

BLDC Fan Motor의 소음 원 규명 및 동 특성 분석

신 현정, 이 동일
LG전자 DA연구소

Acoustic Noise Source Identification and Analysis of Dynamic Characteristics Parameters In BLDC Fan Motor

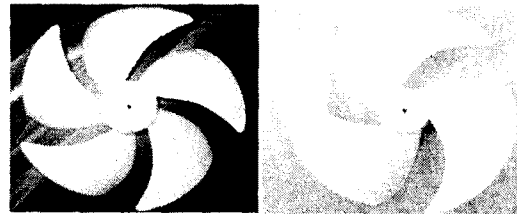
Hyoun-jeong Shin, Dong-il Lee
Digital Appliance Lab, LG Electronics

Abstract - 냉장고에 적용된 BLDC Fan Motor에 있어서 공진소음의 원인에 대하여 연구하였다. 연구에 있어서 종래의 가진 방법을 적용하기 곤란한 구조를 가진 소형 Fan & Rotor System의 동 특성 실험에서 전자 가진법 및 Microphone을 이용한 고유진동수 계측 방법을 사용하고 그 타당성을 보였으며 연구결과, Fan과 Rotor System의 비틀림 고유진동수와 Fan의 굽힘 고유진동수가 BLDC Motor의 Commutating Torque Ripple에 의한 가진 주파수와 일치하여 공진이 발생하는 것으로 분석 되었으며 이와 관련된 주요 인자를 분석하고 대안을 제시하였다.

Motor를 구동한다 (이하 2상 통전 방식) Motor에 전압을 인가하기 위해서, 통전되는 2개의 Switching 소자 중 하나는 DC Link의 Positive, 또 다른 하나는 DC Link의 Negative에 접속된 소자가 통전되며, 이러한 경우의 수는 총 9가지이다. 그러나, 이 중 3가지는 같은 상이 통전되는 경우 이므로 이 경우를 제외하면 모두 6가지의 Switching 상태가 존재한다. 각 Switching 상태에 따른 Inverter의 연결 상태 및 Motor의 전류를 그림 3에 나타내었다. Switching 상태를 위에서 아래로 순차적으로 바꾸어 감에 따라 회전자계를 만들어 줄 수 있다. 이렇게 만들어진 Stator의 회전 자계와 Rotor의 영구자석에 의한 자계의 상호작용에 의하여 BLDC Motor는 회전하게 된다.

1. 서 론

모든 산업 분야에 있어서, 효율적인 에너지 사용의 중요성은 나날이 그 의미를 더해 가고 있으며, 특히, 가전기기산업은 정부의 에너지 규제하해를 거듭할수록 강화되고 있는 추세이며, 따라서 가전기기 업체에서는 구동 원인 모터 및 시스템의 고 효율화를 위한 연구가 활발히 추진되고 있다. 본 연구에서는 최근 냉장고의 소비전력 및 소음 저감을 위하여 점차로 적용이 확대되고 있는 고효율 BLDC Fan Motor에 관한 것으로서 종래 유도전동기는 운전속도가 1속 또는 2속 정도로서 속도 범위가 낮은 반면에 본 모터는 입력 전압을 가변하여 성능을 고려하여 설계자가 원하는 대역을 훨씬 자유로이 설정할 수 있는 장점을 가지고 있어 대부분 2속 또는 3속으로 운전하고 있다. 따라서 특정 운전대역에서 공진현상이 종종 발생하였으나 공진의 원인이 규명되지 않아 운전대역을 변경하는 방법으로 공진을 회피해 왔다. 따라서 본 연구에서는 공진소음의 원인을 규명하고 공진소음 회피설계가 가능한 동특성 인자들에 관한 연구를 수행하였다.



〈그림 2〉 냉기순환 / 응축기용 Fan

2. 본 론

2.1 연구모델 사양 및 구동 원리

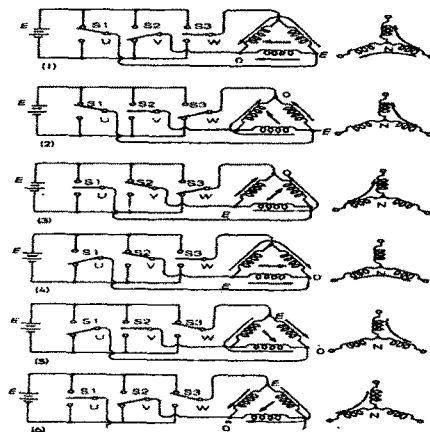
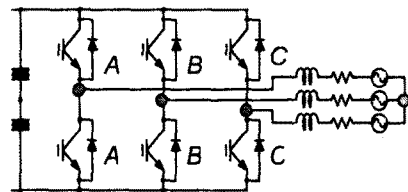
전기적인 관점에서 BLDC의 구동시스템을 이해하기는 쉽지 않으나 본 연구와 관련되어 간략히 사양 및 구동원리를 설명하면 다음과 같다.

- 9 Slot / 6 Pole 구조/인가전압:5Vdc ~ 15Vdc
- 통전 방식: 2상 120 통전
- 출력: 0.8 ~ 1.5Watt/운전범위:0 ~ 1500rpm



〈그림 1〉 BLDC 모터의 구조도

그림 3은 본 연구의 대상 모델인 DIOS 냉장고의 응축기 냉각용[이하 기계실 용] 및 냉동실 냉기 송풍용[이하 냉동실용] BLDC Motor의 구동회로와 모터의 등가회로를 나타낸 것이다. BLDC Motor는 6개의 Switching 소자 중 항상 2개의 Switching 소자만 통전하여

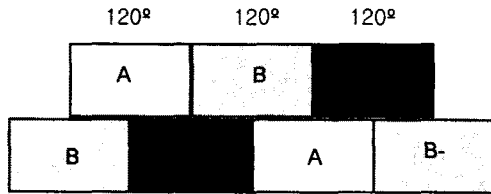


〈그림 3〉 BLDC 모터의 구동 회로

2.2 BLDC Motor의 전자기 가진원

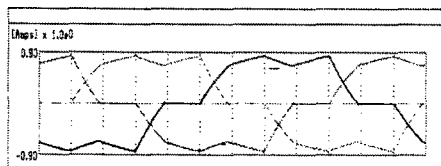
전술한 바와 같이 BLDC(Blushless Direct Current) 모터는 종래의 DC 모터에서 브러시(Blush)와 정류자(Commutator)를 없애고 위치센서 또는 센서리스 방식을 이용하여 로터(Rotor)의 위치를 감지하여 각 위치에 따라 전자적으로 고정자(Stator) 코일에 전류를 흘려주어 회전자계를 만들어 회전하는 방식이다. 그러므로 DC모터의 정류과정에서 발생하는 기계적인 노이즈가 발생하지 않는다는 장점이 있다. 이밖에도 BLDC 모터는 초저속 또는 초고속, 다극, 긴 수명이 요구되는 기계에 사용할 수가 있다. BLDC모터는 회전자와 고정자, 축으로 구성이 되며, 회전자는 영구자석(Permanent Magnet)을 사용하며 고정자에는 코일이 감겨져 있다. 본 과제에서 연구대상으로 사용된 BLDC 모터는 전술한 바와 같이 9슬롯 6극 구형과 2상 통전 구동방식의 BLDC 모터로서 통전되는 상(phase)을 매 60도(전기각)마다 전기적으로 절환(Commutation)해야 하므로 모터의 인덕턴스(Inductance)성분에 의하여 전류의 위상지연(Phase Lag)이 발생하여 토크리플(Torque Ripple)의 원인이 되고, 이 토크리플이 모터의 가진원(Exciting Source)이 된다. 절환 주파수(Commutation Frequency) = 전기적주파수 X 6[Hz]=(Poles X N/120)X 6[Hz]가 된다.

그러므로 본 과제에 사용된 BLDC 모터는 회전속도의 18배 성분의 주파수를 기본으로 한 가진주파수가 존재하게 된다. 그림 5는 이상적인 경우의 각상에 대한 여자 전류 및 합성된 토크 프로파일을 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 토크성분은 맥동이 없는 패턴을 보이나 현실적으로 이러한 이상적인 과정을 보이는 경우는 없다. 왜냐하면 각상에 흐르는 전류를 절환할 때 코일의 인덕턴스 성분에 의하여 그림 6과 같이 구형과 전류가 인가되지 않고 사다리꼴과 유사한 형태의 전류가 인가되므로 발생토크는 맥동성분을 포함하게 된다.



〈그림 5〉 BLDC Motor의 상절환 Logic

또한 BLDC 모터는 영구자석을 사용하고 있기 때문에 영구자석과 스테이터 슬롯오픈[Slot Open]과의 상호작용에 의하여 발생하는 Cogging Torque가 존재하게 되는데 1회전 당 슬롯수와 폴 수의 최소공배수를 기본파로 하는 전자기 가진력이 있게 된다. 본 논문의 연구대상 모터는 6극 9슬롯의 구조를 가지고 있으므로 1회전당 18회의 코깅 토크를 기본파로 하는 가진주파수 및 그것의 고조파성분이 존재하게 된다. 이 성분은 우연히 Commutation Torque Ripple의 주파수와 일치하나 본 논문에서 고려된 모터에서는 그 크기가 상대적으로 매우 작아 가진원으로 보기 어렵다. 이를 확인하기 위해서 Cogging Torque만 존재할 경우[인가전류=0]에서 소음을 측정할 결과, 공진소음은 거의 발생하지 않고 있음을 확인하였기 때문에 연구대상 모터의 공진소음의 가진원은 Commutation Torque Ripple로 보는 것이 타당할 것으로 생각 된다.

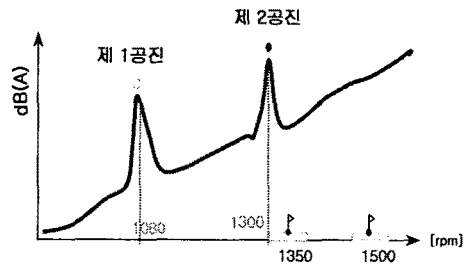


〈그림 6〉 BLDC 모터의 각상의 전류 파형

2.3 BLDC Fan Motor의 공진현상

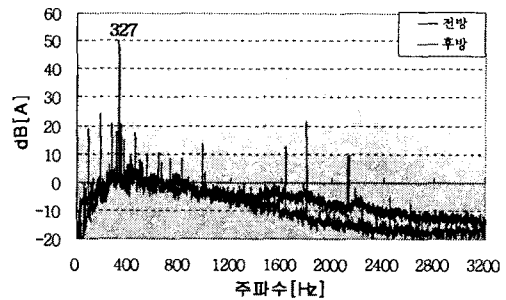
그림 7은 냉동실용 BLDC Fan Motor[Fan 장착상태]의 회전수별 소음을 측정할 결과인데 1080rpm 및 1300rpm대역에서 공진소음이 발생하고 있음을 알 수 있다. 기계실용 BLDC Fan Motor도 이와 마찬가지로 Fan은 서로 상이 하지만 유사한 대역에서 공진 소음이 발생하고 있으며 특히 냉동실용의 경우에는 운전점인 1350rpm 부근에 공진점이 있기 때문에 문제가 되고 있다.

운전점인 1500rpm 대역은 공진현상은 없으나 공진현상의 원인이 규명되지 않아 Motor 또는 Fan의 구조 변경 시 공진의 가능성이 있어 공진소음의 원인을 분석하는 것은 향후 모델 전개에 있어 중요한 Issue가 되고 있다. 본 논문에서는 기계실 팬 모터는 냉동실과 동일한 현상을 보이므로 냉동실 팬 모터에 있어서 1080rpm 대역[제 1공진]과 1350rpm[제 2공진]의 가진원과 동특성을 분석하고 이에 대한 대안을 제시하고자 하였다.

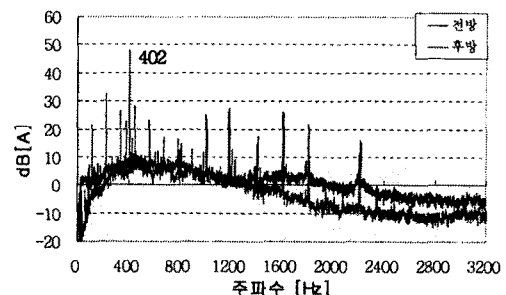


〈그림 7〉 회전속도별 소음 측정 결과

그림 8은 냉동실용 Fan Motor의 공진점에서의 소음 주파수 분석 결과이다. 2.3에서 설명한 바와 같이 1080rpm, 1300rpm에서의 가진 주파수는 정확히 Commutation Torque Ripple의 기본파 성분과 일치하고 있음을 알 수 있다. 기계실 Fan Motor의 경우도 마찬가지로 이와 유사한 현상을 보이고 있으며 따라서 공진소음의 원인이 되는 가진 주파수는 Commutation Torque Ripple 성분이 주요 요인으로 판단된다.



〈그림 8〉 소음 주파수 분석결과 (@1,080 rpm)



〈그림 9〉 소음 주파수 분석결과 (@1,300 rpm)

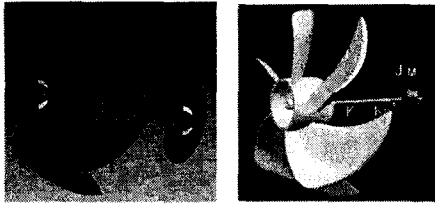
2.4 축계 및 Axial Fan 동특성 분석

공진현상을 분석한 결과 제2공진 회전수는 Fan의 영향을 크게 받지 않으며 Rotor의 Inertia 및 축의 길이와 관련이 있었고 제1공진은 Fan의 형상에 따라 차이가 있었음에 착안 하여 Fan의 공진 및 축계 Torsional Vibration 가능성을 검토하였다.

2.4.1 축계Torsional Vibration 해석

Torsional Vibration을 계산하기 위해 유한요소 해석을 통하여 축계 해석을 수행하였다. 그림 10과 같이 본 연구모델의 Rotor System은 Shaft 끝단에 압입된 Axial Fan 및 Shaft 그리고 Shaft에 일체로 삽입 고정된 영구자석으로 구성되어 있다.

해석은 문제가 된 기존의 플라스틱 Magnet[비중 3.7]에 대하여 수행되었으며 해석결과, 375Hz의 비틀림 고유진동수를 갖는 것이 확인되었으며 Fan과 영구자석이 서로 다른 방향으로 비틀리며 특히, 비틀림 작은 영구자석의 위치에 근접할수록 크게 나타남을 알 수 있었고 비틀림 진동시 Fan Blade가 굽혀지면서 축 방향으로 진동하는 모드를 보였다.



〈그림 10〉 FEM 해석 결과

2.4.2 축계Torsional Vibration 계측

실험적으로 해석결과를 확인하기 위하여 그림11과 같은 실험장치 즉 전자 가진법에 의하여 고유진동수를 계측하였으며 이는 기 계측된 공진점의 주파수와 거의 일치하며 해석결과와 비교할 때도 거의 유사함을 알 수 있었다.

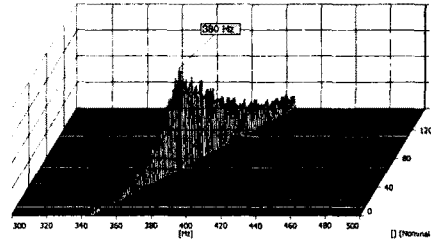
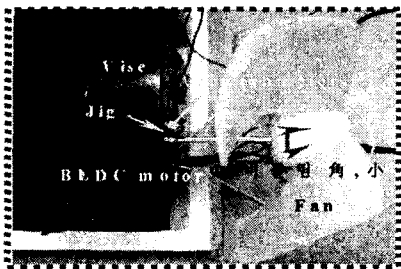
2.4.3 축계Torsional Vibration 회피설계 인자

알려진 바와 같이 축계의 2자유도 비틀림 진동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} J_f & 0 \\ 0 & J_M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_t & -k_t \\ -k_t & k_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

위 Matrix의 해는 다음과 같이 나타낼 수 있으며

$$\omega^2 \left[\omega^2 - \left(\frac{k_t}{J_f} + \frac{k_t}{J_M} \right) \right] = 0 \quad \begin{matrix} \Theta_1 = \left[\frac{1, @ \omega = 0}{-J_f, @ \omega = \omega_1} \right] \\ \Theta_2 = \left[\frac{1, @ \omega = 0}{-J_f, @ \omega = \omega_1} \right] \end{matrix}$$



〈그림 11〉 Torsional Vibration 계측장치 및 결과소음

여기서, 첫번째 식은 비틀림 고유진동수 계산식이고 다음 식은 진동 모드를 나타내는 식이다. 여기서 이식을 좀 더 일반화된 식으로 바꾸면 다음과 같다.

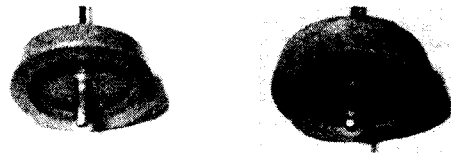
$$\frac{1}{J} = \frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_f}$$

$$f_{torsion} = \sqrt{K \left(\frac{1}{J} \right)}$$

위의 식에서와 같이 Fan의 Inertia는 영구자석의 Inertia에 비하여 매우 크므로 1/J 성분은 Fan의 Inertia에 영향을 거의 받지 않으며 기계실과 냉동실에 있어서 제 2공진 축, 비틀림 공진점은 Fan의 형상에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있고 고유진동수를 변경하기 위해서는 축의 강성을 변경시키거나 축을 변경하지 않는 경우 Magnet의 관성을 변화시키는 것이 큰 효과가 있을 것으로 추정된다. 따라서 아래 표 및 그림과 같이 기존의 Plastic Magnet[비중 3.7]를 Sintered Magnet[비중 5]로 변경하였으며 이 경우 Inertia를 약 56% 증대시킬 수 있어 고유진동수를 25% 낮출 수 있다.

〔표 1〕 고유진동수 변경 결과[실험치]

Rotor Type	고유진동수 [실험]	Jm[Inertia, [kg m ²]] [계산]
Plastic Magnet	380Hz	1.83e-6
Sintered Magnet	301Hz	2.84E-6



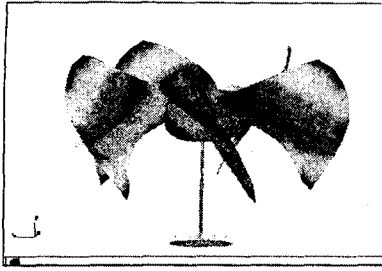
〈그림 12〉 구조도[좌: Plastic,우: Sintered

2.4.4 Axial Fan 동특성 분석

공진현상을 분석한 결과 제1공진회전수는 Rotor의 영향을 크게 받지 않으며 Fan 형상과 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었다 따라서 Fan Blade의 동특성 분석을 수행하였다.

2.4.5 Rotor Mass가 고려된 Fan의 동특성 해석

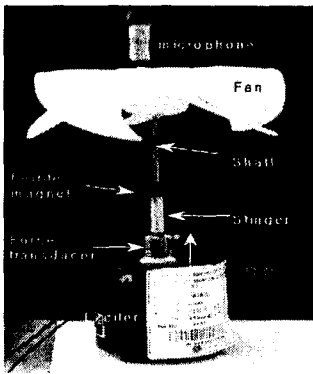
그림 13은 유한요소법에 의하여 Rotor가 부착된 팬의 고유진동 모드 해석 결과이다 그림에서 보여 준 바와 같이 Blade가 상하방향으로 굽힘 변형되는 모드를 보여 주고 있으며 고유진동주파수는 323Hz로 나타났다. 이는 제 1 공진점에서의 주파수와 거의 일치함을 알 수 있으며 이를 변경하기 위해서는 팬의 재질 즉 Young's Modulus와 Blade 두께, 허브와 Blade 연결부간의 굽힘 강성 등이 주요한 인자임을 보였다.



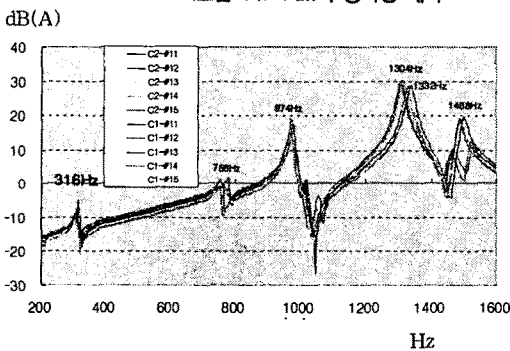
〈그림 13〉 유한 요소 해석 결과

2.4.6 Rotor가 고려된 Fan의 동특성 계측

실험적으로 해석결과를 확인하기 위하여 그림 14과 같은 실험장치를 사용하여 로터가 Fan에 취부된 상태에서의 고유진동수를 계측한 결과, 그림 15에서 보여준 바와 같이 316Hz로 측정되었으며 이는 기 계측된 제 1 공진점에서의 주파수(323Hz)와 거의 일치하고 해석결과와도 잘 일치하는 것을 알 수 있었다



〈그림 14〉 Fan의 동특성 계측



〈그림 15〉 Fan의 FRF 측정 결과

2.4.7 Fan 고유진동수 회피설계 인자

해석결과, 허브와 Blade간의 굽힘 강성 등이 주요한 인자임을 보였으므로 풍량 및 구조변경의 제한성을 고려하여 아래의 그림과 같이 팬의 형상을 변화시켜 고유진동수를 변경하였다.



〈그림 16〉 Fan의 구조 변경도

〔표 2〕 Fan고유진동수 변경 결과 [실험 값]

Fan Type	냉동실 Fan	기계실 Fan
기 존	316Hz	256Hz
변 경	270Hz	220Hz

3. 결 론

냉장고에 적용된 BLDC Fan Motor에 있어서 공진소음의 원인은 Fan과 Rotor System의 비틀림 고유진동수 및 Fan의 굽힘 고유진동수와 BLDC Motor의 Commutation Torque Ripple에 의한 가진 주파수와 일치하여 공진이 발생하는 것으로 분석되었으며 이와 관련된 주요 인자를 분석하고 대안을 제시하였다 아울러 소형 Fan & Rotor System의 동특성 실험에 있어서 전자 가진법 및 Microphone을 이용한 고유진동수 계측방법의 타당성을 보였으며 향후, 소음의 전파경로를 분석하기 위해 음향방사 특성 연구를 수행할 예정 이며 본 모터는 Side by Side 냉장고(DIOS)에 양산 적용하여 제품 소음 레벨 저감은 물론 품질 향상에 기여 할 수 있었다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] Thomas M. Jahns, Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drive, IEEE, 1996
- [2] C. Studer, "Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines", IEEE, 1997
- [3] L. RAN, " Torsional Vibrations In Electrical Induction Motor Drives During Start-up ", Transaction of ASME, Vol 118, APRIL 1996.
- [4] Francis S. TSE, " Mechanical Vibrations - theory and applications ", Allyn and Bacon, 1978