

3차원 소형축류팬의 공력특성에 대한 난류모델평가 Evaluation of the Turbulence Models on the Aerodynamic Performance of Three-Dimensional Small-Size Axial Fan

김장권*† · 오석형**

Jang-Kweon Kim*† and Seok-Hyung Oh**

(접수일 : 2014년 05월 25일, 수정일 : 2014년 11월 17일, 채택확정 : 2014년 11월 17일)

Abstract : The steady-state, incompressible and three-dimensional numerical analysis was carried out to evaluate turbulent models on the aerodynamic performance of a small-size axial fan(SSAF). The prediction performance on the static pressure of all turbulent models is going downhill at the high static pressure and low flowrate region, but has improved at the axial flow region. In consequence, all turbulent models predict the static pressure coefficient with an error performance less than about 4% after the region of the flowrate coefficient of about 0.14. Especially, the turbulent model of SST $k-\omega$ shows the best prediction performance equivalent to an error performance less than about 2% on the static pressure.

Key Words : Aerodynamic Performance, Flow Coefficient, Operating Point, Power Coefficient, Small-Size Axial Fan(SSAF), Sliding Mesh, Static Pressure Coefficient, Steady-State, Turbulence Model

1. 서 론

직경이 100 mm 내외인 소형축류팬(이하 SSAF라고 함)은 개인용 및 각종 컴퓨터의 중앙처리장치(CPU)의 냉각을 위해서, 그리고 현재 판매중인 대부분의 냉장고내에서도 널리 쓰이고 있다. 특히 냉장고에서 쓰이는 SSAF는 냉동실 및 냉장실의 냉기류를 적절하게 분배 또는 순환시키기 위해서 사용되며, 냉장고 뒷면 기계실 내에서도 압축기 및 응축기의 냉각을 위해서 사용되고 있다. 이와 같은 SSAF는 대부분이 날개 두께가 매우 얇은 플라스틱 사출물로 만들어져 있기 때문에, 소음과 진동 및 풍량 성능이 운전부하의 변동에 따라서 크게 영향을 받는다는 문제점이 있다. 그

러나 냉장고에서는 한정된 외곽크기 내에서 될 수 있는 한 수납공간을 많이 확보해야할 필요성이 있기 때문에, 가격이 저렴하고 공간 배치에 용이한 SSAF가 현재까지도 많이 사용되고 있다.

SSAF에 대한 연구는 저소음화와 효율향상을 목적으로 주로 실험에 의해 축류팬의 기하학적 치수와 시스템의 배열구조 등을 변경하여 팬의 공력특성과 주변 유동장의 속도분포를 연구한 경우¹⁻²⁾, 또 열선풍속계나 레이저유속계를 이용하여 날개 사이의 유동속도 벡터를 분석한 경우³⁻⁵⁾와 설계점(design point)에서 형성되는 팬 하류의 유동속도를 회전각도별로 측정 분석한 경우 등⁶⁻⁷⁾이 주를 이루고 있다. 반면에 전산유체역학(CFD)에 의한 SSAF의 연구는 컴퓨터의 발달과 더불어 커

*† 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.

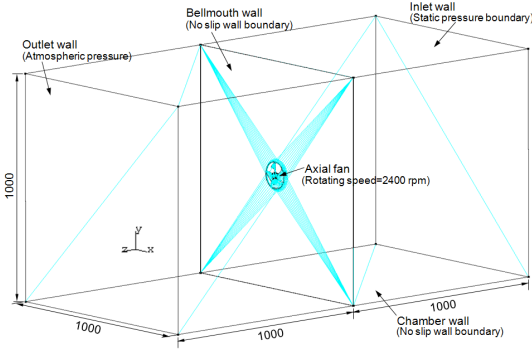


Fig. 1 Geometry configuration for the numerical analysis of SSAF

자를 실제 회전시키지 않고서도 팬의 회전효과를 계산에 반영할 수 있도록 정지영역과 회전영역 사이의 데이터를 보간(interpolation)하는 미끄럼격자(sliding mesh) 방식을 탑재한 상용소프트웨어를 중심으로 정상상태와 비정상상태의 3차원유동해석으로 이루어지고 있다.

Zhou 등⁸⁾과 Kim 등⁹⁾ 및 Hurault 등¹⁰⁾은 주기적(periodic) 조건을 이용하여 날개 한쪽만을 3차원 정상상태로 해석하였으며, 난류모델로 RNG $k-\epsilon$ 과 벽(wall) 근처영역에서 저레이놀즈수(low-Reynolds number)모델을 반영한 SST(shear stress transport)모델 및 레이놀즈응력(Reynolds stress)모델들을 각각 적용하여 각 난류모델들의 우수성을 입증한바가 있다. 또 Han 등¹¹⁾과 Ito 등¹²⁾ 및 Liu¹³⁾ 그리고 Kim 등¹⁴⁾은 완전한 형태의 3차원 축류팬의 모델을 가지고 비정상상태로 유동을 해석하였으며, 난류모델로는 MP $k-\epsilon$ ¹⁵⁾, Standard(STN) $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$ 및 LES 모델들을 각각 이용하였다.

본 연구에서는 실제 냉장고내에서 냉기순환용으로 사용 중인 기 발표된 SSAF의 공력성능¹⁶⁾을 바탕으로 여러 가지 운전점(operating point)들을 만족하는 실제 공력성능들에 대하여 완전한 형태의 3차원 SSAF의 모델을 가지고 비압축성 정상상태의 유동에서 CFD로 해석한 결과들과 비교하여 가장 우수한 난류모델과 그 문제점들을 찾고자 하였다.

한편, 본 연구의 CFD해석을 위해 사용한 난류 모델들은 STN $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, Realizable(RLZ) $k-\epsilon$, MP $k-\epsilon$ 및 SST $k-\omega$ 들이었다. 또 해석 도

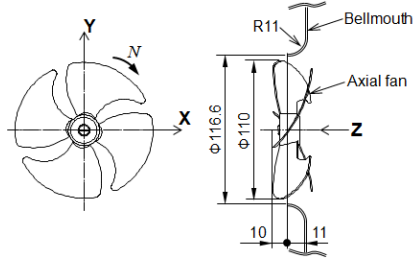


Fig. 2 Geometry configuration of SSAF

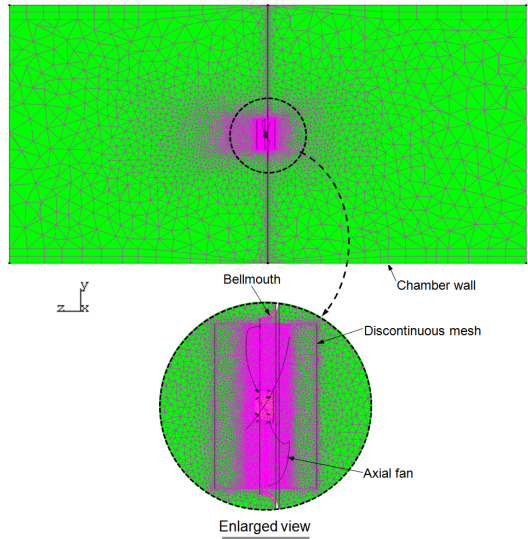


Fig. 3 Mesh configuration for the numerical analysis of SSAF

구로는 유한체적법에 기초하여 미끄럼격자방식을 탑재한 상용소프트웨어인 SC/Tetra(ver.8)¹⁵⁾를 이용하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 1은 SSAF를 해석하기 위해 사용한 챔버(chamber)의 기하학적 제원을 나타내고 있다. 여기서 SSAF의 상세제원은 Table 1과 같다. 벨마우스(bellmouth)를 기준으로 앞뒤에 붙인 챔버의 크기는 SSAF의 주 유동이 계산영역의 크기에 영향을 받지 않도록 SSAF의 직경대비 약 9배 이상으로 키워 $1000 \times 1000 \times 2000 \text{ m}^3$ 으로 적용하였다.

Fig. 2는 Fig. 1에 적용한 SSAF와 벨마우스의

Table 1 Specification of SSAF

Item	Specification
Hub diameter	25
Blade depth	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

설치조건을 나타내는 그림이다. Fig. 1의 해석모델은 먼저 상용 소프트웨어인 CATIA(V5R18)를 가지고 3차원형상으로 모델링하였으며, SC/Tetra의 전처리 소프트웨어를 이용하여 경계조건을 부여한 다음 모델파일을 만들었다. 이후 격자크기를 제어할 수 있는 "Octree"기능을 이용하여 Fig. 3과 같은 계산영역의 격자파일을 만들었다.

본 연구에서는 SSAF의 날개를 얼마나 세밀하게 나누어 격자를 만드느냐에 따라 공력성능의 정확성을 확보할 수 있다고 판단하여 격자 1개의 크기를 0.684 mm까지 미세하게 나타내도록 격자를 생성한 결과, 약 9,318,968개의 요소(element)를 만들었다. 이중에서도 계산의 정확성을 위해 축류현의 미끄럼격자에 해당하는 불연속격자(discontinuous mesh) 영역에는 8,430,931개의 요소들이 집중되도록 하였다. 또한 해의 수렴성을 높이기 위해 SSAF와 벨마우스 및 챔버 벽면에는 각각 프리즘층(prism layer)을 삽입하였으며, 프리즘 두께는 적용된 격자크기의 1/3이 되도록 적용하였다.

2.2 수치기법

본 연구에서 적용한 Fig. 1의 경계조건을 살펴보면, 벨마우스와 챔버의 벽 조건은 모두 점착(no-slip)조건으로 설정하였으며, 입구면은 압력에 의한 부하를 다양하게 부여할 수 있도록 정압조건으로, 그리고 출구면은 대기압조건으로 각각 설정하였다. 또 SSAF는 회전체 조건¹⁵⁾을 반영하

였으며, 회전수를 2400 rpm 으로 설정하였다.

또 지배방정식들의 대류(convection)항에 대한 이산화(discretization)에는 2차 풍상(upwind)기법을 적용하였으며, 이산화된 방정식들의 압력보정에는 모두 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다. 또 정상상태의 해석에서는 모든 변수들의 완화계수를 초기상태의 값들을 이용하였고, 해의 수렴조건은 모든 변수들의 잔류치가 1.0×10^{-7} 일 때로 설정하였으나, 수렴조건에 미치지 못하더라도 가장 작은 일정한 값으로 계속 나타날 경우에는 수렴한 것으로 간주하였다.

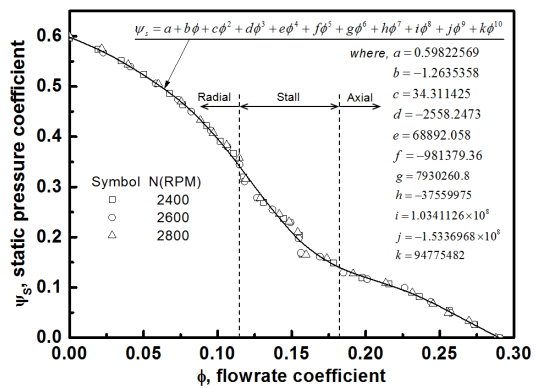


Fig. 4 Static pressure coefficient profiles versus flowrate coefficient

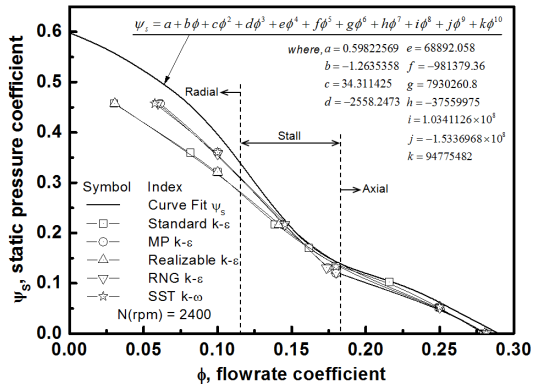


Fig. 5 Static pressure coefficient profiles obtained by CFD analysis

3. 계산결과 및 고찰

3.1 유량계수에 따른 정압특성

Fig. 4는 SSAF를 3가지 회전수별로 실험¹⁶⁾하여

Table 2 Prediction results analyzed by STN k-ε turbulence model

Characteristic values Flowrate coefficient(ϕ)	Static pressure coefficient(ψ_s)			Power coefficient(λ)			Static pressure efficiency(η_s)		
	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)
0.03	0.4596	0.559	16.96	0.1537	0.1784	13.51	8.94	9.2997	1.21
0.0816	0.3594	0.4537	15.77	0.1317	0.1553	12.92	22.27	23.7656	5.04
0.1	0.3209	0.3966	12.66	0.1235	0.1445	11.51	25.98	27.2189	4.17
0.1386	0.217	0.2483	5.24	0.0957	0.1205	13.58	31.43	29.5591	-6.3
0.1616	0.1704	0.1768	1.06	0.086	0.0943	4.53	32.02	27.2783	-15.97
0.18	0.1333	0.1411	1.31	0.0947	0.1087	7.64	25.33	24.1224	-4.07
0.2158	0.1027	0.1059	0.53	0.0898	0.0988	4.92	24.67	23.4717	-4.04
0.25	0.0521	0.062	1.66	0.0806	0.0934	6.99	16.15	16.7248	1.94
0.2795	0	0.0165	2.77	0.0717	0.0866	8.14	0	5.1114	17.21

Table 3 Prediction results analyzed by MP k-ε turbulence model

Characteristic values Flowrate coefficient(ϕ)	Static pressure coefficient(ψ_s)			Power coefficient(λ)			Static pressure efficiency(η_s)		
	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)
0.0622	0.4576	0.5012	7.29	0.1453	0.1661	11.4	19.3	18.6526	-2.18
0.1	0.3607	0.3966	6.01	0.1256	0.1445	10.36	28.72	27.2189	-5.06
0.1438	0.217	0.2298	2.15	0.0929	0.1168	13.07	33.58	29.2887	-14.45
0.1743	0.1308	0.1501	3.22	0.0941	0.1093	8.31	24.24	25.0719	2.8
0.18	0.1198	0.1411	3.57	0.0919	0.1087	9.18	23.48	24.1224	2.16
0.25	0.051	0.062	1.85	0.0806	0.0934	6.99	15.82	16.7248	3.05
0.2813	0	0.0138	2.3	0.0711	0.086	8.16	0	4.2404	14.28

Table 4 Prediction results analyzed by RLZ k-ε turbulence model

Characteristic values Flowrate coefficient(ϕ)	Static pressure coefficient(ψ_s)			Power coefficient(λ)			Static pressure efficiency(η_s)		
	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)
0.0306	0.4576	0.5582	16.81	0.1503	0.1782	15.29	9.31	9.465	0.52
0.1	0.3213	0.3966	12.59	0.1193	0.1445	13.81	26.92	27.2189	1.01
0.1416	0.217	0.2376	3.44	0.0939	0.1184	13.42	32.74	29.4214	-11.18
0.18	0.1256	0.1411	2.6	0.0911	0.1087	9.61	24.8	24.1224	-2.28
0.25	0.053	0.062	1.51	0.0793	0.0934	7.7	16.71	16.7248	0.05
0.2804	0	0.0152	2.55	0.0708	0.0863	8.49	0	4.6994	15.83

얻은 유량계수대 정압계수들을 2차원 커브피팅 (curve-fitting) 프로그램인 TableCurve2D¹⁷⁾에 의해 구해진 근사식¹⁶⁾과 비교한 그림이다. 여기서 유량 계수대 정압계수들은 회전수에 관계없이 상사성 (similarity)이 잘 유지됨을 알 수 있다. 이 근사함 수식의 우수성(goodness, r^2)은 약 0.9983이다. 여기서 r^2 은 커브피팅 통계치의 분산분석¹⁷⁾에서 우수성을 나타내며, 식 (1)로 정의된다.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

여기서 w_i 는 i 번째의 가중치(weight)이고, y_i 는 i 번째의 데이터 y 의 값, \hat{y}_i 는 i 번째 예측된 y 의 값이며, \bar{y} 는 y 값의 평균이다. 그리고 식 (1)에서 $r^2 = 1$ 은 오차가 전혀 없는 완벽함을 의미한다. 한편, Fig. 5는 난류모델들의 성능예측 정확성

Table 5 Prediction results analyzed by RNG k-ε turbulence model

Characteristic values Flowrate coefficient(φ)	Static pressure coefficient(ψ _s)			Power coefficient(λ)			Static pressure efficiency(η _s)		
	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)
0.0597	0.4576	0.5045	7.83	0.1457	0.1669	11.61	18.74	18.2096	-1.79
0.1	0.3568	0.3966	6.66	0.1246	0.1445	10.91	28.64	27.2189	-4.79
0.1454	0.217	0.2244	1.24	0.0926	0.1155	12.55	34.05	29.1763	-16.41
0.1735	0.1308	0.1515	3.46	0.0934	0.1091	8.57	24.29	25.2175	3.12
0.18	0.1214	0.1411	3.3	0.0914	0.1087	9.45	23.9	24.1224	0.75
0.25	0.0515	0.062	1.76	0.0806	0.0934	6.99	15.95	16.7248	2.61
0.2814	0	0.0136	2.28	0.0711	0.086	8.15	0	4.1881	14.1

Table 6 Prediction results analyzed by SST k-ω turbulence model

Characteristic values Flowrate coefficient(φ)	Static pressure coefficient(ψ _s)			Power coefficient(λ)			Static pressure efficiency(η _s)		
	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)	Analysis	Exp. Curve fit	Error (%)
0.0577	0.4576	0.5084	8.5	0.1477	0.1678	11.03	17.87	17.6453	-0.76
0.1	0.3609	0.3966	5.97	0.1261	0.1445	10.09	28.61	27.2189	-4.69
0.1454	0.217	0.2243	1.23	0.0919	0.1155	12.93	34.32	29.1748	-17.33
0.18	0.1331	0.1411	1.35	0.0952	0.1087	7.37	25.15	24.1224	-3.46
0.25	0.0532	0.062	1.48	0.0803	0.0934	7.15	16.56	16.7248	0.56
0.2815	0	0.0136	2.27	0.0716	0.086	7.87	0	4.1738	14.06

을 평가하고자 SSAF를 5가지 난류모델들로 수치 해석하여 얻어진 유량계수에 대한 정압계수를 Fig. 4에서 얻어진 근사식과 각각 비교한 그림이다. 이때, 무차원으로 나타난 유량계수(φ)와 정압계수(ψ_s)는 각각 식 (2)와 식 (3)으로 정의된다.

$$\phi = \frac{4Q}{\pi^2(D_2^2 - D_h^2)D_2N} \quad (2)$$

$$\psi_s = \frac{7200gp_s}{\pi^2\gamma D_2^2 N^2} \quad (3)$$

여기서 Q는 풍량[m³/min], D₂는 팬 외경[m], D_h는 허브(hub) 직경[m], N는 회전수[rpm], g는 중력가속도[m/s²], p_s는 정압[mmH₂O], π는 원주율, γ는 공기비중량[kg/m³]이다.

Fig. 5로부터 각 난류모델별로 전 유량계수에 걸쳐 해석한 정압계수의 성능예측은 모두 실험값에 미치지 못함을 알 수 있다. 그 중에서도 유량계수 φ ≃ 0.1이내에서는 정압이 높게 걸리므로 벨마우스를 통과한 SSAF의 유동이 축방향으로

나가지 못하고 벨마우스 벽을 따라 반경방향으로 확산 발달되는 유동특성^{3,4)}을 보이는 영역으로 특히 난류모델 STN k-ε 과 STN k-ε 에서 확산(diffusion)항의 와점성(eddy viscosity)모델상수를 수정한 RLZ k-ε 의 예측능이 가장 미흡한 약 12%이상의 큰 오차를 보이고 있다. 이것은 φ ≃ 0.1이내에서 벨마우스 벽을 따라 형성되는 반경류(radial flow)에 의해 유선곡률의 변화가 커지고, 난류의 등방성(isotropy)을 크게 벗어나는 결과로 예상되나, 이를 STN k-ε 과 RLZ k-ε 들만이 다른 난류모델들에 비해 제대로 반영하지 못한 결과로 사료된다. 본 연구에서 사용한 모든 오차들은 식 (4)로 정의하였다.

$$Error(\%) = \frac{(Curve\ fit) - (Analysis)}{Maximum\ of\ curve\ fit} \times 100 \quad (4)$$

한편, 유량계수 φ ≃ 0.14이후부터는 SSAF의 유동이 축방향 쪽으로 더 발달하므로 벨마우스 벽에 의한 영향이 줄어들어 유선곡률의 영향이 작아지고 난류의 등방성이 지배되는 확률이 높아져

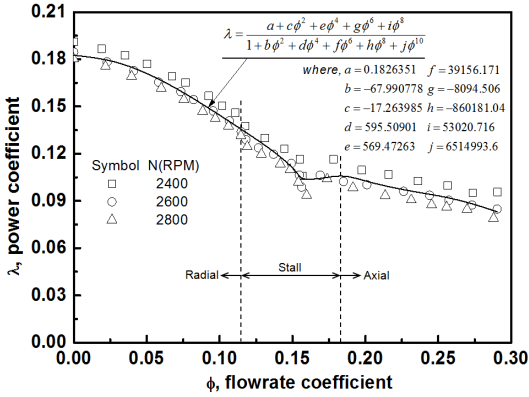


Fig. 6 Power coefficient profiles versus flowrate coefficient

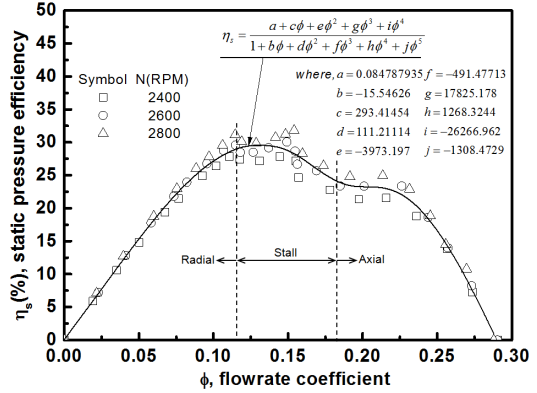


Fig. 8 Static pressure coefficient profiles versus flowrate coefficient

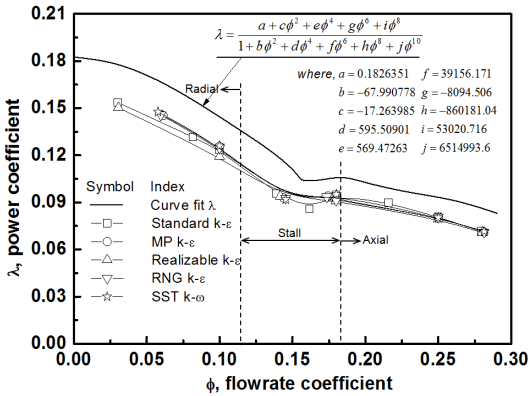


Fig. 7 Power coefficient profiles obtained by CFD analysis

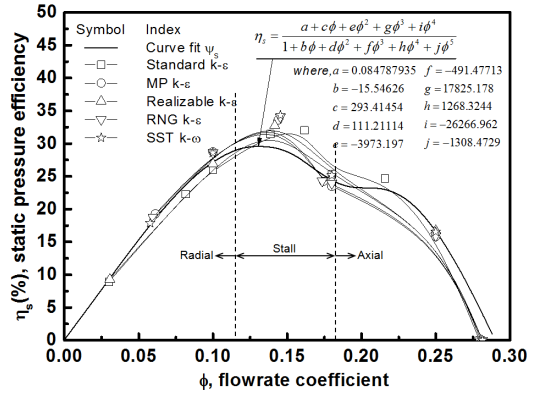


Fig. 9 Static pressure coefficient profiles obtained by CFD analysis

모든 난류모델들이 정압계수를 약 4% 미만으로 매우 양호하게 예측하며, 그 중에서도 SST k- ω 가 약 2% 내외로 가장 우수한 예측능력을 보여준다⁹⁾. 이것은 SST k- ω 가 벽 근처인 경계층 내부 유동에서는 k- ω 가 그리고 경계층 외부에서는 STN k- ϵ 으로 조합해서 해석하기 때문이다. 결과적으로 STN k- ϵ 도 상대적으로 확산성이 커 최대유량을 과소 예측하는 것을 제외하고는 역시 우수한 성능예측을 보여주고 있다. 그밖에 유선 곡률효과를 반영하기 위해 STN k- ϵ 방정식의 생성(production)항들을 수정한 MP k- ϵ , 또 ϵ 방정식에서 생성항의 모델상수를 수정한 RNG k- ϵ , 또 RLZ k- ϵ 도 비교적 우수한 성능을 보이고 있다. 참고로 각 난류모델들에 의해 해석한 성능예측 결과들은 각각 Table 2~6에 나타내었다.

3.2 유량계수에 따른 동력특성

Fig. 6은 SSAF를 3가지 회전수별로 풍량에 따라 측정된 토크(torque)를 동력계수로 무차원화하여 이를 만족하는 근사식과 함께 비교한 그림이다. 본 연구에서 사용한 동력계수(λ)는 식 (5)로 정의된다.

$$\lambda = \frac{57600T}{\pi^3 \gamma D_2^3 N^2 (D_2^2 - D_h^2)} \quad (5)$$

여기서 T 는 토크[N·m]이다.

Fig. 6에서 보여준 전 유량계수에 걸쳐 동력계수 분포가 회전수별로 중첩되지 않고 편차가 크게 나타나 있다. 이 현상은 SSAF가 벨마우스 쪽으로 돌출될수록 정압이 상승하므로, 두께가 얇은

SSAF의 날개가 부하를 극복하지 못하고 진동하게 됨에 따라 SSAF의 축과 직접 연결된 토크센서가 민감하게 반응하여 나타난 결과이다. 특히 회전수가 낮을 때 날개의 떨림이 더 커 동력계수가 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 기 발표한 문헌¹⁶⁾에서도 쉽게 확인할 수가 있다. 따라서 본 연구에 사용된 SSAF는 저유량, 고정압영역에서 발생하는 날개의 떨림현상을 줄이기 위해서는 현재의 날개두께를 좀 더 키울 필요성이 있다고 본다. 한편, 오차비교를 위해 유량계수에 따른 동력계수들을 커브피팅¹⁷⁾으로 구한 결과 식 (1)에 의한 우수성은 자료의 산포가 커 다소 미흡한 0.9722로 나타났다.

Fig. 7은 난류모델들의 오차에 대한 예측성능을 확인하기 위해 각 난류모델들에 의해 해석한 토크를 식 (5)에 의해 동력계수로 계산하여 Fig. 6에서 구한 근사식과 함께 비교한 것이다. 여기서 CFD 해석에 의한 토크는 압력모멘트와 응력모멘트를 합쳐 구한 것이다. 한편, 식 (4)에 의한 각 난류모델들의 동력계수에 대한 예측성능은 Table 2~6으로부터 모두 근사식과 큰 오차를 보이며, 특히 실속(stall)을 포함한 반경류가 존재할 수록 약 10%이상 크게 나타나 있다. 반면에 정상적인 축류유동을 보이는 유량계수범위에서는 모든 난류모델들이 날개의 떨림 현상에도 불구하고 약 10% 이하의 오차로 나타나며, 그나마 STN k-ε 과 SST k-ω가 약간 더 우수한 모습을 보인다.

3.3 유량계수에 따른 정압효율특성

Fig. 8은 SSAF를 3가지 회전수별로 구한 유량계수에 따른 정압효율(η_s)을 근사식과 함께 나타낸 그림이다. 이때 정압효율은 식 (6)으로 정의된다.

$$\eta_s = \frac{gP_s Q}{2\pi NT} \times 100 \quad (6)$$

Fig. 8에서 전 유량계수에 걸쳐 정압효율분포가 회전수별로 중첩되지 않고 편차가 크게 나타

난 이유는 Fig. 7에서 구한 동력계수의 영향이 그대로 반영되기 때문이다. 따라서 유량계수에 따른 정압효율들을 커브피팅¹⁷⁾으로 구한 결과 식 (1)에 의한 우수성은 자료의 산포가 커 다소 미흡한 0.9843으로 나타났다.

Fig. 9는 난류모델들의 오차에 대한 예측성능을 확인하기 위해 각 난류모델들에 의해 구한 정압효율을 근사식과 비교한 그림이다. 식 (4)에 의한 각 난류모델들의 정압효율에 대한 예측성능은 Table 2~6으로부터 유량계수 약 $\phi \approx 0.15$ 를 전후해서 모든 난류모델들이 약 10% 이상의 큰 오차를 보이며, 특히 최대유량에서도 약 10% 이상의 큰 오차를 보이고 있다. 이것은 정상상태에서 해석한 모든 난류모델들이 최대풍량을 과소예측하기 때문으로 판단된다. 반면에 Table 2~6으로부터 모든 난류모델들로 정압효율을 해석한 2개의 유량계수 위치들을 빼고는 약 5% 이하의 예측오차를 보여주고 있다.

4. 결 론

3차원 비압축성, 정상상태에서 5가지 난류모델들로 SSAF를 2400 rpm으로 CFD 해석한 결과 얻어진 공력특성들은 다음과 같다.

(1) 반경류를 보이는 저유량, 고정압영역에서 모든 난류모델들의 정압계수 예측성능은 더 악화되나, 그 중에서도 STN k-ε 과 RLZ k-ε 들이 약 12%이상의 오차를 보여 가장 낮은 예측능력을 보여준다.

(2) 유량계수 $\phi \approx 0.14$ 이후부터는 모든 난류모델들이 약 4%미만의 정압계수 오차를 예측하며, 특히 SST k-ω가 가장 우수한 약 2%내외의 오차를 보여준다.

(3) SSAF 날개의 떨림으로 인해 각 난류모델들의 동력계수 및 정압효율에 대한 예측성능을 정확히 판단하기는 어렵지만, 수정모델인 MP k-ε, RNG k-ε 및 SST k-ω가 약간 더 우수한 모습을 보인다.

(4) SSAF의 최대유량에 대한 성능예측은 STN k-ε 이 가장 오차가 크다.

References

1. S. Akaike and K. Kikuyama, 1991, "Noise Reduction of Condenser Cooling Fans for Automotive Air Conditioners", *Trans. of the JSME (Part B)*, Vol. 57, No. 541, pp. 239-244.
2. S. Kamaya and S. Kanabayashi, 1990, "Improvement of the Characteristics of the Low-Flow -Rate Region for Axial Flow Fans", *Trans. of the JSME (Part B)*, Vol. 56, No. 532, pp. 3769-3773.
3. J. K. Kim, 2008, "Investigation on the Turbulent Flow-Field of a Small-Size Axial Fan with Different Operating Points", *J. of the KSPSE*, Vol. 12, No. 5, pp. 40-47.
4. 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", *Proc. of the 6th Int. Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Vol. 2, pp. 199-208.
5. H. S. Rew, S. H. Kim, Y. G. Jung, C. J. Kim and J. E. Cha, 1996, "LDA Measurement and Calculation in a Small Axial Fan", *Proc. of the 6th Int. Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Vol. 2, pp. 209-218.
6. T. Hoshino and A. Oshima, 1986, "Measurement of Flow Field Around Propeller by Using a 3- Component Laser Doppler Velocimeter (LDV)", *Technical Review, Mitsubishi Heavy Industries*, Vol. 23, No. 3, pp. 343-350.
7. J. Vad and F. Bencze, 1998, "Three-Dimensional Flow in Axial Flow Fans of Non-Free Vortex Design", *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 19, pp. 601-607.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. SC/Tetra (Version 8), 2010, *User's Guide*, Software Cradle Co., Ltd.
16. 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.
17. SYSTAT Software Inc., 2002, *TableCurve2D User's Manual*, Ver.4 for Windows.