

전공식 콘트롤 밸브 Positioner 용 Magnet Unit의 해석

김성재* · 김지원 · 조순철 · 정선태

승실대학교 전자공학과

서울시 동작구 상도 5동 1-1, 156-743

유형근 · 전찬구 · 고택범

LG 하니웰 (주)

충청남도 천안시 차암동 56 번지, 330-200

(1997년 9월 29일 받음, 1997년 11월 15일 최종수정본 받음)

유량을 정밀조정하는 콘트롤 밸브의 핵심 부품인 magnet unit 를 해석하였다. 유한요소법을 이용하여 자석과 요크가 이루는 자기회로를 분석하여 공극에 흐르는 자속과 코일이 받는 힘을 계산하고 이를 측정치와 비교하였다. 시뮬레이션 결과 공극자장은 3~5 kOe, 추력상수는 27.5 N/A, 퍼미언스 계수는 22.1 이었으며 측정치와 잘 일치하였다. 또한 시뮬레이션을 통하여 reluctance factor 는 1.1, fringing factor 는 1.4 임을 알 수 있었다.

I. 서 론

공정제어에 있어서 콘트롤 밸브는 제어대상이 되는 물리량(예를 들어, 탱크의 온도, 압력, 수위, 유량속도 등)을 원하는 값을 갖도록 제어하기 위해, 유체가 통과하는 배관의 도중에 삽입되어, 제어기의 제어신호를 받아 그에 대응한 밸브의 개폐를 조절하고 이에 따라 유량의 속도를 조절함으로써, 제어대상의 물리량을 조절하는 데 중요한 역할을 맡고 있다[1]. 콘트롤 밸브는 크게 제어 신호를 받아 그에 따른 구동부 구동신호로 바꾸어 주는 포지셔너(positioner)부분, 밸브의 개폐 조작을 하는 구동부(actuator), 그리고 밸브 몸체(body)의 세부 부분으로 나눌 수 있다.

밸브의 입출력의 선형성의 성취를 위해서는 포지셔너 부분의 고도의 입출력 선형성이 요구된다. 포지셔너 부분에서 전기신호를 기계적 힘으로 변환시키는 magnet unit 은 nozzle-flapper 메카니즘에 nozzle를 막는 힘 또는 토르크를 공급해주는 부분이며, 그 성능이 포지셔너의 성능에 매우 중요한 역할을 한다. Nozzle-flapper 간의 거리에 비례하여 밸브의 위치가 결정되므로, magnet unit의 입력 전류에 대해 선형적인 힘이나 토르크를 magnet unit의

출력으로 발생시키는 것이 중요하다. 뿐만 아니라 오랜 시일 동안 신뢰성을 유지하며 폭발성 분위기에서도 위험이 없도록 spark를 발생시키지 않는 것이 바람직하다[2].

Flapper를 움직이는 magnet unit 부분은 본 논문에서 다루는 가동코일형(moving coil) 뿐 아니라 electric servomotor, magnetostrictive device, piezoelectric crystal, permanent magnet torquemotor 등이 사용되고 있으나, 가동코일형이 입력전기신호에 대한 출력특성이 선형적이며 히스테리시스가 없고 응답이 빠를 뿐만 아니라 단점이었던 낮은 출력이 희토류 자석의 개발로 보완되고 있다.

본 논문은 자석과 요크가 이루는 magnet assembly를 전자장 시뮬레이터인 Maxwell 2D를 이용하여 해석하고 실험결과와 비교하였다. magnet unit의 자기회로의 자속 분포, 특히 코일이 동작하는 공극에서의 자장 분포를 구하고 코일이 받는 힘 등을 구하였다.

II. 해석 및 측정방법

Fig. 1은 magnet unit의 자석과 요크의 결합체인 magnet assembly와 자기력을 받는 코일을 보이고 있다.

* 현주소 : 경기도 용인시 구성면 마북리 80-9, 449-910, 현대정공 공작기계연구부

공극내에 원통형 코일이 있고 코일에 전류가 흐르면 코일에 자기력이 발생하는 원리이다.

코일의 자기력의 정량적인 분석은 아래와 같다. 자기장 내에 전류가 흐르는 도선이 있다면, 도선은 다음과 같은 힘을 받는다.

$$F = I \int d\vec{L} \times \vec{B} \quad (1)$$

즉, magnet unit의 코일이 받는 힘은 코일에 흐르는 전류, 코일이 받는 자기장, 코일의 총길이에 비례한다. 식 (1)은 magnet unit의 동작에 직관적인 이해를 도와준다.

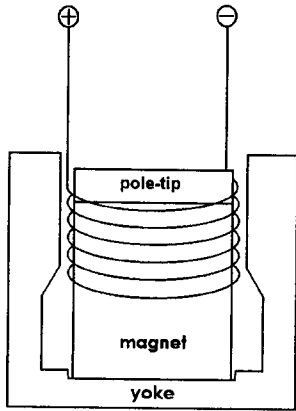


Fig. 1. Schematic diagram of magnet unit.

그러나 실제로 시뮬레이션을 이용하기 위해서는 적분항의 변형이 필요하다. (1) 식의 전류를 전류밀도로 대체하면 다음과 같다.

$$F = \int_v \vec{J} \times \vec{B} dv \quad (2)$$

코일 전체에 작용하는 힘은 코일을 미소체적으로 나누고 각 미소체적이 받는 힘을 적분하면 된다. 코일의 각 권선을 미소체적으로 하고 이를 요소로 정의하였다. 코일이 받는 총 힘을 구하기 위하여 사용된 기호들을 정의하면 다음과 같다.

- F : 코일이 받는 힘
- v : 공극에서 코일이 차지하는 공간의 체적
- N : 코일의 권선수
- A : 코일의 단면적
- n : 요소의 갯수

- I : 코일에 흐르는 전류
- ΔA_i : 요소의 단면적
- r_i : 요소가 이루는 원의 반경
- B_r : 요소에서의 radial 성분 자기장

Magnet unit에 원통좌표계를 적용한다면 \vec{B} 는 B_θ 성분은 \vec{J} 와 같은 방향이므로 cross product 하면 0이 되고, B_z 성분의 힘은 대칭이어서 상쇄되고, B_r 성분만이 코일에 실질적인 힘을 작용하게 된다. 따라서 $|\vec{J} \times \vec{B}| = JB_r$ 이 되고 전류밀도 J 는 $\frac{NI}{A}$ 이고 각 요소의 체적분 $\int_v dv$ 은 $\sum_{i=0}^n 2\pi r_i \Delta A_i$ 이다. 여기서, 체적은 공극에서 코일이 위치한 부분의 체적을 말한다. 그러므로 코일이 받는 총 힘은

$$F = 2\pi \frac{N}{A} \left(\sum_{i=0}^n B_r r_i \Delta A_i \right) \cdot I \quad (3)$$

이 식에서

$$\alpha = 2\pi \frac{N}{A} \left(\sum_{i=0}^n B_r r_i \Delta A_i \right) \quad (4)$$

라고 할때 $F = \alpha I$ 관계식을 얻을 수 있다[3]. α 는 추력상수이고 Newton / Ampere의 단위를 갖는다. 입력전류 대 코일이 받는 힘의 특성이 선형이 되려면 코일의 동작구간에서 α 의 값이 상수가 되어야 한다.

Magnet unit는 자기회로의 공극 자장을 이용하는 것으로서 필요한 만큼의 공극자장과 선형성을 얻기 위해서는 자석의 종류와 형태를 결정하여야한다. 자석의 가장 효율적인 이용을 위해서는 에너지적 ($B \cdot H$)이 최대가 되는 ($B \cdot H$)_{max} 점에서 동작하도록 자석의 형태를 만들고 종류를 결정하여야한다. 예로써 보자력이 큰 자석은 보자력이 작은 자석보다 상대적으로 얇게 제작할 수 있다. 자기회로에서 실제로 유용한 공극의 크기를 계산할 수 있으면 제작시 불필요한 부분을 제거하고 효율적으로 자기회로를 설계할 수 있다. 퍼미언스 계수, reluctance factor, fringing factor는 효율적인 자기회로의 설계를 위해서는 반드시 필요한 인자이다.

퍼미언스 계수는 ($B \cdot H$)_{max}에서의 자속밀도를 감자장으로 나눈 비로 나타내어지며 제작한 자석의 동작점에서의 자속밀도를 감자장으로 나눈 값과 같거나 조금 큰 값을 갖는 것이 좋으며, 이것은 자기회로에 외부로부터의 외란이 있을시 동작점 이동으로 인한 오동작을 방지하기 위해서다. Reluctance factor는 자기회로 중에서 자석의

로부터 나오는 총기자력을 공극기자력으로 나눈 비 (총기자력 / 공극기자력) 이며 자석으로부터 생성된 기자력이 얼마나 효율적으로 사용되고있는지를 알수 있는 것으로 그 값이 1에 가깝게 자기회로를 설계하여야 한다. Fringing factor 는 자기회로 내의 공극에 발생하는 총자속을 코일을 지나는 자속으로 나눈값 (총 자속 / 코일을 지나는 자속) 으로 나타내어지며 그 값이 1에 가깝게 자기회로가 설계되어야 효율적인 설계라 할 수 있다.

Magnet assembly 가 θ 방향으로는 대칭이므로 원통 좌표계로 해석하였고, 전형적인 축대칭 3차원 시뮬레이션 방법이 사용되었다. 따라서, M/A의 우측 단면만을 해석하면 전영역의 특성을 알수 있게 된다[4]. Fig. 2는 Maxwell 2D를 사용한 시뮬레이션에 사용된 magnet unit의 우측단면도이다.

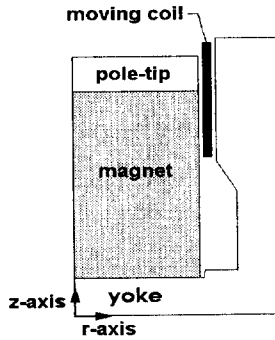


Fig. 2. Right-half of magnet assembly.

Computer simulation의 입력 데이터는 다음과 같다 [5].

① Yoke

Yoke는 전형적인 연철의 특성 (최대투자율: 1,000, $4\pi M_s$: 17 kG)을 입력하였다. 이의 자화곡선은 Fig. 3과 같다.

② 자석의 자성 특성

자석의 감자곡선 (Fig. 7)을 컴퓨터에 입력하여 비선형 해석하였다. Alnico 5 (B_r : 12.5 kG, B_c : 630 Oe 사용).

③ 코일

투자율: 1.0

권선수 \times 코일전류: 2.94~14.7 A

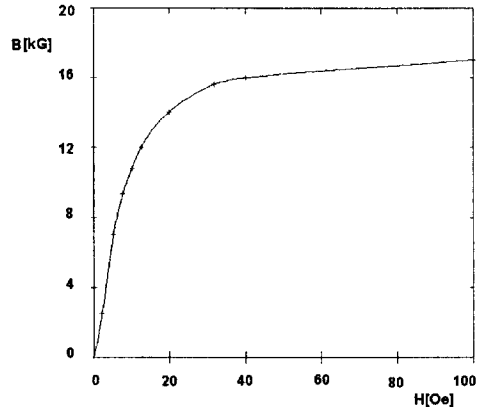


Fig 3. Magnetization curve of yoke material.

III. 결과 및 고찰

1. Magnet assembly의 자장분포

Fig. 4는 magnet assembly의 자속 분포도이다. 대부분의 자속이 공극으로 흐르고 있고, 약간의 누설자속 (fringing flux)이 공극의 위아래쪽으로 흐르고 있다. 코일은 대부분 공극에서 움직이므로 가능하면 코일의 작동 구간외에는 자속의 흐름을 적게 하는 것이 바람직하므로, 공극 아래쪽 하단 요크에 홈을 파서 자기저항을 크게 하므로 누설자속을 적게 설계하였다.

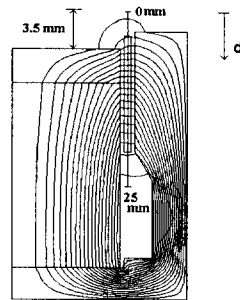


Fig 4. Flux of magnet assembly.

누설자속의 크기는 Fig. 4에 나타나있는 것처럼 공극의 중심에서 pole-tip 상단 3.5 mm 인 지점을 $d=0$ mm 인 점으로하여 아래로 25 mm 인 지점까지 해석영역을 정하고 pole-tip 에서 나와 공극을 지나 yoke 로 들어가는 총 자속과 코일을 지나는 자속의 차이로 계산하였다.

Reluctance factor 는 자석 내부의 Z 축방향 길이를 해

석영역으로 정하고 자장 H 를 이 길이만큼 적분하여 계산한 총기자력을 공극의 r 축방향 길이를 해석영역으로 정하고 자장 H 를 이 길이만큼 적분하여 계산한 공극기자력으로 나누었으므로 계산하였다. 시뮬레이션을 통해 구한 fringing factor 는 1.4 이며 reluctance factor 는 1.1 이다.

Fig. 5는 magnet assembly 공극 자장의 시뮬레이션값과 Gaussmeter 를 이용하여 공극에서 H_r (B_r)을 측정 한 결과를 비교한 것이다. 그림에서 코일 위치는 공극에서 코일의 작동하는 구간을 말한다. 그림의 d 는 Fig. 4에 표시한 것처럼 공극의 상단에서 하단으로 0에서 25 mm 인 지점까지를 나타낸 것이다. 시뮬레이션과 측정치의 오차는 시뮬레이션에서 생기는 부정확성과 측정의 부정확성에서 생기는 것으로 보이나, 상대오차는 4%로서 크지 않아 시뮬레이션의 타당성을 보여주고 있다.

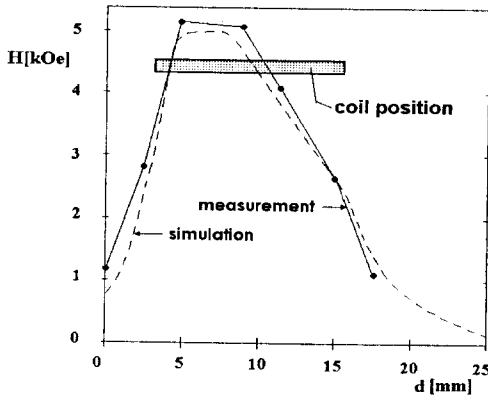


Fig. 5. Gap field of magnet assembly.

Magnet unit 의 공극은 1.7 mm 로 좁고 알니코 5 자석의 높은 잔류자속 밀도(1.25 T) 때문에 높은 자기장 H 을 보이고 있지만, 균일한 자기장 구간은 좁은 것을 볼 수 있다. 균일한 자속밀도 구간이 좁으므로 α 가 일정한 동작구간이 작아져 코일의 움직이는 범위를 제한하게 된다. 코일이 받는 힘은 코일위치의 자속밀도의 평균 값에 비례하므로 코일이 위치한 구간에서의 자속밀도 값으로부터 추력상수를 추측할 수 있다. 또한 코일이 움직이는 구간에서는 선형적인 출력특성을 위해서 α 가 일정해야 하는데, 이를 위해서는 코일의 동작구간에서 자기장 H_r 이 z -방향으로 균일하거나 Fig. 5에서 코일 위치의 좌측 끝단과 우측 끝단에서 경사의 기울기가 비슷하면 된다. 본 연구에서 해석한 magnet unit 의 경우는 균일한 자속밀도 구간이 좁기 때문에 후자의 경우로 설계된 것임을 알 수

있다. 이와 같이 공극 자속밀도 분포곡선의 모양이 magnet unit 의 선형성에 큰 영향을 미치므로, 적절하게 자기 회로를 설계하는 것이 중요하다.

2. Magnet unit의 출력 힘 시뮬레이션

Magnet unit 는 전류에 비례하여 선형적인 힘을 발생시켜야 함을 앞서 지적한 바 있다. 즉 magnet unit 가 전류를 힘으로 변환하는 척도인 α 가 상수가 되도록 magnet assembly 를 제작해야 되는 것이다. Fig 6은 공정 제어 신호로서 사용되는 4-20 mA 의 전류를 공급했을 때 magnet unit 의 힘을 측정 한 것으로 범위 1.2 N, 분해능 1 mN의 load cell 을 이용하여 측정 한 결과를 시뮬레이션 결과와 비교한 것이다. 힘은 시뮬레이션값과 측정치간에 5%의 차이가 나타났으며, α 의 시뮬레이션값은 27.5 이며 측정치는 28.5 이었다.

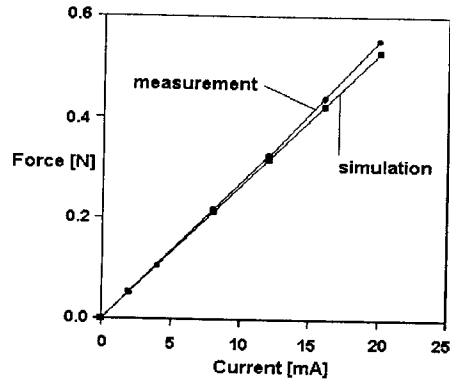


Fig 6. Input current vs. force characteristics.

위 그림에서 볼 수 있듯이 전류 대 힘관계가 선형적임을 확인할 수 있다. 선형성을 해치는 요인의 하나로서 코일에서 발생한 \vec{H} 는 자석의 자기장과 반대방향으로 향하게 되는데, 전류가 증가함에 따라 코일의 자기장이 증가하고 공극의 자기장은 감소하게 되어 결국 α 값이 감소하게 된다. 공극에서 코일이 받는 힘을 시뮬레이션한 결과 전류 대 힘의 추력상수 α 의 비선형성은 0.1% 이내임을 알 수 있었다. 또한 코일의 Z 축 위치에 따른 출력힘을 시뮬레이션을 한 결과 1% 이내의 차이를 보였기 때문에 한 위치에서 코일의 입력전류의 변화에 따른 출력힘 변화만을 시뮬레이션하였다.

3. 자석의 동작점 시뮬레이션

Fig. 7은 알니코 자석의 동작점을 시뮬레이션한 것이

다. 동작점이 굴곡점 (BH_{max} 점) 약간 위 부분에 있는 것을 알 수 있다. 이것은 갑자기 온도에 의한 자석의 안정성을 증가시키기 위한 것으로 알니코 자석과 같이 보자력이 작은 비선형 자석에서는 매우 중요하다 [6]. 동작점으로부터 감자장 (H_d) 과 자속밀도 (B_d) 는 각각 488 Oe와 10.8 kG 이다. 이로부터 퍼미언스 계수는 22.1이고, $B_d H_d$ 는 5.2 MGOe 임을 보아 자석이 효율적이고 안정적으로 사용되고 있음을 알 수 있다.

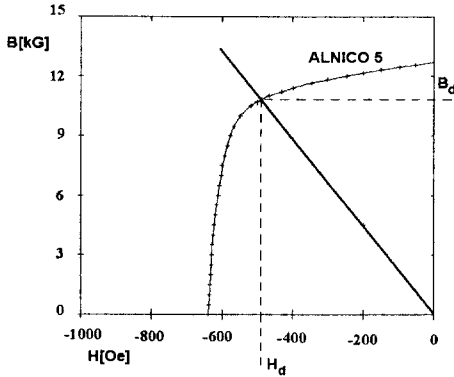


Fig 7. Demagnetization curve and simulated working point of Alnico 5 magnet.

IV. 결 론

Magnet unit 의 공극자장과 코일에 가해진 힘을 유한

요소법을 이용한 시뮬레이션으로 구하고 측정치와 비교한 결과 각각 4%, 5%의 차이를 나타냄으로 보아 시뮬레이션 방법이 타당함을 알 수 있었다. 또한 이제까지 실험적으로 구한 추력상수, 퍼미언스 계수와 간단히 구할 수 없었던 reluctance factor, fringing factor 를 시뮬레이션을 통하여 구할 수 있게 됨으로써 이를 이용한 magnet unit 등의 자기회로 설계의 정밀도를 높이고 제작의 시행착오를 줄일 수 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 김상진, 계장제어 시스템, 연학사, 1991.
- [2] Maintal-Honeywell, I/P 포지셔너 operator's manual, 1992.
- [3] 김성재, 조순철, 김진배, 정선태, "밸브개폐 제어를 위한 I/P 포지셔너용 Magnet unit 의 해석", 자기학회 추계 학술 발표대회, 1994.
- [4] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, pp. 220 (1992).
- [5] Ansoft corporation, Maxwell solver user's guide, 1991.
- [6] Hadfield, Permanent magnets & magnetism, Liffle Books, 1962.

An Analysis of Magnet Unit of Electro-Pneumatic Control Valve Positioner

S. J. Kim, J. W. Kim, S. T. Chung, S. Jo

*Department of electronic engineering, Soongsil university, 1-1 Sangdo 5-Dong,
Dongjak-Ku, Seoul, 156-743, Korea*

H. -K. Yoo, C. -G. Jeon, T. -B. Koh

LG Honywell, 56 Chaam-Dong Chunan City, Choongcheongnam-Do, 330-200, Korea

(Received 29 September 1997, in final form 15 November 1997)

We analyzed an important part of control valve, magnet unit, which is used to control the fluid. Magnetic circuit which is composed of magnet and yoke is analyzed using finite element method. Then, flux density and coil force were calculated and compared with those of measured. According to the simulation results, the gap field, force constant, and permeance coefficient were 3~5 kG, 27.5 N/A, 22.1, respectively, which corresponded reasonably well with the measured values. We also obtained reluctance factor of 1.1 and fringing factor of 1.4 by simulation.