

코깅 토포크 저감이 기계 진동·소음에 미치는 영향

주관정* 최홍순* 이상필* 홍정표** 한승엽***

* 삼성전기(주) 종합연구소

** 한양대학교 전기공학과 박사과정

*** 서울대학교 전기공학과 교수

Effects of Cogging Torque Reduction on Mechanical Noise and Vibration

K. J. Joo* H. S. Choi* S. P. Lee* J. P. Hong** S. Y. Hahn***

* Samsung Electro-Mechanics Co.

** Han Yang Univ.

*** Seoul National Univ.

Abstract

Recently, a lot of efforts have been made to satisfy noise and vibration performance requirements of rotating electric precision machines by the use of various numerical techniques. This paper looks into the influence of the magnetization pattern and the shape of air gap which play the role of primary variables of the electro-magnetic circuits, and finally, an experimental verification has been performed to illustrate the efficiency and the advantages of the optimal air gap shape minimizing the cogging torque.

1. 서론

회전기에 대한 성능 및 품질 경쟁은 기기의 고정밀화, 경박단소화 경향과 함께 날로 치열해지고 있다. 이런 추세와 함께 제품의 성능을 향상시키기 위한 설계기술 연구와 생산제조기술에 대한 연구 등 다각적인 기술수준 향상이 요구되고 있고, 제품설계 요소기술도 복합화의 양상을 띠고 있다. 예를들어, 컴퓨터 주변장치 등에서 사용되는 회전 구동용 소형 정밀 모터의 경우, 전기에너지가 자기에너지를 형성하며 기계에너지로 변화되는 과정에서, 전기적인 요인들이 기기의 구조적 기계특성과 상호연동되어 작용하므로, 전기적인 측면에서의 설계안으로는 최적설계를 실현하기 힘들게 되었다.

회전기기의 진동·소음 품질은 [1], 회전축의 정렬불량, 베어링 결함, 불균형질량, 조립시 예하중에 의한 기계적 헐거움, 회전체의 기하학적 중심이 회전자 중심과 일치하지 않는 편심 등의 요인들과, 영구자석 재질이나 착자분포, 공극형상 (또는 돌극 형상) 등 자기에너지의 크기를 결정짓는 요인들에 의해 좌우된다고 볼수있다. 최근들어, 착자기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고 [2, 3], 공극형상의 최적설계를 통해 코깅토포크의 크기를 감소시키므로써 회전기기의 성능을 향상시키기 위한 노력이 계속 되어오고있다 [4, 5]. 코깅토포크의 푸리에급수 전개방식으로 설명한 분석적인 접근방법에 대해서는 참고문헌 [6, 7]을 참고하기 바란다. 이 코깅토포크는 외부 제어장치로서 제어하기 곤란하므로 기기의 진동과 소음에 직접적인 영향을 미친다.

따라서 본고에서는 자기회로의 주된 영향인자인 자화분포

와 공극의 현상에 대해서 영향분석을 하였으며, 코깅토포크를 최소화하는 공극의 형상이 진동·소음의 저감에 미치는 효과를 분석하였다.

2. 진동·소음 저감 설계

회전자의 회전에 따른 회전기기의 시스템 자기에너지 변화량에 의해 야기되는 힘을, 기기에 작용하는 외력으로 모델링하면, 주파수 영역에서의 기기의 동력학적 거동은 다음과 같이 표현될수 있다.

$$\{u(\omega_k)\} = [H(\omega_k)] \{p(\omega_k)\}, k=1, 2, \dots \quad (2.1)$$

여기서,

$$[H(\omega_k)] = 1 / ([K] + i\omega_k [C] - \omega_k^2 [M]) \quad (2.2)$$

위 식에서, $[H(\omega_k)]$ 는 주파수 ω_k 에 대한 주파수 응답함수(Frequency Response Function)를 나타내는 매트릭스를, $[K]$ 는 시스템 강성 매트릭스를, $[C]$ 는 감쇠(댐핑) 매트릭스를, $[M]$ 은 질량 매트릭스를, $\{p(\omega_k)\}$ 는 주파수 ω_k 에 대한 힘 성분벡터를 각각 의미한다. 매트릭스와 벡터의 크기는 시스템의 자유도에 의해 결정된다.

ω_k 는 힘의 고조파 주파수 성분을 의미하는데, 회전자 회전방향 힘만을 고려해 본다면, ω_k 는 시스템 자기에너지가 작겨지는 방향으로 작용하는 힘 즉, 코깅토포크를 발생시키는 분포하중의 주파수 성분을 의미한다. 따라서 식(2.1)로부터, $\{u(\omega_k)\}$ 의 직접적인 영향인 진동·소음은 힘 $\{p(\omega_k)\}$ 에 의해 결정되므로 자기에너지의 영향인자인 자화분포와 공극의 현상에 크게 좌우됨을 알수 있다. 본장에서는 자화분포와 코깅토포크와의 관계를 분석하고 공극형상과 이로부터의 공극에서의 힘의 변화 영향을 알아보기로한다.

2.1 자화분포의 영향

공극의 형상을 고정시키고 마그네트 착자의 세기를 변화시키면 코깅토포크와 토포크 상수값 (또는 모터 토포크)은 각각 다른 비율로 변화하게된다. 사용자 요구 사양을 만족하는 토포크 상수값을 유지하며 최소의 코깅토포크를 얻을수 있는 적정수준의 착자세기 결정이 요구되고 있다. 따라서, 착자세기 (또는 착자분포), 코깅토포크, 토포크상수값의 세 변수 값들에 대한 영향분석은 모터설계에 있어서 매우 중요하다.

그림 1에 예시된 영구자석 모터의 경우에 있어서 마그네트의 전형적인 자극이 그림 2와 같은 사다리꼴 형태로 자화값이 분포한다고 가정할때, α 값이 0 부터 0.5까지의 값을

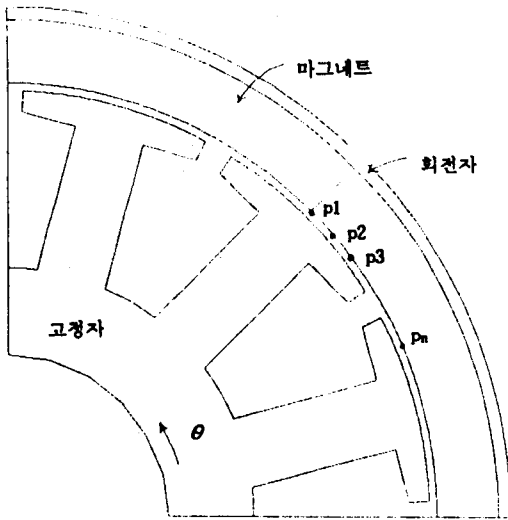


그림 1 영구자석 DC BLS 모터의 1/4 형상

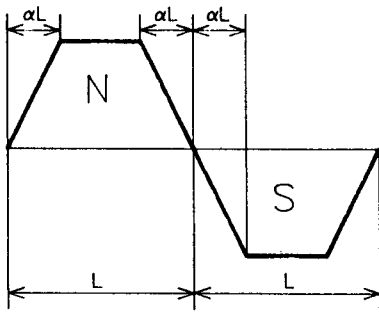


그림 2 착자 분포

취할수 있게되고, α 값이 커질수록 착자의 세기가 약하다고 할수있다.

그림 3 (a), (b)에 보여진 바와 같이, α 를 0에서 0.4까지 변화시켜 가며 코깅토크 분포를 계산해 보면 α 가 증가할수록 즉, 착자세기가 약할수록 토크 상수값은 단순 감소하나 코깅토크는 감소해 나가다가 증가되는 부분이 있음을 알수있다. 코깅토크의 파형의 위상이 180° 반전되는 즉, 코깅토크의 부호가 바뀌는 α 값 부근에서 이런 현상이 있게 된다. 또한 α 값이 변화함에 따라서 최대 코깅토크의 위치가 변화하고 있음도 주목할만하다. α 값에 대한 모터토크와 코깅토크 절대값의크기가 그림 4에 요약되어 있다. α 값이 0에서 0.4로 변화시키면 토크가 23% 정도 감소하는 반면, 코깅토크는 10 배 이상 감소함을 알수있다. α 값이 0.25 일때 코깅토크 값이 극소값이 되고 α 값이 0.25 보다 커지면 코깅토크 절대치가 약간 증가 했다가 0.3을 넘어서면 다시 작아짐을 알수있다.

2.2 공극형상의 영향

영구자석 모터의 진동·소음의 요인들 중에서 자화분포 또는 자화세기와 함께 고려되어야 할 사항이 회전자 마그네트에 의해 고정자나 회전자 표면에 작용하는 장력의 변동에 미치는 영향분석이다. 고정자와 회전자 사이에 기계역학적

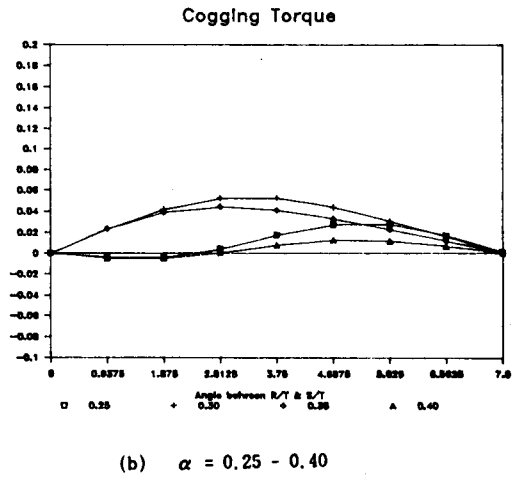
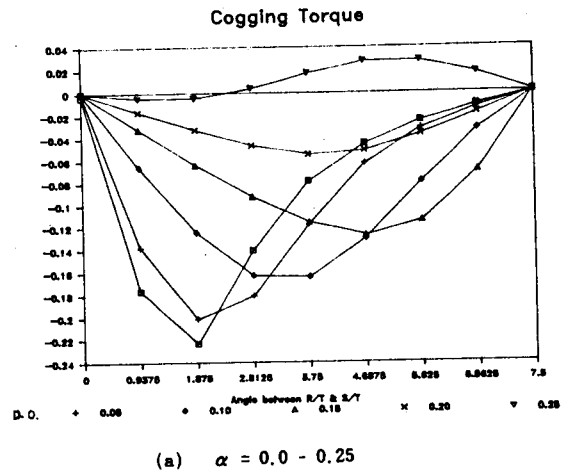


그림 3 α 값의 변화에 따른 반주기분의 코깅 토크 분포도

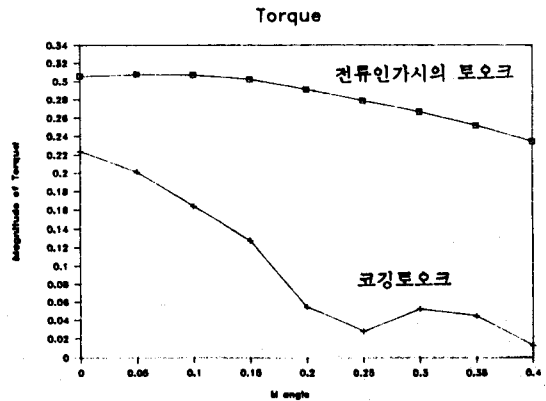


그림 4 α 값에 대한 전류인가시의 토크 및 코깅토크의 최대치의 변화추이

인 힘의 균형을 이루면서 회전주행이 이루어 지고 있는데, 이때 회전각도(또는 경과시간)에 따른 고정자와 회전자 표면에 작용하는 힘의 크기 변화는 모터의 기계적인 진동·소음의 특징을 결정짓는 중요한 역할을 하고있다.

회전자가 주어진 각속도로 회전하게 되면 회전자의 어느 특정 지점점에 작용하는 힘의 분포는 마그네트 착자극수, 슬롯 갯수, 회전속도 등에 의해 결정되어지는 주파수의 정수 배 고조파 성분들의 중첩으로 이루어진 진행파로서 생각할 수 있다. 그림 1의 회전자가 20° 회전하는 동안에 마그네트의 자극 좌측 끝단에서부터 중앙지점 사이의 지정된 고정점 P₁, P₂, P₃...에 작용하는 방사방향 성분 Maxwell stress에 의해 산출된 힘의 분포가 그림 6(a)에 나타나 있다. 코깅토오크를 저감한 모델(그림 5)에 대한 힘의 분포는 그림 6(b)에 나타내었다. 코깅토오크를 저감한 모델에서는 작용하는 힘의 변동 폭이 원래의 모델에서의 힘의 변동 폭보다 감소 되었음을 알수있고, 회전각도에 따른 힘의 맥동은 상대적으로 균일해 졌음을 관찰할수 있다.

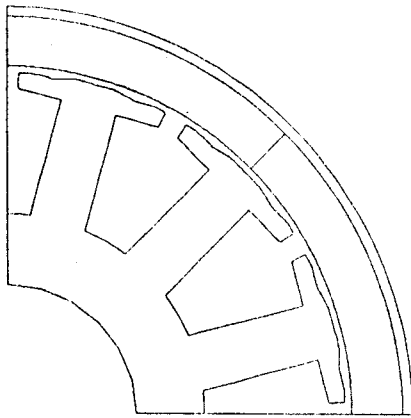


그림 5 코깅토오크를 저감한 영구자석 DC BLS 모터

3. 적용 예

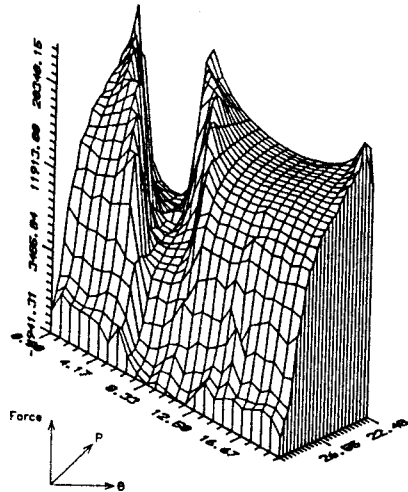
FDD용 소형정밀모터에 대해서, 앞장에서 예시된 바와 같이 코깅토오크 저감 형상을 도출하였고, 샘플을 제작하였다. 코깅토오크 저감을 위한 형상 최적화 기법은 참고문헌 [4]을 참조하기로 하고, 여기서는 진동소음 측면에서의 효과를 확인하기로 한다.

회전자의 회전 각속도 10π rad/sec 에 대한 회전방향 또는 원주방향의 진동과 축방향으로 회전자로부터 30cm 지점에서의 소음 측정결과를 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

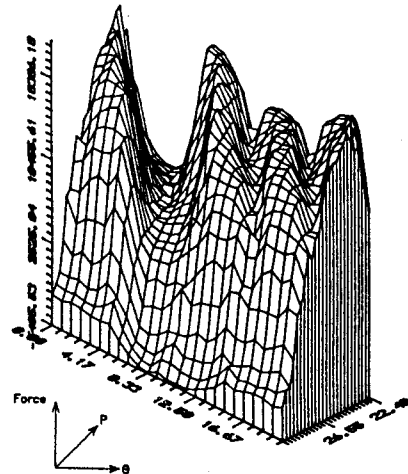
진동특성을 살펴보면, 코깅토오크 주파수 대역인 360 Hz, 720 Hz에서 진동의 크기가 각각 6.7배, 1.5배 정도 감소하였음을 알수있고, 코깅토오크 저감 이전 모델에 있어서 착자극수에 의한 주파수 대역과 슬롯수에 의한 주파수 대역에서의 진동 가진 현상도, 코깅토오크 저감을 위한 공극의 최적화로 인하여 전반적으로 상당량 감소하였음을 확인할수 있다.

소음저감 측면에서 그림 8 (a), (b)를 비교해 보면 전체 소음 수준이 6 dB 정도 저감되었음을 알수있다.

세트의 진동·소음 개선은 세트진동·소음의 원인이 되는 단품의 진동·소음특성 개선부터 시작함이 통례이다. 본 적용예의 경우 모터 단품의 진동·소음 저감효과는, FDD 세트 장착시 4.7 dB 개선 효과를 가져다 주었고 세트 장착시의 소음 측정 결과는 그림 9 (a), (b)에 나타내었다.



(a) 기존형상(그림1)에 대한 힘의 분포



(b) 코깅토오크 저감형상(그림5)에 대한 힘의 분포

그림 6 방사방향의 힘의 분포

4. 결론

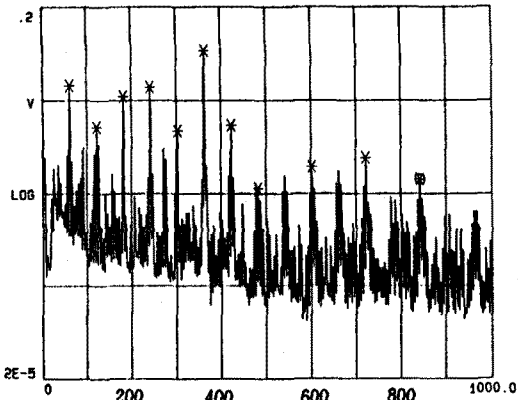
영구자석을 채용하는 소형정밀모터의 진동·소음 저감 설계시에 중요한 영향을 미치는 요소들인 자화분포와 공극에 대해 영향분석을 행하였고, 이들 요소들을 고려한 코깅토오크 저감 형상이 모터의 기계적 진동·소음 저감 설계에 효과적임을 샘플 제작을 통해 확인하였다.

정밀모터는 회전속도의 이극화와 박형화 추세에 있고, 따라서 코깅토오크는 모터의 품질과 성능에 더욱 더 큰영향을 미치게 될 것이므로, 진동·소음 저감 설계 방법으로서의 코깅토오크 저감 형상 설계는 향후, 유용하게 적용될수 있을 것이며, 독자적인 자체 고유 형상 모델 확보에도 효율적일 것이다.

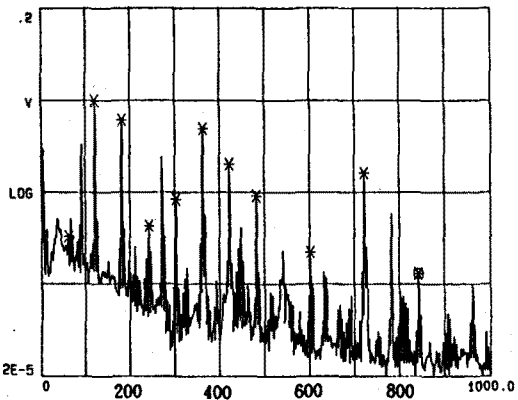
이러한 결실은, 착자패턴의 정밀도를 높이기 위한 착자기술에 대한 연구가 함께 이루어 진다면 좀더 본격화 될것이다.

참고 문헌

- [1] M.J.Goodwin, Dynamics of Rotor-bearing System, Unwin Hyman Ltd., 1989
- [2] 박관수 외 6인, "다극착자기에서 착자전류가 잔류자속에 미치는 영향," 한국자기학회 논문지 제 2권 2 호, 92.6 게재예정
- [3] T.Nakata, et.al, "Numerical Analysis of Transient Magnetic Field in A Capacitor-discharge Impluse Magnetizer," IEEE Trans. MAG-22, No.5, 1986, p.526
- [4] Il-han Park, Beom-taek Lee and Song-yop Hahn, "Pole Shape Optimization for Reduction of Cogging Torque By Sensitivity Analysis," COMPEL, Vol.9, 1990, Supp. A, pp.111-114
- [5] Touzhu Li and Gordon Slemon, "Reduction of Cogging Torque in Permanent Magnet Motors," IEEE Trans. Magn. Vol.24, 1988, pp.2901-2903
- [6] Z.Q.Zhu and D.Howe, "Analytical Prediction of the Cogging Torque in Radial-field Permanent Magnet Brushless Motors,"
- [7] 임달호, 김생수, "브러쉬리스 DC 모터의 코깅토크 저감에 관한 연구," 전기학회 논문지, 제37권 6호, 1988, pp.361-367

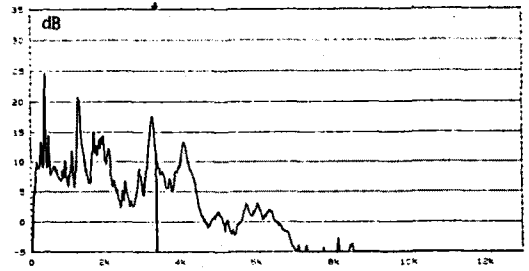


(a) 기본형상에 대한 진동 측정

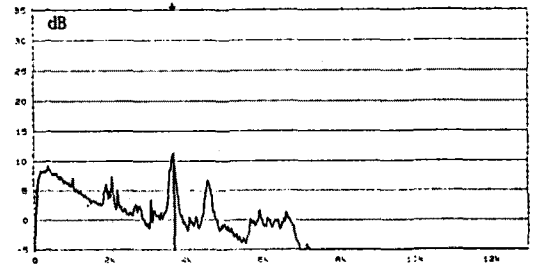


(b) 코깅토크 저감형상에 대한 진동 측정

그림 7 5 rps 시의 진동 측정

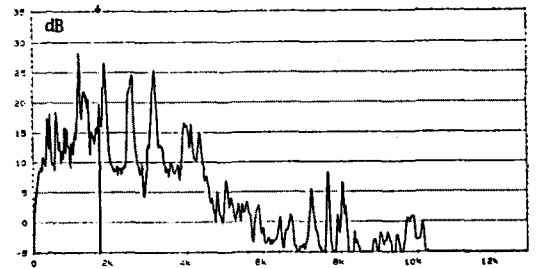


(a) 기본형상에 대한 소음 측정

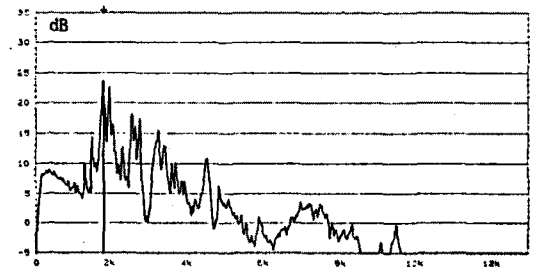


(b) 코깅토크 저감형상에 대한 소음 측정

그림 8 5 rps 시의 소음 측정



(a) 기본형상에 대한 소음 측정



(b) 코깅토크 저감형상에 대한 소음 측정

그림 9 세트 장착시의 소음 측정