

전기압력밥솥을 위한 압력밸브용 솔레노이드 설계 및 제어

(Design and Control of Solenoid for Pressure Valve for Electric Pressure Cooker)

김대경* · 우경일**

(Dae-Kyong Kim · Kyung-Il Woo)

Abstract

In this paper, design by magnetic analysis software and proportional control of solenoid for pressure valve for electric pressure cooker is described. The validation of design was proved by 3D finite element analysis results. Also the efficiency of an air ventilation mechanism was considered when pressure was happened by fluid analysis results. The linear proportional control system by AVR was manufactured and its validation was proved by pressure control of solenoid.

Key Words : Fluid analysis, Linear proportional control, Pressure valve, Ventilation mechanism, 3D Finite Element Analysis

1. 서 론

현재 국내 기업에서 On/Off 비연속 제어가 가능한 솔레노이드밸브를 이용한 전기밥솥용 압력제어 밸브를 개발 판매하고 있다. 그러나 이러한 On/Off의 비연속 압력제어 방식은 고성능 전기압력밥솥에서 요구하는 연속적이며 선형적인 압력조절 성능을 만족시키지 못한다. 전기압력밥솥을 생산하는 나라는 아시아 몇 개 국가와 유럽의 극소수 회사가 있다. 전기압력밥솥의 종주국이라 불리는 일본 보다 현재 우리나라의 기술이 우위에 있어, 전기압력밥솥의 관련한 국내 업체의 기술이 가장 뛰어나다고

할 수 있다. 일반제어밸브의 기술은 미국과 유럽이 가장 뛰어나지만, 전기압력밥솥에 적용할만한 밸브는 아직 개발되지 않았다. 그래서 전기압력밥솥용 압력제어밸브를 해외 기업으로부터 수입하는 것 보다 국내기술로 개발하는 것이 핵심기술보유와 제품의 경쟁력에 도움이 될 것이다. 그리고 전기밥솥을 이용한 다양한 요리와 보온조절기능을 만족시키기 위해 밥솥의 정확한 압력 제어가 필요하고, 이러한 성능을 만족시킬만한 압력제어밸브는 아직 개발되지 않았다.

본 논문에서는 자기해석 프로그램을 이용한 압력 밸브용 솔레노이드의 설계 및 저가형 고정밀 비례 제어에 관하여 기술한다. 압력밸브용 솔레노이드는 Moving Coil Type의 액츄에이터를 적용하였다. Moving Coil Type의 액츄에이터는 Mover의 무게가 적기 때문에 응답성이 빠른 장점이 있다[1-7]. 압력 제어밸브는 2차원으로 표현이 불가능하므로 3차원

* 주저자 : 순천대학교 전기제어공학과 조교수

** 교신저자 : 부경대학교 전기공학과 부교수

Tel : 051-629-6321, Fax : 051-629-6305

E-mail : cogging@pknu.ac.kr

접수일자 : 2012년 5월 23일

1차심사 : 2012년 5월 30일

심사완료 : 2012년 6월 20일

해석이 필수적이며 3차원 유한요소해석은 시간이 오래 소요되는 단점이 있지만 위치별 다양한 매질특성에 대하여 적용이 용이하고 모델의 특성을 가장 정확히 해석할 수 있는 장점이 있다[8]. 3차원 유한요소 해석 결과를 통하여 설계의 타당성을 확인하고 유체 해석 결과로부터 압력이 발생하였을 경우 효율적으로 공기가 배출되기 위한 공기 배출 구조에 대하여도 고찰한다. 또한 저가 마이크로 AVR을 이용한 선형 비례제어 디지털 제어기를 설계 제작하고 솔레노이드의 압력 제어 실험을 통하여 제안한 제어기의 우수성을 확인한다.

2. 비례압력제어용 솔레노이드

2.1 솔레노이드 특성

솔레노이드에서 발생하는 추력은 식 (1)과 같이 영구자석에서 발생하는 자속과 코일에 흐르는 전류에 의하여 발생한다.

$$F = NB_y l \times i \quad [N] \quad (1)$$

공극 자속 밀도는 영구자석에 의한 B_m 와 코일에 의해 발생하는 B_{coil} 을 더한 값이므로, 솔레노이드의 추력 F 는 영구자석에 의해 발생하는 일정한 자속밀도와 코일에 의해 발생하는 자속밀도로 나누어 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$F = NI i (B_m + B_{coil}) \quad [N] \quad (2)$$

코일에 의한 자속밀도는 식 (3)과 같다.

$$B_{coil} = \frac{Ni\mu_0}{2(l_m + l_g)} \quad [Wb/m^2] \quad (3)$$

여기서 식 (3)을 식 (1)에 대입하여 식 (4)를 얻을 수 있다. 그림 1은 솔레노이드가 동작함에 따라 발행하는 비선형적 특성을 보여준다. 그림에서 선형특성은 영구자석에 의한 추력 특성이며 비선형 특성은 코일에 의한 추력특성을 나타낸다.

$$F = NB_{PM} l i + NI \left[\frac{\mu_0}{2(l_m + l_g)} \right] i^2 [N] \quad (4)$$

또한 그림 1은 솔레노이드의 코일에서 발생하는 자속의 방향이 영구자석에서 발생하는 자속의 방향과 서로 같을 경우와 다를 경우에 대하여 각각 밀고 당기는 힘의 크기가 서로 다르다는 것을 보여준다.

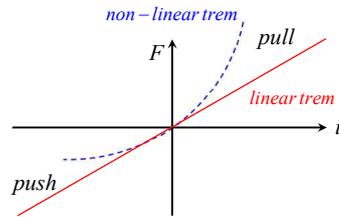


그림 1. 솔레노이드의 비선형 특성
Fig. 1. Nonlinear characteristics of solenoid

2.2 영구자석에 의한 동작점

솔레노이드에서 발생하는 추력을 정확히 계산하기 위해서는 자속밀도의 계산이 필수적이다. 영구자석을 포함한 기기에서는 그림 2에서 보듯이 영구자석의 감자곡선과 퍼미언스 계수(P_c)와의 교점이 되는 동작점 (B_m, H_m)을 찾아야 한다.

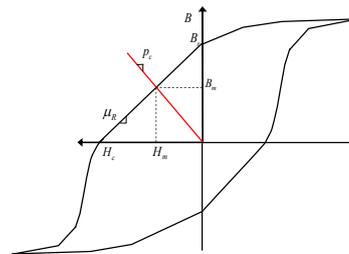


그림 2. 영구자석의 동작점
Fig. 2. Operating point of permanent magnet

식 (5)의 암페어 법칙에서 $H_c=0$ 이라고 가정하면, 식 (6)과 같다.

$$Ni = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad [AT] \quad (5)$$

$$0 = H_m l_m + H_c l_c + H_g l_g$$

전기압력밥솥을 위한 압력밸브용 솔레노이드 설계 및 제어

$$H_g = \frac{l_m}{l_g}(-H_m) [AT/m] \quad (6)$$

누설 자속이 거의 없다고 가정하면 즉, $\Phi_m = \Phi_g$ 인 경우

$$B_m = \frac{\Phi_m}{A_m} = \frac{\Phi_g}{A_m} [Wb/m^2] \quad (7)$$

$\Phi_g = P_g F_g$ 이고, $F_g = H_g l_g$ 이므로 식 (7)은 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$B_m = \frac{P_g H_g l_g}{A_m} = \frac{P_g l_m}{A_m}(-H_m) \quad (8)$$

$$= P_c(-H_m) [Wb/m^2]$$

여기서

P_c : 퍼미언스 계수, B_m : 영구자석의 자속밀도
 H_m : 영구자석의 보자력, l_m : 영구자석 두께
 A_m : 영구자석 단면적, A_g : 유효공극 단면적

2.3 솔레노이드의 운동방정식

솔레노이드에서 발생한 추력에 의하여 가동자가 그림 3과 같은 방향으로 이동할 경우, 이때의 전압방정식은 식 (9)와 같다.

$$V_0 = Ri + \frac{d\lambda}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} + k_e x' [V] \quad (9)$$

추력에 의해 움직이는 가동자의 운동방정식은 식 (10)과 같이 표현된다.

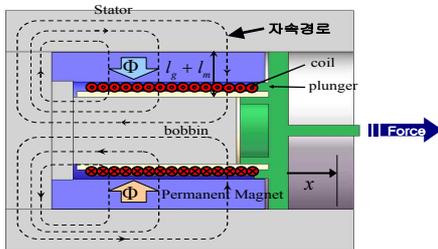


그림 3. 솔레노이드의 추력 발생
 Fig. 3. Thrust generation of solenoid

$$F = m \frac{dx'}{dt} + k_d x' + F_f + k_s x + F_{const} [N] \quad (10)$$

여기서

m : 이동자의 무게
 k_d : 공기에 의한 damping coefficient
 F_f : 플런저와 보빈의 의한 저항 계수
 k_s : 스프링 또는 케이블에 의한 spring coefficient
 F_{const} : 중력에 의한 일정한 힘, x' : $\frac{dx}{dt}$

전류에 의해 발생하는 추력과 위의 운동방정식을 결합하면 다음과 같은 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$m \frac{dx'}{dt} = -(F_f + F_{const}) - (k_d x' + k_s x - NB_g l_i) \quad (11)$$

$$L \frac{di}{dt} = V_0 - (k_e x' + Ri)$$

식 (11)을 행렬로 표현하면 다음 식 (12)와 같고, 이 식을 이용하여 전압 제어방식으로 솔레노이드의 위치를 결정할 수 있다. 여기서 사용된 V_0 는 DC인가전압이며 위치 결정 방법을 간략히 표현하면 그림 4와 같다. 이를 이용하여 전압을 인가하여 이동자의 위치를 결정하여 압력밥솥 내부의 압력조절을 할 수 있다. 식 (13)~(16)은 솔레노이드 밸브의 흡인력, 기자력, 온도 상승, 전압식이다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ x' \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -F_f - F_{const} \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$- \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ k_s & k_d & -k_f \\ 0 & k_e & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x' \\ i \end{bmatrix}$$

$$M \frac{dX}{dt} = Y - KX$$

$$\frac{dX}{dt} = M^{-1}(Y - KX)$$

$$F_m = \frac{B_g^2 S}{2\mu_0} [N] \quad (13)$$

$$U = NI = \frac{B_g l_g}{\mu_0} + \sigma H_i l_i [A] \quad (14)$$

$$V = IR = 4\rho l_m NI(\pi d^2) [V] \quad (15)$$

$$\theta_f = \frac{q\rho}{2\lambda\xi T} \left[\frac{NI}{h} \right]^2 [^\circ\text{C}] \quad (16)$$

여기서

- B_g : 공극 자속밀도, λ : 열방산 계수
- l_g : 공극의 길이, ρ : 도선의 전기저항률 [$\Omega \cdot m$]
- q : 사용률, ξ : 도선의 점적율
- H_i : 철심부의 자계강도, T : 코일의 폭
- l_m : 코일의 1회 감긴 평균길이
- h : 코일 높이, l_i : 철심부의 자로길이
- R : 코일의 저항, d : 도선의 선경

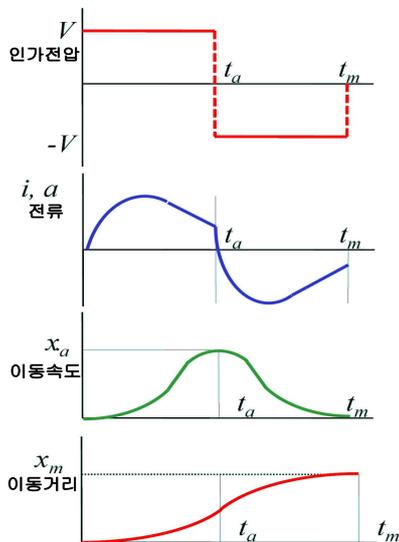


그림 4. 위치 결정을 위한 전압제어 방법
Fig. 4. Voltage control method for position

2.4 솔레노이드 설계

그림 5는 솔레노이드의 설계 절차를 나타낸다. 먼저 자속밀도를 결정한 후 단면적의 크기를 계산한다. 식 (15)를 이용하여 기자력을 구하고, 식 (16)을 이용하여 온도상승을 고려한다. 이를 이용하여 코일의 높이와 코일의 폭을 구하고, 코일의 선경, 코일의 높이, 코일의 턴수를 구한다. 마지막으로 보빈의 크기와 요크단면적을 구하여 솔레노이드를 설계한다.

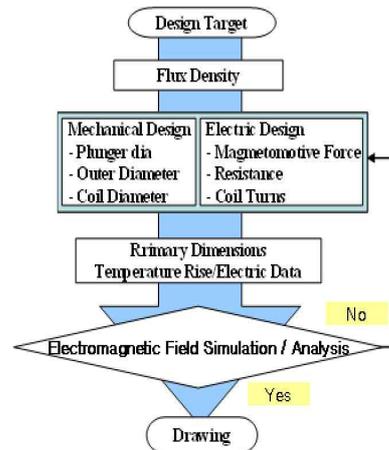
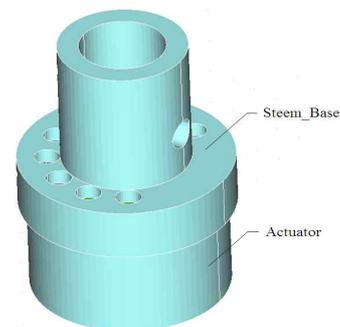


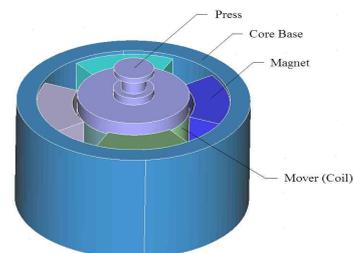
그림 5. 설계 절차
Fig. 5. Design process

3. 3차원 전자장 및 유동해석

3.1 전자장 해석



(a) 비례압력제어밸브
(a) Linear pressure control valve



(b) 액츄에이터
(b) Actuator

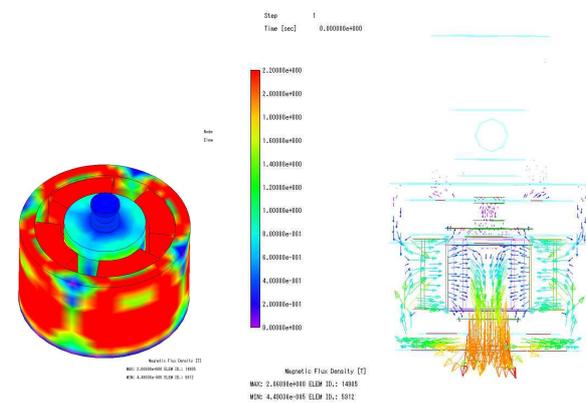
그림 6. 시제품의 3차원 모델
Fig. 6. 3D model of prototype

표 1. 각 부품의 재질

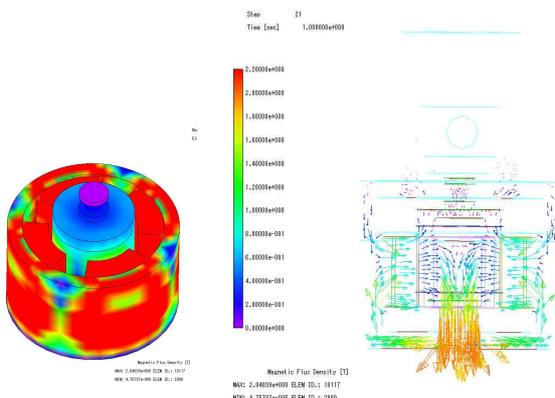
Table 1. Materials of components

항 목	재 질	비 고
Steem_Base	S45C	
Magnet	N38SH	NdFeB
Mover	Copper	Coil
Core Base	S45C	
Press	-	Non-Magnetic Material

로 설계되었다. 그림 6은 비례압력제어밸브의 형상이며 코일에 인가되는 전류가 250[mA], 코일의 이동거리는 2[mm]이다. 코일은 $\varnothing 0.12 \times 650$ Turns이며, 각 부품의 재질은 표 1과 같다.



(a) 초기위치
(a) Initial position



(b) 코일 2[mm] 이동
(b) 2[mm] displacement of coil

그림 7. 자속밀도 분포 (Vector)
Fig. 7. Flux density distribution (vector)

비례압력제어밸브 시제품의 3차원 전자장 해석을 수행하였다. 시제품은 원통형 구조로 영구자석을 4개 부착하여 자속이 Core Base의 중심에 집중될 수 있도록

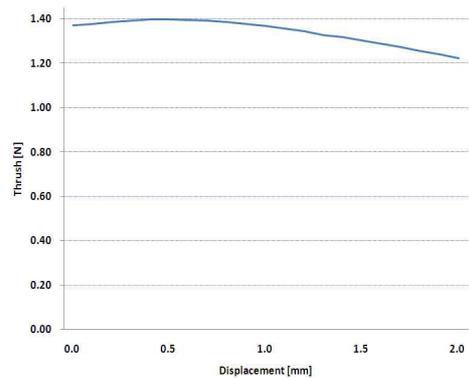


그림 8. 변위에 따른 발생 추력
Fig. 8. Thrust according to displacement

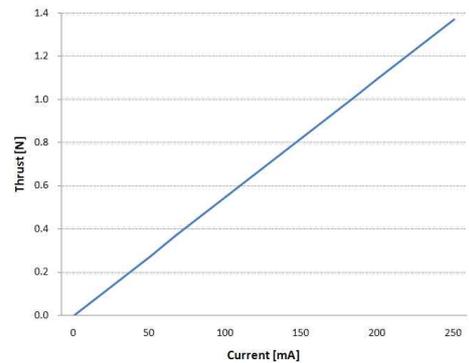


그림 9. 전류에 따른 발생 추력
Fig. 9. Thrust according to current



그림 10. 인장 시험기를 이용한 추력시험
Fig. 10. Thrust experiment by tensile force tester

그림 7은 코일의 초기위치에서와 2[mm] 이동 했을 때 Vector로 표현된 자속밀도 분포로써 코일 변화에 대한 자속밀도의 변화를 확인할 수 있으며, 그림 8은 코일이 위쪽방향으로 2[mm] 이동시 변위에 따른 발생 추력을 나타낸다. 변위 0.5[mm] 지점에서 1.4[N]으로 최대추력이 발생하며 1[mm]를 벗어나면서 부터 추력이 감소하는 특성을 보인다. 그림 9는 전류에 따른 추력특성으로 전류의 크기에 비례하여 추력이 선형적으로 커지는 특성을 나타낸다. 그림 10과 같이 인장 시험기를 이용하여 개발된 비례압력제어밸브의 추력을 측정하였다. 그림 11과 같이 3차원 전자장 해석 결과와 실제 전류제어를 통한 밸브의 추력시험 결과는 잘 일치됨을 확인할 수 있다.

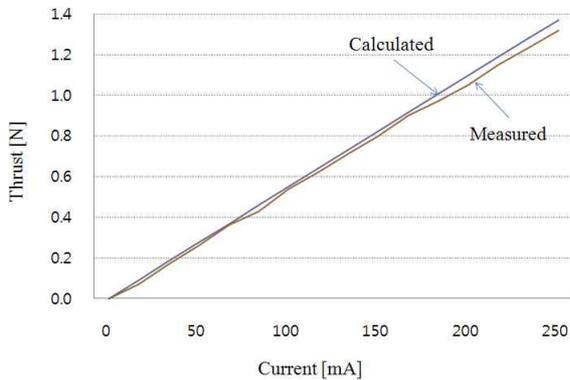


그림 11. 전류에 따른 추력특성 비교
Fig. 11. Thrust comparison according to current

3.2 유동해석

비례압력제어밸브의 Steem_Base의 구멍들이 밥솥에 압력이 생겼을 때 원활히 증기를 배출하는지 확인하기 위하여 비례압력제어밸브의 3차원 유동해석을 수행하였다. 압력밸브 모델링은 그림 12과 같이 상용 3D 프로그램인 CATIA V5를 이용하여 모델링 하였으며 각 부품별로 모델링 하여 어셈블리 하였다. 해석은 CFD 해석의 5 Cycle을 진행하여 시스템의 안정화를 유지하였다. 그림 13은 유동해석 결과로 입구의 압력으로 인해 출구의 압력은 1.54[bar]로 공기가 원활히 유동됨을 알 수 있다.

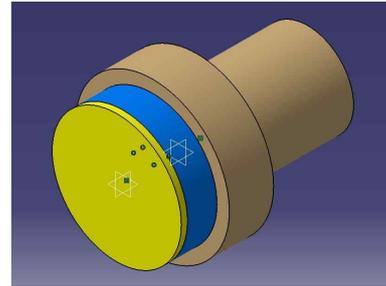


그림 12. 비례압력제어밸브의 3차원 모델링
Fig. 12. 3D modeling of linear pressure control valve

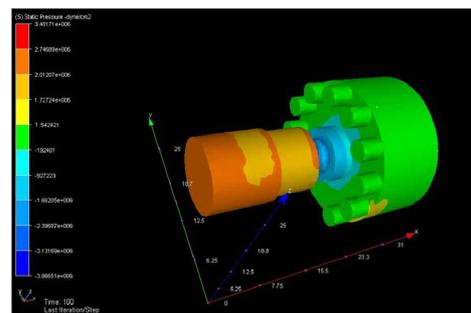


그림 13. 유동해석 결과
Fig. 13. Fluid analysis result

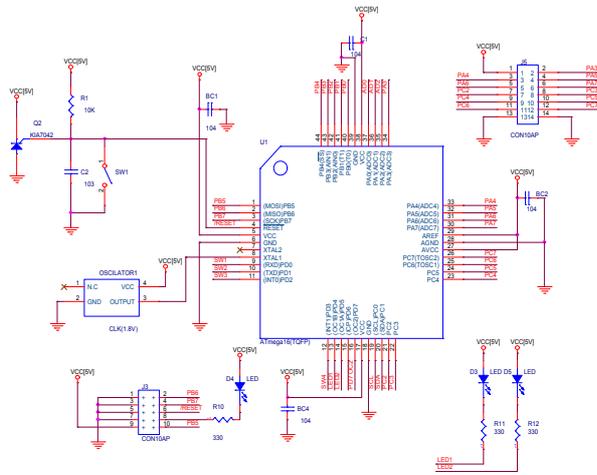
4. 디지털 제어기 구현

압력센서를 이용한 고정밀 선형비례밸브 디지털 제어기를 설계하였다. 선형비례밸브는 입력전류에 대해 추력이 선형적인 특성을 가지고 있으므로 밸브의 전류를 제어하는 방식으로 디지털 제어기를 구현하였으며, 개발된 최종 제품의 단가를 고려하여 저가의 마이컴으로도 구현이 가능하도록 디지털

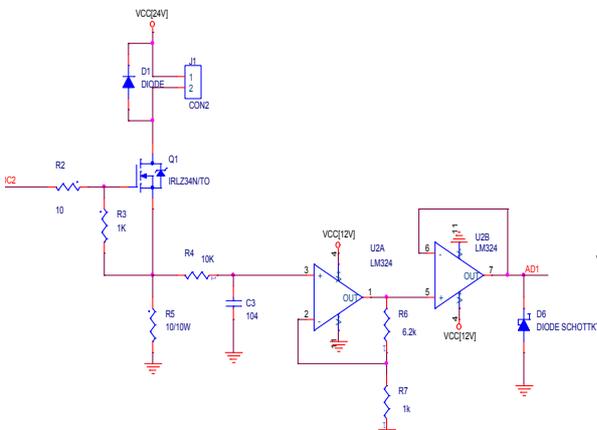


그림 14. 디지털제어기 구조
Fig. 14. Configuration of digital controller

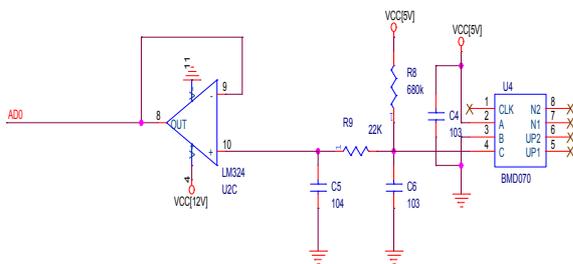
전기압력밥솥을 위한 압력밸브용 솔레노이드 설계 및 제어



(a) 마이컴부 회로도
(a) Circuit of micro-controller part



(b) 출력 전류부 회로도
(b) Circuit of output current part



(c) 압력센서 계측부 회로도
(c) Circuit of pressure sensor measurement

그림 15. 디지털제어기 회로도
Fig. 15. Circuit of digital controller

털 제어기를 간소화 시켰다. 그림 14는 디지털제어기의 구조를 나타낸 것으로 밥솥의 압력을 저가 압력센서인 BOSCH사의 BMD070압력센서를 이용하여 계측하고 계측된 아날로그 신호의 압력신호를 AVR128이라는 저가의 마이컴을 이용하여 데이터 취득 후 내부 디지털 PI제어기를 통하여 비례 제어밸브 내부의 무버의 코일에 흐르는 전류량을 제어하여 선형비례제어 밸브의 위치 및 추력을 제어할 수 있는 Closed-Loop 압력제어기를 구현하였다. 그림 15는 개발된 디지털제어기의 회로도를 나타낸다. 그림 16은 개발된 제어기 및 비례선형밸브를 실제 판매되고 있는 상용 압력밥솥에 부착하여 실험한 구성을 보여주고 있으며, 밥솥의 내부 압력을 0.7[Bar]를 제어하기 위하여 On/Off 압력제어 방법과 비례압력제어 방법으로 실험하였다. 또한 밥솥의 내부 압력을 계측하기 위해 외부에 압력센서를 별도로 부착하여 오실로스코프를 통하여 제어 정밀도를 확인하였다. 그림 17은 압력제어 방법에 따른 제어정도를 비교한 결과를 보여주고 있다. 그림 17 (a)는 기존 On/Off 압력제어방법을 이용한 경우의 압력제어 결과를 보여주고 있으며 최대 압력편차가 0.1[Bar], 최소편차 0.05[Bar] 정도이었으나, 그림 17 (b)는 개발된 비례압력제어기와 밸브를 이용하는 경우 최대 0.085[Bar]와 최소편차 0.03[Bar]로 밥솥 내부의 압력제어가 매우 우수함을 확인하였다.

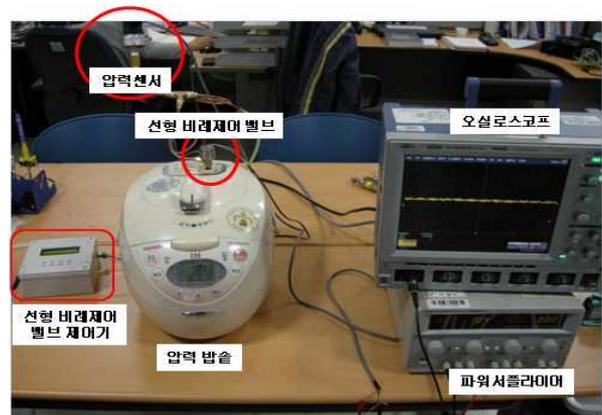
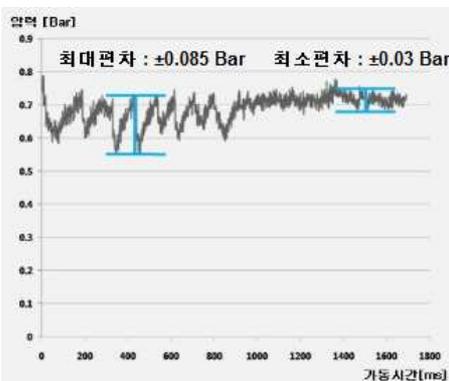


그림 16. 압력제어 실험 구성
Fig. 16. Experimental set for pressure control



(a) 기존 밸브의 압력제어(On/Off 압력제어방법)
(a) Pressure control of existing valve(On/Off pressure control method)



(b) 개발된 밸브 및 제어기의 압력제어(비례압력제어 방법)
(b) Pressure control of developed valve(Linear pressure control method)

그림 17. 압력제어 방식에 따른 제어정도 비교
Fig. 17. Pressure control comparison according to pressure control method

5. 결 론

본 논문에서는 자기해석 프로그램을 이용하여 압력 밸브용 솔레노이드를 설계하였고 비례제어를 수행하였다. 3차원 유한요소 해석 결과를 통하여 설계의 타당성을 확인하였고 설계된 모델에서 압력이 발생했을 경우 유체해석 결과를 통하여 출구의 압력이 1.54[bar]로 공기가 원활히 유동됨을 알 수 있었다. 또한 기존의 On-Off 제어기에 비해 저가 마이크로 AVR을 이용한 선형 비례제어 디지털 제어기를 통하여 내부의 압력제어가 더 정밀하게 수행됨을 확인하였다.

References

- [1] I. Boldea and Syed A. Nasar, "Linear Electric Actuators and Generators", Cambridge University Press, 1997.
- [2] Sung-Duck Kim, Sang-Lae Lee, "Impedance Analysis of a Solenoid Eddy Current Coil with Cylindrical Two-conductor Rods", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 12, No. 3, P. 89-98, 1998.8.
- [3] Hae-Kyung Lee, Yang-Ho Kim, Seuk-Young Hwang, "Analysis of Serial Piston Actuator on the Dynamic Characteristics by Electromechanical Energy Conversion", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 18, No. 2, p.110-114, 2004.3.
- [4] S. S. Jeong and S. M. Jang, "Armature reaction effect and inductance of moving coil linear oscillatory actuator with unbalanced magnetic circuit", IEEE trans. Magn., Vol. 37, Issue 4, Part 1, July. 2001.
- [5] S. M. Jang, "Static Characteristics of a Moving-Coil-Type Linear Motor in Consideration of Interaction between PM and Armature Field" KIEE International Transactions on Electrical Machinery and Energy Conversion System, vol. 48B, no. 1, pp19~29, 1999. 1.
- [6] G. H. Kang, J. P. Hong, G. T. Kim, and D. H. Kim, "An Approach Toward Improving Performance of Moving Coil Type Linear Oscillatory Actuator Considering Asymmetric Magnetic Circuit", Industry Applications Conference, Vol. 1, 8-12 Oct. 2000.
- [7] E. A. Mendrela, Z. J. Pudlowski, "Transients and dynamics in a linear reluctance self-oscillating motor", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 7, No 1, March. 1992.
- [8] A. Canova, M. Ottella, D. Rodger "A coupled field-circuit approach to 3D FEM analysis of electro-mechanical devices", Electrical Machines and Drives, 1999. Ninth International Conference on pp.71-75.

◇ 저자소개 ◇



김대경 (金大慶)

1972년 9월 27일생. 2001년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(박사). 2001~2005년 삼성전자 가전연구소 선임연구원. 2005~2011년 전자부품연구원 디지털컨버전스연구센터 센터장. 2011년~현재 순천대학교 전기제어공학과 조교수.



우경일 (禹景一)

1969년 9월 6일생. 1997년 한양대학교 대학원 졸업(석사). 2001년 동 대학원 졸업(박사). 2002년~현재 부경대학교 전기공학과 부교수.