저소음 Wave Fan 의 System 최적화

System optimization of the low noise Wave Fan

조경석† ·김우준*·주원석**

Kyungseok Cho, Woojune Kim and Wonseok Joo

Key Words : Fan(휀), Engine Cooling(엔진 냉각), Blade(회전익), Aeroacoustics(공력소음), Uneven Spacing(비등각)

ABSTRACT

For the past decade many effort has been delivered to understand noise generation mechanism for the small size engine cooling fan. As a result of that effort, the low noise fan such as the Wave fan was developed. Now the Wave fan becomes the well known low noise engine cooling fan. But in case of the new car development, the system in the new car will be different from previous one. So we need system optimization for every new model. In case of special application, a low speed fan should be developed to match system requirement. In that case, we meet severe engineering requirement by conducting fan system optimization instead of the simple fan scaling. In this paper, I will show you the system optimize process.

기호설명

P(θ) : Pulse pressure , Pa
B : Number of Blade
d_k : Rotational order of amplitude
e_k : Decibel value of the d_k ,dB

1. 서 론

자동차용 냉각 휀은 라디에터와 함께 사용되어 엔진의 방열을 촉진시킨다. 최근 엔진의 소음이 줄어듦에 따라 쿨링 휀의 소음은 자동차 엔진 룸의 중요한 요소로 자리잡고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 자동차 엔진 쿨링 휀은 엔진 룸에서 작동하는 관계로 엔진 룸의 여러 부품에 의해 영향을 받고 있다. 휀의 풍량을 말할 때 중요한 요소 중에 하나는 휀에 걸리는 정압이다. 즉 압력이 얼마일 때 풍량이 어느 정도 발생하는지를 나타내는 곡선이 휀의 성능 곡선이 된다. 자동차 휀에 걸리는 정압은 앞서 말한 열교환기 이외에 엔진 블록에 의한 배압이 크게 작용하며, 열교환기 앞에는 센터 빔, 범퍼, 그릴 등의 구조물이 장애물로 압력 강하를 일으킨다. 이러한 복잡한 구조물은 압력 상승 뿐만 아니라, 소음원으로도 작용한다.

자동차 휀과 같이 회전속도가 작고 소형인 경우, 휀에서 발생하는 소음이 이중극 소음임은 잘 알려진 사실이다.(1) 원음장에서 이산주파수 소음을 계산하기 위해 회전하는 날개 표면에서 비정상 음압을 측정하려는 시도가 이루어졌다.(2) 휀에서 발생하는 공력소음은 휀의 날개 표면의 불안정한 압력 변동에 기인하므로 날개 표면 전체의 압력의 시간 변동 값을 측정하여, 소음원의 발생원인 및 주요 발생 부위를 계산에 의해 규명하였다. (3),(4) 이러한 노력의 결과, 저소음 Wave Fan 이 탄생하게 되었으며, Wave Fan 은 국내 생산 대부분의 차종에 적용되어 자동차 소음저감에 이바지 하고 있으며, 그 우수성을 인정 받고 있다.

휀은 회전체이므로 차량의 실제 적용에 있어서는 각 차종에 부합하도록 회전수로 조정이 필요하다. 자동차 엔진 폭발 회전수와 휀의 회전수가 같은 주파수인 경우 음의 중첩에 의한 공명음이 발생할 수 있으므로 이를 피하기 위해 휀의 회전수 조절이 필요하다. 특별한 경우에 있어서는 저회전 휀의 설계를 필요로 하며, 음질의 개선을 위해 비등각 휀의 적용도 추진하고 있다. 비등각 휀은 이산주파수의 분산을 통해 귀에 거슬리는 피크 소음을 줄여, 감성 음을 개선하는 데 그 목적이 있다. 본 논문에서는 대형 휀의 저회전 및 비등각 적용을 통해 소음의 크기뿐만 아니라, 음질을 개선한 결과에 대해 기술하고자 한다.

2. Wave Fan

2.1 형상 설계

휀을 구성하는 설계 변수는 그림 1 에 도시되어있다. 그림 1 에 표시된 설계 변수는 반경이

† 교신저자; 한라공조 기술연구소
E-mail : kscho@mail.hcc.co.kr
Tel : (042) 930-6732, Fax : (042) 930-6992

* 한라공조 기술연구소

** 한라공조 기술연구소

일정한 한 단면에서의 설계 변수이며, 한 단면에서의 설계변수를 반경이 증가함에 따라 변화시키면서 쌓아나가면 전체 3 차원의 날개 형상을 얻을 수 있다.

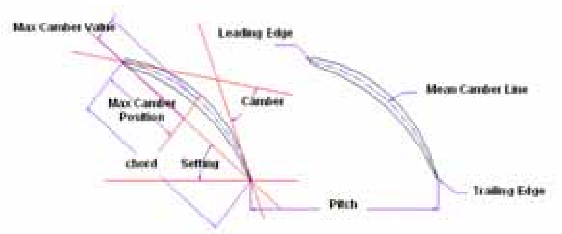


그림 1 휀의 설계 변수

2.2 대형 Single Fan

일반적으로 자동차용 쿨링 휀은 방열기 냉각 휀과 응축기 냉각 휀의 두 개의 휀으로 구성되어 있었다. 휀에서의 소음은 Tip 속도의 5 제곱근에 비례하는 관계를 가지고 있으므로, 휀의 직경을 크게 하는 경우에는 소음이 급격히 증가한다. 그러나, Wave Fan 의 개발로 소음을 획기적으로 줄임에 따라 직경이 큰 대형 Single fan 을 적용할 수 있었다.

그림 2 대형 Single Fan

그림 2 는 직경 460mm 의 7 개의 날개를 갖고 있는 Single Fan 으로 기존의 두 개의 휀 대신 사용된 제품을 도시하였다. 본 연구에서의 모델 휀으로 사용되었다.

3. 최적 설계

3.1 주인자 분석

엔진 주파수와 중첩을 피하기 위하여 저회전 휀을 설계하였다. 설계 회전수를 1600RPM 으로 이하로 선정하여, 설계회전수를 만족시키는 구간에서 소음과 소비전력을 최소로 설계하는 설계 변수를 찾고자 한다. 풍량을 망목 조건으로 하고, 회전수, 소음, 소비전력을 망소 조건으로 선정하였다. 디자인 파라미터들이 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 4 인자 3 수준의 Taguchi 실험 계획법 적용하여 실시하였다.

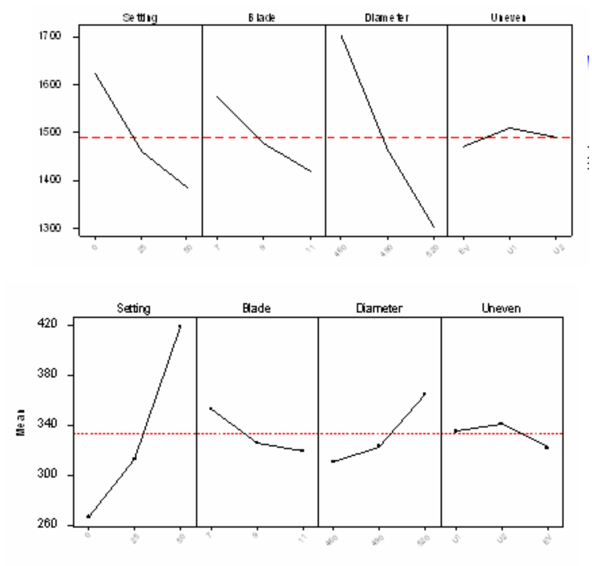


그림 3 주인자 효과 분석

그림 3 에서 주인자 효과 분석 결과를 나타내었다. 휀의 직경을 크게하면 회전수가 크게 떨어질 수 있으므로 휀의 직경은 장착 공간이 허용하는 한도 내에서 최대한 큰 설계수준을 취하였다. 휀의 날개각을 크게하면 회전수가 감소하지만 소비전류가 급격히 증가하므로 날개각은 일정 각도 이상 크게하는 않는 수준에서 최적화 설계를 다시 실시하고자 한다.

3.2 반응 표면법

스크리닝 설계 후 설계 인자의 수준을 근사하게 정의한 다음의 구간 내의최적 값을 찾기 위해 반응 표면법(Response surface method)이 사용된다. 반응 표면법은 최적의 설계 변수와 강건 설계에서 이용되며, 본 연구에서는 중심합성계획법(Central Composite Design)이 사용되었다. 날개각과 캠버에 대하여 상세 설계를 실시하였다. 축과 중심점, Star Point 가 추가된 2 수준 요인배치 설계를 하였다. 재현성 검토를 위해 중심점에서는 다섯개의 샘플을 제작하였다.

그림 4 는 반응표면법 평가 결과를 나타내고 있다. 회전수와 총소음도는 전구간에서 만족하고 있다. 소비전력과 이산 소음의 최저 값을 보이는 윈

쪽 하단의 위치에 최적 설계점이 존재함을 확인 할 수 있었으며, 이 점을 중심으로 최적의 설계인자와 수준의 최종적인 설계 값을 얻을 수 있었다.

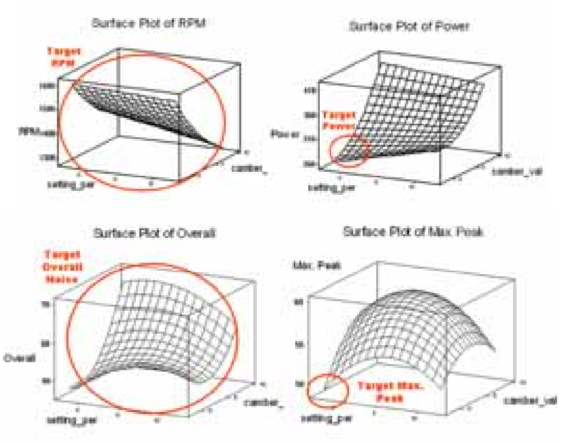


그림 4 반응 표면법 분석

4. 비등각 홴

4.1 Blade 사이각 계산

비등각 홴은 날개회전주파수(BPF)에서의 이산 주파수 성분을 분산하여, 음질의 감성적인 불쾌감을 완화시키기 위한 방법으로 사용된다. 날개의 사잇각을 균등하지 않게 불균형을 줌으로써 회전 주파수 성분에서의 음압의 집중을 완화시킨다. 비등각 홴의 설계시 고려되는 기본방정식은 아래의 수식과 같은 음압의 모델을 사용하였다.

$$P(\theta) = \frac{B}{2\pi} + \frac{1}{\pi}\sum_{k=1}\left[\begin{array}{l}\left(\sum_{j=1}^{B}\cos(k\theta)\right)\cos(k\theta) \\ +\left(\sum_{j=1}^{B}\sin(k\theta)\right)\sin(k\theta)\end{array}\right] \qquad (1)$$

$$d_k = \frac{1}{B}\sqrt{\left(\sum_{j=1}^{B}\cos(k\theta_j)\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{B}\sin(k\theta_j)\right)^2} \qquad (2)$$

$$e_k = 20\log_{10} d_k + C \qquad (3)$$

홴의 각 날개간 각도의 함수로 표현된 위의 수식으로 각도의 임의의 값을 선정해 주면, 이에 해당하는 회전주파수 성분에서의 이산주파수 소음 값의 감소량을 구할 수 있으며 그 예를 아래 그림 5 에 나타내었다. 그림 5 는 9 개의 날개를 갖는 홴의 비등각화를 통해 얻을 수 있는 BPF 성분의 이산 주파수 성분의 감소 정도를 나타내고 있다. 2 차 ~ 5 차 성분 값은 많은 감소를 보여 주고 있다.

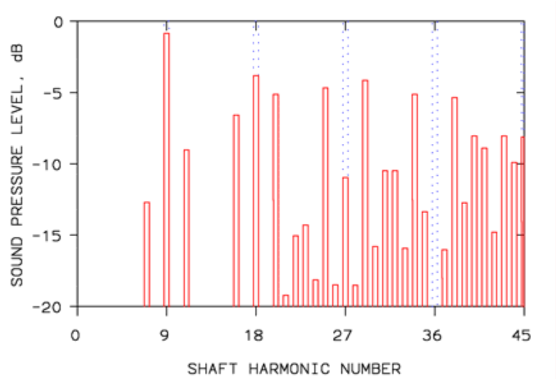


그림 5 음압 감소의 예측 값

4.2 무게 중심의 고려

비등각 홴의 설계 시 고려하여야 할 중요한 사항은 홴의 밸런스이다. 홴을 비등각화 시킴으로써 이산주파수 소음은 감소하지만, 무게중심이 틀어짐으로 인해 진동이 증가하고 사잇각이 큰 지점에서의 홴의 Tip 부위의 링 부위 강도가 저하되고, 런아웃이 증가할 수 있다. 비등각을 결정짓는 비등각 값을 α라고 할 때 , α값의 범위를 한정 지을 필요가 있다. 그림 6 은 본 연구에서 최종적으로 결정된 비등각 홴을 도시하고 있다.

그림 6 비등각 홴

4.3 비등각 홴 실험 결과

비등각 홴의 소음 분석 결과를 그림 7 에 스펙트럼으로 나타내었다. 균등각 홴의 경우는 회전수와 날개수를 곱한 값인 1 차 회전주파수 성분(BPF)에서 이산주파수 성분의 피크 값을 보이고, 이의 정수배에서 이산주파수 성분을 보인다. 이에 반해 비등각 홴의 경우에는 날개의 회전주파수 성분(BPF)와 정수배의 성분에서의 피크 값은 현저히 감소한 반면에 축의 회전 주파수

성분(SPF)에서의 값이 생겨남을 알 수 있었다. 즉 이산주파수 소음의 분산이 이루어졌으며, 이로 인해 피크 값의 분산과 감소가 발생하여, 음의 이질감을 줄일 수 있었다.

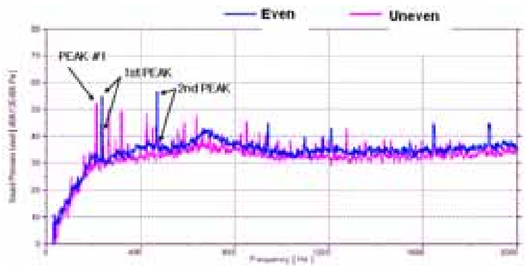
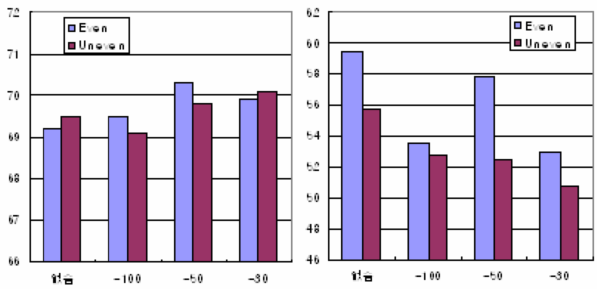


그림 7 소음 스팩트럼



(a) Overall 값 (b) max Peak 값

그림 8 장애물 효과

비등각 휀은 엔진 룸과 같이 주변에 장애물 많은 경우에 더욱 효과적이다. 그림 8 은 휀의 후류방향에 장애물을 설치한 경우의 효과를 보여주고 있다. 장애물을 설치한 경우, 총 소음도는 전체적으로 증가하는 경향을 보이고 있으나, 최대 피크 값의 경우 비등각 휀의 경우 현저히 감소하여, 등각 휀 보다 훨씬 낮은 소음 수준을 보이고 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

자동차용 축류 휀의 시스템 최적화는 엔진 룸의 여러 상황을 고려하여 휀의 작동 회전수가 정의되며, 이 회전 주파수에서 최소의 소음과 최소의 소비전력으로 요구하는 풍량을 만족시키는 과정이다. 기존 휀의 단순 스케일링 만으로는 요구하는 시스템에 최적화된 휀을 설계할 수 없으므로 최적의 휀을 설계하기 위해 반응 표면법과 같은 최적 설계 기법이 도입되었다. 또한 음질의 개선을 위해 비등각을 갖는 휀의 설계를 실시하였다. 이러한 노력의 결과 요구 성능을 만족시키는 최적의 휀을 제안할 수 있었으며, 비등각 휀은 정압이 많이 걸리는 엔진 룸에서 특히 효과가 있는 것으로 평가되었다.

참고문헌

(1) Ffowcs Williams, J.E. and Hawkings,D.L., 1969, “Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion”, Philosophical Transactions of the Royal Society, A264.

(2) 조경석,이수갑, 2001, “ Correlation of Noise and Blade Surface Pressure in Automotive Engine Cooling Fan ”,Inter-Noise 2001

(3) 조경석,이수갑, 2003, “ Low Noise Engine Cooling Fan Development ”, Inter-Noise 2003

(4) 조경석,이수갑, 2003, “ Aerodynamic Noise Sources on Axial Flow Fan Blades ”, Fan Noise 2003

(5) 조경석,박세영, 2004, “ Development of Low Noise Engine Cooling Fan ”, 유체기계공학회