



소형 유도무기 날개 작동기용 보이스 코일 모터의 최적 설계

이충희¹, 김광태², 이병호³, 조영기⁴

Optimization of Voice Coil Motors for a Small Guided Missile Fin Actuator

Choong Hee Lee¹, Gwang Tae Kim², Byung Ho Lee³ and Young Ki Cho⁴

PGM Tech R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd.^{1,3,4}

Agency for Defense Development²

ABSTRACT

In this study, optimal design of direct-drive VCMs (Voice Coil Motor) for a missile fin actuator is carried out. The torque performance and the characteristics of the VCM are predicted by commercial electromagnetic analysis software, ANSYS Maxwell. The optimal design is obtained at the minimum and maximum actuating angles where the aerodynamic load acting on the fin is the largest in the operating range. The critical variables of the actuator is designed and the RSM (Response Surface Method) is used for the optimization. The response surface model consists of second-order functions and its experimental points are selected by a central composite design. This design is widely used for fitting a second-order response surface. The adjustment regression coefficients is computed for adequacy checking of the response surface model. Finally, the torque values obtained by the RSM and the ANSYS Maxwell are shown in good agreement.

초 록

본 연구에서는 직구동방식의 보이스 코일 모터를 이용한 유도무기 날개 작동기의 최적 설계를 진행하였다. ANSYS Maxwell 상용프로그램으로 전자기장 해석을 수행하여 토크 성능 및 보이스 코일 모터의 특성을 예측하였으며, 운용 각도 범위에서 날개에 작용하는 공력부하가 가장 큰 구간인 양끝단에 해당되는 각도에서 최적화 설계를 수행하였다. 또한, 작동기의 주요 설계 변수를 선정하고, 최적화 설계를 위하여 반응면 기법(Response Surface Method)을 사용하였다. 반응면은 2차 함수로 구성하였고 2차 반응면 구성에 널리 쓰이는 중심합성법을 바탕으로 수치실험점들을 선정하였다. 구성된 반응면의 적합성은 수정결정계수로 판단하였으며, 최종적으로 최적화로 구해진 토크값은 전자기장 해석을 통한 토크값과 거의 동일함을 확인하였다.

Key Words : Voice Coil Actuator(보이스코일 구동기), Electromagnetic Analysis(전자기장 해석), Response Surface(반응 표면)

1. 서 론

과거의 전장은 무차별적 사격이나 다수의 인적 물적 자원으로 이루어졌다. 하지만, 유도무기가 보편화

되고 초정밀 센서 및 전자장비들이 개발되면서 현대전은 원거리 정밀 타격을 통하여 아군이나 민간인의 피해를 줄이고, 효율적으로 전장을 장악하는 것으로 바뀌고 있다. 초소형 스마트탄이나 소형 유도무기는

† Received : September 13, 2018 Revised : December 5, 2018 Accepted : December 5, 2018

¹ Senior Researcher, ² Senior Researcher, ³ Principal Researcher, ⁴ Principal Researcher

¹ Corresponding author, E-mail : lee.choonghee@lignex1.com, ORCID 0000-0001-9005-4050

이러한 추세를 발맞춰 다양하게 개발되고 있으며, 탑재되는 각종 센서류나 제어장치도 소형화되고 있다 [1]. 한편, 유도무기 날개의 회전각을 제어하는 구동장치는 전기식의 경우 BLDC모터와 볼스크류를 이용한 기구장치를 많이 사용한다[2]. 이러한 방식은 모터 및 기구적 링크 구조물이 차지하는 공간이 비교적 크므로 소형화에 한계가 있다. 따라서, 소형 유도탄 구동기의 외국 사례를 보면 다음과 같다.

미국에서는 1995년대에 BLAM (Balle Launch Adaptive Munition)이라는 직경 46mm, 길이 134mm의 스마트탄 개발을 시작하였다. 이 탄의 구동기는 압전 세라믹이 사용되었으며, 탄의 머리 부분이 자유롭게 기울기를 변화시키는 방식으로 방향을 제어한다. 압전 구동기의 변위가 작아 기울기 각은 $\pm 0.1^\circ$ 정도 수준이다[1].

2012년에 미국 샌디아 국립 연구소(Sandia National Laboratories)는 Self-guided bullet이라는 초소형 유도탄에 대한 시제품을 선보였다. 전자석을 이용한 구동기가 장착되었으며, 전자석의 특성상 지느러미 형태의 후미 핀은 $0^\circ, \pm 3^\circ$ 의 세 가지 동작으로 구동한다. 이러한 작은 구동각과 bang-bang 제어 방식(on-off control)을 극복하기 위해 초당 30회까지 구동된다[3].

이와 같이 압전구동기, 전자기력 구동기, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 구동기 등의 초소형 구동장치도 개발되고 있지만[4] 압전 방식은 구동력 또는 구동각이 작고 전자기력 방식은 bang-bang 제어만 가능하다는 한계가 있다. 이러한 상황을 극복하기 위해 본 논문에서는 회전형 보이스코일 방식의 전기식 구동기를 제시하였다. 회전형 보이스코일 방식은 피드백 제어(feedback control)가 가능하며, 컴퓨터용 하드디스크 헤드 섹터 모터의 정밀 각도제어용으로도 널리 사용되고 있다[5,6].

본 연구에서는 40mm 구경을 갖는 유도무기의 2축 초소형 구동장치에 적용 가능한 보이스코일 방식의 작동기에 대해 논하였다. 감속기가 없는 직구동방식으로 구성되어 있어 정적 성능에 비해 동적 성능은 매우 우수하므로 작동기의 해석 및 최적화 설계는 정적 해석을 주로 수행하였다.

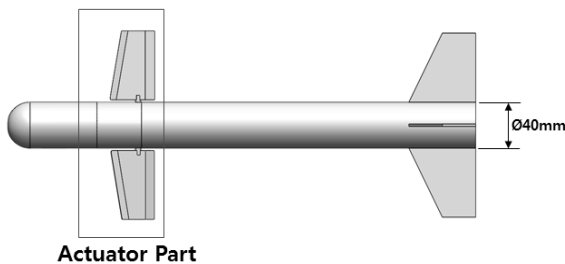


Fig. 1. The position of an actuator in small guided missile

II. 본 론

2.1 작동기 설계

본 연구에서는 40mm에 탑재 가능한 작동기로 해석모델을 설계하였으며, Fig. 1과 같이 카나드형 소형 유도무기의 작동기에 적용 가능하다.

2.1.1 해석 모델

소형 작동기에 적용하기 위하여 Fig. 2와 같이 로터리 보이스코일방식의 직구동 작동기를 설계하였다. 영구자석이 상하 및 중심에 총 3개 배치되어 있으며, 2극 영구자석으로 설계되어 있다. Fig. 3(a)과 같이 원형 도넛 모양의 보이스코일을 배치하였으며, 제작 및 최적화 설계에 용이하도록 도넛 모양의 코일로 설계하였다. 2극 영구자석에 의해 자기장이 Fig. 3(b)와 같이 형성되며, 도넛 모양의 코일 내 전류가 회전

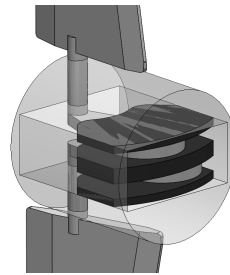


Fig. 2. 2-axis rotary VCM (Voice Coil Motor) actuator

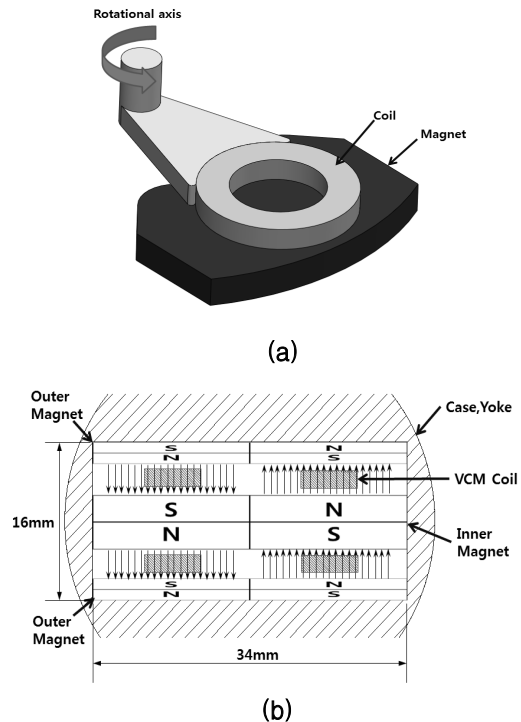


Fig. 3. Configuration (a) and cross-section (b) of a VCM actuator

하면서 흐르게 된다. 따라서, Fig. 3(b)의 좌측과 우측 코일 단면에 흐르는 전류방향이 반대가 되고, 2극 영구자석에 의해 자기장의 흐름도 반대가 되므로 코일에 작용하는 로렌츠 힘은 같은 방향으로 발생하게 된다. 이 토크를 이용하여 날개를 직접 구동하게 되는 방식이다. 이러한 구동기를 아래위로 한 쌍 배치하였다.

2.1.2 수학적 모델

회전형 보이스코일의 구동토크는 식 (1)과 같이 로렌츠힘에 의해 토크가 발생된다.

$$\vec{F} = NI \int_L d\vec{l} \times \vec{B} \tag{1}$$

N 은 코일턴수, B 는 자기장의 세기, I 는 전류, L 은 코일의 원주 길이이다. 그리고, 코일뭉치가 차지하는 체적 대비 권선의 도체가 차지하는 체적의 비율인 점적율(S_p)은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$S_p = \frac{ND^2\pi/4}{A} \tag{2}$$

D 는 권선의 도체경, A 는 코일 뭉치의 단면적이다. 또한, 전류밀도(J)는 전류값을 권선의 단면적으로 나눈 값으로 다음과 같이 정의된다.

$$J = \frac{I}{D^2\pi/4} \tag{3}$$

식 (2)와 (3)을 정리하면, 식 (4)와 같이 표현된다.

$$NI = S_p A J \tag{4}$$

전자기장 유한요소 해석에 사용되는 입력 전류값은 NI 항이며, Ampere-turn으로 정의된다.

본 최적화 연구에서는 코일권선의 전류밀도를 10 A/mm²으로 설정하였고, 코일의 절연체 두께와 권선

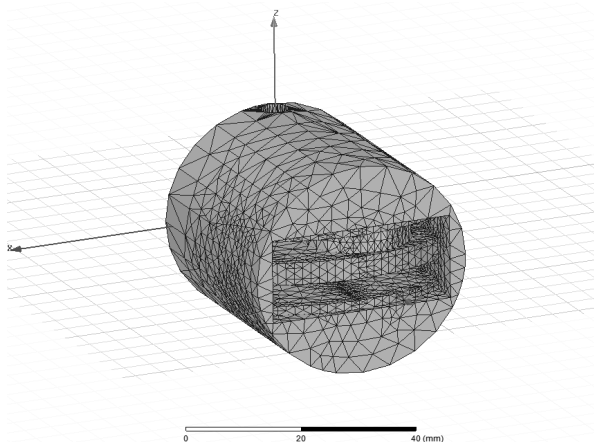


Fig. 4. Mesh of VCM actuator

방식을 고려하여 도체의 점적율은 60%로 설정하였다. 따라서, NI 항은 식 (4)에 의해 코일단면적(mm²)의 6배를 한 값이 된다.

2.1.3 유한요소 해석

보이스코일방식 구동기의 토크특성을 분석하기 위해 범용 전자기장 해석툴인 ANSYS Maxwell 19.0을 이용하여 정자계 해석을 하였다[7].

Figure 4와 같이 구동성능의 주요부품인 구동기 본체, 영구자석, 구동코일을 배치하여 메쉬작업을 수행하였다. 해석 경계조건은 Table 1과 같으며, 각각의 변수는 Figs. 5, 6에 나타내었다. 재질은 케이스 본체는 AISI 1008 Carbon Steel이며, 영구자석은 네오디움 N42등급으로 선정하였다.

코일 뭉치의 단면적(A)은 Fig. 5와 같이 코일폭(C_w)와 코일두께(C_t)의 곱으로 구할 수 있다. 코일두께는 식 (5)와 같이 작동기 내부공간의 높이(16mm로 설계)에서 영구자석들의 두께를 뺀 값으로 적용하였다.

$$C_t = (16 - 2M_1 - M_2) / 2 \tag{5}$$

따라서, 과도하게 영구자석의 두께가 늘어나면 식 (5)에 의해 코일의 두께가 줄어들게 되므로 작동기의 토크 성능은 낮아지게 된다.

Table 1. Boundary Condition of the VCM

Parameter	Value
Thickness of the outer magnets (M_1)	2mm
Thickness of the inner magnet (M_2)	4mm
Coil width (C_w)	3mm
Coil thickness (C_t)	4mm
Coil diameter (C_d)	20mm
Actuating angle (θ)	-15 ~ +15°
Distance between coil center and rotational axis (R)	25mm
Ampere-turn	72A

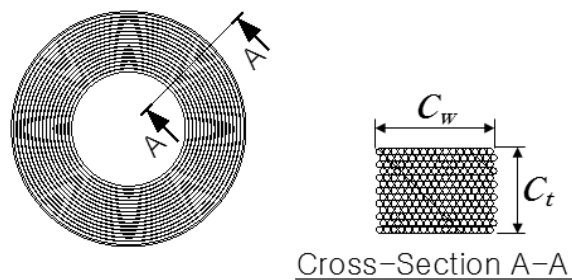
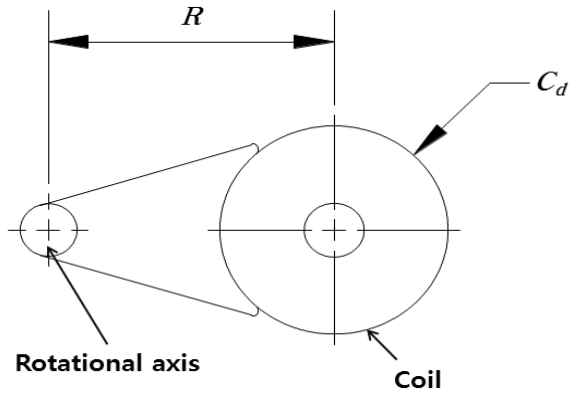
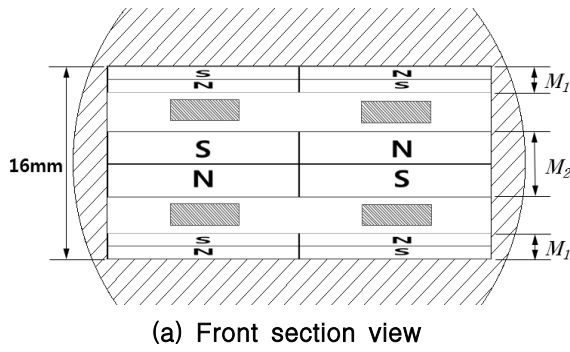


Fig. 5. Configuration of Coil bobbin



(b) Top view of the coil and its arm
Fig. 6. Analysis variables of the VCM

2.1.4 해석 결과

보이스코일방식 구동기를 $-15^{\circ} \sim +15^{\circ}$ 까지 1° 단위로 정자계 해석을 수행하였다. Fig. 7은 보이스코일 구동기 주변의 자기장 벡터를 나타낸 모습이다. 자석의 좌우측 끝단과 중앙 부분은 자기장 벡터가 급변하고 있으며, 그 외에 부분은 비교적 균일하게 자기장이 형성되어 있다. 작동기의 구동각이 0° 를 기준으로 증가 또는 감소하면 코일이 균일한 자기장 구역을 벗어나 불균일한 자기장 구역으로 가게 되어 토크 성능은 떨어지게 된다.

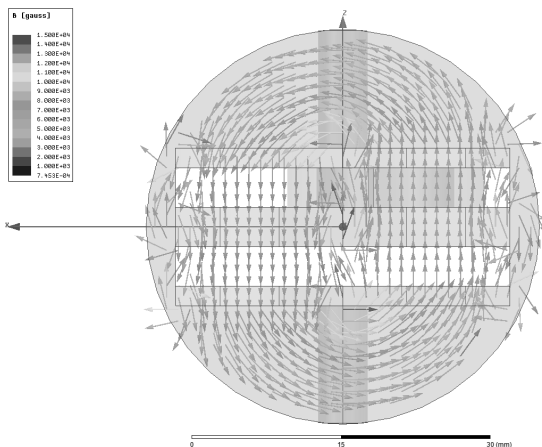


Fig. 7. Magnetic vector around the VCM actuator

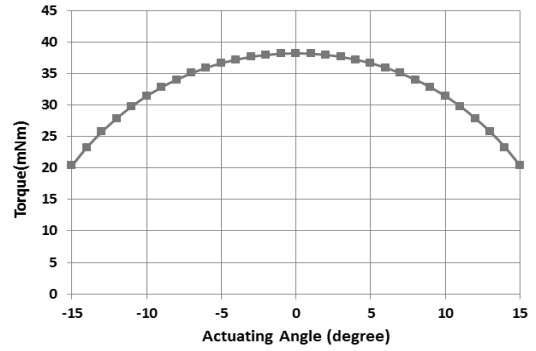


Fig. 8. VCM actuator torque curve by FEM analysis(ANSYS Maxwell)

Figure 8은 보이스코일 작동기 구동축의 토크곡선을 나타낸 그래프이다. 코일에 발생하는 전자기력에서 구동축 토크에 기여하는 벡터 성분만 계산하여 나타내었다. 예상대로 구동각 0° 에서 최대토크가 발생되며, 38.21mNm 로 해석되었다. 또한, 각도가 커질수록 토크는 떨어지게 되며 최대 각도인 15° 에서 최저값인 20.38mNm 로 해석되었다.

2.2 설계 최적화

2.2.1 반응면 기법

본 연구의 최적화 설계에 사용한 반응면기법(Response Surface Method)은 수학적, 통계학적 기법으로 한정된 수의 수치실험점을 통하여 반응면을 구성하고 최적 설계를 수행하는 기법이다[8]. 많은 시간이 소요되는 실험이나 수치해석에서 효율적으로 최적값을 찾기 위해 다방면으로 사용된다[9-11]. 식 (6)은 반응면 모델을 표현하는 2차 다항식이다. 각 미지항은 회귀분석을 통하여 구하게 되며, 이러한 일련의 과정을 통해 최적의 목적 함수값을 찾기 위한 실험의 시행 횟수를 줄일 수 있는 장점이 있다.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (6)$$

위 식에서 x_i, x_j 는 설계 변수이며, y 는 목적 함수값으로 이 연구에서는 최대 토크값이 된다. k 는 설계 변수의 수이며, ϵ 는 오차값이다. β 는 계수값으로 최소자승법(Least Square Method)을 통하여 결정되는 값들이다. 구성된 반응면 모델의 신뢰도를 평가하기 위한 대표적인 계수는 결정계수(R^2)가 있으며, 식 (7)과 같이 표현된다.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{S_{yy}} \quad (7)$$

하지만, 결정계수(R^2)는 설계 변수를 추가하면 항상 값이 증가하므로, 불필요한 변수가 추가되는 것을 판단할 수가 없다. 따라서, 식 (8)과 같이 수정결정계수(R_{adj}^2)로 신뢰도를 주로 평가하게 된다. 수정결정계

수(R_{adj}^2)는 불필요한 변수가 추가되면 값이 감소하게 되어 신뢰도를 더욱 정확하게 판단할 수 있다.

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_E / (n - p)}{S_{yy} / (n - 1)} \quad (8)$$

위 식에서 SS_E 는 오차 제곱의 총합, S_{yy} 는 반응함수 제곱의 총합, n 은 수치실험점 개수(해석점 개수), p 는 다항식 항의 개수이다.

2.2.2 설계 변수 선정

구동기에서 최적화 대상 설계변수는 외측 영구자석 두께(M_1), 내측 영구자석 두께(M_2), 코일의 폭(C_w)으로 정하였으며, 일반적으로 사용하는 구동각을 $\pm 10^\circ$ 로 가정하여 구동각 10° 를 기준으로 설계변수를 최적화하였다. 보이스코일의 외경(C_d)과 구동축에서 코일중심까지의 거리(R)는 모두 클수록 유리하지만, 구동시 기구학적으로 작동기 본체와 간섭을 일으킬 수 있다. 따라서 간섭이 발생하지 않도록 코일 외경(C_d)은 20mm, 구동축에서 코일중심까지의 거리(R)는 25mm로 각각 선정하였다. Table 2는 최적화 대상 설계변수 및 주요 설계 변수에 대해 나타내었다.

수치실험점(해석점)은 Fig. 9와 같이 중심합성법(Central Composite Designs)으로 선정하였다. 설계변수가 총 3개이므로 Fig. 9(b)에 해당되며, 수치실험점은 설계변수의 상한과 하한 및 중간점, 경계 외부의 일부점으로 구성되어 최소 15개가 요구된다.

Table 2. Parameter of optimization

Parameter	Value
Thickness of the outer magnets (M_1)	1 ~ 4mm
Thickness of the inner magnet (M_2)	1 ~ 7mm
Coil width (C_w)	2 ~ 9mm
Coil Diameter (C_d)	20mm
Actuating angle (θ)	10°
Distance between coil center and shaft (R)	25mm
Ampere-turn*	$6C_w \cdot C_d$

* 식 (4)에 의해 계산된 값임.

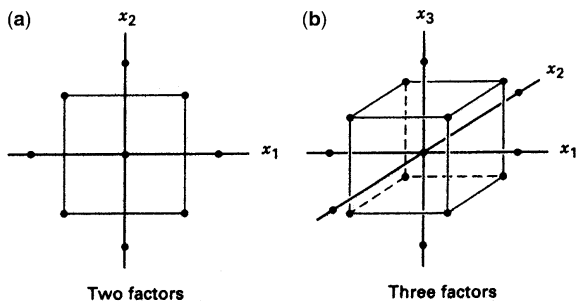
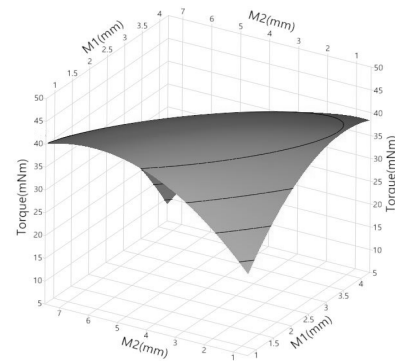


Fig. 9. Central composite designs[8]

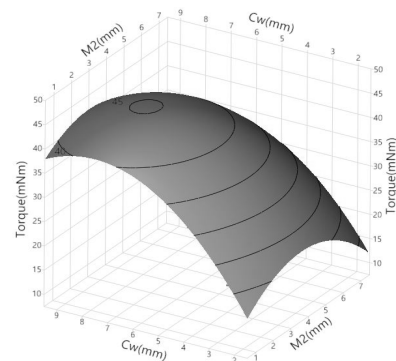
2.3 해석 및 최적화 결과

2.3.1 최적화 결과

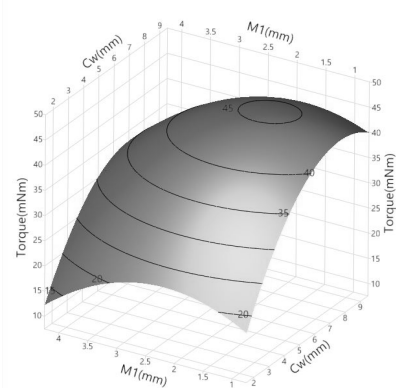
외측 영구자석 두께(M_1), 내측 영구자석 두께(M_2), 코일의 폭(C_w)을 설계 변수로 최적화를 진행하였으며, 반응면 기법을 통한 최적화 결과 영구자석 두께와 코일의 폭에 따른 토크 그래프는 Fig. 10과 같다. 2차 함수의 반응면 그래프로 형성되어 있으며, 곡면의 볼록한 부분 정상에 최적화 결과값이 위치한다.



(a) Thickness of the outer magnets vs. the inner magnet



(b) Thickness of the inner magnet vs. Coil width



(c) Thickness of the outer magnets vs. Coil width

Fig. 10. Response surface plot for each pair of the VCM design parameters

Table 3. Results of the optimized VCM model

Parameter	Value
Thickness of the outer magnets (M_1)	1.8779433mm
Thickness of the inner magnet (M_2)	4.0881622mm
Coil width (C_w)	7.4016553mm
Actuating angle (θ)	10°
Torque (mNm)	45.53907
R^2	0.962
R_{adj}^2	0.905

이와 같이, 반응면기법을 통한 최적화 결과값은 Table 3과 같이 나왔으며 최대토크는 약 45.54mNm를 얻었다. 반응면의 신뢰도 평가의 척도인 결정계수 (R^2) 및 수정결정계수값(R_{adj}^2)은 각각 0.962와 0.905로 계산되었다. 이 값은 0.9이상이면 우수하다고 볼 수 있다. 반응면기법의 신뢰도를 재차 확인하기 위하여 Table 3의 M_1 , M_2 , C_w 변수값을 경계조건으로 설정하여 전자기장 해석 (ANSYS Maxwell)을 수행하였고, 토크값은 45.57mNm로 계산되었다. 이 결과값은 15개의 수치실험점을 기반으로 반응면 기법으로 도출된 통계적 계산값인 45.54mNm와 거의 동일한 결과임을 보였다.

2.3.2 동적 특성 분석

작동기의 동적 특성 중에서 주파수 응답 특성은 중요한 성능 요구 조건이다. 구동날개가 구동각범위 A , 주파수 f 로 구동하고 공기 및 베어링 마찰은 무시하였을 때 각변위 θ 는

$$\theta = A \sin(2\pi ft) \quad (9)$$

와 같이 표현되고, 요구 토크 T_{req} 는

$$T_{req} = J \ddot{\theta} \quad (10)$$

로 표현된다. J 는 구동부의 질량관성모멘트이며, 토크 및 각속도는 식 (11), (12)와 같다.

$$T_{req} = -J(2\pi f)^2 A \sin(2\pi ft) \quad (11)$$

$$\dot{\theta} = 2\pi f A \cos(2\pi ft) \quad (12)$$

작동기의 구동 부분기구를 SUS316재질의 밀도로 적용하고, 최적화 결과를 반영하여 Fig. 11과 같이 설계하였을 때 보이스 코일과 작동기 회전축의 축방향 관성모멘트는 약 7720g.mm²로 계산되었다(Solidworks 2017, Dassault system로 계산). 구동각범위(A)를 2°로 가정하고 최적화 결과에서 나온 구동토크 45.57mNm를 적용하면, 최대 주파수는 식 (11)에 의해 65.4Hz

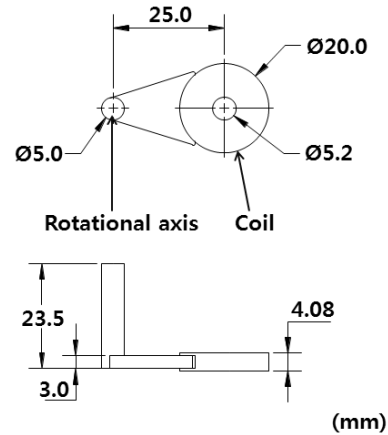


Fig. 11. Moving parts of the VCM Actuator

로 계산된다. 구동날개의 관성은 제외하고 계산된 결과이며, 볼스크류나 크랭크암방식의 감속기가 적용된 전기식 구동장치에 비해 주파수 특성은 우수하다.

III. 결 론

본 연구에서는 40mm 구경의 유도무기에 내장 가능한 2축 회전형 보이스코일 작동기를 설계하였으며, 전자기장 유한 요소 해석을 수행하여 토크값을 예측하였다. 해석 결과 토크값은 0°에서 토크값이 가장 크며, 구동각이 클수록 토크값은 작아지는 경향을 보였다. 작동기의 주요설계변수로서 영구자석 두께, 코일의 폭을 선정하였으며 반응면 기법을 통해 구동각 10°에서 토크값에 대한 설계 최적화를 수행하였다. 또한, 최적 설계된 작동기는 이론적인 주파수 응답 특성을 분석하여 유도무기 작동기로서의 활용 가능성을 보였다.

후 기

“본 연구는 국방과학연구소 과제(No. UC170015ID)의 연구결과임.”

References

- 1) Lee, S. H., Cho, H. J., Cho, Y. K., and Bang, H. C., “Recent Status on Miniature Smart-bullet Techniques,” *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*. Vol. 43, No. 3, 2015, pp.272~281.
- 2) Lee, C. S., Park, C. K., Kim, S. W., and Kim, H. J., “Design of Reduction ratio for Electro-mechanical Fin Actuator System,” *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space*

Sciences Spring Conference, April 2017, pp.506~507.

3) Larry S., "Rough Sketch : Self-Guided Bullet," *Popular Science*, June 2012, <http://www.popsci.com/technology/article/2012-05/rough-sketch-self-guide-d-bullet>.

4) Wang, Q. M., and Eric, C. L., "Constitutive Equations of Symmetrical Triple Layer Piezoelectric Benders," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 46, No. 6, Nov. 1999, pp.1343~1351.

5) Ratliff, R. T., and Pagilla, P. R., "Design, Modeling, and Seek Control of a Voice-Coil Motor Actuator With Nonlinear Magnetic Bias," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41, No. 6, June 2005, pp.2180~2188.

6) Jintai, C., "A Design of the VCM Coil Diameter of a Rotary Actuator in a Computer Hard Disk Drive," *The Korean Society of Mechanical Engineers Journal*, Vol. 10, No. 1, 1996, pp.22~30.

7) *Getting Started with Maxwell : Designing a Rotational Actuator*, ANSYS Electromagnetics suite

Release 19.0, ANSYS, Inc., 2017.

8) Myers, R. H., and Montgomery, D. C., *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 3rd Ed., John Wiley & Sons, 1995, pp.13~71, 113.

9) Kim, S. M., Park, J. Y., Ahn, K. Y., and Baek, J. H., "Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller and Diffuser using a Response Surface Method," *Proceeding of Korean Society of Computational Fluids Engineering*. October 2007, pp.92~99.

10) Hwang, I. S., Kim, M. K., Hwang, C. S., Min, S. Y., and Kim, S. J., "Optimal Design of Cyclocopter Rotor System using RSM," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*. April 2005, pp.34~37.

11) Park, Y. M., Kim, Y. S., Chung J. D., and Lee, J. Y., "Aerodynamic Shape Optimization of Airfoils Using Response Surface Method," *Aerospace Engineering and Technology*, Korea Aerospace Research Institute, Vol. 3, No. 2, November 2004, pp.248~255.