

전자기 가진력에 의한 BLDC 전동기의 진동 특성 해석

정희준, 신판석, 우성현
홍익대학교 전기공학과

Vibration Analysis for BLDC Motor by Electromagnetic Exciting Force

H.J.Chung, P.S.Shin, S.H.Woo
Hongik University

Abstract - This paper deals with the vibration analysis of characteristics for BLDC motor by electromagnetic exciting force. Vibration analysis of electric machine is mainly divided into mechanical and electrical approach. However, it need to execute coupling analysis of mechanical and electrical computation because the vibration sources have relation to each other. Magnetic fields is calculated from Maxwell stress method with electromagnetic finite element method. And magnetic radial force is calculated from previous magnetic fields. With coupled electromagnetic and structure finite element, the vibratory behavior between the phase commutation advancing technique and pulse-width control is investigated in single phase brushless dc motor.

1. 서 론

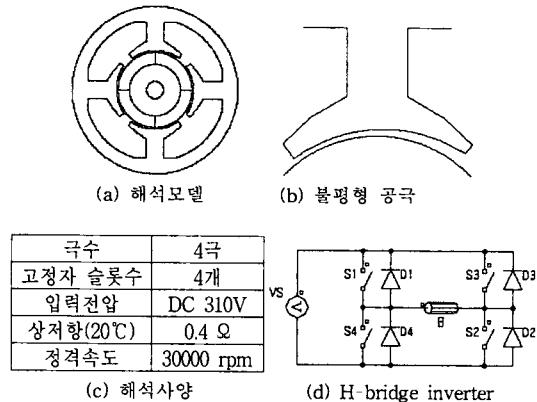
전동기의 진동 발생원으로는 크게 기계적인 원인과 전자기적인 원인이 있으며, 기계적인 원인은 회전자의 편심에 따른 회전자 불균형, 베어링, 탄성축에 의한 것이 있고, 전자기적 원인으로는 코킹토크, 부하시의 토크리풀, 전자기적 인력 변동 성분 등이 있다. 이중 전자기적 인력 변동 성분은 전자기적 가진력으로, 스위치 개폐시에 전동기의 고정자와 회전자 사이에서 작용하는 반경방향 힘의 변화가 고정자의 변위를 가속시키는 원인으로 알려져 있다. 즉, 공극 내부에 존재하는 반경방향 자속밀도에 의하여 회전자와 고정자 사이에 작용하는 인력이 회전자 위치에 따라 변화하면서 발생하게 되므로 고정자 내측면을 직접 가진하는 국소가진력으로 작용하게 된다. 전동기 진동 해석에서 위의 기계적인 원인과 전자기적인 원인은 서로 밀접하게 연관되어 있으므로 연성해석이 필요하며, 본 논문에서는 단상 BLDC 전동기의 제어 방법에 따라 각각 전자장 해석을 통해 얻어낸 전자기적 인력을 진동해석의 가진력으로 입력하여 전자기 가진력의 변화에 따른 진동 특성을 해석하였다.

2. 본 론

2.1 전자기 해석

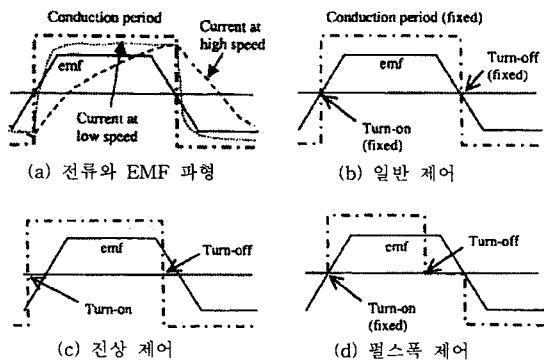
2.1.1 해석 모델

본 논문에 사용된 모델은 4극 4슬롯 단상 BLDC 전동기로 이에 대한 모델의 단면도와 회로 및 구체적인 사양은 <그림 1>에 나타나 있다. 단상 BLDC 전동기는 토크가 발생하지 않는 회전자 위치점(死點 : Dead Point)이 발생하여 재기동이 불가능해지는 경우가 있으므로, 공극을 불평형 공극(Asymmetrical Graded Airgap)으로 설계



<그림 1> 해석 모델과 사양

하여 이를 해결하고 있으나, 불평형 공극은 코킹토크를 증가시키고 평균토크는 감소시킨다.(그림 1(b)) 또한, 정격속도가 커질 경우 상전류가 권선의 인덕턴스로 인하여 미처 따라가지 못하여 위상지연이 일어나고 부토크(Negative Torque)가 생성되어 축토크는 0이 되므로 전동력을 얻을 수 없게 된다.(그림 2(a)) 이러한 위상지연을 해결하기 위해 스위치 여자전류를 미리 흐르게 하고 부토크 영역 이전에 미리 소호하여 180도 통전하거나(그림 2(c)), 통전주기를 감소시켜(그림 2(d)) 부토크를 방지하고 있다. 본 논문에서는 진상 제어와 펄스폭 제어시의 전자기 가진력을 각각 계산하여 가진력의 주파수 분석을 시행하였다.



<그림 2> 단상 BLDC의 제어

2.1.2 전자기 가진력 계산

전자력 및 전자기 힘 밀도(Force Density)를 구하기 위해서 맥스웰 응력 텐서법이 많이 쓰이고 있으며, 원통 좌표계의 경우 각 방향의 자계 값이 알려져 있는 임의의 점에서의 맥스웰 응력 텐서는 다음과 같다.

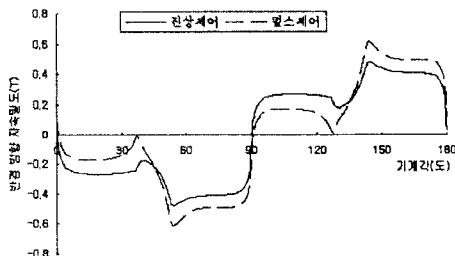
$$T_{mn} = \mu H_n H_m - \frac{1}{2} \delta_{mn} H_k H_k \quad (1)$$

여기서, T_{mn} 은 m방향의 법선벡터를 갖는 표면에 작용하는 n방향 응력[Pa], H_n 은 n방향 자기장도[A/m], μ 는 투자율, δ_{mn} 은 크로네커 델타이다.

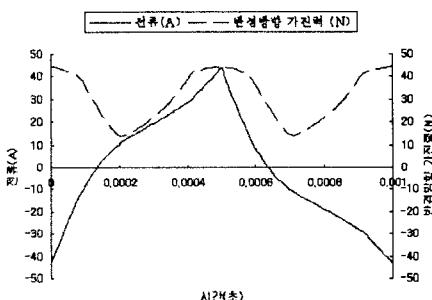
전동기 공극에서의 가진력 해석을 위해 위의 힘 밀도를 매 시간 간격마다 계산하면 전동기의 회전에 따른 가진력의 분포의 변화를 볼 수 있다.

그림 3은 일반적인 정류시와 진상 제어 및 펄스폭 제어시의 유한요소 해석을 통해 얻은 동일 시각에서의 공극자속밀도이며, 이는 공극 가진력 파형의 계산과 직접 연관된다. 펄스폭 제어시 자속밀도의 맥동이 진상 제어시보다 더 큰 것을 알 수 있다.

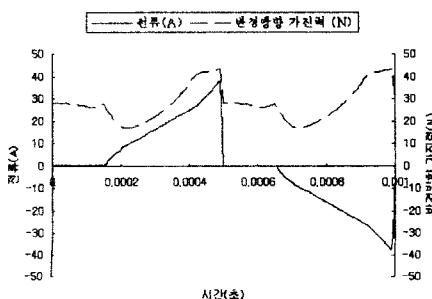
그림 4와 5에는 맥스웰 응력 텐서를 이용하여 고정자에 작용하는 반경방향 전자기 가진력을 한 주기에 대하여 나타낸 것이다.



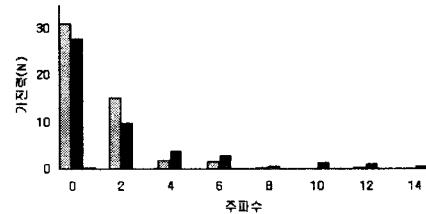
<그림 3> 반경 방향 공극자속밀도



<그림 4> 진상 제어시 전류와 가진력 크기



<그림 5> 펄스폭 제어시 전류와 가진력 크기



<그림 6> 전자기 가진력 스펙트럼

시간과 공간적으로 주기적으로 변하는 가진력을 보다 효과적으로 분석하기 위해 다음 식 (2-1)에서 (2-4)를 이용하여 푸리에계수를 추출한 후 각 성분을 이용하여 그림 6에 스펙트럼을 계산하였다. 유한요소 해석의 결과는 이산화된 결과이므로 샘플링 시간 간격은 고조파 성분의 2배가 되도록 결정한다.

$$\sigma(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad (2-1)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \sigma(\omega t) dt \quad (2-2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T \sigma(\omega t) \cos(n\omega t) dt \quad (2-3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T \sigma(\omega t) \sin(n\omega t) dt \quad (2-4)$$

여기서, ω 는 기본 각주파수이고, T는 주기이다.

그림 6의 스펙트럼은 직류성분, 기본파 성분 및 고조파 성분을 포함하며, 진상 제어시 펄스폭 제어보다 직류성분이 더 강하고 고조파 성분으로 갈수록 그 크기가 더 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

2.2 모드 해석

감쇄강제진동의 기본방정식은 다음 식 3과 같은 미분방정식이 되며, 이를 행렬 형태로 나타내면 식 4와 같아진다.

$$mx''(t) + cx'(t) + kx(t) = f(t) \quad (3)$$

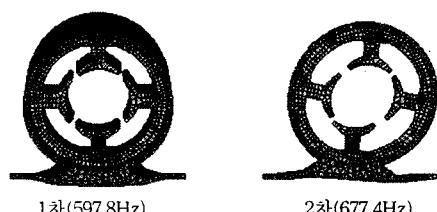
$$[M]\{x''(t)\} + [C]\{x'(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (4)$$

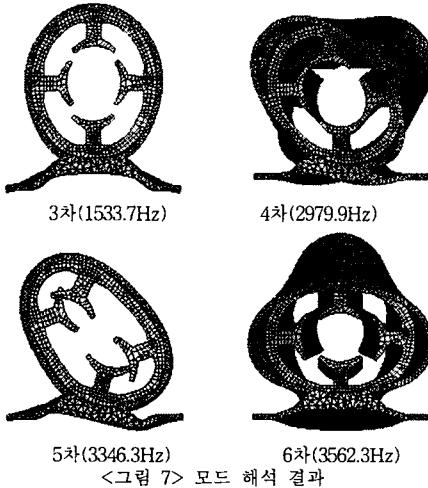
여기서, $[M]$ 은 관성행렬, $[C]$ 는 감쇄행렬, $[K]$ 는 강성행렬, $\{x(t)\}$ 는 변위벡터, $\{f(t)\}$ 는 외력벡터이다.

모드 해석은 구조 자체의 고유한 응답을 얻는 과정이므로 감쇄 및 외력이 없이 강성과 질량으로만 결정되므로 식 (3)은 다음과 같이 수정된다.

$$mx''(t) + kx(t) = 0 \quad (5)$$

본 모델의 모드 해석은 상용프로그램인 ANSYS를 이용하여 수행하였고, 그림 7은 해석 결과이다.



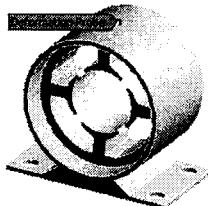


<그림 7> 모드 해석 결과

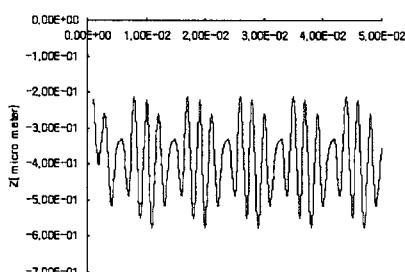
원통형 구조의 전동모드는 크게 순수 반경모드와 비순수 반경모드로 나눌 수 있는데, 비순수 반경모드는 반경 방향의 변화와 함께 다른 모드가 더 추가되어 나타난다. 저차부터 순수반경모드와 비순수반경모드가 교대로 나타남을 볼 수 있다.

2.3 강제진동해석

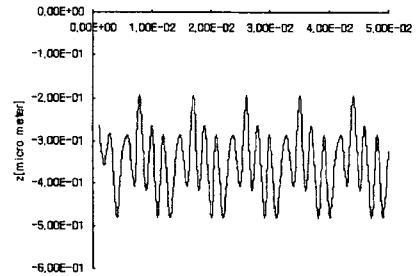
진상 제어와 펄스폭 제어에 대해 각각 계산한 가진력을 대한 기계적 응답을 해석하였다. 푸리에 계수에서 추출한 삼각함수의 조합을 하중에 대해 입력으로 전달하여 모터 상단(그림 8)에서의 진동변위를 얻어 냈다. 그림 8과 9는 각 제어방법에 따른 가진함수에 대해 시간에 따른 z 방향의 변위를 나타낸 것이다. 여기서, 가진력은 치의 단면에 집중되어 작용하는 것으로 가정하였다.



<그림 8> 변위계산위치



<그림 9> 진상 제어시의 가진력에 따른 변위



<그림 10> 펄스폭 제어시의 가진력에 따른 변위

3. 결 론

전자기적 인력 변동 성분들이 전동기의 고정자 및 회전자 구조에 힘을 가하며, 이는 전동기의 기계적인 구조에 변형을 일으킨다. 이러한 변형은 전체적인 구조의 전동으로 나타나 전동기의 기계적 성능을 저하시킬 수 있으므로, 전자기와 진동의 연성해석의 필요성이 커지고 있다. 본 논문에서는 단상 BLDC 전동기의 제어방법에 따른 가진력을 전자기 유한요소법을 이용하여 계산하고, 그 결과를 바탕으로 주파수 분석을 하였다. 계산된 가진력을 진동해석의 입력으로 전달하여 주기적인 가진력을 가지는 강제진동해석과, 고유진동수를 알아내기 위한 모드 해석을 수행하였다.

본 논문은 국방과학연구소(ADD)에서 지원한 수중운동체특화 연구센터의 사업으로 수행되었습니다.

【참 고 문 헌】

- [1] Z. Q. Zhu, S. Bentouati, D. Howe, "Control of Single-Phase Permanent Magnet Brushless DC Drives for High-Speed Applications", IEE Conf. Publ. No. 475, pp. 327-332, 2000
- [2] G. Henneberger, Ph. K. Sattler, W. Hadrys, D. Shen, "Procedure for the Numerical Computation of Mechanical Vibrations in Electrical Machines", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 2, 1992
- [3] 황상문, "자동차 부품용 고속, 고부하 BLDC 모터내의 전자기적 토크 맥동 저감", 자동차공학회논문집 6권 4호, pp.39-46, 1998
- [4] 장정환, 장건희, "컴퓨터 하드 디스크 드라이브용 스팬들 모터의 기전 연성계 해석", 전기학회논문지, 498권 11호, 742-748, 2000
- [5] 고흥석, "영구자석 매입형 BLDC 모터의 소음/진동 평가를 위한 전자기적 가진력의 특성화", 박사학위 논문, 2002
- [6] 한기진, "BLDC 전동기의 전자기 가진력에 의한 진동에 관한 연구", 석사학위 논문, 2000
- [7] 하경호, "진동 저감을 위한 스위치드 퀼력턴스 전동기의 자기회로 설계 및 특성 해석", 박사학위 논문, 2002