

# 전자기적 가진에 의한 소음 진동

왕 세 명\*

(광주과학기술원 기전공학과)

## 1. 머리말

모터, 발전기, 액추에이터와 같은 전기 기기는 보통 전기 에너지를 기계 에너지로 혹은 그 반대로 전환하는 변환기라 할 수 있다. 따라서 이러한 전기 기기는 필연적으로 회전 운동이나 직선 운동을 하는 부분을 가지게 된다.

일반적으로 전기 기기의 진동 에너지와 소음 에너지를 전체 에너지에 비교하면 매우 적다. 하지만, 인간의 귀는 매우 민감하기 때문에 상대적으로 적은 진동, 소음 에너지라도 그 효과를 무시할 수 없으며 때때로 인간이 듣기에 불쾌한 소음까지 만들기도 한다. 또한 진동은 시스템의 작동 및 성능에 영향을 미치기 때문에 중요한 요소이다.<sup>(1)</sup>

전기 기기의 소음진동 문제의 원인은 크게 공기역학적, 기계적, 전자기적 원인 등으로 나눌 수 있다.

먼저, 공기역학적 원인에 의한 소음의 주된 요인은 팬(fan) 소음이다. 팬 소음은 운동하는 물체 주위의 공기의 움직임에 의한 소음이며, 넓은 대역(board-band)의 소음을 나타낸다.

두 번째로 기계적인 원인에 의한 소음은 회전자

의 불균형 및 베어링으로부터 나타난다. 이 소음은 전자기적인 요소를 모두 제거해도 나타난다. 다시 말해서, 전기 기기를 전기의 힘이 아닌 기계적인 힘으로 인위적으로 돌려도 이 소음은 나타나게 된다. 일반적으로 전기 기기에 부하가 걸리게 되면, 이로 인해 발생하는 진동 토크는 축(shaft)에 비틀림 진동(torsional vibration)을 유도하게 된다. 결국, 베어링은 이 진동을 다른 연결 부분에 전달 시켜 소음을 발생시키게 된다.

마지막으로, 전자기적인 가진에 의한 진동 및 소음은 운동하는 자계에 의해 만들어지는 공극 내의 자속(flux)에 의해 발생하게 된다. 이에 의한 소음은 고주파 영역까지 넓게 분포하고 있기 때문에 다른 소음원 보다 중요할 뿐만 아니라 공극 내의 자속에 의한 가진력의 주파수와 구조물의 공진 주파수가 비슷한 영역에서 존재하면 구조물이 큰 진동을 하게 되므로 이를 막는 것이 또한 중요하다.<sup>(1)</sup>

전자기적인 소음 및 진동의 주 요인인 공극 내의 자속은 슬롯(slot)에 있는 도선을 따라 흐르는 전류에 의해서 유도되어 진다. 슬롯의 분포 및 형상 등은 크게 두 가지의 결과를 가져온다.

첫째, 기자력(magnetomotive force : mmf)이 원주방향을 따라 지그재그 모양으로 발생하게 되고 그 결과로써 기자력 파(wave)는 기본 성분해 겹쳐서 강한 고조파 성분을 가지게 된다. 이로 인

\* 우리 학회 편집위원

E-mail : smwang@kjist.ac.kr

해 원주방향으로의 고조파(time harmonics)는 토크 리플(ripple)을 발생시키며, 결국 소음을 일으킨다.<sup>(2)</sup>

둘째, 슬롯의 형상은 원주 및 반경 방향으로의 공극의 균일함을 깨뜨리게 된다. 자기 회로에서 대부분의 자기 저항(reluctance)으로 표현되어지는 공극은 회전자와 고정자의 상대적 위치의 변화에 따라 주기적으로 변하게 된다.<sup>(3)</sup> 결국, 공극 내의 자속 밀도의 고조파 성분은 기계적 시스템에 작용하게 되는 주기적인 가진력을 야기하게 된다.

그림 1과 같은 경로로 발생된 전자기적 가진력은 구동 토크를 발생시키는 한편 반경 방향, 접선 방향, 축 방향으로 각각 가진력을 가하게 되어서 진동을 유발시키게 된다. 그러나 실제로 접선 방향, 축 방향으로의 가진력이 진동에 미치는 효과는 반경 방향에 의한 것에 비해서 상대적으로 적은 값이다.

다시 말해서, 주로 반경 방향의 힘이 전자기적 가진력의 원인이 되어 고정자를 진동 시킨다. 그리고 고정자의 기계적 진동은 다시 주위의 공기를 진동 시켜 소음을 만들어 낸다. 그러므로 전자기적 원인에 의한 고정자의 진동 및 소음을 해석하기 위해서는 전기 기기의 전자기장의 해석을 통하여 정확한 전자기적 가진력을 계산해 내야 한다.

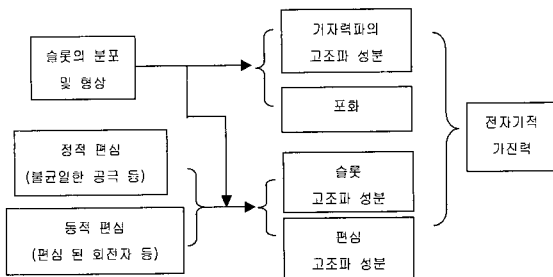


그림 1 전자기적 가진력의 발생 경로

## 2. 리니어 압축기의 소음진동 문제

### 2.1 리니어 압축기

압축기(compressor)는 저온/저압의 기체를 체적 감소로 압축하여 고온/고압의 기체로 만들어 주는 장치로 열 교환기와 함께 냉장고, 에어컨의 사이클을 구성하는 핵심 부품 중 하나이다. 압축기는 압축방식에 따라 일반적으로 왕복동식(reciprocating), 회전식(rotary), 스크롤(scroll), 리니어(linear) 압축기 등으로 구분되어진다.

이 중 리니어 압축기는 그 이름에서 알수 있듯이 지금까지 사용되어 왔던 방식 즉, 전자기적인 회전력을 직선 왕복운동으로 변환하거나(왕복동식), 회전운동을 이용하는 방식(rotary, scroll)과는 달리 전자기적 전원인 구동부의 운동자체가 직선 운동인 압축운동을 하는 새로운 형태의 압축기이다.

그림 2는 LG전자에서 세계 최초로 상용화한 리니어 압축기의 내부 구조를 나타낸 것이다. 이 리니어 압축기는 압축기의 효율을 표시하는 에너지 효율비(EER : energy efficiency ratio)가 기존 냉장고(효율비 5.5)를 훨씬 뛰어넘는 7.5의 고 효율을 가진다.

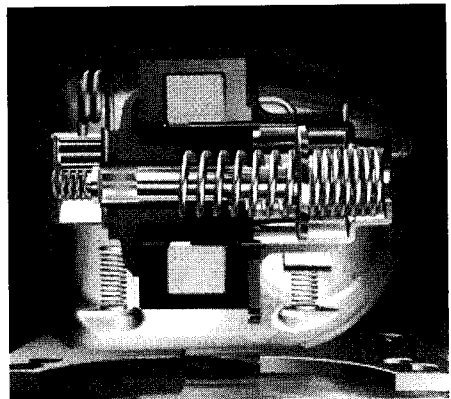


그림 2 LG전자에서 세계 최초로 상용화한 리니어 압축기의 구조

그림 2에서 알 수 있듯이, 리니어 압축기에는 압축기를 구동하는 리니어 모터를 포함하고 있다. 리니어 모터는 현재 냉 공조기의 구동을 비롯해 음향용 스피커 구동, 자기부상 열차의 추진장치, 고층용 엘리베이터 등에서의 응용에도 널리 연구되고 있다.

리니어 모터는 직선형의 구동력을 직접 구동부에 발생시키므로 기계적인 힘의 전달 및 변환장치가 추가적으로 필요치 않다. 그리고 그 구조가 다른 형태의 압축기에 사용되는 모터에 비해 복잡하지 않으며 에너지 손실이 적어 높은 효율을 얻을 수 있다. 또한, 일반적인 회전기가 갖고 있는 베어링이 존재하지 않기 때문에 이를 통해 발생하는 소음이 없고, 운전속도에서도 크게 제한을 받지 않는 등의 많은 장점들을 가지고 있다.

### 2.2 리니어 압축기의 구동원리와 축 직각 방향의 진동

그림 3은 리니어 압축기에 들어가는 리니어 모터 구조의 단면을 나타내며 전체적인 구조는 그림 4와 같은 원통형으로 되어 있다. 리니어 모터는 크게 바깥쪽 고정자(outer stator)와 안쪽 고정자(inner stator)를 포함하는 고정부(fixed part)와 자석을 포함하는 구동부(moving part)로 나뉘어 질 수 있다.

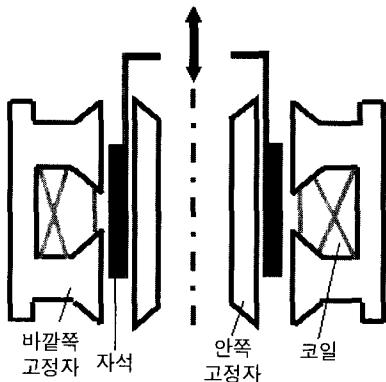


그림 3 LG전자에서 개발한 리니어 모터의 구조

구동 원리를 보면, 일차적으로 교류 전원을 인가한 코일(coil)에서 자속(flux)을 발생시키며, 이 자속은 바깥쪽 고정자와 안쪽 고정자를 따라 흐르게 된다. 이렇게 해서 발생된 자속은 자석(magnet)을 지나게 되는데, 로렌츠 법칙(Lorentz law)에 따라 자석과 코일의 상호작용에 의하여 전자기적 힘이 발생하게 된다.

결국, 모터의 구동부는 축 방향과 반경 방향으로 힘을 받게된다. 그 중 축 방향으로 발생하는 힘은 실질적으로 모터가 직선 왕복 운동을 하는데에 사용되어 지고, 이와는 달리 구동부의 반경 방향으로 발생하는 힘은 구동부가 축의 중심에 위치하게 되어 공극(airgap)의 크기가 균일하게 되면 상대적으로 상쇄되어 없어지게 된다.

리니어 모터에 의하여 발생된 전자기적 힘은 스프링의 공진으로 증폭된 후 직접 피스톤(piston)과 실린더(cylinder)로 구성된 압축부로 전달되게 된다. 이렇게 전달된 힘이 피스톤을 상호 왕복 운동시켜 실린더 내부의 냉매를 압축하게 된다.

### 2.3 축 직각 방향의 편심력과 소음진동

리니어 모터의 전자기적 힘을 압축부로 전달해주는 구동부는 그림 2에서 보여지듯이 베어링이 아닌 스프링(spring)에 의하여 모터가 움직이는 축 방향으로는 고정되어 있지만 모터의 반경 방향으로서는 실린더의 내면과 피스톤의 상대 운동 면이

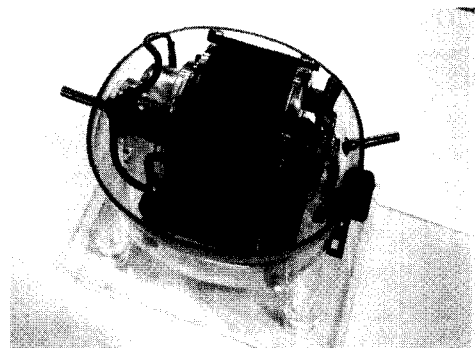


그림 4 리니어 모터의 실물

지지를 하는 구조이다. 따라서 반경방향의 진동이 발생하게 되면 이로 인한 소음 뿐만 아니라 실린더와 피스톤 표면의 마모를 유발하여 구동에도 상당한 문제를 일으키게 된다. 그림 5는 전자기적 불균형으로 인한 편심력 때문에 피스톤과 실린더의 마찰로 발생하는 진동현상의 가속도 신호이다. 그림 5는 60 Hz의 가진 성분과 가속도 절대값의 최대값에서 발생하는 진동현상을 보여준다.

따라서 리니어 모터의 구동부가 조립과정에서 극히 작은 편심이 발생하게 된다. 이러한 구동부의 편심은 구동부 주변의 공극의 불균일을 가져오고 이로 인해 균형을 이루고 있었던 반경방향으로의 힘이 깨져서 편심력을 발생하게 된다. 이렇게 발생된 편심력은 구동부의 진동을 발생시키며,<sup>(4~6)</sup> 결국 압축기의 소음으로 나타나게 된다. 이러한 리니어 컴프레서의 소음진동 문제의 해결을 위해서는 상대 운동상태에 있는 마그넷과 고정자의 상호 운동 시 발생하게 되는 전자기적인 해석이 필수적이다.

### 3. 하드 디스크 드라이브(HDD)의 소음진동

하드 디스크 드라이버(HDD)에 있어 진동의 주된 원인은 BLDC(blushless DC) 스피들 모터(그림 6)와 VCM(voice coil motor)이다. 이로 인한 진동 문제는 소음을 야기할 뿐만 아니라, 디스크의 진동으로 인한 떨림으로 정보를 읽지 못하게 되는데 이는 HDD의 비정상 작동의 대표적인 예이다. 따

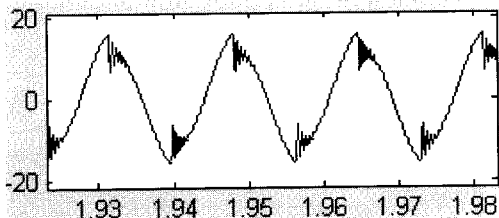


그림 5 리니어 압축기에서 발생하는 진동 신호

라서 스피들 모터의 진동특성을 예측하고 이를 바탕으로 설계를 행하는 것은 HDD의 안정된 성능을 구현하는데 필수적이다.

이러한 BLDC 모터의 경우 회전자가 고정자의 공극 중심과 정확히 동심에 있다면 불평형 전자기력은 완전히 제거되지만, 제조 공정 시 가공 및 조립 오차에 의해 회전자가 고정자 중심에서 어긋난 위치에 있으므로 인해 전자기적으로 불평형 가진력이 작용할 뿐 아니라 탄성 축-베어링계의 과도한 휘돌림 운동으로 인해 회전자와 고정자 사이에 불평형 전자기력이 발생하게 된다. 이 전자기적 가진력은 회전자의 공진을 발생시켜 BLDC 모터의 진동 및 소음을 초래하고, 위치 및 속도의 제어에 어려움을 초래한다. 전동기의 휨 진동에 영향을 주는 변수로써 회전자 및 축의 형상인자, 지지 베어링의 특성, 회전축에 작용하는 불평형 질량에 의한 동기 가진력과 전동기 회전자에 작용하는 전자기적 가진력을 고려할 수 있다. 이와 같이 BLDC 모터의 진동과 소음은 기계적 및 전자기적으로 연성 되므로, 저진동과 저소음의 설계를 만족하기 위해서는 이들 특성을 함께 고려하여 회전자의 진동 특성을 해석할 필요가 있다.<sup>(6)</sup>

HDD에 대한 전자기적 가진의 또 다른 하나는 스피들 모터<sup>(8)</sup>의 전자기적 현상 중에 코어(core or teeth)와 영구자석(permanent magnet)의 자화된 극 사이의 상호작용에 의해 힘이 유발되는데, 이것을 코깅 토크라 부른다. 코깅 토크는 실질

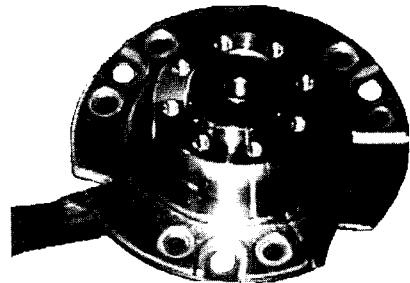


그림 6 BLDC 스피들 모터

적인 모터가 갖는 토크 값에 비해 그 크기가 상대적으로 작지만 하드디스크와 같은 정밀 제어를 필요로 하는 곳에서는 무시할 수가 없다. 따라서, 전자기적 현상에 의해 발생하는 코깅 토크의 저감에 관련한 최적 설계가 필요하다. 이러한 BLDC 모터의 코깅 토크 저감을 위한 코어의 형상최적설계가 수행되어 왔다.

그림 7은 BLDC 모터의 단면도를 나타낸다. 이 모터는 8개의 영구자석과 12개의 코어로 구성되어 있다. 따라서, 90도 마다 같은 자기장 분포를 보인다. 따라서 1/4 모델만을 사용해도 전체 자기장 분포를 알아낼 수 있다.

코깅 토크에 대한 형상설계민감도를 계산하기

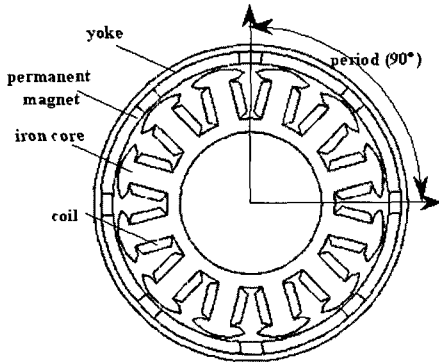


그림 7 BLDC 모터의 단면도

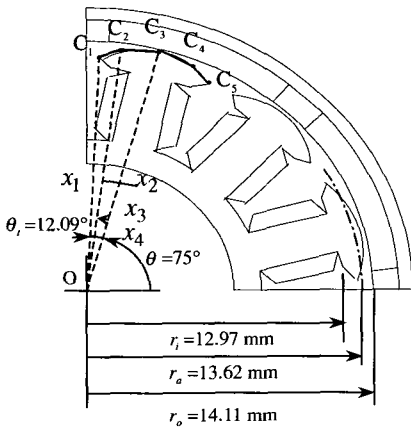


그림 8 BLDC 모터의 CAD 모델

위하여 연속체 설계 민감도(continuum design sensitivity)를 사용하였고 BLDC 모터의 CAD 모델은 Pro/Engineer를 이용하여 구성하였다. 형상설계민감도를 얻기 위해서는 경계 속도장(boundary velocity)이 필요한데, 이는 유한요소 해석 프로그램 중의 하나인 ANSYS에서 CAD 모델과 연계하여 경계 변위법(boundary displacement method)을 이용해 얻었다.

그림 8, 9는 스핀들 모터의 CAD 모델과 유한요소모델을 나타낸다. 설계 변수로 설정한 코어의 형상은 5개의 제어점을 갖는 NURBS로 모델링하였고, 형상설계민감도는 유도된 설계 민감도 식을 이용하여 프로그램을 직접 개발하여 구하였다.<sup>(9~11)</sup>

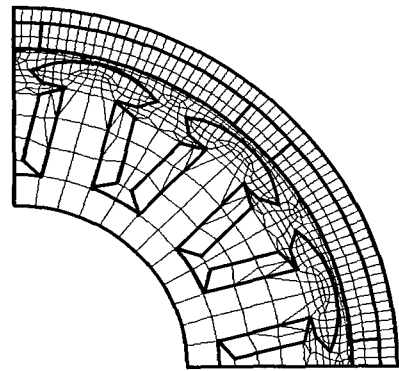


그림 9 BLDC 모터의 유한 요소 모델

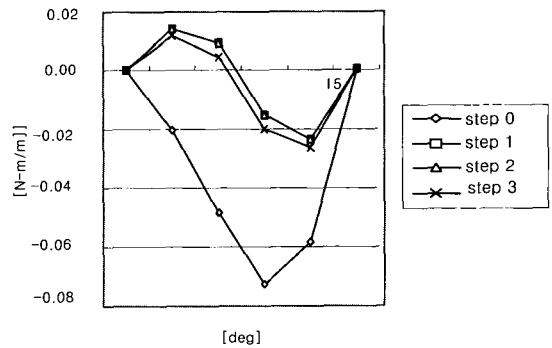


그림 10 코깅 토크의 변화

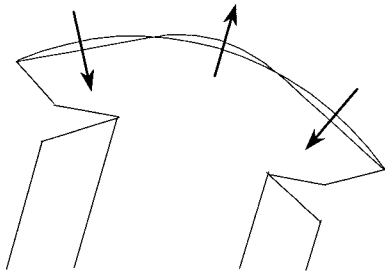


그림 11 초기와 최종 치형

최적화 알고리즘은 근사 선형 탐색(inexact line search)을 이용한 최대 경사법(steepest descent method)를 이용하였다. 형상설계민감도를 이용한 형상최적설계를 통해 그림 10과 같이 코깅 토크가 처음보다 80%가량 줄일 수 있었다. 그림 11은 형상최적설계 후의 최종 코어의 형상을 보여준다.

#### 4. 맺음말

본 특집에서는 전자기적 가진에 의한 일반적인 소음 진동 발생과 리니어 압축기와 하드디스크 드라이브에서 발생하는 소음 진동 문제에 대하여 다루었다. 살펴본 바와 같이 전자기적 가지는 시스템의 운전효율이나 안전성뿐만 아니라 소음 진동의 유발로 상품의 질을 저하시키는 등 여러가지 문제를 야기 시킨다. 이러한 문제는 구조적인 문제와 관련되어 발생하는 것이 일반적이기 때문에 기계-전기 연성시스템에 대한 보다 깊은 연구가 요망된다.

#### 참고 문헌

(1) Koen D., 2002, "Computational and Experimental Analysis of Electric Machine Vibrations Caused by Magnetic Forces and Magnetostriction," A Thesis of Ph. D at

Jatholieke Universiteit Luuven.

(2) William, R. F., 1991, "Noise in Induction Motors Causes and Treatments," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 6.

(3) Takashi Kobayashi, Fumio Tajima, Motoya and Suctaro Shibukawa, 1997, Effects of Slot Combination on Acoustic Noise from Induction Motors, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 2.

(4) Chao Gao, Doris Kuhlmann-Wilsdorf and David D. Makel, 1994, "The Dynamic Analysis of Stick-slip Motion," Wear 173, 1~12.

(5) Wang, S. and Park, J., 2003, "Friction-induced Vibration (stick slip) of Linear Compressor," ICSV<sup>10th</sup>.

(6) Kim, T. J. and Hwang, S. M., Transient Dynamic Analysis of a Eccentric Rotor with Unblanced Magnetic Forces in BLDC Motors.

(7) Haug, E. J., Choi, K. K. and Komkov, V., 1986, Design Sensitivity Analysis of Structural Systems, Academic Press, Orlando.

(8) Wang, S. M., Jeong, S. K. and Yoon, H. S., 1999, "Continuum Shape Design Sensitivity Analysis of Magnetostatic Field Using Finite Element Method," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 35, No. 3, pp. 1159~1162.

(9) Koh, C. S., Hahn, S. Y., Jung, H. K. and Choi, K. K., 1993, "A Continuum Approach in Shape Design Sensitivity Analysis of Magnetostatic Problems Using the Boundary Element Method", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29, No. 2, pp. 1771~1774.

(10) Wang, S. M. and Ki, S. H., 1997, "Configuration Design Sensitivity Analysis Using CAD-based Design Velocity Field", Proc. of 2nd World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, pp. 265~270.