◎ 해 설

축류휀 설계, 성능 및 소음 해석 프로그램 개발

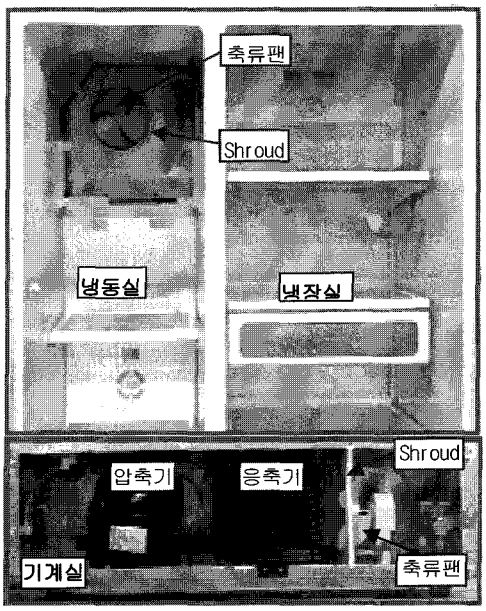
전완호* · 백승조* · 김창준*

1. 서 론

축류휀은 터보기계의 일종으로서 저정압, 고풍량을 특징으로 하여 생산 원가가 저렴해서 환기, 발열부품의 냉각, 열교환 등을 목적으로 많이 사용되고 있다. 가전기기 중에서 열교환을 목적으로 축류휀을 사용하는 대표적인 것은 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 냉장고 냉동실과 기계실이다. 여기서 기계실 축류휀의 역할은 냉동 사이클이 운전하는 동안, 응축기에서 발생되는 고온의 열을 저온의 외부 공기를 흡입하여 열교환시킨 후 다시 기계실외부로 방출시키는 동작을 반복하며, 냉동실 축류휀은 증발기를 통과한 차가운 냉기를 냉동실과 냉장실로 송풍시키는 것이다. 이러한 축류휀은 요구 풍량과 시스템 정압을 맞추기 위해 그 형태에 있어서 3차원 꼬임(twist) 및 스윕(sweep)이 기본적으로 적용됨으로써 3차원 자유곡면의 형상을 이룬다(Fig. 1(b)).(1) 이렇게 스윕과 받음각이 많이 들어간 이유는 저소음과 고압력으로 가전제품용 휀의 설계개념이 잡혀 있기 때문이다. 이런 가전제품용 휀의 설계는 설계자 각자의 경험에만 의존하는 방식이었다. 이런 설계는 설계한 제품을 제작하여 시험한 후 성능과 소음을 만족하지 않으면, 다시 재설계하면서 원하는 성능이 나올 때까지 계속반복적인 루프를 돌아야 하며, 이때 시간과 비용이 기하급수적으로 필요하게 된다. 휀에 대한 연구가 더욱 진행될수록 위의 과정을 수치적으로 버츄얼(virtual)하게 진행할 수 있는 시스템의 등장은 필연적이었다. 결국, 좀 더 체계적인 휀의 저소음 연구를 위해서 휀의 설계뿐만 아니라 성능예측과 유동장, 소음 해석까지 동시에 수행될 수 있는 전체적인 휀 해석 프로그램의 개발이 구상되고 수행되었다.

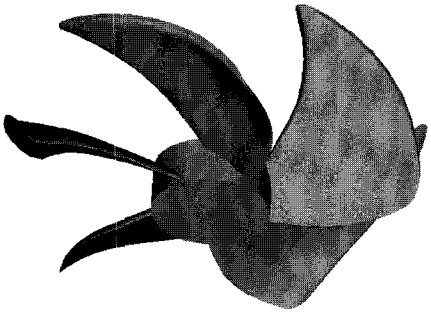
본 프로그램은 크게 세 부분으로 나누어져 있다. 우선 기본적인 개념을 바탕으로 기본 설계를 수행하는 설계 모듈, 설계된 형상을 바탕으로 패널 방법의 정상유동 해석을 통해서 성능을 해석하는 성능 해석 모듈 그리고 설계된 형상을 바탕으로 비정상유동해석과 소음 해석을 수행하는 소음 해석 모듈로 이루어진다.

설계모듈은 기존에 계속 사용되어 오던 프로세스를 좀 더 체계적으로 정리하고 사용자가 쓰기 쉽도록 만든 프로그램이다. 성능 해석은 삼차원 패널 방법을 이용해서 수치적으로 수행된다. 소음 해석은 비정상 유동해석이 선행된 후, 음향학적 유추법에 의해서 수행된다. 성능해석이나 소음해석 모두 설계 모듈에서 설계된 형상자료를 이용하여 계산이 수행되며, 계산시간은 성능해석의 경우 약 1분, 소음예측은 경우에 따라서 3시간에서 6시간 정도가 소요된다. 본 논문은 개발된 프로그램의 전체적인 구상과, 소음 해석 과정 그리고 소음 해석의 여러 결과에 대해서 기술한다.



(a) Refrigerator and axial fans

* LG전자 Digital Appliance 연구소
E-mail : whjeon@lge.com



(b) Typical axial fan of freezer

Fig. 1 Overview of refrigerator and axial fan

2. 본 론

2.1 축류휀 설계 프로그램

축류휀의 형상을 설계하는데 있어서 다양한 인자들(피치각, 스윕각, 날개수, 날개간격, 외경 등)을 사용자가 입력하면 3차원 축류휀 형상을 사용자의 PC 환경하에서 확인할 수 있고, 설계된 날개의 상세부분을 그래픽적으로 검토할 수 있으며 날개변수들의 각 단면별 분포를 도식화하여 개선된 휀 설계를 도모할 수 있도록 구성된 프로그램이다. 이 프로그램의 순서도는 Fig. 2에 있다.

휀의 성능에 주요한 영향을 미치는 인자들은 날개수, 피치각(pitch angle), 캠버(camber), 익형태 등이며 소음의 주요 인자들은 이 이외에 스윕각, 레이크각(rake angle), tip rounding 관련 변수들이다.

2.2 휀의 성능 해석

성능 해석에 사용된 수치기법은 선형 압축성 공기역학 이론에 근거한 주파수 영역 패널(frequency-domain panel) 방법이다. 이 이론은 깃이 얇고 스톨이 발생하지 않는 받음각에 대해서 적용되는 것으로 선형성에 대한 가정을 기반으로 한다. 또한, 선형성 이외에도 깃 표면의 어떤 점에서 작용하는 하중의 크기가 어떤 주파수로 조화진동 한다는 가정을 한다. 따라서 전체 교란장은 휀 상에서 같이 회전하는 좌표계에서 같은 진동수로 변동하게 된다.

깃을 평균 캠버면을 이용하여 나타내고, 각 깃에서의 하중을 평균 캠버면에서 계산한다. 계산된 값은 휀의 성능을 나타내는 변수인 유량계수, 압력계수, 효율 등으로 나타낸다.

Fig. 2 Flow chart for axial fan design

2.3 휀의 공력소음 해석

축류휀의 소음은 스펙트럼 상에서 보면 피크로 특성 지어지는 토온소음(tonal noise)과 넓은 주파수 영역에서 음압값을 갖는 광역소음(broadband noise)로 나누어 질 수 있다. 이 두 스펙트럼상의 특징은 서로 다른 소음 발생 원인에서 기인한다. 일반적으로 토온소음은 날개통과주파수(BPF : Blade Passing Frequency)로 존재하며, 깃에 걸리는 하중이 회전하면서 발생하는 소음으로 축의 회전주파수와 깃의 수의 곱에 해당하는 주파수에 발생한다. 또한, 이 주파수의 조화주파수로도 존재한다. 광역소음은 깃을 지나는 유동의 난류에 의한 소음으로 주로 날개 경계층에 의한 교란, 입구 난류에 의한 간섭 소음, 박리에 의한 강한 난류 교란 그리고 깃 끝전(trailing edge)을 지나는 유동의 와류발생에 의한 소음 등에 그 원인이 있다. 그렇기 때문에 광역소음을 예측하는 일은 난류와 박리 등에 대한 유동해석이 정확하게 수행되어야 하기 때문에 복잡하고 아직도 많은 연구가 진행 중이다. 본 방법에서는 우선 토온소음의 예측에 대해서만 고려한다.

본 논문에 사용된 수치기법은 유동장을 비정상유동 계산에 많이 사용되는 와류패널법과 자유후류법을 이용

하여 계산하고, 유동장에서 구한 로터 깃의 힘(압력)으로 로터 깃에서의 비정상 압력 교란에 의한 소음을 예측하는 방법이다.[2),3)] 이것을 위해서 매시간 로터 깃의 각 요소에서 힘을 구하고, 움직이는 점 힘에 의한 먼 거리(far field) 음향장을 시간 영역 음향유추법의 일종인 Farassat 방법으로 예측한다. Farassat방정식은 자유공간에서 이극이 움직이는 경우의 음향장을 예측하는 방법이므로 산란이나 회절의 효과는 고려되지 않으나 소음원의 규명이나 음압의 예측에는 쉽게 적용될 수 있다.[2),3)]

3. 결 과

3.1 휀 설계 및 성능예측 프로그램 개발

휀을 설계하기 위해서 기본적으로 휀의 설계조건인 작동 유량, 정압, 회전수를 입력한다. 이 값은 비속도(specific speed, Vs)를 계산하고 그 범위가 일반적인 축류휀의 비속도 범위에 포함되는지 여부를 판별하는데 사용된다. 축류휀 설계모듈은 크게 유동각 관련 변수 계산단계, 날개 현 계산, 평균캠버선 결정, 스윕각 적용, 캠버면에 두께분포 적용, 피치각 적용, tip rounding/rake 적용, 각 반경위치별 생성된 날개 표면데이타를 허브에 붙이는 과정 및 최종 휀 parameter 재계산등으로 구성된다. 이 6개의 단계를 지나가면 기본적인 휀 설계가 끝나게 된다.

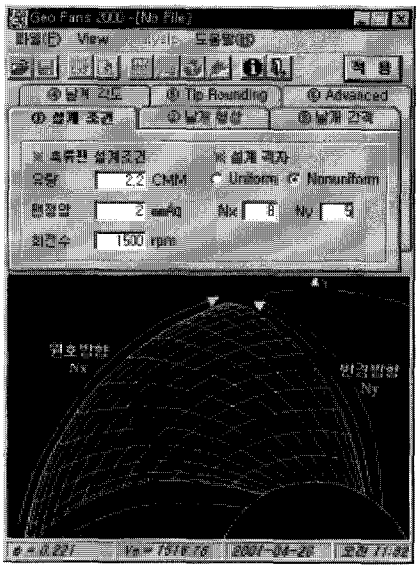


Fig. 3 Capture view of axial flow fan design program and designed fan shape

설계가 끝나면 설계한 휀의 형상을 눈으로 확인하기 위한 삼차원 모델링 창이 열려서 삼차원적으로 휀 형상을 확인할 수 있다. 1500rpm에서 작동하는 직경 145 ㎜ 깃 5개인 축류휀의 설계된 형상이 Fig. 4에 있다.

앞의 프로그램으로 기본적인 휀의 설계가 끝나면 성능 해석 프로그램으로 기본적인 성능에 대한 검증을 실시한다. 성능예측 프로그램의 기본적인 형상은 Fig. 5와 같고 설계에 사용된 휀 인자들이 그대로 반영됨과 동시에 축류휀 성능에 직접적인 관계가 있는 쉬라우드(shroud)관련 변수가 성능예측에 사용되며 해석에 사용되는 시간은 Pentium Ⅲ-800MHz에서 1분 이내이다. 해석된 결과는 기본적으로 P-Q 곡선과 효율이 나오고 각 단면별 형상 값이 주어진다. 또한, 수치해석의 결과를 이용해서 깃 표면에서의 하중 분포를 압력계수로

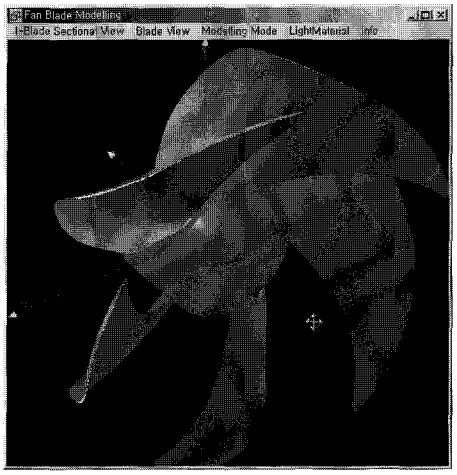


Fig. 4 3D view window showing the designed axial flow fan

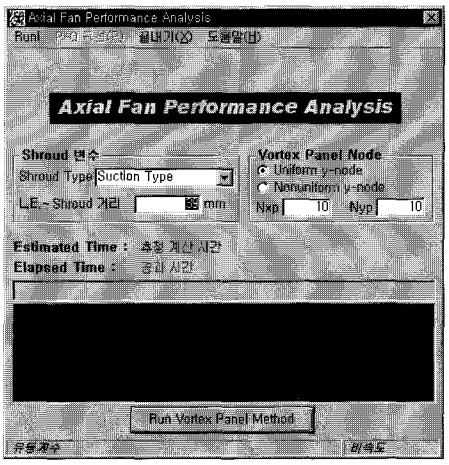


Fig. 5 Performance analysis module

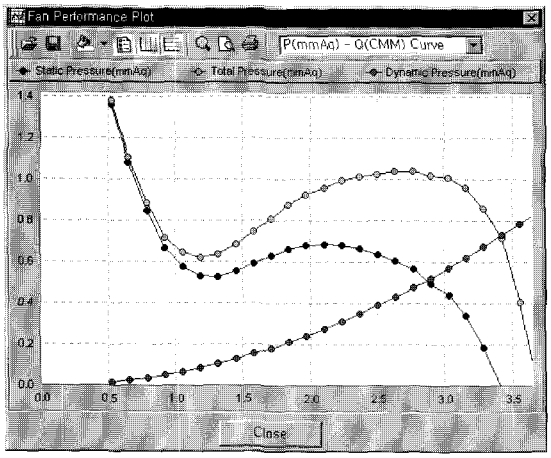


Fig. 6 Predicted performance characteristics

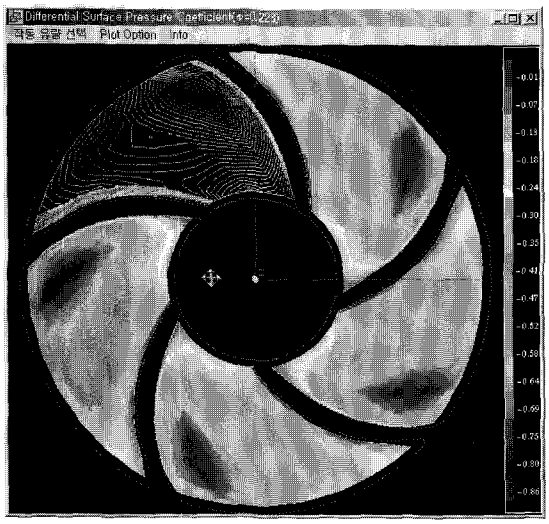


Fig. 7 Predicted pressure coefficient distribution

그려볼 수 있다. Fig. 6은 해석된 성능곡선이고 Fig. 7은 압력계수 분포이다. 이런 압력계수의 분포는 하중이 너무 모여 있다던가 유체에 일을 효율적으로 하지 못한다는 등 기본적인 휀 설계의 단점을 확인할 수 있다. 이 압력분포는 각 유량조건에 따라 변하며 적정 유량의 경우 가장 효율이 좋은 블레이드 하중분포를 나타낸다.

3.2 축류휀의 공력소음 해석

개발된 프로그램은 소음예측에 필요한 비정상 유동장을 해석 할 수 있는 모듈과 소음예측 모듈의 두 가지로 구성되어 있다. 프로그램의 전체적인 형상은 Fig. 8

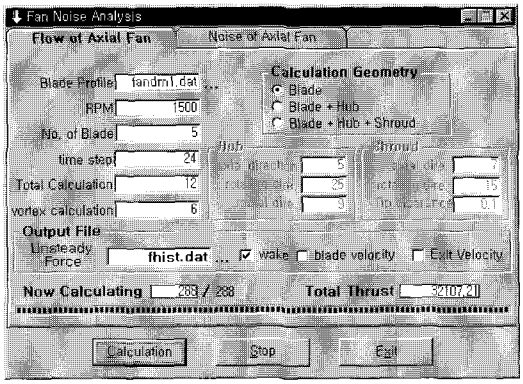
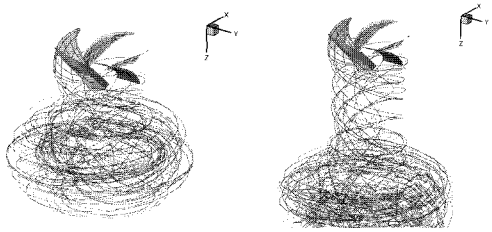


Fig. 8 Overview of the fan noise prediction program



(a) 4 revolutions (b) 6 revolutions

Fig. 9 Wake structure evolution for time marching

에 있다. 기본적인 입력자료는 설계프로그램에서 설계된 휀 형상파일과 작동 rpm 그리고 쉬라우드 관련 변수들이다.

휀 소음을 예측하기 위해서는 비정상 유동장 해석이 선행되어야 한다. 그래서 소음 예측 프로그램은 우선 vortex lattice 유동 해석프로그램을 이용하여 유동해석을 수행한 후, 그 유동장 정보를 소음해석에 사용한다. 유동해석은 비정상 상태로 해석되며 매 시간간격마다 로터는 주어진 각도만큼 회전한다. 해석된 결과는 비정상 유동장의 후류구조와 깃에서의 비정상 하중에 대한 값으로 저장된다. 이 비정상 하중이 소음예측 모듈의 소음계산 시 입력값으로 사용된다.

Fig. 9는 모델 휀에 대한 후류와류구조를 보여주고 있다. 시간이 지날수록 후류와류가 발달하는 것을 확인할 수 있다. 유동장 변수 중 소음에 직접적인 영향을 주는 것은 압력(혹은 힘)이다. 한 깃에 걸리는 힘의 시간에 따른 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 힘의 x성분은 주기적으로 변하지만 z축 성분은 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이 z축 힘의 값이 성능과 관련되고 x,y축 성분은 소음의 발생과 주로 관련 있다.

완성된 소음 예측 프로그램을 검증하기 위해서 1992년 Lohmann이 수치 해석에 사용한 깃 3개인 축류휀을

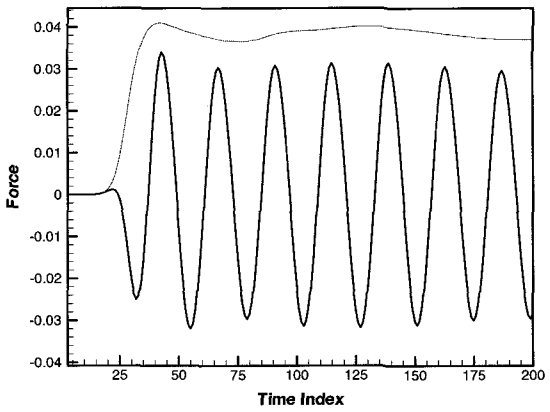


Fig. 10 Variation of the force on one blade

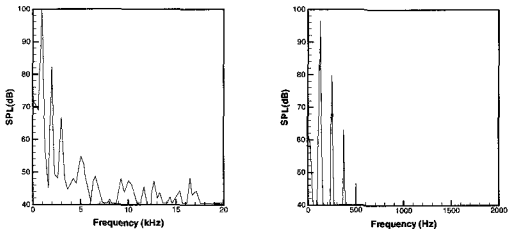


Fig. 11 Comparison of measured(left, by Lohmann) and calculated(right, by author) acoustic pressure.

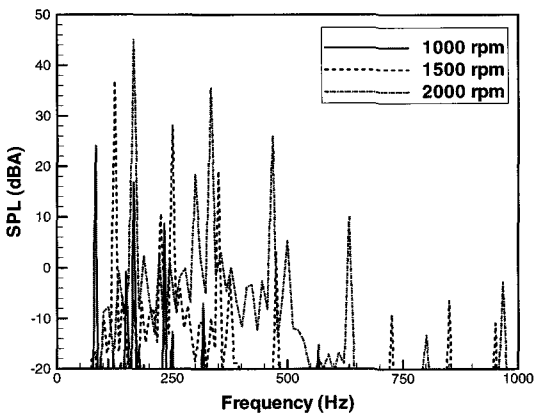


Fig. 12 Predicted sound spectrum for 1000, 1500, 2000 rpm cases

해석하였다.[4] Fig. 11에 Lohmann의 측정값과 본 방법에 의한 예측값을 비교하였다. BPF와 그 조화주파수의 음압이 2dB이내로 일치하는 것을 확인할 수 있다.

개발된 프로그램의 예측 결과를 좀 더 검증하기 위해서 휀의 작동 rpm변화에 따른 소음 해석을 수행하였다. Fig. 12는 모델 휀에 대해서 작동 rpm을 1000, 1500, 2000rpm으로 바꿔가면서 해석을 수행하였을 경우의 예측된 소음 신호의 변화를 나타낸다. 전체적인 경향은 rpm증가에 따라서 음압이 2.3승에 비례해서 증가하는 것을 확인하였다. 이것은 기존의 연구자들이 발표한 2~3승 사이의 분포에 들어가는 값이다.[5]

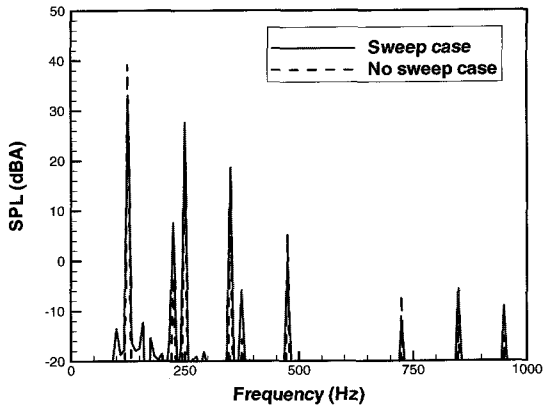


Fig. 13 Predicted acoustic spectrum for swept and no swept fan cases

일반적으로 저소음화를 위해서 휀 날개에 스윕각을 준다. 이것을 수치적으로 확인하기 위해서 스윕을 준 휀과 스윕이 없는 휀에 대한 소음을 계산하였다. Fig. 13을 보면 스윕각이 없는 경우 전체음압레벨이 39.3dB(A)에서 스윕을 주면 37.5dB(A)로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

저소음 휀에 대한 연구를 보다 효율적으로 수행하기 위해서 휀의 설계, 성능해석, 유동/소음 해석을 수행할 수 있는 프로그램을 구상하고 작성하였다. 성능해석은 주파수 영역 패널 방법을 사용하였고, 소음계산을 위한 비정상 유동장은 시간전진 자유후류법을 이용해서 계산한다. 계산된 깃의 하중변화를 이용해서 휀 소음을 수치적으로 예측하였다.

개발된 소음해석 프로그램은 Lohmann의 실험결과와 2dB 이내로 음압을 잘 예측하고 있으며, rpm변화나 스윕각의 변화에 따른 소음변화를 잘 예측하고 있음을 확인하였다.

참고 문헌

(1) 김창준, 이동익, 2000, "비소음 측정을 위한 저소음 축류휀 설계," 소음진동공학회지, 제 10권, 5호, pp. 873~879.

(2) 전완호, 정기훈, 이덕주, 2000, "덕트가 있는 축류휀의 유동 및 음향장 해석," 유체기계저널, 제 3권 2호, pp. 15~23.
(3) Wan-Ho Jeon, Duck-Joo Lee, 2000, "Analysis of the flow and sound field of ducted axial fan," Internoise 2000, pp. 1531~1535.
(4) D. Lohmann, 1992, "Prediction of Ducted Radiator Fan Aeroacoustics With a Lifting Surface Method," DGLR/AIAA 14th Aeroacoustics Conference, pp. 576~606.
(5) Neise, W., 1975, "Application of Similarity Laws to the Blade Passage Sound of Centrifugal Fans," Journal of Sound and Vibration, Vol. 43, No. 1, pp. 61~77.