◎ 논 문

DOI: http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2012.15.5.037
ISSN (Print): 1226-9883

FanDAS-CFX 결합을 통한 고효율-저소음 축류 송풍기의 개발

이찬*†· 길현권* · 조계현**

Development of a High-efficiency and Low-noise Axial Flow Fan through Combining FanDAS and CFX codes

Chan Lee*†, Hyun Gwon Kil*, Myung-Keun Noh**

Key Words : Axial flow fan(축류 송풍기), Blade design(블레이드 설계), Performance analysis(성능 해석), Noise prediction(소음 예측), CFD analysis(전산유체역학 해석), Performance test(성능 시험)

ABSTRACT

High-efficiency and low-noise axial flow fan is developed by combining the FanDAS, a computerized axial fan design/performance analysis system, and CFD software(CFX). Based on fan design requirements, FanDAS conducts 3-D blade geometry design, quasi-3D flow/ performance analyses and noise evaluation by using through-flow analysis method and noise models for discrete frequency and broadband noise sources. Through the parametric studies of fan design variables using FandDAS, preliminary and baseline design is achieved for high efficiency and low noise fan, and then can be coupled with a CFD technique such as the CFX code for constructing final and optimized fan design. The FanDAS-CFX coupled system and its design procedure are applied to actual fan development practice. The FanDAS provides an optimized 3-D fan blade geometry, and its predictions on the performance and the noise level of designed fan are well agreed with actual test results.

1. 서 론

축류형 송풍기는 산업, 환기 및 공조 분야에서 폭 넓게 사용되며, 최근의 에너지 절약 및 친환경 제품을 요구하는 산업적 추세에 발맞추어, 고효율 및 저소음에 대한 요구가 점차 강화되고 있는 실정이다. 축류형 송풍기의 효율이나 소음은 송풍기 내부 유동장 및 성능과 매우 밀접하게 연관되어 있으므로, 고효율-저소음 송풍기의 개발을 위해서는 설계 단계에서부터 설계 변수가 효율 및 소음에 미치는 영향을 고려하여 송풍기의 형상 설계가 이루어 져야 하며, 더 나아가 성능-효율-소음 간의 상호작용을 정확히 분석하여 효율 개선과 소음 저감을 동시에 달성할 수 있는 절충설계(trade-off design)가 이루어질 필요가 있다.

축류형 송풍기의 개발절차는, Fig.1 에서 볼 수 있듯이, 기본 형상 설계, 성능 예측, 유동/소음 해석 및 성능시험의 과정들의 순차적인 적용이 요구되며, 더 나아가 송풍기의 효율 향상 및 소음 저감을 위해서는 이러한 과정들의 피드백(feed back)을 통한 반복적인 수행이 필요하다. 그러나 이러한 반복적인 개발 과정은 많은 시간, 비용 및 숙련된 기술자의 전문성을 요구하므로, 단기간에 송풍기들을 개발해야 하는 업체들에게는 큰 부담으로 작용하고 있다. 이러한 이유로, 고효율-저소음 송풍기 개발을 위한 좀 더 빠르고 신뢰성 있는 개발과정 및 방법의 제시가 현재 송풍기 산업체들의 주요한 과제로 대두되고 있으며, 이에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다[1,2,3].

그러므로 본 연구는 송풍기 설계 및 성능-소음 해석을 위한 FanDAS 소프트웨어와 설계된 송풍기 3차원 유동해석을 위한 CFX 코드를 결합하여, 비교적 단순하면서도 효율적인 송풍기 개발 계체 및 절차를 제안하였다. 또한 본 연구에서 제안된 개발체계를 신규 고효율-저소음 송풍기 개발 실제에 적용하여, 본 개발 체계 및 방법의 신뢰성을 검증하였다.

* 수원대학교 기계공학과
** 엘오티베큠 기술연구소
† 교신저자, E-mail : clee@suwon.ac.kr

2011 유체기계 연구개발 발표회 발표 논문, 2011년 11월 30일-12월 2일, 경주
유체기계저널:제15권, 제5호, pp. 37~41, 2012(논문접수일자: 2011.10.31, 심사완료일자: 2012.05.07)

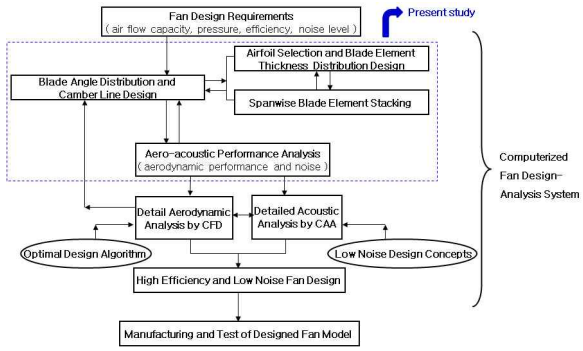


Fig. 1 General fan development procedure

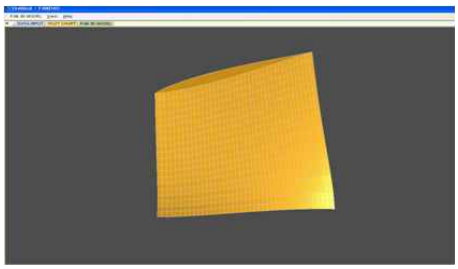
2. 송풍기의 설계 및 성능-소음 해석

본 연구에서 송풍기 설계 및 설계된 송풍기의 성능-소음 해석은 FanDAS 소프트웨어에 의해 이루어지며, 설계 및 그에 따른 해석에 관련된 이론 및 과정에 대한 내용은 아래와 같이 요약될 수 있고, FanDAS 에 대한 상세한 내용은 참고문헌[1]에 기술되어 있다.

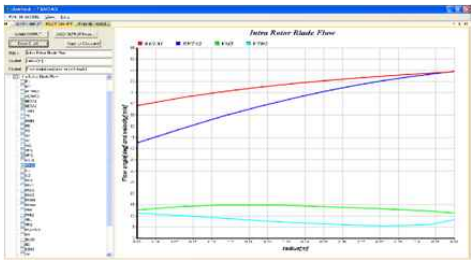
2.1 FanDAS 를 이용한 설계

송풍기 설계요구사양이 주어지면, Fig.2(a) 에서 보여지듯이, FanDAS 소프트웨어의 GUI 상에서 해당 설계요구사양 및 설계변수들의 값을 입력하고, 이를 바탕으로 송풍기 3차원 형상설계가 날개길이 방향 블레이드 각도 분포 결정, 캠버선 설계, 블레이드 단면의 익형 선정 및 두께 분포를 통해 이루어진다. 송풍기 블레이드 설계의 유연성을 위해, 익형 선정 시 FanDAS 소프트웨어에 내장되어 있는 NACA, DCA, C_4 익형 데이터베이스를 선택적으로 사용할 수 있고, 설계된 3차원 블레이드 형상 설계 결과(Fig.2(b) 참조)는 STEP 파일 형태로 저장되어 상세설계 및 해석을 위해 CAD 또는 CFD 코드로 넘겨진다.

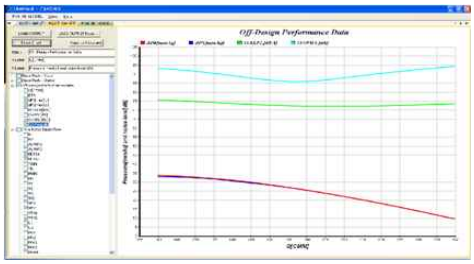
(a) Input data window



(b) 3-D blade geometry design



(c) Spanwise velocity and angle distributions



(d) Aeroacoustic performance map

Fig. 2 GUI windows of FanDAS

2.2 FanDAS 를 이용한 성능 및 소음 예측

설계된 송풍기 형상을 바탕으로, FanDAS 는 자동적으로 송풍기의 성능 및 소음 특성을 계산한다. 송풍기의 성능 예측을 위해서는, 송풍기 내부 유동장을 관통류 해석방법(through-flow analysis method)을 이용하여 준3차원(quasi 3-D) 유동 계산을 수행하고, 이때 송풍기 내부에서의 유동각 및 압력분포는 다양한 유동편차각 및 압력손실 모델들을 이용하여 계산한다. 참고로 FanDAS에서 사용하는 모델들은 세부적인 송풍기 설계 인자 및 변수들의 영향을 고려하도록 구성되어 있다. 관통류해석을 통해 구한 송풍기 내부 유동 및 압력 분포의 질량평균(mass averaging)을 통해 각 유량조건에서의 송풍기 선능을 구한다. FanDAS 를 이용한 설계된 송풍기의 유동 분포 예측결과가 Fig.2(c) 에 도시되어 있다.

FanDAS 를 이용하여 송풍기 내부의 유동 분포 및 성능특성이 구해지면, 이러한 예측결과들을 송풍기 소음 예측이 이루어진다. 이때 소음예측은 특정한 주파수에 배음형태로 발생하는 깃통과주파수소음(blade passing frequency noise)과 넓은 주

파수 영역에 분포되어 발생하는 광대역소음(broadband nosie) 성분들을 각각 계산한 후, 두 소음성분들을 주파수 대역별로 중첩하여 총소음도(OASPL: overall noise level)를 구한다. FanDAS 이용하여 계산된 총소음도 예측결과가 성능예측결과와 병행하여 Fig.2(d)에 도시되어 있다.

2.3 FanDAS 를 이용한 설계 최적화

다음과 같은 설계목표를 가지는 고효율-저소음 송풍기 개발과정에 FanDAS 를 이용하여 설계최적화를 수행하였다.

- 정압: 30 mmAq
- 유량: 200 m^3/min
- 총 소음도: 84 dBA 이하(@ 1m)
- 효율: 70% 이상

이때 송풍기 설계를 위한 기타 설계사양들은 Table 1 에 표시되어 있다.

FanDAS 는 기본적으로 Table 1에 표시된 모든 설계변수들을 변화시켜 가며 설계 및 해석이 가능하지만, 본 연구에서는, Table 1에서 알 수 있듯이, 송풍기 설계최적화를 위해 동익의 시위길이 및 개수 만을 자유설계변수로 취급하였고 나머지 설계변수들은 고정된 값으로 다루었다.

앞서 언급한 두 가지 자유설계변수들의 최적화를 위해 FanDAS 를 이용한 설계 매개변수연구(parametric study)를 수행하였다. Fig. 3 은 송풍기 설계정압에 대한 매개변수 해석결과를 보여주고 있다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 동익의 시위길이와 개수를 증가시킬수록 정압이 상승하고 있으며, 설계 정압을 30 mmAq 이상으로 유지하기 위해서는 동익의 개수가 최소한 11개 이상이어야 함을 알 수 있다.

Fig. 4 는 설계점에서의 송풍기 총 소음도에 대한 매개변수 해석결과를 보여주고 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 동익 시위길이 및 개수의 증가는 소음을 대폭적으로 감소시켜 줌을 알 수 있다. 앞서 Fig. 3의 결과와 Fig. 4의 결과를 병합하여 고려하는 경우, 설계정압과 소음요구조건을 만족시키기 위해서는 동익의 개수는 11개 이상, 시위길이는 10 cm 이상이어야 한다.

Table 1 Fan design specifications

RPM	1170	Stator chord	0.1 m
Tip diameter	0.63 m	No. of stators	11
Hub/tip ratio	0.44	Angle distrib.	Free vortex
Rotor chord	0.09-0.11 m	Camber design	Circular arc
No. of rotors	8-12	Rotor airfoil	NACA65-010
Tip clearance	0.0025 m	Stator airfoil	Cambered plate

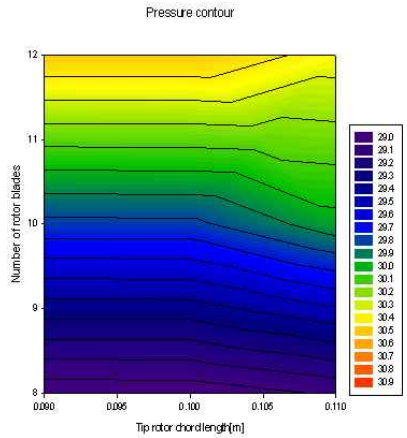


Fig. 3 Parametric analysis on design pressure

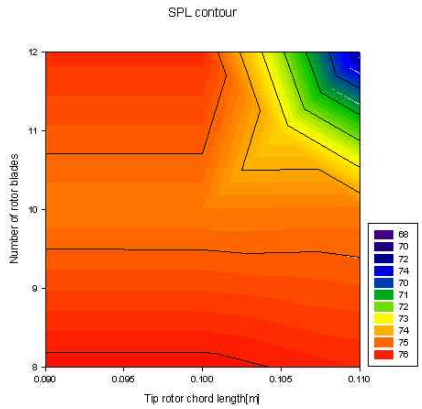


Fig. 4 Parametric analysis on OASPL

마지막으로 Fig. 5 를 통해 설계변수들이 송풍기 설계효율에 미치는 영향을 검토하였다. Fig. 5에서 보여지듯이, 효율은 동익이 10 cm 이고 개수가 12개 인 경우 최대 78% 가 됨을 알 수 있다. 그러므로, Figs. 3, 4 및 5 의 결과들을 종합하면, 송풍기의 정압과 유량을 만족시키며 동시에 고효율, 저소음 특성을 달성하기 위해서는 동익의 시위길이와 개수가 각각 10 cm, 12 인 경우가 최적의 설계조건으로 판단될 수 있다.

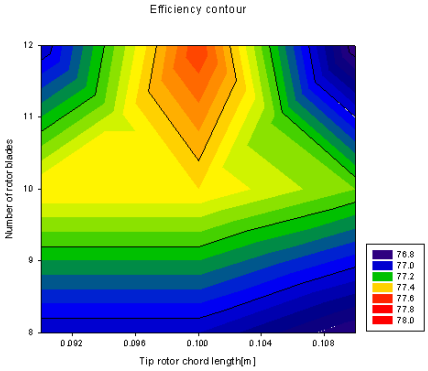


Fig. 5 Parametric analysis on efficiency

3. CFD 유동해석을 통한 설계 검증

앞서 최적 설계된 송풍기 형상에 대해서 설계점 조건에서 송풍기 내부 3차원 유동장을 CFX 코드[4]를 이용하여 계산하고, 그 계산결과를 FanDAS 의 관통류해석결과와 비교하여 FanDAS 를 이용한 설계방법을 검증하였다.

3.1 CFD 해석을 위한 격자계 및 수치 모델

Fig. 6 는 본 연구에서 사용한 3차원 격자계를 보여주고 있다. 격자계 형성을 위해 블레이드 간 내부 유동장에는 H-격자를 사용하였고, 블레이드 표면에는 O-격자를 사용하였으며 벽 근처의 격자들에는 해석의 정확성을 위해 y+ 방법을 적용하였다. 그리고 격자 의존성 시험을 수행하여, 계산결과에 영향을 미치지 않는 범위내에서 약 40만개의 격자를 사용하였다.

설계된 송풍기 내부 유동 해석을 위해서, 본 연구는 블레이드로 유입되는 공기의 상대적 유동을 고려한 frozen-rotor scheme 을 사용하였고, RANS solver(Reynolds-stress averaged Navier-Stokes equation solver)를 사용하였다. 또한 RANS solver 의 난류모델로는 SST(shear stress transport) 모델을 적용하였다.

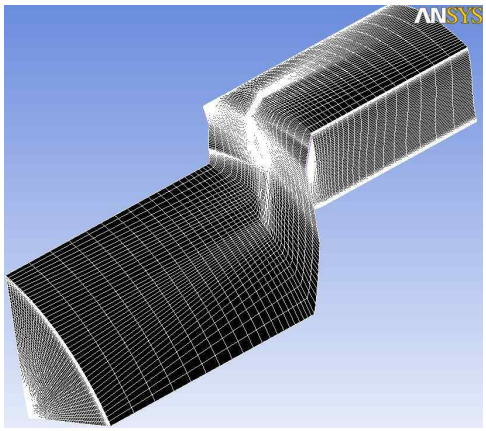


Fig. 6 Grid system for the CFX analysis on fan

3.2 CFD 해석결과 및 FanDAS 설계 검증

Fig. 7 은 CFX 코드를 이용하여 계산된 블레이드 단면을 통과하는 공기의 속도분포에 대한 예측결과들을 FanDAS 설계를 통해 예측된 결과들과 비교하고 있다. CFX 를 이용해 예측된 송풍기 입구 및 출구에서의 속도 및 유동각 분포가 FanDAS 를 통한 설계해석결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 블레이드 팁 근처(90% span)에서 CFX 와 FanDAS 해석의 비교결과가 20, 60% span 에서의 비교결과에 비해 다소 차이를 보이는 것으로 판단되며, 이러한 차이는 FanDAS 의 설계해석방법이 블레이드 팁근처에서 발생하는 복잡한 3차원 와류현상을 예측하지 못하기 때문 인것으로 보인다. 그러나 이러한 국소적인 해석결과의 차이에도 불구하고, FanDAS 를 이용한 설계방법은 송풍기의 전체 성능 및 효율을 예측함에 있어서 더 나아가 송풍기 설계최적화를 함에 있어서 비교적 높은 신뢰성을 가지고 사용될 수 있음을 알 수 있다.

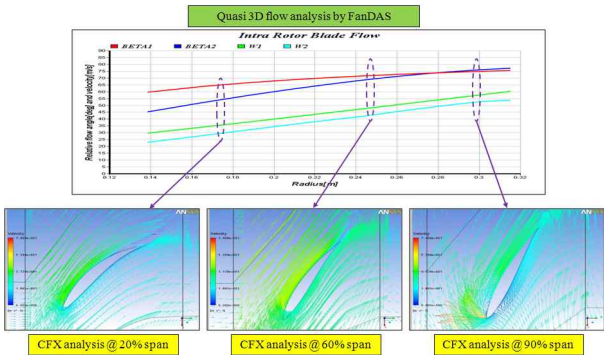


Fig. 7 Comparison between FanDAS and CFX

4. 송풍기 제작 및 시험을 통한 설계 검증

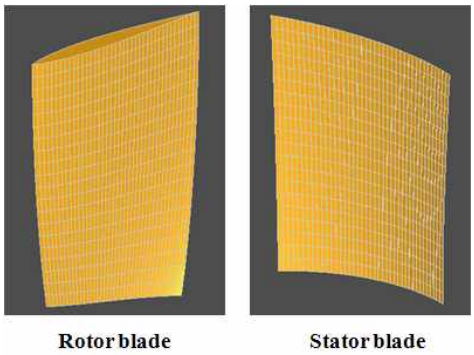


Fig. 8 3-D blade geometry of optimized fan

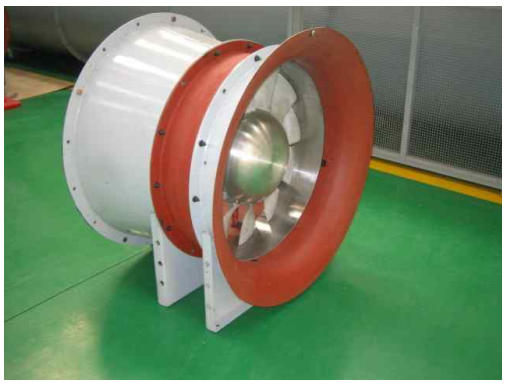


Fig. 9 Manufactured model of optimized fan

Table 2 Performance and noise test results

Model	Method	Flow [m³/min]	Pressure [mmAq]	Effici. [%]	PWL [dB]	SPL [dBA]
Optimal model	FANDAS	200	32.4	78.2	91.3	78.09
	Test	200	36.0	75.0	90.0	79.00
Market product	Test	210	34.5	65.0	101.0	90.00

앞서 최적 설계된 송풍기 형상에 대해서 실제 시작품을 제작하고, AMCA 및 ISO 규격에 준한 한국기계전기전자시험연구원(KTC)의 챔버형 시험설비를 사용하여 송풍기 시작품의 성능 및 소음을 측정하였다. Fig. 8 은 송풍기 시작품 제작을 위해 FanDAS 를 이용하여 설계된 동익 및 정익의 3차원 형상을 보여주고 있으며, Fig. 9 는 조립된 송풍기 시작품의 모습을 보여주고 있다.

설계점에서의 송풍기 시험결과들이 FanDAS 예측결과들과 Table 2 에 비교되어 있다. Table 2 에서 볼 수 있듯이, 송풍기 정압, 효율 및 총소음도 예측결과들이 시험결과들과 최대 10% 오차 범위 내에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 참고로 시중 제품과의 비교를 통해, FanDAS 를 이용해 최적화된 송풍기 설계가 효율은 10% 향상시키고, 소음은 11 dB 저감시키고 있음을 볼 수 있다. 이러한 비교결과들로부터, FanDAS 를 이용한 설계 방법과 FanDAS-CFX 개발체계가 고효율, 저소음 송풍기 개발에 매우 유용하고 신뢰성있게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

더 나아가 탈설계점 조건에서의 FanDAS 를 통한 송풍기 성능 및 소음예측 결과와 시험결과가 Fig. 10 에 비교되어 있다. Fig. 10 의 비교에서 보여 지듯이, FanDAS 를 이용한 예측결과가 대부분의 유량 범위 내에서 시험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 FanDAS 를 이용한 설계방법이 송풍기의 유량변화에 따른 성능특성 예측에도 높은 신뢰성을 가지고 사용될 수 있음을 의미한다.

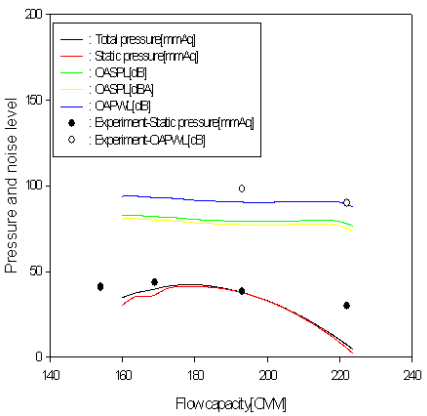


Fig. 10 Aero-acoustic performance map

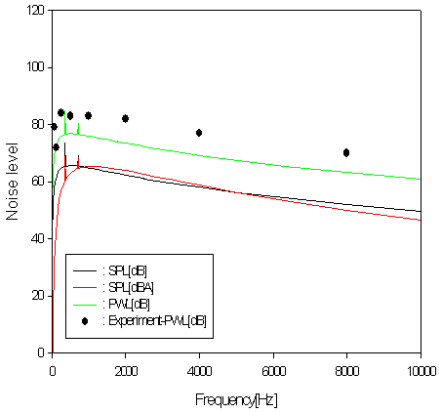


Fig. 11 Fan noise spectrum at design capacity

Fig. 11 은 송풍기의 설계점 조건에서의 주파수 대역별 소음 스펙트럼을 보여주고 있으며, FanDAS를 이용한 예측결과가 측정결과와 잘 일치하고 있다. 이러한 비교결과는 FanDAS 를 이용하여 송풍기의 소음성분 분석 및 그에 따른 상세한 소음저감설계가 가능함을 암시한다.

4. 결 론

고효율-저소음 축류 송풍기 개발을 위한 FanDAS 와 CFX 소프트웨어를 결합한 전산체계를 제안하였고, 본 연구에서 제안된 개발체계 및 방법을 송풍기 설계최적화에 적용하였다. 송풍기 최적설계는 FanDAS 를 이용한 매개변수 분석을 통해 수행하였고, 최적화된 송풍기 설계결과는 CFX 를 이용한 유동해석를 이용하여 검증하였다. 더 나아가 최적화된 송풍기의 설계, 성능 및 소음예측결과는 실제 송풍기 시작품의 제작, 시험을 통해 최종적으로 검증하였다. 검증결과들을 통해 FanDAS 와 CFX 가 연계된 송풍기 개발체계는 고효율-저소음 송풍기 개발에 비교적 간편하면서도 높은 신뢰성을 가지고 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) 이찬, 길현권, 2010, “성능 및 소음특성을 고려한 축류 팬 설계의 전산 체계,” 유체기계저널, 제13권 제2호, pp. 48~53.
(2) 이찬, 2010, “공력음향학적 특성을 고려한 시로코 팬의 설계 방법,” 유체기계저널, 제13권 제2호, pp. 59~64.
(3) 김재우, 김진혁, 이찬, 김광용, 2011, “가중평균대리모델을 이용한 환기용 축류송풍기의 고효율 최적설계,” 대한기계학회논문집 B권, 제35권 제8호, pp. 763~771.
(4) ANSYS CFX manual, 2010.