

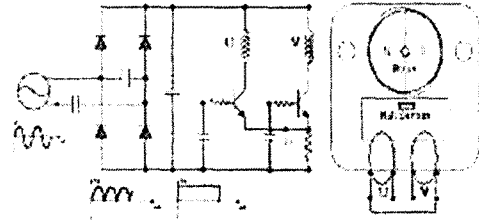
전자기 가진 원 저감에 의한 BLDC Fan Motor의 공진 소음 저감에 관한 연구

신현정 이동일
LG전자 DA연구소

Study on the Noise Reduction of BLDC Fan Motor by the Diminution of the Electro-Magnetic Exciting Source

Hyun-Jung, Shin, Dong-Il, Lee
DA Research Lab. LG Electronics.

Abstract - It is important to diminish noise source of an electric motor used in appliances. We studied on the noise reduction of BLDC motor to drive a fan. Especially, this study was focused on detent torque caused by interaction between a permanent magnet of rotor and groove in stator. This source and rotating system brought about a resonance. This paper showed that the higher harmonic component of this torque had a main factor to lessen noise. So, we had designed new magnets with shape like a peanut and pseudo-sinusoidal flux density for low-noise BLDC motor in refrigerator.



[Fig. 1] Simple Drive Circuit and Structure

1. 서 론

가전제품에 있어서, 품질의 중요 요인 중의 하나인 제품의 소음 수준은 소비자는 물론 생산자 입장에서도 간과 할 수 없는 매우 중요한 품질 평가 항목이다. 일반적으로 가전제품에서 발생하는 소음은 제품에 따라 그 특성이 다르며, 수준 또한 제품에 따라 다르다. 청소기와 에어컨의 제품 예를 생각하면 그 차이점을 가늠해 볼 수 있다.

본 연구에서는 이러한 다양한 제품 중에서 냉장고를 대상 제품으로 하였으며, 특히, 냉장고용 팬 모터에 대하여 연구하였다. 냉장고는 제품 특성상 가동시간이 년 중 무후로써, 매우 많은 가동 시간을 갖는다. 이러한 이유로 인하여 제품에 있어서 에너지 효율 또한 매우 중요한 제품 품질 항목이며 고 효율화를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 냉장고용 팬 모터는 냉기 순환(고내 송)과 냉동 사이클 중 냉매 응축을 돕기 위한 목적(기계실용)으로 각각 사용되며, 앞서 언급한 고 효율화의 추세에 맞추어 기존의 유도 전동기에서 BLDC 모터로의 대체 적용이 이루어지고 있다. 그러나 기존의 유도 전동기와는 다른 구동 특성을 갖는 BLDC 전동기는 적절한 설계가 이루어 졌을 때 우수한 소음 특성을 갖으나, 그렇지 않을 경우 오히려 소음 문제를 유발 할 수 있기 때문에 BLDC 모터의 전자기 가진력 특성을 고려한 소음 저감 연구가 필요하다.

본 연구에서는 냉장고의 저온 단속(ON/OFF) 운전(약 -20℃)중 상용 전원 구동 BLDC 팬 모터가 특정 영역에서 운전 될 때 발생하는 이상 소음과 관련하여, 현상 분석, 개선 설계 및 검증 등의 과정을 통한 소음 저감에 관한 연구 결과를 나타내었다.

2. 본 론

2.1 현상 분석

상용 전원 구동 BLDC 팬 모터의 구동 원리는 아래 [Fig.1]과 같이 비교적 간단한 구동 회로 및 구조로 구성되어 있다. 상용 교류 전원의 인가로부터 간단한 정류 회로를 거쳐 모터의 고정자에 있는 홀(Hall) 센서로부터의 자극 변화를 감지하여 매 180도 마다 U 및 V 상의 각각에 정류된 전압을 흘려서 회전자를 구동하는 원리로 구성된다. 본 연구에서 검토하고 있는 BLDC 모터는 스킴리톤 타입(Skeleton type)의 단상 2극(pole) 모터이며, 특히, 이와 같은 형식의 모터는 고정자에 디텐트(Detent Groove)를 형성하여, 항상 고정자와 회전자가 일정한 위치에 정지하고 그 위치에서 기동 한다. 그렇게 함으로서 초기의 기동시 발생 할 수 있는 기동 실패에 대한 문제점을 해결하고 있다.

이러한 BLDC 모터를 냉장고 쉘 구동용으로 적용 시, 특정 운전 영역(약 1,650rpm)에서 비정상적인 소음이 발생한다. [Fig. 2]는 그 측정 예를 보여 주고 있는데 압축기의 단속 운전 운전으로 발생하는 소음 변화 외에도 비정상적으로 냉장고 전 후방에서의 소음 변화가 매우 크게 발생하는 현상이 관측 되어진다.



[Fig. 2] Noise Profile in SET Condition.

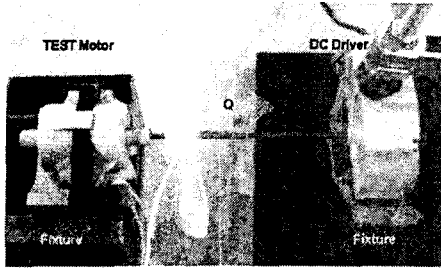
2.2 원인 분석

BLDC 모터의 전자기 맥동 토크 (Electro-Magnetic Pulsation Torque)발생은 일반적으로 아래의 식 과 같이 2개의 토크리플 성분으로 나누어 볼 수 있다.

$$T_{\text{ripple}} = T_{\text{cogging}} + T_{\text{commutating}}$$

여기서 발생 토크(Trippl)는 통전 유무와 상관없이 자석과 고정자 슬롯의 기하학적 형상에 의하여 존재하며, 미소 회전각 변화에 따른 자기에너지의 변화로 정의되어지는 코깅토크(Cogging Torque)와 전류의 왜곡에 의하여 발생하는 절환 토크 리플(Commutating Torque Ripple)로 구성된다.

앞서 [Fig.2]에 언급된 비정상적 소음을 분석하기 위해서는 소음 발생원에 대한 원인 분석이 필요하며 이를 위하여 팬 모터 회전수 변화에 따른 소음 변화추이 및 각각의 발생 토크 리플에 대한 소음 기여도를 분석하였다. [Fig. 3]은 이를 위한 간단한 시험 장치를 나타내며, 시험모터를 구동하기 위한 모터는 [표1]에서 보는 바와 같이 시험모터와 상이한 전자기적 특성을 갖는 것으로 선정하였다.

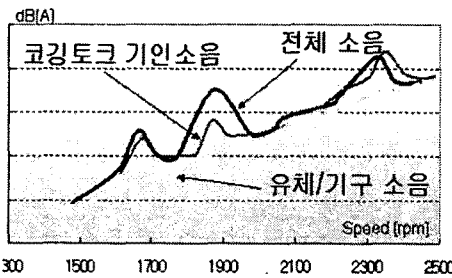


[Fig.3] Test Apparatus

<표 1> Test motor Vs. DC Drive

구분	Test motor	DC Driver
Poles	2	6
Phase	1	3
Slots	2	9
Cogging Frequency	rpm × 2	rpm × 18
Input	상용전원	DC 전원
Remarks	Top mount	Dios용

[Fig.3]과 같은 시험 장치를 통하여, 시험모터에 통전(Voltage=0)을 하지 않은 상태에서 자화되지 않은 영구자석을 적용하여 3상 BLDC 모터로 구동하면서 유체기인 소음을 측정하고, 자화된 영구자석을 적용하여 3상 BLDC모터로 구동하여 코깅 토크 기인 소음을 측정하여 아래 [Fig.4]와 같은 전체소음(Overall noise)에 대한 개별 소음원의 기여도를 얻을 수 있었다. 이로부터 코깅토크로 야기된 소음이 전체소음에 가장 지배적 영향을 주며, 특히 공진으로 판단되어지는 특정 운전 속도에서 그 기여도는 매우 큼을 알 수 있다.

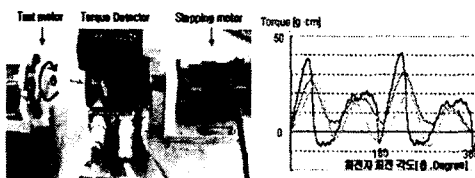


[Fig.4] Noise Source Identification

2.3 코깅토크 계속

본 절에서는 코깅토크가 가장 지배적인 소음 원인으로 판단되어짐에 따라 계측을 통하여 코깅토크를 정량화하고 회전 축계의 진동 특성을 검토하였다. 단상 2극 (Pole) 모터에 있어서 코깅토크의 기본 주파수 (f)는 다음과 같다.

$$f = (\text{rpm} / 60) \times (\text{Poles}) : \text{fundamental frequency} \quad (\text{식 1})$$



[Fig.5] Test Apparatus of Cogging and Torque Curve

위의 [Fig.5]에서 보는 바와 같이, 코깅토크를 측정하기 위하여 일정한 속도(약 1분당 1회전)로 회전하는 스텝모터와 토크미터를 이용하였고 회전자를 일정 속도로 회전시키면서 회전자의 회전 각 위치(θ) 별 코깅에 의하여 발생하는 토크를 계측 할 수 있다. 여러 종류의 회전자 별 측정 예를 [Fig.5]에 나타내었으며 매우 작은 토크의 크기를 측정하고 있기 때문에 반복적인 측정을 통하여 측정값의 정도를 확인하였다.

2.4 동특성 분석

축계의 진동 특성 분석을 위하여 회전 축계를 포함한 웬의 동특성과 축계의 비틀림 고유 진동 특성을 검토하였다. 웬의 동특성은 가진기를 이용한 정현파 스윕(Sine Swept)가진 방법으로 구해진 주파수 응답 함수로부터 [Fig.6]과 같이 얻어졌으며, 비틀림 공진 주파수는 아래 [식 2]와 같은 간단한 수식에 의하여 [표 2]와 같이 계산되어진다.

$$f_{\text{torsion}} = \sqrt{K \left(\frac{1}{J} \right)} \quad \frac{1}{J} = \frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_f}$$

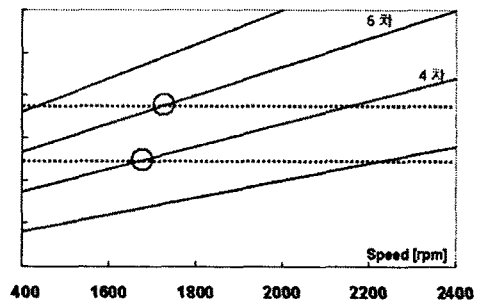
<표 2> Natural frequency by torsion [Hz]

구분	Plastic	관성비 (fan / plastic magnet)
고내 (F)	289	4
기계 (C)	275	5

이로부터 냉동실용 웬의 고유 진동수는 190Hz, 240Hz, 350Hz를 갖으며 축계 비틀림 고유진동수는 약290 Hz임을 확인하였다.

2.5 Campbell 선도

앞서 확인된 축계 / 웬의 고유진동수로부터 회전체 캠벨(Campbell) 선도를 검토하였다. 코깅토크가 가장 주요한 가진 원인으로 확인되어진바, 코깅토크의 고차고조파 성분과 일치하는 고유진동수를 확인하였다. 특정 운전 영역에서 이상소음은 냉동실용 웬 모터의 경우 코깅토크의 4차 고조파 가진 성분과 웬의 고유진동수가 일치하여 약 1600~1700 rpm영역에서 발생하였으며, 또한 5차의 고조파 가진 성분과 축계의 고유진동수가 일치하면서 역시 유사 운전 영역에서 공진을 일으킴을 확인하였다.



[Fig.7] Campbell Diagram - Resonance

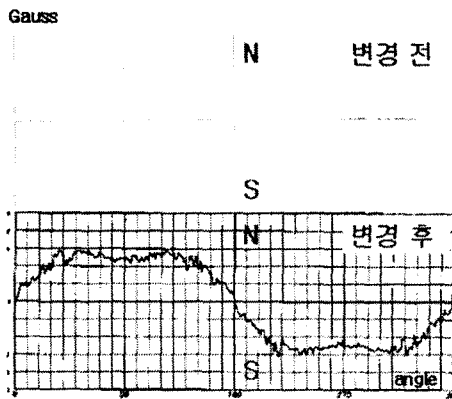
[Fig.7]의 캠벨 선도로부터 공진 영역은 상용 전원 구동 BLDC 웬 모터의 운전 전압 범위를 고려 할 때 약 1,400 ~ 2,200rpm (냉동실용의 경우)의 매우 폭 넓은 운전 영역을 갖는다. 이로부터 동특성 개선을 통한 공진 회피는 불가능으로 판단되어졌다. 따라서 가진력을 저감할 필요성이 있으므로 공진소음의 주 기여 인자인 코깅토크 저감을 통한 소음 개선의 필요성을 확인하였다. 특히 이 토크의 기본파에 해당하는 1~2차 성분은 앞서 언급한 바와 같이 기동 특성을 유지하기 위하여 필수적인 성분이기때문에 4차~6차 성분만의 코깅토크 가진 원에 대해서 그 크기를 저감 시켜서 공진시 발생하는 소음의 크기를 감소시킬 필요가 있다.

3. 공진 소음 저감

3.1 개선안의 도출

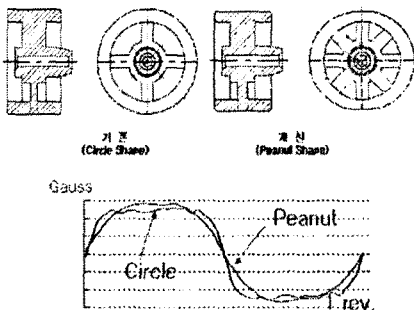
고차 성분의 코깅토크를 저감하기 위하여 일반적으로 회전자 자석의 자속 밀도(Flux density)를 최대한 정현파(sinusoidal wave)형태로 자화(magnetization)시킴으로써 고차 성분을 저감하는 것이 가능하다. 그러나 이는 펌 모터의 전기적 특성 검토도 함께 이루어져야 하는 부분이다. 본 연구에서는 이를 위하여 두 가지 방법을 검토하였다. 자석의 자화 패턴 변경 그리고 자석의 형상 변경을 고려하였으나 보다 효과적인 방법으로 판단된 후자의 경우에 대하여 분석한 결과를 더욱 더 자세히 언급하기로 한다.

먼저, 자화 패턴 변경을 통한 회전자 자석의 표면 자속밀도분포(Surface Flux Density Distribution)의 차이를 [Fig.8]에 나타내었다. 이는 후자의 경우에도 동일한 형태를 갖는다. 이 방법에 있어서 소음 저감 효과 또한 매우 우수한 것으로 판단되어 졌다. 이 방법으로부터 자석의 표면자속밀도분포를 정현파가 되도록 구현하는 것이 코깅토크의 고조파 성분 저감에 많은 영향을 줄 수 있었다.



[Fig.8] Surface Flux Densities

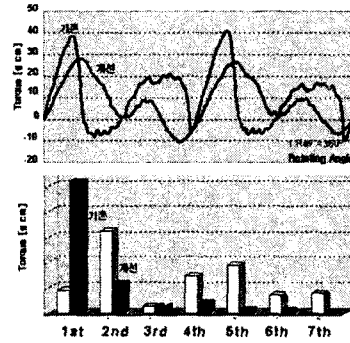
후자의 경우에 있어서 제안된 회전자 자석의 형상은 [Fig.9]와 같으며 이는 마치 땅콩 형상과 유사한 구조를 가짐으로 편의상 땅콩(Peanut Shape)이라 명명 하였다. [Fig.9]에서 보는 바와 같이 자석 형상의 변화로 공간자속밀도(Gap Flux density)의 변화가 더욱 정현파에 가깝게 변화 될 수 있으며 이는 고차의 코깅토크 가진원을 저감함에 있어서 보다 효과적인 것으로 평가된다.



[Fig.9] Peanut Shape & Gap flux

3.2 소음 저감 효과 파악

제안된 자석 형상을 갖는 회전자에 있어서 고차의 코깅토크 성분의 크기 변화를 확인하기 위하여, 앞서 언급한 바와 같은 측정 장치를 통하여 그 크기를 측정 한 후 코깅토크의 고조파 성분 분석을 하였다. 이로부터 관심 고조파 성분인 3차 ~ 6차 성분 코깅토크의 크기가 많이 저감되었음을 확인하였다. [Fig.10]은 그 결과를 나타낸다. [Fig.10]에 나타난 바와 같이 측정된 결과로부터 코깅토크의 고차 고조파 성분이 최대 90% 정도 감소하였음을 확인 할 수 있었다.



[Fig.10] Cogging torque & Harmonics

한편, 기본과 성분의 변화는 펌 모터의 전기적 특성 감소를 초래할 수 있으나 현재의 개선안인 자석 형상 변경품의 경우 그 특성 변화가 거의 없는 것으로 나타났으며 대표적인 특성 값인 역 기전력의 비교를 [표 3]에 나타내었다

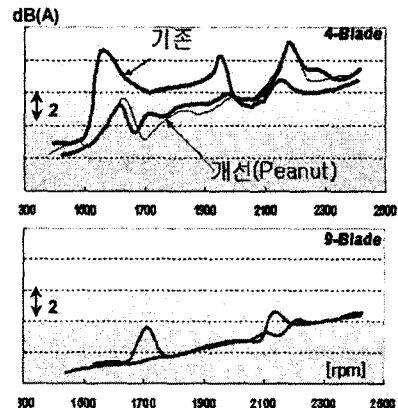
<표 3> 역기전력 비교

	B-emf [V,RMS]	RMS percent
기존	9.54	100%
개선 II	9.48	99%
개선 I	9.30	97%

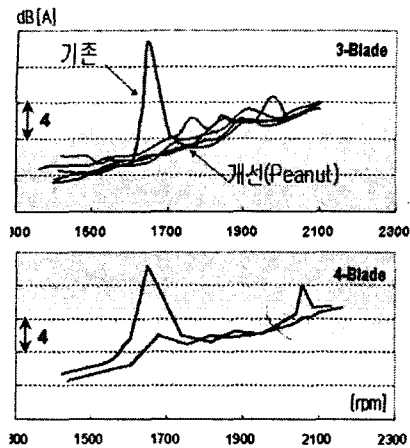
제안된 개선 형상의 회전자 자석을 적용하여 냉장고 장착 소음 시험을 하였다. [Fig. 11] 및 [Fig.12]는 냉동실 및 기계실용 펌 모터에 적용하여 개선 전과 개선 후의 소음 수준을 비교한 결과이다. 이로부터 공진 대역에서의 소음 레벨이 상당히 저감되었음을 알 수 있었다. 따라서 본 모터의 공진 소음원은 코깅토크의 고차 고조파 성분이었음을 확인 하였다.

4. 결 론

- 이와 같은 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.
- 1) 소음의 원인은 전자기 가진원의 하나인 코깅토크와 펌/축계 비틀림 공진으로 발생하였음을 규명하였고 특히 코깅토크의 고차 고조파 성분이 매우 중요한 인자로 검토되었다.
 - 2) 회전자 자석의 자화 패턴 및 자석의 형상 변경을 통하여 자속 밀도를 정현파 형태에 가깝게 함으로써 코깅토크의 고차 고조파 성분을 저감 할 수 있음을 확인하였다.
 - 3) 개선된 회전자 자석을 적용한 모터를 냉장고 세트에 장착시 종래 대비 공진대역에서의 소음 레벨을 5~12 dB(A)정도 저감 하였다.
 - 4) 본 모터는 일반형 및 3 도어용 냉장고에 양산 적용하여 제품 소음 레벨 저감은 물론 품질 향상에 기여 할 수 있었다.



[Fig.11] Noise Evaluation in SET



[Fig.12] Noise Evaluation in SET

[참 고 문 헌]

- [1] J.R.Hendershot,Jr, " Design of Brushless Permanent Magnet Motors",1994.
- [2] Tse, " Mechanical Vibrations ",1990.
- [3] Thomas M. Jahns,Soong, W.L." Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives",Industrial Electronics, Vol. 43, pp 321 - 330, IEEE, April, 1996
- [4] C. Studer,"Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines", IEEE, Volume 1, 5-9 Oct. pp 42 - 49, 1997
- [5] Praveen Vijayraghavan," Noise in Electric Machines ", IEEE, 1999
- [6] L. RAN, "Torsional Vibrations In Electrical Induction Motor Drives During Start-up", Transaction of ASME, Vol 118, April 1996.
- [7] Francis S,Tse"Mechanical Vibrations-Theory and Applications ", 1978