

고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 기계적 접촉에 의한 이상 소음원의 실험적 규명

Experimental Identification of Abnormal Noise Source of a High Speed Polygon Mirror Scanner Motor Considering the Mechanical Contact

김 명 규*·이 창 진*·장 건 희†·임 동 오**

Myunggyu Kim, Changjin Lee, Gunhee Jang and Dongo Lim

Key Words: Abnormal noise (이상 소음), High speed rotor(고속 회전체), Mechanical contact(기계적 접촉), Polygon mirror scanner motor(폴리곤 미러 스캐너 모터)

ABSTRACT

This paper investigates the abnormal noise of polygon mirror scanner motor due to the mechanical contact. In the high speed polygon mirror scanner motor the vibration of polygon mirror scanner motor is one of the main sources of abnormal noise, because structure-borne noise due to the vibration is bigger than aerodynamic noise, especially when the rotating part contacts the stationary parts. This research determines the main harmonics of structure-borne noise by using sound quality evaluation. It also develops an experimental set-up to measure the mechanical contact and vibration of polygon mirror scanner motor simultaneously. This paper also show that mechanical contact between rotating shaft and stationary sleeve is one of the dominant vibration sources of structure-borne noise which cause the abnormal noise of the high speed polygon mirror scanner motor by using the developed experimental set-up.

1. 서 론

폴리곤 미러 스캐너 모터(Polygon mirror scanner motor)는 PC 및 기타 매체로부터 정보를 출력하는 레이저 빔 프린터(Laser beam printer)의 핵심 부품인 LSU(Laser scanner unit) 구동 고속 스핀들 모터로서 폴리곤 미러에 주사된 레이저 빔을 지정된 위치로 편향 시키는 역할을 한다. 폴리곤 미러 스캐너 모터의 회전 속도는 인쇄물을 고속으로 출력하기 위하여 최근 30,000rpm 이상까지 증가했으며 그 속도는 더욱 증가하고 있는 추세이다. 그리고 폴리곤 미러 스캐너 모터는 프린터의 인쇄 품질을 향상 시키기 위해 저진동 특성이 요구될 뿐만 아니라 최근에는 사용자의 쾌적한 사용 환경을 위해 저소음 특성이 지속적으로 요구된다.

일반적으로 폴리곤 미러 스캐너 모터에서 발생하는 소음은 공력 소음(Aerodynamic noise), 구조 소음(Structure-borne noise), 전자기 소음(Electromagnetic noise)으로 크게 분류할 수 있다. 공력 소음은 고속으로 회전하는 폴리곤 미러에 의한 공기 유동에 의해 주로 저주파 대역에서 광대역 소음으로 발생하고, 구조 소음은 회전체의 불평형 질량에 의한 가진 등 모터 자체의 진동에

의해 전체 주파수 대역에서 이산 주파수 소음으로 발생한다. 그리고 전자기 소음은 모터의 코깅 토크나 인버터의 정류에 의해 전체 주파수 대역에서 이산 주파수 소음으로 발생한다. 따라서 폴리곤 미러 스캐너 모터에서 발생하는 소음의 다양한 가진원과 복잡한 전달 경로 등의 발생 과정을 정확하게 예측하여 사용자의 쾌적한 사용 환경을 저해하는 소음을 발생시키는 원인을 규명하고 제거하는 것이 효과적인 폴리곤 미러 스캐너 모터의 소음 저감 방법이다.

현재까지 많은 연구자들이 폴리곤 미러 스캐너 모터의 소음·진동원 규명 및 소음 저감을 위한 연구를 수행했다. Jung⁽¹⁾ 등은 유연한 지지구조를 포함하고 소결 베어링으로 지지되는 고속 회전 유연 폴리곤 미러 스캐너 모터의 유한 요소 모델을 개발하여 불평형 질량이 모터의 진동에 대한 연구를 해석적으로 수행했다. 하지만 불평형 질량에 의한 모터의 진동에 초점을 맞추고 있기 때문에 다른 가진원이 전체 진동과 소음에 미치는 영향을 파악하기에는 한계가 있다. Kawamoto⁽²⁾ 등은 폴리곤 미러 스캐너 모터의 진동 때문에 발생하는 회전체와 지지부 사이의 접촉에 대한 연구를 실험적으로 수행했다. 하지만 고속영역을 제외한 저속영역에서만 접촉과 진동의 영향을 고려하였다. Kim⁽³⁾ 등은 폴리곤 미러 스캐너 모터의 회전 속도 변화에 따른 그루브 베어링과 회전축 사이의 접촉에 대한 연구를 실험적으로 수행했다. 그러나 접촉과 진동의 상관 관계는 고려하지 않아 접촉이 전체 진동과 소음에 미치는 영향은 파악하기에는 한계가 존재한다.

† 교신저자: 정희원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : ghjang@hanyang.ac.kr

Tel : (02) 2220-0431, Fax : (02) 2292-3406

* 정희원, 한양대학교 대학원 기계공학과

** 삼성전기 P&M 사업부

본 논문은 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 소음 특성과 진동 특성의 상관 관계를 분석하였다. 그리고 이를 기반으로 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터에서 발생할 수 있는 이상 소음의 주파수와 가진원을 실험적으로 규명하였다. 또한 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 기계적 접촉과 진동의 상관 관계를 평가할 수 있는 실험 장치를 개발하여 이상 소음원 규명 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의

소음 특성

과거에는 폴리곤 미러에 의한 공력 소음이 폴리곤 미러 스캐너 모터에서 발생하는 전체 소음 중 가장 큰 비중을 차지했었다. 그러나 최근에는 폴리곤 미러 스캐너 모터의 속도가 증가함에 따라 고속에서의 회전 관성을 최소화하기 위하여 회전체의 크기가 점점 작아지고 있기 때문에 공력 소음의 비중은 점점 감소하고 있다. 또한 모터의 속도가 증가함에 따라 전자기 소음도 20kHz 이상의 가청 주파수 밖으로 벗어나고 있다. 따라서 모터에서 발생하는 전체 소음 중 구조 소음이 차지하는 비중이 크게 증가하고 있다. 특히 2~5kHz 사이의 주파수 대역에서 발생하는 이산 주파수 소음은 인간의 청각이 가장 민감하게 반응하는 소음이기 때문에 이 주파수 대역에서 발생하는 구조 소음은 사용자의 편의성을 저해하는 주요 이상 소음으로 작용한다.

Fig. 1 은 정격 속도가 다른 폴리곤 미러 스캐너 모터로 type A 모터는 30,000 rpm 이고 type B 모터는 34,000rpm 이다. 두 모터는 동일한 플레인 소결 베어링을 사용하고, 불평형 질량은 4.0mg·cm 이하로 밸런싱 했다. 하지만 정격 속도가 34,000rpm 인 모터는 정격 속도가 30,000rpm 인 모터보다 회전체의 크기를 줄여 고속에서의 회전 관성을 최소화 했다. Fig. 2 는 두 폴리곤 미러 스캐너 모터를 정격 속도에서 구동했을 때 측정된 소음 스펙트럼이다. 정격 속도가 30,000rpm 인 모터는 폴리곤 미러에 의한 공력 소음이 2~8kHz 사이의 저주파 대역에서 광대역 소음으로 크게 발생하며, 불평형 질량에 의한 구조 소음이 회전 주파수의 1st 조화 성분에서 이산 주파수 소음으로 크게 발생한다. 반면 정격 속도가 34,000rpm 인 모터는 회전체의 크기가 작아졌기 때문에 2~8Hz 사이의 저주파 대역에서 발생하는 공력 소음은 감소했지만, 불평형 질량에 의한 1st 조화 성분의 구조 소음 외에도 이산 주

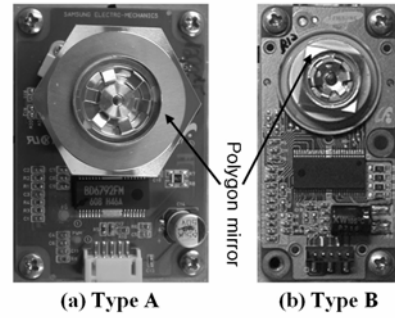


Fig. 1 Polygon mirror scanner motor

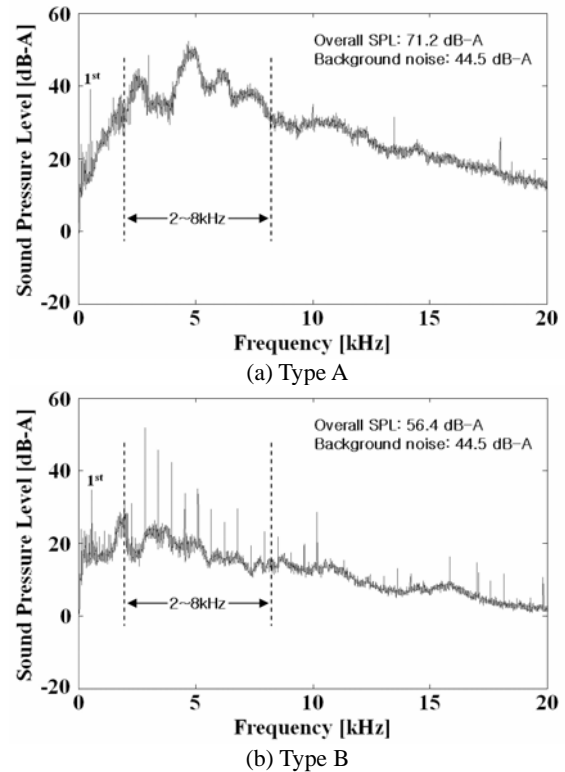


Fig. 2 Sound spectrum of polygon mirror scanner motor

파수 소음이 2~8kHz 사이의 저주파 대역에서 크게 증가했다. 이는 공력 소음에 묻혀있던 구조 소음이나 전자기 소음이 감소한 공력 소음 때문에 노출된 것으로 사료된다.

Fig. 3 은 정격 속도 34,000rpm인 모터에서 발생하는 진동 스펙트럼과 진동과 소음 사이의 코히어런스이다. 모터의 진동은 회전 주파수의 조화 성분에서 주로 발생하며, 특히 1st 조화 성분을 제외하고는 5th 조화 성분이 가장 크다. 그리고 2~8kHz 사이에 존재하는 회전 주파수의 조화 성분의 코히어런스 값은 대부분 0.7 이상이기 때문에 이 주파수 대역에서 발생한 이산 주파수 소음은 대부분 모터의 진동에 기인한 구조 소음이라고 할 수 있다. 특히 이상 소음의 주파수 대역에 포함되는 회전 주파수의 5th 조화 성분과 6th 조화

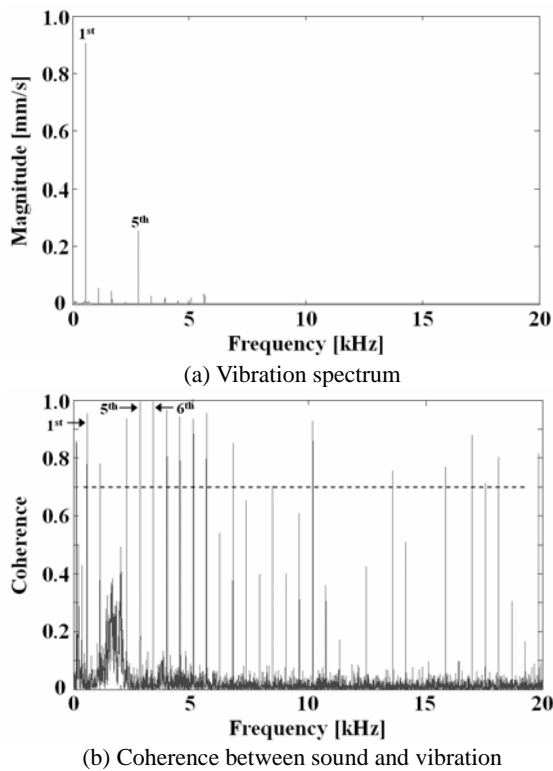


Fig. 3 Vibration spectrum and coherence of type B at 34,000 rpm

성분의 코히어런스 값은 1에 근접하기 때문에 이 주파수에서 발생하는 모터의 진동은 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터에서 이상 소음을 유발한다. 따라서 2~5kHz 사이의 주파수 대역에서 모터의 진동에 의한 구조 소음의 주파수와 가진원을 명확히 규명하고 제거하는 것이 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 이상 소음 저감을 위한 가장 효과적인 방법이다.

3. 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 이상 소음원 규명

3.1 이상 소음의 주파수

고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 이상 소음원 규명을 위하여 본 논문에서는 정격 속도가 34,000rpm인 Type B 모터를 사용했다. 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터에서 발생하는 이상 소음의 주파수는 음질 평가를 통하여 파악할 수 있다⁽⁴⁾. 본 논문에서는 음질 평가를 위하여 상용 프로그램인 B&K Sound Quality를 사용하였고, Fig. 4 과 같이 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터에서 발생하는 소음을 측정 후 이산 주파수 소음 중 회전 주파수의 특정 조화 성분을 소음 스펙트럼에서 제거하여 각 조화 성분이 전체 소음에 미치는 영향을 분

석하였다. Table 1 은 불평형 질량에 의한 회전 주파수의 1st 조화 성분과 2~5kHz 사이의 주파수 대역에서 발생한 구조 소음 중 소음과 진동의 코히어런스 값이 큰 5th 조화 성분과 6th 조화 성분이 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터에서 발생한 전체 소음에 미치는 영향이다. 회전 주파수의 5th 조화 성분을 제거했을 경우 전체 소음은 2.1dB-A 감소하지만 1st 조화 성분과 6th 조화 성분을 제거했을 경우 전체 소음은 큰 변화가 없다. 따라서 구조 소음 중 회전 주파수의 5th 조화 주파수가 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터에서 발생하는 이상 소음의 주파수이다.

3.2 이상 소음의 원인

고속 폴리곤 미러 스캐너 모터에서 발생하는 이상 소음은 모터의 진동에 의한 구조 소음이기 때문에 이상 소음의 기인은 회전 주파수의 5th 조화 진동의 원인을 파악하면 규명할 수 있다. 모터의 진동은 가진원에 의해 가진 주파수에서 직접 발생하는 진동과 가진 주파수의 조화 성분이 모터의 고유 진동수와 일치했을 때 공진에 의하여 발생하는 진동으로 구분할 수 있다. 가진 주파수에서 직접 발생하는 진동은 모터의 회전 속도가 변하면 변화된 가진 주파수에서도 유사한 진동이 발생한다. 그러나 공진에 의한 진동은 회전 속도가 변하면 변화된 가진 주파수의 조화 성분이 모터의 고유 진동수를 완전히 회피하거나 다른 고유 진동수와 일치할 것이기 때문에 공진에 의한 진동은 사라지거나 주파수가 변한다. 따라서 회전 주파수의 5th 조화 진동의 원인은 모터의 속도 변화에 따른 진동 스펙트럼 측정 등을 통하여 실험적으로 찾을 수 있다. Fig. 5 는 속도 변화에 따른 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 진동 스펙트럼이다.

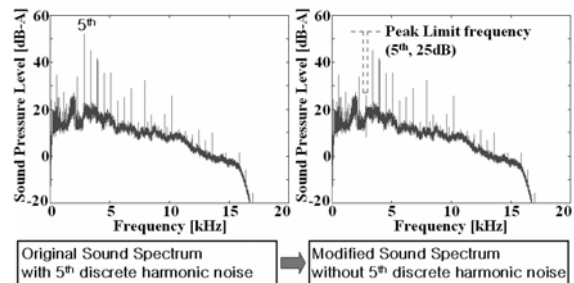


Fig. 4 Sound quality method of polygon mirror scanner motor

Table 1 Overall sound pressure level due to eliminated harmonic

Eliminated harmonic	No	1st 0.56kHz	5 th 2.83kHz	6 th 3.4kHz
Overall [dB-A]	56.2	56.2	54.1	55.9

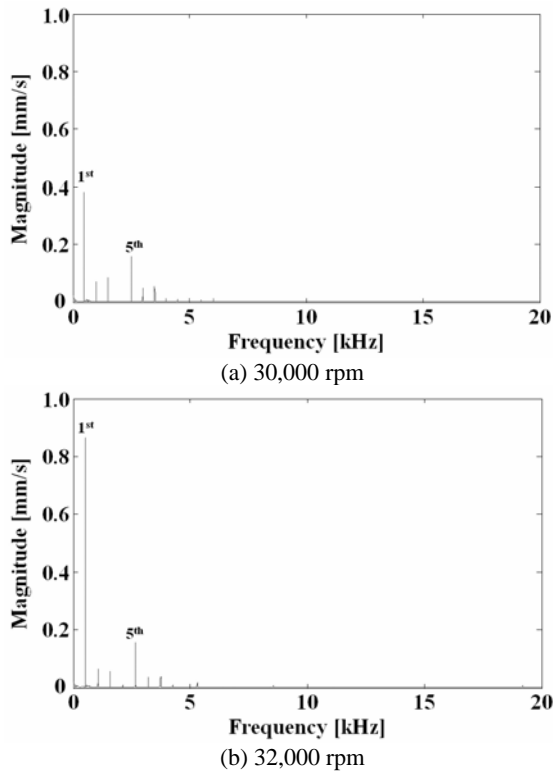


Fig. 5 Vibration spectrum due to speed variation

회전 속도가 30,000rpm과 32,000rpm으로 변해도 모터의 진동은 회전 속도에 상관없이 1st 조화 성분을 제외하고는 항상 5th 조화 성분이 가장 크다. 그리고 가진 주파수가 변하면 진동 주파수도 동일하게 변하기 때문에 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 이상 소음을 야기하는 회전 주파수의 5th 조화 성분의 진동은 공진에 의하여 발생하는 진동이 아니라 가진 주파수에서 직접 발생하는 진동이다. 가진 주파수에서 직접 모터의 진동을 야기할 수 있는 가진원은 회전체의 불평형 질량과 베어링에서 발생하는 회전체와 정지부 사이의 기계적 접촉이 있다. 따라서 모터를 직접 가진하는 회전 주파수의 5th 조화 진동의 가진원을 규명하면 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터에서 발생하는 이상 소음의 소음원을 규명할 수 있다.

일반적으로 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 불평형 질량은 높은 회전 속도 때문에 전체 시스템의 진동 특성을 결정하는 지배적인 요인이다. 불평형 질량에 의한 가진은 회전 주파수의 1st 조화 성분이 가장 지배적이며, 항상 회전 속도에 비례하여 증가한다. Fig. 6은 속도 변화에 따른 진동 스펙트럼의 1st 조화 성분과 5th 조화 성분의 크기 변화이다. 진동 스펙트럼에서 1st 조화 성분의 크기는 회전 속도가 28,000rpm에서 36,000rpm

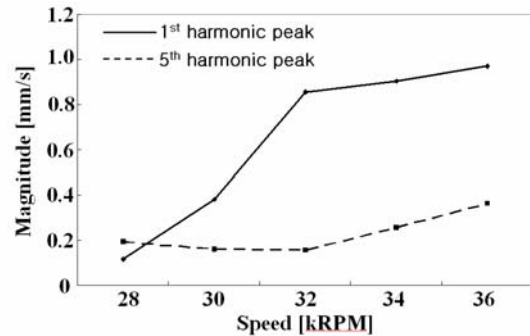


Fig. 6 Variation of 1st and 5th harmonic of vibration due to speed variation

으로 증가함에 따라 비례적으로 증가하지만 5th 조화 성분의 크기는 회전 속도 변화에 비례하지 않는다. 또한 28,000rpm에서는 1st 조화의 크기보다 5th 조화 성분이 크기 때문에 불평형 질량이 회전 주파수의 5th 조화 진동 성분을 야기하는 가진원은 아니다. 이와 같은 결론은 Fig. 3을 통해서도 확인할 수 있다. 진동 스펙트럼에서 1st 조화 성분이 5th 조화 성분을 포함한 모터의 다른 조화 성분보다 크기 때문에 불평형 질량이 전체 시스템의 진동 특성을 결정하는 지배적인 요인이다. 하지만 소음과 진동의 코히어런스 값은 회전 주파수의 1st 조화 성분보다 회전 주파수의 5th 조화 성분이 높기 때문에 모터를 직접 가진하는 5th 조화 진동의 가진원은 불평형 질량이 아니다. 따라서 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 이상 소음을 야기하는 가진원은 베어링에서 발생하는 회전체와 정지부 사이의 기계적 접촉일 가능성이 높다.

3.3 베어링의 기계적 접촉 측정

본 논문에서는 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터에서 발생하는 이상 소음의 가진원을 명확히 규명하기 위하여 베어링에서 발생하는 회전체와 정지부 사이의 기계적 접촉과 모터의 진동을 동시에 측정하고 분석할 수 있는 실험 장치를 Fig. 7과 같이 구축하였다. 구축한 실험 장치는 폴리곤 미러 스캐너 모터를 구동하기 위한 제어기와 진동을 측정하기 위한 가속도계, 베어링과 회전축 사이의 기계적 접촉을 측정할 수 있는 외부 회로로 구성되어 있다. 베어링과 회전축 사이의 기계적 접촉을 측정할 수 있는 외부 회로는 각각 회전체와 정지부에 연결되어 있어서 베어링과 회전축 사이에 기계적 접촉이 발생하지 않으면 전류가 경로 ①로 흘러 측정 전압은 0V가 되고, 접촉이 발생하면 전류가 ②로 흘러 측정 전압은 3V가 된다. 그리고 고속으로 회전하는 회전체와 외부 회로를 비접촉으로 연결하기 위하여 수은을 이용하였다.

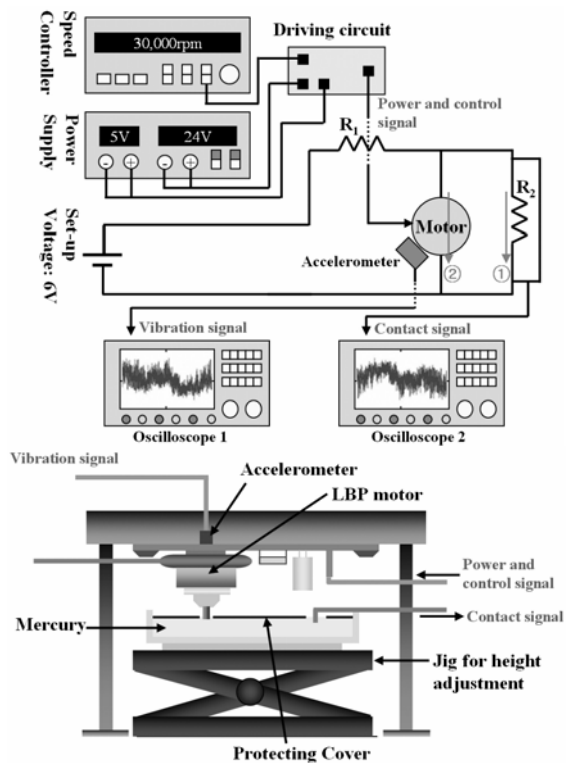


Fig. 7 Experimental setup to evaluate the contact of bearing and the vibration of motor

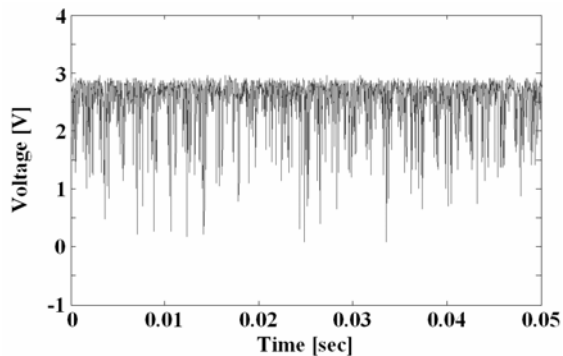
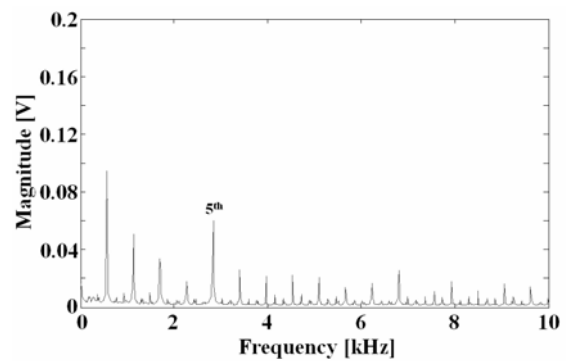
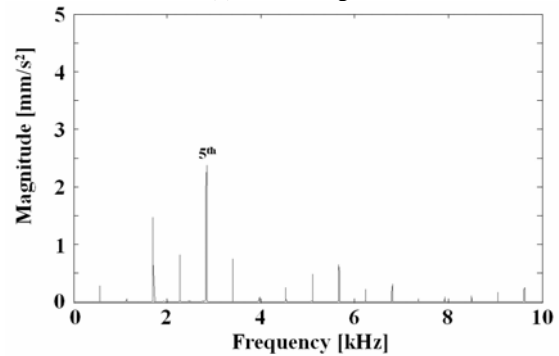


Fig. 8 Contact signal between bearing and shaft at 34,000 rpm

Fig. 8 은 모터를 34,000rpm으로 구동할 때 발생하는 접촉 신호이다. 접촉 신호는 3V를 기준으로 진폭이 0V 방향으로 하강과 상승을 계속적으로 반복하기 때문에 모터가 회전하는 동안 베어링과 회전축 사이에 기계적 접촉이 계속 발생한다는 것을 실험적으로 확인할 수 있다. Fig. 9 는 모터를 34,000 rpm으로 구동할 때 동시에 측정한 접촉 신호와 진동 신호의 주파수 분석 결과이다. 접촉 신호는 회전 주파수의 5th 조화 성분이 1st 조화 성분을 제외한 다른 주파수 성분 보다 크고, 동시에 측정한 진동 신호도 회전 전파수의 5th 조화 성분이 가장 크다. 접촉 신호의 5th 조화 성분은 모터 1 회전 당 회전축이 베어링을 5 회 가진다는 것을 의미하기 때문에 회전 주파수의 5th



(a) Contact signal



(b) Vibration signal

Fig. 9 Frequency spectrum of contact signal and vibration signal at 34,000rpm

조화 진동의 가진원은 베어링과 회전축 사이의 기계적 접촉이다.

베어링과 회전축 사이의 기계적 접촉이 5th 조화 성분을 갖는 원인을 파악하기 위해 Fig. 10 과 같이 베어링과 회전축의 진원도를 측정하였고 각 진원도의 주파수 분석 결과는 Fig. 11 와 같다. 베어링 진원도는 특정 조화 성분이 두드러지지 않지만, 회전축의 진원도는 5th 조화 성분이 다른 조화 성분 보다 지배적이다. 결국 베어링과 회전축 사이의 기계적 접촉에 조화 성분을 발생시키는 원인은 베어링과 회전축의 형상 변형이다.

회전축의 진원도에 5th 조화 성분이 존재하면 진동에 5th 조화 성분이 항상 존재하는 것과 같이 형상 변형이 존재하는 베어링과 회전축 사이의 기계적 접촉은 항상 존재하는 가진원이며 모터의 회전 속도가 변하면 가진 주파수 자체도 회전 주파수에 동기화되어 변한다. 그리고 만약 가진 주파수가 2~5kHz 사이의 주파수 영역에 존재하면 베어링과 회전축 사이의 기계적 접촉에 의한 모터의 진동은 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 이상 소음을 발생시키는 가진원이 된다. 따라서, 베어링과 회전축의 형상과 무관하게 베어링과 회전축 사이에 기계적 접촉이 발생하지 않도록 축계를 강인하게 설계하는 것이 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 이상 소음 저감을 위한 가장 효과적인 방법

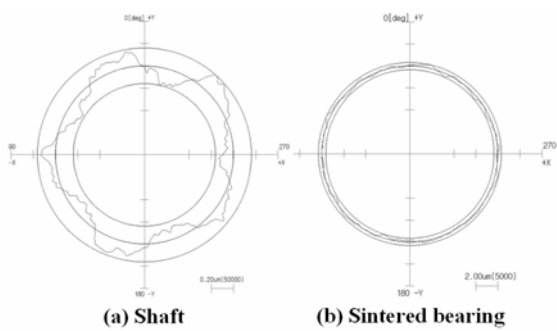


Fig. 10 Roundness of shaft and sintered bearing

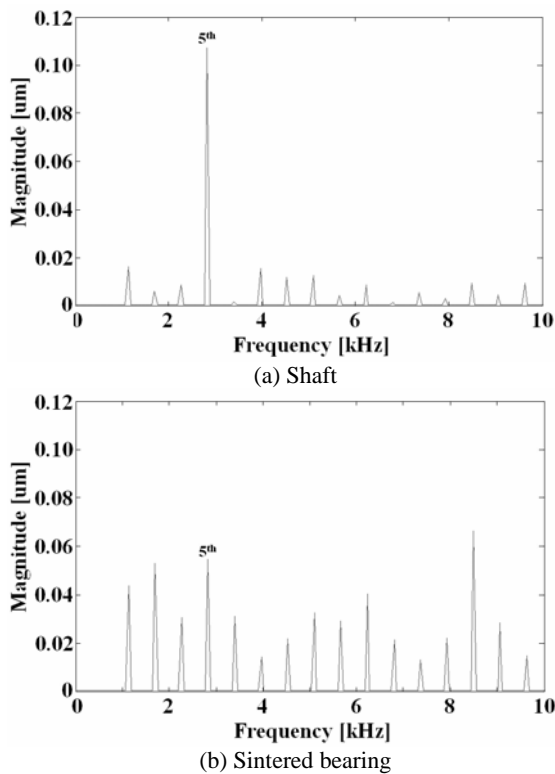


Fig. 11 Frequency spectrum of roundness of shaft and sintered bearing

이다.

4. 결 론

본 논문은 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 소음 특성과 진동 특성의 상관 관계를 분석하였다. 그리고 이를 기반으로 베어링과 회전축 사이의 기계적 접촉이 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 이상 소음원으로 작용하는 것을 규명하였다. 또한 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 기계적 접촉과 진동의 상관 관계를 평가할 수 있는 실험 장치를 개발하여 베어링과 회전축 사이의 기계적 접촉과 그로 인한 진동과 이상 소음이 베어링과 회전축의

형상과 직접적 영향이 있음을 실험적으로 규명했다. 따라서 베어링과 회전축의 형상과 무관하게 베어링과 회전축 사이에 기계적 접촉이 발생하지 않도록 축계를 강인하게 설계하는 것이 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터의 이상 소음 저감을 위한 가장 효과적인 방법이다.

그리고 본 논문과 같은 실험적 방법은 고속 폴리곤 미러 스캐너 모터에서 발생하는 이상 소음원을 규명하고 제거하여 전체 소음을 저감하는데 효과적으로 응용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) Jung, K. M., Seo, C. H., Kim, M. G. and Jang, G. H., 2007, " Finite Element Analysis of Unbalance Response of a High Speed Flexible Polygon Mirror Scanner Motor Considering the Flexibility of Supporting Structure" , Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 24-061~24-067.
- (2) Kawamoto, H., 2001, " Contact Characteristics of a Laser Scanner Motor in a Laser Printer in the Low Speed Region" , Journal of Imaging Science and Technology, vol.45, pp.489-494.
- (3) Lee, Y. Z., Jeong, S. H. and Jeong, K. S., 2000, " Frictional and Electrical Characteristics of Grooved Fluid Film Bearing for High-Speed Laser Scanner Motor" , Journal of Tribology, vol.122, pp.557~564.
- (4) Jeon, J. Y., You, J. and Kim, S. Y., 2006, " Evaluation of Sound Quality of Air-conditioning Noise" , Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol.16, No.5, pp.551~558.