

보조동력장치 연료 공급용 서보밸브 토크모터의 기초 수치모사 연구 Priliminary Numerical Simulation of the Torque Motor for a Servo Valve in the Fuel Supply System of APU

장세명 · 정현술 · 장강원 · 양인영 · 이원중

S. M. Chang, H. S. Jeong, G. W. Jang, I. Y. Yang and W. Lee

Key Words : Static analysis(정적 해석), Servo valve(서보밸브), Torque motor(토크모터), APU(보조동력장치)

Abstract: The APU(Auxiliary Power Unit) needs a set of complex pipeline for the fuel supply system where some of the main valves controlling the flow rate consist of the servo valve worked with a torque motor. The input electric current produces an induced magnetic field almost perpendicular to the background magnetic filed generated by fixed permanent magnets. The induced torque deforms the tubular bushing, and directly rotates an armature, which can open and close the valve. In this study, we start from a basic analytic model using a simple electro-magneto-statics, and expand our model to the three-dimensional one computationally applying a commercial code named COMSOL. The result is compared with each other, and reasonable numerical data are obtained for the dynamic behavior and multi-physics system.

기호 설명

- A : 자기 벡터 포텐셜(magnetic potential)
- \vec{B} : 자기장 (magnetic field)
- I : 관성 모멘트 (moment of inertia)
- J : 코일의 전류 밀도 (current density)
- N : 코일의 감긴 횟수 (number of coil turns)
- Q : 밸브 체적 유량 (volume flow rate)
- T_{ff} : 유동에 의한 토크 (flow torque)
- a : 코일의 평균 유효 반경 (radius of coil)
- f : 함수 (certain function)
- Δi : 전류 차 (difference of electric current)
- Δp : 차압 (differential pressure)
- s : 밸브 간극의 개도 (openness)
- x : 아마추어 방향 공간 좌표

(horizontal component of coordinate)

- δ : 플래퍼의 변위(displacement)
- $\vec{\xi}$: 자기 쌍극자 모멘트 (dipole moment)
- μ : 투자율(permeability)
- σ : 수직 응력 (normal stress)
- $\vec{\tau}$: 자기 토크 (magnetic torque)

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 서보밸브(EHV, Electro-Hydraulic Servo Valve)를 이용하여 조절한다. 회전익 항공기의 경우 공중에서 다양한 임무를 수행해야 하므로, 그 연료 공급 체계에 각종 비행 조건과 임무에 따라 응답성이 빠르고 신뢰할만한 강건성을 지닌 밸브 시스템이 필요하다. 보통 이러한 용도로 전자기 구동 방식의 솔레노이드 타입 서보밸브가 널리 사용된다¹⁾.

접수일: 2008년 11월 20일, 게재확정일: 2009년 2월 27일
 장세명(책임저자): 군산대학교 기계자동차공학부
 E-mail : smchang@kunsan.ac.kr,
 Tel : 063-469-4724
 정현술, 장강원: 군산대학교 기계자동차공학부
 양인영, 이원중: 한국항공우주연구원 KHP 사업팀

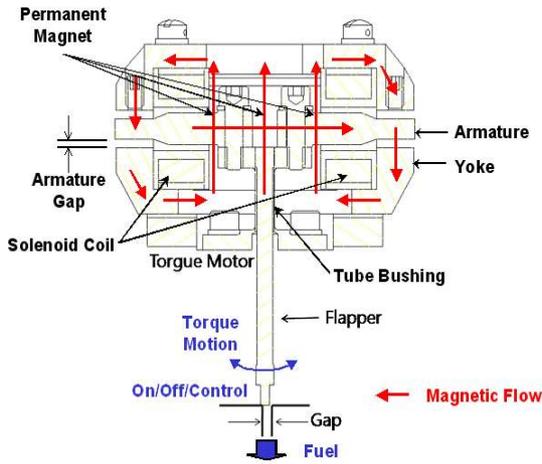


Fig. 1 Principle of the present servo valve

Fig. 1에 제시된 직접 구동식 EHV 시스템은 일반적으로 토크모터(torque motor)와 밸브 유로로 구성된다²⁾. 이 중에서 토크모터는 피드백 신호를 받아 이 신호를 밸브 기동 토크로 변환시키는 장치이다. 아마추어(armature)에 고정된 솔레노이드 코일에 일정 전류를 통하여 주면, 자기력이 발생하여 금속 막대는 전자석으로 변하게 된다. 이때, 영구 자석을 이용하여 일정 방향으로 자기장을 미리 가해 주었다면, 주어진 자기장 안에 설치된 전자석에서는 이 자기장과 정렬하려는 토크가 발생한다. 이 토크의 크기는 매우 작아서 아주 작은 변위의 회전 변형이 일어나 유로의 오리피스 간극(gap)을 막고 있는 플래퍼(flapper) 끝단의 개폐 운동을 일으킨다. 한편 병렬로 연결된 아마추어 양쪽 코일에 흐르는 전류에 미세한 차이를 준다면, 이 차이에 의해 원하는 만큼의 토크를 시스템에 가할 수 있다.

본 연구에서는 주어진 입력 전류 차에 대하여 정역학인 출력 토크를 구하는 문제로 연구 범위를 한정하기로 한다. 먼저 전자기 토크 발생에 관련한 파라미터들에 대해 고찰한다. 다음 단계로는 3 차원 모델링한 실제 토크 모터 모델을 가지고 범용 소프트웨어인 COMSOLTM을 이용하여 이 결과와 비교해 보기로 한다. 본 연구 결과는 실제 솔레노이드 밸브에서 측정된 실험 결과와 직접 비교할 수 있다. 마지막으로 아마추어에 걸리는 전자기 토크, 튜브 부싱(bushing)의 변형, 그리고 기존 연구 결과인 유동력(flow force)으로부터 다중 물리(multi-physics) 해석을 수행하여 기초적인 정적 시스템 해석을 실시한다.

2. 연구 방법

2.1 이론적 해석

일정 방향으로 영구 자석 등에 의해 자기 유속 밀도(magnetic flux density)가 주어졌을 때, 전류가 흐르는 솔레노이드 코일에서의 자기 쌍극자 모멘트(magnetic dipole moment)에 의하여 발생하는 토크는 다음과 같다^{3, 8)}.

$$\vec{\tau} = \vec{\xi} \times \vec{B} \quad (1)$$

여기에서

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

이므로 벡터 $\vec{\tau}$ 크기의 최대값은 벡터 $\vec{\xi}$ 와 \vec{B} 가 수직을 이룰 때의 값으로 다음과 같다.

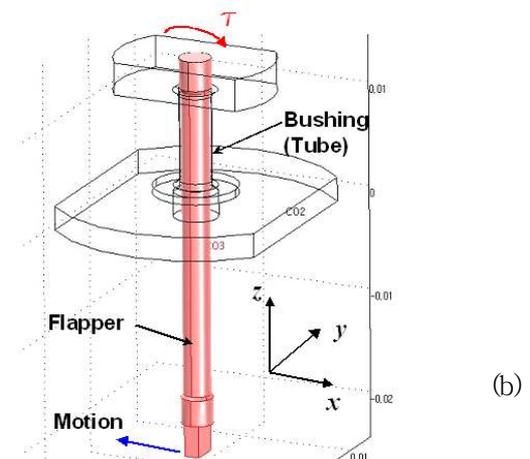
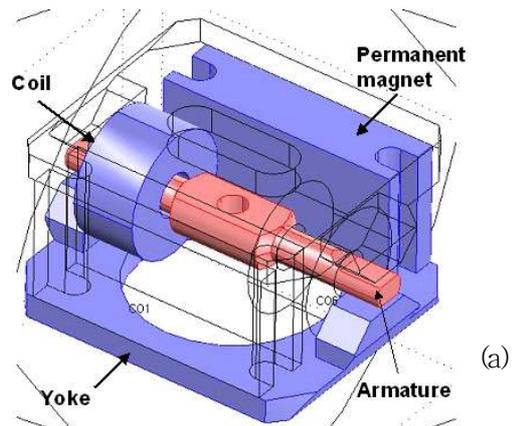


Fig. 2 Servo valve models: (a) torque motor, (b) flapper and bushing

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

이상의 이론에서는 Fig. 1에서와 같이 아마추어 끝단에서의 3차원 효과인 자기 유동 집속을 고려하지는 않았다. 따라서 식 (3)은 끝단에서의 자기손실이 거의 0에 가깝다는 가정 하에 유도된 이상적인 이론 식일 뿐이다.

한편 튜브로 구성된 부싱의 변형에 관한 방정식은 다음과 같다(좌표계는 Fig. 2(b) 참조)⁴⁾.

$$\sigma_z = -\frac{\tau x}{I_{yy}} \quad (4)$$

즉 아마추어의 중심 축에서 발생하는 토크는 플레퍼를 지지하는 튜브 모양의 부싱에 대해 굽힘 모멘트(bending moment)로 작용하므로 식 (4)와 같은 경계 조건을 이용하여 해석할 수 있다.

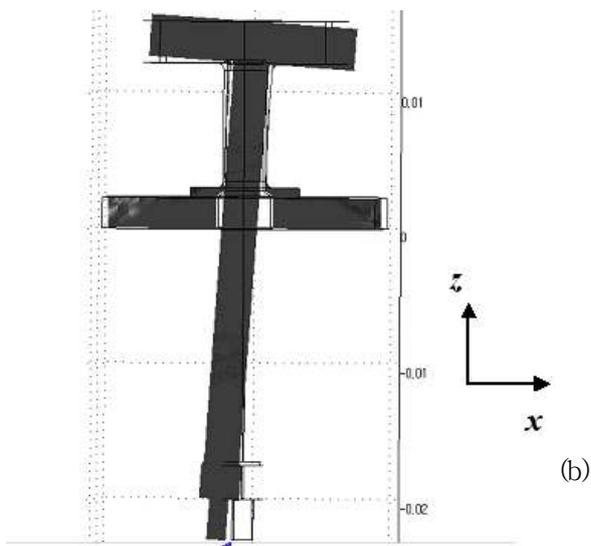
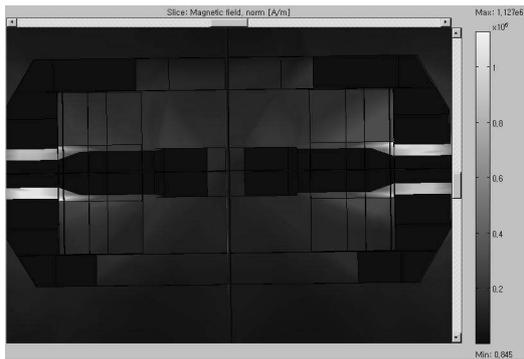


Fig. 3 Field views from the solution: (a) magnetic field, (b) displacement

2.2 수치적 방법

실제 토크 모터에서는 영구자석과 연결된 철판(요크)의 끝단 형상을 구부려 아마추어 끝단에서 자기 플럭스의 손실을 최소한으로 줄였기 때문에, 이 부분에 대한 3 차원 해석이 필요하다. 따라서 3 차원 해석이 가능한 상용 코드를 이용하여 수치해석을 실시하였다. 본 연구에서는 다중 물리 해석이 가능한 COMSOLTM을 이용하여 전자기 및 튜브-플레퍼 구조의 유한요소 해석을 실시하기로 한다.

Fig. 2(a)~(b)에서는 수치 해석을 위한 모델링의 예를 보여주고 있다. 각 모델은 CATIATM을 이용하여 3차원 도면을 완성한 다음, 수치 해석을 위해 세밀한 부분들을 적절하게 단순화시킨다.

전자기장이나 부싱의 구조적인 변형에 대한 지배 방정식은 모두 선형(linear)이므로, 수렴 검사(convergence test) 결과 불과 1만 개 이내의 사면체 비정렬 격자(tetrahedral unstructured grids)로 각각 적절한 해석이 가능하다. 다중 물리 해석은 우선 다음과 같은 자기 포텐셜 방정식(magnetic potential equations)을 유한 요소법에 기초한 수치 해석 방법으로 풀이하여 자기장의 분포를 구한다⁵⁾.

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (5)$$

여기에서

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (6)$$

경계 조건은 모든 경계에서 자기 절연 조건(magnetic insulation condition)을 주고, 영구 자석은 물성 값으로부터 일정한 자계 값을 유도 자기장과 겹치게 부여하며, 코일 부분에는 알려진 전류밀도 분포를 준다.

식 (5)~(6)과 같이 구한 자기장 분포로부터 식 (1)과 같이 Fig. 2(a)의 아마추어 전체 표면에 대한 자기 토크를 계산한다. 이 결과로부터 플레퍼-부싱 구조의 경계 조건으로 식 (4)와 같은 수직 응력의 분포를 아마추어와의 경계면에 줄 수 있다. 최종적으로 Fig. 2(b)의 형상에서 플레퍼 끝단의 변위(displacement)를 구한다. 이때, 아래 판의 밑면에서는 변위와 이동 각도에 대한 구속조건을 적용한다.

Fig. 3(a)~(b)는 이러한 과정을 통하여 구한 자기장의 분포와 플레퍼-부싱의 변위를 보여준다. Fig.

3(a)를 살펴보면, 아마추어 끝단의 좁은 간극에서 강한 자기 유속이 형성되고 있음을 관찰할 수 있다.

2.3 다중 물리 해석 알고리즘

플래퍼의 끝단에서는 밸브 유동의 영향으로 유동력이 발생한다. 유체가 급격한 속도 변화를 가지고 꺾여야 하므로, 유동력에 의한 토크는 정적 안정성(static stability)에 의해 밸브를 잠그는 방향으로 작용한다⁶⁾.

밸브 유로 시스템의 입·출구 양단에서 차압(Δp)이 주어지면, 이에 대한 유량 값(Q)과 발생하는 유동력에 의한 토크 값(T_{ff})을 구할 수 있다. 본 연구에서는 편의상 이전 연구⁷⁾에서 구한 유동 데이터베이스를 직접 이용하기로 한다.

각각의 물리 현상들에 대해 다음과 같은 꼴의 함수들이 성립한다.

$$\tau = f_1(\Delta i) \quad (7)$$

$$\delta = f_2(\tau - T_{ff}) \quad (8)$$

$$s = f_3(\delta) \quad (9)$$

$$Q = f_4(\Delta p, s) \quad (10)$$

$$T_{ff} = f_5(\Delta p, s) \quad (11)$$

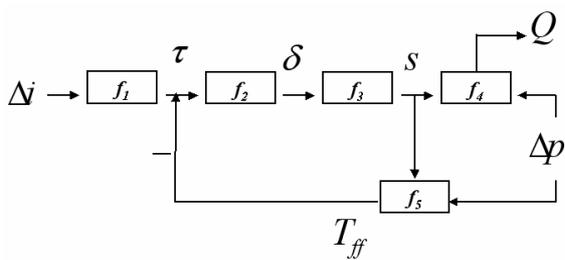


Fig. 4 Block diagram for multi-physics modeling

Fig. 4는 식 (7)~(11)에 정의된 함수들에 대하여 다중 물리 문제를 반복법으로 푸는 알고리즘에 대해 설명하고 있다. 초기에는 유동력에 의한 토크 값을 알 수 없기 때문에 순차적으로 입력 값($\Delta i, \Delta p$)에 대한 유동 토크(T_{ff})를 간극의 개도(s)로부터 구한다. 이 값을 식 (8)에 대입하여 플래퍼 변위(δ)를 구하는데 사용한다. 이 과정은 개도가 일정한 값으로 수렴

할 때까지 반복한다.

이상의 알고리즘은 COMSOL Script로 구현되어 MATLABTM 환경에서 구현된다. 유동장 해석과 같은 비선형 해석을 미리 계산된 데이터베이스로부터 내삽(interpolation)하기 때문에 일반적인 PC 환경에서 각 파라미터 점에 대해 불과 수십 초 정도의 계산 시간이 요구된다.

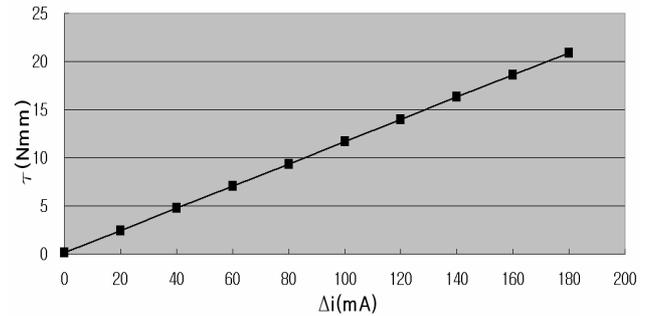


Fig. 5 Magnetic torque vs. current difference, comparison of theory and numerical data

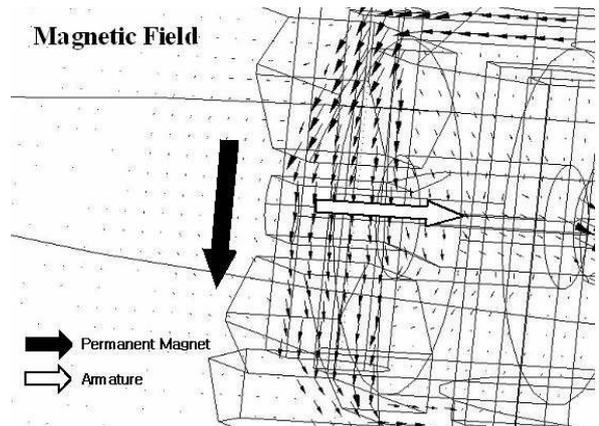


Fig. 6 Magnetic field at the tip of armature

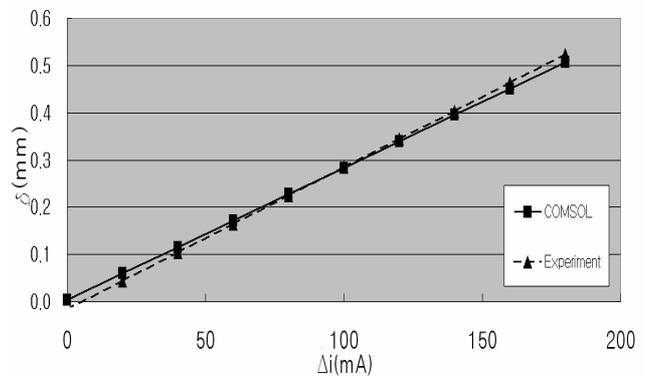


Fig. 7 Flapper displacement vs. current difference, comparison of numerical and experimental data

3. 계산 결과 및 토의

3.1 토크모터의 전자기 해석

Fig. 5는 자기장에 의해서 발생하는 아마추어의 순 토크를 입력 전압 차에 대해 도시한 것이다. 입력 전압 차에 대한 아마추어의 토크 값은 거의 선형을 이루고 있음을 알 수 있다. 또한 실제 계산에서 아마추어의 끝단 매우 작은 간극에서의 자기장 분포를 Fig. 6에 제시하였다. 이 그림은 개념도인 Fig. 1의 좌측 끝단 부분(armature gap)에 해당한다. 영구자석과 밀착된 위쪽 철판에서 발생한 자기장이 외부로 큰 손실 없이 아래쪽 판까지 아마추어 간극을 통하여 전달되고 있는 사실을 관찰할 수 있다.

일부 자기장은 코일에 의해 발생하는 자기가 정렬된 아마추어철심을 타고 흐른다. 본 연구에서 사용한 물성치는 실제 밸브 모델의 부품 재질에 대해 표준 값을 사용하였다. 주요 물성으로는 영구자석의 세기 (B_{PM}) 및 아마추어와 요크의 투자율 (μ) 등이 있다.

3.2 토크모터의 구조 해석

Fig. 7은 앞 절에서 구한 토크가 플래퍼 끝단 변위에 미치는 영향을 그래프로 나타낸 것이다. 영역에 따라 약간의 오차는 존재하지만, 전반적으로 현재의 계산 결과와 별도로 시행된 실험 결과는 대체로 일치하고 있다^{6, 8)}.

본 연구에서 사용한 Fig. 2(b)의 모델은 거의 선형에 가까운 거동을 보인다. 따라서 식 (8)은 단순한 비례 상수로 그 기울기를 표시할 수 있다. 그러한 이유는 Fig. 8(a)의 응력(von-Mises stress) 분포에서 살펴볼 수 있다. 대부분의 응력은 얇은 튜브 모양의 부싱에 집중된다. 따라서 튜브 요소에 순수 굽힘(pure bending)을 받고 있는 문제로 생각해도 무방하다.

Fig. 8(b)에서 부싱튜브 내부의 응력분포를 살펴보면, 튜브 바깥 면이 압축 응력(compressive stress)을 받을 경우, 안쪽에서는 인장 응력(tensile stress)이 발생함을 알 수 있다. 최대 응력 지점은 부싱과 플레이트의 경계면에서 수 mm 위 지점에서 발생한다. 따라서 이 점을 플래퍼의 힌지 점(hinge point)으로 볼 수 있다. 대부분의 응력은 이러한 힌지 점 근방에 집중된다.

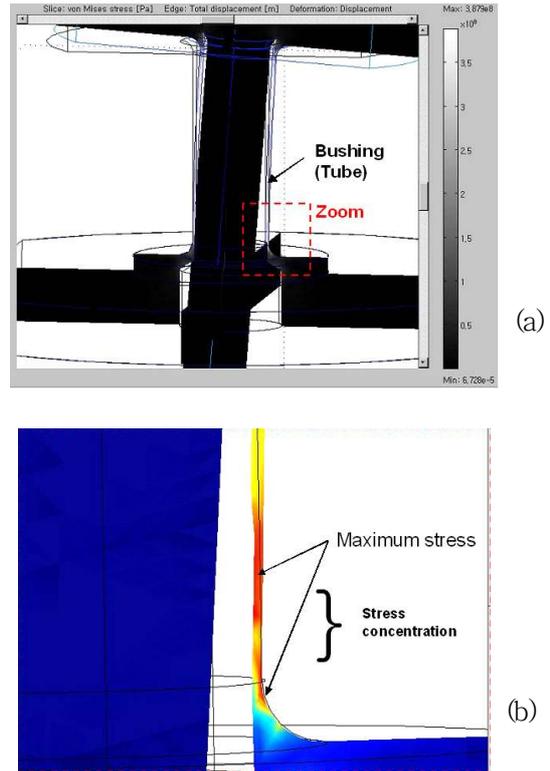


Fig. 8 Stress concentration at the bushing tube

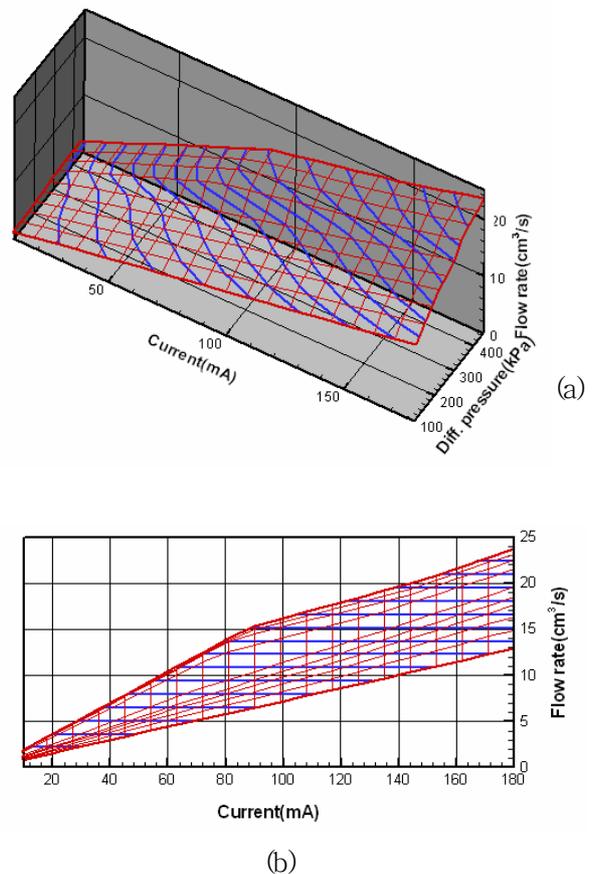


Fig. 9 Parameter space of this servo valve model: (a) 3-D view, (b) projected view

3.3 서보밸브의 다중물리 해석

주어진 밸브 모델에 대한 기존 연구에서의 실험 결과로 제시된 전체 밸브 시스템의 정격 값은 다음과 같다⁶⁾: $\Delta i = 80\text{mA}$, $\Delta p = 29.0\text{kPa}$, $Q = 11.9\text{cm}^3/\text{s}$.

그러나 Fig. 4의 알고리즘으로 주어진 전류 차와 밸브 양단의 차압을 대입하여 계산을 완료하면, 토크 모터의 입력전류 대비토크 계산 값이 Fig. 7과 같이 실험값과 일치함에도 불구하고, 유량값은 $Q = 8.92\text{cm}^3/\text{s}$ (오차 19.8%)가 나온다. 이러한 계산 오차는 주로 유동 데이터베이스의 불확실성과 내삽하는 과정에서 수치 오차에 의해 발생하는 것으로 여겨진다.

Fig. 9(a)~(b)에서는 다양한 파라미터 점들에 대한 계산 결과가 제시되어 있다. 현재의 밸브로는 제품 개발시 정격 요구 유량의 약 50% 정도밖에 구현되지 못함을 알 수 있다. 따라서 추후 연구를 통한 개량이 필요하다. 가장 손쉽게 유량을 증가시킬 수 있는 방법은 식 (10)을 바꾸는 것이다. 즉, 현재보다 밸브 간극의 구멍 폭을 확대시킨다면 주어지는 조건을 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 논문에서 저자들은 보조 동력 장치 연료 공급 시스템에서 실제로 사용되고 있는 유량 조절용 서보밸브를 3 차원적으로 모델링 하여 적절한 상용 코드를 이용하여 이를 정상 상태(steady state)에서 해석해 보았다. 전산 해석 결과로부터 지금까지 얻은 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 상용 코드인 COMSOLTM이 지닌 계산 능력(전자기, 구조해석 등)을 이용하여 현재의 방법론을 서보밸브 해석에 응용할 수 있다. 각각의 물리현상을 주어진 편미분 방정식의 계로 모델링하고 적절한 경계 조건을 적용하였다. 그 결과 실제 물리 현상과 정성적으로 부합하는 자기장과 응력 분포를 얻을 수 있었다. 또한 유동 모델은 기존에 기 구축된 유동 데이터베이스를 활용하여 비선형 풀개(nonlinear solver)에 드는 계산 시간을 획기적으로 절약할 수 있었다. 또한 각각의 모듈들은 Script를 통한 MATLABTM과의 연동으로 손쉽게 다중물리 프로그래밍이 가능했으며, 그 결과는 단계별로 기존의 실험값과 대체로 일치하는 경향을 보였다.

(2) 본 연구에서 개발한 방법을 사용하여 파라미터 해석을 실시하면 서보 밸브 개발 초기의 시행착오를

줄일 수 있으며, 각 모듈들을 비정상 상태(unsteady state)의 시계열 계산까지 확장하면, 앞으로 동적 해석까지 가능할 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 지식경제부 한국형헬기 민군겸용 구성품 개발사업(KARI 주관) 위탁연구결과 중 일부입니다.

참고 문헌

- 1) 정현술, APU 연료시스템 서보밸브 설계/해석 기술 개발”, 연구계획서, 한국항공우주연구원, 2007.
- 2) Finke M. and Becher D., “Product Design and Testing at Moog: Turning High Performance into Reality,” <http://www.moog.com>, pp. 1~5, 2002.
- 3) Holiday D. and Resnick R., “Fundamentals of Physics, John Wiley & Sons”, 3rd edition, 1988.
- 4) Gere J.M. and Timoshenko S.P., “Mechanics of Materials”, PWS-KENT, 3rd edition, 1990.
- 5) Lonngren K.E., Savov S.V. and Randy J.J., “Fundamentals of Electromagnetics with MATLAB”, 2nd edition, 2007.
- 6) 정현술, 장세명, 장강원 외, APU 연료시스템 서보밸브 설계/해석 기술개발”, 연차보고서, 한국항공우주연구원, 2008.
- 7) 김성수, 장세명, 정현술, 류혁, 이상효, 보조 동력 장치 연료 공급용 서보밸브의 유동 특성 해석”, 유공압시스템학회논문집, Vol. 5, No. 4, pp. 10~16, 2008.
- 8) 장세명, 장강원, 정현술, 이동호, 보조 동력 장치 연료공급용 서보밸브의 토크모터 전자기 해석”, 항공우주시스템공학회지, Vol. 1, No. 3, p. 712, 2007.