

깃 끝단 개선을 통한 냉장고용 축류팬 저소음화에 대한 연구 Study on Noise Reduction of an Axial Fan for Refrigerator through Modification of the Blade Tip

김창준*·전완호**·정용규**

Chang-Joon Kim, Wan-Ho Jeon and Young-Gyu Jung

Key Words : Axial Flow Fan(축류팬), Aeroacoustics(공력음향), Noise Reduction(소음 저감), Refrigerator(냉장고).

ABSTRACT

In this paper, a successful noise reduction of an axial flow fan for a refrigerator is presented. The vortex sheet generated at the blade tip of fan was suppressed by changing the shape of the tip. The structure of vortex sheet and detailed flow pattern around the fan were studied by two-dimensional LDV(Laser-Doppler Velocimetry). Effective ways to work out the result as mentioned above are to make the tip of the blade varied in thickness and to have elliptical shapes. To seek the optimal value for the shape of new fan, several cases were examined. Through the application of the methods, the refrigerator became less noisy by 3.8 dB(A) in terms of air-borne noise produced only by the axial flow fan compared to the current one.

1. 서론

가전제품의 경우 대부분의 냉기 이송에 팬이 사용되고 있다. 가장 대표적인 예가 축류팬을 사용하는 냉장고와 에어컨 실외기 그리고 직교류팬을 사용하는 에어컨 실내기, 터보팬을 사용하는 청소기 등이 있다. 이러한 팬은 가전제품 소음의 많은 부분을 차지하고 있고, 대부분의 경우 팬소음의 저감이 가전제품 소음의 저감으로 연결되고 있는 실정이다. 특히, 냉장고의 경우 최근 대형화와 고급화 추세에 맞추어 저소음과 저전력소모가 가장 큰 소비자의 선택기준이 되고 있다.

가전제품의 팬을 설계하기 시작한 후 지난 십여년간 축류팬 역시 저소음을 위하여 많은 형상변화가 있었다. 기본적인 설계 변수로는 날개 형상에 있어서 날개 유입각도, 날개 유출각도, 캠버각(camber angle), 스테거각(stagger angle) 또는 피치각(pitch angle), 솔리디티(solidity), 최대 캠버 크기와 그 위치, 스위프각(sweep angle) 그리고 레이크각(rake angle) 등이 있다. 이런 변수는 다구찌 방법이라는 최적화 기법이 널리 사용된 이후 최적화가 꾸준히 진행되어 저소음의 최적 값이 거의 밝혀져 있다. 결국, 기존의 팬 설계변수로는 더 이상의 저소음화는 불가능한 상태이다. 그래서, 본 연구에서는 팬의 저소음화를 위해서 새로운 설계 변수를 선정한 후, 그 변수를 최적화 하여 기존의 축류팬보다 더 조용한 팬을 설계하는 것을 목표로 한다.

공진을 제외한 팬 소음의 주된 원인은 공력소음으로 이극(dipole)이 주된 원인임이 많은 연구자에 의해서 밝혀져 있다.¹⁾²⁾ 그러나, 이 경우는 피크소음의 경우이고 광역소음의 경우는 이극과 사극이 섞여 있는 경우가 많다. 광역소음의 원인으로서는 이차유동(secondary flow), 와류홀림(vortex shedding), 난류경계층(turbulent boundary layer) 등이 있으며 날개 끝단에서 발생하는 와류에 의한 영향이 특히 지배적임이 밝혀져 있다.³⁾⁴⁾ 본 연구에서는 날개 끝단에서 발생하는 와류의 세기를 줄일 수 있는 끝단 형상을 제안하고 최적화를 수행하였다.

날개 끝단에서 발생하는 와류의 세기를 제어하기 위해서 축류팬 날개 끝단의 형상을 압력면에서 부압면으로 기울어진 타원형상으로 설계하였다. 제안된 형상에 대한 LDV 측정이 수행되었으며, 끝단 와류의 폭과 크기가 많이 감소하고 있음을 확인하였다. 제안된 형상에 대한 설계변수를 도출하여 최적화된 팬을 설계하였다. 냉장고 내부에 장착하여 측정한 결과 기존팬에 비해서 3.8dB(A)의 소음이 감소함을 확인할 수 있었다.

2. 축류팬 깃 형상

2.1 냉장고의 유로 시스템

본 연구에서는 팬 날개 형상의 변경으로 인한 성능과 소음의 변화를 확인하기 위해서 냉장고 내부에 적용되는 직경 88mm 인 축류팬을 기본 모델로 선정하였다. 이 팬의 회전수는 3236rpm 이고 풍량은 0.67CMM 으로 상기 운전조건에서의 송풍

* LG 전자 디지털어플라이언스연구소
E-mail : cjkim@lge.com
Tel : (02) 818-3528, Fax : (02) 867-9629
** LG 전자 디지털어플라이언스연구소

소음은 냉장고 전면에서 1m 떨어진 지점에서 측정할 때 25.8dB(A)이다.

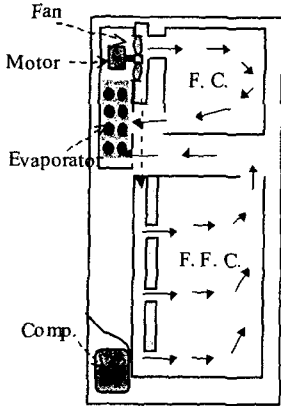


Fig. 1. The flow path of cooling air for refrigerator

Fig. 1에 본 연구의 대상인 냉장고의 구조와 구성을 간단히 나타내었다. 냉장고는 내부의 상부에는 냉동실, 하부에 냉장실이 있고 외부에는 기계실이 있다. 증발기(evaporator)는 냉장고내의 냉동실 뒤에 설치되어 축류팬을 이용하여 냉동실 뿐만 아니라 냉장실로 냉기순환을 하고 있다. 응축기(condenser)는 냉장고 후면 하단부의 기계실에 설치되어 있으며 냉동실과 마찬가지로 팬을 이용하여 열교환을 한다. 냉기순환용 축류팬은 냉장고 유로가 폐회로(closed loop)이고 팬을 중심으로 측면 흡입, 반경방향 토출로 인한 고정압 유로를 형성하기 때문에 통상의 축류팬과는 달리 고정압 팬의 형상과 쉬라우드(shroud)내 설치위치를 가지고 있다.

2.2 도입된 축류팬 깃 형상

기존의 일반적인 축류팬 날개 끝단부의 형상은 Fig. 2와 같이 깃의 전연(leading edge)부터 후연(trailing edge)까지 일정한 형상을 가진다. 즉 압력면과 부압면의 형상이 곡률을 가지고 평평하며 두께가 일정하고 분포되어 있다. 이런 팬은 회전할 때, 압력면과 부압면의 압력차이로 Fig. 2와 같이 압력면에서 부압면으로 넘어가는 유동이 발생하게 된다. 이러한 형상은 Fig. 3과 같이 날개 끝단에서 와류띠(vortex sheet)를 발생시키며 이러한 와류는 쉬라우드와 간섭이 되면서 축류팬의 광대역 소음을 발생시키는 원인이 된다.³⁾

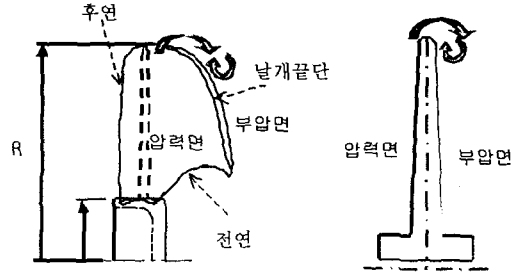


Fig. 2. Shape of fan blade and cross section of fan

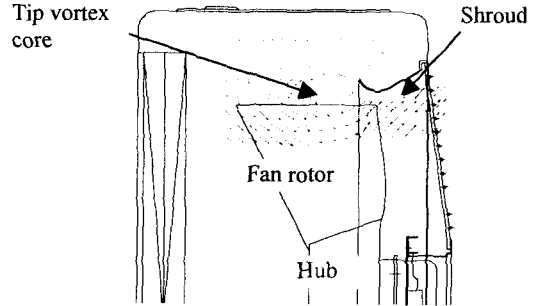


Fig. 3. Tangentially averaged velocity vectors and streamlines on meridian plane(LDV results) [3]

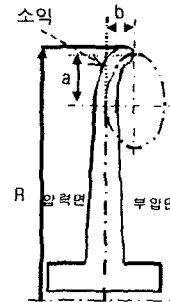


Fig. 4. Shape of newly suggested fan cross section

본 연구에서는 축류팬에서 압력면에서 부압면으로 넘어가는 유동에 의해 발생하는 와류의 성장을 억제하기 위해서 Fig. 4와 같이 축류팬 날개 끝단의 형상을 압력면에서 부압면으로 기울어지는 타원형상으로 제안하였다. 기존팬은 균일두께인 반면 개선팬은 최대캠버 위치를 중심으로 이중타원 날개두께 분포를 갖는다. 이는 팬의 단극과 이극 소음을 동시에 줄이고자 반영된 것이다.

새로운 팬의 날개 끝단에 설치되는 기울어진 소익의 설계변수로 소익의 반경방향 길이(a)와 원주방향 길이(b) 비와 소익의 반경방향 길이와 팬의 반지름(R) 비로 설정하였다.

본 연구에서 사용된 일부 축류팬 설계인자는 다음 표 1과 같다. 풍량, 정압등의 기본성능을 만족하는 설치각, 날개수, 허브직경등을 결정한 다음

소익과 관련된 설계인자인 반경방향길이와 축방향 길이의 최적값을 실험을 통하여 찾았다.

Table. 1. Design parameters for axial fan.

인자	단위	PT1-1	PT1-2	PT1-3	PT1-4	PT1-5
판직경	mm	88	88	88	88	88
허브직경	mm	32	28	33	33	25
날개수	EA	9	7	9	9	5
날개 두께	mm	1.8	1.8	1.6	1.6	1.6
최대캠버 위치	%	A	A1	A2	A3	A5
스윙각	Deg	B	B1	B2	B3	B5
피치각	Deg	C	C1	C2	C3	C5
앞전 날개폭	mm	20.4	21.7	22.5	23.6	22.7
뒷전 날개폭	mm	3.5	3.7	3.3	3.3	4.3
전체 날개폭	mm	23.9	25.3	25.8	26.9	26.9
앞전 날개폭(Hub)	mm	3.6	4.1	3.4	3.4	4.2
뒷전 날개폭(Hub)	mm	3.5	3.7	3.3	3.3	4.2
전체 날개폭(Hub)	mm	7	7.8	6.8	6.8	8.4
a/R	%	D	D1	D2	D3	D4
b/a	%	E	E1	E2	E3	E4

3. 실험장치

3.1 팬의 풍량 및 소음 측정

팬의 풍량은 AMCA 규격 210-74 에 따라서 제작된 팬테스터(풍량범위 0.2~12CMM)를 이용하여 측정하였고 소음은 ISO 3741 규격에 따라서 제작된 완전무향실에서 냉장고 전면 1m 에서 설치된 1/2 inch 마이크로폰으로 측정하였다. 무향실의 제원은 폭 4.8(m), 높이 3.8(m), 길이 4.8(m)이고 cut-off 주파수는 100Hz, 배경소음은 11dB(A)이다. 소음측정에는 B&K Analyzer Type 2035 시스템이 사용되었다..

냉장고의 시스템 풍량 측정은 팬테스터를 이용하여 냉동실과 냉장실을 각각 별도로 측정하여 합하였다. 냉동실의 풍량 측정은 냉장실 문을 닫아 기존의 상태를 유지한 다음 냉동실의 흡입구 부분을 토출식 팬테스터에 덕트로 연결한 다음 흡입구 부분에 직각방향으로 설치된 정압홀의 정압이 대기압과 같은 상태에서 노즐의 풍량을 측정하여 기록을 하였다. 이런 방법으로 회전수를 변화시키면서 풍량을 측정하였고, 이것으로 팬의 성능을 판단하였다. 냉장실 풍량도 같은 방법으로 측정하였다.

시스템 소음 실험은 팬의 시스템 운전 회전수에서 냉장고의 문을 모두 닫고 전면 1m 지점에서 마이크로폰을 이용하여 측정하였다.

3.2 LDV 시스템을 이용한 팬 유동장 측정

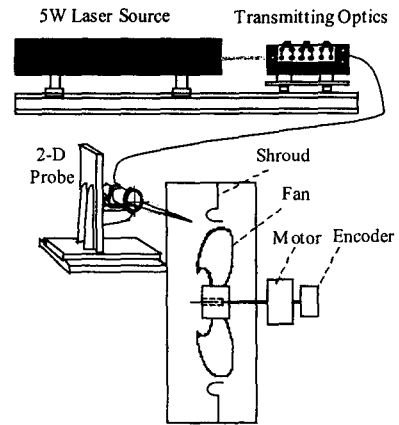


Fig. 5. LDV measurement for the flow visualization

팬의 유동특성과 소음 저감의 원인을 알아보기 위한 방법으로 이차원 레이저유속계(LDV)를 이용하여 기존팬과 새로 제안된 팬을 대상으로 날개 사이 유동을 측정하였다. 본 연구대상의 냉장고용 팬이 매우 작아서 유동 속도 측정이 어려워 상사 법칙에 따라 팬을 크게 만든 다음 실제 냉동실의 쉬라우드도 같은 비율로 키워서 팬과 쉬라우드만을 대상으로 유동을 측정하였다.

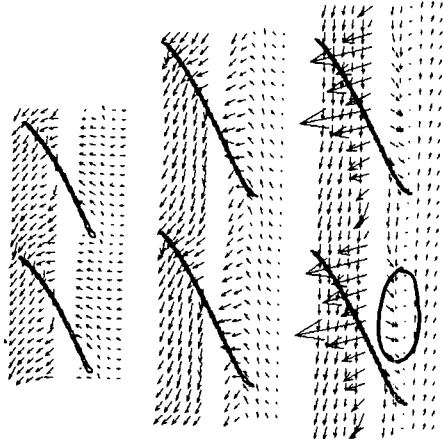
실험장치는 Fig. 5 에 나타난 바와 유동속도 측정을 위하여 Dantec 사의 LDA 시스템을 이용하였고 최대 레이저 출력은 5W 이며 팬을 회전시키기 위한 모터, 팬 날개 위치 검출에 필요한 엔코더를 모터축에 연결하여 실험하였다. LDV 시스템의 속도 측정 영역은 -19 ~ 95m/s 이며, 삼차원 측정도 가능하며, 프루브(probe)에서 레이저 빔이 나와서 측정 영역을 통과하는 입자에 의해서 산란된 도플러(Doppler) 신호를 받는 수광부의 역할을 동시에 하는 back-scattering 방식이다.

4. 결과 및 토의

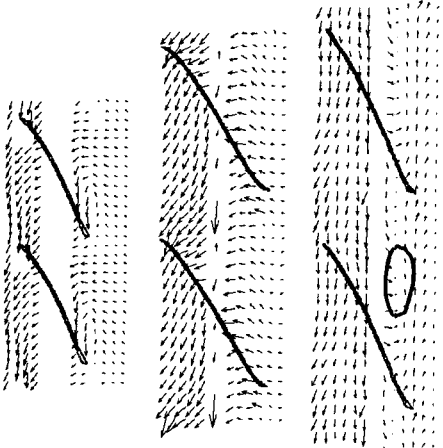
4.1 팬의 유동 가시화 결과

축류팬의 날개 끝단에서 발생하는 와류의 현상을 분석하기 위해서 LDV 를 이용하여 축류팬과 쉬라우드 사이의 유동장 측정하였다. 측정방법은 Fig. 5 에서 팬의 허브부터 끝단방향으로 움직이면서 팬 날개의 전연에서 후연 방향으로 자동이송장치를 이용하여 레이저유속계의 이차원 프루브를 움직이면서 날개사이 및 날개 끝단과 쉬라우드사이의 주기적인 유동속도를 측정하였다. 기존 축류팬과 깃의 끝단을 기울인 새로운 축류팬에 대한 유동장 측정 결과가 Fig. 6, 7 에 나타내었다. 그림

에서 좌측과 중간은 날개사이 유동을 계측한 것으로 좌측은 허브와 가까운 곳의 속도벡터이다. 우측 그림은 날개 끝단과 쉬라우드사이의 속도벡터이다. 그림에서 끝단쪽에 와류가 있음을 확인할 수 있다. Fig. 6 과 Fig. 7 의 끝단 쪽 속도벡터를 비교하여보면, 간섭소음의 크기와 관련이 있는 와류의 크기가 기존 축류팬이 개선된 축류팬 보다 훨씬 크게 발생 함을 알 수 있다.(그림의 타원 부분)



Hub side Middle plane Tip side
Fig. 6. Velocity vector field of the traditional fan



Hub side Middle plane Tip side
Fig. 7. Velocity vector field of the new designed fan.

이러한 결과를 보다 더 명확히 판단하기 위하여 팬의 팁과 쉬라우드 사이에서 가장 유동이 불안정한 위치인 유동이 팬으로 유입되어 블레이드와 처음 만나는 지점에서 측정된 주기적 속도변동을 기존팬과 새로 제안된 축류팬에 대하여 FFT 변환하여 Fig. 8 에 나타내었는데 그 결과 본 연구의

축류팬이 기존팬에 비하여 속도의 시간에 따른 교란이 현저히 줄어들음을 확인할 수 있다. 이러한 연구결과는 에어컨용 팬에서도 확인이 되었으며⁵⁾ 따라서 냉장고에 사용되는 축류팬의 피크소음을 줄이기 위해서는 팬의 전연(leading edge)부터 후연(trailing edge)까지 가장 큰 교란값을 보이는 팬과 쉬라우드가 만나기 시작하는 곳의 교란을 줄이는 것이 팬 날개의 압력변동이나 난류유동의 교란을 줄이는 방법이고 결국 저소음 팬을 만드는 효과적인 방법이다. 한편 기존팬의 경우, 깃과 쉬라우드가 만나는 지점에서 거의 모든 주파수의 교란성분이 발생하였고 개선팬에서는 상대적으로 크기가 작고 덜 발생이 되었다.

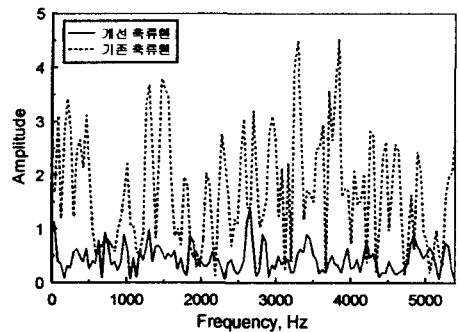


Fig. 8. Velocity vector FFT between blade tip and shroud

4.2 깃 끝단 설계 변수의 최적화

깃 끝단 설계변수를 최적화하기 위해서 반경방향 길이(a)와 축방향 길이(b)를 다양하게 변화시키면서 성능 및 소음 변화를 측정하였다. Fig. 9는 소음의 크기에 따른 소음변화를 나타낸 것인데, 가로축은 소음의 반경방향길이(a)를 축류팬 반지름(R)으로 나누어 백분율로 표시한 것이고 세로축은 같은 풍량에서 측정된 축류팬의 소음값을 나타낸다.

$$L(\%) = \frac{a(\text{소음의반경방향길이})}{R(\text{축류팬의반지름})} \times 100 \quad (1)$$

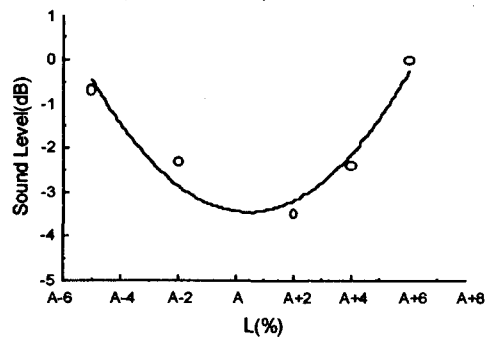


Fig.9 Fan Noise according to L

위의 결과로서 소익의 반경방향길이(a)는 L값이 최저소음을 내는 A%를 기준으로 약 A-2 ~ A+2% 에서 소음이 저감 되는 것을 알 수 있다.

Fig.10에서는 최저 소음값을 나타낸 소익의 반경방향 길이(a)를 A%로 고정하고, 소익의 반경방향 길이(a)에 대한 원부방향 길이 (b)를 변화시켜 가며 성능 및 소음실험한 결과를 나타내었다. 가로축은 소익의 축방향 길이(b)를 반경방향길이(a)로 나누어서 백분율로 나타낸 것이다. 그리고 세로축은 동일풍량 0.67m³/min. 에서 측정된 축류팬의 소음값을 나타낸다.

$$\frac{b}{a} (\%) = \frac{b(\text{소익의 원주방향길이})}{a(\text{소익의 반경방향길이})} \times 100 \quad (2)$$

실험결과 소익의 반경방향길이(a)에 대한 축방향길이(b)가 어느 구간에서 ± 10% 범위 내에서 소음이 크게 저감 되는 것을 알 수 있다.

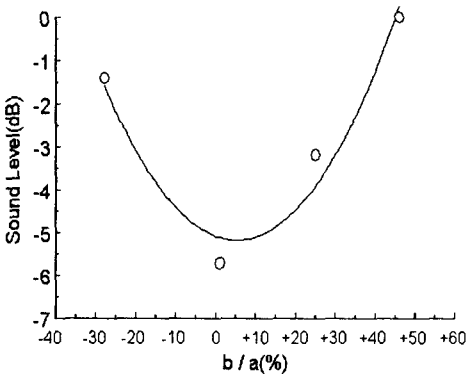


Fig.10 Fan Noise according to b/a

이러한 실험을 통하여 도출된 소익의 축방향길이(a)와 반경방향길이(b)가 적용된 최종 축류팬의 형상은 Fig. 11과 같이 날개수는 5개, 날개폭 24.5mm 이다.

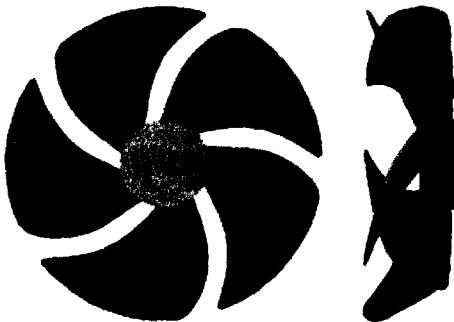


Fig. 11 Optimized low noise axial fan

Fig. 11과 같은 최적 크기의 소익을 적용한 최종 축류팬과 기존팬의 성능 및 소음 특성에 관하여 종합적으로 소음을 비교한 결과를 Fig. 12, Fig. 13에 각각 나타내었다. 본연구에서 날개 끝단이 최적화하여 최종 개발된 축류팬이 동일 풍량에서 기존 축류팬에 비해 소음 저감 효과가 최대 3.8 dB(A)까지 낮아지는 것으로 나타났다.

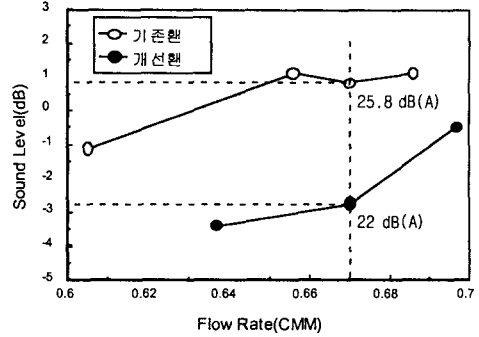


Fig. 12 Comparison of the generated noise by changing flow rate

또한 본 연구의 축류팬과 기존팬의 소음 Spectrum 을 분석해 보면 개선팬이 냉장고 문의 차음 효과를 기대할 수 없는 1000Hz 미만의 영역 및 BPF 에서 기존팬 보다 많이 개선된 것을 볼 수 있다.

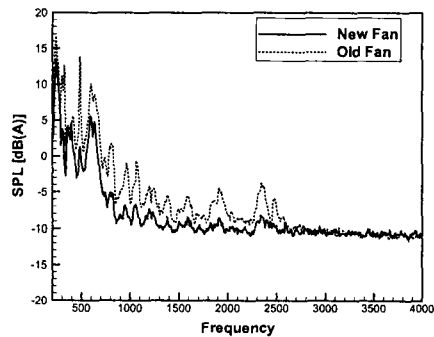


Fig. 13 Comparison of the noise spectrum

5. 결론

고효율 저소음화를 위해 개발된 깃 끝단 개선 축류팬의 날개에 대한 소익의 크기와 그 형상에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. 고효율 저소음 축류팬의 설계를 위하여 날개 끝단 형상 변화를 주요한 변수로 설정하였으며 본 연구에 따른 주요 결론은 다음과 같다.

1. LDV 실험을 통해서 축류팬 깃 끝단을 팬의

압력면에서 부압면으로 기울어지는 타원형상으로 바꾸었을 경우, 깃 끝단의 와류의 크기가 감소하고, 세기도 많이 줄어들음을 확인할 수 있었다.

2. 축류팬 깃 끝단 신행상 날개의 최적설계로 간섭소음을 크게 줄여서 냉장고 송풍소음을 기존 대비 최대 3.8 dB(A) 까지 저감하여 냉장고에 적용하였다.

3. 냉장고에서 본 연구에서 제시된 소익의 설계 인자중 가장 낮은 소음이 발생하는 축류팬의 반경에 대한 소익의 반경 방향길이의 비가 존재함을 확인하였다.

4. 냉장고에서 본 연구에서 제시된 소익의 설계 인자중 가장 낮은 소음이 발생하는 소익의 반경방향길이에 대한 원주방향길이의 비가 존재함을 확인하였다.

참고문헌

(1) Neise, W., 1992, "Review of Fan Noise Generation Mechanisms and Control Methods ", International INCE Symposium, pp. 45 ~ 56.

(2) Jeon, W.-H., Lee, D.-J., 1999, "An Analysis of the flow and aerodynamic acoustic sources of a centrifugal impeller," Journal of Sound and Vibration, Vol. 222, No. 3, pp.505-511

(3) Jang, C-M., Jeong, Y-G., Rhee D-I., 1997, "Noise Flow Characteristics in Tip Region of a Half-Ducted Fan for Split Room Air Conditioner," JSME Centennial Grand Congress, Proceeding of the International Conference on Fluid Engineering, Vol. II, pp. 713-718.

(4) Fukano, T., Kodama Y., and Senoo Y, 1977, " Noise Generation by Low Pressure Axial Flow Fans ", Journal of Sound and Vibration, Vol. 50, pp. 63 ~ 74.

(5) 김창준, 윤홍열, 정용규, 박영민, 2000, "축류팬 및 쉬라우드 개선을 통한 공조기 저소음화에 대한 연구", 한국소음진동공학회 2000년도 춘계 학술대회 논문집, pp.380~387