

## 레이저빔프린터용 폴리곤 미러 스캐너 모터의 특성개선

유용민  
호남대학교

### Performance Improvement of a Polygon Mirror Scanner Motor for Laser Beam Printer

Yong-min You  
Honam University

**Abstract** - Electric machines for office automation device such as printer and scanner have been required the low noise and vibration performance. Many researches about the low noise and vibration of polygon mirror scanner motor have been also progressed. The noise and vibration of polygon mirror scanner motor can be classified by aerodynamic, structural and electromagnetic. Electromagnetic noise and vibration can be occurred by high cogging torque and nonsinusoidal back EMF. To improve the cogging torque and back EMF characteristic, we apply unequal air-gap. To analyse characteristic of a polygon mirror scanner motor, two dimensional finite element method is used. To minimize the cogging torque of a polygon mirror motor, Kriging based on latin hypercube sampling (LHS) is utilized. As a result, the cogging torque and torque ripple improved while maintaining the back EMF and average torque.

#### 1. 서 론

레이저 빔 프린터의 핵심 부품인 폴리곤 미러 스캐너 모터 (Polygon mirror scanner motor)는 전기력이나 자기력을 가해 다각 거울에 주사된 레이저 빔을 지정된 위치로 변화시키는 역할을 하는 고속 회전용 구동 모터이다. 인쇄물의 고속 출력을 위해 폴리곤 미러 스캐너 모터의 회전 속도는 3만 rpm 이상까지 증가했으며, 그 속도는 더욱 증가하고 있다. 한편 프린터나 스캐너 등의 OA기기용 모터는 사무실이나 가정에서 사용되므로, 저소음·저진동 특성이 지속적으로 요구되고 있다. 따라서 폴리곤 미러 스캐너 모터 역시 저소음·저진동 구현을 위한 많은 연구들이 진행되고 있다[1]-[2].

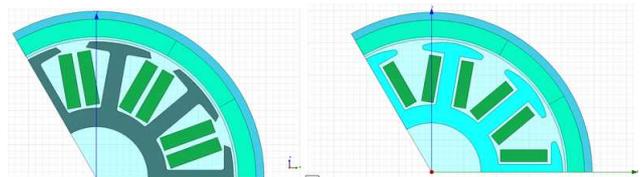
일반적으로 폴리곤 미러 스캐너 모터에서 발생하는 소음·진동은 공력 소음·진동, 구조 소음·진동 및 전자기 소음·진동으로 분류된다. 공력 소음·진동은 저주파 영역에서 넓은 대역의 소음이며, 고속으로 회전하는 폴리곤 모터 주위의 공기 흐름에 의해 발생한다[1]. 구조 소음·진동은 주로 2~5 kHz 사이에서 발생하는 고주파 소음·진동이며, 대부분 베어링과 회전축의 기계적 마찰이나 공간에 의해 발생한다. 따라서 구조 소음·진동을 줄이기 위해서는 베어링과 회전축 사이에 기계적 마찰을 줄이기 위해 축계를 견고히 설계해야 한다. 전자기 소음·진동은 영구자석과 스위칭 전류와의 상호작용에 의해 발생하는 전자기 힘에 의해 발생한다. 전자기 소음·진동의 주요 원인은 높은 코깅토크와 비정현적인 역기전력 및 전류로 인한 토크 맥동이다. 코깅토크를 저감하기 위한 방법에는 공극의 길이 증가, 슬롯 오픈의 감소, 슬롯이나 극 수 증가, 회전자나 고정자 치에 Notch 적용, 회전자나 고정자에 Skew를 적용하는 방법들이 연구되어지고 있다[3]-[4].

본 논문에서는 코깅토크 저감 뿐만 아니라 정현적인 역기전력을 구현하고자 폴리곤 미러 스캐너 모터에 Unequal air-gap의 형상을 적용하였다. 또한 모터의 정현적인 역기전력 및 평균토크 특성을 유지하면서 코깅토크를 최소화하기 위해 Kriging 모델을 이용한 형상최적설계를 수행하였다.

#### 2. Unequal air-gap모델의 특성해석

##### 2.1 해석 모델의 구조 및 사양

코깅토크 개선을 위한 다양한 연구들이 진행되어 왔으나, 대부분의 연구가 코깅토크의 특성만을 개선하는데 국한되어 왔다. 본 연구에서는 폴리곤 미러 스캐너모터의 코깅토크의 저감뿐만 아니라 정현적인 역기전력 구현하기 위해 그림 1 (b)와 같은 Unequal air-gap의 형상을 적용하였다. Unequal air-gap 적용 시 코깅토크의 저감은 가능하지만, Trade-off 관계에 있는 정격토크는 저하되게 된다. 따라서 정격토크의 보상을 위해 턴수를 증가시켰으며, 권선저항을 기본 모델과 동일하게 유지하기 위해 선경은 증가시켰다. 기본 모델과 Unequal air-gap 모델의 사양 비교는 표 1과 같다.



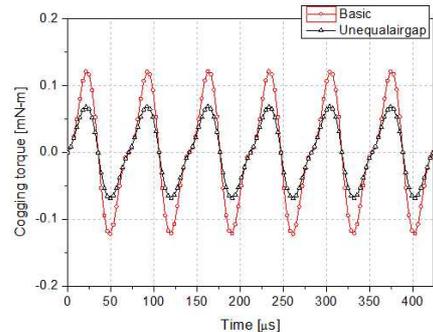
(a) 기본 모델 (b) Unequal air-gap 모델  
〈그림 1〉 폴리곤 미러 스캐너모터의 구조

〈표 1〉 기본 모델과 Unequal air-gap 모델의 사양 비교

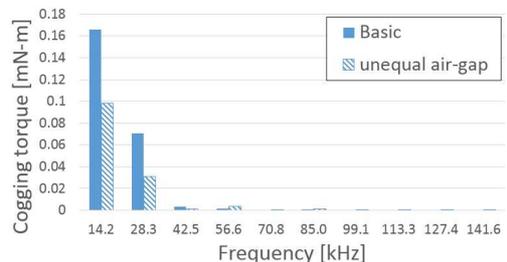
구분	단위	기본 모델	Unequal air-gap 모델
치 끝단형상	-	Round 없음	Round (R5.3)
치 두께	mm	0.7	0.9
권선 외경	mm	0.24	0.25
슬롯당 권선 턴수	turns	45	49
상간 권선저항	Ω	0.67	0.67
점적율	%	56.1	66.3

##### 2.2 특성해석

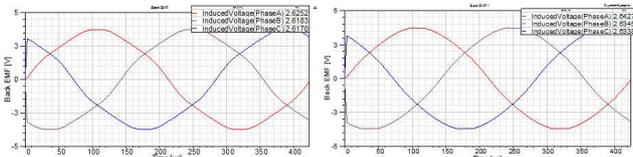
기본 모델과 Unequal air-gap 모델의 특성 비교를 위해 유한요소해석을 수행하였다. Unequal air-gap 모델의 코깅토크 해석결과는 그림 2와 같고, 코깅토크의 peak-to-peak 값은 기본 모델의 0.243 mN·m에서 0.138 mN·m으로 43.2 % 저감되었다. 그림 3은 코깅토크의 FFT 분석결과를 나타내고 있으며, 정격 운전 주파수인 14.2 kHz 대역에서 코깅토크는 기본 모델의 0.166 mN·m에서 0.098 mN·m로 41 % 감소함을 알 수 있다.



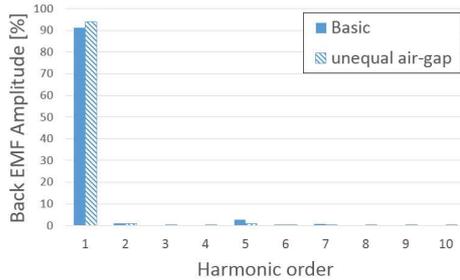
〈그림 2〉 코깅토크 특성 비교



〈그림 3〉 코깅토크의 주파수별 FFT 분석결과



(a) 기본 모델 (b) Unequal air-gap 모델  
 <그림 4> 역기전력 특성 비교



<그림 5> 역기전력의 FFT 분석결과

정격속도인 23,600 rpm에서 Unequal air-gap 모델의 역기전력 파형은 그림 4와 같이 기본모델 대비 정현적으로 변화하였으며, 실효치는 기본 모델의 2.625 Vrms 대비 동등 수준인 2.643 Vrms임을 알 수 있다. 그림 5는 역기전력의 FFT 분석결과를 나타내고 있으며, 기본 고조파 성분은 기본 모델의 91.2 %에서 93.9 %로 증가함을 알 수 있다. 또한 역기전력의 THD 분석 결과, 기본 모델의 3.401 %에서 1.681 %로 감소함으로써 역기전력 파형이 정현적으로 개선되었음을 알 수 있다.

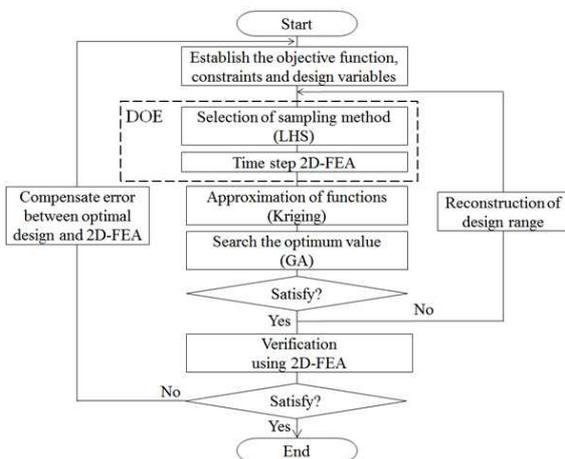
### 3. 코깅토크 최소화를 위한 최적설계

#### 3.1 최적설계 과정

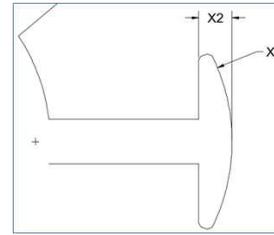
Unequal air-gap 모델의 역기전력 및 평균토크 특성을 유지시키면서, 코깅토크를 최소화하기 위한 최적설계를 그림 6과 같이 수행하였다. 우선 목적함수, 제약조건 및 설계변수를 설정하였으며, LHS에 의해 선정된 실험계획을 2차원 유한요소해석을 통해 수행하였다. 실험계획의 결과를 이용하여 Kriging 모델을 통해 모델 근사화를 수행하였으며, 유전알고리즘을 통해 최적화를 수행하였다. 최종적으로 최적설계의 타당성을 검증하기 위해 최적설계된 모델의 2차원 유한요소해석을 수행하였다.

#### 3.2 목적함수, 제약조건 및 설계변수 설정

최적설계를 위한 목적함수는 코깅토크를 최소화하는 것으로 설정하였으며, 제약조건은 Unequal air-gap 모델의 특성 값을 기준으로 하여 역기전력의 기본고조파 성분과 평균토크를 각각 93.93 %, 0.54 mN·m 이상으로 설정하였다. 최적설계를 위한 설계변수로서 목적함수와 제약조건에 영향을 미치는 치 끝단의 형상(X1)과 치 두께(X2)를 그림 7과 같이 선정하였다. 실험계획의 횟수는 설계변수의 수를 고려하여, 9회로 결정하였다.



<그림 6> 최적설계 순서도



<그림 7> 최적설계변수

<표 2> 최적설계 결과 비교 (23,600 rpm)

항목	단위	기본모델	Unequal air-gap 모델	최적모델	
설계 변수	X1	mm	5.3	5.17	
	X2	mm	0.7	0.9	
코깅 토크	mN·m	0.243	0.138	0.127	
평균 토크	mN·m	0.54	0.544	0.542	
토크 리플	%	48.0	26.5	24.6	
역기전력	실효치	Vrms	2.625	2.643	2.634
	기본 고조파	%	91.2	93.9	94.0
	THD	%	3.407	1.651	1.601

### 3.3 최적설계 결과

LHS기법과 유한요소해석에 의한 실험계획결과를 바탕으로 Kriging 모델을 이용하여 함수 근사화를 수행하였다. 유전알고리즘을 이용하여 최적화 수행결과, 반복횟수 200회동안 설계변수 및 목적함수가 잘 수렴함을 알 수 있었다.

Kriging 모델을 이용한 최적설계 결과는 표 2와 같다. Kriging을 이용한 최적 모델의 코깅토크와 토크리플은 Unequal air-gap 모델 대비 각각 8.0 %, 1.9 % 개선되었으며, 평균토크는 동등 수준으로 유지되었다. 또한 최적 모델의 역기전력의 실효치, 기본고조파 및 THD는 Unequal air-gap 모델 대비 동등 수준으로 유지되었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 폴리곤 미러 스캐너 모터의 코깅토크를 저감시키고, 비정현적인 역기전력 특성의 개선을 위해 Unequal air-gap을 적용하였으며, 정격토크의 보상을 위해 권선사양을 변경하였다. 기본 모델과 Unequal air-gap 모델의 특성해석을 위해 유한요소해석 기법을 사용하였다. 또한 코깅토크 최소화를 위해 Unequal air-gap 모델의 최적형상 설계를 수행하였다.

Unequal air-gap 적용 결과, 코깅토크와 토크리플은 각각 43.2 %, 44.8 % 저감되었으며, 역기전력의 기본 고조파 성분은 2.7 % 증가하였고 THD는 1.7 % 감소함으로써 역기전력 파형은 정현적으로 변화하였다. 또한 권선사양의 변경을 통해 역기전력, 정격 토크는 기본 모델 대비 동등한 수준으로 유지시켰다.

또한 최적설계 수행을 통해 Unequal air-gap 모델 대비 평균 토크 및 역기전력 특성은 유지하면서, 코깅토크와 토크리플을 각각 8.0 %, 1.9% 개선시켰다.

결론적으로 본 연구를 통해, 폴리곤 미러 스캐너 모터에 Unequal air-gap을 적용하고 최적설계를 수행함으로써, 모터의 전반적인 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

## [참 고 문 헌]

- [1] M. G. Kim et al., "Experimental identification of abnormal noise and vibration in a high-speed polygon mirror scanner motor due to mechanical contact of plain journal bearing", *Microsyst Technol.*, Springer, Vol. 16, pp. 3-8, 2010.
- [2] K. M. Jung et al., "Finite Element Analysis of Unbalance Response of High-speed Polygon Mirror Scanner Motor Considering the Flexibility of the Structure", *Microsyst Technol.*, Springer, Vol. 15, pp. 1629-1636, 2009.
- [3] Islam M. S., et al., "Experimental Verification of Design Techniques of Permanent-Magnet Synchronous Motors for Low-Torque-Ripple Applications", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 47, No. 1, pp. 88-95, Jan. 2011.
- [4] Un-Jae Seo, et al., "A Technique of Torque Ripple Reduction in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 47, No. 10, pp. 3240-3243, Oct. 2011.