

## Shroud 형상에 대한 해석적 연구 및 ‘프로벨러 팬’ 소개

한재오\* · 유승훈\*\* · 모진용\*\*\*

### Computational Study of the Shroud Shape & the ProBeller Fan

Jae-Oh Han\*, Seung-Hun Yu\*\* and Jin-Yong Mo\*\*\*

**Keywords :** ProBeller Fan(프로벨러 팬), Shroud(시라우드), Tip Clearance(끝단간격), Outdoor Unit(실외기), Interaction Effect(교호작용효과), Axial Flow Fan(축류팬), DOE(Design of Experiment, 실험계획법), CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학), Dipole(2극자)

#### Abstract

Computational investigation was conducted to study the effects of the shape parameter of shroud on the performance of the outdoor unit of an air-conditioners. For this study the Design of Experiment(4-factor 3-level) was created and the an automatic program was composed using VBA to reduce the load of pre-process for CFD.

The estimated mathematical equation was produced from this analysis and it was found that the gap between fan and shroud affects more heavily than the other parameters. As a result, the composition of the best parameters was verified that its flow rate was increased by 10 percents and sound pressure level was reduced by 1.2 dBA compare with the worst. And finally, a kind of Propeller fan with blades which were attached to the shroud, so-called 'ProBeller Fan' was introduced in this study.

#### 1. 서론

일반적으로 우리 실생활에서 환기나 열교환을 목적으로 송풍기가 광범위하게 사용되고 있는데, 그 중에 에어컨 실외기(outdoor unit)를 비롯한 냉장고 등 가전기기의 내부 순환 및 냉각에는 축류팬의 일종인 프로펠러팬이 많이 사용된다.

이러한 프로펠러팬은 효율이 높고 풍량이 많으며 원심팬에 비해 구조가 간단하지만 압력상승이 크지 않아 동일한 압력상승을 위해서는 대형화·고속화 해야 하는 문제가 있어 그 적용범위가 제한적이다. 따라서 기기의 성능향상 및 소음저감을 위해서는 팬 자체에 대한 연구뿐만 아니라 팬 주위의 유동에 대한 정확한 분석이 필수적이라 하겠다. 이에 축류팬의 고효율화 및 저소음화에 대하여 일본을 비롯해 국내에서도 많은 연구 등이 진행되었다.

Fukano 등[1]은 프로펠러팬에서 팬의 축방향 위치, 덕트 길이, 덕트 입구형상, 그리고 팬과 덕트와의 간격 등 여러 인자를 변화시켜 가면서 공력특성에 대해 연구하였고, Yamaguchi 등[2]은 축류팬과 시라우드(shroud)의 성능과 소음에 대해 연구하였으며, Sato 등[3]은 소음저감을 위해 시라우드(shroud)와 팬의 상대적 무차원 거리비, 무차원 반경비, 무차원 폭비 등을 연구하였다. 또한, 조강래 등[4]은 두 가지 형태의 프로펠러팬에 대하여 덕트 입구의 상대위치, 덕트 주위의 배플의 크기가 팬의 특성 및 덕트 입구 전방 유동장에 미치는 영향을 연구하였고, 입구 유입조건의 변화에 대하여는 Ariga 등[5]이 허브축

과 끝단측, 그리고 회전방향의 불균일성에 대하여 연구하였다. Kiya 등[6]은 후류와 물체의 상호작용에 의한 소음실험을 수행하였다. 특히, Fukano 등[7]과 Elonghouse[8]은 축류팬에서 날개 끝단 간격(tip clearance)에 의한 유동손실 및 소음의 영향을 연구하였다. 이렇듯 프로펠러팬 단품에 대한 연구뿐만 아니라 팬 주위 구조물, 즉 시라우드의 형상과 상대위치 그리고 유입 조건 등에 따른 영향도에 대한 연구들이 대부분 실험적 방법에 의해 수행되어져 왔다.

그런데, 최근에는 급속한 컴퓨터의 발달과 더불어 3차원 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 통한 유동장 해석이 급속히 발전하였고, 이를 통해 팬의 단품 해석은 물론, 전체 시스템적 유동장 해석 등 다양한 연구가 여러 분야에서 수행 중이며 실제 많은 연구성과들이 나오고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 에어컨 실외기의 성능을 향상시키기 위하여 시라우드 형상 설계를 해석적으로 접근하였다. 우선 최적설계를 위한 많은 해석 Case-4인자 3수준에 대한 작업 부하(load)를 줄이기 위해 VBA를 통한 자동화 프로그램을 구성하여 해석에 필요한 툴(tool)들을 직접 제어하였다. 그리고 설계인자들은 기구적으로 구현 가능한 범위 내에서 실험계획법(DOE : Design of Experiment)을 생성하여 해석을 진행하여, 마침내 풍량성능에 대한 시라우드 형상인자의 영향도를 수학적으로 예측하여 관계식을 유도하였다.

끝으로, 본 연구결과를 바탕으로 풍량성능에 큰 영향을 주는 설계인자의 기구적 제한성을 극복하기 위해 새로운 팬(fan)에 대한 형상을 제안하고, 진행 중인 연구에 대해 간략히 소개하고자 한다.

\* 정회원, (주)삼성전자 생활가전, jo.han@samsung.com

\*\* (주)삼성전자 생활가전, shun.yu@samsung.com

\*\*\* (주)삼성전자 생활가전, jinyong.mo@samsung.com

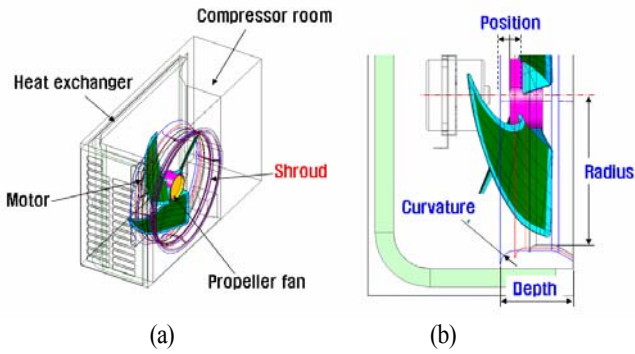


Fig. 1 Schematic Diagram of (a) outdoor unit and (b) shroud

## 2. Shroud 형상 설계

### 2.1 에어컨 실외기 구성

일상에서 흔히 볼 수 있는 에어컨 실외기는 Fig. 1에 보는 바와 같이 세트(set), 열교환기(heat exchanger), 모터(motor), 압축기룸(compressor room), 프로펠러팬(propeller fan) 그리고 시라우드(shroud) 등으로 구성된다. 압축기와 함께 주소음원인 프로펠러팬은 모터의 회전력을 전달받아 날개를 회전시켜 팬의 전·후에 압력차를 발생시키게 되는데, 이때 발생된 압력차에 의해서 냉동 사이클이 운전될 때 발생된 고온의 냉매를 열교환기를 통해 강제 열전달을 시키는 역할을 수행하게 된다. 여기서, 팬 주변의 유로 구성물인 시라우드(shroud)는 팬 외주부에 형성되어 프로펠러팬의 압력상승에 의한 송풍량을 확보하는데 있어서 손실을 작게 하면서 팬 효율을 극대화하여 설계자가 원하는 송풍량 및 소음을 확보하도록 하는 역할을 한다.

### 2.2 설계인자 및 수준

실외기의 풍량성능을 향상하기 위한 시라우드 형상 파라미터(parameter)로 Fig. 1과 같이 팬의 설치위치, 시라우드 반경, 깊이, 유입구 곡률 등 4개의 인자를 선정하였으며, 인자의 정확한 영향도를 판단하기 위해 각 인자에 대하여 Table 1과 같이 3수준 해석을 진행하였다.

Table 1 Design Factors and Levels

Factors	Levels		
	-1	0	+1
Position (p)	-0.05	0.00	0.05
Radius (r)	1.0250	1.0438	1.0625
Depth (d)	0.3	0.4	0.5
Curvature (c)	0.050	0.075	0.100

\* Non-dimensional value

Table 1에 나타난 시라우드 설계인자 p, r, d, 그리고 c는 각각 팬의 설치위치, 시라우드의 반경, 시라우드의 깊이, 그리고 유입구 곡률을 팬의 반경으로 나눈 무차원 값으로 그 범위(level)는 열교환기, 모터브라켓(bracket motor), 그리고 압축기룸(compressor room)과의 기구적 간섭, 실제 설계 및 운전을 고려한 제한적 수준임을 미리 밝혀둔다.

## 3. 해석 방법

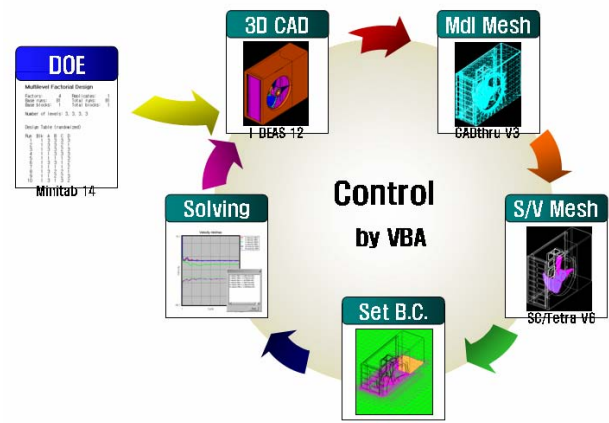


Fig. 2 Automatic Job Process

### 3.1 해석자동화 프로세스

본 연구에서는 선정된 4인자 3수준의 해석적 DOE를 진행하기 위해서는 81회의 해석 작업이 필요하게 되는데, 이와 같이 많은 부분의 반복적인 작업을 자동화하기 위해서 VBA (Visual Basic Application)을 이용하여 해석에 사용되는 툴(tool)들을 직접 제어하였다.

자동화를 위한 작업 프로세스는 Fig. 2에 나타난 바와 같이, 우선 통계 프로그램인 Minitab 14를 이용하여 4인자 3수준의 DOE를 생성하였으며, 이렇게 생성된 변수들의 조합은 3D CAD 프로그램인 I-DEAS 12를 이용하여 3차원 모델링(modeling)하고, 이후 CADthru V3를 이용하여 요소(element) 모델 작업을 진행하였다. 이 후 SC/Tetra V6을 이용하여 공간에 대한 격자(mesh) 생성, 경계조건의 설정, 그리고 해석(solving) 작업 등을 진행하였다.

### 3.2 해석 조건

해석영역은 Fig. 3과 같이 직경이 10W(W:세트 폭)인 반구형으로 구성하였으며, 반경방향으로는 외부와의 자유로운 유동의 유출입을 위해  $P_s = 0$  [Pa]을 지정하였고, 바닥은 실제 세트의 설치조건과 같이 'wall' 조건을 지정하였다. 또한, 불연속(discontinuous) 및 이동격자(moving mesh) 영역을 구성하여 팬을 62.83rad/sec으로 운전하였으며, 열교환기의 특성을 적용하기 위해 실험을 통해 통과 유속에 대한 압력강하를 측정하여 해석조건에 반영토록 하였다.

이와 같이 구성된 해석모델의 격자수는 약 500~550만개로 Tetra, Hexa, 그리고 Prism 등으로 구성되어 있으며, Intel Xeon @ 2.33GHz 8-CPU를 이용한 병렬처리로 5 cycle 동안  $\Delta t = 2.778E-4$ [sec]의 비정상 해석(transient analysis)을 수행하였다.

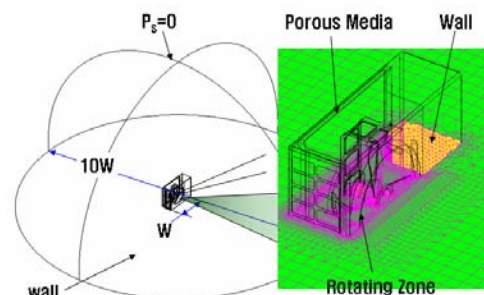
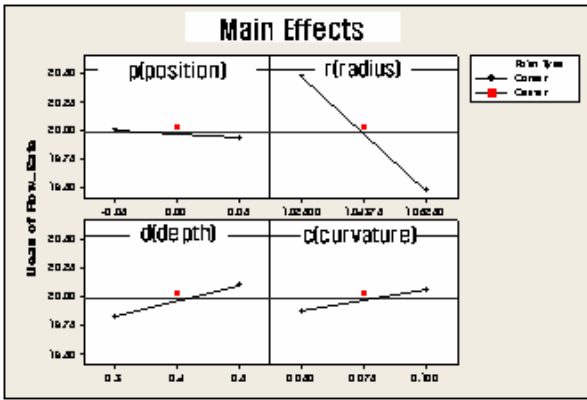
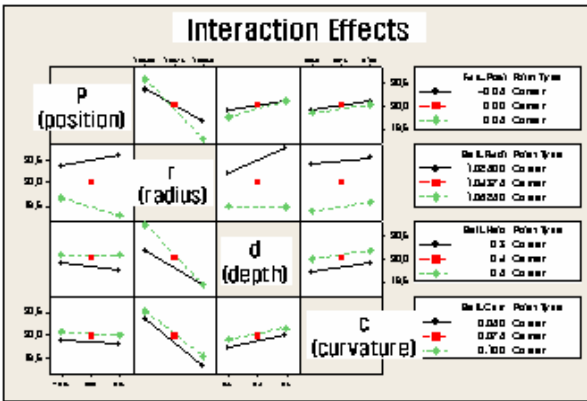


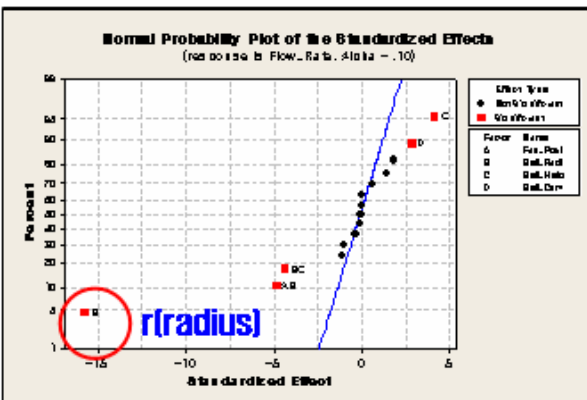
Fig. 3 Computational Domain and Boundary Conditions.



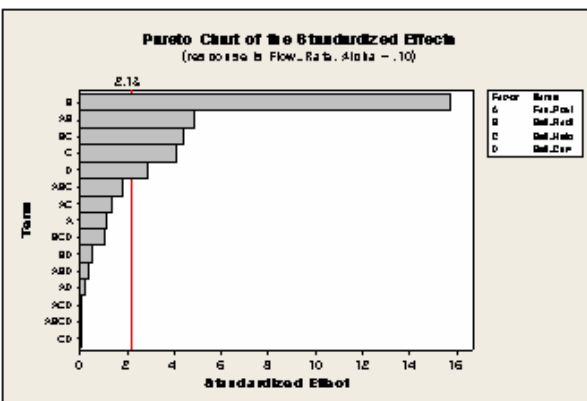
(a) Main Effects



(b) Interaction Effects



(c) Normal Probability Plot



(d) Pareto Chart

Fig. 4 Charts of the Main Effects and Standardized Effects by Factors.

## 4. 해석 결과

### 4.1 수학적 모형식

우선 본 연구는 시라우드의 설계인자에 대한 영향도를 보다 정확하게 분석할 목적으로 4인자 3수준으로 많은 경우의 해석을 진행하였다. 그러나 통계 프로그램을 통한 분석결과는 각 인자에 대한 독립적 영향도는 밝힐 수 있었으나 인자간 복잡한 교호작용(interaction effect)으로 인하여 풍량성능에 대한 인자별 수학적 관계식을 도출하지는 못하였다. 이는 실험계획법[9]을 이용하여 축류팬 인자에 대해 연구한 Kamaya 등[10]의 연구 결과처럼 인자간의 교호작용으로 인하여 나타나는 산포(signal to noise ratio)를 극복하지 못한 결과로 사료된다.

이와 같은 이유로 본 연구는 이미 해석된 결과로부터 4인자 2수준의 DOE를 다시 생성하고, 이에 맞는 해석 결과를 재정리하여 영향도가 적은 인자들의 4차항 및 3차항 들을 순서대로 제거(screening)해가며 해석결과를 재분석하였다. 여기에는 각 인자들의 곡률효과를 검증하기 위한 중앙값이 포함되었다.

Fig. 4 (a)의 결과를 보면, 수준 내의 인자들은 성능에 선형적인 영향을 주고 있음을 알 수 있으며, r에 의한 영향도가 해석 수준 내에서 약 10%로 성능에 큰 영향이 미침을 알 수 있는데, 이는 시라우드와 팬과의 간격이 커지면서 발생하는 유동 및 압력손실에 의한 풍량감소를 의미한다. 반면, p에 의한 주인자 효과는 해석수준 내에서 1% 이내로 매우 미미함이 관찰되나, Fig. 4 (b),(c),(d)에서는 r과의 교호작용효과가 다른 인자에 비해 매우 크다는 것을 관찰할 수 있다.

또한, d와 c의 영향도는 r에 비해 작으나, 풍량성능에 대해 양(+)의 영향도가 있음을 알 수 있다. 이는 본 해석 모델과 인자수준에 있어서는 시라우드의 깊이가 깊고 유입구 곡률이 커질수록 풍량성능이 증가함을 의미한다. 반면 Fig. (b)에서는 c에 의한 교호작용은 거의 없이 독립적인 영향만 존재함을 알 수 있다.

본 연구에서는 주인자 및 인자별 교호작용효과 등이 풍량성능에 얼마의 영향을 주는지 Fig. (c),(d)에 나타내었고, 풍량성능에 대한 각 인자들간의 관계를 예측하여 모형식을 식 (1)과 같이 도출하였다.

$$Q = C_1 + C_2[p] + C_3[r] + C_4[d] + C_5[c] + C_6[p][r] + C_7[r][d] + C_8[p][r][d] \quad (1)$$

여기서,  $C_1=15.67$ ,  $C_2=172.5$ ,  $C_3=3.367$ ,  $C_4=80.30$ ,  $C_5=3.625$ ,  $C_6=-169.4$ ,  $C_7=-75.67$ , 그리고  $C_8=8.457$  이다. 식 (1)을 통해서  $p=0.05$ ,  $r=1.025$ ,  $d=0.5$ , 그리고  $c=0.1$ 일 때 최대성능을 나타내며,  $p=0.05$ ,  $r=1.0625$ ,  $d=0.3$ , 그리고  $c=0.05$ 에서 최소성능을 보이고, 최대사양과 최소사양은 약 10%의 성능차이가 발생함을 알 수 있다.

### 4.2 소음 해석

최대사양과 최소사양에서의 소음해석을 위해서 Flownoise V3.7을 이용하였다. 수음점은 세트의 1m 전방에 위치시키고, 팬, 시라우드, 세트 내부, 그리고 모터브라켓 등 4개 부분을 2

극자(dipole) 소음영역으로 구분하여 해석을 수행하였다.

해석결과는 Table 2와 같이 약 10% 풍량성능이 향상된 최대 풍량 사양이 최소풍량 사양 시보다 소음이 약 1.2dBA 감소함을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of SPL at the Best Spec. and the Worst Spec.

Spec.	SPL(dBA)			
	Fan	Shroud	Inner Set	Motor
Best case	30.7	23.0	31.0	14.0
Worst case	32.3	24.2	31.9	14.7

### 4.3 ProBeller Fan

해석적 연구결과를 통하여 날개의 끝단 간격(tip clearance)가 풍량성능에 매우 큰 영향이 있음을 알 수 있었으며, 또한 끝단 간격이 작으면 작을수록 풍량이 증가하는 경향을 파악할 수 있었다. 그러나 기존의 팬과 시라우드 구조에서는 운전 시 날개의 변형 및 기구적 간섭 등의 문제로 끝단 간격을 팬 반경의 2% 이하로 관리하기가 어려워 어느 정도의 유동 손실을 안고 설계되어 왔다.

이에 본 연구에서는 이러한 끝단 간격에 의한 유동 손실을 최소화하기 위해 연구가 진행 중인 팬과 시라우드가 일체화되어 같이 회전하는 일명 ‘ProBeller’ 팬을 간략히 소개하고자 한다.

그 형상은 Fig. 5와 같이 팬 날개 끝단에 시라우드의 일부 또는 전체가 일체화 되어 있어 팬과 함께 회전하는 형상으로 고정부와 임의의 간격은 피할 수 없었다. 그러나 이러한 간격에 의한 손실을 해석적으로 평가한 결과는 Table 3과 같이 토출풍량, 토크(Torque), 그리고 해석적 SPL 측면에서 동등한 성능이 발휘됨이 검증되었다. 여기서 기존 ‘Propeller’ 및 ‘ProBeller’ 팬과 시라우드와의 간격은 팬 반경의 2.5%로 유지하였고, 고정부와 회전부와의 간격도 2.5%를 유지하여 연구를 진행하였다.

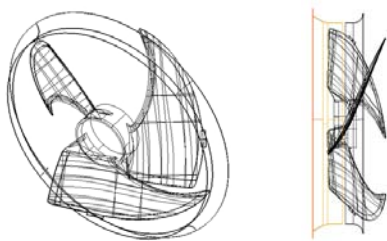


Fig. 5 Schematic Diagram of the ProBeller Fan

Table 3 Comparison of Performance

	Q[CMM]	Torque[N.m]	SPL[dBA]
Propeller Fan	20.9	0.1605	31.4
ProBeller Fan	20.8	0.1573	31.6

## 5. 결론

에어컨 실외기에서 프로펠러팬의 성능을 극대화하기 위해 시라우드 설계변수에 대해 해석적 DOE를 진행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 팬과 시라우드와의 간격이 풍량성능에 상대적으로 큰 영향도를 나타내었고, 간격이 작을수록 풍량성능이 증가하였다.
- 2) 팬의 설치위치는 알려진 바와 같이 독립적으로는 그 영향도가 미미하나, 다른 인자와의 교호작용 효과는 크게 나타남을 알 수 있었다.
- 3) 시라우드 깊이, 유입구 곡률의 영향도는 상대적으로 작으나, 깊이가 깊고 곡률이 클수록 풍량성능이 증가하였다.
- 4) 최대풍량의 설계사양에서 소음해석 결과, 풍량성능이 10% 증가함에도 불구하고 1.2dBA 소음저감 효과가 나타남을 알 수 있었다.
- 5) 날개 끝단 간격의 유동손실을 최소화 하기 위한 새로운 형상의 ‘ProBeller’ 팬을 제안하였다.

## 참고문헌

- [1] T. Fukano, 1990, "Experimental Study on the Noise Reduction of Propeller Fan", Transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, 3378, Vol. B, 5-531, pp. 174~184.
- [2] N. Yamakuchi, H. Kondo, Y. Aoki, and T. Tominaga, 1990, "Noise Reduction in Propeller Fans for Air Conditioners", 三菱重工技報, Vol. 27, No. 3 pp. 267~272.
- [3] S. Sato, K. Kinoshita, 1993, "Improvement in Performance of Propeller Fans for Outdoor Units of Airconditioners", The 4th Asian International Conference on Fluid Machinery, Suzhou, China, pp. 166~170.
- [4] 김종수, 조강래, 1995, "덕트의 입구조건이 팬의 특성에 미치는 영향", 공기조화냉동공학논문집 제7권 제2호, p. 217.
- [5] I. Ariga, N. Kasai, S. Masuda, Y. Watanabe, and I. Watanabe, 1983, "The Effect of Inlet Distorsion on the Performance Characteristics of a Centrifugal Compressor", Journal of Engineering for Power, Vol. 105, p. 223.
- [6] O. Machizuki, M. Kiya, 1995, "Aerodynamic Sound Generated by Wake-Body Interaction", ASME NCA, Vol. 19, p. 23.
- [7] T. Fukano, Y. Takamatsu, Y. Kodama, 1986, "The Effects of Tip Clearance in the Noise of Low Pressure Axial and Mixed Flow Fans", Journal of Sound Vibration, Vol. 105[2], pp. 291~308.
- [8] R. Elonghouse, 1978, "Control of Tip-Vortex Noise of Axial Flow Fans by Rotating Shrouds", Journal of Sound Vibration, Vol. 58[2], pp. 201~215.
- [9] Phadke, M. S., 1989, "Quality Engineering Using Robust Design", Prentice-Hall International Inc.
- [10] S. Kamaya, S. Kanabayashi, 1990, "A Study on Noise Reduction for Small Axial Flow Fans", 日本機械學會論文集 (B編), 第 56卷 第 531號, pp. 204~208.