

보조 동력 장치 연료 공급용 서보밸브의 토크모터 전자기 해석

장세명* · 장강원** · 정현술*** · 이동호****

Electromagnetic Analysis on the Torque Motor of Servo Valve for the Fuel Supply System of Auxiliary Power Unit

Se-Myong Chang* · Gang-Won Jang** · Heon-Sul Jeong*** · Dong-Ho Rhee****

ABSTRACT

As a main part of an utility helicopter, the APU(Auxiliary Power Unit) has a solenoid valve system operated with a torque motor, which controls the flow rate in the fuel supply system. In this paper, we solved the Maxwell potential equations to analyze the electromagnetic force in the torque motor, and some additional analytic methods are used to compute the quantity of torque produced by the torque motor for the given circuit current. For the convenience, small displacement is assumed, and only magneto-static problem is considered for the two-dimensional cross section. The result will be compared with the three-dimensional analysis that will be studied in the near future.

Key Words: Torque Motor, Solenoid, Servo Valve, Electro-magnetics, Fuel Supply System, APU

기호설명

<i>A</i>	: 자기 포텐셜 [N/A]
<i>a</i>	: 코일의 평균 반경 [m]
<i>B</i>	: 자기 유속 밀도 [N/(Am)]
<i>c</i>	: 전자기파의 전파 속도 [m/s]
<i>d</i>	: 두 솔레노이드 사이 유효 길이 [m]
<i>E</i>	: 전기 유속 밀도 [N/(As)]

Δi	: 전류 차	[A]
<i>J</i>	: 전류 밀도	[A/m ²]
<i>L</i>	: 인덕턴스	[Nm/A ²]
<i>N</i>	: 코일의 감은 횟수	
<i>R</i>	: 저항	[\Omega, Nm/(A ² s)]
ϵ	: 유전율	[A ² s ² /(Nm ²)]
μ	: 투자율	[N/A ²]
τ	: 토크	[Nm]
σ	: 도전율	[A ² s/(Nm ²)]
ξ	: 자기 쌍극자 모멘트	[Am ²]

* 정희원, 군산대학교 기계공학부

** 군산대학교 기계공학부

*** 군산대학교 기계공학부

**** 한국항공우주연구원 KHP 엔진팀

연락처자, E-mail: smchang@kunsan.ac.kr

1. 서 론

보조 동력 장치(APU, Auxiliary Power Unit)는 가스 터빈 추진 방식의 항공기에서 전원 등과 같은 주 추진 동력 이외의 장치를 구동하기 위해 사용된다. 모든 다른 엔진들에서와 마찬가지로 보조 추진 장치는 비행 상태와 운전 조건에 따라 적절한 연료 공급이 필요하며, 연료의 유량은 솔레노이드를 사용하는 전자 유압식 서보 밸브(EHV, Electro-Hydraulic Servo Valve)를 이용하여 조절한다[1].

EHV는 보통 토크모터, 유압 증폭부, 그리고 스플 및 슬리브 등으로 구성된다. 이 중 토크 모터는 피드백 신호를 받아 이 신호를 밸브를 시동시키는 토크로 변환시킨다(Fig. 1). 아마추어(armature)라고 부르는 금속 막대 둘레에 감긴 코일 솔레노이드에 일정 전류를 통하여 주면, 자기력이 발생하여 금속 막대는 전자석으로 변하게 된다. 이때, 영구 자석 등을 이용하여 일정 방향으로 자기장을 가해 주었다면, 주어진 자기장 안에 설치된 전자석에서는 이 자기장과 정렬하려는 토크가 발생한다(Fig. 2). 이 토크의 크기는 매우 작아서 아주 작은 범위의 회전변형이 일어나지만, 부싱과 연결된 유압 증폭장치를 통하여 스플의 개폐 운동을 일으킨다. 한편 병렬로 연결된 아마추어 양쪽 코일에 흐르는 전류에 미세한 차이를 준다면, 이 차이에 의해 원하는 토크를 시스템에 가할 수 있다.

본 연구에서는 주어진 입력 전류 차에 대하여 출력 토크를 구하는 문제로 연구 범위를 한정하기로 한다. 먼저 기초 전자기 이론을 공부하여 토크 발생에 관련한 파라메터들에 대해 고찰한다. 다음 맥스웰 방정식으로부터 유도되는 포텐셜 방정식들을 풀이하여 자기장의 분포에 대해 알아본다. 마지막으로 간단한 회로 이론을 이용하여 주어진 저항과 인덕턴스에 대해 비정상 전류 신호를 구현하여 이를 시간에 대해 변하는 토크 값으로 산출한다.

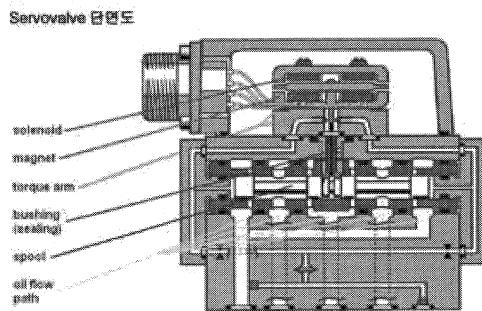


Fig. 1 Typical EHV and Torque Motor

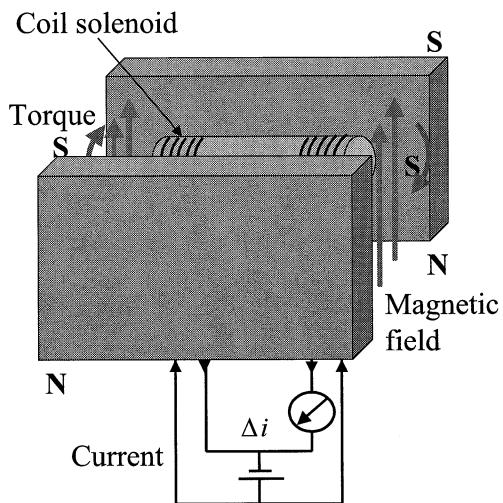


Fig. 2 Schematic of a Torque Motor

이러한 기초 연구를 통하여 전자 유압식 서보 밸브의 기본 구동 파라메터들의 해석 선형 연구를 실시하고, 계산 결과를 고찰하여 이러한 시스템을 최적화 할 수 있도록 전자기 현상에 대한 물리적 이해를 체계적으로 돋고자 한다. 특히 인덕턴스에 의한 시간 지연 모델을 구현하여 토크모터의 변이 운동(transient motion) 예측에 필요한 시간 상수(time constant)를 척도로 써 구하는 것이 본 연구의 가장 중요한 목적이라 할 수 있다.

Table 1. Permeability of Ferromagnetic Metals

Material	μ/μ_0
Nickel	~ 600
Iron	~ 5,000

2. 연구 내용

2.1 자기장에서 발생하는 토크

일정 방향으로 영구 자석 등에 의해 자기 유속 밀도(magnetic flux density) B 가 주어졌을 때, 전류가 흐르는 솔레노이드 코일에서의 자기쌍극자 모멘트(magnetic dipole moment) ξ 에 의하여 발생하는 토크 τ 는 다음과 같다[2].

$$\tau = \xi \times B \quad (1)$$

여기서,

$$|\xi| = N\Delta i \pi a^2 \quad (2)$$

이다.

Fig. 2에서 솔레노이드의 중심축은 자기장의 방향과 수직이므로, 식 (1)에 의해 토크는 최대 값을 갖는다. 이 때, 토크의 크기는 다음과 같다.

$$|\tau| = BN\Delta i \pi a^2 \quad (3)$$

2.2 맥스웰 방정식

전자기에 대한 기초 방정식은 다음의 Maxwell 방정식이다[3].

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times B = \mu(\sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}) \quad (5)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (7)$$

식 (4)~(7)에서 벡터 항등식과 다음 벡터 포텐셜의 정의를 사용하면,

$$B = \nabla \times A \quad (8)$$

최종적으로 다음과 같은 벡터 파동 방정식을 얻는다[4].

$$\nabla^2 A - \mu\epsilon \left(\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \right) = -\mu J \quad (9)$$

여기에서 μ 는 투자율(permeability)로 아마추어의 재질인 강자성체에 대해서는 Table 1과 같은 값을 갖는다. 투자율에 대한 전공에서의 표준값은 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} N/A^2$ 이다.

본 문제와 같이 토크모터의 변위가 매우 작은 자기정역학 문제에 대해 정상 상태를 가정하면, 식 (9)는 다음과 같은 Poisson 방정식으로 쓸 수 있다.

$$\nabla^2 A = -\mu J \quad (10)$$

인가 전류가 없는 경우 식 (10)의 우변은 0이 되고, 결국 유체역학에서의 포텐셜 문제와 비슷하게 Laplace 방정식의 일반해를 구하는 문제로 귀착된다.

식 (10)은 Poisson 방정식으로, 외부에서 주어진 전류 밀도는 자기 포텐셜의 생성항(source term)으로 작용한다. 만일 외부 교란에 해당하는 이 전기 밀도의 크기를 무시할 수 있다는 가정 하에 식 (10)을 해석한다면, 이는 Laplace 방정식이 된다. 다음 절에서는 주어진 영구 자석 형상과 경계 조건에 대해 Laplace 방정식을 풀이하는 수치 해석을 실시하기로 한다.

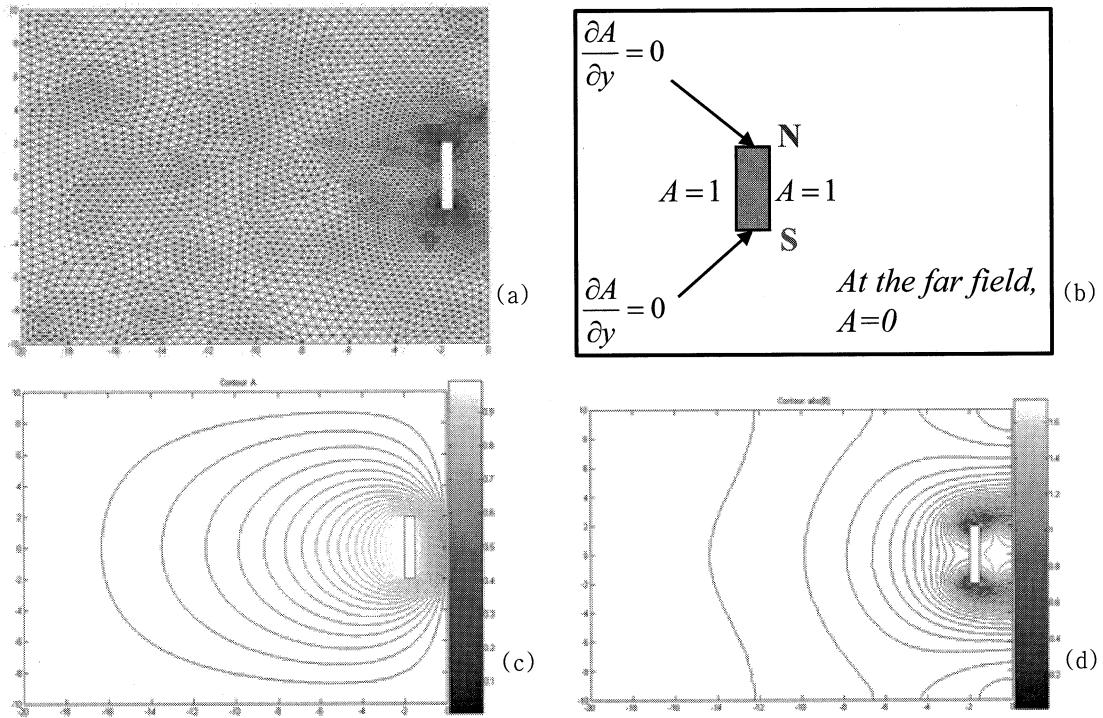


Fig. 3 Numerical Solution of the Maxwell Potential Equations: (a) Grids, (b) Boundary Conditions, (c) Magnetic Vector Potential, (d) Amplitude of Magnetic Flux Density.

2.3 수치 해법 및 결과

식 (10)을 주어진 토크모터의 영구자석 주변에서 수치적으로 풀이한 결과가 Fig. 3에 제시되어 있다. 이러한 수치 해석은 MATLAB™ PDETOOL을 이용하여 실시하였다. (a)와 같은 삼각형 비정렬 격자계(triangular unstructured girds)에서 유한요소법(FEM, Finite Element Method)을 이용하여 해석한다. 경계 조건(b)은 자석의 양극에서는 수직 구배의 Neumann 조건을 사용하고, 이외에서는 Dirichlet 조건을 사용한다.

토크모터의 중심 수직 단면에 대해 솔레노이드의 중심축(그림의 원점에 해당) 근방에서는 등 포텐셜선들이 좁은 영역에 대해 거의 직선을 이루고 있으며(c), 솔레노이드 위치에서 자기 유속 밀도는 1 % 이내로 일정한 값을 갖는다는 사실을 확인할 수 있었다(d). 따라서 식 (3)에

서 B 값을 거의 일정한 값으로 보아도 무방할 것으로 보인다.

이러한 결과는 실험적인 직관과도 일치한다. 토크모터의 입장에서는 주어진 전류 차에 대한 출력 토크 값의 선형성(linearity)을 보장하기 위하여 되도록 일정한 자기장에 아마추어를 놓는 것이 기술적으로 유리할 것이다. 따라서 Fig. 2와 같이 두 개의 평행한 영구자석으로 밀폐된 공간 안에서는 Fig. 3(c)~(d)와 같이 자기력선은 수직방향으로 거의 평행하고, 자기 밀도는 아마추어의 중심축에서 거의 일정한 값을 갖도록 설계되어야 한다.

영구자석은 서로 대칭이므로 대칭면(y 축)에

Table 2. Basic Parameters

Parameter	Value	Unit
N	1,000	-
B	1	$T, N/(Am)$
a	5.965e-3	m
Δi	0.0625	A
$ \tau \equiv BN\Delta i \pi a^2$ Eq. (3)	6.986e-3	Nm
μ	6.283e-3	N/A^2
d	2.7e-2	m
$L \equiv \mu_0 N^2 \pi a^2 / d$ Eq. (11)	5.20e-3	$H, Nm/A^2$
V	5	$V, (Nm)/(As)$
R	40	$\Omega, (Nm)/(A^2 s)$

대해 절반만 풀이하였다. 즉, 대칭면에서는 접선 방향으로의 벡터 포텐셜 A 값이 일정하다는 대칭 조건을 이용하였다.

2.4 회로 이론을 이용한 비정상 전류값

일반적으로 솔레노이드 코일의 상호 인덕턴스 (mutual inductance)는 다음과 같다[4].

$$L = \frac{\mu_0 N^2}{d} \pi a^2 \quad (11)$$

Fig. 2에서 각각의 페루프 전자석 회로는, 기초적인 회로 이론을 적용하면, 솔레노이드에 저항이 직렬로 연결된 회로 시스템에 대한 교과서적 문제로 귀착된다. 일반적으로 본 연구에서 사용하는 토크모터에는 내부 저항 때문에 Fig. 2에서 두 개의 병렬 연결된 코일에 대해 약 40Ω 의 저항이 결린다.

$$L \frac{d\Delta i}{dt} + R\Delta i = V(t) \quad (12)$$

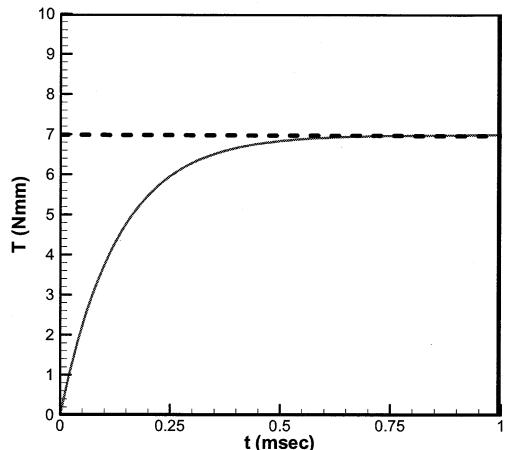


Fig. 4 Torque vs. Time

만일 직류라면, 식 (12)의 우변의 전압이 상수 값을 가지고, 식 (12)와 같은 1계 상미분 방정식의 해로 주어지는 전류 값은 다음과 같다.

$$\Delta i(t) = \left(i_0 - \frac{V}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V}{R} \quad (13)$$

특히 초기 전류 값이 0이라고 하면,

$$\Delta i(t) = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad (14)$$

식 (14)를 이용하여 시간에 대한 전류 값을 계산하고 이 값을 식 (3)에 대입하면 토크를 구할 수 있다. 일반적인 물성치에 대한 각 변수들의 값은 Table 2.에 제시되어 있다. 이 값을 이용하여, 본 연구에서 유도한 식들에 제시하면, Fig. 4와 같은 토크모터의 응답 곡선을 구할 수 있다.

일정한 전압(5 V)에서 토크의 응답 시간은 최대 토크의 95 %까지 상승하는데 약 $652\ \mu s$ (공진 주파수 $1.53\ kHz$)가 걸림을 알 수 있다. 발생하는 토크는 수 Nm 인데, 참고문헌 [6]에서 다른 상용 토크모터에서 발생하는 토크 값이 10

Nmm 인 것으로 미루어 보아 이 정도 값은 일단 공학적으로 의미 있는 값으로 보인다.

2.5 본 해석의 신뢰성과 오차 요인

본 연구의 결과로 제시된 Fig. 4와 같은 결과는, 상용 서보 밸브 시스템에 적용했을 경우, 참고문헌 [6]에서와 같은 데이터보다 작은 값을 보인다. 그 원인은 아마추어의 끝단에서 금속의 투자율에 의해 강한 자기력이 발생하기 때문이다. 이 자기력에 의한 토크는 솔레노이드에 의해 발생하는 토크와 합해진다. 아마추어 끝단에서는 상대적으로 모멘트 압이 크기 때문에 상당히 큰 토크가 발생한다.

시간 지역에 기여하는 대부분의 물리적 원인은 식 (14)와 같이 솔레노이드의 자기 인덕턴스에 의한 것으로 사료된다. 왜냐하면 전자기적 교란이 전파되는 속도는, 식 (9)의 파동 방정식에서 다음 식 (15)를 유도할 수 있고, 그 크기는 거의 광속(speed of light)에 가깝기 때문이다.

$$\mu\epsilon \cong \frac{1}{c^2} \quad (15)$$

3. 결 론

본 연구를 통하여 저자들은 보조 동력 장치 연료 공급 시스템에서 유량 제어를 목적으로 사용할 EHV 솔레노이드 밸브의 토크모터 해석이라는 전자기 문제를 체계적으로 이해하고 추후 보다 염밀한 3 차원 해석을 위한 기초 해석을 실시하였다. 본 연구의 주된 결과는 비록 교과서

적인 전자기 이론에 기반을 둔 이론 해석이지만, 간단한 수치 해석을 통하여 발생하는 토크의 대략적 크기와 시스템의 시간 응답 지연을 예측하였다. 이 결과는 매우 경제적이며, 추후 참고문헌 [5]와 같은 결과와 직접 비교 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

동 연구는 산업자원부 한국형헬기 민군겸용구 성품개발사업(KARI주관) 위탁연구결과 중 일부임.

참 고 문 헌

- [1] 정현술, “APU 연료시스템 서보밸브의 설계/해석 기술 개발,” 한국항공우주연구원 항공사업단, 2007.
- [2] Holiday D., Resnick R., *Fundamentals of Physics*, John Wiley & Sons, 3e, 1988.
- [3] 김동일, 나정웅, 박동철, 전파공학, 청문각, 5e, 2002.
- [4] Lonngren K.E., Savov S.V., Randy J.J., *Fundamentals of Electromagnetics with MATLAB*, 2e, 2007.
- [5] Biller H., "Moving Meshes for Electromagnets," Proceedings of the COMSOL Users Conference, 2006, Frankfurt, Germany.
- [6] Li S., Song Y., "Dynamic Response of a Hydraulic Servo-Valve Torque Motor with Magnetic Fluids," Mechatronics, Vol 17, pp. 442-447