



벨마우스의 깊이가 다른 3차원 나선형 축류팬의 최대유량역에서 난류유동장 특성에 대한 대규모와 모사

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

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

(Received 01 October 2018, Revision received 09 April 2019, Accepted 10 April 2019)

Abstract: Large eddy simulation (LES) was carried out to analyze the characteristics of turbulent flow fields at the maximum flowrate of a three-dimensional helical axial fan (HAF) according to the different depth of bellmouth. The maximum flowrate of the HAF is half as small as that of the conventional axial flow fan. There is an optimum arrangement between the helical impeller and the bellmouth to obtain the maximum flowrate, but the helical impeller with two pitch blades exhibits very little change in flowrate regardless of the position of the bellmouth. In the downstream of the HAF, axial flow is observed and then radially diffused flow is observed. In particular, this flow is influenced by the chamber walls and creates a vortex pair. The vorticity magnitude generated downstream of the HAF is mainly formed at the helical blade tip and hub side.

Key Words : Courant Number, Dynamic Subgrid-Scale, Helical Axial Fan, Initial Time Interval, Large Eddy Simulation (LES)

1. 서 론

최근 3D 프린터가 산업계에 활발히 보급되면서 이를 활용한 새로운 산업혁명이 도래되고 있다. 종래에는 금형을 통해서 주로 제품 및 부품을 만들던 시대에서 현재에는 아무리 복잡한 형상을

갖는 부품들이라도 3D 모델링으로 형상 구현이 가능하다면, 3D 프린터로 직접 부품들을 만들 수 있게 되었다. 이에 따라 저자들은 일반적인 나선(screw)형상을 응용하여 축류팬(axial fan)으로 사용하기 위한 “나선형 송풍팬을 갖는 송풍장치”로 2016년도에 국내특허¹⁾를 등록한 바가 있다. 이것

*† 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 기계공학과

*† 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 Engineering, Kunsan National University.

은 전통적인 사출용 금형을 통해서도 도저히 제작될 수 없었지만, 3D 프린터에 의해서는 현재도 제작이 가능하다는 특징을 갖는다.

한편, 저자들^{2,6)}은 많은 실험 및 수치해석을 통해 축류팬 하류에서 일어나는 난류유동장의 구조 및 난류특성치들을 운전부하에 따라 다양한 각도에서 분석한 바가 있다. 그 결과, 축류팬 하류에서 발생하는 난류유동장은 운전부하에 따라 주로 반경방향으로 유동이 형성되는 영역과 대부분 실속(stall)이 발생하는 영역, 부분적인 실속이 일어나는 영역, 그리고 전형적인 축류유동이 일어나는 영역으로 유동구조를 갖는다고 밝힌 바가 있다.²⁾

따라서 이번 연구에서는 나선형 축류팬(helical axial fan, 이하 HAF로 표기함)의 최대유량 조건에서 난류유동장의 구조와 특성이 기존 축류팬^{2,6)}의 경우와 어떻게 다르게 나타나는지를 살펴보고자 대규모와모사(large eddy simulation, 이하 LES라고 표기함) 기법을 적용하였다. 여기서 LES기법⁷⁾은 다양한 크기의 척도(scale)를 갖는 난류 와(eddy)들의 조직화된 난류유동을 정확히 해석하기 위해서 주어진 격자크기의 필터(filter)보다 더 큰 대규모와(large scale eddy)는 어떠한 가정이나 난류모델 없이 직접 계산하고, 필터보다 더 작은 소규모와(small scale eddy)는 아격자척도(sub-grid scale)라는 난류모델을 도입하여 해(solution)를 구하는 방법으로 기존의 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)방법보다 수치해석의 정확도가 더 높다고 잘 알려져 있다.^{2,7)}

한편, 이번 연구에서는 완전한 형태의 3차원

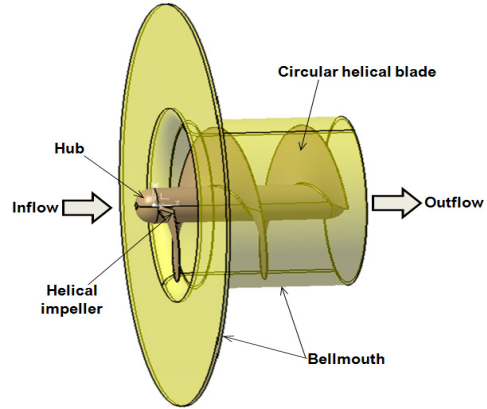


Fig. 1 Configuration of HAF

HAF의 모델들을 가지고 나선형 임펠러(impeller)가 벨마우스(bellmouth)에 위치하는 깊이변화에 따라 하류에서 발생하는 다양한 난류유동장의 구조와 특성들을 벡터(vector), 유선(streamline) 및 와도(vorticity) 분포 등을 통해 정확히 파악하고자 3차원, 비압축성, 비정상상태로 해석하였다. 이때, LES 해석에는 유한체적법에 기초한 상용소프트웨어인 SC/Tetra(ver.12)⁷⁾를 이용하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 1은 HAF를 구성하는 그림으로, 기존 축류팬^{2,6)}과 달리 변형된 벨마우스를 갖지만, 그 유동은 기존의 축류팬과 같이 축방향으로 유입되어 벨마우스 내의 나선형 날개사이를 거쳐 축방향으

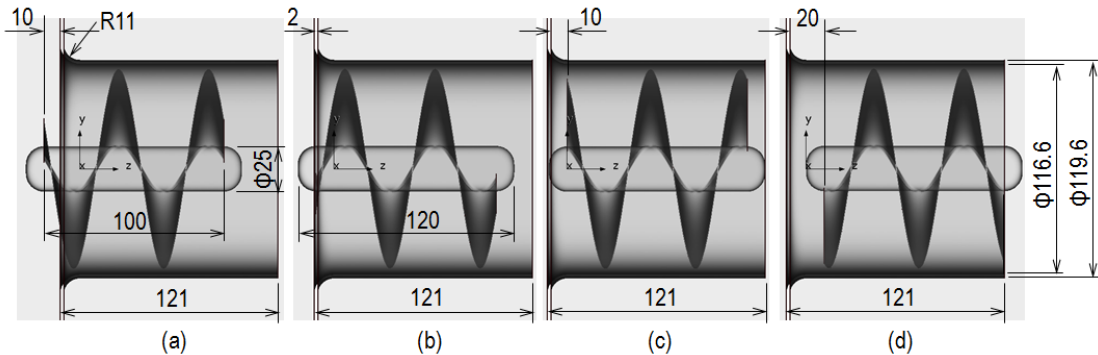


Fig. 2 Geometry arrangement between helical impeller and bellmouth

로 빠져나가는 형식을 취하게 된다. Fig. 2는 벨마우스내 나선형 임펠러의 최적위치를 찾기 위해 나선형 임펠러를 유동축(Z축) 방향으로 10 mm씩 변화를 준 4가지 해석모델들을 보여주고 있다. 여기서 나선형 임펠러의 날개직경, 허브(hub)직경, 벨마우스 직경 및 곡률반경들은 이미 발표된 축류팬²⁻⁶⁾과 동일한 크기이다. 또 원형인 나선형 날개는 허브외경을 따라 2회(2 pitch) 감아서 전체 깊이를 100 mm로 만들었다. 또 변형된 벨마우스는 입구곡률이 끝나는 지점에서 Z축방향으로 110 mm 길이의 원통을 추가로 붙여 만들었다.

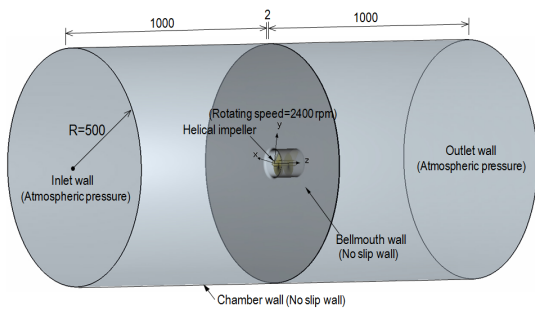


Fig. 3 Geometry configuration for the numerical analysis of HAF shown in Fig. 2(c)

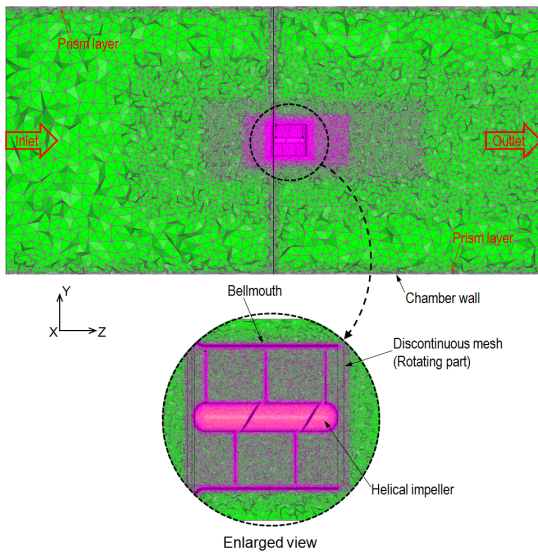


Fig. 4 Mesh configuration for the numerical analysis of HAF shown in Fig. 2(c)

Table 1 Grid sizes of analysis models for Fig. 2

Models \ Number	Node	Element
Fig. 2(a)	6,474,404	26,807,719
Fig. 2(b)	5,332,721	21,332,572
Fig. 2(c)	4,521,963	16,553,814
Fig. 2(d)	5,343,967	21,424,617

Fig. 3은 일례로 Fig. 2(c)의 HAF를 수치해석하기 위한 기하학적 형상을 나타낸 그림이다. 이 형상은 벨마우스를 중심으로 전후에 각각 반경 500 mm, 길이 1000 mm인 원통형 챔버(chamber)를 붙여 만들었다. 한편, 이 해석모델은 상용 소프트웨어인 CATIA(V5R18)로 3차원형상을 모델링한 후, SC/Tetra의 전처리 기능을 이용하여 각 구성요소들에 경계조건을 부여한 다음 만들었다. Fig. 4는 격자크기를 제어할 수 있는 "Octree" 기능을 이용하여 Fig. 3을 총 교점(node)수가 약 452만개를 가지며, 총 요소(element)수가 약 1655만개가 생성되도록 만든 격자그림이다. 여기서 해의 수렴성을 높이기 위해 나선형 임펠러와 벨마우스 및 챔버 벽면에는 각각 2개의 프리즘층(prism layer)을 삽입하였다. Fig. 2의 나머지 해석모델들도 같은 방법으로 처리하였으며, 얻어진 격자크기들은 Table 1에 요약하였다.

2.2 수치기법

이번 연구에서 적용한 Fig. 3의 경계조건을 살펴보면, 벨마우스와 챔버의 벽면 조건은 모두 점착(no-slip)조건으로 설정하였으며, 입구 및 출구벽면은 최대유량이 나오도록 대기압조건으로 각각 설정하였다. 또 나선형 임펠러는 회전수를 2,400 rpm으로 설정하여 회전체 조건⁷⁾을 반영하였다.

LES의 난류모델에는 동적 아격자척도(dynamic subgrid-scale) 모델을 사용하였으며, 시간미분항은 2차 음함수(implicit)기법을, 대류항은 2차 중앙차분(central difference)기법을 각각 적용하였다. 또 이산화된 방정식들의 압력보정에는 모두 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다. 또 초기시간 간격은 회전수 2,400 rpm에 대한 나선형 임펠러의

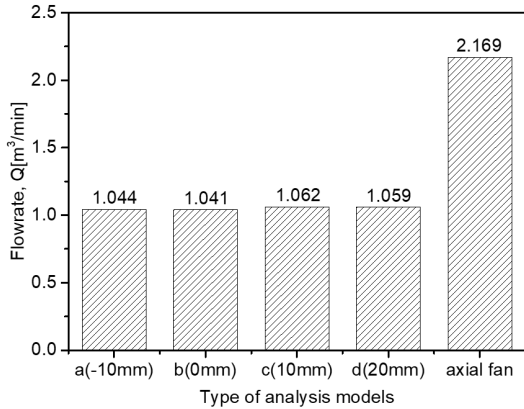


Fig. 5 Comparison of maximum flowrate obtained by the LES analysis of HAF models

원주속도와 최소격자크기를 고려하여 4.95×10^{-5} 초로 정하였으며, 어떠한 시간간격(time interval)에도 영향을 받지 않는 해석결과를 얻기 위해 Courant수⁷⁾를 1로 정하였다. 이를 토대로 질량유량(mass flux)이 충분히 안정을 보이는 10만회까지 비정상상태로 계산을 한 다음, 이것을 바탕으로 통계학적 난류특성 평균치를 얻기 위해서 동일한 시간간격으로 다시 10만회를 더 시간평균(time average)하여 그 결과들을 통해 난류유동장을 분석하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 최대풍량 분포

Fig. 5는 Fig. 2의 4가지 HAF의 해석모델들과 이미 발표된 축류팬²⁻⁶⁾의 최대풍량을 비교한 그림이다. 이번 연구에서 HAF의 최대풍량은 전체적으로 같은 날개직경과 허브직경을 갖는 기존의 축류팬²⁻⁶⁾보다 같은 회전수에서도 거의 절반 수준으로 작은 크기를 보이며, 특히 Fig. 2(c)의 해석모델에서는 그나마 가장 큰 값을 보이고 있다. 이것은 나선형 임펠러의 날개면적이 축류팬보다 약 2.6배가 더 커지면서 유동이 날개통로를 빠져나가는 과정에서 유동저항이 더 크게 작용하기 때문으로 생각된다. 결과적으로 벨마우스 내 나선형 임펠러의 최적배치는 Fig. 2(c)가 가장 이상적임을 알 수 있다. 그러나 벨마우스내 나선형 임펠러가 Z축방

향으로 10 mm씩 변하여도 최대풍량의 변화는 매우 작음을 알 수 있다. 이것은 나선형 임펠러의 날개가 2피치(pitch)로 구성되어 있기 때문에, Fig. 2와 같이 변하여도 나선형 날개가 적어도 1피치 이상 벨마우스 내에 머물러 풍량 변화가 적게 나타나는 것으로 판단된다.

3.2 벡터유동장 분포

Fig. 6은 Fig. 2의 HAF 모델별로 해석한 평균유동장으로부터 얻어진 Y, Z방향의 평균속도성분들로 구성된 벡터분포들을 나타낸 그림이다. 모든 HAF 해석모델에서 가장 뚜렷하게 나타난 벡터분포의 특징은 나선형 날개면에서 발생한 유동이 Z축 하류로 쏙 빠져나가지 못하고 해석모델별로 다른 Z축방향의 특정한 위치 이후에서는 반경방향으로 크게 확산되면서 속도가 감소되어 주류의 간섭과 챔버의 벽면에 영향을 받으면서 다시 상류로 꺾이는 역류현상이 발생해 와류쌍(vortex pair)을 형성하고 있다는 점이다. 따라서 와류쌍이 발생하는 위치를 중심으로 일부 유동은 속도크기가 매우 작지만 상류측으로 재순환되는 유동으로 나타나고, 일부 유동은 하류 반경방향쪽으로 크게 확산되어 흐르는 것을 알 수 있다. 이것은 이미 발표된 축류팬²⁻⁶⁾에서는 전혀 찾아볼 수 없는 유동현상으로 HAF의 하류에서만 볼 수 있는 고유현상으로 판단된다. 특히 HAF의 하류유동에서는 동일한 크기의 축류팬²⁻⁶⁾보다 풍량이 약 절반 수준으로 작게 나타나기 때문에, 축류유동을 나타내는 축방향 거리가 상대적으로 매우 짧게 나타남을 알 수 있다. 또한 허브 하류측에서 형성된 유동의 속도크기도 축류팬²⁻⁶⁾보다 더 작게 나타나고 있다. 결과적으로 HAF의 해석모델 중 풍량이 가장 크게 나타나는 Fig. 6(c)의 조건에서 축류유동이 가장 길게 나타나고, 상대적으로 더 안정된 속도분포가 형성됨을 알 수 있다.

3.3 유선 분포

Fig. 7은 Fig. 2의 HAF 모델별로 해석한 평균유동장으로부터 얻어진 유선들을 나타낸 그림이다. 여기서 각 해석모델별 유선들은 X-Y평면의 벨마

우스 출구($X=110\text{ mm}$)에서 나선형 날개 끝단을 시작점으로 같은 조건하에서 구하였다. 전체적으로 나선형 날개면에서 생성된 유선들은 HAF의 회전운동으로 선회하면서 Z축방향 하류로 일정거리를 좁게 전개하다가, 일부는 하류로 진행하다가 갑자기 반경방향쪽으로 크게 확산되면서 축방향으로 쏘 빠져나가고, 주 유동을 벗어난 일부는 챔버 벽면까지 확대된 영향으로 인해 하류측에서 압력이 상승해 압력이 상대적으로 낮은 상류측으로 재순환되는 모습을 보이고 있다. 여기서 재순환유동은 챔버의 직경크기에 영향을 받아 생긴 현상으로 사료된다. 따라서 이 현상은 챔버의 직경을 훨씬 크게 하든지 아니면 벽면을 없애면 사라질 것으로 예상되어 정확한 평가를 위해서는 추가 해석이 필요할 것 같다.

3.4 와도 분포

Fig. 8은 Fig. 2의 HAF 해석모델별로 얻어진 와도의 크기들을 나타낸 그림이다. 여기서 와도의 크기는 일례로 40 s^{-1} 을 나타내었다. 와도분포는 전체적으로 나선형 날개 끝단부와 허브를 중심으로 발달함을 알 수 있다. 나선형 임펠러가 벨마우스로 가장 작게 들어간 Fig. 8(a)에서 와도는 가장 불규칙적인 분포를 나타내며, 나선형 임펠러가 벨마우스로 더 들어갈수록 와도의 불규칙성은 개선된다. 그러나 가장 풍량이 큰 Fig. 8(c)에서 와도분포가 가장 안정된 상태를 보인다. 따라서 Fig. 8(c)가 나선형 임펠러와 벨마우스의 최적배치 상태로 판단된다.

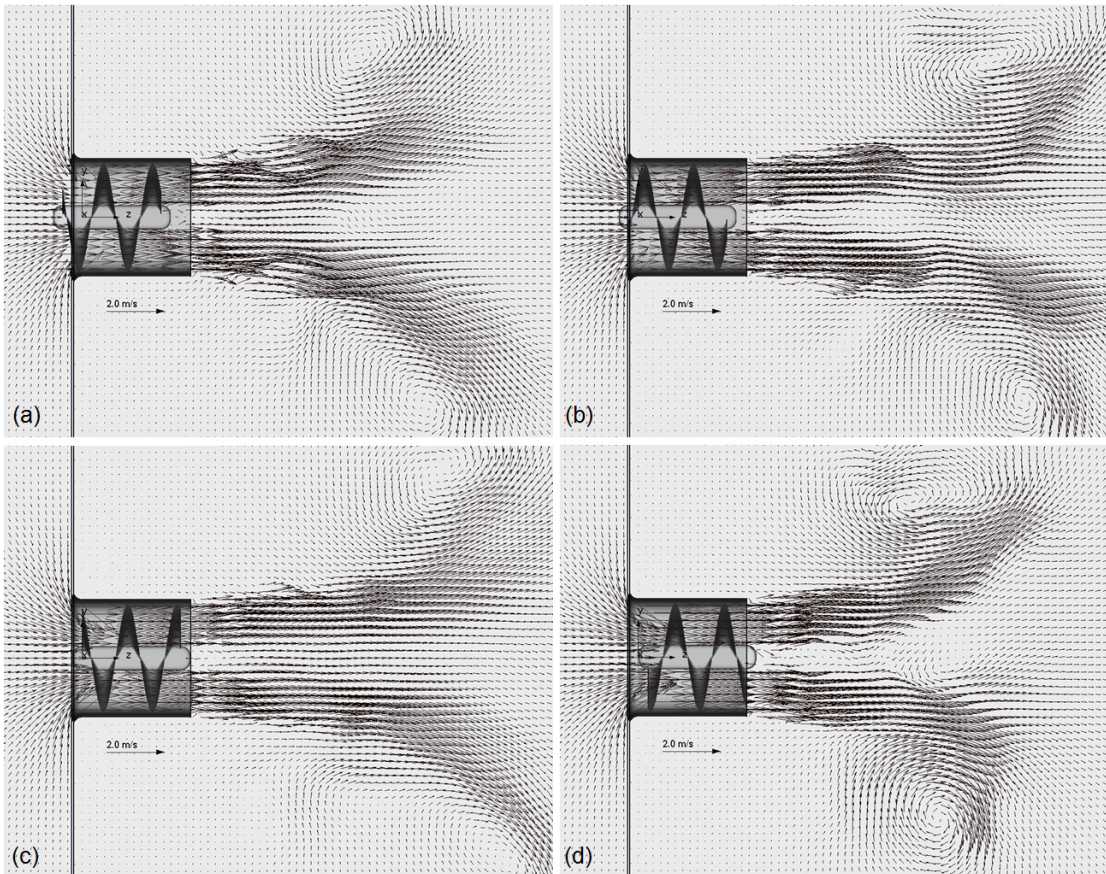


Fig. 6 Vector profiles obtained by the LES analysis of HAF models

4. 결 론

2피치 나선형 임펠러를 벨마우스와 배치 깊이를 달리하면서 완전한 3차원 형태의 HAF모델들을 LES로 전산 해석한 난류유동장 특성은 다음과 같다.

1) HAF의 최대풍량은 임펠러의 통과유동저항으로 인해 기존의 축류팬보다 절반 수준으로 작게 나타난다.

2) 최대풍량을 얻기 위한 나선형 임펠러와 벨마우스 사이의 최적 배치는 존재하나, 2피치 날개를 갖는 나선형 임펠러에서는 벨마우스와의 배치변화에 관계없이 풍량 변화는 매우 작다.

3) HAF의 하류는 축류유동을 보이다가 반경방향으로 크게 확산하는 유동을 보이며, 챔버 벽면의 영향을 받아 와류쌍을 생성한다.

4) HAF의 하류에서 생성된 와도크기는 주로 나선형날개 끝단부와 허브측에서 형성된다.

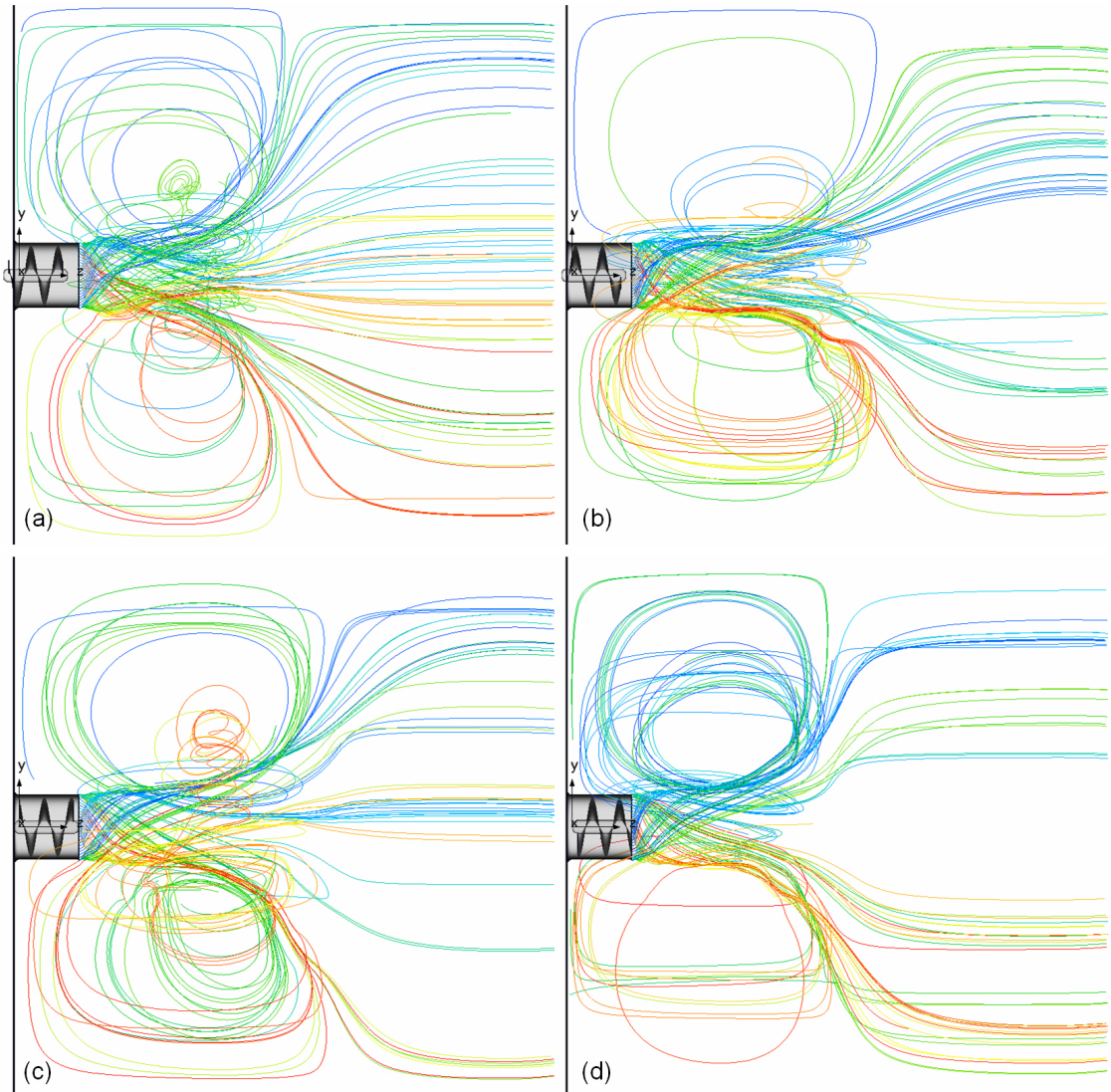


Fig. 7 Streamline profiles obtained by the LES analysis of HAF models

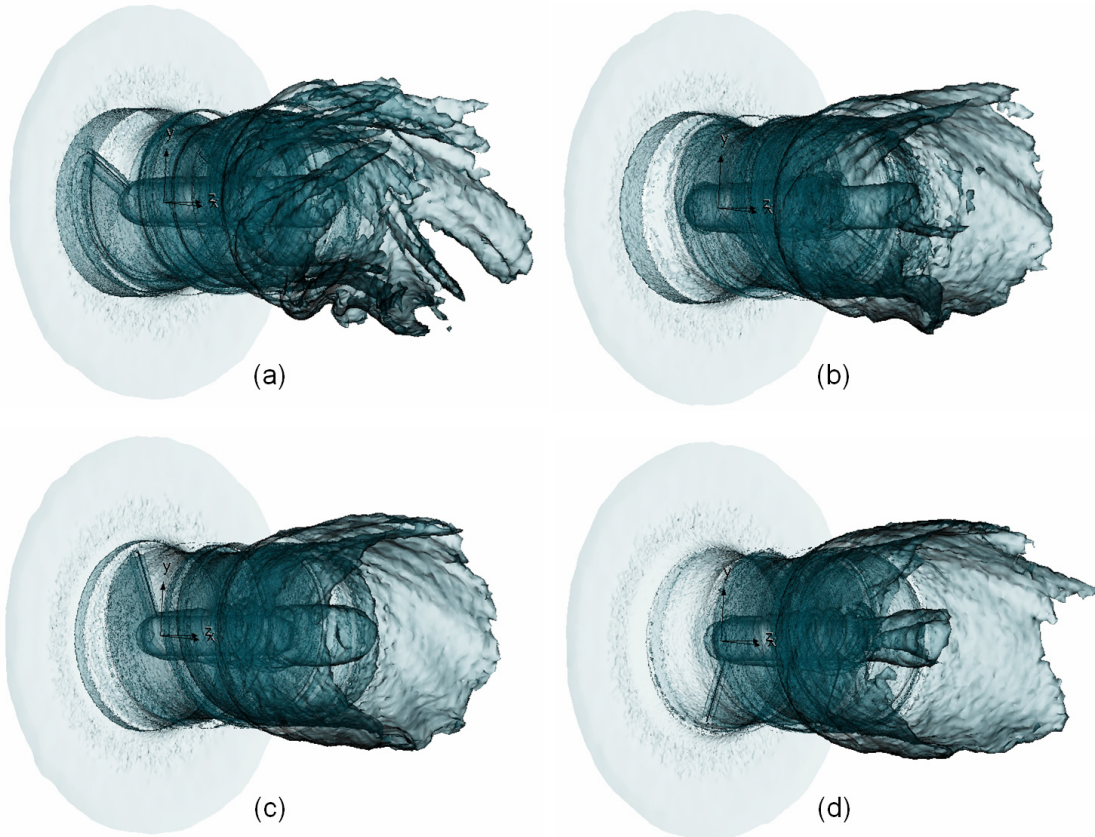


Fig. 8 Iso-surface profiles of vorticity magnitude(40 s^{-1}) obtained by the LES analysis of HAF models

5) HAF의 실제 사용을 확대하고, 정확한 유동 특성을 파악하기 위해서는 챔버 벽면의 영향을 배제한 LES 해석이 추가로 요구된다.

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, 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)

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.
(DOI:10.9726/kspse.2015.19.6.019)
4. 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)
5. 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)
6. 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)
7. SC/Tetra(Version 12), 2015, User's Guide, Software Cradle Co., Ltd.