

## A Study on Characteristic of Cogging Torque due to Assembly Tolerances of Magnet on Rotor and Evaluation of Noise and Vibration in Brushless DC Motor

**Seung Ho Yun**

*Defense Agency for Technology and Quality, Daejeon 35409, Korea*

**Seung Il Ro**

*Hanwha Corporation, Daejeon 34060, Korea*

**Hui Min Kim and Gwan Soo Park\***

*Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

(Received 1 June 2016, Received in final form 14 June 2016, Accepted 14 June 2016)

The cogging torque of a brushless dc (BLDC) motor results from the interaction between permanent magnets and iron core, and it causes noise and induce vibrations. During a manufacturing process, assembly tolerances lead to the change of the electromagnetic structure of a BLDC motor where permanent magnets are not properly glued to the surface of rotor core. In this paper, the effect of magnet separation from the surface of rotor core on the cogging torque is investigated due to assembly tolerance. The relationship with key design parameters is considered such as separation between magnets and rotor core, the number of magnets having separation, as well as the several types of arrangements among neighboring magnets. Finite element method (FEM) has been used to analyze a BLDC motor, and the allowable assembly tolerance is proposed to prevent generating noise and vibrations. Within proposed assembly tolerance, it is concluded that the cogging torque of a BLDC motor is decreased, and hence noise and vibrations.

**Keywords :** cogging torque, assembly tolerances, permanent magnet (PM), noise and vibration, brushless motor

## BLDC 전동기에서 회전자 자석의 조립 공차에 따른 코깅토크 특성변화와 소음진동 불량 평가에 관한 연구

**윤승호**

국방기술품질원, 대전시 서구 혜천로 72, 35409

**노승일**

한화, 대전시 유성구 외삼로 8번길 99, 34060

**김희민 · 박관수\***

부산대학교 전기공학과, 부산시 부산대학로 63번길 2, 46241

(2016년 6월 1일 받음, 2016년 6월 14일 최종수정본 받음, 2016년 6월 14일 게재확정)

BLDC 전동기의 코깅토크는 영구자석과 철심의 상호작용에 의해 발생하고 소음과 진동을 발생시키는 요인이다. 제조 과정에서 조립 공차로 인해 영구자석이 회전자 철심 면에 제대로 붙지 않을 경우 BLDC 전동기의 전자기적 구조가 변할 수 있다. 본 논문에서는 조립 공차로 인해 자석이 회전자 표면과 분리되었을 때 코깅토크에 미치는 영향에 대해 연구했다. 핵심적인 설계 요소 들인 회전자와 자석 간 분리, 분리를 가진 자석 수, 이웃한 자석들 간의 여러 배치형태를 고려했다. 코깅토크 해석을 위해 유한

요소법을 사용하였고, 소음진동을 발생시키지 않는 조립 공차를 제안했다. 제안된 조립 공차로 제작된 BLDC 전동기의 코깅토크는 감소되었고 소음진동 또한 줄어들 것이라고 판단된다.

**주제어** : 코깅토크, 조립 공차, 영구자석, 소음진동, 브러쉬리스 전동기

## I. 서 론

군사적으로 운용중인 유도무기는 목표물을 향하여 방향과 자세를 제어하면서 비행한다. 방향과 자세를 제어하기 위한 여러 가지 방법이 있는데 그 중 외부에 날개가 달린 유도무기는 목표물을 향해 비행하면서 날개의 방향을 조정함으로써 방향과 자세를 제어한다. 이러한 날개의 기계적인 구동이 예전에는 주로 공압 구동방식이었으나, 유도무기가 소형화되고 열전지 기술이 발달하면서 전동기를 이용한 전기 구동방식이 많이 사용되고 있다.

이미 개발이 완료되어 양산중인 ○○ 유도탄은 날개구동용 전동기로 BLDC 전동기를 사용하고 있다. 개발 당시 국외에서 도입한 BLDC 전동기를 사용했었으나 양산 시 이를 국산화하여 국내업체에서 생산하고 있다. 영구자석 전동기에서는 코깅토크가 발생하게 되는데 이는 전동기의 부드러운 동작을 방해하며 소음진동을 유발하는 요인이다[1]. 코깅토크는 영구자석의 조립과 결합에 민감하기 때문에[2] 제작 시 조립 공차를 적절히 관리해야한다.

영구자석 전동기에서 분할코어의 제작 공차가 코깅토크의 크기에 미치는 영향에 대한 연구는[3, 4]에서 진행되었으나 영구자석 자체의 조립 공차가 코깅토크에 미치는 영향에 관한 연구는 진행되지 않았다. 실제 제조 시 접착제를 과도포하거나 작업자의 일습미흡으로 영구자석이 회전자 철심에 제대로 접착이 되지 않는 경우가 있기 때문에 이로 인한 코깅토크에 미치는 영향을 확인할 필요가 있다.

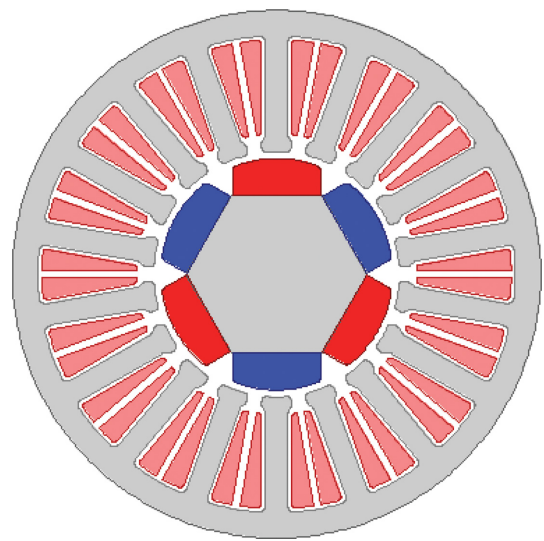
따라서 본 논문에서는 실제 제작된 전동기의 코깅토크와 소음진동의 관계를 측정하고, 영구자석 조립 공차로 발생할 수 있는 코깅토크를 분석하여 소음진동이 발생하는 코깅토크 이하가 되는 조립 공차를 제시하고자 한다. Skew, 분수 극/슬롯 적용, 입력 전류 파형 제어 등의 코깅토크를 줄이는 방법[5]이 있지만 본 논문에서는 형상을 변경하지 않고 기 설계된 전동기의 영구자석 조립 공차를 줄임으로써 코깅토크를 관리하고자 한다. 전동기의 영구자석 조립 형상을 여러 가지 경우에 대해 모델링하고 FEM을 이용하여 코깅토크를 분석함으로써 소음진동이 발생하지 않는 조립 공차를 제시하였다.

## II. 본 론

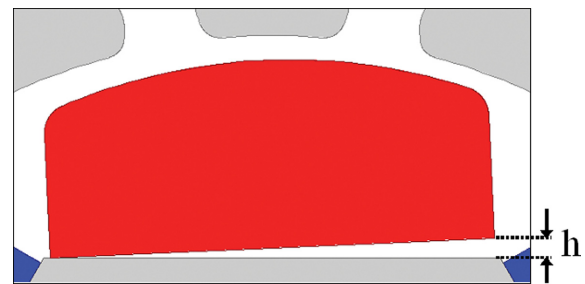
본 논문의 대상인 전동기는 유도탄 날개구동용 전동기이고 기 설계된 것으로서 주요 제원은 Table I과 같다. 전동기의

**Table I.** Specification of BLDC motor.

항목	사양
영구자석 재질	SmCo
철심 재질	35A560
극수	6
슬롯수	18
상수	3



**Fig. 1.** (Color online) Structure of BLDC motor.



**Fig. 2.** (Color online) Separation of PM.

형상은 Fig. 1과 같고 회전자가 전동기 내부에 위치한 내전형 BLDC 전동기이다. 내부 회전자의 구조는 Fig. 2와 같이 회전자 철심 면에 영구자석이 접착되어 있는 구조이고, 이 때 영구자석이 회전자 철심에 고르게 접착되지 못할 경우 영구자석과 고정자 슬롯 간 공극에서의 자기장이 불균일하게 되어 코깅토크에 영향을 줄 수 있다. 본 논문에서는 영구자석이 회전자 철심으로부터 한쪽으로부터 분리가 발생할 경우에 대해서만 고려한다. 코깅토크가 클 경우 소음진동이 발생할

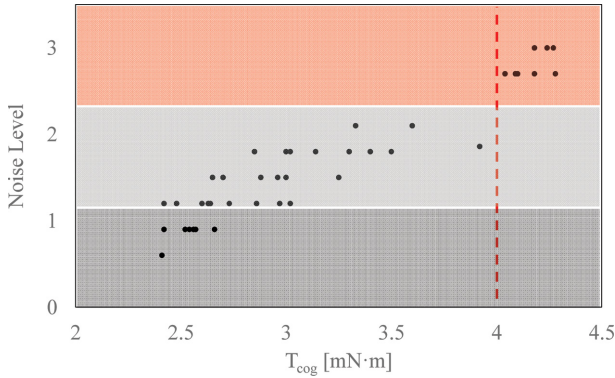


Fig. 3. (Color online) Noise level with respect to cogging torque.

수 있으며 실제 제작한 시료들에 대해 코깅토크를 측정하고 그에 따라 자체적으로 평가한 소음진동 수준을 Fig. 3에 나타내었다. 소음진동 레벨의 부적합 기준은 3 이상이고 이에 따라 코깅토크가 4 mN·m 이상이 경우를 불량 평가기준으로 정했다.

1. 코깅토크의 발생

코깅토크는 회전자/고정자의 철심과, 회전자 영구자석, 공극으로 구성되는 자기회로에서 자기저항이 최소가 되도록 작용하는 힘이고[5], 맥스웰 응력 텐서법(Maxwell Stress Tensor)을 이용하여 2차원 원통형 대칭일 경우 식(1)로 표현된다[6].

$$T_{cog} = \frac{1}{N} \frac{1}{\mu_0} \sum_{r=r_r}^{r_s} \int_0^{2\pi} B_n B_r r^2 d\phi \quad (1)$$

여기서  $N$ 은  $r_s$ ,  $r_r$  사이의 텐서라인 개수,  $l$ 은 적층 길이,  $r_s$ 는 고정자 내경 반지름,  $r_r$ 은 회전자 외경 반지름,  $r_n$ 은 텐서라인 반지름,  $B_n$ 은 텐서라인에 있는 노드의 반경방향 자속밀도,  $B_r$ 은 텐서라인에 있는 노드의 접선방향 자속밀도이다. 코깅토크는 자석과 슬롯 간의 상호작용에 의해 결정되므로 식(2)와 같은 주기성을 가진다.

$$K_{cogging} = \frac{360}{LCM(pole, slot)} \quad (2)$$

여기서 LCM은 최소공배수를 뜻하고 본 논문에서 분석할 전동기는 20° 기계각의 주기를 가진다.

2. 분리높이에 따른 코깅토크

Fig. 2에서 영구자석이 회전자 철심에 제대로 붙지 않을 경우  $h$ 만큼 접촉면과 분리된다. FEM을 이용하여 한 극에 대해 분리된 높이  $h$ 의 변화에 따른 최대 코깅토크를 분석한 결과를 Fig. 4과 Table II에 나타내었다.  $h$ 가 증가함에 따라 영구

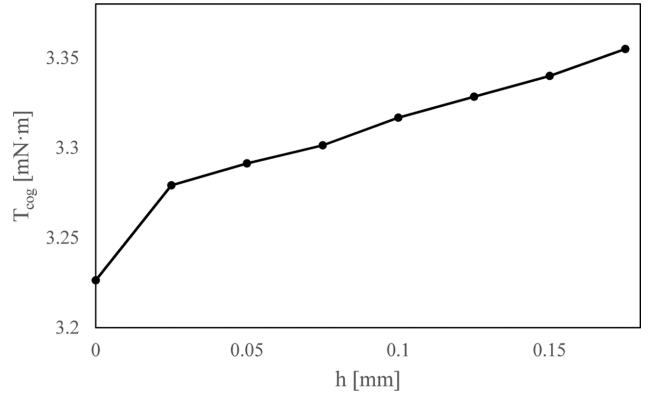


Fig. 4. Peak cogging torque with respect to separation.

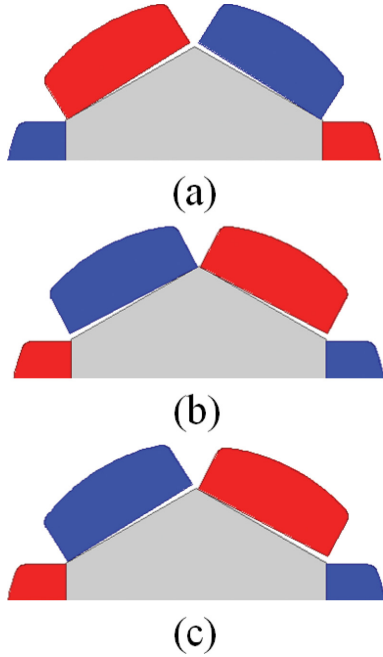
Table II. Peak cogging torque with respect to separation.

$h$ [mm]	$T_{cog}$ [mN·m]	Rate [%]
0	3.226	0
0.025	3.279	1.6
0.050	3.291	2.0
0.075	3.301	2.3
0.100	3.317	2.8
0.125	3.328	3.2
0.150	3.340	3.5
0.175	3.355	4.0

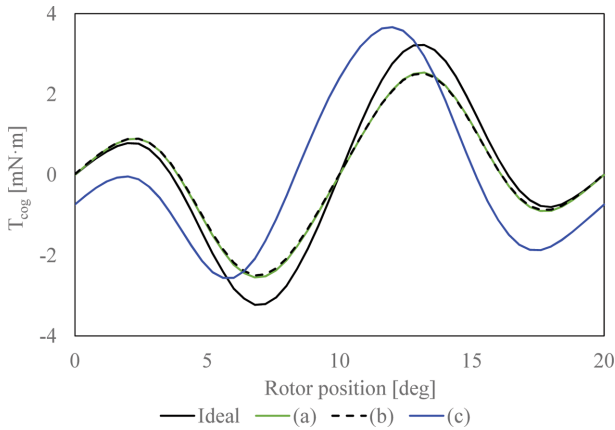
자석과 고정자 슬롯 간 공극에서의 자기저항이 줄어들기 때문에 코깅토크가 증가한다. 회전자 영구자석 한 극의 높이  $h$ 의 변화에 대해 이상적으로 조립된 전동기에서 발생할 수 있는 최대 코깅토크와의 차이가 최대 약 4% 나는 것을 확인할 수 있다.

3. 인접한 영구자석 배치에 따른 코깅토크

코깅토크는 여러 극이 이루는 상호 자기회로의 조합에 의해 발생하기 때문에 극끼리의 영향을 독립적으로 해석해서는 안된다. 상호 영향에 대해 분석하기 위해 우선 두 개의 분리된 높이를 가진 영구자석이 인접할 경우 코깅토크에 미치는 영향을 확인하였다. Fig. 5에서 분리높이가 0.175 mm인 영구자석을 (a), (b)와 같이 각각 안쪽과 바깥쪽으로 분리되도록 대칭으로 배치하고 (c)는 평행으로 배치하여 모델링하였다. 이를 해석하여 한 주기에 대한 각 배치별 코깅토크 파형을 Fig. 6에 나타내었다. (a), (b)와 같이 대칭으로 배치된 구조에서 코깅토크가 줄어든 반면 (c)와 같이 평행으로 배치된 구조에서는 코깅토크가 증가하였다. (a)는 분리를 가진 영구자석 간 자기저항이 증가했고, (b)는 분리를 가진 영구자석 간 자기저항은 감소했으나 양 옆의 영구자석 간 자기저항의 증가 성분이 더 크기 때문에 코깅토크가 줄어든 것을 확인할 수 있다. (c)는 같은 방향으로 분리를 가지는 두 영구자석 극의 배치구조로서 이상적인 모델보다 13.7%가 증가한 것을 볼 수 있다.



**Fig. 5.** (Color online) Arrangement of two neighboring PMs: (a) symmetric(inner gap) (b) symmetric(outer gap) (c) parallel.



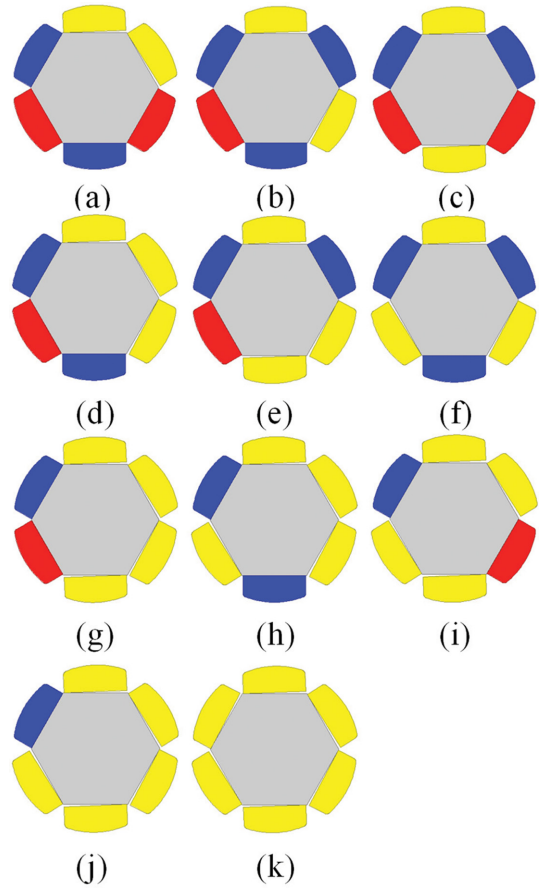
**Fig. 6.** (Color online) Cogging torque with respect to arrangement of two neighboring PMs.

**Table III.** Peak cogging torque with respect to arrangement of two neighboring PMs.

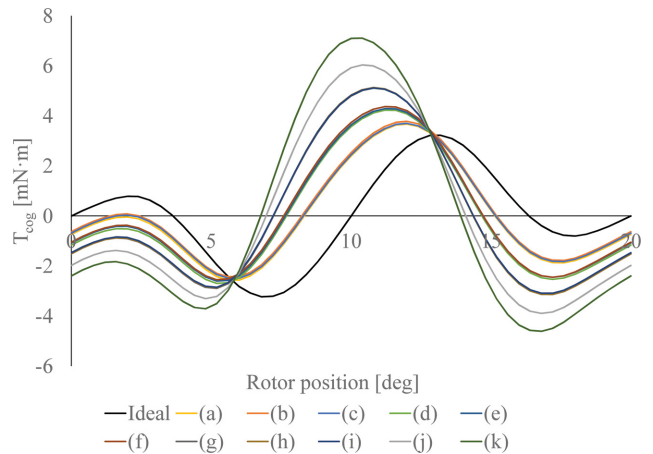
Case	$T_{cog}$ [mN·m]	Rate [%]
Ideal	3.226	0
(a)	2.538	-21.3
(b)	2.516	-22.0
(c)	3.668	13.7

#### 4. 평행한 영구자석의 극수에 따른 코깅토크

분리를 가지는 평행한 영구자석이 하나일 때보다 두개가 인접할 경우 코깅토크가 커졌다. 따라서 여러 극의 조합에 대한 영향을 분석할 필요가 있고, 분리를 가지는 평행한 영구



**Fig. 7.** (Color online) Arrangement of parallel PMs: (a)-(c) 2 PMs (d)-(f) 3 PMs (g)-(i) 4 PMs (j) 5 PMs (k) 6 PMs.

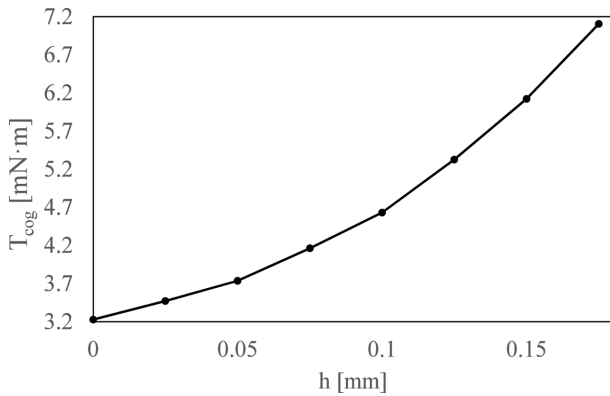


**Fig. 8.** (Color online) Cogging torque with respect to arrangement of parallel PMs.

자석의 극수에 따른 코깅토크를 분석하기 위해 Fig. 7과 같이 극수를 증가시키면서 가능한 배치에 대해 모델링하였다. 가능한 배치는 두 극일 경우 (a)-(c), 세 극일 경우 (d)-(f), 네 극일 경우 (g)-(i), 다섯 극일 경우 (j), 여섯 극일 경우

**Table IV.** Peak cogging torque with respect to arrangement of parallel PMs.

Case	$T_{cog}$ [mN · m]	Rate [%]
Ideal	3.226	0
(a)	3.668	13.7
(b)	3.784	17.3
(c)	3.701	14.7
(d)	4.229	31.1
(e)	4.289	33.0
(f)	4.373	35.6
(g)	5.109	58.4
(h)	5.134	59.2
(i)	5.119	58.7
(j)	6.038	87.2
(k)	7.105	120.3



**Fig. 9.** Peak cogging torque with respect to separation (case (k) of Fig. 7).

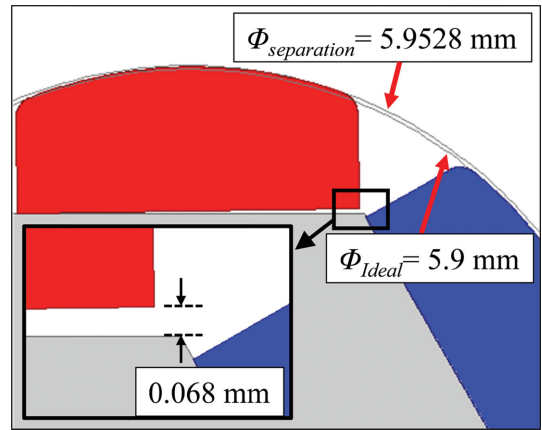
(k)와 같으며 이를 해석하여 한 주기에 대한 각 배치별 코깅토크 파형을 Fig. 8에 나타냈다. 배치별 코깅토크는 두 극일 경우 13.7~17.3% 증가, 세 극일 경우 31.1~35.6% 증가, 네 극일 경우 58.4~59.2%, 다섯 극일 경우 87.2% 증가, 여섯 극일 경우 120.3%가 증가했다. 분리를 가진 영구자석이 평행하게 모든 극을 구성할 경우 가장 높은 코깅토크를 발생시키는 것을 알 수 있다.

**5. 평행한 영구자석 극의 분리높이에 따른 코깅토크**

Fig. 7의 (k) 배치와 같이, 분리를 가지는 영구자석이 평행하게 모든 극을 구성할 때 코깅토크가 최대가 되는 것을 확인했고 이러한 배치에서 분리높이가 달라질 경우를 확인해야 한다. 분리를 가지는 영구자석이 평행하게 배치되어 모든 극을 구성할 때 분리높이에 따른 최대 코깅토크를 Fig. 9와 Table V에 나타내었다. Fig. 9에서 코깅토크가 4 mN · m인 분리높이를 0.068 mm로 추정할 수 있고, 이 때 Fig. 10과 같이 회전자의 외경이 설계 치수와 0.0528 mm만큼 차이가 나게 된다. 따라서 조립 공차를 0.05 mm로 설정하면 어떠한

**Table V.** Peak cogging torque with respect to separation (case (k) of Fig. 7).

h [mm]	$T_{cog}$ [mN · m]	Rate [%]
0	3.226	0
0.025	3.472	7.6
0.050	3.736	15.8
0.075	4.162	29.0
0.100	4.633	43.6
0.125	5.325	65.1
0.150	6.122	89.8
0.175	7.105	120.2



**Fig. 10.** (Color online) Difference of outer diameter due to separation.



**Fig. 11.** (Color online) Go-No gauge.

영구자석의 분리에 대해서도 코깅토크는 4 mN · m 이내를 만족하게 되고 소음진동의 발생을 억제할 수 있다. 실제로 제조 공정에 적용하기 위해 Fig. 11과 같이 고노 게이지를 이용하여 조립 공차를 벗어난 회전자를 걸러낼 수 있다.

**III. 결 론**

본 논문에서는 유도탄 날개구동용 전동기에서 발생하는 소음진동을 억제하기 위한 회전자 영구자석의 조립 공차를 제

시하였다. 소음진동이 발생하는 코깅토크를 불량 평가기준으로 산정하고, 회전자 영구자석의 조립 공차로 인한 분리로 발생하는 코깅토크를 FEM을 이용하여 분석하였다. 분리높이가 클수록 코깅토크가 증가하였고 평행하게 배치된 구조에서 코깅토크가 큰 값을 나타내었다. 그리고 모든 극에 대해 평행하게 배치되었을 때 코깅토크 값이 가장 컸고 이러한 구조에서 분리높이에 따른 코깅토크를 분석했을 때 소음진동이 발생하는 코깅토크 이하가 되는 분리높이를 산출하였다. 이를 조립 공차에 적용하였고 고노 게이지를 제작하여 조립 공차를 벗어난 회전자를 걸러냄으로써 제작되는 전동기의 소음진동을 원천 차단할 수 있고 전동기의 안정성, 신뢰성 향상에 기여할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의

지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2015R1D1A3A01017721).

### References

- [1] K. J. Han, H. S. Cho, D. H. Cho, and H. K. Jung, IEEE Trans. Magn. **36**, 1927 (2000).
- [2] L. Gasparin, A. Cernigoj, S. Markic, and R. Fiser, IEEE Trans. Magn. **45**, 1210 (2009).
- [3] H. J. Park, D. W. Kang, W. H. Kim, H. W. Lee, S. B. Lim, and J. Lee, KIEE EMECS Conf. 134 (2010).
- [4] S. Y. Kim, J. H. Cho, S. G. Song, B. T. Kim, and J. Lee, KIEE Conf. 661 (2013).
- [5] J. R. Hendershot Jr. and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Motor Design Books, Venice (2010) pp. 107~108.
- [6] C. K. Kim, S. G. Lee, and S. Y. Jung, Trans. KIEE **58**, 1923 (2009).