

# 냉장고용 저소음 신형상팬의 최적 형상에 관한 연구

## Study on the Optimal Shape of Low Noise, New Concept Fan for Refrigerator

정용규\* · 김창준\*\* · 백승조\*\* · 전완호\*\*

\*Young-Gyu Jung, Chang-Joon Kim, Seung-Jo Beak, Wan-Ho Jeon

**Key Words :** Axial Flow Fan(축류팬), Turbo blade(터보익), Aeroacoustic noise(공력소음), 6-sigma(6 씨그마)

### ABSTRACT

In this paper, new concept, low noise axial fan was developed. The fan was designed to operate at high-pressure condition inside the refrigerator. This fan - we call it Alpha fan - has small turbo blades at trailing edge of axial fan. These turbo blades make alpha fan operate at high pressure and low noise condition. In order to find out the optimal value of design parameters, 6-sigma method was used. The design parameters are ratio between inner and outer diameter, Height, Install angle and Install position of turbo blade. Optimal value of turbo blade was found out and the noise generated from this fan is reduced about 3dB(A).

## 1. Introduction

축류팬은 제작 및 설치가 간편한 이유로 많은 가전제품에 설치되어 운전되고 있으며, 그 설계인자를 선택하는 업체들 마다 많은 Data 를 확보하고 있다. 일반적인 축류팬 연구는 유로 저항과 풍량에 적합한 날개형상이나 설치각도의 변경에 의한 성능개선 및 소음 저감으로 진행되고 있다. 하지만 사용자의 요구에 따라서 제품의 다양한 기능이 부과되고, 소형화 됨으로 인하여 유로가 복잡해지고 이에 따른 시스템 저항이 증가하게 된다. 이에 따른 축류팬의 성능 증가는 한계가 있으며, 소음 증가는 불가피하다. 이에 가장 크게 언급되고 있는 소비자의 Claim 중 하나가 바로 팬에 의해서 발생하는 공력 소음이다.

공기에 의해 발생하는 이른바 공력소음에 대한 연구는 Lighthill[1]에 의해 자유 유동장에 대해서 처음으로 수식화 되기 시작하여 Curel[2]이 고정된 물체로 대상을 확장하고 Ffowcs-Williams 와 Hawkins[3]에 이르러 다음과 같이 공기 중에서 물체의 이동에 따른 소음 발생이 고찰 되었다. FWH 는 공력소음을 그 발생구조에 따라서, 각각 단극(monopole), 이극(dipole), 사극(quadrupole)으로 분류하였는데 이에 따라서 팬의 소음원은 두께소음, 하중소음, 비선형적 사극소음 등으로 구분할 수 있다. 팬의 경우에 있어서는 많은 연구자에 의해서 이극소음이 지배적인 음원임이 밝혀져 있다.[4,5]

축류팬에 있어서 이러한 이극소음을 줄이고자 팬 날개의 두께를 키워서 유동박리를 억제 또는 후퇴시키거나 특정부분(전연(Leading Edge), 후연(Trailing Edge), 끝단(Tip))의 형상을 개선하여 유동의 안정을 꾀하여 팬모터 지지대, 쉬라우드, 그릴과의 간섭소음을 개선하고 있다. 하지만 본 연구에서 관심있는 냉장고 고내와 같이 축방향으로 유동을 흡입하여 원심방향으로 토출시키는 유로 구조(Fig. 1 참조)는 축류팬의 형상 및 설치 위치가 통상의 유로와 많은 차이를 보이고 있어 일반적인 설계방법으로 제작된 축류팬으로 저소음화를 실현하기가 매우 어렵다.

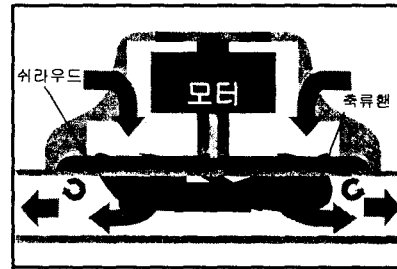


Fig.1 Flow path around the axial fan inside the refrigerator

Fig.1 은 냉장고 고내에 있어서 냉기를 순환시키기 위한 축류팬과 유동현상을 도시화한 것으로서, 축류팬의 설치 위치가 쉬라우드 (Shroud)후방으로 많이 돌출된 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 냉장고 고내의 유로 구조가 폐회로로 구성되어 있으며, 매우 복잡하고 긴 유로 구조를 가지고 있음으로 인하여, 유로 저항이 증가 되었기 때문이다. 또한 냉장고 고내의 유로 구성상 축류팬의 설치 위치가 냉동실 상부에 설치되어 축류팬의 하부로부터 유동을 흡입하여 원심방향으로 유동을 토출시키는 구조를 가지고 있다. 이러한 유로 구조

\* LG 전자 디지털 어플라이언스 연구소

E-mail : jyg@lge.com

Tel : (02) 818-7889, Fax : (02) 867-9629

\*\* LG 전자 디지털 어플라이언스 연구소

로 인하여 유동을 원심방향으로 분출 시키기에 용이하도록 구성되는 것이 유리하다.

이러한 냉장고 고내의 유로 구조와, 유동의 정압 상승을 위하여 축류팬의 설치 위치가 변경되었다. 하지만 냉장고 팬 유로 구조상 원심방향으로 유동을 분출시킴으로 인한 쉬라우드 부근의 유동 손실과 난류소음 발생은 불가피하며, 이를 개선하기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다.[6]

냉장고 내부의 위와 같은 고정압의 특성 때문에 이러한 특수한 유로조건에 맞는 축류팬이 십여년간 연구되면서 많은 설계변수가 최적화되어 왔다. 그러나, 최근 들어 냉장고의 주된 소음이라고 분석되고 있는 압축기(Compressor)의 소음이 점차 저감 되고, 소음이 소비자의 주된 관심이 되면서 팬소음을 더 줄여야 하는 필요성이 강하게 대두되고 있다. 이러한 경향은 고급 대형 냉장고일수록 강하게 나타나고 있다. 팬에 의한 송풍소음은 매년 2~3dB(A)씩 감소하고 있지만, 기존의 팬을 최적화하여 소음을 저감하는 방법으로는 이러한 소비자의 요구를 충족시킬 수 없기 때문에 본 연구에서는 냉장고 내부의 고정압 유로에 맞는 새로운 개념의 팬을 제안하고 설계하였다. 이 팬은 냉장고의 유로 구조 및 높은 유로 저항에 적합하도록 축류팬 날개의 팁(Tip)에 터보익(Turbo Blade)형태의 보조익을 설치한 것으로 Alpha 팬이라고 명명하였다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 냉장고 고내의 유로 구조 및 높은 유로 저항에 최적인 Alpha 팬을 개발하기 위하여 Alpha 팬의 터보익 형상에 있어서 6-Sigma 기법을 적용해서 소음과 풍량에 가장 크게 영향을 미치는 설계인자의 효과와 기여도를 분석 하였다. 위의 연구 결과로서 터보익의 형상을 결정하는 4 개 인자의 최적수준을 도출함으로써, 최적 Alpha 팬을 개발하고 냉장고 저소음 목표를 달성하였다.

## 2. 저소음 신형상 축류팬

### 2.1 냉장고의 유로 시스템 및 축류팬

본 연구에서는 Alpha 팬의 설계인자 변경으로 인한 성능과 소음의 변화를 확인하기 위하여 대형 냉장고(730 liter 급)에 사용되고 있는 직경 145mm 인 축류팬을 적용 모델로 선정하였다. Fig.2 에 대형 냉장고의 구조와 구성을 간단히 나타내었다. 냉장고는 냉장고 좌측에는 냉동실, 우측에는 냉장실이 위치해 있고, 냉장고의 후면 하단부에는 기

계실이 있다. 증발기(Evaporator)는 냉동실 뒤에 설치되어 팬을 이용하여 냉동실 뿐만 아니라 냉장실로 냉기순환을 하고 있다. 응축기(Condenser)는 냉장고 후면 하단부의 기계실에 설치되어 있으며 냉동실과 마찬가지로 팬을 이용하여 열교환을 한다.

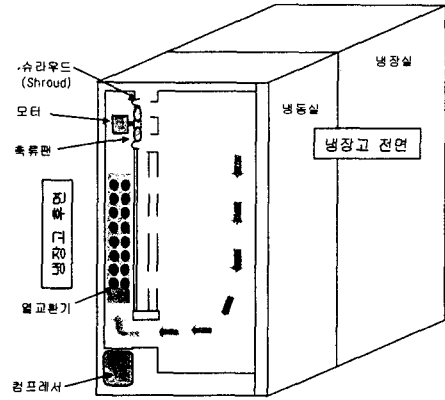


Fig.2 The flow path inside the Freezer room of the Refrigerator

일반적으로 대형 냉장고는 냉각용 팬으로 Fig.3 과 같이 축류팬이 사용되고 있다. 기존팬의 직경은 145mm 이며, 팬의 날개수는 5 개이고 형상은 에어컨용 팬과 비슷하나 증발기용 축류팬이 쉬라우드 내에서 설치하는 위치가 에어컨과는 많이 차이가 난다. 냉장고용 냉동실 축류팬이 에어컨과 차이가 나는 것은 냉장고 유로가 폐회로(closed loop)이고 팬을 중심으로 유동을 측면으로부터 흡입하여 반경방향으로 토출시킴으로 인한 고정압 유로를 형성하기 때문이다.

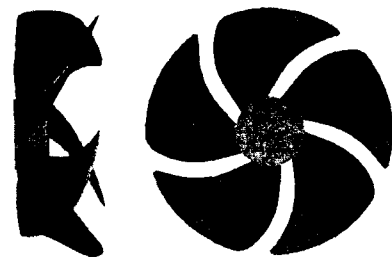


Fig.3 Former axial fan used in refrigerator

### 2.2 신형상 팬 성능 특성

일반적인 축류팬의 P-Q 곡선은 Fig.4 의 (a)와 같이 낮은 압력에서 많은 풍량을 발생시키지만, 압력이 상승하는 것과 비교 할 때 풍량이 급격히 감소되는 특성을 보인다. 냉장고와 같이 음식물의

양, 냉장고 고내 온도와 습도의 변화에 따라서 유로 저항이 다양하게 변화하는 유로에서는 유로 저항의 변화에 따라서 안정적인 풍량을 발생시킬 수 있어야 한다. 하지만 (a)에서 볼 수 있듯이 축류팬은 운전영역에서 압력이 조금만 변해도 풍량의 변화가 급격하게 변화한다. 이러한 현상이 반복적으로 발생하게 되면 냉장고에 보관되어 있는 음식물의 신선도를 떨어뜨리고, 보관시간이 짧아지게 되므로 냉장고의 신뢰성을 떨어뜨릴 수 있다.

반면 원심팬의 성능곡선은 Fig.4의 (b)와 같이 축류팬과 비교하여 높은 압력조건에서 풍량의 변화가 안정적으로 작동하지만, 압력의 변화에 비교하여 볼 때 풍량의 변화가 적은 특성이 있다. 대형 냉장고와 같은 고급화된 냉장고는 기능이 다양하고, 용도에 따라서 냉장고의 풍량을 가변 시켜야 하며 소비전력 또한 낮아야 한다. 이러한 이유로 팬 구동용 모터가 유도기 모터에서 BLDC 모터로 대체되고 있으며, 팬의 회전수를 용도에 맞게 가변 시킴으로써 유량을 조절 할 수 있도록 개발되고 있다. 이렇게 다양한 풍량 조절 능력을 수행하기에 원심팬은 적합하지가 않으며, 요구되는 풍량의 가변을 위해서 원심팬의 직경을 크게 하거나 높은 회전수로 구동 시켜야 한다. 그러나 원심팬의 크기가 커지게 되면 모터의 소비전력이 높아지고, 반대로 회전수가 높아지면 유동 소음이 커지는 문제가 발생하게 된다.

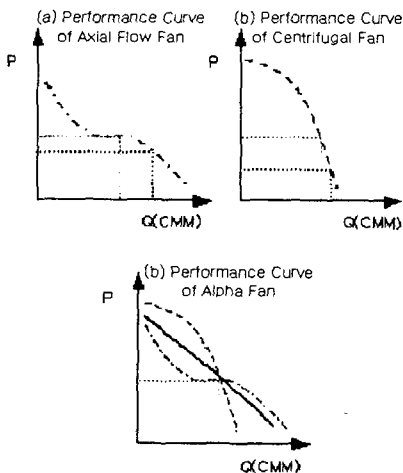


Fig.4 The performance curve of various fans

이러한 축류팬과 원심팬의 단점을 보완하기 위하여 설계된 고정압 저소음 신형상 팬의 성능곡선은 (c)와 같다. Alpha 팬의 성능곡선은 기존의 축류팬과 원심팬에서 보여진 P-Q 곡선과 비교하여 볼

때 중간 형태를 나타내고 있으며, 압력의 변화에 대하여 풍량이 선형적으로 변화하는 특성을 나타내고 있다. 이러한 Alpha 팬의 P-Q 곡선은 앞에서 언급한 냉장고 고내의 압력 변화 및 풍량 가변의 요구에 적합한 팬으로써 비교적 넓은 영역의 운전 조건에 안정적인 풍량을 발생시킬 수 있다.

### 2.3 신형상 팬의 설계 인자 및 최적화

본 연구에서는 위에서 언급한 축류팬과 원심팬의 문제점 해결과 송풍소음의 저감을 위하여 Alpha 팬에 부착되는 터보의 형상의 최적화에 대한 연구를 수행하였으며, 이를 위해서 6-Sigma 기법을 적용하였다.

6-Sigma 기법은 Motorola의 Mike J. Harry에 의해서 1987년 창안된 통계학적 처리 방법으로써 제품의 에러 발생율을 1 백만개 당 3.4 개로 한다는 경영혁신 활동이다. 또한 단순히 품질관리 부문에만 머무는 것이 아니라 마케팅, 엔지니어링, 서비스 등 경영활동 전반을 대상으로 하고 있으며, 현재 GE, Sony, IBM 등등 세계 유수의 대기업에서 활발하게 적용 중에 있다.[7]

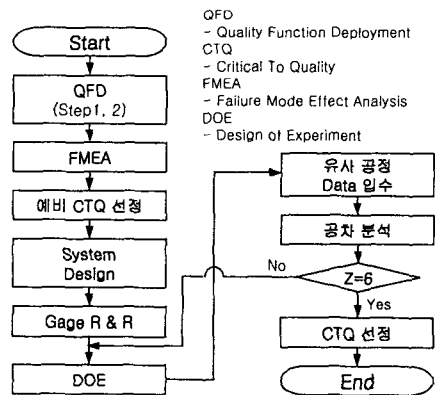


Fig.5. The Procedure of 6-Sigma

일반적인 R&D 6-Sigma 절차는 Fig.5와 같이 QFD(Quality Function Deployment)와 FMEA(Failure Mode Effect Analysis)절차를 통하여 고객의 요구사항을 기술적 요구사항 및 설계인자특성으로 정리하여 예비 CTQ(Critical to Quality)를 선정한다. 또한 측정시스템 및 측정자에 의해서 발생할 수 있는 측정오차의 산포를 분석하기 위하여 Gage R&R을 실시한다.

이렇게 선정된 예비 CTQ와 측정 시스템을 이용하여 DOE(Design of Experiment)를 수행하고, 측정된 Data를 이용하여 설계인자의 변화에 따라서

성능의 변화를 예측할 수 있는 회귀 방정식을 도출한다. 그리고 기존의 제작과정을 회귀 방정식에 적용하였을 때 Z 값이 6-Sigma 수준에 도달하지 못하게 되면 DOE 과정부터 다시 수행하고, 6-Sigma 수준에 도달 하게 되면 CTQ를 확정하게 된다.

본 연구에 의해서 제안된 Alpha 팬의 예비 CTQ를 선정하기 위하여 QFD를 수행 하였으며, 다음과 같이 Alpha 팬의 성능과 소음에 영향을 미치는 설계인자를 4 가지[터보익의 내외경비, 높이, 설치 위치, 설치각도]로 정리 할 수 있었다. 또한 Fig.6에서와 같이 Alpha 팬을 설계하는데 있어서 터보익의 설계 인자들이 축류팬의 외경 및 높이의 변화에 대응하여 설계 될 수 있도록 축류팬의 설계 인자와 접목하여 무차원화 시켰다.

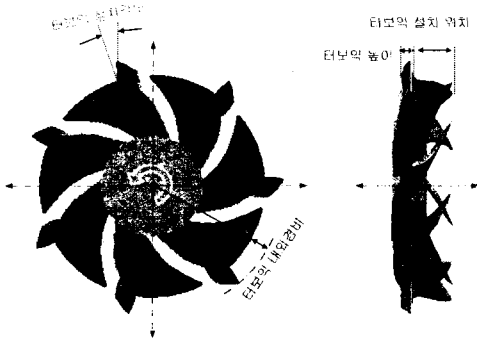


Fig.6 Design parameters of Alpha fan

이들 인자는 Alpha 팬의 성능 및 소음에 크게 영향을 미치는 인자들로서, 냉장고의 성능과 소음에 대한 인자들의 기여도를 분석하기 위하여 실험 계획법의 L9 배열을 이용하여 표.1 과 같이 9 개의 인자 Alpha 팬을 제작 하였다. 이때 Alpha 팬 설계 인자들의 특성을 분석할 수 있도록 설계 인자 및 인자 수준들이 서로 교차 되도록 설계되었다.[7] L9 인자배열은 4 인자 3 수준의 인자 배열로써 비교적 많은 설계인자와 넓은 영역의 인자수준을 비교 분석할 수 있지만 그 정확도가 떨어지기 때문에 정밀한 실험이 요구된다.

Table. 1. Array of design parameters for 6-sigma.

No	설계인자			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	2	1	2	2
3	3	1	3	3
4	1	2	3	2
5	2	2	1	3
6	3	2	2	1
7	1	3	2	3
8	2	3	3	1
9	3	3	1	2

### 3. 실험장치

본 연구에서 실험은 Fig.2 과 같은 대형 냉장고의 냉동실과 냉장실을 대상으로 냉동사이클 운전 상태가 아닌 팬 모터만을 운전하는 송풍상태에서 시스템 풍량 및 소음 실험을 실시하였다. 팬의 풍량은 AMCA 규격 210-74 에 따라서 제작된 팬테스터(풍량범위 0.2 ~ 12m<sup>3</sup>/min.)를 이용하여 측정하였고 소음 측정은 ISO 3741 규격에 따라서 제작된 무향실(압소음 11dB(A), 차단주파수 100Hz)에서 냉장고 전면 1.0 m 지점에 설치된 1 inch 마이크로폰에서 감지된 소음 신호를 B & K Analyzer Type 2035 에서 FFT 변환하였다.

냉장고의 풍량을 측정하는 방법은 여러 가지가 있지만 여기서는 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 냉동실의 풍량 측정은 먼저 냉장실은 문을 닫고 기존의 상태로 유지한 다음 냉동실의 흡입구 부분에 토출식 팬테스터를 이용하여 덕트로 연결한 다음 흡입구 부분에 직각방향으로 설치된 정압홀의 정압이 대기압과 같은 상태에서 노즐의 풍량을 계측한다. 냉동실과 연결된 덕트의 크기가 충분히 크면 팬테스터 내의 노즐 후의 정압홀을 이용하여 정압을 측정해도 가능하다.

이러한 방법으로 9 개의 인자팬에 대하여 회전수를 변화시키며 풍량 계측 실험을 실시하였다.

시스템 소음 실험은 풍량 실험과 같은 회전수에서 냉장고의 문을 모두 닫고 전면 1.0m 지점에서 인자 Alpha 팬의 종류를 달리하면서 냉장고의 전면 소음은 1", 냉장고 후면의 소음은 1/2" 마이크로폰을 이용하여 계측하였다.

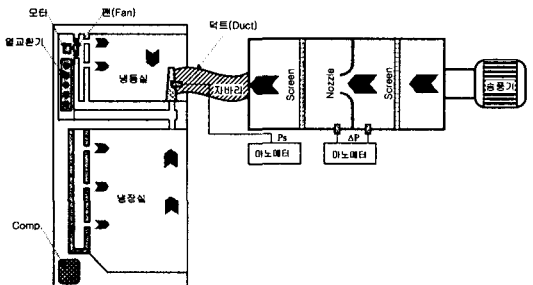


Fig.7 The apparatus for measuring the flow rate of refrigerator.

### 4. 결과 및 토의

#### 4.1 최적화된 Alpha 팬 개발

냉장고의 성능 및 소음에 영향을 미치는 중요

한 인자와 각 인자의 최적 수준을 도출하기 위하여 냉장고에 대한 인자 Alpha 팬의 반응표면 분석을 실시하였다.

반응표면 분석은 풍량과 소음 각각에 대하여 분석하였으며, 이에 의해서 추정된 회귀 방정식의 정확성을 나타내는 R-Sq(adj)값이 98%로써 유효한 것으로 분석되었다. 회귀방정식은 반응표면 분석 결과에 의해서 추정되며, Alpha 팬의 설계 인자 변화에 따른 소음과 성능을 예측할 수 있는 중요한 방정식이다. 이렇게 도출된 회귀방정식을 이용하여 설계 인자들의 변화에 따른 성능 및 소음의 변화를 계산하여 성능이 우수하고 소음이 낮은 최적 형상의 Alpha 팬을 도출하는 반응최적화(Response Optimization)를 실행하였다.

반응최적화를 통하여 축류팬과 동일한 풍량 조건에서 설계 인자들의 수준을 조합하여 가장 낮은 소음을 나타내는 설계인자 수준을 도출한 결과 Fig.8 과 같이 최적 수준의 Alpha 팬을 도출할 수 있다.



Fig.8 Optimized shape of Alpha fan

#### 4.2 신형상 팬에 의한 성능 및 소음 변화

위의 반응 최적화 방법을 통하여 도출된 최적 Alpha 팬을 대형 냉장고에 대하여 소음과 성능 실험을 하였으며, 실험의 정확도를 높이기 위하여 냉장고에 대하여 동일한 모터를 3 개씩 변경하여 실험 하였다. 최적 Alpha 팬 실험결과 동일한 풍량 조건에서 반응최적화에 의해서 예측된 소음과 실험을 통하여 측정된 소음의 차이가 0.3dB(A)로서, 거의 일치하는 것을 볼 수 있었으며, 이는 반응표면 분석에서 도출된 회귀방정식이 상당히 유효하다는 것을 증명한다.

또한 최적 Alpha 팬의 터보익을 제거하여 성능 및 소음 비교실험 결과 기존 축류팬 보다 최적 Alpha 팬의 소비전력이 냉장고 운전 풍량에서 20% 이상 (Fig.9 참조) 저감 되었으며, 송풍 소음 또한 약 3dB(A) 저감되는 것을 확인하였다. 이는 냉장고에 있어서 Alpha 팬이 기존의 축류팬 보다 성능 및 소음 면에서 우수하다는 것을 확인시켜준다.

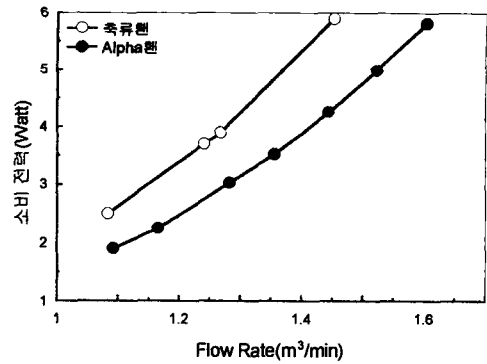


Fig.9 Power consumption of former fan and Alpha fan

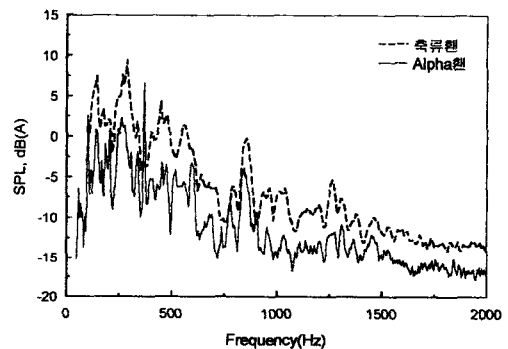


Fig.10 Measured noise spectrum of former fan and Alpha fan

축류팬과 Alpha 팬의 소음 비교실험 결과 Fig.10 과 같이 축류팬은 저주파수 영역에서 BPF(Blade Passing Frequency)의 피크가 크게 발생하는 반면에 Alpha 팬의 경우에 BPF 에 의한 Peak 소음이 거의 없으며, 전체적인 광대역 소음 또한 상당히 줄어드는 것을 볼 수 있다.

## 5. Conclusion

냉장고의 고효율 저소음화를 위한 Alpha 팬의 설계 인자에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. 냉장고 고내에 사용되는 고효율 저소음 Alpha 팬의 터보익 설계는 성능 및 소음에 영향을 크게 미치는 4 개의 설계 인자를 선정하였으며, 이에 따른 주요 결론은 다음과 같다.

1. 성능 및 소음에 중요한 역할을 하는 Alpha 팬

의 4 가지 설계인자를 최적화 시킴으로써, 동일한 날개형상을 가진 축류팬과 비교하여 Alpha 팬의 송풍 소음을 3dB(A)저감 하였다.

2. Alpha 팬을 구동 시키는 BLDC 모터의 소비 전력이 기존의 축류팬과 비교하여, 약 20% 저감 되었다.

3. 본 연구를 통하여 6-Sigma 의 반응최적화에 의해서 예측된 최종 Alpha 팬의 소음과 실험에 의해서 측정된 소음이 동일한 풍량 조건에서 0.3dB(A)의 차이를 나타냄으로써 거의 일치하는 것을 볼 수 있으며, 이는 6-Sigma 에 의해 도출된 회귀방정식이 유효하다는 것을 증명 한다.

### 참고문헌

(1) Lighthill, M.J. 1952,"On Sound Generated Aerodynamically (I) General Theory," Proc. R. Soc. London, Ser. A 211, pp.564-587.

(2) Curle, N., 1955, "The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound," Proc. R. Soc. London, Ser. A 214, pp.505-514.

(3) Ffowcs Williams, J.E. and Hawkings, D.L., 1969, "Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion," Phil. Trans. Proc. R. Soc. London, Ser. A , pp.264-321.

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

(5) 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

(6) 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.

(7) Phadke, M. S., 1989, "Quality engineering using robust design", Prentice-Hall International Inc.