

벨마우스 깊이가 다른 3차원 소형축류팬의 공력특성에 대한 대규모 와 모사

Large Eddy Simulation on the Aerodynamic Performance of Three-Dimensional Small-Size Axial Fan with the Different Depth of Bellmouth

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

(Received 14 July 2015, Revision received 28 October 2015, Accepted 28 October 2015)

Abstract: The unsteady-state, incompressible and three-dimensional large eddy simulation(LES) was carried out to analyze the aerodynamic performance of three-dimensional small-size axial fan(SSAF) with the different depth of bellmouth. The static pressure coefficients analyzed by LES predict a little bit larger than measurements except stall region regardless of the installation depth between SSAF and bellmouth. Moreover, static pressure efficiencies analyzed by LES show about maximum 30% at the actual operating point ranges, but measurements do not. Therefore, if the blades of conventional SSAF have some more rigidity and complete dynamic balance, the aerodynamic performance of SSAF will be some more improved. In consequence, LES shows the best prediction performance in comparison with any other Reynolds averaged Navier-Stokes(RANS) method.

Key Words : Aerodynamic Performance, Courant Number, Dynamic Subgrid-Scale, Flow Coefficient, Large Eddy Simulation(LES), Small-Size Axial Fan(SSAF), Static Pressure Coefficient, Static Pressure Efficiency

기호설명

D_2 : 팬의 외경 [m]

D_h : 팬의 허브직경 [m]

g : 중력가속도 [m/s^2]

N : 회전수 [rpm]

p_s : 정압력 [Pa]

Q : 유량 [m^3/min]

T : 토크 [$N \cdot m$]

η_s : 축류팬의 정압효율 [%], $\{\eta_s = \frac{50p_s Q}{\pi N T}\}$

ρ : 공기의 밀도 [kg/m^3]

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(교신저자) : 군산대학교 동력기계시스템공학과
 E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848

** 오석형 : 군산대학교 기계공학부

*† Jang-Kweon Kim(corresponding author) : Department of
 Power System Engineering, Kunsan National University.
 E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848

** Seok-Hyung Oh : School of Mechanical Engineering, Kunsan
 National University.

1. 서론

소형축류팬(이하 SSAF라고 함)은 각종 컴퓨터에서 중앙처리장치(CPU)의 열 배출 및 냉각고내에서 냉기류의 순환을 위해 많이 사용되고 있다. 특히, 이 SSAF는 대부분이 날개 두께가 매우 얇은 플라스틱 사출물로 만들어져 있기 때문에, 소음과 진동 및 풍량 성능이 운전부하의 변동이나 SSAF와 벨마우스(bellmouth)의 설치위치에 따라 크게 영향을 받는 문제점이 있다. 그러나 SSAF는 설치하고자 하는 시스템의 한정된 외곽크기 내에서 공간 배치가 용이하고, 가격이 저렴하기 때문에 현재까지도 많이 사용되고 있다.

전산유체역학에 의한 SSAF의 연구는 컴퓨터의 발달과 더불어 격자를 실제 회전시키지 않고서도 팬의 회전효과를 반영할 수 있도록 정지영역과 회전영역 사이의 계산값들을 보간하는 미끄럼격자(sliding mesh) 방식을 갖춘 상용소프트웨어를 통해 이루어지고 있다. 즉, Zhou 등¹⁾과 Kim 등²⁾ 및 Hurault 등³⁾은 각각 RNG $k-\epsilon$ 과 벽 근처영역에서 저레이놀즈수(low-Reynolds number)를 반영한 SST(shear stress transport)모델 및 레이놀즈응력(Reynolds stress)모델들을 적용하여 축류팬 날개의 주기적인(periodic) 조건을 이용하기 위해 날개한쪽모델만을 3차원 정상상태로 해석한바 있다. 또 Han 등⁴⁾과 Ito 등⁵⁾ 및 Liu⁶⁾는 각각 MP $k-\epsilon$ ⁷⁾, 표준(standard) $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$ 모델들을 이용하여 완전한 형태의 3차원 축류팬 모델을 가지고 비정상상태로 유동을 해석한바가 있다.

한편, 저자들은 3차원 비압축성 정상상태에서 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)방법들로 SSAF를 해석해 기 발표한 예측공력성능⁸⁾이 실험결과⁹⁾와 비교했을 때, 그 정확성이 크게 떨어진다고 판단하여, 본 연구에서는 기존의 RANS 방법보다는 수치해석의 정확도가 더 높다고 잘 알려진 대규모 와 모사(large eddy simulation, 이하 LES라고 함)기법을 도입하였다⁷⁾. LES기법^{7,10)}은 다양한 크기의 척도(scale)를 갖는 난류 와(eddy)들에 의해 조직화된 난류유동을 정확히 해석하기 위해 주어진 격자크기의 필터(filter)보

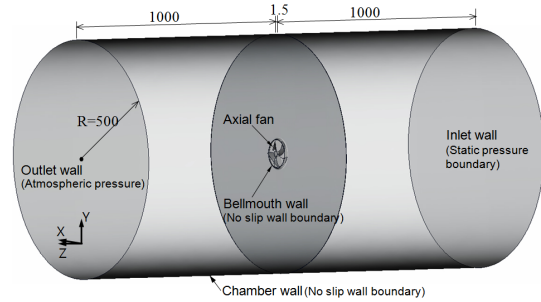


Fig. 1 Geometry configuration for the numerical analysis of SSAF

다 더 큰 대규모와(large scale eddy)는 어떠한 가정이나 모델 없이 직접 계산하고, 필터보다 더 작은 소규모와(small scale eddy)는 아격자척도(sub-grid scale)라는 난류모델을 도입하여 해를 구하는 방법이다⁷⁾.

따라서 본 연구에서는 완전한 형태의 3차원 SSAF모델을 가지고 벨마우스와의 설치위치를 달리하면서 3차원, 비압축성, 비정상상태로 해석한 LES의 공력특성 결과들이 과연 실험결과들과 얼마나 잘 일치하는지를 살펴보고자 하였다. 이를 위해 유한체적법에 기초한 상용소프트웨어인 SC/Tetra(ver.8)⁷⁾를 이용하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 1은 SSAF를 해석하기 위해 사용한 챔버(chamber)의 기하학적 형상과 제원을 나타내고 있다. 여기서 SSAF는 실제 냉각고에서 사용 중인 것으로 그 상세제원은 Table 1과 같다. 두께 1.5 mm인 벨마우스를 기준으로 앞뒤에 붙인 2개의 원통형 챔버의 크기는 직경 및 길이가 각각 1000 mm이다. 이 크기는 SSAF의 주 유동이 계산영역의 크기에 영향을 받지 않도록 SSAF의 직경대비 약 9배 이상으로 정한 것이다.

Fig. 2는 Fig. 1에 적용한 SSAF와 벨마우스의 설치조건들을 나타내는 그림이다. Fig. 1의 해석 모델은 먼저 상용 소프트웨어인 CATIA(V5R18)를 가지고 3차원형상으로 모델링한 후, SC/Tetra

Table 1 Specification of SSAF

Item	Specification
Hub diameter (mm)	25
Blade depth (mm)	27.315
Blade thickness (mm)	Max 2
Blade curvature radius (mm)	109.24
Chord length at tip (mm)	65.58
Chord length at hub (mm)	13.33
Blade inlet angle (°)	98.08
Blade outlet angle (°)	51.16
Blade rake angle (°)	5.14
Solidity at tip (-)	0.7591
Solidity at hub (-)	0.6789
Blade attachment angle (°)	24.28

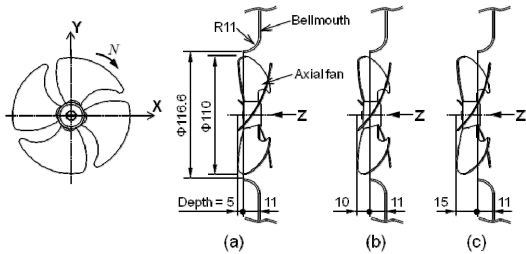


Fig. 2 Position array between SSAF and bellmouth

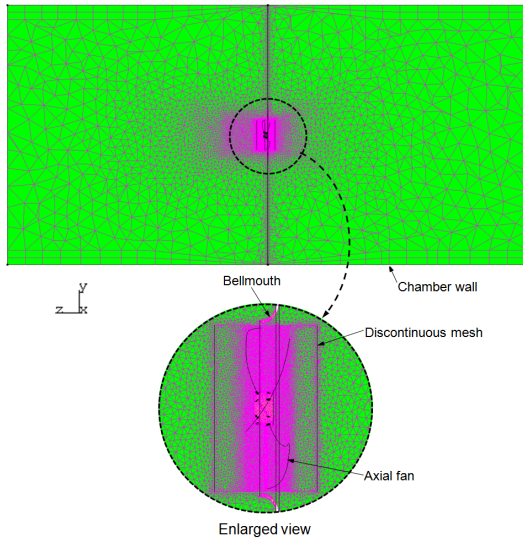


Fig. 3 Mesh configuration for numerical analysis with the type of position array (b)

의 전처리 소프트웨어를 이용하여 경계조건을 부여한 다음 만들었다. 이후 격자크기를 제어할 수

Table 2 Mesh specification for numerical analysis

Position array(depth)	Total element number
Type A(5 mm)	4,639,834
Type B(10 mm)	4,395,460
Type C(15 mm)	4,231,841

있는 "Octree" 기능을 이용하여 Fig. 3과 같은 계산영역의 격자파일을 만들었다. 그 결과, 각 벨마우스의 위치배열 형태에 따른 요소(element)수는 Table 2와 같이 생성되었다. 여기서 해의 수렴성을 높이기 위해 SSAF와 벨마우스 및 챔버 벽면에는 각각 프리즘층(prism layer)을 삽입하였다.

2.2 수치기법

본 연구에서 적용한 Fig. 1의 경계조건을 살펴보면, 벨마우스와 챔버의 벽 조건은 모두 점착(no-slip)조건으로 설정하였으며, 입구벽면은 압력에 의한 부하를 다양하게 부여할 수 있도록 정압조건으로, 그리고 출구벽면은 대기압조건으로 각각 설정하였다. 또 SSAF는 회전수를 2400 rpm으로 설정하여 회전체 조건⁷⁾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 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다. 또 초기시간간격은 회전수 2400 rpm에 대한 SSAF의 원주속도와 최소격자크기를 고려하여 4.95×10^{-5} 초로 정하였으며, 어떠한 시간간격(time interval)에도 영향을 받지 않는 해석결과를 얻기 위해서 Courant 수는 1로 정하였다⁷⁾. 이를 토대로 질량유량(mass flux)이 충분히 안정을 보이는 10만회까지 비정상상태로 계산을 하여 그 결과들을 분석하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 정압계수 분포

Fig. 4는 벨마우스를 고정된 상태에서 SSAF를 유동 출구쪽(Z방향)으로 각각 5 mm, 10 mm, 15

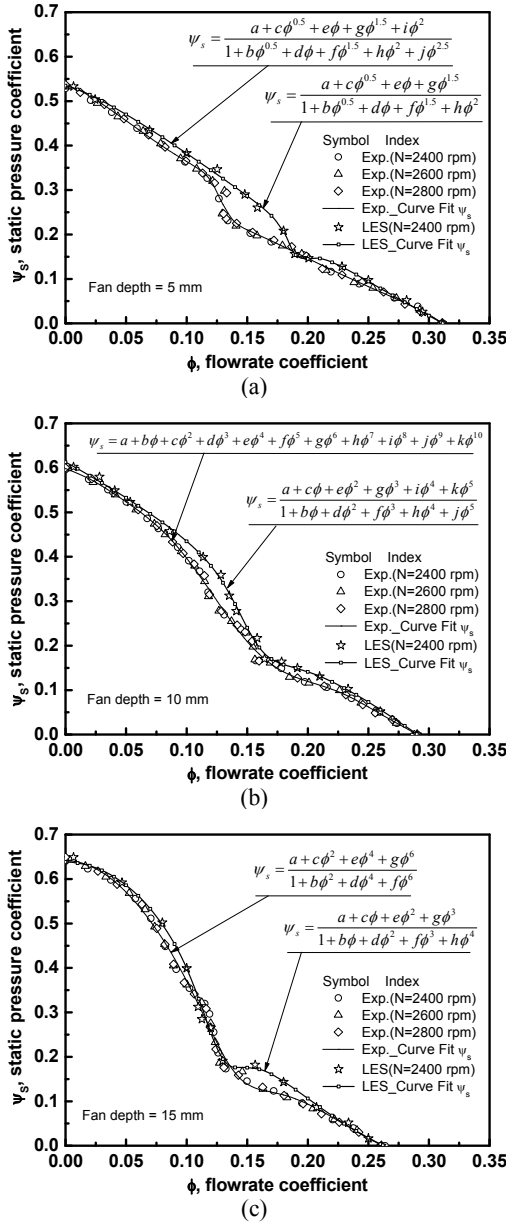


Fig. 4 Static pressure coefficient profiles obtained by experiment and LES analysis

mm씩 밀어 넣은 상태에서 무차원 공력성능인 유량계수에 따른 정압계수들의 실험값들과 LES로 해석한 결과들을 상호 비교한 그림이다. 여기서 실험값들은 상사성을 확보하기 위해 3가지 회전수에서 얻어진 결과들을 사용하였다.

Table 3 Coefficient values satisfied with the curve -fit of static pressure coefficient

Position array (Fan depth)	Coefficient values	
Type A (5 mm)	Exp.	a=0.52908876 f=-70.005117
		b=-9.1816245 g=-21.99597
		c=-4.7091953 h=84.057108
	LES	d=34.568301 i=11.522392
		e=15.42625 j=-45.074045
		a=0.53454869 e=7.1708279
Type B (10 mm)	Exp.	b=-6.4299184 f=-18.707548
		c=-3.4008644 g=-5.005022
		d=15.686605 h=10.310877
	LES	a=0.59822569 g=7930260.8
		b=-1.2635358 h=-37559975
		c=34.311425 i=1.0341126×10 ⁸
Type C (15 mm)	Exp.	d=-2558.2473 j=-1.5336968×10 ⁸
		e=68892.058 k=94775482
		f=-981379.36 -
	LES	a=0.61289505 g=-0.018537941
		b=-10.87901 h=193.41474
		c=-8.1470624 i=-32.447299
Type C (15 mm)	Exp.	d=26.186608 j=-42.7252
		e=29.280966 k=-234.60854
		f=3.5169013 -
	LES	a=0.64107962 e=2050.566
		b=-50.216837 f=51423.539
		c=-61.432081 g=-18960.658
LES	d=252.44555 -	
	a=0.63827884 e=72.648014	
	b=-18.597085 f=-573.41487	
LES	c=-11.953663 g=-138.52845	
	d=136.95926 h=1408.7372	

한편, SSAF를 Fig. 2와 같이 순차적으로 Z방향 쪽으로 밀어 넣을수록, Fig. 4에서 나타난 유량계수별 정압계수는 실험값들이나 해석값들 모두 서로 다른 분포양상을 보여주며, 최대정압계수는 증가하나, 최대유량계수는 감소함을 알 수 있다. Fig. 4에서 나타난 가장 큰 특징은 LES로 해석한 정압계수들이 SSAF의 설치깊이에 관계없이 대체로 전 유량계수에 걸쳐 실험값들에 일치하거나 약간 더 큰 값을 나타내고 있다는 것이다. 이와 같은 특징은 LES가 기존의 RANS방법들에 의해 SSAF를 3차원 비압축성 정상상태로 기 해석한 결과들⁹⁾에 비해 매

우 우수하다는 것을 의미한다. 참고로 기존 RANS 방법들에 의한 정압계수들의 해석값들은 실험값들에 현저히 미치지 못함을 보였었다⁸⁾.

한편, Fig. 4에서 정압계수(ψ_s)가 0.1보다 낮은 구간에서는 SSAF의 설치깊이에 관계없이 해석값들이 실험값들과 거의 비슷한 크기를 보이지만, 정압계수가 0.1보다 큰 구간에서는 SSAF의 설치깊이에 따라 각각 다른 양상을 보여주고 있다. 즉, SSAF의 설치깊이 5 mm에서는 최대유량으로부터 유량이 감소함에 따라 정압계수의 곡률이 크게 변화하는 실속(stall)을 나타내는 유량계수 구간 중 $0.11 \leq \phi \leq 0.2$ 에서 해석값들과 실험값들이 더 큰 편차를 보여주고 있다. 반면에 SSAF의 설치깊이 10 mm의 경우 해석값들과 실험값들의 편차는 많이 줄었지만, 유량계수 $0.07 \leq \phi \leq 0.16$ 에서 나타나고 있다. 그런데 SSAF의 설치깊이 15 mm의 경우 오히려 실속을 지나 고정압에 이르는 유량계수 구간에서는 해석값들과 실험값들의 편차가 그다지 크지 않고, 유량계수 $0.13 \leq \phi \leq 0.2$ 에서 다소 크게 나타나고 있다. 이것은 SSAF의 최대날개두께가 2 mm를 갖는 얇은 플라스틱재질로 만들어졌기 때문에, 4개의 날개들이 모두 동적균형(dynamic balance)을 완벽하게 이룰 수 없을 뿐만 아니라 웬 회전 시 SSAF와 벨마우스의 설치깊이에 따라 발생하는 다른 부하조건으로 인해 날개의 흔들림과 유동 반대방향으로 젖혀지는 휨 및 날개 끝단에서 주로 발생하는 누설 등의 문제점들이 각각 다르게 발생되므로 실제 실험값들은 LES해석 결과보다 더 작게 얻어졌다고 판단된다. 따라서 현재의 SSAF의 날개두께를 좀 더 키워 강성을 높이고, 4개의 날개두께를 균일하게 제작할 수만 있다면, 실험값은 기존보다 더 좋은 공력성능을 나타낼 수 있어, 결과적으로 LES 해석값과 비슷해 질 것으로 판단된다.

참고로 유량계수별 정압계수의 실험값들과 LES 해석값들의 근사식들은 각각 2차원 상용소프트웨어인 TableCurve2D¹¹⁾로 커브피팅(curve-fitting)하여 얻어졌다. 그 결과, Fig. 4(a)에서 실험값들과 해석값들의 근사식들은 모두 식 (1)의 형태로 주어진다. 또 Fig. 4(b)의 경우, 실험값들과 해석값들의 근사식들은 각각 식 (2)와 식 (3)으로 주어

지며, Fig. 4(c)의 경우에는 실험값들과 해석값들의 근사식들이 각각 식 (4)와 식 (3)의 형태로 주어진다. 이때, Fig. 4에서 나타난 각 수식들을 만족하는 각 계수들은 모두 Table 3에 나타내었다.

$$\psi_s = \frac{a + c\phi^{0.5} + e\phi + g\phi^{1.5} + i\phi^2}{1 + b\phi^{0.5} + d\phi + f\phi^{1.5} + h\phi^2 + j\phi^{2.5}} \quad (1)$$

$$\psi_s = a + b\phi + c\phi^2 + d\phi^3 + e\phi^4 + f\phi^5 + g\phi^6 + h\phi^7 + i\phi^8 + j\phi^9 + k\phi^{10} \quad (2)$$

$$\psi_s = \frac{a + c\phi + e\phi^2 + g\phi^3 + i\phi^4 + k\phi^5}{1 + b\phi + d\phi^2 + f\phi^3 + h\phi^4 + j\phi^5} \quad (3)$$

$$\psi_s = \frac{a + c\phi^2 + e\phi^4 + g\phi^6}{1 + b\phi^2 + d\phi^4 + f\phi^6} \quad (4)$$

3.2 정압효율 분포

Fig. 5는 벨마우스를 고정된 상태에서 SSAF를 유동 출구쪽(Z방향)으로 각각 5 mm, 10 mm, 15 mm씩 밀어 넣은 상태에서 유량계수에 따른 정압효율의 실험값들⁹⁾과 LES로 해석한 결과들을 상호 비교한 그림이다. 여기서도 실험값들은 상사성을 확보하기 위해서 3가지 회전수에서 얻어진 결과들을 사용하였다.

Fig. 5에서 보여준 유량계수에 따른 정압효율의 분포는 SSAF의 설치깊이에 따라 다른 분포양상을 보여주며, 실험값들은 회전수별로 주로 실속을 나타내는 구간에서 서로 중첩되지 않고 그 편차가 크게 나타나 있다. 이 현상은 SSAF가 벨마우스 후방 쪽으로 돌출될수록 정압이 상승하므로, 두께가 얇은 SSAF의 날개가 부하를 극복하지 못하고 유동방향 반대로 젖혀져 진동하게 됨에 따라 SSAF의 축과 직접 연결된 토크센서가 민감하게 반응하여 나타난 결과이다. 그 결과, 회전수가 낮을수록 날개의 떨림이 더 커 토크가 더 크게 측정되어 정압효율이 약간 낮게 나타남을 알 수 있다⁹⁾. 한편, LES로 해석한 정압효율의 분포양상은 실험값과 비교적 유사한 분포양상을 보여주며, 특히 SSAF의 설치깊이 5 mm에서 매우 유사한 크기분포를 보여주고 있다. 이것은 다른 웬의 설치깊이보다도 SSAF의 날개에 영향을 미치는 정압 및 날개와 벨마우스의 간섭이 가장 적

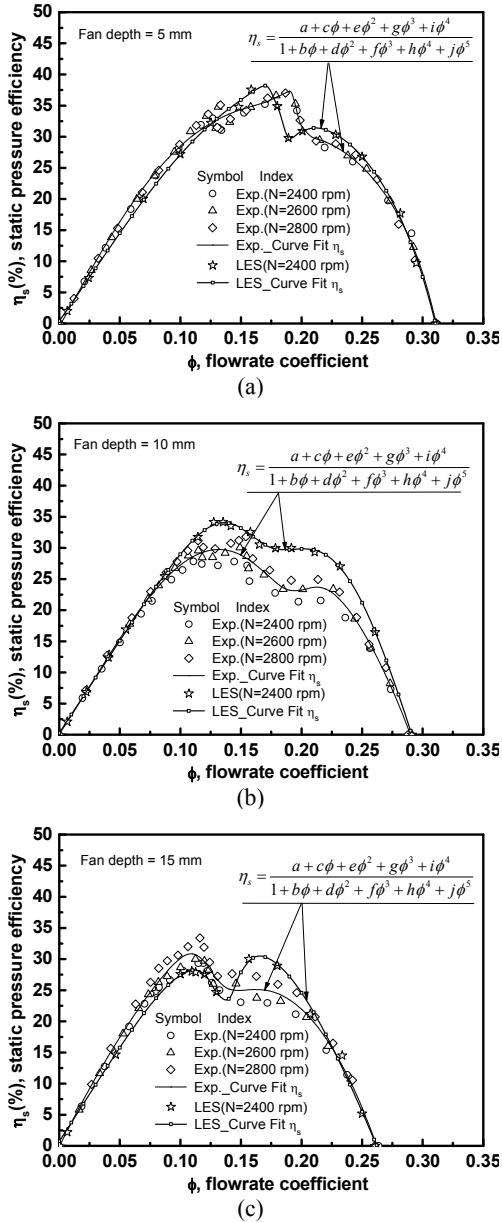


Fig. 5 Static pressure efficiency profiles obtained by experiment and LES analysis

게 받기 때문이다. 이와 같은 현상은 SSAF의 설치깊이 15 mm에서도 찾아볼 수 있는데, 여기서는 날개가 상대적으로 높은 정압을 받기 때문에 떨림 현상이 크게 작용하여 정압효율의 해석값들과 실험값들의 차이가 정압계수분포와 마찬가지로 유량계수 0.13 ≤ φ ≤ 0.2에서 다소 크게 나타나

Table 4 Coefficient values satisfied with the curve -fit of static pressure efficiency

Position array (Fan depth)	Coefficient values	
Type A (5 mm)	Exp.	a=-0.5367666 f=-360.38183
		b=-13.440209 g=20913.4
		c=361.88746 h=1138.7136
	LES	d=80.549889 i=-29702.216
		e=-4789.1038 j=-1471.697
		a=0.39756679 f=-335.67599
Type B (10 mm)	Exp.	b=-15.54626 g=17825.178
		c=293.41454 h=1268.3244
		d=111.21114 i=-26266.962
	LES	e=-3973.197 j=-1308.4729
		a=0.26949413 f=-47.422775
		b=-14.438214 g=20847.284
Type C (15 mm)	Exp.	c=292.74002 h=-406.73071
		d=67.088679 i=-33008.589
		e=-4280.351 j=-896.20815
	LES	a=-0.1180879 f=-92.251177
		b=-16.834396 g=45415.266
		c=394.23407 h=17.413623
Type C (15 mm)	Exp.	d=83.961582 i=-87415.722
		e=-7400.2429 j=0
		a=0.72874456 f=-439.20138
	LES	b=-19.111141 g=31872.713
		c=284.62903 h=694.08927
		d=133.72775 i=-59596.372
e=-5355.9268 j=0		

고 있다. 그러나 실제 SSAF의 설치깊이로 이용되는 설치깊이 10 mm의 경우 SSAF의 날개에 영향을 미치는 정압도 상대적으로 높고, 날개와 벨마우스의 간섭이 가장 크기 때문에, 날개의 떨림 현상이 크게 작용하여 넓은 유량계수 범위에서 해석값들과 실험값들의 편차가 가장 크게 나타나 있음을 알 수 있다. 따라서 날개의 강성을 지금보다도 조금 더 늘려 날개의 떨림 현상을 줄일 수 있다면, 정압효율은 더 증대될 것으로 사료된다. 이것은 실제 SSAF의 운전점으로 많이 사용되는 실속을 벗어난 우측의 유량계수 구간에서 LES로 해석한 정압효율이 최대 약 30% 값으로

비교적 일정하게 유지되기 때문이다. 참고로 유량 계수별 정압효율의 실험값들과 LES 해석값들에 대한 근사식들은 TableCurve2D¹¹⁾로 커브피팅한 결과, 식 (5)로 확보하였다. 각각의 팬 설치깊이 별 정압효율의 실험값들과 해석값들의 근사식들에 대한 각 계수들은 모두 Table 4에 나타내었다.

$$\eta_s = \frac{a + c\phi + e\phi^2 + g\phi^3 + i\phi^4}{1 + b\phi + d\phi^2 + f\phi^3 + h\phi^4 + j\phi^5} \quad (5)$$

4. 결 론

완전한 형태의 3차원 SSAF모형을 가지고 LES로 전산 해석한 결과는 다음과 같다.

(1) LES로 해석한 정압계수는 SSAF의 설치깊이에 관계없이 전 유량계수에 걸쳐 대체로 실험값들과 유사하거나 약간 더 큰 값을 나타내며, 실속을 나타내는 구간에서 다소 더 큰 편차를 보이고 있지만, LES는 매우 우수한 성능해석 도구임을 알 수 있다.

(2) 실제 SSAF의 운전점으로 많이 사용되는 실속을 벗어난 우측의 유량계수 구간에서 LES로 해석한 정압효율은 SSAF의 설치깊이에 관계없이 대체로 최대 약 30% 값을 나타내고 있다.

(3) 실속을 나타내는 유량계수 위치는 SSAF의 설치깊이가 커짐에 따라 감소해 나타난다.

(4) 기존보다 SSAF의 날개에 대한 강성을 더 높이고, 모든 날개를 균일하게 제작할 수 있다면 더 좋은 공력성능을 확보할 수 있다고 판단된다.

References

1. J. H. Zhou and C. X. Yang, 2008, "Design and Simulation of the CPU Fan and Heat Sinks", IEEE Trans. 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", J. 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", Proc. of 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", Int. J. 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. SC/Tetra(Version 8), 2010, User's Guide, Software Cradle Co, Ltd.
8. J. K. Kim and S. H. Oh, 2013, "Evaluation of the Turbulence Models on the Aerodynamic Performance of Three-Dimensional Small-Size Axial Fan", J. of the KSPSE, Vol. 18, No. 6, pp. 13-20.
9. 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", J. of the KSPSE, Vol. 17, No. 6, pp. 73-78.
10. W. Kim, N. K. Hur, and W. H. Jeon, 2010, "Numerical Analysis of Unsteady Flow Field and Aeroacoustic Noise of an Axial Flow Fan", J. of KSCFE, Vol. 15, No. 4, pp. 60-66.
11. SYSTAT Software Inc, 2002, TableCurve2D User's Manual, Ver.4 for Windows.