

# 충격에 강인한 폴리곤 미러 스캐너 모터의 판 스프링 설계

## Robust Design of Leaf Spring of a Polygon Mirror Scanner Motor Against Shock

이 상 옥\* · 김 명 규\* · 정 경 문\* · 장 건 희†  
Sangwook Lee, Myunggyu Kim, Kyungmoon Jung and Gunhee Jang

Key Words: Finite Element Method(유한 요소법), Leaf spring(판 스프링), Mode superposition method(모드 중첩법), Polygon mirror scanner motor(폴리곤 미러 스캐너 모터), Shock analysis(충격 해석), Unbalance mass(불평형 질량)

### ABSTRACT

This paper develops a finite element model of a polygon mirror scanner motor supported by the sintered bearing and flexible supporting structures to analyze the shock response by using the finite element method and the mode superposition method. The validity of the proposed model is verified by comparing the simulated natural frequencies and shock response with the experimental ones. It investigates the displacement and the stress of the most vulnerable component, i.e. a leaf spring due to shock, and it proposes a robust design of leaf spring of a polygon mirror scanner motor against shock.

### 1. 서론

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 스피들 모터로서 폴리곤 미러에 주사된 레이저 빔을 지정된 위치로 편향 시키는 역할을 한다. 폴리곤 미러 스캐너 모터의 회전 속도는 인쇄물을 고속으로 출력하기 위하여 최근 50,000rpm 이상까지 증가했으며 그 속도는 더욱 증가하고 있는 추세이다. 그리고 폴리곤 미러 스캐너 모터는 프린터의 인쇄 품질을 향상시키기 위해 저진동 특성이 요구될 뿐만 아니라 최근에는 사용자의 쾌적한 사용 환경을 위해 저소음 특성이 지속적으로 요구된다. 일반적으로 폴리곤 미러 스캐너 모터는 진동을 저감하기 위하여 밸런싱(balancing)을 통해 회전체의 불평형 질량을 최소화 한다. 하지만 폴리곤 미러와 회전체는 판 스프링(Leaf spring)을 통하여 고정되어 있기 때문에 실제 운반 또는 조립 시에 발생할 수 있는 외부 충격으로 인하여 밸런싱이 쉽게 틀어져 불평형 질량이 변할 수 있는 구조적 한계가 있다. 따라서 폴리곤 미러 스캐너 모터는 외부 충격에 영구 변형을 최소화 할 수 있는 구조적인 설계가 필요하다.

현재까지 많은 연구자들이 폴리곤 미러 스캐너 모터를 포함한 회전체의 진동 특성에 관한 연구를 수

행했다. Kawamoto<sup>(1)</sup> 등은 공기 베어링으로 지지되는 폴리곤 미러 스캐너 모터의 불평형 질량을 포함한 회전체와 지지구조를 강제로 가정하여 회전체의 운동 방정식을 수학적으로 전개 하였다. 또한 Kawamoto<sup>(2)</sup> 등은 폴리곤 미러 스캐너 모터의 저속 영역에서 불평형 질량으로 인한 진동 때문에 발생하는 회전체와 지지부 사이의 접촉에 대한 연구를 실험적으로 수행했다. Lee<sup>(3)</sup> 등은 폴리곤 미러 스캐너 모터의 불평형 질량 변화에 따른 그루브 베어링과 회전축 사이의 접촉에 대한 연구를 실험적으로 수행했다. Jung<sup>(4)</sup> 등은 유연한 지지구조를 포함하고 소결 베어링으로 지지되는 고속 회전 유연 폴리곤 미러 스캐너 모터의 유한 요소 모델을 개발하여 불평형 질량이 모터의 진동에 미치는 영향에 대한 연구를 해석적으로 수행했다. 그러나 이들의 연구들은 단지 불평형 질량이 폴리곤 미러 스캐너 모터의 진동에 미치는 영향에만 국한되어 있고, 외부 충격 등으로 인하여 발생할 수 있는 불평형 질량을 최소화 하기 위한 설계를 제안하지는 않았다.

본 논문은 유한 요소법과 모드 중첩법을 이용하여 유연한 지지 구조를 포함하고 소결 베어링으로 지지되는 폴리곤 미러 스캐너 모터의 유한 요소 모델을 개발하였다. 개발된 유한 요소 모델을 이용하여 고 유 진동 해석과 충격 해석을 수행하고 실험을 통하여 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 또한 본 논문은 외부 충격 시 폴리곤 미러 스캐너 모터에 사용하는 판 스프링의 취약부를 분석하고 설계 변수 변경을 통해 외부 충격 시 폴리곤 미러 스캐너 모터의 불평형 질량 변화를 최소화 할 수 있는 방안을 해석적인 방법을 통하여 제시하였다.

† 한양대학교 기계공학과

E-mail : ghjang@hanyang.ac.kr

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

\* 한양대학교 대학원 기계공학과

## 2. 폴리곤 미러 스캐너 모터 시스템의

### 유한 요소 해석 모델

본 연구의 해석 대상인 폴리곤 미러 스캐너 모터의 구동속도는 20,000~45,000rpm 이며 불평형 질량은 4.0mg·cm 이하로 밸런싱 된다. Fig. 1 은 폴리곤 미러 스캐너 모터 시스템의 기계적인 구조이다. 폴리곤 미러는 허브에 판 스프링으로 고정되어 고속 회전하게 되며 회전하는 폴리곤 미러 스캐너 모터 시스템은 소결베어링과 하우징, 슬리브, 스테이터, 콘덴서, PCB 플레이트로 구성되는 지지구조에 의해 지지된다.

본 연구에서는 폴리곤 미러 스캐너 모터의 동특성을 해석하기 위하여 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 유한 요소 모델을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 유한 요소 모델은 지지구조인 하우징, 슬리브, 스테이터, 콘덴서, PCB 플레이트의 유연성을 고려하였고, 정확한 충격 해석을 위하여 폴리곤 미러와 판 스프링 사이에 스프링 강성을 부여하였다. 판 스프링, 케이스 로터, PCB플레이트는 6 자유도 4 절점 쉘(Shell)요소로 분할하였다. 그리고 하우징, 슬리브, 스테이터, 콘덴서, 영구자석(PM), 허브, 폴리곤 미러, 축(Shaft)은 6 자유도 4 절점 사면체 요소로 분할하였으며, 회전부와 정지부의 기하학적 적합성(Geometric compatibility)을 유지하였다<sup>(5)</sup>. 그리고 소결 베어링은 기공 내에 있던 유체가 완전히 유출된다는 가정하에 본 연구실에서 개발한 유체 동압 베어링 해석 프로그램인 HYBAP (Hydrodynamic bearing analysis program)을 사용하여 5 자유도 강성 및 감쇠 계수로 모델링 하였다<sup>(6)</sup>.

Fig. 2는 해석 대상인 폴리곤 미러 스캐너 모터의 판 스프링이다. 판 스프링은 폴리곤 미러와 허브 사이에서 스프링 암의 변위  $h$ 에 상응하는 반발력  $F$ 로 폴리곤 미러와 허브를 고정한다. 이때 스프링 암의 상부는 허브와 접촉하고 스프링 암의 하부는 폴리곤 미러와 접촉한다. 본 연구에서는 스프링 암의 변위  $h$ 에 상응하는 반발력  $F$ 를 실측하여 판 스프링의 강성을 계산하였다. Fig. 3은 폴리곤 미러와 허브 사이에 존재하는 판 스프링에 스프링 강성을 부여한 유

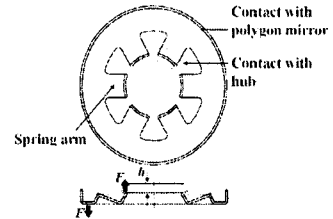


Fig. 2 The leaf spring of polygon mirror scanner motor

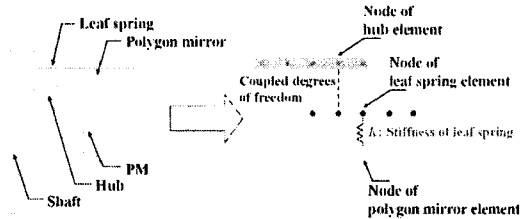


Fig. 3 Finite element model between leaf spring and mirror using stiffness coefficient

한 요소 모델이다. 우선 판 스프링을 모델링 후, 스프링 암의 하부에 해당하는 요소의 절점과 그에 대응하는 폴리곤 미러 요소의 절점은 스프링 강성을 부여하여 연결하였다. 그리고 스프링 암의 상부에 해당하는 요소의 절점과 그에 대응하는 허브의 절점은 자유도를 공유하여 연결하였다. 따라서, 본 논문은 폴리곤 미러와 허브 사이에 존재하는 판 스프링의 형상과 스프링 강성을 동시에 고려함으로써 폴리

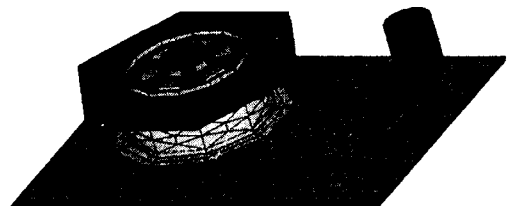


Fig. 4 Finite element model of a polygon mirror scanner motor

Table 1 Element number and element type of each component of a polygon mirror scanner motor

Component	Element number	Element type
Rotating part	Clamp	45
	Case-rotor	73
	PM	587
	Hub	2013
	Polygon mirror	854
Stationary part	Shaft	1829
	PCB plate	662
	Sleeve	1299
	Stator	1574
	Housing	2488
	Condenser	991

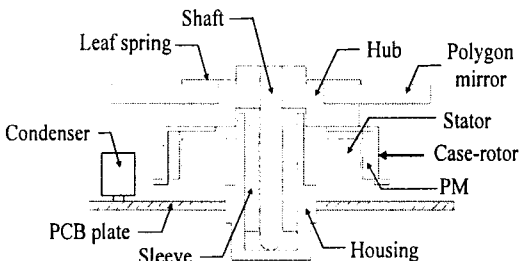


Fig. 1 Mechanical structure of a polygon mirror scanner motor

곤 미러 스캐너 모터 자체에 외부 충격이 가해질 때 판 스프링에서 발생할 수 있는 응력과 변위를 동시에 해석할 수 있도록 유한 요소 모델을 개발했다.

위에서 설명한 유한 요소 해석방법을 사용하여 판 스프링의 유연성을 고려한 폴리곤 미러 스캐너 모터 전체 시스템을 Fig. 4 에서와 같이 모델링하고, 상용 해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 고유진동 해석과 충격 해석을 수행하였다. 경계조건은 폴리곤 미러 스캐너 모터의 나사체결부에 해당하는 노드의 병진 변위와 회전변위의 자유도를 구속하였다. Table 1 은 전체 시스템에 사용된 요소의 수와 형태를 나타내며 전체 요소수는 12,405 개이다.

### 3. 폴리곤 미러 스캐너 모터의 동특성 해석

#### 3.1 고유 진동 해석 및 실험

해석결과와 타당성을 검증하기 위해 모달 실험 (Modal testing)을 수행하였으며, 실험방법은 폴리곤 미러 스캐너 모터의 나사체결부를 나사로 지그에 고정된 상태에서 충격 해머를 사용하여 실험 모델을 가진하였다. 그리고 레이저 변위 센서(laser doppler vibrometer, LDV)를 사용하여 가진 시 응답을 측정하였다.

Table 2 는 정지 시 폴리곤 미러 스캐너 모터의 고유진동수 해석결과와 실험결과를 0~3,200Hz 의 영역에서 비교한 것으로 제안된 해석 방법이 실험모델의 고유진동수를 잘 예측함을 알 수 있다. Table 3 은 정지 시 폴리곤 미러 스캐너 모터의 고유진동모드 해석결과를 나타낸다. 정지 시 폴리곤 미러 스캐너 모터의 고유진동모드는 지지구조의 운동이 지배적인 모드, 폴리곤 미러의 운동이 지배적인 모드, 폴리곤 미러의 운동과 지지구조의 운동 모두 지배적인 모드로 분류 할 수 있다.

지지구조의 운동이 지배적인 모드는 진동모드 1, 4, 7, 8, 9 로 얇은 PCB 플레이트의 유연성 때문에 지지구조의 탄성변형이 크게 일어남을 알 수 있다. 진동모드 1 은 PCB 플레이트가 굽힘 운동(Bending motion)을 함에 따라 폴리곤 미러가 축방향으로 운동하면서 동시에 rocking 운동을 하는 모드이다. 폴리곤 미러의 운동이 지배적인 모드는 진동모드 2, 3 이며 폴리곤 미러는 rocking 운동을 하며 지지구조의 탄성변형은 폴리곤 미러의 운동에 비해 비교적 작다. 폴리곤 미러의 운동과 지지구조의 운동 모두 지배적인 모드는 5, 6 이며 폴리곤 미러의 운동, 지지구조의 탄성변형운동 모두 크다.

#### 3.2 충격 해석 및 실험

본 논문에서는 폴리곤 미러 스캐너 모터 자체에 가해지는 충격을 수학적으로 묘사하기 위하여 3.1 절에서 해석된 저차 20 개의 고유진동수와 고유벡터를

**Table 2 Comparison between the numerical and the experimental damped natural frequencies ( $f_d$ ) for a polygon mirror scanner motor at 0 rpm**

Mode number	Simulation	Experiment	Error [%]
	$f_d$ [Hz]	$f_d$ [Hz]	
Mode 1	602	576	4.51
Mode 2	795	791	0.51
Mode 3	845	855	-1.16
Mode 4	1437	1477	-2.71
Mode 5	1689	1660	1.75
Mode 6	1906	1840	3.59
Mode 7	2409	2427	-0.74
Mode 8	2637	2617	0.76
Mode 9	2722	2710	0.44

**Table 3 Vibration modes of a polygon mirror scanner motor at 0 rpm**

Mode number	Mode shape	
	PCB plate	Polygon mirror
Mode 1	Bending	Rocking along Y axis (+)
Mode 2	X axis (1,0)	Rocking along X axis (+)
Mode 3	Y axis (1,0)	Rocking along Y axis (+)
Mode 4	X axis (1,0)	Rocking along X axis (-)
Mode 5	X axis (1,0)	Rocking along X axis (-)
Mode 6	Y axis (1,0)	Rocking along Y axis (-)
Mode 7	X axis (1,0)	No motion
Mode 8	(2,0)	No motion
Mode 9	(2,0)	No motion

The phase of the polygon mirror is explained with respect to the motion of the PCB plate.

In-phase and out-of-phase motion are denoted as + and - respectively.

The major and the minor axes of the PCB plate are denoted as X axis and Y axis.

The Difference between mode 4 and mode 5 is due to the phase of the condenser.

사용하여 모드중첩법을 통해 충격 응답 해석을 수행하였다.

Fig 5 는 충격 해석 시 응답점, 가진점 그리고 가진력을 나타낸다. 폴리곤 미러 스캐너 모터에 가해지는 충격은 half-sine 파형의 가진력이 지그를 통하여 폴리곤 미러 스캐너 모터를 가진 한다고 가정되었다. 그리고 지그는 폴리곤 미러 스캐너 모터에 비해 강성이 매우 크기 때문에 강체인 사면체 요소로 모델링되며, 폴리곤 미러 스캐너 모터의 나사체결부와 기하학적 구속조건으로 연결된다. 해석 응답점은 회전부에서 취약부인 판 스프링 압의 노드이며, 가진점은 지그의 한 노드이다. 그리고 실험 결과와 비교하기 위하여 실험에서 측정된 가진력은 가속도의 최대 크기가 44 m/s<sup>2</sup>이며, 지속시간이 2 ms인 half-sine 파형의 충격력을 지그의 노드에 축방향으로 가하였다.

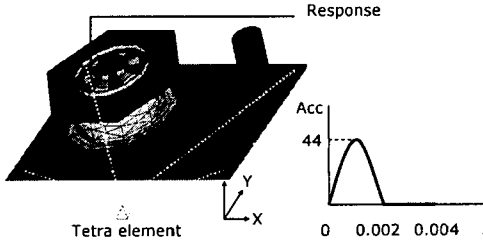


Fig. 5 Finite element model for shock analysis and applied shock

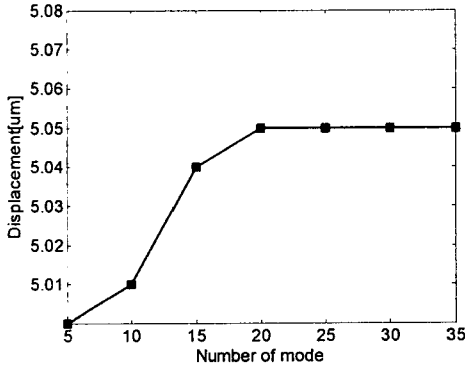


Fig. 6 Axial displacement of leaf spring due to the increase of the superposed modes

저차 20 개 모드 중첩으로 계산된 수치해의 중첩 모드수에 따른 수렴성을 검증하기 위하여, 중첩모드수에 따른 충격 응답 해석을 수행하였다. Fig. 6 은 중첩모드수에 따른 판 스프링 노드의 축방향 변위 해석 결과를 나타내며, 저차 20 개의 모드중첩은 타당함을 잘 보여준다.

본 연구에서는 충격 응답 해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 가진기를 이용한 충격실험을 수행하여 해석결과와 실험결과를 비교하였다. Fig. 7 은 충격 실험 장치도와 응답점을 나타낸다. 실험방법은 폴리곤 미러 스캐너 모터가 고정된 지그는 가진기를 통하여 해석과 동일한 축방향 가진력으로 가진되며 가진력은 지그 위에 부착된 가속도계에 의해 측정된다. 그리고 해석 응답점에 해당하는 판 스프링의 축방향 변위는 레이저 변위 센서를 통해 측정된다.

Fig. 8 과 Fig. 9 는 각각 충격 시 판 스프링의 축

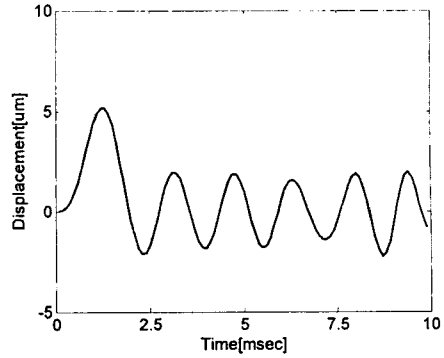


Fig. 8 Simulated displacement of the leaf spring of polygon scanner motor

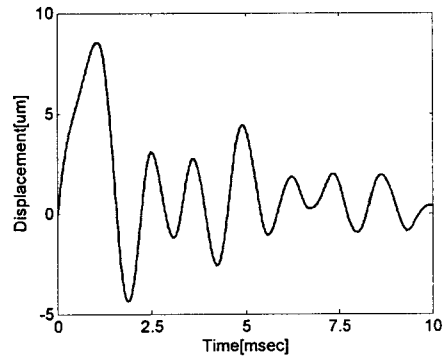


Fig. 9 Measured displacement of the leaf spring of polygon scanner motor

방향 변위의 해석 결과와 실험 결과를 나타낸다. Fig. 8 과 Fig. 9 를 비교해 보면, 해석 변위와 실험 변위의 크기와 파형이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 해석결과와 실험 결과 사이에 차이가 발생하는 요인은 해석 모델이 실험 모델에 비해 약한 감쇠 효과를 갖기 때문으로 사료된다. 실제 실험 모델에 존재하는 구조적 감쇠 등의 부가적인 감쇠 메커니즘을 해석 모델에 적용하지 않았기 때문에 해석 모델은 실험 모델에 비해 약한 감쇠 효과를 갖게 되며, 이로 인하여 실험 모델의 충격에 의한 변위도 해석 모델에 비해 빠르게 감쇠하게 된다.

#### 4. 충격에 강인한 폴리곤 미러 스캐너 모터 판스프링 설계 방안

폴리곤 미러 스캐너 모터의 불평형 질량은 인쇄 품질 저하와 진동·소음 증가에 직접적인 영향을 가져오기 때문에 본 논문에서는 우선 폴리곤 미러 스캐너 모터에 외부 충격이 존재할 때 불평형 질량의 증가를 야기하는 주요 부품인 판 스프링의 충격 시 응력 해석을 통하여 취약부를 분석했다. 응력 해석에는 다음과 같은 최대 응력 강도(stress intensity)를 사용했다.

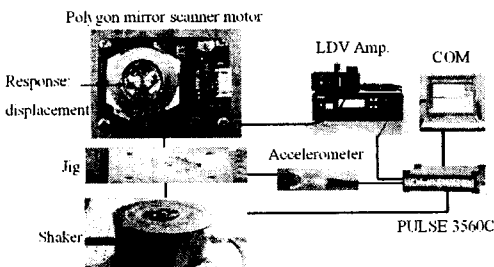


Fig. 7 Experimental setup for shock testing, and the measured point of the response

$$\sigma_1 = \text{MAX}(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) \quad (1)$$

여기서  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  은 주응력(principal stresses)을 나타낸다.

Fig. 10 은 본 논문의 해석 대상인 폴리곤 미러 스캐너 모터의 판 스프링 구조이고, Fig. 11 은 3.2 절의 해석과 동일한 외부 충격이 존재할 때 최대 응력 강도가 발생하는 시간에서의 응력 집중 부위를 나타낸

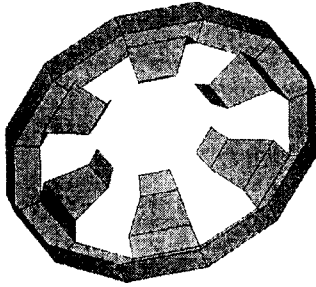


Fig. 10 The original leaf spring

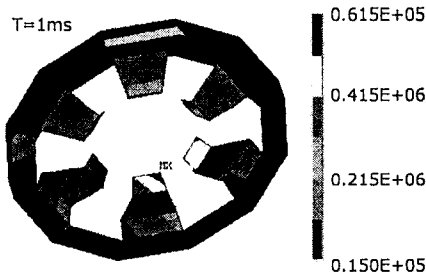


Fig. 11 Stress distribution of the original leaf spring

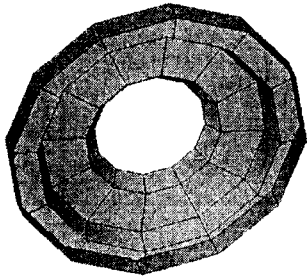


Fig. 12 The proposed leaf spring

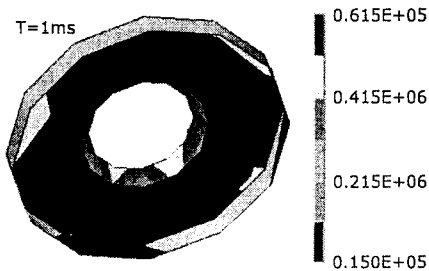


Fig. 13 Stress distribution of the proposed leaf spring

Table 4 Results of the stress intensity for a rotating part

	Stress intensity of original model[N/m <sup>2</sup> ]	Stress intensity of proposed model[N/m <sup>2</sup> ]	Difference [%]
leaf spring	0.604E+06	0.539E+06	10.8
Polygon mirror	0.222E+06	0.174E+06	21.6
Hub	0.105E+07	0.868E+06	17.3

다. 최대 응력이 집중되는 부위는 판 스프링과 허브가 결합되는 압의 상부이고, 최대 응력이 집중되는 원인은 외부 충격으로 판 스프링에 변위가 발생할 때 압의 상부에서 단면적이 최소가 되기 때문이다. 판 스프링의 응력 집중부는 충격 시 영구 변형이 발생할 수도 있기 때문에 폴리곤 미러 스캐너 모터의 불평형 질량을 야기할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 외부 충격 시 판 스프링에서 발생할 수 있는 응력 집중을 최소화 하기 위하여 판 스프링의 구조를 변경하였다. 즉 응력이 집중되는 부위의 단면적을 증가시키기 위하여 판 스프링의 압을 제거하고 전체 영역이 폴리곤 미러와 허브를 동시에 지지하도록 Fig. 12 와 같이 설계를 변경한 후 충격 해석을 수행하였다. Fig. 13 은 기존 모델과 동일한 외부 충격이 존재할 때 최대 응력 강도가 발생하는 시간에서의 응력 집중 부위를 나타낸다. 판 스프링의 설계 변경 후 동일한 충격 시 폴리곤 미러 스캐너 모터의 판 스프링에서 발생하는 최대 응력은 0.604 MN/m<sup>2</sup>에서 0.539 MN/m<sup>2</sup>으로 10% 정도 감소하였다. Table 4 는 동일한 충격 시 판 스프링의 설계 변경 전·후 발생하는 판 스프링과 판 스프링으

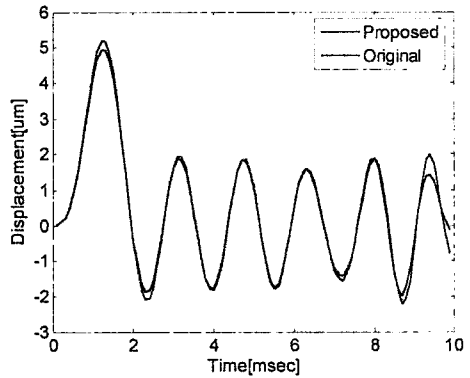


Fig. 14 Comparison of the displacement between the original and the proposed leaf spring

Table 5 Comparison of displacement between the origin and the proposed leaf spring

	Original model	Proposed model	Difference [%]
Positive max. displacement [um]	5.17	4.93	4.64
Negative max. displacement [um]	-2.24	-1.97	12.1

로 결합되는 폴리곤 미러와 허브의 최대 응력으로 설계 변경 후 판 스프링 뿐만 아니라 폴리곤 미러와 허브의 최대 응력도 각각 21%와 17% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 14 와 Table 5 는 폴리곤 미러 스캐너 모터에 동일한 충격이 존재할 때 기존 판 스프링과 설계 변경한 판 스프링에서 발생하는 양의 변위와 음의 변위의 최대값을 나타낸다. 설계 변경 시 기존 판 스프링 보다 충격 시 발생하는 양의 변위와 음의 변위의 최대값은 각각 4%와 12% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있다.

따라서 본 논문에서 제안한 판 스프링의 설계 변경이 외부 충격 시 발생하는 판 스프링의 최대 응력과 변위를 저감시켜 폴리곤 미러 스캐너 모터의 불평형 질량 변화를 최소화할 수 있는 효과적인 설계임을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문은 유한 요소법과 모드 중첩법을 이용하여 유연한 지지 구조를 포함하고 소결 베어링으로 지지되는 폴리곤 미러 스캐너 모터의 유한 요소 모델을 개발하였다. 개발된 유한 요소 모델을 이용하여 고유 진동 해석과 충격 해석을 수행하고 실험을 통하여 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 또한 본 논문은 외부 충격 시 폴리곤 미러 스캐너 모터의 불평형 질량 변화를 최소화할 수 있는 판 스프링의 설계안을 제안하였다. 본 연구 결과는 폴리곤 미러 스캐너 모터에 가진되는 다양한 가진력에 대해 충격시 거동 해석이 가능하며, 충격에 강인한 폴리곤 미러 스캐너 모터의 설계에 활용 될 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌.

- (1) Kawamoto, H., 1997, "Rotor Dynamics of Polygonal Mirror Scanner Motor Supported by Air Bearings in Digital Electrophotography", *Journal of Imaging Science and Technology*, vol.41, pp.565-569.
- (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) 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.

- (5) Jang, G. H., Han, J. H. and Seo, C. H., 2005, "Finite Element Modal Analysis of a Spinning Flexible Disk-Spindle System in a HDD Considering the Flexibility of Complicated Supporting Structure", *Microsystem Technologies*, vol.11, no.7, pp.488-498.

- (6) Jang, G. H., Jung, K.M., Seo, C. H. and Kim, M.G., 2007, "Finite element analysis of unbalance response of high-speed polygon mirror scanner motor considering the flexibility", *ASME/ISPS conference*.