

# BLDC 모터의 소음 저감을 위한 로터부 구조 최적설계

## An Optimal Design of the Rotor of BLDC Motors for Noise Reduction

김지훈\* · 고강호\* · 김민수\* · 허승진\*\*

Ji-Hoon kim, Kang-Ho Ko, Min-Soo Kim and Seoung-Jin Heo

**Key Words** : Volume Velocity(체적속도), 3-Level DOE(3수준 실험계획법), Direct Frequency Response Analysis(직접 주파수 응답 해석), Optimal Design(최적설계), RSM, Response Surface Method(반응표면법)

### ABSTRACT

In order to reduce the noise of BLDC motor, a systematic optimization procedure for rotor structure is presented. The noise index is defined as the sum of volume velocity of FE-model that are calculated at the dominant frequencies during dehydratation process, which is based on the principle of radiation simple volume source. Then, the five design variables are selected to represent the shape and layout of rotor structure. This discrete design optimization problem for minimizing the noise index is solved by 3-level orthogonal array based effect analysis. Finally, the response surface method (RSM) combined optimization approach is employed for more refining the approximate optimum.

### 1. 서 론

최근 생활수준의 향상에 따라 가전제품 또는 기계부품간의 고성능에 이어 고품질의 요구가 증대 되고 있는 추세이다. 일반적으로 생활에 밀접한 관련이 있는 세탁기, 에어컨과 같은 가전제품에서 주요 소음 및 진동은 동력원인 모터에서 직접적으로 비롯되거나, 모터에서 발생한 진동이 다른 구조물을 가진하여 간접적으로 발생하게 된다.

저소음, 저진동의 품질적인 면을 개선하기 위해서는 소음 및 진동의 전달계통에서 해결할 수도 있으나, 근본적으로는 모터 자체에서 먼저 해결하는 것이 전달계통에서의 설계 자유도를 증가 시킬 수 있다.

특히 최근에 가전제품에 장착되고 있는 BLDC 모터의 경우 영구 자석이 회전자(rotor) 내부에 매입되어, 원심력에 의한 영구 자석의 이탈 현상이 발생할 우려가 없어 고속 운전이 가능하다는 장점 때문에 사용이 증가하는 추세이다. 반면에 고속으로 회전이 가능하기 때문에 진동 및 소음에 있어서는 개선의 여지가 충분히 있어, 저소음, 저진동을 고려한 제품을 출시하기 위한 개발이 두드러지게 나타나고

있다.

BLDC 모터를 사용하는 가전제품중의 하나인 드럼 세탁기에 대한 모터진동은 크게 세탁모드나 탈수모드에서 발생되고 있는데, 특히 고 rpm에 따른 모터의 로터부 회전은 세탁시보다 탈수시 더욱 큰 진동이 발생되고, 또 이것은 소음으로 이어져 세탁기의 품질을 저하시키는 요인이 되고 있다. 이와같은 문제요인에 맞추어 BLDC 모터를 사용하는 제품인 드럼 세탁기를 기준으로 제품의 초기설계 단계부터 저진동을 고려한 로터부 형상설계가 요구된다.

본 연구에서는 현재 시판되고 있는 BLDC 모터 장착의 드럼 세탁기를 연구의 대상으로 선정하였다. 선정된 세탁기 모터의 로터부위 유한요소모델에 대하여 방사소음 원리인 체적속도(volume velocity)를 적용시켜 강제진동해석을 수행하여 세탁기의 탈수과정에서 나타나는 각각의 관심 주파수에 따른 모터의 진동 및 소음 레벨을 저감시키기 위한 로터부의 형상 최적화 기법을 제시하고자 한다.

### 2. 로터부의 유한요소해석모델과 해석방법

#### 2.1 체적속도의 개요

체적속도는 음원의 표면에서 발생하는 공기의 유량(flow rate)을 나타내며, 음원 주위의 특정지점에서 발생하는 음압이나 인텐시티(intensity), 방사 파워와 같은 음향특성을 결

\* 국민대학교 자동차공학전문대학원

\*\* 국민대학교 기계·자동차공학부  
E-mail : sjheo@kookmin.ac.kr  
Tel : (02)912-4045 Fax : (02)912-4442

정한다. 그러므로 진동하는 물체의 체적속도를 이용하면 그 물체의 소음특성을 파악할 수 있다.

임의의 형상을 갖는 음원(sound source)의 체적속도는 다음과 같이 정의된다.

$$Q = \int_s \vec{v} \cdot \vec{n} dS \quad (1)$$

여기에서  $\vec{v}$ 는 음원의 표면에서의 진동 속도이고  $\vec{n}$ 은 미소 표면요소  $dS$ 에 수직한 단위 벡터이다. 체적속도 개념을 유한요소 모델에 적용하면 식(2)에 나타나 있는 것과 같이 모델 전체의 체적속도는 각 요소(element)의 체적속도의 합으로 구할 수 있다.

$$Q = \sum_i \vec{v}_i \cdot \vec{n}_i S_i \quad (2)$$

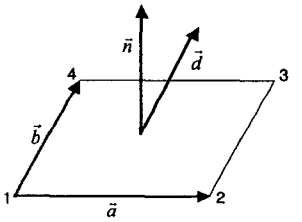


Fig. 1 Unit normal vector and velocity vector

위의 Fig. 1에서는 한 개의 유한요소에 대하여 node 1과 node 2를 잇는 벡터  $\vec{a}$ 와 node 1과 node 4를 잇는 벡터  $\vec{b}$ 의 외적(cross product)을 구하면 벡터의 크기가 요소의 면적  $S$ 가 되는 수직벡터를 구할 수 있다.

$$\vec{a} \times \vec{b} = \vec{n} S \quad (3)$$

따라서 식(2)와 식(3)을 이용하면 하나의 요소에 대한 체적속도  $Q_i$ 는 다음의 식(4)와 같이 혼합 3중곱(mixed triple product)으로 표현된다.

$$Q_i = \vec{v}_i \cdot (\vec{a}_i \times \vec{b}_i) \quad (4)$$

따라서 유한요소 모델 전체의 체적속도는 식(5)와 같이 모든 요소의 체적속도 절대값의 합으로 구할 수 있다.

$$Q = \sum_i |Q_i| \quad (5)$$

## 2.2 유한요소 해석모델

### 2.2.1 재료의 물성치

Fig. 2는 BLDC 모터의 로터부를 구성하는 각 부품의 명칭과 사용 재질을 보여 주고 있으며, 이에 대한 물성치는 Table 1에 나타나 있다.

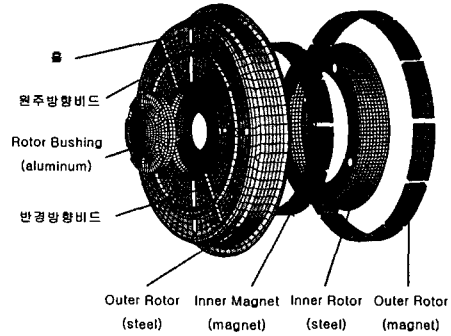


Fig. 2 Components and materials of rotor part

Table 1 Material properties of components

Material	Young's Modulus (N/mm <sup>2</sup> )	Density (N-sec <sup>2</sup> /mm <sup>4</sup> )	Poisson's ratio
Steel	2.1×10 <sup>5</sup>	7.850×10 <sup>-9</sup>	0.3
Aluminum	6.9×10 <sup>4</sup>	2.7×10 <sup>-9</sup>	0.33
Magnet	5.0×10 <sup>3</sup>	3.0×10 <sup>-9</sup>	0.3

### 2.2.2 유한요소 생성기준과 경계조건

Fig. 2에서의 모델은 pre/post processor인 Altair Hyper-mesh로 유한요소모델을 생성하였다. 각 구성품의 요소 사이즈는 모두 4 mm로 고정하였고, 요소 타입에 있어서 외측 로터(outer rotor)와 내측 로터(inner rotor)는 shell요소로, 로터 부싱(rotor bushing) 및 외측 자석(outer magnet)과 내측 자석(inner magnet)은 solid요소로 생성하였다. 로터 부싱의 임의의 node 한점을 축 방향으로 가진하여 강제진동 해석을 수행하였다. 그리고 각 구성품의 볼트 체결점과 로터 부와 자석의 결합은 Nastran의 강제요소인 RBE2 요소로 관련된 부위의 node를 각각 연결시켰다.

로터부의 구조를 이루는 3가지 요소인 비드, 홀 및 볼트의 배열은 전체적인 대칭형상을 위해 90° 등간격으로 홀을 배치하였고, 전반적으로 대칭형상이 이루어지지 않는 모델을 제외하고는 홀→볼트→비드 순서의 배열을 원칙으로 하였다.

### 2.3 해석방법 및 해석 주파수 선정

MSC/Nastran에서의 주파수 응답 해석은 직접법(direct method)과 모드 중첩법(mode superposition method)의 두 가지 해석방법을 지원하고 있는데, 본 연구에서는 관심 주파수에 따라 변위 벡터의 응답을 구할 수 있는 직접법(sol 108)을 사용하여 해석하였다.

본 연구에서 선정된 세탁기의 경우 탈수 모드시에 모터의 회전은 최고 1,300 rpm까지 올라가고, 가정에서 사용되는 일반세탁기의 경우는 세탁물에 따라 다르겠지만 보통 1,100 ~ 1,300 rpm 미만까지 회전한다. Fig. 3은 모터 중심부에서 1.5 m 떨어진 위치에서 측정된 소음의 컬러맵(color map)을 나타내고 있다. 전체 rpm에 걸쳐 12, 24, 36, 72차 order 성분의 소음레벨이 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 탈수시간이 가장 긴 영역인 1,100 rpm을 관심 rpm으로 정하여 관련된 12, 24, 36, 72차 order 성분에 대한 주파수 220, 440, 660, 1320 Hz를 관심 주파수로 선정하였다.

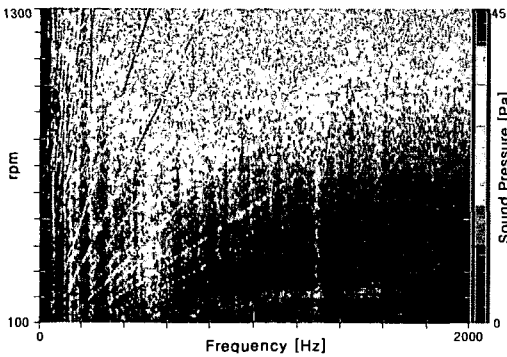


Fig. 3 Spectrogram of the radiated noise of the rotor

## 3. BLDC 모터의 로터부 구조 최적설계

### 3.1 설계변수 선정 및 민감도 해석

로터의 강성과 관련된 비드, 홀 및 볼트의 구성요소가 체적속도(Q)값에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여 최적화를 위한 설계변수를 원주방향의 비드위치, 반경방향의 비드의 개수, 반경방향의 비드 폭, 홀의 개수 그리고 체결부의 개수로 총 5개의 설계변수를 선정하여 모델을 구성하여 해석하였다. 그리고 설계변수 이외에 고정적인 요소는 원주방향의 비드 폭(4 mm), 홀의 반경방향의 길이(65 mm), 홀의 폭(8 mm), 홀의 중심으로부터의 반경위치(53 mm), 체결부의 반경위치(60 mm)이고, 외측 로터와 내측 로터의 전체적인 지름(각각 272 mm, 188 mm), 두께(2 mm)등의 사이즈는 일정하게 하였다.

설계변수에 대한 체적속도의 민감도를 계산하기 위하여 설계변수의 상/중/하한치에 대한 3수준 실험계획법을 적용

하였고, 값의 범위는 로터부의 면적과 요소의 대칭적인 배열을 고려하여 Table 2와 같이 정리하였다.

Table 2 Design variables and their limits

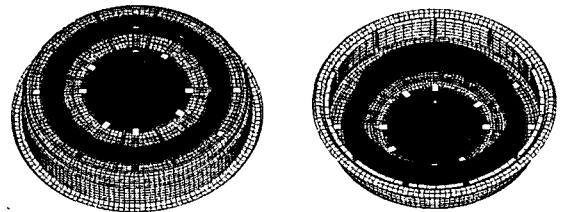
Design Variables	Mark	Lower Value	Center Value	Upper Value
원주방향 비드의 위치(mm)	DV <sub>1</sub>	95	105	115
반경방향 비드의 개수	DV <sub>2</sub>	4	8	12
반경방향 비드의 폭(mm)	DV <sub>3</sub>	4	6	8
홀의 개수	DV <sub>4</sub>	4	8	12
체결부의 개수	DV <sub>5</sub>	4	8	12

Table 3 3-level DOE table and volume velocity

Model	DV <sub>1</sub>	DV <sub>2</sub>	DV <sub>3</sub>	DV <sub>4</sub>	DV <sub>5</sub>	Q (mm <sup>3</sup> /s)
1	95	4	4	4	4	200.33
2	95	8	6	8	8	76.892
3	95	12	8	12	12	48.930
4	105	4	6	12	4	61.620
5	105	8	8	4	8	79.628
6	105	12	4	8	12	45.086
7	115	4	4	8	8	208.48
8	115	8	6	12	12	175.14
9	115	12	8	4	4	77.182

Table 3은 Table 2의 설계변수를 적용하여 조합된 표이다. 총 5개의 설계변수에 9개의 조합이 이루어졌으며, 각각 모델에 대하여 4개의 관심주파수 영역에서 강제진동해석을 수행하여 전체 체적속도의 결과값을 얻었다.

Table 3에서 각각의 결과를 비교해 볼 때 model 3, 6에서 체적속도가 가장 낮은 결과를 나타내었다.



(a) Top view

(b) Bottom view

Fig. 4 A result of forced response analysis on model No. 6 at 440 Hz

Fig. 4는 해석의 한 예로 model 6의 440 Hz에서의 강제진동해석의 결과로 전체적인 변위의 분포를 알 수 있다. Fig. 4에서 보이듯이 청색에서 적색으로 표현될수록 변위가 커진다. 그러므로 가진점과 가까운 로터부심이나 그와 연결된 외

측로터와 내측로터 부위가 적색의 분포율이 높기 때문에 가장 많은 변위를 보였고, 외측로터의 원주방향 비드부분과 내측자석은 청색의 분포율이 높기 때문에 가장 적은 변위를 보였다.

분석된 Q값의 결과로 각 설계변수간의 민감도를 분석하였고, 이를 도식적으로 표현하면 Fig. 5와 같다. 도시된 민감도를 보면, DV<sub>1</sub> 과 DV<sub>5</sub>를 제외한 나머지 변수들은 선형성을 보이고 있다. 그러므로 분석된 Fig. 5의 민감도를 기반으로 9개의 모델에서 해석에 영향을 주는 인자인 최적치 설계변수를 얻을 수 있었다.

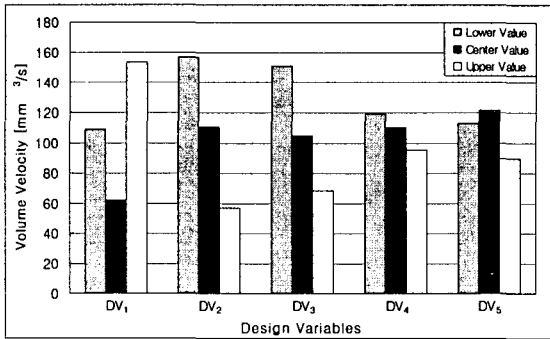


Fig. 5 Design sensitivities for total volume velocity

### 3.2 반응표면법 및 순차적 근사 최적화를 이용한 최적설계

반응표면 모델을 적용한 근사 최적설계를 적용하기에 앞서, Fig. 5의 민감도에 따른 최적치에 대한 해석을 수행하였다. 그리고, 이 설계점을 Table 3에 추가하여 근사최적설계를 수행하였다<sup>[3]</sup>. 민감도를 통한 최적설계치는 Table 4에 정리하였고, RSM을 적용한 최적설계치는 Table 5에 정리하였다.

Table 4 Analysis results of an optimal design determined from design sensitivity

Model	DV <sub>1</sub>	DV <sub>2</sub>	DV <sub>3</sub>	DV <sub>4</sub>	DV <sub>5</sub>	Q (mm <sup>3</sup> /s)
10	105	12	8	12	12	51.752

Table 5 Analysis results of an optimal design determined from RSM

Model	DV <sub>1</sub>	DV <sub>2</sub>	DV <sub>3</sub>	DV <sub>4</sub>	DV <sub>5</sub>	Q (mm <sup>3</sup> /s)
11	95	12	4	8	12	47.614

이상의 결과에서, RSM에 기반한 최적설계치가 민감도에 기반한 최적설계치에 비하여 좋은 결과를 보였지만, Table 4의 model 6에 비하여 다소 나쁜 결과가 도출되었다. 이는,

본 설계 문제가 이산변수(discrete variables)에 대한 최적설계인 관계로 변수 공간에서의 불연속성이 존재하는 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고, Table 4의 model 6, model 3 그리고 민감도에 의한 최적설계치 model 10과 RSM에 의한 최적설계치인 model 11의 공통점을 보면, 반경방향의 비드 개수(DV<sub>2</sub>)와 체결부의 개수(DV<sub>5</sub>)가 모두 12라는 점이다. 따라서, 이들을 고정하면 설계변수 DV<sub>1</sub>, DV<sub>3</sub>, DV<sub>4</sub>에 대한 3<sup>3</sup>개의 경우의 설계가 가능하게 된다. 그런데, model 6, model 10, model 11의 체적속도의 변화가 6.7 (mm<sup>3</sup>/s) 이내이기 때문에, 모델변경에 따른 부가적인 해석 소요시간을 고려하여 추가적인 해석에 기반한 RSM 최적설계를 수행하지 않았다.

## 4. 결론

본 연구에서는 모터 로터부의 유한 요소모델에 대하여 강제진동해석을 하여 체적속도를 구하였고, 체적속도를 최소화하는 형상최적화를 수행하였다. 최적설계를 수행함에 있어서 민감도를 통한 해석값과 RSM기법을 통한 해석값이 model 6의 값과 비슷하므로, model 6의 값이 근사 최적점에 수렴했다고 볼 수 있다. 생산을 고려한 로터를 선정한다면, 가장 최적인 model 6 또는 이와 비슷한 model 3, 10, 11에 대해서 가공의 용이함과 생산원가를 줄일 수 있는 모델을 선택하여도 무방할 것이다. 결론적으로 이 로터 모델에서의 최적형상은 반경방향의 비드 개수와 체결부의 개수가 많을수록 좋은 특성을 나타내고 있다.

추후의 연구에서는 각 구성품간의 접촉점과 연결점을 고려한 해석이 진행될 것이고, 실제 샘플을 제작하여 해석의 결과를 검증하고자 한다.

## 참고 문헌

- (1) 고강호, 1999, "진동-음향 상반 원리에 이용되는 음원의 유효 면적 측정", 한국소음진동공학회지 제9권 제5호 pp943 ~ 948
- (2) Kinsler, L. E. and Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., Fundamentals of Acoustics Fourth Edition pp172 ~ 176
- (3) M. S. Kim, R-INOPL Version 1.5 : User's Guide for Response Surface Modeling and Approximate Optimization, [www.inopl.com](http://www.inopl.com), 2003.
- (4) M. S. Kim, B-INOPL Version 3.0 : User's Guide for Constrained Nonlinear Optimization, [www.inopl.com](http://www.inopl.com), 2001.
- (5) 김민수, 이창욱, 손성효, 임홍재, 허승진, "실험계획법을 적용한 Lower Control Arm의 피로수명 형상 최적설계", 자동차 공학회 논문집, Vol. 11, No.5, 2003.