

소형 터보팬 설계인자와 음질의 상관관계에 의한 설계 최적화[#]

Design Optimization by the Correlation between the Design Parameter and the Sound Quality of Small Turbo-fan

김 휘 중* · 정 용 규** · 이 정 수** · 이 승 배†

Hooi-Joong Kim, Young-Gyu Jung, Jung-Soo Lee and Seungbae Lee

(2005년 12월 22일 접수 ; 2006년 4월 8일 심사완료)

Key Words : Loudness(라우드니스), Roughness(러프니스), Sharpness(샤프니스), Fluctuation Strength(변동 강도), Sound Quality(음질), Response Surface(반응면)

ABSTRACT

The state-of-the-art of low-noise fan design usually includes the consideration of optimal sound level and sound quality. The influential design parameters of the noise level by the centrifugal fan were selected based on the preliminary test. The centrifugal fans were designed according to the experiment plan method by specifying the selected design parameters. The experiment with these machined mock-up's of centrifugal impellers suggested the major design parameters among many, having impacts upon the indices of sound quality (e.g. loudness, sharpness, roughness and fluctuation strength) at the same operation point. With the response surface method, the major design parameters selected thereafter were analyzed to estimate each contribution upon the sound quality of the centrifugal fan, and the optimal values were drawn by the consideration of the sound quality levels and their regression equations. In addition, the validity of the regression equations was numerically verified by means of the coefficient of determination. Furthermore, the mechanism by which the centrifugal fan impeller influences the determinants of its sound quality was suggested.

1. 서 론

생활수준의 향상과 함께 소음에 대한 관심이 높아지고 있다. 이런 소음의 발생은 생활 내에서 사용되는 가전기기들에 의해서 발생하는 경우가 대부분이며 가전기기 내에서 발생하는 여러 가지 메커니즘에

의한 다양한 소음원들이 존재하게 된다. 이런 소음에 관한 문제들 가운데 회전기기인 팬에 의한 소음은 주기적인 회전수에 의해서 발생하는 톤 소음의 영향이 지배적으로 나타난다. 이러한 소음은 최적화된 팬의 설계를 통해 저감하려는 다양한 연구들이 진행되어 왔다.^(1~5) 최근에는 반응면 기법을 통해서 임펠러를 최적화하는 연구들이 수행된 바 있다.^(6~7)

일반적으로 가전기기의 소음 제어는 다양한 소음원의 개별적 A-가중치(weighting) 소음 레벨을 저감하는 목표를 두고 수행되어 왔다. 그러나 최근에는 제품의 소음 저감뿐만 아니라, 소비자에 의한 제품의 선호도 측면에서 작동되는 가전기기에서 불쾌감(annoyance)이 느껴지지 않고 편안함을 느끼게 하는 소리에 대한 연구가 수행되고 있다.^(8~10) 최근

† 책임저자; 정회원, 인하대학교

E-mail : sbaelee@inha.ac.kr

Tel : (032) 860-7325, FAX : (032) 868-1716

* 인하대학교 산업과학기술연구소

** 인하대학교 기계공학과

이 논문은 2005 추계 소음진동 학술대회 우수논문으로 추천되었음.

이러한 음질에 관한 연구는 지금까지 전체 시스템에 적용해 왔을 뿐 각 단품에 적용해서 시스템으로 접근하려는 시도가 없었으며, 시스템에서 발생하는 문제를 피드백 방식으로 접근해 왔다.

가전제품에서 발생하는 소음들 중 소비자들의 주관적인 평가가 다양한 가전제품이 냉장고이다. 냉장고의 경우 소음은 크게 압축기소음, 냉기 순환용 냉동실의 팬 소음, 압축기 및 응축기 냉각용 기계실 팬 소음과 냉매 소음으로 구분된다. 냉장고 냉기 순환용 유체기계로써 축류팬이 주로 사용되고 있으며, 축류팬의 유동 소음을 저감시키기 위한 방법으로써 냉장고 유로 및 유로 저항에 적합하도록 날개 형상을 최적화하는 방법이 적용되고 있다. 그러나 냉장고의 사용 환경과 온도 변화에 따라 요구되는 유량 및 유로저항이 증가하게 되며, 회전수 증가와 이로 인한 소음 증가가 발생하게 되어 이를 근본적으로 해결하는데 한계가 있다.

이 논문에서는 이러한 냉기 순환을 목적으로 하는 축류팬을 대체하기 위한 수단으로 원심팬을 제안하였으며, 원심팬 설계인자가 감성적인 면에서 어떻게 기여하는지를 소음레벨 및 청감 측면에서 분석하여 최적의 원심팬 설계인자를 찾고자 한다. 이를 위해서 예비 실험을 통하여 원심팬의 주요 설계인자를 선정하였으며, 실험 계획법과 반응 표면 기법을 이용하여 설계인자를 배열하였다. 모든 원심팬의 음질 및 소음은 동일 운전조건에서 비교해야 하기 때문에 원심팬의 성능에 대한 원심팬의 설계인자는 매우 중요하다. 이러한 설계인자들을 사용해 각각의 음질에 대한 평가를 수행하였으며 최적의 음질을 나타내는 설계인자들의 조합을 구하였다.

2. 음질 요소(Sound Quality Parameters)

음질에 대한 관심의 증대는 동작 중인 제품에서 발생하는 소리가 주관적으로 인지됨에 있다. 음질의 평가 방법은 크게 수학적인 표현식에 근거한 객관적인 평가 방법과 임상 실험 방법으로 청취자들의 주관적 평가 결과를 통계 과정을 거쳐 평가하는 주관적 평가 방법으로 구분할 수 있다. 임상 실험을 통한 주관적인 평가 방법은 많은 비용과 시간 또는 피실험자의 교육 등 많은 노력이 필요하다. 주관적인 음질 평가 결과를 통한 청감 계산 모델을 이용한 객

관적인 평가 방법을 사용함으로써 주관적 평가 방법의 단점인 비용과 시간을 줄이고 임상 실험 없이 음질을 예측할 수 있다. 그러나 객관적인 평가 방법은 라우드니스의 경우 Zwicker(ISO R 532B, 1958)와 Steven(ISO R 532A, 1961)이 기준을 제시하였지만 다른 요소들은 규격화 되어 있지 않다. 하지만 그 밖의 경우에 대해 상대 비교적 개념에서 사용된다면 최적인 음질 요소를 찾는 데 중요한 의미를 가진다.

일반적으로 음질에 영향을 주는 요소로는 라우드니스(loudness), 샤프니스(sharpness), 러프니스(roughness), 변동강도(fluctuation strength) 등을 정의한다.⁽¹¹⁾

2.1. 라우드니스(Loudness, L)

라우드니스는 주관적으로 느끼는 소리의 크기를 의미한다. 이는 음압레벨과 밀접한 연관성을 나타내고 동일 주파수의 톤소음이 크면 소음레벨과 라우드니스가 동시에 커진다. 그러나 동일한 음압레벨에서 주파수 크기가 다른 톤소음의 경우 인간의 귀의 외이에서 내이로의 음향 감쇠특성이 대역폭에 따라 다르게 인지되므로 라우드니스는 다르게 나타난다. 라우드니스의 단위는 sone과 phon으로 1 sone은 1 kHz 순음의 40 dB 값으로 정의된다.

라우드니스는 다음과 같이 계산된다.

$$N = \int_0^{24k} N' dz, \text{ sone} \quad (1)$$

여기서 N' 은 비-라우드니스 이며 phon과 sone의 관계는 다음과 같다.

$$P = 40 + 10 \log \frac{N}{2}, \text{ phon} \quad (2)$$

라우드니스 계산은 Zwicker가 제안한 방법으로 1/3 옥타브대역을 사용하였다.

2.2. 샤프니스(Sharpness, S)

샤프니스는 고주파수 특성을 가지고 있으며 날카로운 음압 신호를 주로 인지한다. 샤프니스는 라우드니스의 비-라우드니스(specific loudness) 값을 이용해 저주파-고주파 성분 간의 분포에 의해서 결정된다. 이는 동일한 음압레벨에서 주파수가 증가함으로써 샤프니스가 증가한다는 것을 의미한다.

샤프니스의 단위는 acum으로 1 acum은 1 kHz에서의 60 dB의 순음을 나타낸다. 샤프니스는 다음과 같이 계산된다.

$$S = 0.11 \frac{\int_1^{24k} N'(z) \cdot g(z) \cdot z \cdot dz}{\int_1^{24k} N'(z) \cdot dz}, \text{ acum} \quad (3)$$

$$g(z) = \begin{cases} 1 & \text{for } z \leq 16 \\ 0.066 \cdot e^{0.171 \cdot z} & \text{for } z \geq 16 \end{cases}$$

여기서 z 는 임계대역율, $g(z)$ 는 임계대역율의 함수이다.

2.3. 러프니스(Roughness, R)

15 Hz에서 300 Hz까지의 음의 진폭이나 주파수를 변조시 음의 크기 변화를 느끼지 못하게 되며, 이러한 거친 느낌을 나타내는 지표가 러프니스이다. 단위는 asper를 사용하며 1 asper는 1 kHz의 순음이 70 Hz에서 변조가 100% 일어날 때의 값을 나타낸다. 일반적으로 변조도가 증가하면 이 값이 증가하며 1 kHz 부근에서 가장 큰 값을 나타낸다.

러프니스는 다음과 같이 계산된다.

$$R = 0.3 f_{\text{mod}} \int_0^{24k} \frac{\Delta L_E(z) dz}{dB/k}, \text{ asper} \quad (4)$$

여기서 f_{mod} 는 변조주파수(kHz), $\Delta L_E(z)$ 는 각 Bark 대역에서의 일시적인 마스킹 효과의 폭이다.

2.4. 변동강도(Fluctuation Strength, F)

변조주파수가 20 Hz 미만인 음의 주기적인 변동으로 귀에서 시간에 따른 음의 크기 변화로 인식되며, 변동강도는 이 때 청감에 의한 크기 변조량이다. 단위는 vacil이며 1 vacil은 1 kHz의 순음이 4 Hz의 변조주파수로 100% 변조될 때의 레벨로 정의된다.

$$F \sim \frac{0.008 \int_0^{24k} \Delta L dz}{(f_{\text{mod}}/4\text{Hz}) + (4\text{Hz}/f_{\text{mod}})}, \text{ vacil} \quad (5)$$

여기서 ΔL 은 마스킹 폭이다.

3. 반응면 기법(Response Surface Regression)

반응면 기법은 실제 반응 함수를 근사적인 다항 함수로 모델링하기 위해 물리적 또는 수치적인 실험으로부터 얻어진 결과들을 이용하는 일련의 수리 통계적 기법이라고 할 수 있다.⁽¹²⁾ 본래 물리적 실험을 통해 관찰된 값들로부터 단지 경험적인 관계식을 만들기 위해 이용되었지만, 적은 횟수의 실험을 통해 시간과 비용을 적게 소비하면서 최적 조건을 결정하는데 있어서 효율적인 방법이다.

반응면 기법에 있어서 임의 공간에서 주어지는 독립 변수들로 인해 얻어지는 물리적 또는 수치적 실험의 결과를 반응(response)라고 한다. 반응면을 이용한 최적 설계란 설계 공간 내에서 반응을 최대화 또는 최소화하는 독립 변수의 집합을 구하는 것으로 그 관계는 다음과 같다.

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_k) + \epsilon \quad (6)$$

여기서 f 는 실제 반응 함수를 의미하며, ϵ 는 주요 독립 변수 이외의 요인이 반응에 기여하는 양으로써, 반응 함수가 예측하지 못하는 통계적 오차로 간주된다. 이 오차 ϵ 의 평균값이 0으로 하는 정규분포를 따른다고 가정된다.

실제 반응 함수 f 는 알 수 없거나 매우 복잡한 형태를 취하고 있으므로 이를 가정하는 과정이 필요하며, 적절한 가정은 반응면 기법의 성공 여부와 직접적으로 연관이 되어 있다.

일반적으로 반응 모델 f 를 이차 다항식으로 가정할 경우 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{j < j'} \beta_{jj'} x_j x_{j'} \quad (7)$$

여기서 k 는 설계 변수의 수를 의미하며, 회귀상수 (β_0, β_1 등)의 개수는 $n_t = (k+1)(k+2)/2$ 이다. 실험 데이터로부터 적절한 β 값을 도출하여야 하는데 이는 최소 자승법(least squares method)을 사용하여 구할 수 있다. 구성된 다항식 반응면의 각 항에 속한 미결정계수들을 합리적으로 결정하고, 이 미결정계수들의 타당성을 검증하는 과정이 ANOVA (analysis of variance)와 회귀 분석(regression analysis)이다. 미결정계수의 불확실성은 T-statistics를 이용해 평가할 수 있다.

이 연구에서는 통계학 상용 소프트웨어인 MINITAB⁽¹³⁾을 사용하였다. 실험에 의해 취득한 자료들의 각각의 음질값들이 2차 다항식의 반응면을 구성하였는지를 나타내는 지표로 R_{adj}^2 을 사용하며, 이 값이 클수록 정확한 반응 모델이 구성되었음을 의미한다. 즉 R_{adj}^2 값이 90%라는 것은 반응모델이 목적값의 90%를 설명할 수 있다는 것이다.

이 연구의 실험을 계획하고 수행하는데 있어서 실험의 오차를 최소화하기 위해서 랜덤(random), 반복, 블록화(block), 교락, 직교화 등의 원칙을 바탕으로 인자를 배열하고 데이터를 수집, 분석하였다.

실험 원칙에 따른 실험의 횟수 및 비용을 줄이기 위하여 예비 실험(preliminary test)을 수행하였으며, 냉장고 냉기 순환환의 성능과 소음에 가장 크게 영향을 미치는 주요 설계인자 4개를 선정하였다. 주요 설계 인자로 날개 입구각(β_1), 출구각(β_2), 내외경비(D_1/D_2), 솔리더티($\sigma=C/s$)를 선정하였으며 각 설계변수의 정의는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 또한 실험 계획법의 인자배열을 이용하여 4인자 3수준의

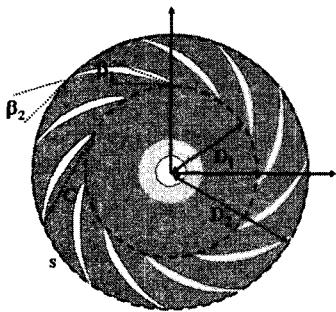


Fig. 1 Design parameters of small turbo-fan

Table 1 Selected design parameters of small turbo-fan

No.	D1/D2	$\beta_1(^{\circ})$	$\beta_2(^{\circ})$	σ
1	0.59	25	32	0.8
2	0.59	32	40	0.92
3	0.59	39	48	1.04
4	0.64	25	40	1.04
5	0.64	32	48	0.8
6	0.64	39	32	0.92
7	0.69	25	48	0.92
8	0.69	32	32	1.04
9	0.69	39	40	0.8

L_9 인자 배열을 선정하여 Table 1과 같은 변수들을 갖는 원심환을 설계하였다.

4. 실험장치 및 실험결과

4.1 실험장치

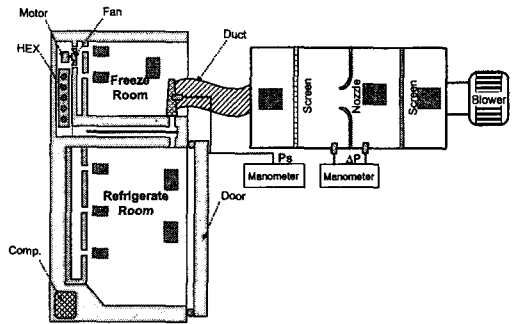


Fig. 2 Flow-rate measurement set-up for refrigerator using a fan tester

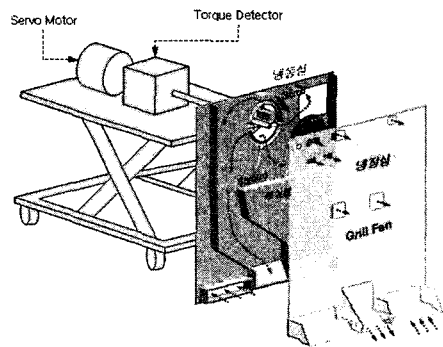


Fig. 3 Torque-meter measuring fan-motor efficiency

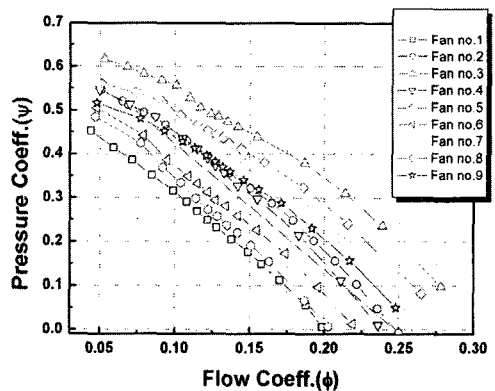


Fig. 4 Performance curves of each tested fan

냉장고 고내의 유량측정을 위한 장치는 Fig. 2와 같이 AMCA 210-85 규격에 따라서 제작되었으며, 측정 가능한 유량 대역은 0.2 CMM에서 12.0 CMM이다. 이는 원심팬 설계 인자에 따른 음질을 평가하기 위하여 냉장고 고내 유로 저항을 모사한 풍동이며, 냉장고 고내 유로 정압과 유량이 동등한 조건에서 실험을 수행하였다. 공기는 벨 마우스(bell mouth) 입구를 통해 들어와 회전하는 임펠러에서 가속된 후 풍동 내부로 들어가게 된다. 주 모터는 실험에 사용되는 원심팬을 구동하며, 보조 모터로 구동되는 배기팬의 회전수를 제어함으로써 유량을 조절할 수 있도록 구성되었다. 실험계획법에 의해서 제작된 설계 원심팬을 냉장고에 장착하여 팬만을 구동시킨 상태에서 냉장고 고내의 유량을 측정하였으며, 이를 통하여 원심팬의 운전점인 시스템 정압과 유량을 측정하였다. Fig. 3은 토크미터를 이용하여 각 팬들의 효율을 측정하는 장치를 보여준다.

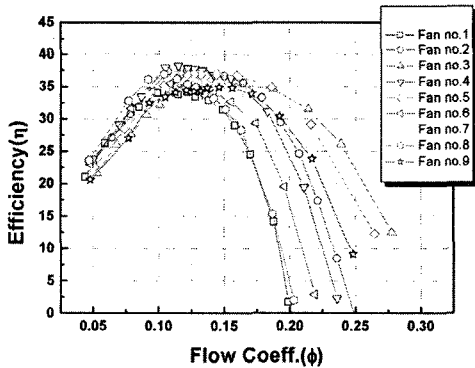


Fig. 5 Efficiency curves of each tested fan

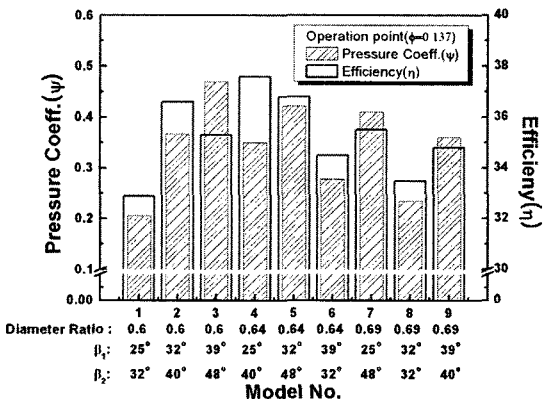


Fig. 6 Comparison of its performance at each design point

Fig. 4와 5는 각 설계인자에 의한 9가지 경우의 성능 및 효율 곡선을 나타내며, 실제 작동 조건인 유량계수 조건에 따라 다시 정리하면 Fig. 6에서와 같다. 이 그림으로부터 설계 변수 중 출구각이 커지면 압력계수도 증가함을 알 수가 있다. 효율은 전체적으로 입구각과 내외경비가 커질수록 증가하는 경향을 보인다. 이 연구에서 설계한 팬들의 비속도 ($N_s = NQ^{1/2}/(\Delta P_T/\rho)^{3/4}$)들의 범위는 1.92에서 3.64이다.

설계된 팬 소음 및 음질 측정은 인하대학교 기계공학과 무향실⁽¹⁴⁾에서 수행되었다. 소음 측정 장비는 1/2" 마이크로폰을 사용하였으며, FFT analyzer (SRS 780)를 사용하여 주파수 분석을 하였다.

각 팬의 운전점 조건에서 Fig. 7과 같이 제작된 소음 측정 챔버를 이용하여 팬 단독 소음을 측정하였다. 이 챔버는 Myler 필름으로 덮혀 있어 가능한 챔버 벽면 반사장으로 인한 공명소음을 최소화하도록 설계되었다. 원심팬의 소음측정은 유동의 토출 방향에서 45° 경사진 위치에서 1/2" 마이크로폰

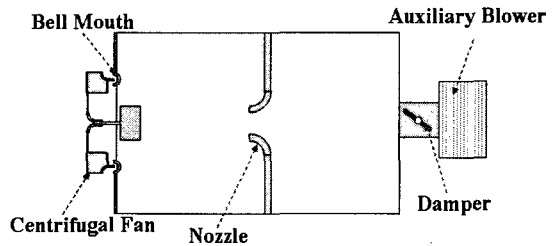


Fig. 7 Experimental setup measuring radiated sound from a test fan using mylar-film covered chamber

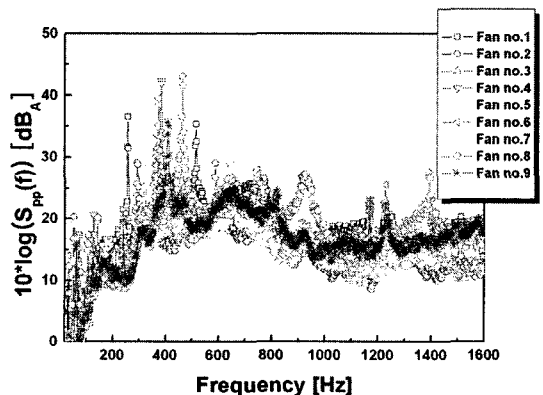


Fig. 8 Sound spectrum of each tested fan

을 이용하여 측정하였으며, 각 인자 원심팬의 음질 특성을 정확히 구분하기 위하여 팬으로부터 10 cm 떨어진 위치에서 A/D 컨버터로 신호를 취득하였다. 이 측정된 신호들은 MTS sound quality⁽¹⁵⁾ s/w로 처리하였다.

Fig. 8은 0.5 m 이격 거리에서 측정한 소음스펙트럼으로 9가지 팬의 이산소음 특징들을 보여주고 있다. 그러나 이 스펙트럼 분석으로는 정확한 소음원들의 영향을 정확히 분석하기 어렵기 때문에 이 논문에서는 각 설계변수들에 의한 소음의 특징들을 분석하기 위해 신호처리의 방법 중 음질 관점에서 접근하였다.

일반적으로 라우드니스는 1/3 옥타브의 해석에 마스크 효과를 고려하여 계산되며 이 변화량은 음압의 크기 변화에 민감한 영향을 받는다. 샤프니스는 동일한 음압레벨에서 주파수가 증가함에 따라 증가하는 경향이 보이고 주파수 성분과 협대역음의 중심 주파수가 주요 영향을 미친다. 러프니스는 음의 크기 변화보다는 소음에 대한 느낌이며, 변동강도는 변조 주파수가 20 Hz 미만인 경우 청감의 느낌이며 러프니스에 비해 청감에 더욱 민감한 지표이다. 이와 같이 각 음질 인자들은 주파수 및 크기에 따라 각각 음질 특성을 가지고 있으며, 이러한 객관적인 음질 인자와 주관적인 청감실험의 상관관계를 통해 청감의 유효성에 관한 연구들이 활발히 수행된 바 있다.⁽¹⁶⁻²¹⁾ 또한 자동차, 가전기기 등 적용분야에 따라 음질 인자들 간의 상관관계가 차이를 보이나, 각 음질 인자들을 정확히 정량적인 청감으로 표현하기 다소 어려운 주관적인 측면을 가지고 있다.

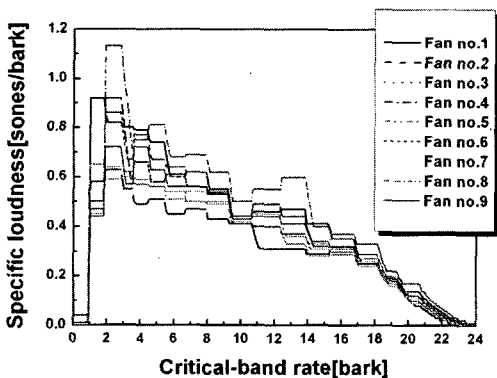


Fig. 9 Specific-loudness curves of each tested fan

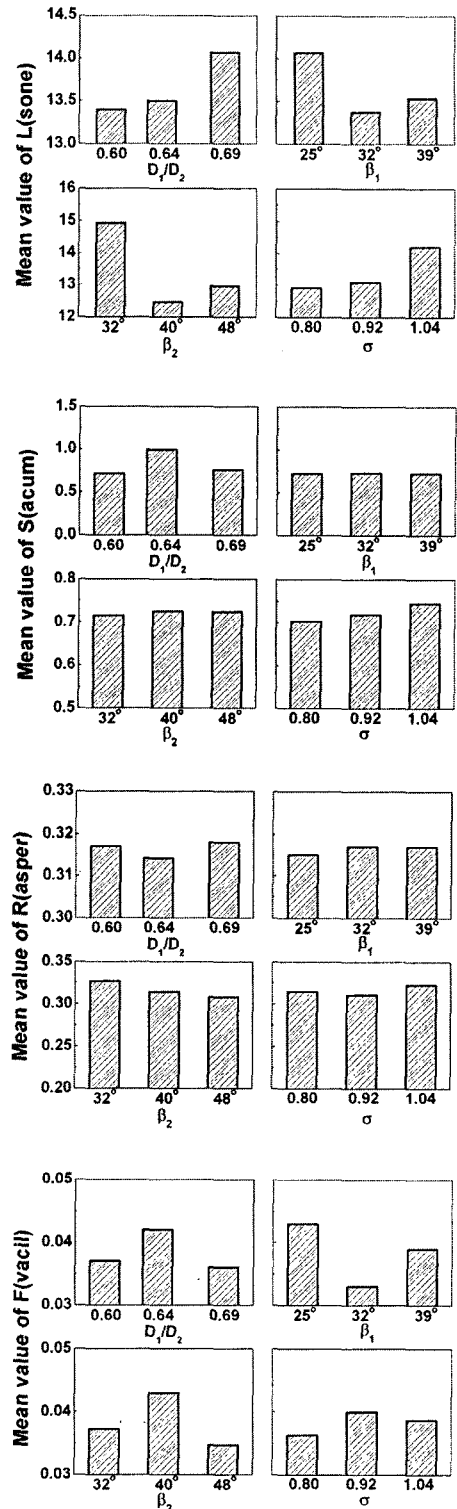


Fig. 10 Averaged sound-quality values for each design parameter (L, S, R, F)

4.2 주요 설계인자 분석

각 원심팬의 소음 데이터를 이용하여 4가지의 음질 평가 요소 (L, S, R, F)에 대하여 각 인자의 평균된 값으로 설계 변수별 효과 분석을 수행하였다.

Fig. 9는 비-라우드니스로 라우드니스와 샤프니스 계산에 직접적으로 사용되며 이산주파수 특성이 나타나는 주파수 영역에서 높은 레벨을 나타내고 있으며, 각각의 특징들 중 fan no. 2에서 가장 낮은 소음 분포를 보이고 있다.

Fig. 10에서 설계 인자의 음질 지수 기여도를 분석한 결과 라우드니스는 내외경비와 솔리더티가 낮고 입출구각이 중간값일 때 즉, $\beta_1 \approx 32^\circ$, $\beta_2 \approx 40^\circ$ 일 때 낮아지는 경향을 보인다. 샤프니스는 내외경비가 양 끝부분에서 그리고 솔리더티가 작으면 낮아지는 경향을 보이며 입출구각의 영향은 거의 없다. 러프니스는 모든 설계 변수에 대하여 큰 영향을 받지 않는다. 변동강도는 내외경비와 출구각 및 솔리더티의 양 끝부분에서 작아지며 입구각은 중간 부분에서 낮아지는 경향을 나타낸다. 이들 음질 요소에 대한 주요 설계 인자를 재분석해 보면, 내·외경비가 작고 입·출구각은 커질수록 그리고 솔리더티는 낮을수록 전체적으로 라우드니스, 샤프니스, 변동강도가 작아진다. 이상과 같은 효과 분석을 통하여 원심팬 설계인자들이 음질 평가 요소에 미치는 영향과 개선 방향에 대해서 알 수 있었으며, 이와 더불어 반응면 기법(response surface)을 이용하여 회귀 방정식을 도출할 수 있다. 반응면 기법은 4가지의 음질 평가요소에 대하여 실시하였으며, 2차 선형 방정식을 이용하여 설계인자가 유효하다고 판단되는 일정 수준의 P-value를 넘게 되면 제외시켰다.

반응면 기법에 의해서 도출되는 주요한 결과는 회귀방정식이다. 회귀방정식은 인자 실험을 통해서 개선하고자 하는 목적값을 예측할 수 있는 함수이다. 이러한 회귀 방정식은 결정계수(R-Sq값)에 의해서 정확성을 판단할 수 있다. 그러나 데이터 또는 샘플링의 개수가 적을 때 결정계수가 상향평균화되는 특성을 보이기 때문에 수정 결정계수[R-Sq(adj)] 값을 이용하여 좀 더 정확하게 회귀 방정식을 평가할 수 있다. 반응면 기법에서 음질요소 각각에 대한 수정 결정계수 값이 99.6 % 대역으로써 유효하다고 분석되었다. 최적 음질의 냉장고 냉기 순환용 원심팬 설계 인자를 도출하기 위하여 위의 회귀방정식을 이용

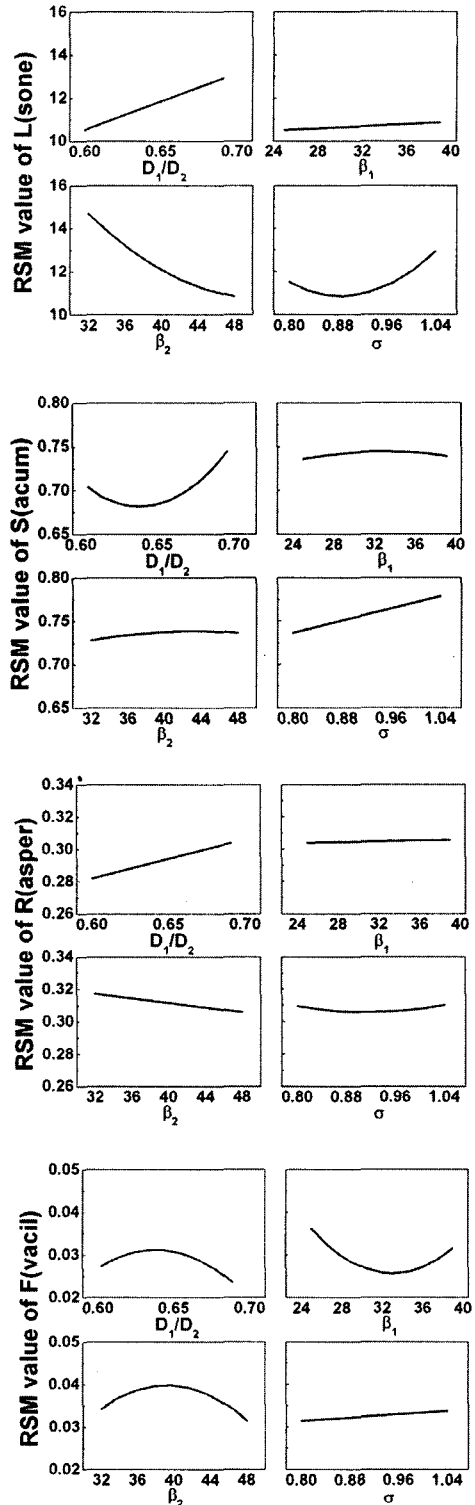


Fig. 11 Characteristics of design parameters using response surface method

하여 반응면 최적화(response optimization)를 수행하였다.

Fig. 11의 가로축은 각 설계 인자의 수준을 나타내며, 세로축은 각 음질 평가 요소의 지수를 나타낸다. 이러한 관계를 이용하여 원심팬 설계 인자들의 주효과를 분석할 수 있으며, 설계 인자 수준의 변화에 따른 음질 평가요소들의 지수를 예측할 수 있다.

라우드니스는 내·외경비와 입구각이 작고 Fig. 10의 분석과는 달리 출구각이 커질수록 낮아진다. 샤프니스는 내·외경비가 중간일 때 그리고 솔리더티는 적을수록 낮아지는 경향을 보이거나 입출구각의 영향은 거의 없다. 러프니스는 내외경비가 적을수록 낮고 출구각이 커질수록 유리하며 다른 설계 변수에 대하여 큰 영향을 받지 않는다. 변동강도는 내외경비와 출구각의 양 끝부분에서 작아지며 입구각은 중간 부분에서 낮아지고 솔리더티에 큰 영향을 받지 않는다.

설계 인자 최적화는 각 항목들의 합이 최소화되는 지점을 도출하여 최적 원심팬의 설계인자 수준을 도출하였다. Table 2의 "N" 은 거의 차이가 없다는 표시이며 결론적으로 최적화된 원심팬의, 설계인자

로 내·외경비 0.6, 입구각 32°, 출구각 48°, 솔리더티 0.8이다.

Fig. 12, 13에서 보면 도출된 각 설계변수들을 이용한 최적 원심팬의 소음 스펙트럼에 있어서 토널 소음 및 고주파와 저주파의 광대역 소음이 크게 개선된 것을 확인할 수 있으며, 또한 음질 평가 요소에 있어서 라우드니스, 샤프니스, 러프니스가 상관적으로 개선되었다. 위와 같이 고려된 4가지 음질 요소들은 저주파 및 고주파 에너지의 토널 소음과 광대역 소음의 특징들을 나타내고 있으며 이를 최소화하는 방향으로 설계하려면 각 음질 요소들의 개선을 고려해야 한다.

Table 3은 내·외경비 기준으로 음질 지표들이 가장 적은 test fan과 최적화된 설계변수를 적용한 팬의 비교로서, 최적화 팬이 전체적으로 향상되었음을 알 수 있고 소음의 개선 효과가 보인다. 이 실험의 결과에서는 음압레벨(dBA)의 감소가 각 음질 지표들의 전체적인 감소로 나타난다. 그러나 음압레벨과 연관된 지표인 라우드니스를 제외한 다른 지표들은 음압레벨로 직접적인 영향을 평가할 수 없지만 각

Table 2 Optimum values of design parameters of the turbo-fan

	L	S	R	F
D1/D2	0.6	0.6	0.6	0.6
$\beta 1$	32°	N	N	32°
$\beta 2$	32°~32°	N	N	48°
σ	0.8~0.92	0.8	N	0.8

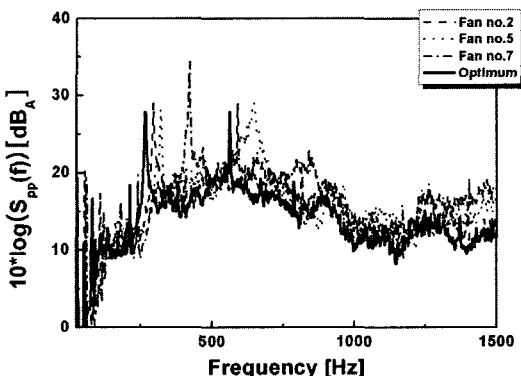


Fig. 12 Sound pressure level of optimum centrifugal fan

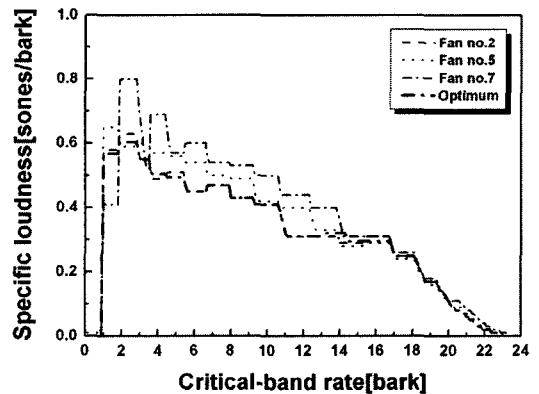


Fig. 13 Specific loudness comparison at selected fan of minimum loudness and optimum fan

Table 3 Comparison among the tested fans and an optimal fan

	Fan 2	Fan 5	Fan 7	Optm.
SPL(dBA)	55.8	57.5	58	54.2
L(sone)	11.7	12.4	13.1	10.7
S(acum)	0.704	0.684	0.751	0.680
R(asper)	0.308	0.305	0.304	0.305
F(vacil)	0.038	0.031	0.039	0.032

모델에 대한 음질 개선 평가로는 효과적으로 사용할 수 있다.

음질 평가 항목인 설계변수의 개선은 원심팬의 설치각인 입·출구각의 최적화를 의미하며 날개 표면에서 발생하는 유동 박리 및 후류 영역의 저감으로 인한 광대역 소음과 날개 끝단에서 주기적으로 발생하는 날개 통과 주파수(BPF)에 의한 소음이 저감됨을 나타낸다. 설계점에서 날개 성능에 지배적인 요소인 양력은 유지되면서 박리 및 날개 후단의 와류를 최소화하여 소음 발생 원인을 줄이는 효과를 나타낸다.⁽²²⁾ 라우드니스는 소음의 크기에 지배적인 영향을 받는다. 그리고 러프니스는 저주파수 영역의 에너지에 영향을 받게 된다. 이 실험계획법에 따르면 샤프니스의 경우 솔리더티에 영향을 크게 받는 요소로 솔리더티가 커질 경우 유로의 감소로 인해 유속 증가로 인한 고주파 성분의 특성이 나타났다.

5. 결 론

이 연구는 1.92에서 3.64의 비속도 범위를 갖는 원심형 팬의 설계점에서 내·외경비, 입·출구각, 솔리더티의 4가지 설계변수에 대해 음질을 최소로 하는 최적 설계변수를 찾는 방법 중 각 설계 변수에 따른 평균화된 기법과 반응면 기법을 통해 음질을 비교하였다. 최적의 설계변수는 두 방법의 공통적으로 민감한 변수를 통해 최적의 조건으로 도출하였다.

실험에서 고려한 비속도 영역내의 설계변수 중 내·외경비는 유로의 영향으로 모든 음질 요소에 영향을 미친다. 입·출구각과 솔리더티는 라우드니스와 변동강도에 동시에 영향을 준다. 각 설계 변수의 변화는 라우드니스와 변동강도에 주로 영향을 미친다. 정량적인 음질 평가로 라우드니스 감소는 음압레벨(dBA) 저감으로 직접적으로 나타낼 수는 있지만 변동강도의 경우 그 변화량은 작다고 하더라도 감소되는 경향으로 음질 개선으로 평가할 수 있으며 팬의 경우 이 연구에 설계제인 효율이 최대가 아닌 작동점에서 박리 등 여러 유동 현상으로 인해 변동 강도의 영향이 커질 수 있다. 또한 설계변수의 평균화한 방법과 반응면 기법은 정확하게 일치한 결과를 나타내지는 않았지만 유사한 경향성을 보여주었다.

결론적으로 이 연구에서는 일반적으로 사용되는 음질의 4가지 요소를 이용하여 시간 및 비용적인 측

면을 고려해 팬 소음레벨 뿐만 아니라 감성적인 평가를 객관적인 지표로 최적화하여 설계변수를 도출했으며 각 지표들과의 연관성을 평가할 수 있었다.

후 기

이 연구는 정보통신부 대학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구결과로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Neise, W. 1982, "Review of Noise Reduction Methods for Centrifugal Fans," *Journal of Engineering for Industry*, 5, pp. 33~45.
- (2) Park, K.-J., Lee, S.-H. and Son, B.-J., 1999, "A Study on Low-noise and High-efficiency Sirocco Fan Development," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 2, No. 2, pp. 46~56.
- (3) Kim, K.-H., Park, K.-C. and Lee, S., 1999, "Measurement and Prediction of Aerodynamic Noise From Sirocco Fans," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 2, No. 4, pp. 57~64.
- (4) Kim, H.-J., Jung, K.-H., Lee, C.-J. and Lee, S., 2000, "Experimental Study of Trailing Edge Shape of Forward Curved Blade upon Radiated Noise," *Proceedings of the KFMA Fluid Machinery Conference*, pp. 137~142.
- (5) Son, J.-M., Kim, H.-J., Lee, S. and Cho, S.-M., 2003, "Trailing Edge Noise Modification in a Blade Cascade," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 6, No. 3, pp. 7~14.
- (6) Joo, J.-M., Kim, Y.-H., Lee, J.-W. and Oh, S.-K., 2003, "Evaluation of the Sound Quality from Home Appliances," *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 622~627.
- (7) Lee, S.-G., 2001, "Optimization of Axial Fan Noise Using Response Surface Modeling Methods," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 21~25.
- (8) Seo, S.-J. and Kim, K.-Y., 2003, "Design Optimization of a Multi-blade Centrifugal Fan with

Navier-stokes Analysis and Response Surface Method," Transactions of the KSME(B), Vol. 27, No. 10, pp. 1457~1463.

(9) Han, J.-O., Koo, H.-M., Choi, W.-S. and Kim, J.-B., 2003, "A Method of Noise Reduction and Improvement in Sound Quality for a Product with the Auto Louver," Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 1073~1075.

(10) Joo, J.-M., 2004, "Noise and Vibration of the Digital Appliances," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 6. pp. 15~22.

(11) Zwicker, E. and Fastle, H., 1999, Psychoacoustics: Fact and Models, 2nd edition, Springer.

(12) Shyy, W., Papila, N., Vaidyanathan, R. and Tucker, K., 2001, "Global Design Optimization for Aerodynamics and Rocket Propulsion Components," Progress in Aerospace Sciences, Vol. 37, No. 1, pp. 59~118.

(13) Eretec, 2000, The Basic Statistics and MINITAB usage for Six-Sigma, KSA.

(14) Kim, H.-J, and Lee, S., 1997, "Design of Low Noise Anechoic Wind Tunnel," Proceedings of the KSME Annual Autumn Conference, pp. 691~696.

(15) MTS Sound Quality V3.7 User's Manuals, MTS

(16) Kim, J.-W., Choi, J.-K., Heo, J.-K. and Byun, E.-S., 1998, "A Study on the Sound Quality

of Passenger Cars," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 94~104.

(17) Hur, D.-J., Cho, Y., Kim, H.-S., Lee, K. -S. and Park, T.-W., 1999, "Model Development and Analysis of the Car Interior Sound Quality," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 254~260.

(18) Jeon, J.-Y., Koo, M.-W. and Cho, M.-J., 2001, "A Study on Perceptual Evaluation of Noise Sources in Living Environment," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 443~448.

(19) Shin, S.-H. and Ih, J.-G., 2004, "A Method for Sound Quality Evaluation of Non-stationary Acoustic Signal," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 1009~1012.

(20) Jo, K.-S., Hur, D.-J. and Cho, Y., 2004, "The Sound Quality Analysis of Environmental Noise by Jury Testing," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 712~717.

(21) Hwang, D.-K., Abu, A., Lee, J.-Y., Oh, J.-E. and Yoo, D.-H., 2005, "Sound Quality Evaluation for the Vehicle HVAC System Using Optimum Layout of Damping Material," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 629~633.

(22) Lee, S., Kim, H.-J., Kim, J.-H. and Song, S.-J., 2004, "Computation of Turbulent Flows and Radiated Sound from Axial Compressor Cascade," Int' Journal of KSME, Vol. 18, No. 2, pp. 272~285.