서 운전점 D를 벗어나 운전점 F까지는 축류유동과 반경유동이 혼재되어 나타나는 일종의 천이유동 영역으로 실속이 작용되는 구간이 아닌가 판단된다.

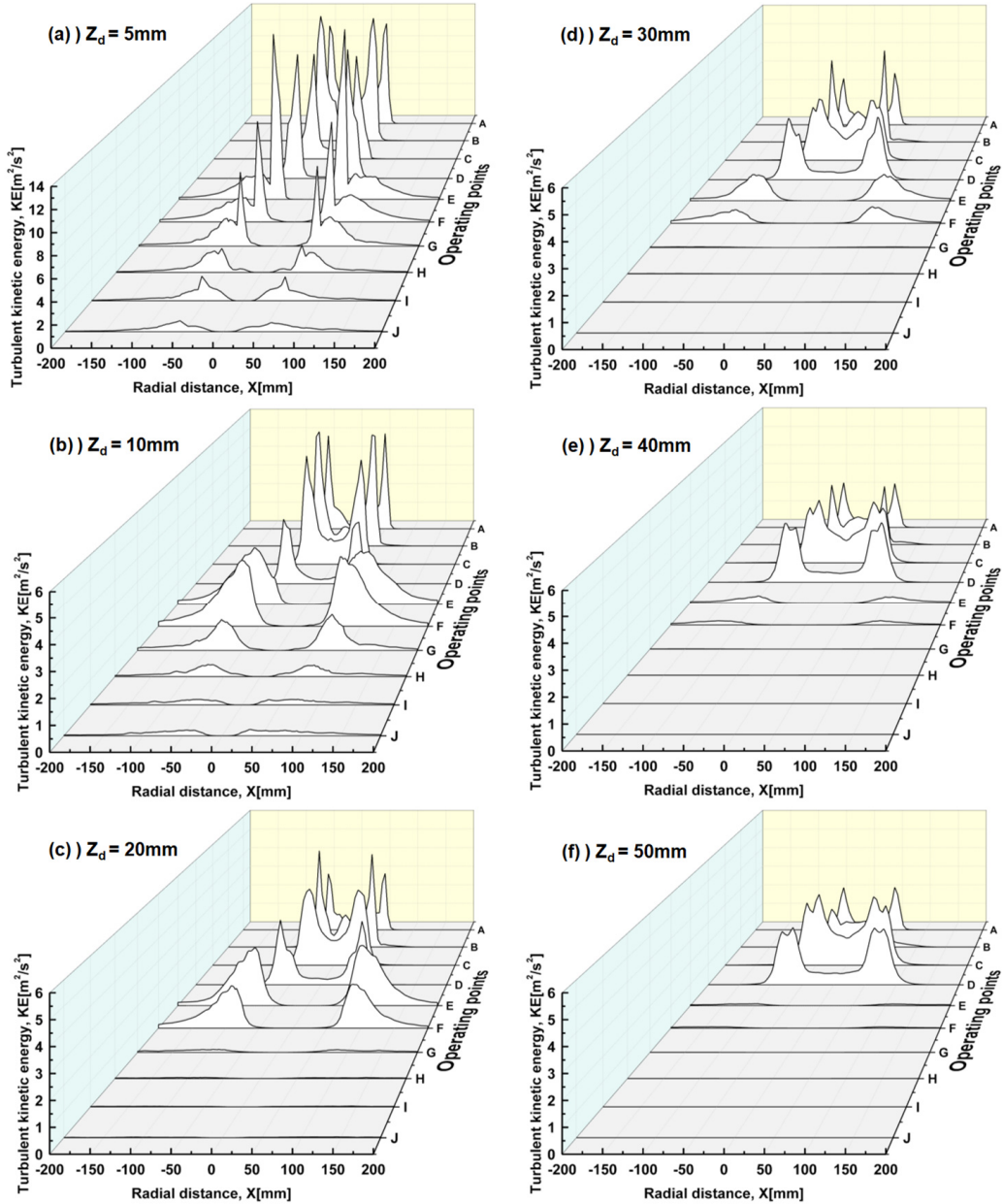


Fig. 6 Downstream turbulent kinetic energy profiles according to the operating points

3.3 난류운동에너지 분포

Fig. 6은 SSAF를 LES로 해석하여 얻어진 운전 부하에 따라 하류측에서 발달하는 유량계수에 따른 난류운동에너지(KE)들을 상호 비교한 그림이다. 여기서 KE는 유동장이 완전히 발달되어 유동

이 균질(homogeneous)하다는 가정 하에 정의된 식으로 계산하였다.

Fig. 6에서 KE의 분포는 하류측 거리에 관계없이 SSAF의 날개 끝단부를 중심으로 크게 발달함을 알 수 있다. 이것은 날개 끝단부를 중심으로

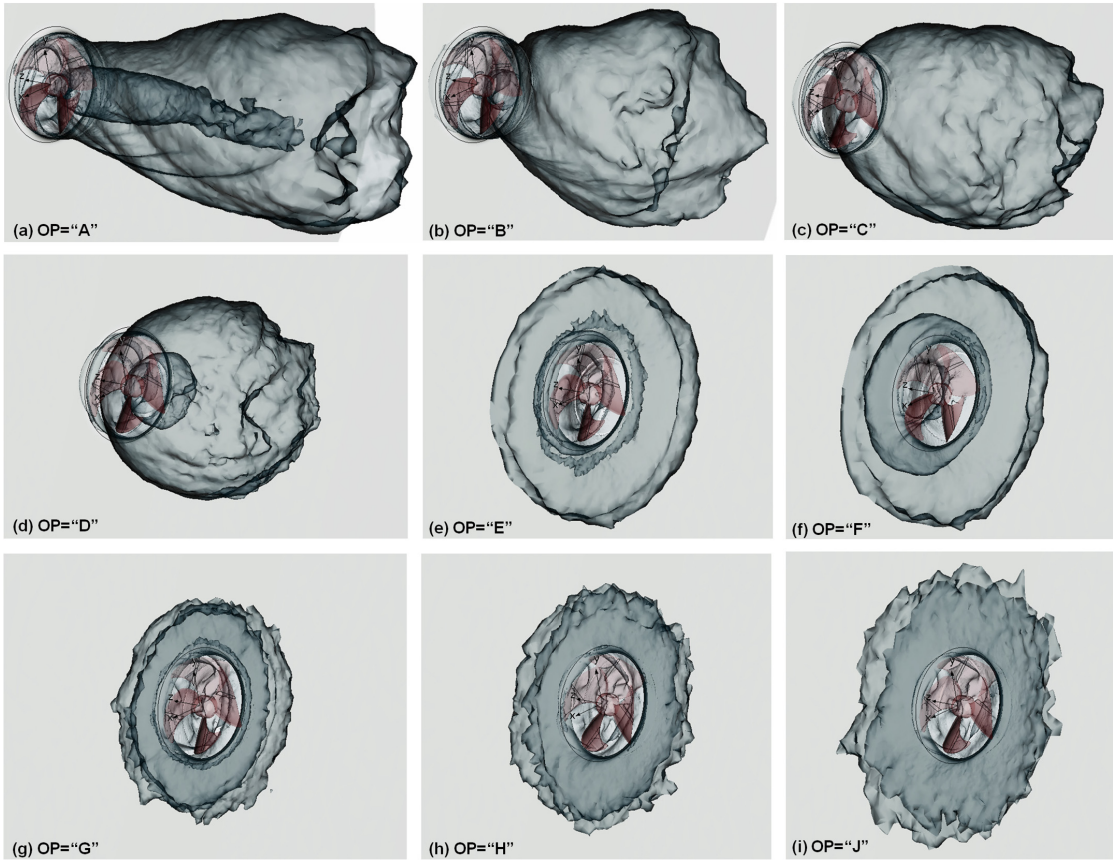


Fig. 7 Equivalent turbulent kinetic energy($KE=0.6\text{ m}^2/\text{s}^2$) contours according to the operating points

평균속도성분들의 기울기가 가장 크게 발달해 난류강도가 커지기 때문이다. 특히 SSAF의 날개로부터 떨어진 거리가 가까울수록 모든 운전점들에서 KE 의 크기는 상대적으로 크게 발달하며, 하류측으로 갈수록, 또 고 부하쪽으로 갈수록 분포되는 KE 는 더 빨리 소멸함을 알 수 있다. 한편, Fig. 6에서 가장 두드러진 특징은 SSAF의 하류측으로 가장 멀리 떨어진 $Z_0=50\text{ mm}$ 까지도 운전점 D까지 KE 는 다른 운전점들과는 달리 여전히 반경방향으로 더 확대되어 분포되지만 그 크기는 일정하게 유지한다는 점이다. 이것은 운전점 D까지는 축류유동이 형성되어 상대적으로 축방향 평균속도성분의 기울기가 더 크게 작용하기 때문으로 판단된다. 반면 운전점 E 이후부터 KE 는 축류유동보다는 반경유동으로 변할수록 현저히 감소

되어 나타난다.

Fig. 7은 운전부하에 따라 SSAF의 하류영역에서 발달하는 KE 를 입체적으로 비교 분석하기 위해 편의상 크기가 $0.6\text{ m}^2/\text{s}^2$ 인 등표면(iso-surface)의 분포들을 나타낸 그림이다. 최대유량을 나타내는 운전점 A에서 KE 의 등표면 양상은 SSAF의 날개 끝단부를 시작으로 발달하여 유동 축방향으로 멀리 확산된 모습을 보이며, 특히 SSAF의 중심부에서도 허브측 후류(wake)의 영향에 의해 하류측으로 발달된 모습을 볼 수 있다. 운전점 A에서 D로 갈수록 운전부하가 증가하므로 유동이 축방향 하류측으로 쪽 뻗어나가지 못하여 KE 의 등표면 양상은 점점 수축되어 둥그렇게 나타난다. 그러나 축류유동과 반경유동이 혼재되는 운전점 E와 F에서는 KE 의 등표면 양상이 납작하게 변하

며, 특히 축류유동보다는 반경유동이 더 지배되는 운전점 G 이후부터는 방사상으로 퍼진 완전히 납작한 모습을 보여준다.

4. 결 론

3차원 SSAF의 모델을 가지고 LES로 전산 해석한 결과는 다음과 같다.

1) SSAF의 공력성능에서 가장 큰 특징은 유량 대비 정압계수의 곡률이 크게 변화하는 실속구간이 항상 존재하며, 전압효율은 유량계수 $\phi = 0.2$ 부근에서 최대 약 35%값을 보여준다.

2) SSAF의 유량 대비 정압계수에서 운전점 D까지는 전형적인 축류유동이 형성되지만, 운전점 E 이후부터는 축류유동에서 반경유동으로 변하여 발달한다. 특히 운전점 D를 벗어나 F까지는 축류유동과 반경유동이 혼재된 일종의 실속구간으로 판단된다.

3) SSAF의 난류운동에너지는 날개로부터 떨어진 축방향 하류측 거리가 가까울수록 모든 운전점들에서 그 크기는 상대적으로 크게 발달하며, 하류측으로 갈수록, 또 고 부하측으로 갈수록 더 빨리 소멸한다.

4) 난류운동에너지의 등표면 양상은 운전점 A에서 D로 갈수록 운전부하가 증가하여 유동이 축방향 하류측으로 쭉 뻗어나가지 못하므로 점점 수축되어 둥그랗게 나타나지만, 운전점 E 이후부터는 납작하게 방사상으로 퍼져 나타난다.

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. 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. 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.

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, pp. 213-216, Kyungju, Korea.

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, 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>)

8. 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.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2018.22.6.028>)
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.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2015.19.5.080>)
10. J. K. Kim and S. H. Oh, 2016, "An Investigation on the 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.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2016.20.1.050>)
11. 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.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2016.20.6.064>)
12. 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.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.2.057>)
13. 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.
14. SC/Tetra(Version 12), 2015, User's Guide, Software Cradle Co., Ltd.
15. T. Adachi, M. Yamashita, K. Yasuhara and T. Kawai, 1996, "Effects of Operating Conditions on the Flow in the Moving Blade Passage of a Single Stage Axial-Flow Fan", *Proceedings of 6th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Vol. 2, pp. 199-208.
16. S. C. Morris, J. J. Good and J. F. Foss, 1998, "Velocity Measurements in the Wake of an Automotive Cooling Fan", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 17, pp. 100-106.