

공기 동압 베어링을 갖는 디지털 라이트닝 프로세서 모터용 코어리스 및 슬롯리스 BLDC 모터의 특성 분석 및 비교

論 文

56-6-8

Characteristics Analysis and Comparison of Coreless and Slotless BLDC Motor used in Digital Lightening Processor Motor with Air-Dynamic Bearing

梁 二 宇[†] · 金 榮 石^{*} · 金 尙 郁^{**}

(Iee-Woo Yang · Young-Seok Kim · Sang-Uk Kim)

Abstract - This paper presents the analysis for power consumption, mechanical vibration and acoustic noise characteristics of the Coreless and Slotless Brushless DC motor in Digital Lightening Processor(DLP) Motor with the Air-Dynamic Bearing. The Coreless BLDC motor has not the stator yoke as well as the stator slot to remove the unbalance force by the interaction between the stator yoke and Air-Dynamic Bearing clearance. The assembling tolerance and the processing error make the air-gap difference between the magnet and the stator yoke ,which occurs the unbalanced electro-magnetic force in the Slotless BLDC motor. It imposes the air-dynamic bearing on the disturbance force and makes the Air-Dynamic Bearing vibrated and noised. Also, The attractive force between the magnet and the silicon steel stator yoke increases the power consumption. In this paper, the power consumption, mechanical vibration and acoustic noise of the Coreless BLDC motor and the Slotless BLDC motor with the silicon steel stator yoke are simulated, analyzed, and tested using the manufactured proto-type motors with Air-Dynamic bearing. The simulated and tested results present that the Coreless BLDC motor without the silicon steel stator yoke has the lower mechanical vibration and noise ,and lower power consumption than the Slotless BLDC motor with the silicon steel stator yoke in Digital Lightening Processor Motor with Air-Dynamic Bearing.

Key Words : Coreless BLDC motor, Slotless BLDC motor, Air-Dynamic Bearing, Silicon Steel Stator Yoke, Mechanical Vibration, Acoustic Noise, Power Consumption, Attractive Force

1. 서 론

근래에 Brushless DC(BLDC) 모터는 소형화 및 고 효율 등을 성취할 수 있는 장점을 갖고 있어서 가전기기 및 컴퓨터 하드디스크 등 광범위한 산업 분야에서 사용되고 있다. 특히, 고속, 소형 모터를 필요로 하는 분야에서, 일반적인 BLDC 모터는 기계적으로 구름 요소 베어링이나 유체 동압 베어링이 사용되고 있으나, 구름 요소 베어링을 사용할 때 수명이 짧다는 단점이 있고, 유체 동압 베어링의 경우, 유체의 온도 점성 계수에 따른 마찰 손이 존재한다. 특히, 저온에서는 유체의 점성계수에 의한 베어링 마찰손이 상대적으로 커서 높은 소비전력을 요구한다. 또한, 전자기적으로 고정자 요크에 의한 코깅 토오크가 발생하게 되고, 이 성분은 기계적 진동 및 소음의 원인이 된다[1]. 이러한 문제를 극복하기 위해서 전기적으로는 슬롯리스 BLDC 모터(Slotless BLDC Motor)의 적용과 기계적으로는 베어링 면의 접촉이 없다면 수명은 영구적이며 마찰손이 적은 공기 동압 베어링

이 여러 분야에서 검토되고 있다. 특히, 하드 디스크 분야에서는 빠른 속도의 데이터 입·출력이 요구되기 때문에, 구동 모터의 고속 회전이 필요하게 되는데, 구름 요소 및 유체 동압 베어링은 고속 회전 시 진동·소음 및 소비 전력이 높고 수명이 짧다는 단점이 있어 공기 동압 베어링의 적용이 검토 되고 있으며, 의료 기기의 인공 심장 분야에서는 구름 요소 및 유체 동압 베어링과 유사한 기계적 베어링은 혈액의 응고 현상을 유발시키는 단점이 있어 이를 개선하고자 공기 동압 베어링과 슬롯리스 BLDC 모터의 적용이 검토 되고 있다[2][3]. 영상 가전기기의 일종인 프로젝션 TV 나 프로젝터의 경우, 영상 신호를 회전하는 유리 재질의 컬러휠(Color Wheel)에 투사하면 컬러휠이 영상 신호를 반사함으로써 선명하면서도 연속적인 확대된 영상을 얻는 디지털 라이트닝 프로세서(Digital Lightening Processor) 가 사용되고 있다. 이 때 컬러휠(Color Wheel)을 구동 하는 모터를 디지털 라이트닝 프로세서 모터(Digital Lightening Processor Motor)라 하는데 이 모터는 고속 회전, 저 진동이여야 영상 신호를 일정하게 반사할 수 있으며, 저 소음 및 저 소비 전력도 필수적인 요소이다. 따라서 고속 이면서 낮은 소비전력을 유지하기 위해서 마찰 손실이 거의 없는 공기 동압 베어링이 채용되고 코깅 토오크가 없어 진동·소음이 적은 슬롯리스 BLDC 모터가 적절하다. 그러나 공기 동압 베어링은 베어링 간극을 점성계수가 아주 낮은 공기로 채우고 있기 때문에 유체 동압 베어링에 비하여 부하 능력이 낮고 규정 이상의

† 교신저자, 準會員 : 仁河大學校 電氣工學科 博士課程

E-mail : iwyang@gnwtech.com

* 正 會 員 : 仁河大學校 電氣工學科 教授·工博

** 正 會 員 : 仁河工業專門大學 情報通信科 部教授

接受日字 : 2007年 1月 31日

最終完了 : 2006年 4月 23日

외부 힘에 대해서는 고체 접촉을 유발하여 베어링이 손상된다. 또한, 부하능력이 낮아서 모터의 기동 시 진동이 발생할 우려가 있고 외부 힘의 불 균일에 의해서도 회전체는 기계적으로 진동할 우려가 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 베어링의 간극을 아주 작게 하여 부하능력을 향상하고, 외부 외란을 최소화 할 필요가 있다[4]. 슬롯리스 BLDC 모터는 고정자 요크와 영구 자석사이의 자기적 인력 (Magnetically Suspended force, Attractive Force)에 의한 정지력이 발생하여 회전 시 부하 토오르크로 작용하기 때문에 소비 전력이 증가할 뿐만 아니라, 모터의 제작·조립 시 자성 재질 고정자 요크와 영구 자석사이의 동심도 차이 등의 가공오차 및 조립 편차를 수반하게 되어 불 평형 전자기력이 발생한다. 모터의 불 평형 전자기력은 공기 동압 베어링의 외란 성분으로 작용하기 때문에 베어링의 진동·소음이 커지고 베어링 부하능력 이상의 큰 불 평형 전자기력이 베어링에 작용되면 고체 접촉에 의한 베어링 손상이 발생하게 된다.

본 논문에서는, 공기 동압 베어링을 갖는 디지털 라이트닝 프로세서 모터에서 고정자 요크 유무 및 공극 불 균일에 따른 전자기력의 불 평형 및 자기적 인력에 따른 부하 토오르크를 모의실험 및 실험을 통하여 비교 검토하고, 실리콘 스틸 고정자 요크를 제거한 코어리스 BLDC 모터의 적용을 통하여 자기적 인력과 불 평형 전자기력을 최소화함으로써 소비 전력 절감 및 기계적 진동·소음의 저감을 실현할 수 있음을 보인다.

2. 본 론

2.1 공기 동압 베어링

공기 동압 베어링은 그림 1과 같이 회전축(Shaft)과 슬리브(Sleeve)로 구성 되어 있다. 회전축과 슬리브 사이의 미소 간극(베어링 틈)이 존재하지만 회전축과 슬리브의 무게 중심 편차에 의하여 간극은 일정하지 않고 그림과 같이 반경 방향으로 편심이 발생한다. 이러한 편심은 베어링 간극 사이에 반경방향(편심을 줄이는 방향) 공기 압력 편차를 발생시키고 압력 편차에 의하여 편심을 극복하려는 힘(반력)이 발생하게 된다. 또한, 외부에서 회전축 또는 슬리브에 힘(외란)이 가해지면 베어링 간극의 편심이 발생하기 때문에 외란을 극복하려는 힘이 발생하게 된다.

그림 1과 같은 진원 공기 동압 베어링의 성능을 지배하는 것은 베어링의 간극(Clearance)내의 공기압의 분포 상황이고, 이것을 규정하는 것은 Reynolds 방정식이다.

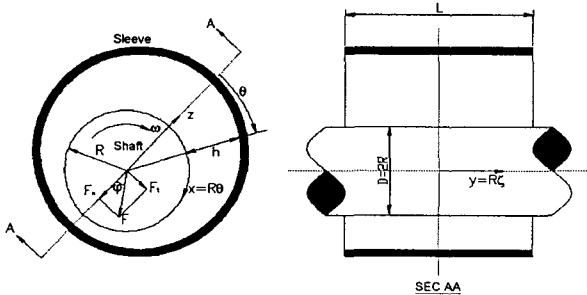


그림 1 공기 동압 베어링의 구조
Fig. 1 Structure of Air-Dynamic Bearing

그림 1과 같이 좌표를 잡고 평균 반경 간극을 C_r , 편심률을 ϵ , 각속도를 ω , 주위압력을 p_a 라 하면 정상상태에서의 Reynolds 방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (PH^3 \frac{\partial P}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (PH^3 \frac{\partial P}{\partial \zeta}) = \Lambda \frac{\partial}{\partial \theta} (PH) \tag{1}$$

여기서,

$P = \frac{p_a}{p}$: 베어링압력(p)와 주위압력(p_a)의 비

$\Lambda = \frac{6\mu\omega}{p_a} (\frac{R}{C_r})^2$: 베어링 수

$h = C_r H = C_r (1 + \epsilon \cos \theta)$: 반경틈

μ : 점성계수, R : 베어링 반지름, p : 베어링 압력

식(1)은 P 에 대한 비선형 방정식이기 때문에 P 에 대하여 선형화하고, 수치계산을 시행하여 공기 동압 베어링의 압력 분포를 구한다. 압력을 편심 방향(θ) 성분(p_t) 및 직각 방향(ζ) 성분(p_n)으로 분리하여 면적분하면 F_t, F_n 을 얻게 되고, 이 벡터 성분의 합은 공기 동압 베어링의 공기압에 의한 힘 즉 부하능력이 된다. 공기 동압 베어링의 부하능력은 식(1)을 압력(P) 선형화법 및 섭동해법을 통해 얻어진 결과를 토대로 작성된 J.S Ausman의 설계 도표[4]를 이용하여 구할 수 있다. 설계 도표에 의하여 부하능력을 구하면 식(2)이 되고, 편심률(ϵ)이 0.4 이상인 경우 식(3) 및 식(4)와 같다.

$$F = \frac{\pi p_a D L \epsilon}{2} F_{(1)} \tag{2}$$

$$F = F_{(1)} \frac{2}{\epsilon^2} \left[\frac{1 - (1 - \epsilon^2)^{1/2}}{(1 - \epsilon^2)^{1/2}} \right] (1 - \epsilon^2 \sin^2 \varphi_{(1)})^{1/2} \tag{3}$$

$$\tan \varphi = (1 - \epsilon^2)^{1/2} \tan \varphi_{(1)} \tag{4}$$

여기서, $F_{(1)}$: 무차원 부하 능력

$\varphi_{(1)}$: 무차원편심 각

식(2)(3)(4)에서 $F_{(1)}$ 과 $\varphi_{(1)}$ 는 설계도표에 의하여 결정되는 값으로 베어링 수(Λ)에 의하여 결정된다.

또한, 회전수를 N , 직경을 D , 길이를 L 이라하면, 마찰 손실은 식(5)과 같다[4].

$$W_{loss} = \frac{9.8}{3600} \frac{\mu}{\sqrt{1 - \epsilon^2}} \frac{\pi^3 D^3 L N^2}{C_r} \times 10^{-2} [W] \tag{5}$$

식(2)과 식(5)으로부터 부하능력은 회전축과 슬리브의 중심축의 편심에 따라 변화하는 값으로 편심이 작을수록 부하능력이 커지게 되고, 마찰 손실은 반대로 편심이 커질수록 작아지게 된다. 따라서 부하능력과 마찰 손실 사이의 적당한 타협(Trade-Off)이 필요하다.

2.1.1 프로토-타입 공기 동압 베어링

본 논문에서 설계된 프로토-타입 공기 동압 베어링은 표 1과 같다. 표 1의 공기 동압 베어링은 무 차원 부하능력이 0.6이고 허용 편심률에 따라 실 부하능력을 식(2)으로 계산

하면 0.43kg이 되고 소비전력은 식(5)으로부터 0.074[W]이며 편심각은 35°이다.

즉, 0.43kg의 반경방향의 외부 힘에 대하여 베어링 최소 간극이 2.1μm으로 편심되지만, 베어링 축과 슬리브의 접촉 없이 안정한 회전을 하게 된다. 또한, 이 때 베어링만을 고려하면 공기 동압에 의하여 회전축의 회전에 필요한 소비전력은 0.074[W]이다. 편심률이 ε=0.8인 경우는 거의 베어링 축과 슬리브의 접촉이 우려되는 상황으로 베어링의 최소 간극이 0.7μm이고 부하능력은 1.57kg, 소비 전력은 0.11[W]가 된다.

표 1 공기 동압 베어링의 사양
Table 1 Specification of Air-Dynamic Bearing

항목	값	단위
L/D	1.58	
베어링 간극(C _r)	3.5	μm
허용 편심률(ε)	0.4	
회전 속도	14400	rpm

편심률 ε ≫ 0.8이 된다면, 베어링 축과 슬리브가 접촉할 우려가 있고 접촉이 일어나지 않는다 하더라도, 베어링 공간에서 발열이 발생하기 때문에 슬리브와 축의 재질에 따라 변형을 일으킬 우려가 있다. 따라서 본 논문에서는 베어링의 편심률을 ε ≤ 0.4로 하여 베어링의 안정성을 확보한다. ε ≤ 0.4인 경우 베어링 부하능력은 F ≤ 0.43kg가 되고, 디지털 라이트닝 프로세서(Digital Lightning Processor) 모터의 허브(Hub)와 쉘리휠의 무게가 0.01kg 정도이기 때문에, 0.42kg이 내 외부 부하에 대한 강인성도 확보 할 수 있다.

2.2 코어리스 BLDC 모터

코어리스 BLDC 모터의 전자장의 해석을 위해 맥스웰(Maxwell) 방정식으로부터 계 방정식을 도출한다[5][6]. 정자계의 맥스웰 방정식은 식(6)로부터 식(10)이다.

$$\nabla \times H = J \tag{6}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{7}$$

$$B = \nabla \times A \tag{8}$$

$$B = \mu_0 (H + M) \tag{9}$$

$$B = \mu H \tag{10}$$

여기서, H[A/m]: 자계의 세기, B[T]: 자속밀도,
A[wb/m]: 자기 벡터 포텐셜,
J[A/m²]: 외부회로에 의한 고정자전류밀도,
M[A/m]: 영구자석의 자화량,
μ[H/m]: 자성체투자율, μ₀[H/m]: 진공투자율

식(9)는 영구 자석의 자화량에 의한 자속밀도이고 식(10)은 자성체에 의한 자속밀도이다. 우선 영구 자석내의 자계 해석을 위한 지배방정식을 얻기 위하여 식(9)을 식(6)에 대입하고 벡터 공식을 적용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\mu_0} (\nabla (\nabla \cdot A) - \nabla^2 A) = J + \nabla \times M \tag{11}$$

식(11)에 Coulomb gauge 조건(∇ · A = 0)을 적용하면 다음과 같다

$$-\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 A = J + \nabla \times M \tag{12}$$

식(12)에서 ∇ × M 은 영구 자석의 자화 분포에 의해 생기는 항으로 전류 밀도와 동일 차원을 가지므로 등가 자화 전류 밀도 J_m[A/m²]로 표현하면 다음과 같다.

$$-\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 A = J + J_m \tag{13}$$

또한, 회전자 요크 부분에 대해서는 식(10)을 식(6)에 대입하여 동일한 방식으로 정리하면 식(14)을 얻을 수 있다.

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \tag{14}$$

식(13)과 식(14)를 유한 요소 해석을 통해 해를 구하면 영구 자석 및 자성체등에서의 자계해석이 가능하다.

2.2.1 맥스웰 응력법(Maxwell stress tensor method)

자계해석에 의한 결과로 얻은 공극 자속 밀도 성분을 이용하여 발생 토오크 및 불 평형 자력을 구하기 위해 자속밀도와 투자율로 표현되는 맥스웰 응력법을 이용한다[7].

시험 전하 q[C]가 자속 밀도 B인 자계 내에서 이동속도 v[m/sec]로 움직일 때 전하 q에 작용하는 로렌츠의 힘은 식(15)이고 단위 체적 당 힘 밀도 함수 f_v는 식(16)과 같다.

$$F = qv \times B \tag{15}$$

$$f_v = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\sum F}{\delta V} = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\sum qv \times B}{\delta V} = J \times B \tag{16}$$

식(16)에 암페어의 주회 법칙(Ampere's circuital law)의 미분 형을 적용하면 식(17)이 되고, 식(18)의 맥스웰 응력텐서 σ_{ij}를 적용하여 힘의 밀도의 x, y, z 방향 성분을 구하면 식(19),(20)(21)와 같다.

$$f_v = [\nabla \times \frac{B}{\mu_0}] \times B = \frac{1}{\mu_0} [B(\nabla \cdot B) - B \times (\nabla \times B)] \tag{17}$$

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\mu_0} (B_i B_j - \frac{1}{2} B^2 \delta_{ij}) \tag{18}$$

여기서, δ_{ij}: Kronecker Delta 함수

$$f_x = \nabla \cdot \sigma_x = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \tag{19}$$

$$f_y = \nabla \cdot \sigma_y \tag{20}$$

$$f_z = \nabla \cdot \sigma_z \tag{21}$$

식(19),(20),(21)의 힘 밀도로부터 f_v를 체적 v에 대해 적분하고 발산정리를 적용하면 폐곡면 S내에 둘러싸인 영역 v안에서의 힘 F를 식(22)과 같이 구할 수 있다.

$$F = \int_v f_v dv = \int_v \nabla \cdot \sigma dv = \oint_S \sigma dS \tag{22}$$

식(22)에 의해 축 방향 길이를 고려해서 토오크 및 합성력을 구할 수 있다.

2.2.2 프로토-타입(Proto-Type) 코어리스 BLDC 모터

본 논문에서 제작한 프로토-타입 모터는 8극 12 코일의 코어리스 BLDC 모터로 그림 2와 같고, 상세 모터 사양은 표 2에 보인다.

표 2 코어리스 BLDC 모터의 설계 사양
Table 2 Design specification of Coreless BLDC Motor

항목	값	항목	값
극수	8	출력 정격 용량	1.2 W
상수	3상	정격 속도	14400rpm
코일 수	12	정격 전류	0.2A
선간 입력전압	12V	역기전력 상수	0.004 Vs/rad

회전자는 링 타입 희토류 계(Nd-Fe-B) 영구 자석과 실리콘 스틸(Si-Steel)의 요크로 구성되어 있고 고정자는 12개의 원형 코일만으로 구성되어 있다. 고정자가 코일만으로 이루어져 있기 때문에 모터의 힘이 고정자 요크가 있는 경우보다 저하되게 되므로 희토류 계 영구 자석을 사용하고 영구자석을 극 이방성으로 자화하였다. 그림 2는 영구 자석에 의한 자속 분포를 보이고 있는 것으로 대칭적이다. 특히, 실리콘 스틸의 고정자 요크를 플라스틱 가이드가 대신하고 있기 때문에, 고정자에 의한 불 평형 전자기력 및 자기적 인력은 근본적으로 존재하지 않는다.

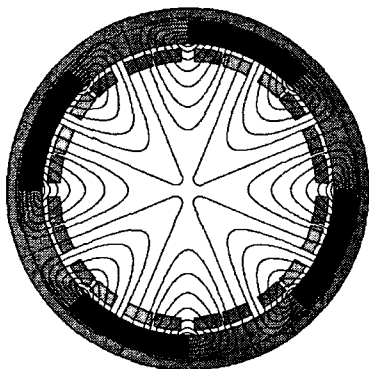


그림 2 8극 12 코일 코어리스 BLDC 모터 자속 분포
Fig. 2 Flux of 8poles-12coils Coreless BLDC Motor

2.3 고정자 요크를 갖는 슬롯리스 BLDC 모터가 공기 동압 베어링에 미치는 영향

실리콘 스틸의 고정자 요크를 갖는 슬롯리스 BLDC 모터의 경우, 고정자 요크의 제작 시 가공 오차와 모터의 조립 시 조립 오차는 고정자와 영구 자석 사이의 공극 편차를 일으키게 된다. 이러한 공극 편차가 공기 동압 베어링에 미치는 영향을 고찰한다.

그림 3은 고정자 요크로서 실리콘 스틸을 사용하였을 때의 자속 분포를 보이는 것으로 편축 방향(x축 방향)으로 공극 편차를 30μm로 가정하여 해석한 것으로 A부분의 자속은 B부분의 자속보다 5% 크다. 즉, 영구 자석의 중심을 P_N이라 하고 고정자 중심을 P_S라 하면 A부분의 고정자 요크는 영구 자석과 x축 방향으로 30μm(|P_S-P_N|=30μm) 근접하게

되므로 실질적으로는 공극이 작아지게 되고, 상대적으로 B부분은 공극이 커지게 된다. 자속 밀도는 공극에 역비례하기 때문에 A부분의 공극 자속 밀도를 B_A라 하고, B부분의 공극 자속 밀도를 B_B, 각 부분의 힘을 F_A, F_B라 하면 식(23)과 같이 쓸 수 있다.

$$F_A - F_B \propto (B_A^2 - B_B^2) \tag{23}$$

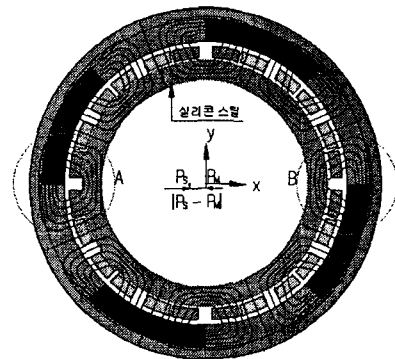


그림 3 실리콘 스틸 고정자 요크를 갖는 8극 12 코일 슬롯리스 BLDC 모터 자속 분포
Fig. 3 Flux of 8poles-12coils Slotless BLDC motor with Si-Steel Stator Yoke

식(23)으로부터 공극의 편차에 의한 힘의 불균형은 영역 전체에서 나타나게 되고, 그 결과 반경 방향의 전자기력의 편차가 0.103kg 발생한다. 유체 동압 또는 구름 요소 베어링은 부하능력이 커서 진동·소음 및 소비 전력이 그다지 큰 영향을 미치지 못하나 점성계수가 작은 공기에 의하여 지지되는 공기 동압 베어링은 작은 외란에 의해서도 큰 진동·소음이 발생할 수 있고 베어링이 파괴(Lock)될 수도 있다. 전자기력의 편차 0.103kg은 공기 동압 베어링의 외란이 되므로, 프로토-타입 공기 동압 베어링에 0.103kg의 하중이 인가되는 것과 같다. 즉, 식(2),(3),(4)에 의하여 편심률(ε=0.099)이 커지고 베어링 마찰 손실 식(5)에 의하여 0.068[W] 증가한다.

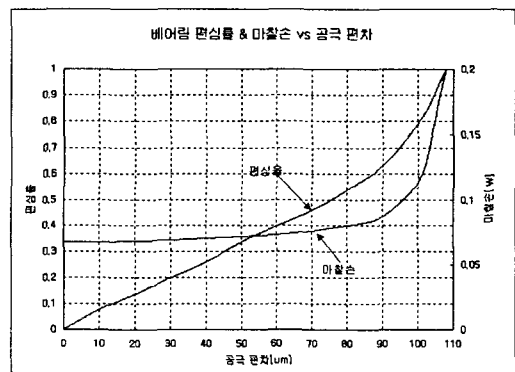


그림 4 전자기적 공극편차에 의한 베어링의 편심률 및 마찰손
Fig. 4 Eccentricity and friction loss of Air-Dynamic Bearing for the electro-magnetic air-gap variation

그림 4에 공극 편차에 대한 베어링의 편심률과 베어링 마찰 손 변화를 보이고 있다. 공극 편차가 100 μm 이상이 되면 0.6kg 이상의 불 평형 전자기력이 발생하고 베어링 편심률도 0.8보다 커져서 베어링은 매우 불안정하게 되고 약간의 하중(실 부하)에 대해서도 베어링 축과 슬리브의 마찰이 일어나게 되어 베어링이 파괴된다.

그림 5에 공극 편차에 대한 불 평형 전자기력과 자기적 인력 및 전자기력의 편차에 의한 부하 토크를 보인다. 부하 토크는 자성재료의 고정자 요크와 영구 자석사이의 인력에 의한 정지 토크와 릴럭턴스(Reluctance) 편차(공극 편차)에 의하여 발생하는 토크 성분으로 불 평형 전자기력에 비례하여 증가하게 된다.

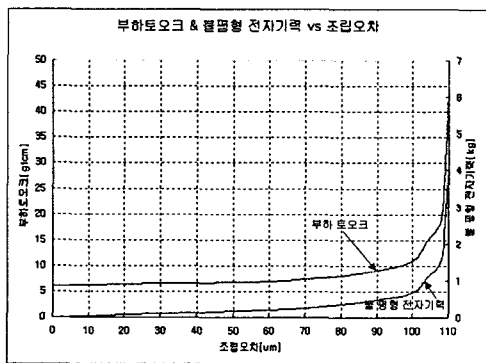


그림 5 전자기적 공극 편차에 의한 불 평형 전자기력 및 부하 토크

Fig. 5 Unbalanced electro-magnetic force and load torque for the air-gap variation

2.4 디지털 라이트닝 프로세서 모터의 전체 구성

실리콘-스틸 고정자 요크 없는 코어리스 BLDC 모터와 공기 동압 베어링을 채용한 디지털라이트닝프로세서(Digital Lightninging Processor)모터의 구조를 그림 6에 보인다.

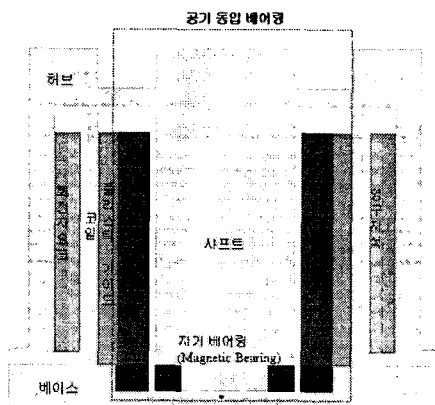


그림 6 디지털 라이트닝 프로세서 모터
Fig. 6 Digital Lightninging Processor Motor

공기 동압 베어링은 샤프트와 슬리브 두 부품으로만 구성되어 있고 베어링 간극은 점성 계수가 낮은 공기로 되어 있다. 디지털 라이트닝 프로세서 모터의 초기 구동 시, 영구자

석의 척력을 이용한 자기 베어링은 공기 베어링의 베어링 간격을 일정하게 유지할 수 있도록 한다. 또한, 부하 및 회전자의 무게에 의하여 베이스 면과 샤프트 하측 면의 접촉이 발생할 가능성이 있기 때문에, 이를 방지하기 위하여 볼(Ball)을 베이스 표면에 설치함으로써 샤프트와 베이스의 면 접촉을 점접촉으로 변경하여 원활한 기동을 확보하도록 하였다. 그러나 베이스 면과 샤프트 하측 면사이의 공기압에 의하여 힘이 발생하므로, 볼과 샤프트 하측 면이 접촉하는 경우는 발생하지 않는다. 코일에 의한 조립오차를 감소시키기 위하여 플라스틱 가이드에 코일을 부착함으로써 코일의 반경 및 중심을 일정하게 함으로서, 코일의 쇄교 자속 수에 의한 불 평형 힘을 최소화 하였다. 모터의 구동 시에는 공기 동압 베어링의 작은 간극(슬리브와 샤프트 사이)에서 발생하는 공기 압력에 의하여 허브를 포함한 회전체 전체가 지지되게 된다. 슬리브와 회전축의 재질은 전자기적 불 평형의 요인이 되지 않도록 비자성체(세라믹)이며 회전자 요크는 자성체, 허브와 베이스는 알루미늄이다. 슬리브는 영구자석 및 플라스틱 가이드와 함께 베이스로 고정되고 플라스틱 가이드와 접촉되어 있는 코일은 PCB(Printed Circuit Board)로 연결되어 외부 구동 전원을 얻을 수 있도록 하였다. PCB에는 홀소자를 부착하여 회전자의 위치를 검출하도록 하였다. 부하로는 $\phi 65\text{mm}$ 두께 0.6mm의 유리 재질로 되어 있고 63g/cm²의 관성을 갖는 컬러휠(Color Wheel)이다.

2.5 실험 결과

실험에 사용한 인버터 및 제어기의 사양은 표 3과 같다. 인버터는 3상 Bipolar로 스위칭 소자는 5A/24V급 FET를 사용하였고, 위치 검출 신호를 이용하여 속도 제어를 실현하는 제어기는 8-bit 마이크로프로세서를 사용하여 구성하였다.

표 3 인버터 & 제어기 사양

Table 3 Specification of Inverter and Controller

인버터 & 제어기		
항목	값	단위
선간 입력 전압	12	V
최대 전류	1	A
최대 기동 전류	2	A
속도 오차	± 1	rpm
위치 검출기	홀 소자	
제어 방식	120°통전 Bipolar	

2.5.1 프로토-타입(Proto-Type) 슬롯리스 BLDC 모터

본 논문에서 제작한 프로토-타입 8극 12 코일의 슬롯리스 BLDC 모터는 그림 3과 같고, 상세 모터 사양은 표 2와 동일하다. 모터의 구조는 그림 6에서 플라스틱 가이드를 실리콘 스틸 고정자 요크로 대체하여 제작하였다. 회전자는 링 타입 회로류 계 영구 자석과 실리콘 스틸(Si-Steel)의 요크로 구성되어 있고 12개의 코일은 실리콘 스틸 고정자 요크에 부착하였다. 그림 7에 실리콘 스틸의 고정자 요크를 사용한 프로토-타입 모터의 무 부하 전류 파형을 보이고 있다. 회전속도 14400rpm에서 상 전류는 220mA로 2.45W의 무 부하 손실을 보이고 있다. 영구 자석과 고정자 철심 사이의 인력에 의하여 14400rpm에서 6.2g/cm의 정지 토크가 발생하

고 100 μ m 이상의 공극 편차에 대하여는 부하 토크는 4.3gfcM 이상이 발생하여 무 부하 상태에서 10.5gfcM 이상의 부하 토크가 인가되고 있다. 이러한 결과는 그림 4와 그림 5의 모의실험을 토대로 분석하면 공극 편차 100 μ m, 공기 동압 베어링의 편심률 0.78인 경우와 거의 일치하고 있다. 이러한 결과는 자기적 인력에 의한 부하 토크와 베어링 편심에 의한 토크에 기인하는 것으로 과부하로 운전되고 있음을 확인하였다. 그림 8은 진동 특성을 보이고 있다. 진동량은 일반적으로 RRO(Repeatable RunOut)을 통하여 알 수 있는데, 그림 8의 파형은 RRO 파형을 보이고 있는 것으로 회전하고 있는 로터 허브의 측면에서 측정하였다. 회전속도 14400rpm에서 총 5 μ m(편측:2.5 μ m)의 기계적 진동이 측정되었다. 베어링 편심률 0.72인 상태에서 구동하고 있어 모의실험 결과(0.78)와 거의 일치하고 있으며 축과 슬리브의 거리가 1 μ m로 약간의 외란에 대해서도 베어링은 파손될 가능성이 있다.

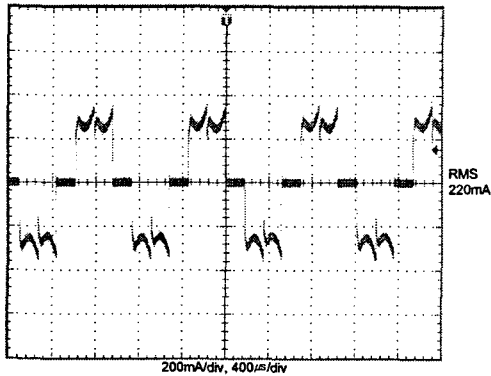


그림 7 실리콘 스틸의 고정자 요크를 갖는 슬롯리스 BLDC 모터의 14400rpm 무 부하 전류
 Fig. 7 No load current of Slotless BLDC motor with Si-Steel stator yoke at speed:14400rpm

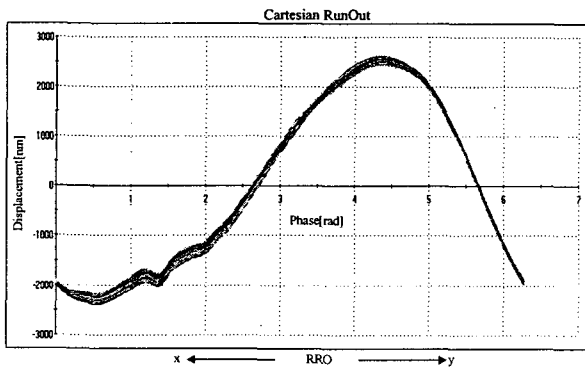


그림 8 실리콘-스틸의 고정자 요크를 갖는 슬롯리스 BLDC 모터의 진동 파형
 Fig. 8 Vibration Waveform of Slotless BLDC motor with Si-Steel stator yoke

그림 9는 소음 특성을 보이고 있다. 소음 특성에서도 회전 주파수인 240Hz에서 소음이 25dB로 크게 나타나고 있다. 베어링의 회전 주파수에서 큰 소음을 일으키고 있는 것은

베어링이 회전할 때의 진동이 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 진동 파형 및 소음 파형으로부터 로터의 회전 시 매우 불안정하게 회전하고 있음을 확인하였다. 총 합계 소음은 28.1dB로 크게 나타나고 있다.

그림 4,5의 모의실험 결과와 그림 7,8,9의 실험 결과로부터 실리콘 스틸 고정자 요크를 갖는 슬롯리스 BLDC 모터는 자기적 인력과 불 평형 전자기력에 의하여 무 부하 토크 6.2gfcM가 인가되고 있고, 기계적 진동 5 μ m, 소음 28.1dB로 진동이 크고 소비 전력 및 소음도 크게 나타나고 있음을 확인하였다.

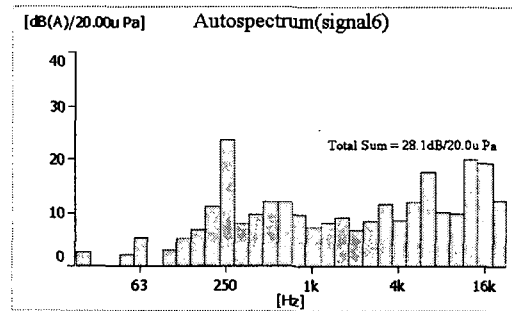


그림 9 실리콘-스틸의 고정자 요크를 갖는 슬롯리스 BLDC 모터의 소음 Spectrum 분석
 Fig. 9 Acoustic noise spectrum analysis of Slotless BLDC motor with Si-Steel stator yoke

2.5.2 프로토-타입(Proto-Type) 코어리스 BLDC 모터

코어리스 BLDC 모터의 구성은 그림 6과 같다. 슬롯리스 BLDC 모터와 차이점은 자기적 인력에 의한 소비 전력을 감소시키고 조립 및 가공오차에 의한 전자기적 불 평형을 제거하기 위하여 실리콘 스틸 고정자 요크를 사용하지 않고 플라스틱 가이드와 코일로 고정자를 구성하였다는 점이다.

그림 10은 제작된 모터의 무 부하 전류 파형을 보이고 있다. 전류는 실효전류 36mA이고, 인버터 출력 주파수는 960Hz로 14400rpm으로 회전하고 있다.

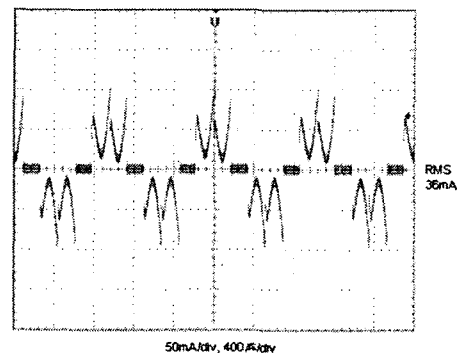


그림 10 14400rpm에서의 무 부하 전류 파형
 Fig. 10 No Load Current waveform at speed 14400rpm

회전 시 부하 전류는 전자기적 불 평형이 거의 없음을 보여 주고 있고, 약간의 베어링의 마찰 손실과 모터 허브 관성 부하에 의한 총 손실은 0.217W로 그림 3의 고정자 요크를 갖는 슬롯리스 BLDC 모터(2.45W)에 비하여 90% 감소하였

다. 자성 재질의 고정자 요크에 의한 불 평형 전자기력 및 자기적 인력의 영향이 없기 때문에 소비 전류가 매우 작다. 그림 11은 14400rpm에서의 부하 전류 파형을 보이고 있다. 상 인덕턴스가 작기 때문에, 상 절환 시 피크(Peak) 전류(250mA)가 인가되고 있지만, 실효 전류는 169mA이다. 컬러 휠(Color Wheel)의 관성 부하로서 7.7gpcm의 토오크 (1.17W)와 베어링 손실(0.068W, $\epsilon \ll 0.4$), 동손(0.44W), 철손 및 인버터 손실 등 총 1.72W가 입력되고 있다. 그림 12는 RRO를 보인다. 진동은 허브 표면에서 측정되었으며, 이때의 진동은 1.9 μ m이다. 이는 편축 방향으로는 1.1 μ m에 불과하고, 가공 및 조립 오차가 없다고 가정하더라도 편심률은 0.31이다. 이 결과는 그림 8의 슬롯리스 BLDC 모터(2.5 μ m)에 비하여 50%수준으로 베어링의 진동은 거의 발생하지 않고 있음을 입증하고 있다.

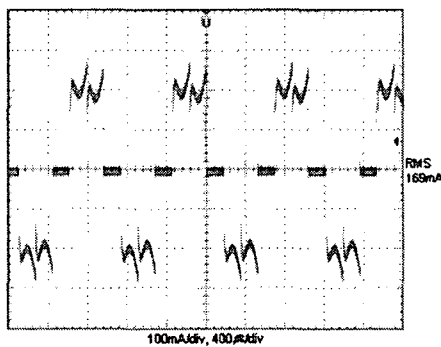


그림 11 14400rpm에서의 부하 전류 파형
Fig. 11 Current waveform at speed 14400rpm and color wheel load

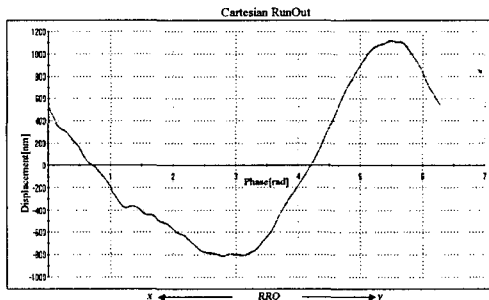


그림 12 14400rpm에서 RRO(Repeatable RunOut)
Fig. 12 Repeatability RunOut at speed 14400rpm

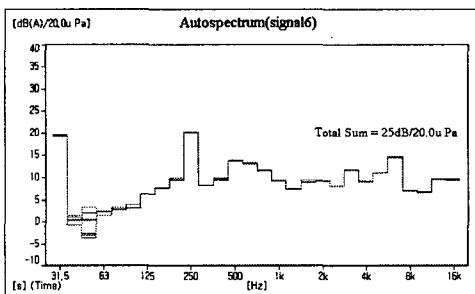


그림 13 14400rpm에서 소음 Spectrum 분석
Fig. 13 Acoustic noise spectrum analysis at speed 14400rpm

그림 13은 소음 측정 결과로 기계적 소음은 회전 주파수(240Hz)에서 20dB정도이고 스위칭 주파수(5.76kHz)에서 15dB로 총 소음은 25dB(암 소음 17dB)이다. 슬롯리스 모터에 비하여 3dB정도 낮은 소음을 확인할 수 있었다. 그림 14는 10800rpm에서의 부하 전류 파형을 보이고 있다. 실효 전류 111mA이고, 입력 1.2W로 양호한 성능을 보이고 있다. 그림 15는 10800rpm에서의 소음 측정 결과로 기계적 소음은 회전 주파수(180Hz)에서 10dB정도이고 스위칭 주파수(4.32kHz)에서 15dB로 총 소음은 22dB(암 소음 17dB)로 양호한 소음 특성을 보이고 있다.

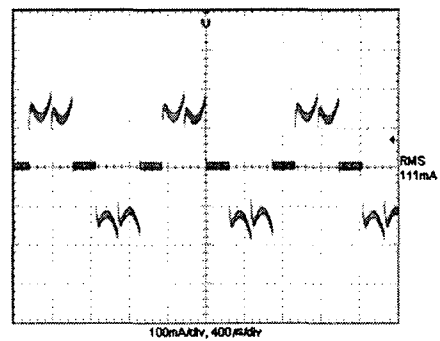


그림 14 10800rpm에서의 부하 전류 파형
Fig. 14 Current waveform at speed 10800rpm and color wheel load

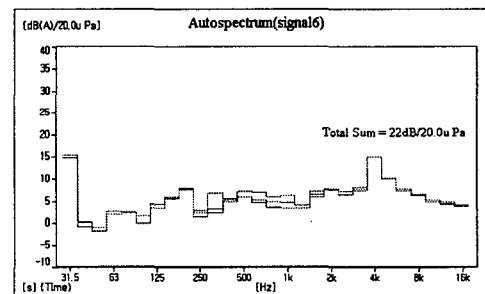


그림 15 10800rpm에서 소음 Spectrum 분석
Fig. 15 Acoustic noise spectrum analysis at speed 10800rpm

2.5.3 코어리스 BLDC 모터와 슬롯리스 BLDC 모터의 성능 비교

고정자 요크를 갖는 슬롯리스 BLDC 모터의 실험 결과와 코어리스 BLDC 모터의 실험결과와의 성능을 요약하면 표 4와 같다. 회전속도 14400rpm으로 무 부하 구동을 기준으로 성능을 비교하였다.

표 4 코어리스와 슬롯리스 BLDC 모터의 성능 비교
Table 4 Comparison of performance of Coreless and Slotless BLDC motor

항목	코어리스 모터	슬롯리스 모터
진동(RRO)	1.1 μ m	2.5 μ m
소음	25dB	28.1dB
소비 전류	36mA	220mA

코어리스 BLDC 모터는 고정자 요크를 갖는 슬롯리스 BLDC 모터에 비하여 진동 50%이상, 소비 전류 90%이상, 소음 3dB이상 향상되었음을 확인 할 수 있었다. 이 결과는 고정자 요크에 의한 자기적 인력의 감소와 불 평형 전자기력의 감소에 의한 것으로 공기 동압 베어링을 채용한 디지털 라이트닝 모터의 구동 모터로서 슬롯리스 BLDC 모터 보다 코어리스 BLDC 모터가 유리하다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 소비 전류나 진동의 경우는 고정자 요크에 의한 자기적 인력 및 불 평형 전자기력을 최소화함으로써 특성을 개선할 수 있었으나, 스위칭 주파수에서의 소음은 감소되지 않고 있다. 이 소음은 스위칭 절환 시 큰 피크(peak) 전류에 의한 것으로 파악되며, 이의 개선을 위하여 보다 정밀한 제어기(Controller)와 모터 드라이버(Driver)의 개발이 필요하다.

3. 결 론

본 논문에서는 공기 동압 베어링을 채용한 디지털 라이트닝 프로세서 모터에 있어서 코어리스 BLDC 모터와 고정자 요크를 갖는 슬롯리스 BLDC 모터의 특성을 비교 검토함으로써 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 슬롯리스 BLDC 모터는 고정자 요크에 의하여 불 평형 전자기력과 상대적으로 큰 자기적 인력에 의한 공기 동압 베어링의 큰 진동·소음과 소비 전력을 보임을 알 수 있었다.
2. 코어리스 BLDC 모터는 고정자 요크에 의한 불 평형 전자기력을 최소화함으로써 점성 계수가 낮은 공기에 의하여 지지되는 공기 동압 베어링의 진동 및 소음을 저감할 수 있었다.
3. 코어리스 BLDC 모터는 고정자 요크에 의한 자기적 인력을 제거함으로써 무 부하 토크가 감소되기 때문에 소비 전력을 절감할 수 있었다.
4. 코어리스 BLDC 모터는 저 소비 전력 및 저 진동 소음을 요구하는 디지털 라이트닝 프로세서 모터에 실리콘 스틸 고정자 요크를 갖는 슬롯리스 모터보다 적합함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2006년 중소기업청과 G&W Technologies의 지원에 의하여 연구되었음. (S0504222-F0420410-10100020)

참 고 문 헌

[1] Sang-Moon Hwang, Kyung-Tae Kim, Weui-Bong Jeong, Yoong-Ho Jung and Beom-Soo Kang, "Comparison of Vibration Sources Between Symmetric and Asymmetric HDD Spindle Motors with Rotor Eccentricity", IEEE Trans. on Ind. App., Vol.37, No.6, pp.1727-1731, Dec. 2001

[2] Ron W. Wonlley, "Air Bearings-Are they the future for the Hard Disk Drive Spindle motors?" ,DataTech

pp.49-52, 2002

[3] J.X. Shen, K.J.Tseng, D.M.Vilathgamuwa, W.K.Chan, "A Novel Compact PMSM with Magnetic Bearing Artificial Heart Application", IEEE, Trans. Ind. App., Vol.36, No.4 July 2000

[4] 十合普, "氣體軸受-設計から製作まで", 共立出版株式會社, 昭和 59年

[5] J.R. Hendershot Jr and TJE Miller, " Design of Brushless Permanent Magnet Motors", Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1994

[6] 전자장수치해석기법 조사전문위원회, " 전자장 수치 해석 기법 현황" 대한전기학회, 1992

[7] M.Marinescu and N. Marinescu, "Numerical Computation of Torques in Permanent Magnet Motors by Maxwell Stress and Energy Method", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 24, No.1 pp.463-466, 1988

저 자 소 개



양 이 우 (梁 二 宇)

1968년 12월 30일생. 1993년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정. G&W Technologies 책임 연구원
전화 : 032-815-3427
팩스 : 032-815-3429
E-mail : iwyang@gnwtech.com



김 영 석 (金 榮 石)

1951년 6월 11일생. 1977년 인하대 전기공학과 졸업. 1987년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년~1989년 전기연구원 전력전자연구실장. 현재 인하대 전기공학과 교수.
전화 : 032-860-7397
팩스 : 032-863-5822
E-mail : youngsk@inha.ac.kr



김 상 욱 (金 尙 郁)

1967년 2월 12일생. 1992년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 인하공업전문대학 전기정보과 부교수
전화 : 032-815-3427
팩스 : 032-815-3429
E-mail : sanguk@gnwtech.com