

고성능 레이저 프린터용 고속 스캐너모터

성부현* · 김성민* · 우기명* · 좌성훈*

High Speed Scanner Motor for High Performance Laser Printer

Bu-Hyun Sung · Sung-Min Kim · Ki-Myung Woo · Sung-Hoon Choa

Key Words: LSU(레이저 스캐닝 유니트), High Speed(고속), Cogging(코깅), Aerodynamic Bearing(공기베어링), Drive Circuit(구동회로), Motor(모터)

Abstract

High performance laser printer requires high speed scanning motor, which can operate up to 40,000 rpm. However, development of high speed scanning motor has been restricted due to the practical problems such as use of high speed bearing, compact circuit design and high cost. In this study, we designed a high speed scanner motor for use on laser scanning unit and discussed some design principles including the reduction method of cogging torque of the motor, development of hemispherical aerodynamic bearing, windage loss estimation, and operating circuit design to reduce noise.

기호설명

 C_d : 항력계수 (drag coefficient) ρ : 공기밀도 N : 다각면의 수 ω : 회전수 R_a : 폴리건미러의 평균반경 A_a : 폴리건미러의 체적계수

1. 서 론

정보화시대에 있어서 프린터의 수요는 점점 폭발적으로 확대되어가고 있으며, 프린터 중에서 화질이 우수하고 인쇄속도가 빠른 레이저 프린터의 수요가 급증하고 있다. 따라서 최근 레이저 프린터는 화질과 인쇄속도를 향상시키는 것이 주요 기술적 추세가 되고있다. 레이저 프린터에는 입사빔(beam)을 주사하여주는 LSU(Laser Scanning Unit)가 있으며 이 LSU 내에는 폴리건미러

(polygon mirror)를 회전시켜 주는 스캐너 모터(scanner motor)가 있다. 인쇄속도를 향상시키기 위해서는 폴리건미러를 회전시켜 주는 스캐너 모터의 회전속도를 증가시켜야 한다. 현재 레이저 프린터의 해상도는 600 DPI(Dot Per Inch)에서 1200 DPI로 이전되고 있으며, 속도는 A4용지를 기준으로 할 때, 일반보급형은 12 PPM(Page Per Minute)이고 고급보급형은 24 PPM 정도이다. 이를 위한 스캐너 모터의 회전수는 현재 10,000 rpm 또는 20,000 rpm대에서 약 30,000 rpm 또는 40,000 rpm대로의 증가가 필수적이다. 그럼에도 불구하고 40,000 rpm 이상의 고속모터의 개발은 아직 초기 단계에 머무르고 있다. 그 이유는 모터의 핵심이 되는 구동회로의 콤팩트(compact)화와 고속회전 베어링의 적용이 용이하지 않을 뿐 아니라, 어렵게 구현을 했을 경우에도 비용의 부담이 커지기 때문이다. 따라서 본 논문은 아직까지 초기 개발 단계에 머무르고 있는 40,000 rpm 이상의 고속 스캐너 모터의 개발을 시도하였으며, 특히 시스템 적용에 초점을 맞추어 성능구현 측면에 대하여 중점적으로 연구하였다. 이를 위하여 스캐너 모터를 제작하여 폴리건미러를 탑재

* 삼성전자 중앙연구소

한 상태에서 45,000 rpm 까지 회전시키었고 LSU의 적용에 필요한 성능평가를 하였다. 특히 성능구현의 측면에서는 정속을 위한 코깅토크 저감, 고속회전을 위한 공기 동압베어링의 적용 그리고 고속회전 시 예상외로 크게 발생하는 폴리건미러에 의한 풍손(windage)에 대응하는 전력전자(power electronics) 기능의 구동회로 등에 관하여 주의 깊게 다루었다.

2. 이론 및 설계

2.1 모터의 구성

본 연구에서 사용된 모터는 레이저 프린터용으로 사용될 것을 고려하여 장수명과 정속도 제어를 위한 브러시레스 DC 방식을 채택하였다. 또한 고회전을 위하여 8극 6슬롯의 구조와, 고회전 시 원심력에 의한 영구자석의 파손을 막기 위하여 아우터 회전자(outer rotor) 방식을 채택하였다. LSU의 구조 안에 장착시키기 위한 모터의 크기는 작을수록 유리하므로 가능한 한 모터의 부피를 작게 하기 위하여 노력하였다. 이를 위하여 토크-회전수 특성의 이론적 계산과 FEM(Finite Element Method) 시뮬레이션을 이용하여 모터 사이즈를 최적화 시켰었다. 본 모터의 간략한 설계 사양을 표 1에, 그리고 개략적인 형상을 그림 1에 나타내었다.

Table 1 Specification of scanner motor

정격전압	24 Volt
토크상수	0.0031 Nm/A
정격회전수	45,000 rpm
모터외경	38.6 mm
모터높이	28.0 mm

그림 1에서 모터의 기판으로 사용되는 금속(metal) PCB상에는 구동회로와 연결되는 회로 패턴(pattern)이 구성된다. 회전자는 공기 동압베어링과 영구자석이 일체형으로 조립되는 형태로써 공기 동압베어링의 회전부 외측에 폴리건미러를 고정하도록 설계하였다. 본 연구에서 사용한 폴

리건미러는 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 6면 미러의 구조이다.

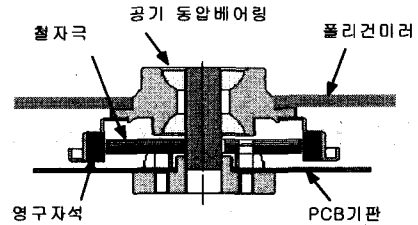


Fig.1 Schematic diagram of scanner motor

2.2 고속회전에 따른 풍손(windage) 계산

모터를 설계함에 있어서 정격부하는 이론적으로 예측되어야 한다. 모터의 정격회전 시 모터에 부하로 작용하는 것은 베어링의 마찰, 공기저항 그리고 외부부하 등이 있으나, 본 모터에서는 공기 동압베어링을 적용하여 베어링의 마찰이 없고 외부부하가 없으므로 공기저항만이 부하로 작용하게 된다. 공기저항은 대부분 폴리건미러의 풍손으로 볼 수 있는데, 그 폴리건미러에 대한 풍손 T_m 의 계산식은 아래의 식(1)과 같다[1].

$$T_m = C_d \left(\frac{\rho N \omega^2}{2} \right) R_a^3 A_a \quad (1)$$

식(1)에서 알 수 있듯이 풍손은 회전수의 제곱에 비례하므로 고회전이 될 때 풍손에 의한 부하가 크게 증가되고, 이에 따라서 대전류 스위칭(switching)을 위한 파워모듈(power module)이 필요하게 됨을 알 수 있다.

2.3 코깅토크 저감

모터의 속도가 불균일하면 용지에 입사되는 빔의 스캐닝(scanning) 거리가 시간에 대해서 일정치 않게 된다. 따라서 레이저 프린터에서 모터의 정속회전은 인쇄 시 화질의 수준을 결정하게 되는 주요 요소 중의 하나이다. 그러므로 모터설계 시 코깅토크를 저감시키는 것은 매우 중요하다. 코깅토크를 저감시키는 방법에 대해서는 이미 많은 연구를 통하여 다양한 방법이 알려져 있다 [2,3]. 본 연구에서는 여러 방법들 중에서 양산의 적용이 용이하며, 비용이 크게 필요치 않은 철자극의 형상을 변형하는 방법을 선택하였다. 철자극 형상의 변형 방법은 철자극과 영구자석사이의

에어갭을 철자극 양끝 단으로 갈수록 크게 하도록 하는 방법을 사용하였다. 이를 위한 시뮬레이션은 맥스웰 전자기장 툴(tool)을 이용하였다.

2.4 공기 동압베어링

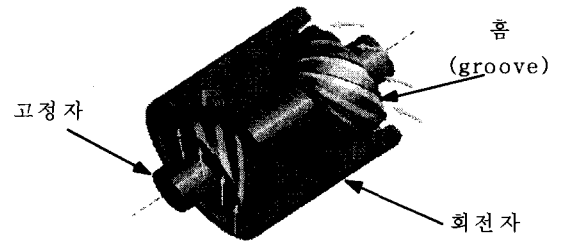
기존 20,000 rpm 이하의 LSU용 모터에는 볼베어링이 주로 이용되고 있다. 그러나 이런 볼베어링을 이용하면 소음, 발열, 마모 등으로 안정적인 작동이 어렵게 되므로 약 25,000 rpm 이상에서는 볼베어링을 적용할 수 없는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 당 실험실에서 개발한 자체부상식 공기 동압베어링을 적용하였다[4]. 공기 동압베어링은 여러 종류가 있으나[5], 본 논문에서는 반구형 공기 동압베어링(hemispherical aerodynamic bearing)을 채택하여 개발하였는데, 그 이유는 반구형 공기 동압베어링은 반경방향 하중과 축방향 하중을 동시에 지지할 수 있기 때문에 본 연구의 모터처럼 고속으로 회전하며 회전축이 수직인 회전계의 지지에 장점이 있기 때문이다. 반구형 공기 동압베어링의 개략적인 구조는 그림 2와 같다. 공기 동압베어링은 고정자와 회전자로 구성되어 있고, 고정자와 회전자 사이에는 2~10 μ m 정도의 틈새가 있으며, 고정자에는 2~10 μ m 깊이의 홈(groove)이 있다. 초기에 회전자가 고정자 하반구에 접촉한 상태로 있다가 회전자가 동력을 받아 회전하면 고정자 홈으로 공기가 유입되고, 웨지효과(wedge effect)에 의해 높은 압력이 발생하여 회전체를 부상시킨다.

2.5 구동회로

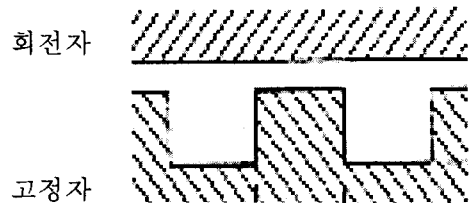
스캐너 모터의 고속구동을 위해서는 구동회로에 아래와 같이 4가지 기능이 요구된다.

- ① 일반 브러시리스 모터를 구동시킬 수 있는 드라이브 기능,
- ② 정속제어를 위한 PLL(Phase Locked Loop) 기능,
- ③ 플리건미러가 고회전하게 될 때 풍손에 의하여 발생하는 대전류의 통전을 위한 전력전자의 기능,
- ④ 모터와 더불어 구동회로를 LSU 내의 일정한 공간에 장착시키기 위한 콤팩트(compact)화 기능 등이 그것이다. 기존의 약 20,000 rpm 정도의 구동회로는 소형화를 위하여 여러 IC 메이커에서 위 ①,②,④의 기능이 모두 구비된 one-chip화 된

IC를 상용화시키었다. 상용화된 IC를 이용할 경우에는 구동회로의 사이즈가 크지 않아 LSU 내에 장착시킬 수 있는 크기로 모터와 구동회로를 같은 금속 PCB위에 탑재시킬 수 있다. 그러나 30,000 rpm 이상의 모터의 경우에는 전류량이 커지므로 ③의 기능이 추가로 요구되는데, 이를 위한 one-chip화 된 IC는 아직 상용화되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 one-chip IC에 의하여 구동회로를 소형화 할 수 없었으므로 ①과②의 기능을 갖춘 IC(LB1875)에 파워모듈(power module)을 별도로 적용하여 ③의 기능을 보완한 구동회로를 설계하였다. 그러나 이런 방법으로 구동회로와 모터를 같은 금속 PCB위에 탑재시킬 경우에 금속 PCB의 사이즈가 커지므로 ④의 기능을 만족시킬 수가 없게 되었다. 따라서 모터와 구동회로를 분리 제작한 뒤 구동회로는 LSU 외부에 장착시키었다. 구동회로 방식에는 현재 주로 적용하고 있는 PWM(Pulse Width Modulation) 방식 외에, 노이즈에 대하여 우수한 성능을 발휘하는 PAM(Pulse Amplitude Modulation) 방식이 있다. 각 방식에 대한 회로도를 그림 3에 나타내었다.



(a) Principle of operating

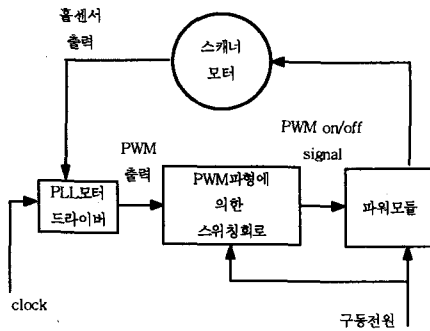


(b) Cross sections of groove

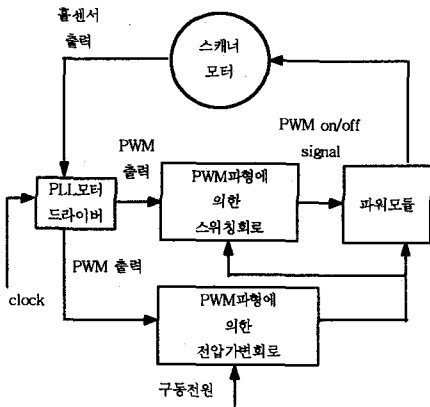
Fig.2 Schematic of spiral-grooved spherical air bearing

그림 3을 보아 알 수 있듯이 PWM 방식은

PAM 방식보다 트랜지스터를 포함한 부품수가 적기 때문에 재료비를 감소시킬 수 있다. 그런데 PWM 방식은 재료비 측면에서는 장점을 갖고 있으나 모터부와 구동회로부를 연결시키는 라인이 길 경우에는, 모터 코일에서 발생하는 되는 노이즈에 의해서 연결라인상을 흐르는 신호가 영향을 받아 성능상의 문제를 야기하는 단점을 갖고있다. 본 연구에서는 PWM과 PAM 회로를 구성하여 각각의 노이즈 특성을 비교하였고, 스캐너 모터에 적합한 구동회로를 채택하였다.



(a) PWM method



(b) PAM method

Fig.3 Circuit diagram of PWM method and PAM method

3. 실험 및 결과

3.1 회전수 증가에 따른 풍선에 의한 소모전류 시스템의 소비전력 및 구동회로의 부품사양을

결정하기 위하여 풍선에 의한 소모전류의 예측 및 평가는 매우 중요하다. 아래 그림 4에는 폴리건미러의 풍선에 의하여 발생하는 토크와 회전수와의 관계를 식(1)에 의해서 이론적으로 계산된 값과 실험을 통하여 얻어진 값을 그래프로 비교하였다. 실험치의 데이터 중에서 25,000 rpm 이상의 데이터는 실험장치상의 어려움으로 25,000 rpm 이하의 데이터를 이용하여 유추를 하였다. 그림 4의 비교에서 볼 때 실험치가 이론치보다 약간 크게 나타나는 이유는, 첫째 앞의 식(1)에서 항력계수를 설정함에 있어서 오차가 있기 때문이며, 둘째 회전체의 불균형(unbalance)에 기인하여 회전 시 발생하는 폴리건미러의 흔들림(wobble)에 의한 공기저항이 이론치보다 증가되기 때문이라고 사료된다. 이론적으로 얻어진 토크값을 이용하여 각 회전수에 대한 이론적 전류치를 구할 수 있다.

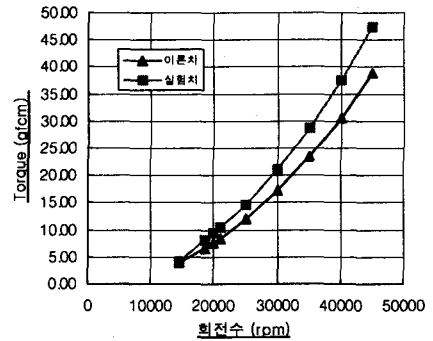


Fig.4 Revolution of polygon mirror vs. torque of motor

그림 5에 회전수와 전류와의 관계를 그래프로 나타내었다. 그림 5를 보았을 때 이론치와 실험치가 잘 일치함을 알 수 있다. 약 27,000 rpm 이상으로 폴리건미러가 회전할 때 모터에는 약 300 mA의 전류가 소모됨을 그림 5를 보아 알 수 있다. 일반적으로 one-chip 타입의 구동회로 IC의 허용전류가 250 mA 이하이므로 25,000 rpm 이상의 모터용 구동회로에는 대전류를 스위칭하기 위한 파워모듈(power module)이 필요하게 된다. 더욱이 본 연구에서는 45,000 rpm의 회전수를 목표로 하였고, 이때 소비전류는 약 800 mA가 되므로 스위칭 트랜지스터의 용량은 마진을 포함하여 소비전류의 2배정도인 1.6A 정도의 파워모듈을

사용하여야 한다. 결국 고속 스캐너모터용 구동 회로는 개별소자(discrete) 회로로써 설계 제작해야만 한다는 것을 알 수 있다.

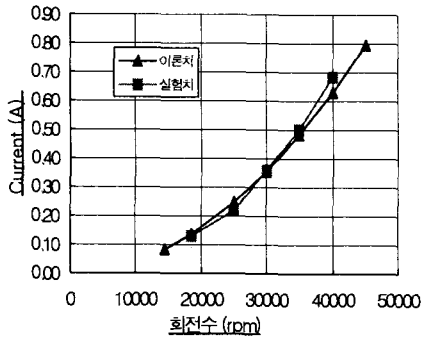
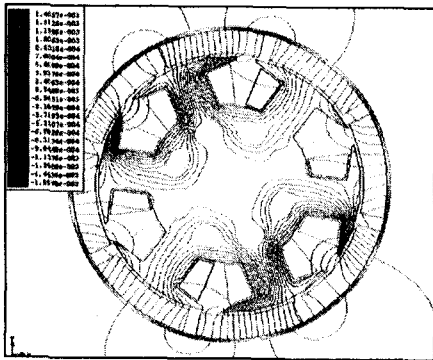
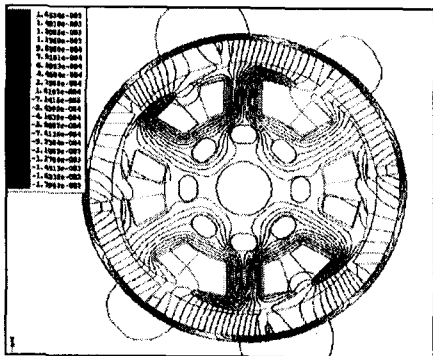


Fig.5 Revolution of polygon mirror vs. current of motor



(a) Initial shape of core



(b) Modified shape of core

Fig.6 Shape and EM simulation of core

3.2 코깅저감을 위한 전자기장 시뮬레이션

기존의 철자극과 변형된 철자극의 형상의 모터를 각각 전자기장(EM) 시뮬레이션을 하였고 그 결과를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 8극 6슬롯의 구조의 모터는 회전각의 15°가 스위칭 구간이 되므로, 이 구간에 대해서만 시뮬레이션을 하였다. 그림 7을 보면 변형된 철자극의 코깅토크는 0.007 Nm로 초기형상 철자극의 코깅토크 0.013 Nm에 비하여 약 1/2로 감소했음을 알 수 있다.

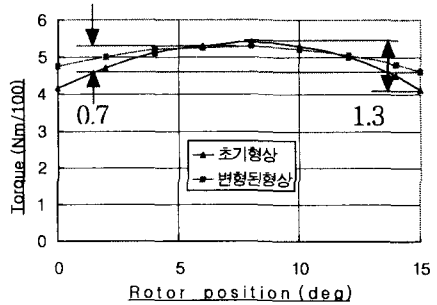


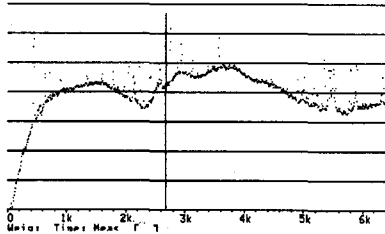
Fig.7 Cogging torque at switching angle (15°)

3.3 각 베어링의 성능 비교

본 연구에서 적용한 공기 동압베어링의 성능을 확인하기 위하여 볼베어링과 공기 동압베어링을 채용한 모터에 대하여 각각 소음, 진동 그리고 소비전류를 측정하여 비교하였다. 이때 측정 회전수는 26,880 rpm 이었다. 그림 8에 소음 측정 결과를 나타내었다. 공기 동압베어링을 채용한 모터가 볼베어링을 채용한 모터보다 약 14 dB정도 낮아, 소음이 매우 크게 감소함을 알 수 있다. 그림 9는 가속도계를 이용하여 측정한 진동 결과이다. 공기 동압베어링을 채용한 모터가 볼베어링을 채용한 모터보다 약 1/2배 정도로 진동레벨이 감소했음을 알 수 있다. 이것은 공기베어링의 경우 공기 갭에 의하여 회전되기 때문에 기존의 볼베어링에 의해서 발생하는 비반복성 떨림(non repeatable runout) 성분이 거의 소거되고 반복성 떨림(repeatable runout) 성분만이 남게 되어 진동이 크게 향상되기 때문이다. 따라서 볼베어링을 채용했을 때, 볼(ball) 및 레이스(lace)에 의해서 가진 되던 소음 및 진동이 공기 동압베어링을 채용했을 때에는 크게 감소된다는 사실을 확인하였다. 따라서 고속회전 시 마모 및 발열 등에 의해

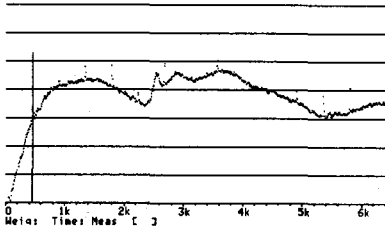
서 수명을 보장 못하는 볼베어링 대신에 공기 동압베어링에 의해서 수명을 보장할 수 있게 되었다.

Me AUTOSPEC ch.R A MEICH MERS:IN [] MAIN Y: 26.6dB
 Y: 70.0dB ref 20.0uV RMS 80dB [] X: []
 X: 0Hz + 6.4kHz LIN [] X: []
 #AVG: 300 TOTAL: 62.9dB/V



(a) Ball bearing

Me AUTOSPEC ch.R A MEICH MERS:IN [] MAIN Y: 42.8dB
 Y: 70.0dB ref 20.0uV RMS 80dB [] X: []
 X: 0Hz + 6.4kHz LIN [] X: []
 #AVG: 300 TOTAL: 58.7dB/V



(b) Spherical air bearing

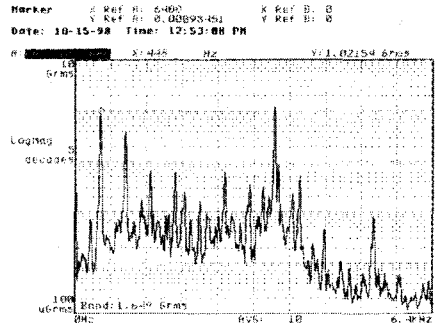
Fig.8 Noise level of motors using each bearings

한편 그림 10은 회전 시 소비전류를 측정 한 결과이다[4]. 측정방법은 모터의 전원 입력단에 전류 탐침(probe)을 연결한 뒤 오실로스코프(oscilloscope)로 측정하였다. 공기 동압베어링은 비접촉으로 회전하기 때문에 회전 마찰력이 작다. 따라서 소비전류가 작게 측정된다. 측정결과 공기 동압베어링의 경우 볼베어링에 비하여 30 mA인 약 13%의 소비전류가 감소함을 확인할 수 있었다. 따라서 공기 동압베어링을 사용할 경우에는 볼베어링을 사용할 때에 비하여 기계적인 특성이 우수해 짐과 동시에 전기적인 특성도 우수해 지는 사실을 확인하였다.

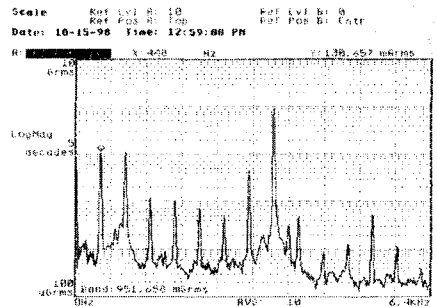
3.4 구동회로의 적용방식의 비교

본 연구에서는 PWM 및 PAM 방식으로 구동회

로를 설계 제작하여 모터를 고속 구동시키며 노이즈에 대한 성능을 실험을 하였다. 실험 시 모터와 구동회로간의 거리는 실제 시스템 내에서의 장착거리인 30cm로 하였다. 상(phase)파형 및 홀(hall)파형의 노이즈는 모터 자체뿐 아니라 전체 시스템의 파형에도 영향을 미치어 시스템 성능상의 문제를 야기하기도 한다.



(a) Ball bearing (1,649 grms)



(b) Spherical air bearing (951 grms)

Fig.9 Vibration of motors using each bearings

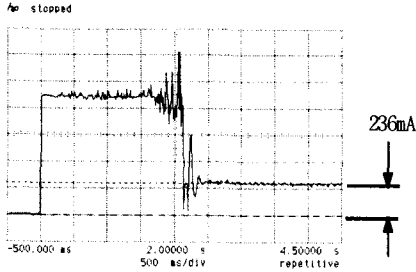
아래 그림 11에는 노이즈의 한 예로서 각 방식에서 평가된 홀 파형을 나타내었다. 그림 11에서 보면 PWM 방식의 홀 파형의 중간 중간에는 상하로 튀는 노이즈가 크게 나타나는데 비하여, PAM 방식의 홀 파형에는 노이즈가 거의 없게 나타났다. 이것은 고속모터일 경우에 모터와 구동회로를 분리하여 장착하게 됨으로서 발생하는 노이즈 문제에 대응하기 위하여, 구동회로를 PAM 방식으로 채용해야 한다는 사실을 알 수 있게 해준다.

4. 결론

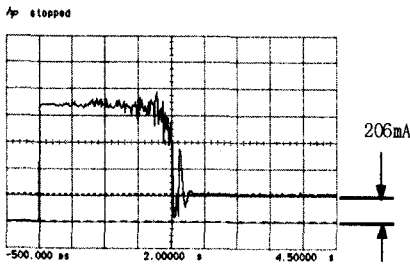
본 연구에서는 점차 고속 및 고화질화 되는 레이저 프린터에 필수적으로 요구되는 고속 스캐너 모터에 대해서 실제 시스템에 적용할 때 발생하는 주요 기술적 이슈를 다루었다. 전자기장 시뮬레이션을 이용하여 철자극의 형상변형 방법으로 코깅토크를 저감했으며, 공기 동압베어링의 적용을 통하여 고속모터의 수명 및 진동소음의 성능을 확보하였다. 그리고 고속회전 시 폴리컨미러에서 크게 발생하는 풍손에 의한 전류를 예측하였고, 그 전류에 대응하기 위한 구동회로 방식들을 실험을 통하여 비교분석 하였다. 특히 25,000 rpm 이상의 고속모터의 구동회로는 개별소자 회로로서 설계 제작해야만 한다는 사실을 파악하였고, 45,000 rpm 용 모터의 구동회로를 개별소자회로로서 구현하였다. 또한 고속모터일 경우에 모터와 구동회로를 분리하여 장착하게 됨으로써 발생하는 노이즈 문제에 대응하기 위하여, 구동회로를 PAM 방식으로 채용해야 한다는 사실도 확인하였다. 레이저 프린터 시장의 급속한 발전 추세에 비하여 이에 대한 연구가 부족한 현실임을 감안하여 볼 때, 본 연구는 관련분야의 발전에 일익을 할 수 있을 것이라고 생각된다.

참고문헌

- (1) G.F. Marshall, 1991, Optical Scanning, Marcel Decker Inc., pp.459~461, J.R. Hendershot
- (2) Jr. and TJE Miller, 1994, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press Oxford, pp. 4/26~4/28
- (3) B. Ackermann, J.H.H. Janssen, R. Sottek and R.I. van Steen, 1992, "New Technique for Reducing Cogging Torque in a Class of Brushless DC Motors", IEEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 139, pp. 315~320, July
- (4) 박근형외 5인, 1999, "나선홈을 갖는 반구형 공기 베어링의 반경 방향 성능측정", 한국정밀공학회지, 제16권, 2호, pp. 23~30

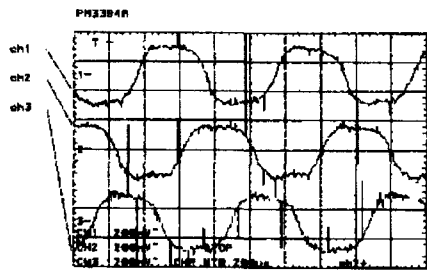


(a) Ball bearing

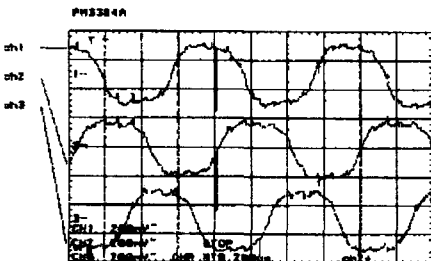


(b) Spherical air bearing

Fig.10 Current consumption of motors using each bearings



(a) PWM method



(b) PAM method

Fig.11 Hall waves by PWM method and PAM method

(5) D. Bonneau and J. Absi, 1994, "Analysis of Aerodynamic Journal Bearings with Small Number of Herringbone Grooves by Finite Element Method", Transaction of the ASME, Vol. 116, pp. 698~704