

고기동 추력기 밸브 구동용 날개연동형 전기식 구동기 개발

서민호* · 허돈* · 김은수* · 박상준*† · 장기원*

Development of an Electromechanical Actuator Interlocked with Canard for a Rapid Maneuvering Side Thruster's Valve

Minho Seo* · Don Hur* · Eunsoo Kim* · Sangjoon Park*† · Kiwon Jang*

ABSTRACT

A valve's high response for controlling thruster is essential for rapid turning during initial short moment after launching. The actuator for controlling the valve is simultaneously used in controlling canard of a guided missile. This paper explain development process for the electromechanical actuator interlocked with canard by arranging in following order, design, analysis, manufacture, test and evaluation.

초 록

유도탄 발사 초기 짧은 순간의 급선회를 위해선 고응답의 밸브 구동이 필요하게 되는데 이를 탄전두부 날개구동과 연동시켜 구동하게 하는 전기식 구동기 개발을 목표로 하였다. 본 논문은 이 전기식 구동기의 설계, 해석, 제작, 시험 및 평가 순서로 정리함으로써 날개와 연동된 초기선회형 측추력기용 구동장치의 개발 과정을 소개하는 것을 내용으로 하고 있다.

Key Words: High Maneuvering Thruster(고기동 추력기), Electromechanical Actuator(전기식 구동기), Interlocked with canard(카나드 연동형)

1. 서 론

유도탄은 기존 공력제어 방식으로 고기동 성능을 달성하기 어렵다. 요구되는 고기동을 구현하기 위한 방법으로 유도탄의 무게중심 또는 탄두부에서 탄의 진행방향과 수직인 방향으로 jet을 분사하는 방법을 사용하게 되는데 이와 같은

방식의 추력기를 측추력기라한다. 유도탄에 사용되는 측추력기는 적용기술에 따라 초기선회형, 노즐개방형, 연속형 등으로 나눌 수 있다. 본 연구는 초기선회형 측추력기로써 jet의 분사각도 및 분사량 조절을 유도조종용 날개 구동장치와 연동하는 고속, 정밀 구동기 개발을 목표로 설계, 해석, 제작, 시험평가를 진행하였다.

2. 본 론

* (주)한화 항공우주/기계연구소

† 교신저자, E-mail: sjparksj@hanwha.co.kr

Table 1. Actuator requirement

항목	목표사양
최대토크	9.3 Nm
날개작동범위	±15°
반응속도	≤ 30ms

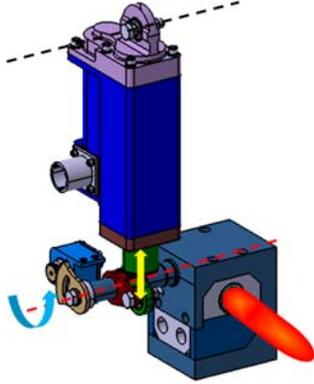


Fig. 1 구동기 형상/ 메카니즘

2.1 설계

본 연구에서 개발된 고기동 추력기 벨브구동용 전기식 구동장치의 목표사양은 Table 1과 같다. 날개는 회전각에 따라 노즐 목면적이 바뀌어 최대 15°에서 최대추력이 발생하는 구조이며, 이때 구동기에 최대토크가 작용한다. 날개의 공력 부하에 따른 토크는 이번 연구 단계에서 반영하지 않았다.

Figure 1은 측추력방향과 추력을 조절하는 카나드와 연동된 구동기의 작동 메카니즘을 나타낸다. 구동기는 Linear Type으로 제어기 신호에 의해 모터에서 발생한 회전력은 기어트레인과 볼나사를 통해 피스톤의 직선운동으로 변환한다. 피스톤은 날개와 연결된 모멘트암을 구동하여 날개를 회전시킨다. 이러한 볼나사를 사용하는 형식은 크기가 크고 무거워지는 단점이 있지만 높은 감속비와 큰 구동력을 낼 수 있으며 정밀 구동이 가능하다는 장점이 있다. 구동기 내부 별도의 센서를 장착하지 않았으며, 날개의 변위는 외장형 분압기에 의해 피드백 된다. 이 분압기는 기 개발된 유도탄에 적용되어 성능이 입증된 제품을 사용하였다[1]. 분압기에 역회전방지기어를

Table 2. Actuator Design

모터	구동전압	36 VDC
	Nominal Torque	0.143 Nm
	Nominal Speed	11,600 rpm
	Stall Torque	2.57 Nm
볼나사	리드	6 mm
Margin	하중여유	-14.24 %
	속도여유	89.89 %

*Margin 값은 Nominal 값 기준

적용하였으며, 분해능 향상을 위해 날개축에 섉터기어를 적용하여 분압기와의 감속비를 증가시켰다.

Table 1의 요구조건을 충족시키도록 전기식 구동기를 다음과 기본설계를 수행하였다.

모터는 해외 전문업체의 BLDC모터를 적용하였으며, Nominal Torque는 0.143 Nm, Stall Torque는 2.57Nm이다.

기어트레인의 효율은 $\eta_{Gear} = 90\%$ 로 가정하였으며 모터와 볼나사의 축간거리를 고려하여 이들 기어를 적용한 2단으로 설계하였다.

볼나사의 효율은 $\eta_{screw} = 90\%$ 로 가정하였으며, 리드는 반응속도 요구조건을 만족하고 제한된 회전속도와 기어트레인의 감속비를 고려, Eq. 1, 2에 의해 6mm로 선정하였다.

위 설계된 내용을 바탕으로 하중여유와 속도

$$T_{screw} = T_{motor} \times \text{감속비}_{Gear} \times \eta_{Gear} \quad (1)$$

$$F_{screw} = \frac{T_{screw} \times 2\pi \times \eta_{screw}}{lead} \quad (2)$$

$$T_{wing} = F_{screw} \times L_{momentarm} \quad (3)$$

$$T_{Margin} = \frac{T_{wing} - T_{req}}{T_{req}} \times 100 \quad (4)$$

$$RPM_{screwmax} = \frac{RPM_{motor}}{\text{감속비}_{Gear}} \quad (5)$$

$$\text{감속비}_{ballscrew} = \frac{360}{\arcsin\left(\frac{0.5 \times lead}{L_{momentarm}}\right) \times \frac{360}{\pi}} \quad (6)$$

$$RPM_{wing} = \frac{RPM_{screwmax}}{\text{감속비}_{screw}} \quad (7)$$

$$SpeedMargin = \frac{RPM_{wing} - RPM_{req}}{RPM_{req}} \times 100 \quad (8)$$

여유를 Eq.4, 8에 의해 계산하였다. 하중여유의 경우 Nominal Torque 기준 -14%로 모터의 Stall Torque(2.57Nm)와 구동기의 작동시간이 1sec 미만임을 고려할 때 적절하다고 판단되며 속도여유의 경우 89.89%로 시스템의 관성모멘트 등을 고려하여 충분한 여유를 두고 기본 설계를 진행하였다.

2.2 해석

2.2.1 구조해석

기어의 경우 Lewis Equation(Eq. 9)과 Hertzan Equation(Eq. 10)을 적용하였으며 해석조건 및 결과는 Table 3과 같다.

$$\sigma_b = \frac{P \cdot f_s \cdot f_w}{f_v \cdot b \cdot m \cdot y} \quad (9)$$

$$\sigma_c^2 = \frac{0.35P_n \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)}{b \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}, \quad r_1 = \frac{D_1}{2} \sin \alpha, \quad r_2 = \frac{D_2}{2} \sin \alpha \quad (10)$$

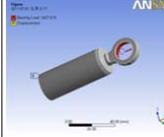
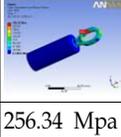
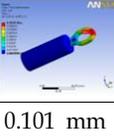
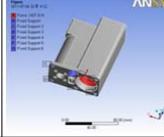
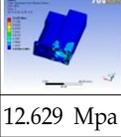
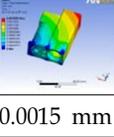
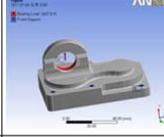
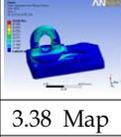
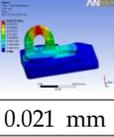
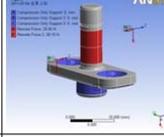
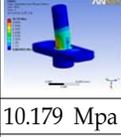
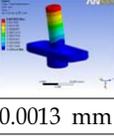
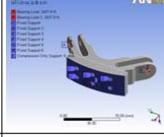
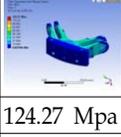
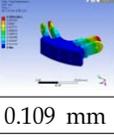
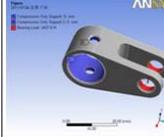
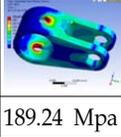
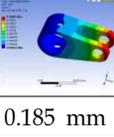
설계된 구동기 모델링을 바탕으로 하우징을 포함한 주요구성품 6종에 대한 구조해석을 실시하였다. 해석대상의 재질은 선형탄성체임을 가정하였고, 시간응답이나 소성변형은 고려하지 않은 선형해석에 국한해 해석을 진행하였다. 재료의 물성치는 MIL 핸드북[2]의 값을 적용하였다. 구조해석 결과를 바탕으로 일부부품은 중량감량을 위한 최적화 작업을 수행하였으며, Table 4와 같이 결과를 정리하였다.

Table 3. Gear Analysis

대상	모터기어	아이들#1	아이들#2	불나사기어
피치원경	12mm	24mm	20mm	28mm
기어잇수	15	30	25	35
잇폭	3	4	4	3
굽힘응력	27.53	17.47	19.16	23.89
압축응력	65.87		59.75	
굽힘여유	2.52	4.55	4.06	3.06
압축여유	1.37		1.62	

*440C 반복굽힘강도 : 98 kgf/cm2, 압축강도 : 156.498 kgf/cm2

Table 4. Structure Analysis

대상 (안전율)	해석조건	해석결과	
		최대등가응력	최대변위
피스톤 (1.69)		 256.34 Mpa	 0.101 mm
하우징 (High)		 12.629 Mpa	 0.0015 mm
작동기 힌지 (1.29)		 3.38 Map	 0.021 mm
아이들 기어핀 (High)		 10.179 Mpa	 0.0013 mm
작동기 고정 브라켓 (2.48)		 124.27 Mpa	 0.109 mm
모멘트암 (1.29)		 189.24 Mpa	 0.185 mm

2.2.2 성능해석

성능해석 시 구동장치의 수학적 모델링을 위하여 구동기를 감속비가 일정한 기어트레인으로 연결된 단순구조로 가정하였다[1]. 모터상수와 부하 조건을 고려하여 성능해석을 수행하였으며 수행조건 Table 5와 같다. 1차 성능해석을 위해 시스템의 점성마찰계수는 모터 제조사에서 공급받은 값을 적용하였으며, 시스템이 완성된 후 구동기 정속시험을 통해 시스템 전체 점성마찰계수를 획득하여 최종 성능해석을 재수행할 계획이다[3]. Fig. 2에서 STEP 명령에 대한 성능해석 결과를 나타내었다. 명령에 대한 90% 추종시의 속도를 반응속도로 볼 때 해석상 35msec의 값을 나타내고

Table 5. Performance Analysis

대상	해석조건	
부하조건	$T = \frac{-9.3}{15} \times \theta [Nm]$	
등가 관성모멘트	6.108E-6 kgm2	
등가 점성마찰계수	5.9E-7	
모터상수	전압	36 VDC
	최대전류	2A
	저항	0.386Ω
	인덕턴스	0.0653 mH
	속도상수	346 RPM/V

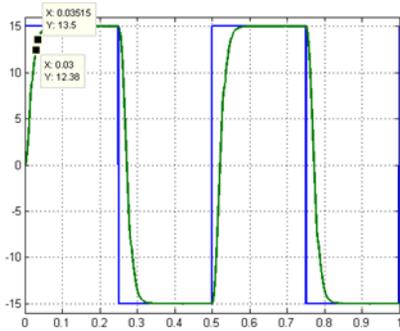


Fig. 2 Performance Analysis

있으며, 이는 향후 제어게인을 조정하여 최적화할 예정이다.

2.3 제작 및 시험평가

설계, 해석한 결과에 따라 1차 시제품을 제작하였으며 Fig. 3은 구동기 조립체의 완성된 시제품 사진이다. Fig. 4는 제작된 구동기 시제품과 성능시험을 위하여 제작된 시험장치 모습이다. 사각의 토션바를 적용하여 최대 변위시 가장 큰 토크를 발생하도록 하는 고정부하시험을 수행할 수 있도록 하였다.



Fig. 3 1차 시제 구동기

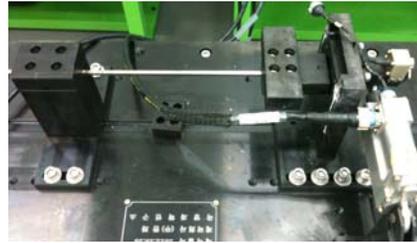


Fig. 4 성능시험장치

토션바의 길이를 조절할 수 있으며 요구조건인 15°에서 정해진 토크를 발생시키도록 설계되었다. 정확한 성능평가를 위하여 날개형상에 따른 질량 관성모멘트를 고려한 모의 치구를 적용하였으며, 시험기에도 실제 장착조건과 동일한 베어링만을 적용하였다. 현재 구동성능시험이 일부 진행이 되었고 성능해석 결과와 유사한 반응속도를 나타내고 있으며, 추가 성능시험 및 부하시험을 통한 제어게인 최적화를 진행할 예정이다.

3. 결 론

본 개발을 통해 고기동 추력기에 적용되는 날개연동형 전기식 구동기에 대한 설계/제작을 완료하였으며 현재 무부하/부하 시험평가를 진행하고 있다. 향후 시스템 특성분석 및 제어 게인 최적화를 완료 및 밸브 조립체와의 통합 성능시험을 진행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. 서민호, 정규진, 이상문, 박치형, 김은수, 이종철, 박상준, 장기원, “유도로켓용 전기식 구동기 개발” 제14차 유도무기학술대회, 2007, pp191~197
2. MIL-HDBK-5J, "METALLIC MATERIALS AND ELEMENTS FOR AEROSPACE VEHICLE STRUCTURES"
3. 변윤섭, 목재균, 김영철, “전동기 점성마찰계수 특성에 관한 연구” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2007, pp1082~1083