

소형 및 저비용화를 위한 전자석-스프링 구동장치 연구

김세웅^{*,1)} · 이창섭¹⁾ · 최현영¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제1기술연구본부

A Study on Electromagnetic-Spring Actuator for Low Cost Miniature Actuators

Sewoong Kim^{*,1)} · Changseop Lee¹⁾ · Hyunyoung Choi¹⁾

¹⁾ The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 14 December 2018 / Revised 8 April 2019 / Accepted 31 May 2019)

ABSTRACT

This paper provides a fin actuation system of missile based on electromagnetic-spring mechanism to miniaturize the system and lower the cost. Compared with proportional electro-mechanical actuators, the output of Electromagnetic-Spring Actuators(EMSA) has two or three discrete states, but the mechanical configuration of EMSA is simple since it does not need power trains like gears. The simple mechanism of EMSA makes it easy to build small size, low cost, and relatively high torque actuators. However, fast response time is required to improve the dynamic performance and accuracy of missiles since bang-off-bang operation of EMSA affects the flight performance of missile. In this paper the development of EMSA including parameter optimization and mathematical modeling is described. The simulation results using Simulink and experimental test results of prototype EMSAs are presented.

Key Words : Electromagnetic-Spring Actuator(전자석-스프링 구동장치), Electromagnetic Force(전자력), Flux Density(자속밀도), Spring Force(스프링력)

1. 서론

현대의 다양한 전장 환경 및 전술개념의 변화에 따라 새로운 유도무기에 대한 개발 요구가 높아지고 있다. 특히 전면전 보다 국지전 형태의 분쟁이 많이 발

생하면서 근접에서의 방어와 공격을 위해 초-소형의 유도무기 개발 필요성이 높아지고 있다. 이에 따라 구성품을 소형화하기 위한 연구가 많이 진행되고 있으며, 소형유도탄의 비용절감을 위하여 구성품의 소형화와 더불어 저비용화도 고려되어야 할 중요한 요소이다. 유도무기용 전기식 구동장치의 고효율화 및 정밀 제어를 위해 사용되는 BLDC 전동기, 불나사 등의 주요 부품들은 상대적으로 고가일 뿐만 아니라, 소형,

* Corresponding author, E-mail: sewoongut@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

정밀화할 경우 기술적 어려움 및 조립의 복잡성 등으로 상대적으로 비용이 증가하게 된다. 따라서 기존 전기식 구동장치의 소형화에 따른 비용적 한계를 극복하기 위하여 지능재료 및 새로운 아이디어를 활용한 초·소형 유도무기에 적합한 구동장치 연구가 활발히 이루어지고 있다¹⁻³⁾.

본 논문은 소형/저가격의 유도무기 개발을 위한 선행핵심과제의 한 부분으로 수행한 전자석-스프링 구동장치(Electromagnetic-Spring Actuator, EMSA) 개발에 관한 연구를 기술하였다. 선행 기술조사를 통하여 유도탄에서 요구되는 크기 및 가격을 기존의 전기식 구동장치 방식으로는 개발하기 어렵다고 판단되어 EMSA를 제안하였다. 제안한 전자석-스프링 구동장치는 동력전달 기구가 없으므로 상대적으로 단순한 구조를 가지며, 연속응답을 갖는 구동장치와 달리 on-off 이산 동작을 하므로 위치 피드백 제어를 위한 조종날개 위치 감지기가 필요 없으므로 저비용 제작에 유리하다. EMSA 개발 타당성 검토과정에서 비용에 대한 검토도 이루어졌으나 비슷한 크기의 전기식 구동장치가 개발된 실적이 없기에 객관성이 부족할 수 있다 판단되어 본 논문에서는 기술적인 내용만 기술하였다.

EMSA는 연속응답형 구동장치에 비해 조종날개 위치 제어 정밀도가 떨어지므로 고정밀 유도무기에는 적용하기 어렵지만 초·소형 유도무기와 같은 경우 상대적으로 표적속도가 느리고 고기동을 요구하지 않기 때문에 조종날개 ON/OFF 제어로도 요구 성능을 확보할 수 있다. 하지만 bang-off-bang(BOB) 구동방식의 구동장치가 국내 유도탄에 적용된 적이 없으므로 BOB 구동장치를 유도탄에 적용하기 위한 조종제어 관련 연구가 별도로 수행되었으며, 유도탄에서 요구되는 최소한의 EMSA 구동장치의 성능요구조건이 개발과정에서 도출되었다. 도출된 요구조건을 이후 설계 및 실험에 반영하였다.

본 논문의 2장에서는 EMSA를 적용한 조종제어 연구를 위한 M&S에 적용하고 구동장치 요구조건을 도출하기 위한 EMSA의 수학적 모델링과 이를 이용한 Simulink 모델을 기술하였다. 3장에서는 공간적인 제한조건에서 EMSA를 설계하기 위한 전자석설계 및 스프링 상수에 따른 실험결과를 기술하였다. 4장에서는 잔류자속 등에 의한 성능저하를 방지하기 위한 전류 제어 방식을 기술하였으며, 3장의 설계 결과에 따라 시제한 EMSA의 성능시험결과와 2장의 모델을 이용한 시뮬레이션 결과를 비교분석하였다.

본 연구를 통하여 확보한 EMSA 기본설계 기술은 향후 소형 유도무기 구동장치 개발에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

2. 전자석-스프링 구동장치 모델링

2.1 전자석-스프링 구동장치 작동원리

전자석-스프링 구동장치는 프레임, 스프링 조립체, 전자석 조립체 및 회전축 조립체로 구성되며 구동장치의 허용공간을 고려하여 2축 독립구동 구조로 설계하였다. EMSA의 구조 및 작동원리를 Fig. 1에 나타내었다. 전자석에 전압이 인가되면 전자력이 발생하게 되고, 발생된 전자력에 의한 인력으로 회전축 조립체의 회전판이 전자석에 부착될 때까지 회전하게 된다.(ON 상태) 따라서 조종날개의 최대회전각도는 회전판과 전자석의 접촉이 일어나는 위치와 동일하며 이는 회전판의 형상과 전자석의 형상 및 상대위치에 의해 결정된다. 전자석의 전압이 제거되면 회전판의 양쪽에 설치된 스프링에 의한 복원력에 의하여 회전판과 조종날개는 영점으로 복귀한다.(OFF 상태)

2.2 수학적 모델링 및 시뮬레이션

자속밀도에 의해 철심표면에 작용하는 힘은 F 는^{6,7)}

$$F = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} A [N] \quad (1)$$

B : 자속밀도, A : 극면의 단면적

μ_0 : 투자율 $4\pi \times 10^{-7}$

이며, 공극의 자기저항 \mathcal{R} 은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathcal{R} = \frac{g}{\mu_0 A} \quad (2)$$

g : 공극의 길이

기자력 \mathcal{F} 와 자속 ψ 의 관계는 식 (3)과 같다.

$$\mathcal{F} = N \cdot I = \Phi \cdot \mathcal{R} \quad (3)$$

N : 단위 길이당 턴 수, I : 전류,

Φ : 자속(wb), \mathcal{R} : 자기저항

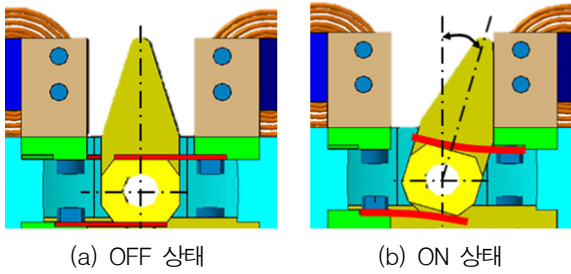


Fig. 1. Operating motion of EMSA

자속밀도 B 는 다음과 같이 표현된다.

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{N \cdot I}{\mathfrak{R} \cdot A} = \frac{N \cdot I}{\left(\frac{g}{\mu_0 A}\right) \cdot A} = \frac{N \cdot I \cdot \mu_0}{g} \quad (4)$$

따라서 철심 면에 작용하는 인력은 식 (5)와 같다.

$$F_m = \frac{1}{2} \frac{B^2 A}{\mu_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{NI\mu_0}{g}\right)^2 \frac{A}{\mu_0} = \frac{1}{2} \frac{N^2 I^2 A \mu_0}{g^2} \quad (5)$$

$$= K_T I^2$$

K_T : force 계수

회전자 축에 작용하는 힘과 변위 Δx 에 따른 스프링력은 Fig. 2의 정의에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$F_T = F_{m2} - F_{m1} \quad (6)$$

$$F_S = F_{s1} - F_{s2} = K\Delta x - K(-\Delta x) = 2K\Delta x \quad (7)$$

전자석의 전압방정식은 다음과 같이 표현된다^[8].

$$V_s = iR + \frac{d\Psi}{dt} \quad (8)$$

솔레노이드 밸브의 경우 코일 안에서 plunger가 움직이므로 솔레노이드 코일의 쇠교자속이 변화하게 된다. 따라서 코일의 인덕턴스는 plunger의 위치에 따라 변화하게 되고 이때 코일의 인덕턴스는 다음과 같이 표현된다.

$$V_s = iR + \frac{d\Psi(i,x)}{di} \frac{di}{dt} + \frac{d\Psi(i,x)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (9)$$

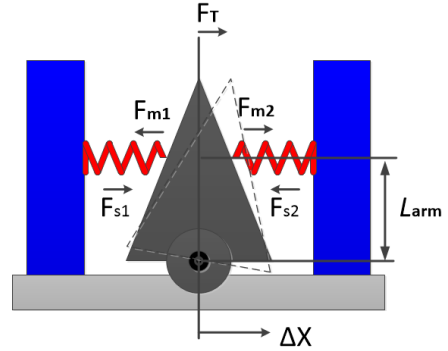


Fig. 2. Free body diagram of EMSA

인덕턴스는 다음과 같이 정의되므로

$$\Psi = Li \quad (10)$$

식 (9)의 전압방정식은

$$V_s = iR + L(i,x) \frac{di}{dt} + \frac{dL(i,x)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (11)$$

으로 표현된다. 코일 내부에서 plunger가 움직이는 솔레노이드밸브의 경우 식 (11)의 3번째 항에 의해 역기전력이 발생하므로 솔레노이드코일의 전류는 plunger의 움직임에 따라 전원이가 후 전류는 증가하다 감소 후 다시 증가하는 형태의 전류과형을 갖는다. EMSA의 경우 회전판과 전자석 사이의 공극에서는 자속이 크게 변화하나 코일 내에서의 자속은 상대적으로 변화가 적다. 따라서 회전판의 위치에 따른 코일의 자기인덕턴스 변화를 무시하면 EMSA의 전압 방정식은 다음과 일반적인 코일의 전압방정식으로 표현된다.

$$V_s = iR + L \frac{di}{dt} \quad (11)$$

EMSA의 전기-기계방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$K_T(i_2^2 - i_1^2)L_{arm} = J \frac{dw}{dt} + Bw + (2k\Delta x)L_{arm} \quad (12)$$

J : 관성모멘트, B : 점성 마찰계수

Fig. 3은 식 (5) ~ (12)를 이용한 EMSA 구동장치의 Simulink 모델이다.

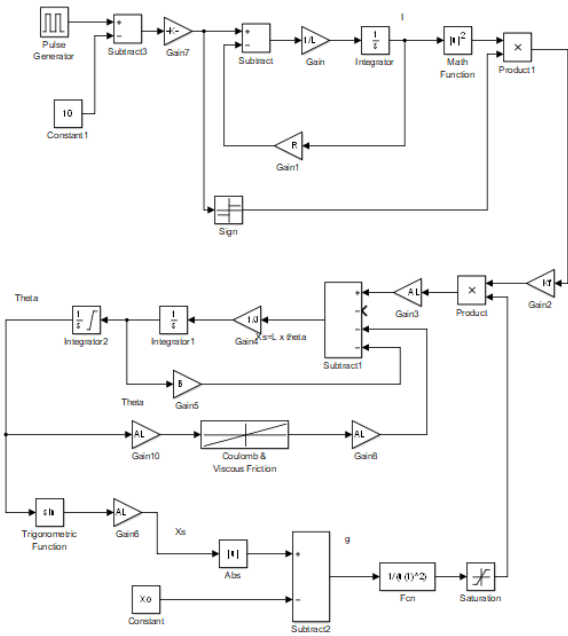


Fig. 3. Simulink model of EMSA

3. 전자석-스프링 작동기 설계

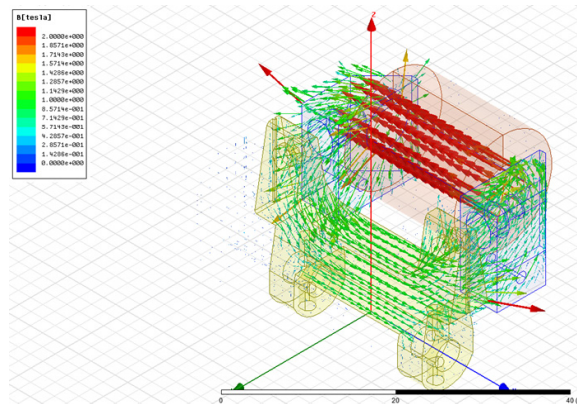
3.1 작동기 코일 설계

고정자 철심에서 발생하는 기자력은 식 (3)에서와 같이 코일의 단위 길이 당 턴 수와 코일에 흐르는 전류에 의해 결정된다. 코일의 턴 수와 전류는 코일이 감기는 전자석의 코어와 전선의 직경에 의해 결정된다. Table 1은 철심의 직경이 6 mm 일 때 코일의 직경에 따른 최대 턴 수 및 전류 밀도 등을 나타낸다. 코일 직경이 증가함에 따라 턴 수는 감소하나 전류가 증가하여 전자력은 증가하게 된다. 하지만 코일의 전류 및 전류밀도가 증가함에 따라 동손이 증가하여 작동 중의 코일의 온도가 상승하게 된다. 코일온도의 상승은 저항을 증가시켜 전류를 감소시키므로 작동 중 전자력 감소로 인한 성능저하가 발생한다. 동손이 심한 경우 절연재의 소손에 의하여 코일이 파손되므로 작동시간이 제한되게 된다. 동손에 따른 발열 및 최대 운전시간을 고려할 경우 0.26 mm 이하의 코일직경이 적절한 것으로 분석되었다.

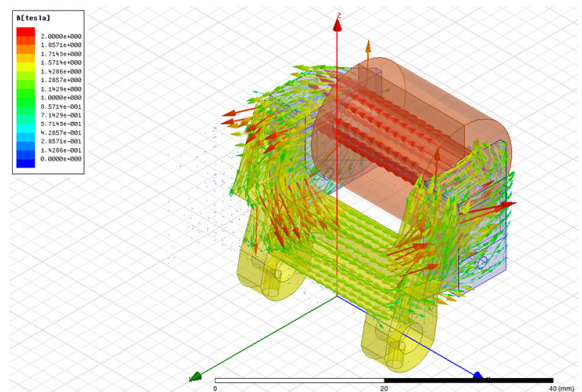
코일의 전류 및 회전판의 위치에 따른 자속과 회전판에 작용하는 전자력을 계산하기 위하여 유한요소법을 사용하였다. 일반적인 전동기의 경우 전동기의 축

Table 1. Design parameters of coils

권선직경[mm]	0.24	0.25	0.26	0.27
턴 수	1368	1200	1100	1050
전체저항[Ω]	17.08	13.80	11.70	10.36
전압[V]	28.0	28.0	28.0	28.0
전류[A]	1.64	2.03	2.39	2.70
점적율[%]	63.8	60.7	60.2	62.0
전류밀도[A/mm ²]	36.25	41.32	45.08	47.23



(a) When rotation angle is zero



(b) When rotation angle is maximum

Fig. 4. Analysis of electromagnetic flux

길이 방향으로서는 형상 변화가 없으므로 자속밀도 해석은 2차원 단면을 기준으로 수행하나 EMSA의 경우 형상이 상대적으로 복잡하여 전체 모델에 대한 3차원 해석이 필요하다. Fig. 4와 5는 회전판의 위치에 따른

자속벡터도와 자속밀도 분포도이다.

그림에서 보는 바와 같이 회전판이 영점에 있을 때에는 공극 및 회전판을 지나는 자속이 적으며, 회전판이 전자석에 가까워 질수록 공극과 회전판 내에서의 자속이 증가하게 된다. 회전판의 형상은 관성을 줄이기 위하여 요철 형태로 설계되었으므로 자속이 증가함에 따라 일부분에서 상대적으로 자속밀도가 증가함을 알 수 있다. 따라서 전자력에 회전 시 자기 포화가 일어나지 않도록 코일의 직경선정과 전자석 철심, 회전자 형상을 설계하였다. 자속밀도 해석을 통하여 Table 1의 코일 직경 및 회전각도에 따른 전자력을 계산하여 Table 2에 나타내었다. Table 2의 전자력은 측정된 힘 중 최대값을 기준으로 정규화 하여 나타내었다. 코일의 직경 및 턴 수에 따른 전자력과 발열을 고려하여 코일의 직경을 0.26 mm로 선정하였다.

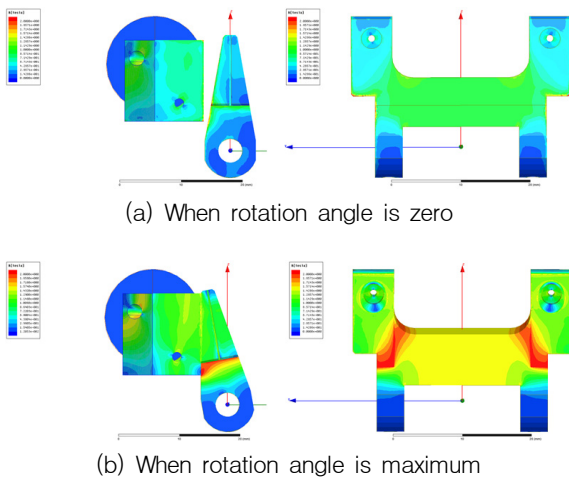


Fig. 5. Distribution of magnetic flux density

Table 2. Electromagnetic forces according to coil turns & diameters

권선직경 [mm]	턴 수	힘[normalized N]	
		0도	최대회전각
0.23	1248	0.098	0.95
0.24	1200	0.102	0.96
0.25	1100	0.106	0.98
0.26	1050	0.111	1.00

3.2 스프링 상수 선정

전자석-스프링 구동장치에서 구동력은 전자석의 자기력에 의해 발생되고 영점으로의 복원력은 스프링에 의해 발생되므로 전자력과 스프링복원력의 비율에 따라 구동성능이 변화하게 된다. 스프링복원력이 작은 경우 전원이 OFF 되어 영점으로 복귀할 때 복원력이 부족하여 응답성능이 떨어지게 된다. 반대로 스프링복원력이 큰 경우 ON 했을 회전력이 부족하여 성능이 저하되고 심한 경우 조종날개가 최대회전각에 도달하지 못하게 된다. 따라서 스프링복원력과 전자력의 비율이 EMSA 구동장치 응답성능에 영향을 미치므로 실험을 통하여 스프링 상수를 선정하였다. 회전판의 회전각도에 따른 전자력과 스프링복원력을 측정하기 위해 0~17 도까지 회전이 가능한 시제품을 만들고 회전변위에 따른 전자력과 스프링상수에 따른 스프링력을 push-pull 게이지를 이용하여 측정하였다. Fig. 6은 전자석에 의한 전자력과 스프링 종류(상수)에 따른 스프링 복원력을 회전판의 회전각도에 따라 나타내었다. 그래프에서 표시된 힘은 실험을 통하여 측정된 힘 중 가장 큰 힘을 기준으로 정규화 하여 나타내었다

그래프에서 회전각도가 17도 일 때 즉 회전판과 전자석은 밀착되며 이때 전자석은 최대힘을 발생하고 회전판이 전자석에서 멀어지면서 즉 영점에 가까워지면 회전판에 미치는 인력이 감소하게 된다. 반면 스프링복원력은 영점에서부터 증가하게 된다. 만약 최대회전각이 7도가 되도록 EMSA가 설계가 한다면 Fig. 6의 그래프에서 전자석은 17~10도 작동범위에 해당되게 되고 스프링의 작동범위는 0~7도가 된다. 따라서 전자력에 의한 인력은 최대각도에서 1.0 N이 되고 영점에서는 0.3 N이 된다. 스프링 A의 복원력은 최대회전각에서 0.05 N이 되고 영점에서의 복원력은 0 N이다. 따라서 EMSA는 최대회전각에서 0.95N, 영점에서 0.3 N의 힘을 발생할 수 있게 된다. 스프링 D의 경우 최대회전각에서 0.2 N의 복원력이 발생한다. 따라서 스프링 D를 적용한 EMSA는 최대회전각에서 0.8 N의 최대힘을 갖는다. 이와 같은 방법으로 Fig. 6의 실험 결과를 이용하여 EMSA의 최대 힘 또는 최대 토크를 만족하기 위한 스프링상수를 선정할 수 있다. 하지만 EMSA의 최대 각속도, 지연시간, 주파수 응답특성 등은 스프링반력과 전자력의 비율에 의해 영향을 받으므로 스프링 상수에 따른 주파수 대역폭 시험 등을 통하여 스프링을 선정하였다.

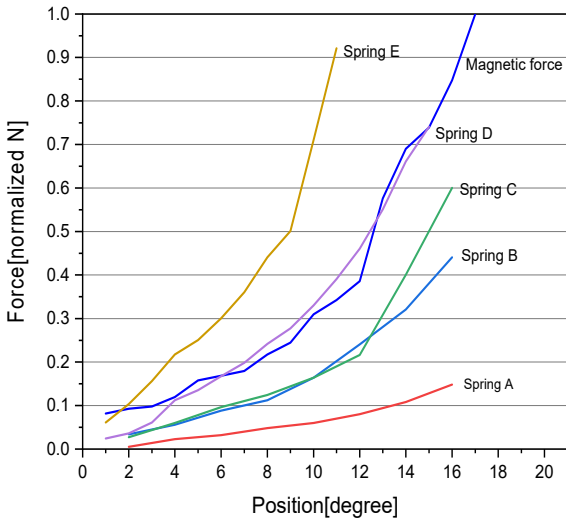


Fig. 6. Generating torque of spring force and electromagnetic force

4. 실험 및 시뮬레이션 결과

4.1 잔류자속에 의한 영향제거

코일에 공급된 전류에 의한 기자력(H)과 철심에 유도된 자속밀도와와의 상관관계를 나타내는 자기이력곡선(B-H곡선)은 잘 알려진 바와 같이 히스테리시스 특성을 갖는다. 즉 기자력 증가에 의해 유도자속 밀도가 증가한 후 기자력이 다시 영(零)으로 감소하여도 코어의 자속밀도는 영(零)이 되지 않는다. 이때의 자속밀도를 잔류자속밀도(remnant flux density)라 한다. 이후 기자력이 음의 방향으로 증가하면 잔류자속밀도는 감소하여 영(零)이 되었다가 음의 방향으로 증가한다. 코어의 유도 자속밀도가 영(零)이 되는 음의 기자력을 보자력(coercive force)이라 한다.

EMSA의 전자석 코어도 히스테리시스 B-H특성을 가지므로 전자석에 인가되는 전류가 영이 되어도 코어의 자속밀도는 소거가 되지 않고 잔류자속으로 남아 있게 된다. 잔류자속은 전자력에 의한 인력을 발생하므로 스프링에 의한 복원력을 방해하는 부하로 작용하여 off 시 응답특성을 저하시키게 된다. 또한 turn off 시 코일에 흐르는 전류는 인덕턴스로 인하여 급격히 감소하지 못하고 freewheeling 회로를 통하여 서서히 감소하게 되므로 기자력 또한 천천히 감소하게 된다. 따라서 EMSA는 인덕턴스에 의한 전류지연과 잔

류자속에 의한 전자력에 의하여 지연응답이 발생하므로 출력은 입력 명령에 대하여 위상차를 갖는다. EMSA의 주파수 특성 시험 중 동작 주파수가 증가하면 지연응답의 영향성이 증가하여 출력의 위상차가 증가하게 된다. 심한 경우 전자석이 turn off 한 후에도 회전판이 전자석에서 떨어지지 못하는 경우가 발생하기도 한다. Fig. 7은 구동장치 요구 주파수대역폭의 1/2에 해당되는 주파수에서의 동작시험결과이다. 그림에서 보는바와 같이 위상지연이 발생하고 응답의 duty 비도 불균형하게 된다.

이러한 지연응답을 방지하기 위하여 본 연구에서는 turn off 시 역방향 전류를 이용하여 보자력을 인가하였다. 보자력을 인가하면 잔류자속이 제거가 되므로 잔류자속에 의한 지연응답을 방지할 수 있을 뿐만 아니라, 보자력 발생을 위하여 인가한 역방향 전압으로 인하여 기존보다 전류가 빠르게 감소하게 된다. 따라서 전류지연에 의한 기자력 효과도 감소하게 된다.

EMSA의 기자력을 제어하기 위하여 전자석 구동회로를 H 브리지로 구성하여 Fig. 8과 같이 on 할 때는 +의 전압(전류)을 인가하고, off 할 때는 -의 전압(전류)을 인가하였다. H 브리지 구동회로 특성상 공급되는 전류의 크기는 제어하지 못하므로 역전압이 인가되는 시간을 제어하여 보자력을 제어하였다. Fig. 9는 2 ms 동안 역전압을 인가하였을 때의 EMSA의 응답 특성이다. Fig. 7의 응답특성과 비교하여 위상차 및 응답특성이 향상됨을 알 수 있다.

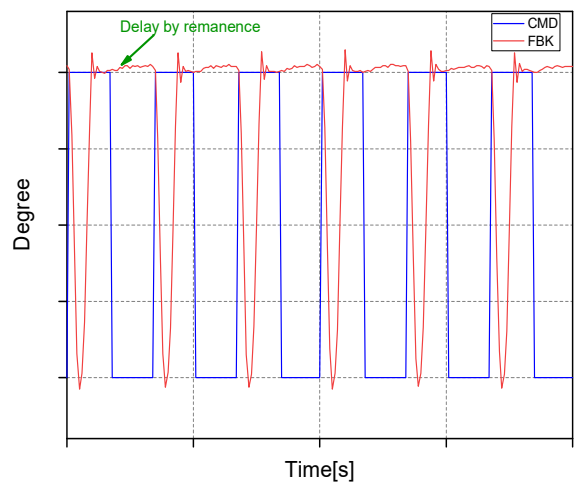


Fig. 7. Time response without degaussing current

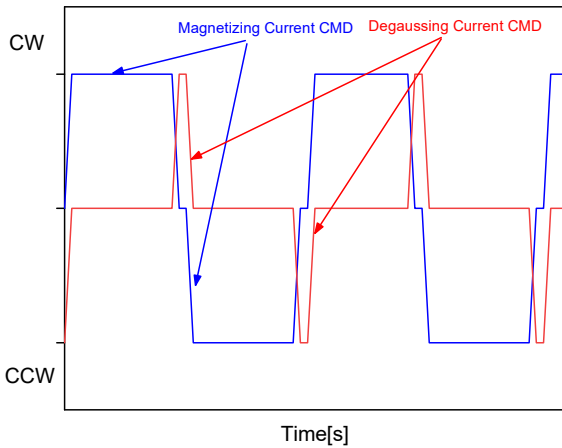


Fig. 8. Degaussing current control scheme

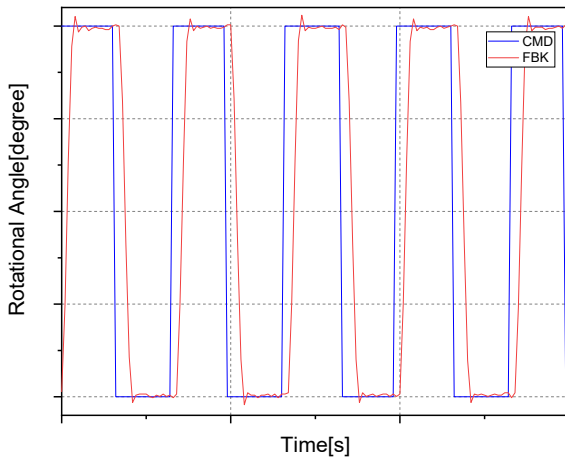


Fig. 9. Time response with 2 ms degaussing current

4.2 스프링 상수에 의한 응답특성

선형응답특성을 갖는 구동장치의 주파수 응답시험의 경우 정현파 명령을 인가하고 동작 주파수를 연속적으로 증가시키면서 구동장치의 응답특성을 분석한다. 주파수 시험을 통하여 구동장치의 진폭 및 위상차 주파수 대역 뿐만 아니라 공진 등에 의한 주파수 응답특성을 분석하기 위하여 FFT 분석 후 Bode 선도로 나타내고 필요시 주파수 응답특성을 제어하게 된다.

EMSA의 경우 입력명령은 ± 최대각이므로 주파수 응답시험을 위한 명령은 진폭은 ± 최대각으로 동일하고 시간에 따라 주파수가 증가되는 구형파형의 형태를 갖는다. EMSA와 같은 구형파의 입출력을 FFT하면 기본파와 고조파성분으로 분해하여 비교하게 된다. 구

Table 3. Frequency response by springs

구분	주파수	0.2	0.4	0.6	0.8	1.00
		C	진폭 0.93	0.91	0.96	0.97
	위상	50.4	108	151	230	288
D	진폭	0.99	0.98	0.98	0.99	0.45
	위상	43.2	72	108	144	288
E	진폭	0.2	0.2	0.3	0.5	0.8
	위상	28.8	57.6	65.1	86.4	108

주파수[normalized], 진폭[normalized], 위상[degree]

동장치의 경우 고조파에 대한 응답특성이 떨어지므로 FFT를 이용한 분석과 구형파를 이용한 분석과 큰 차이가 없다. 따라서 본 연구에서는 구형파의 입력 주파수를 5~10의 배수로 증가시키면서 FFT 분석없이 입력에 대한 출력의 진폭비와 위상차를 계산하였다. BOB 운전특성을 고려하여 주파수대역폭의 진폭기준은 일반적인 70 %(-3 dB) 대신 90 %, 위상기준은 -90도로 설정하여 평가하였다.

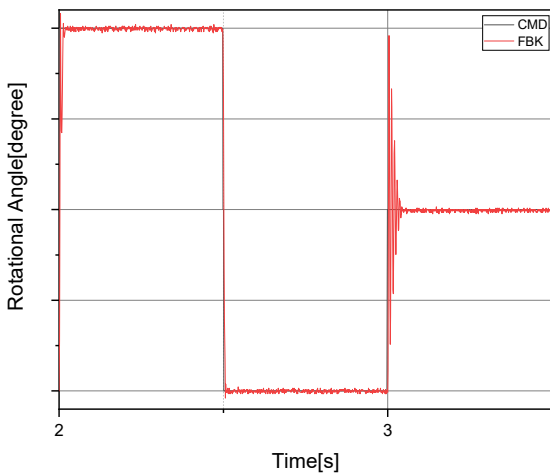
스프링 상수에 따른 주파수 응답특성을 시험하기 위하여 Fig. 6의 C, D, E 스프링을 이용하여 주파수 응답특성 시험을 수행하였다. 가장 좋은 성능을 갖는 EMSA를 기준으로 정규화한 실험결과를 Table 3에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 스프링 상수가 작을 경우(C) 진폭 특성은 우수하나 위상차가 빠르게 증가한다, 스프링 상수가 클 경우 (E) 위상차는 적게 발생하나 회전판이 전자석까지 도달하지 못하여 진폭응답특성을 만족하지 못하였다. 전자석과 유사한 기울기를 갖는 스프링(D)의 경우 진폭응답 및 위상차에서 요구조건을 모두 만족하였다,

4.3 시뮬레이션 및 실험결과 비교

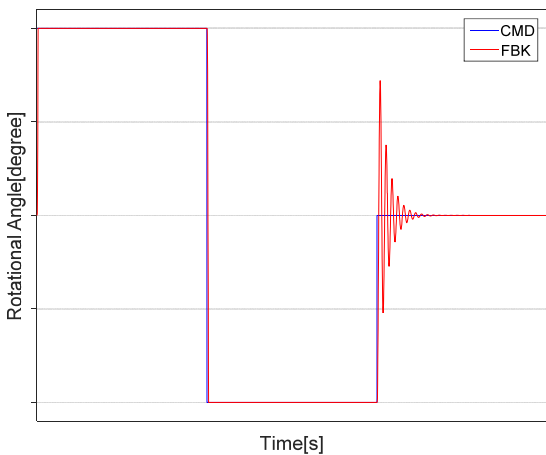
스프링 D를 적용하여 제작한 구동장치를 상온조건에서 성능시험을 수행하였다. 계측을 위하여 구동장치 외부에 위치감지기를 설치하였으며 구동명령은 Bang-Bang 방식으로 +, - 최대값을 인가하였다. 실험결과를 Fig. 10~11에 나타내었다. Fig. 10은 1 Hz 구동명령에 대한 실험 및 시뮬레이션 결과이며, Fig. 11은 요구조건 주파수대역에서의 구동명령에 대한 실험 및 시뮬레이션 결과이다. 실험결과 저속 및 고속운전 모두 잔

류자속 등에 의한 지연을 보상하였으므로 bang-bang 명령을 잘 추종하고 있다. Fig. 10에서 보는바와 같이 구동명령이 영(零)이 되는 경우 실험 및 시뮬레이션 응답모두에서 진동이 발생하였다. 전자력이 모두 off 된 상태에서는 양쪽 스프링의 에너지 수수가 발생하는데, 이때 시스템 댐핑이 부족하게 되면 진동이 발생하게 된다. 2.2절에서 개발한 Simulink 모델을 이용한 시뮬레이션을 통하여 영(零)도 명령 시의 진동 발생을 예측할 수 있었으며 지연 시간 및 상승 시간 또한 유사함을 나타내었다. 향후 진동을 방지하기 위한 댐핑

의 크기와 댐핑이 성능이 미치는 영향성 분석 등 EMSA 기본설계와 유도탄 성능분석에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 고주파수 주파수 시험결과 EMSA의 최대회전각은 회전판과 전자석의 접촉에 의해 제한되므로 오버슈트는 발생할 수 없으나, Fig. 11 (a)에서 보는 바와 같이 회전판이 전자석과 부딪히면서 과도상태가 발생하였다. 이의 원인으로 회전판이 전자석에 충돌 후 반발력 등에 의한 이격 발생과 위치센서 연결부의 유격 등에 의한 영향으로 추정된다. 보다 정밀한 계측을 통한 추가 분석이 필요하다.

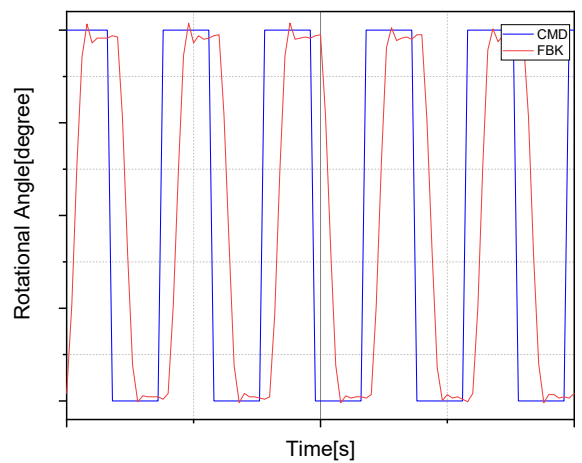


(a) Experimental result

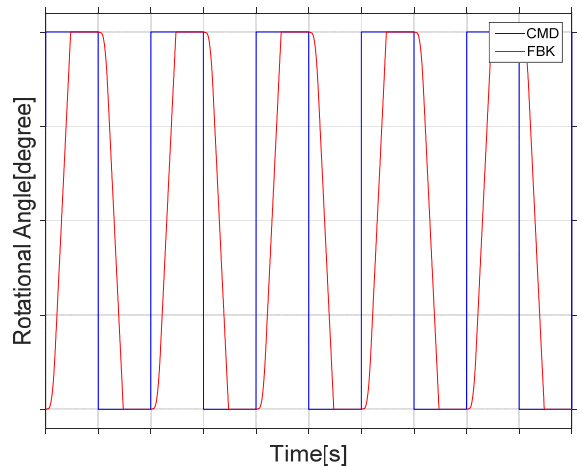


(b) Simulation result

Fig. 10. Experimental test and simulation results for low frequency



(a) Experimental result



(b) Simulation result

Fig. 11. Experimental test and simulation results for high frequency

5. 결 론

소형 유도무기에서 요구되는 소형, 저가의 구동장치를 개발하기 위하여 전자석과 스프링을 이용한 전기식 구동장치를 개발하였다. 전동기를 이용한 기존의 전기식 구동장치의 경우 연속 및 선형응답특성을 가지므로 제어능력이 우수하나 전동기 및 동력전달 장치에 의하여 가격이 상승하고 공간적인 제약이 따르게 된다. 반면 전자석-스프링 구동장치의 경우 구조적으로 단순하고 구성품이 간단하여 소형화 및 저비용화에 유리하다. 하지만 bang-(off)-bang 운전 특성에 의하여 제어 성능이 떨어지게 된다.

본 논문에서는 전자석-스프링 구동장치의 개발을 위하여 수행한 수학적 모델과 작동기 구성품 설계를 위한 해석 및 실험에 대하여 기술하였다. 시뮬레이션을 이용하여 EMSA 개념설계를 수행하고, 자속포화 없이 최대 전자력이 발생하도록 전자석을 설계하였으며 전자력과 스프링 복원력 측정시험을 통하여 스프링을 선정하였다. 시험제작한 구동장치를 이용하여 주파수 성능시험을 수행하여 시제한 구동장치의 성능을 분석하고 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 본 연구에서 개발한 모델 및 설계기법이 EMSA 개발에 유효함을 확인하였으며, 향후 최적화 설계 및 시스템 제어기법 개발에 도움이 될 것으로 판단된다.

References

- [1] Junghoon Noh, Kyongkuk Cho, Seongjun Kim and et al., "Development of Application for Guidance and Controller Unit for Low Cost and Small UAV Missile based on Smart Phone," J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 37, No. 7, pp. 610-618, 2017.
- [2] Seongheon Lee, Hanjin Cho, Youngki Cho, and et al., "Recent Status on Miniture Smart-bullet Techniques," J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 43, No. 3, pp. 272-281, 2015.
- [3] Rob M. E. M. van Heijster, huub L. J. Keizers, 2004, "Future Trends for the Application of MEMS in Missiles and Gun Launched Munitions," <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a428644.pdf>(accessed October 17, 2018).
- [4] Jane's International Defense Review, "Lighten up : Shoulder-Launched Weapon Systems Come of Age," https://www.janes.com/images/assets/442/49442/shoulder-launched_weapon_systems_come_of_age.pdf(accessed October 17, 2018).
- [5] James F. Jones, Brian A. Kast, Mare W. Kniskern and et al., "Small Caliber Guided Projectile," US Patent, 7,781,709, B1 Aug. 24. 2010.
- [6] Willian H. Hayt, Jr. John A. Buck, "Engineering Electromagnetics," Sixth Ed., Interactive e-Text, McGraw, USA, pp. 274-321, 2001.
- [7] Dan B. Marghitu, "Mechanical Engineer's Handbook," Academic Press, USA, pp. 244-336, 2001.
- [8] Manu balakrishnan, Navaneeth Kumar N, "Detection of Plunger Movement in DC Solenoids," Texas Instrument, SSIY-001, June, 2015.