

솔레노이드 밸브 성능 향상 전략 및 자성 재료 기술

Performance Improvement Strategy of Solenoid Valve and Magnetic Material Technique

윤소남 · 윤동원

S. N. Yun and D. W. Yun

1. 서론

일반적으로 유공압용 밸브에 있어서는, 사용유량과 사용압력, 사용유량과 사용압력에서의 내/외부누설 등과 같이 용량을 결정하는 사양 이외에 히스테리시스, 선형성, 반복성, 스텝응답 및 주파수응답특성 사양이 밸브의 성능을 결정하는 중요한 인자로서 작용한다. 때문에 메인밸브를 구동하는 액추에이터는 전기식, 전자식 혹은 회전운동방식, 직선운동방식 등에 관계없이 우수한 성능 제품들이 채용되거나, 채용을 위하여 무단한 연구들이 이루어지고 있다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 솔레노이드 액추에이터도 예외는 아니다.

모든 액추에이터에 적용되는 일반적인 요구조건은 다음과 같다^{1~2)}.

- ㄱ) 변위량(감도= 변위량/구동과워)이 클 것.
- ㄴ) 재현성이 좋을 것(히스테리시스가 적을 것).
- ㄷ) 응답이 빠를 것.
- ㄹ) 온도 특성이 좋을 것.
- ㅁ) 적은 에너지로 구동이 가능할 것.
- ㅂ) 조작력이 클 것.
- ㅅ) 크기와 중량이 작을 것.
- ㅇ) 장수명이며, 가격이 싼 것.

ㄱ)에서 보이는 감도에서 힘을 고려하면, 출력감도=조작력/구동과워의 의미를 갖게 되며, 출력감도가 크게 되면 응답이 빠르고, 적은 에너지로 구동이 가능하고, 크기와 중량이 작아지는 동시에 장수명과 저가격을 꾀할 수 있다. 또한, KS, JIS 및 기타 국제규격의 시험항목마다 우수한 특성을 발휘하는 솔레노이드 액추에이터 및 밸브는 전기-기계 에너지 변환 기술(솔레노이드 및 회로기술), 저마찰 손실과 응답성을 고려한 기계 메커니즘 기술, 코일 및 자성재료 기술을 통하여 해결될 수 있을 것으로 사료된다. 본 해설에서는 비례솔레노이드와 관련하여 KS 및 JIS의 시험항목을 고찰하고, 비례솔레노이드밸브의 성능에 영향을 미치는 인자들을 도출하여 분석하는 것으

로 한다. 특히, 자성재료와 관련해서는 우수한 성질을 가지는 재료의 선정방안 및 대표적인 자성재료의 장단점을 비교 분석하고, 끝으로 B-H analyzer(자속밀도-자계강도 분석기)의 필요성 및 기본적인 특성을 고찰하는 것으로 한다.

2. KS 및 JIS를 통한 시험항목 분석

일반적으로 비례솔레노이드 액추에이터/밸브의 성능 향상이라 하면, KS 혹은 JIS 및 기타 국제규격의 시험 항목들에 대해서 우수한 특성의 데이터를 제공하게 되면 만족한다 할 수 있다. 표 1은 DC와 AC 솔레노이드 액추에이터의 시험항목을 비교한 것으로, 연속 통전시에 발생할 수 있는 소음 및 코일 손실의 여부에 따라서 조금씩 항목들이 달라지고 있다. 표 2는 KS 및 JIS에서 제공하는 비례솔레노이드 액추에이터 시험항목과 저자의 경험에 의하여 필요로 하는 항목을 추가

표 1 Test items of on-off solenoid actuator

No	시 험 항 목	DC 솔레노이드	AC 솔레노이드
1	구조시험	○	○
2	동작시험	○	○
3	소음시험	×	○
4	소비전력시험	○	×
5	유지전류시험	×	○
6	시동전류시험	×	○
7	유지력시험	○	×
8	흡인력시험	○	○
9	잔류흡착력시험	○	○
10	온도시험	○	○
11	절연저항시험	○	○
12	내전압시험	○	○
13	내습성시험	○	○
14	보관내한성시험	○	○
15	보관내열성시험	○	○
16	단자강도시험	○	○
17	내구성(수명)시험	○	○

하여 작성한 것이다. 신뢰성 시험과 관련해서는 신뢰성 항목 자체가 일반적인 성능시험 항목과 완전한 차별성이 있기 때문에 이 해설에서는 제외하였다.

표 2 Test items of proportional solenoid

대 분류	소 분류	KS 규격	JIS 규격	추천 시험
솔레노이드 시험	솔레노이드 구조시험	×	×	○
	코일저항시험	○	○	○
	절연저항 및 내전압시험	○	○	○
	온도상승 시험	○	○	○
	변위 히스테리시스 특성시험	×	×	○
	흡인력 특성시험	×	×	○
	SSR 지연특성시험	×	×	○
정특성 시험	변위스텝특성시험	×	×	○
	입력신호에 대한 제어압력 특성시험	○	○	○
	분해능 시험	○	○	○
	유량 변화에 대한 제어압력 변화특성시험	○	○	○
	반복성 시험	○	○	○
	압력강하 특성시험	○	○	○
	기름 온도 변화에 대한 제어 압력 변화 특성시험	○	○	○
	내부누설시험	○	○	○
	외부누설시험	○	○	○
	보증 내압력 시험	○	○	○
동특성 시험	제어압력 맥동 특성시험	○	○	○
	안전밸브에서 유량변화에 대한 제어압력 변화 특성시험	○	○	○
환경시험	스텝응답시험	○	○	○
	주파수 응답시험	○	○	○
환경시험	내진동시험	○	○	○
	내습 및 내수시험	○	○	○

선정하려는 혹은 설계하려는 밸브나 솔레노이드 액추에이터의 구조 간단화, 소형화, 조립공정 개선, 동작 안정화, 저소비전력화, 빠른 응답성, 제어능 향상 및 고흡인력을 얻기 위해서는 표 1 및 표 2의 성능 시험항목들이 반드시 필요하다 하겠다.

3. 성능향상 전략

3.1 기계 메커니즘 부 개선 전략^{3~5)}

식(1)은 비례솔레노이드 밸브의 힘 평형식을 보이는 것으로, 흡인력(F_m)은 밸브부의 운동력과 플런저부의 운동력의 합과 유체유동력의 합에 등가되거나, 안전성을 고려하여 130% 정도 혹은 그 이상의 큰 힘을 가지게 된다.

$$\sum F = F_m - \{m_p a_p + b_p \dot{x}_p + k_p(x_p + x_{p0})\} - \{m_v a_v + b_v \dot{x}_v + k_v(x_v + x_{v0})\} \pm F_f \quad (1)$$

식 (1)에서 p 는 플런저 부, v 는 밸브 부, o 는 초기

압축길이를 의미하고, m 은 질량, a 는 가속도, b 는 마찰계수, x 는 변위, k 는 스프링 상수를 의미한다. F_f 는 유체 유동력을 의미하는 것으로 설계시에 구조를 최적화하면 효과를 얻을 수 있다. 식 (1)로부터 성능 개선 인자들을 살펴보면, 밸브부나 플런저부의 마찰계수, 스프링 상수 및 초기 압축길이, 질량, 구조 및 형상이며, 솔레노이드 액추에이터부에서는 코일선정 및 자기회로 개선, 제어회로 개선, 자성재료 개선 등을 들 수 있다. 응답성과 주파수 특성 및 히스테리시스 특성에 직접 영향을 미치는 인자는 질량(m)과 마찰계수(b)이며, 응답성과 선형성에 직접 영향을 미치는 인자는 마찰계수 그리고 스프링 상수(k) 및 스프링 구조이다. 따라서, 질량의 영향을 줄이기 위해서는 우수한 재질 선정 및 유출 능력이 우수한 구조설계가 필요하고, 스프링의 영향을 줄이기 위해서는 최적의 초기 압축길이 선정과 선형성이 우수한 재질 선정 및 최적구조설계가 필요하다. 마찰의 영향을 최소화하기 위해서는 정밀 가공 및 무마찰 쉘 채택 기술이 중요하며, 시스템에 적절한 디더(PWM 주파수) 사용이 매우 중요하다.

3.2 제어회로 개선 전략

그림 1은 비례솔레노이드 액추에이터에 인가되는 입력전압의 형상을 보이는 것으로, 메인 입력전압에 디더형식의 파형을 실어 보내는 형식에서 최근에는 PWM 신호를 이용하여 제어를 수행하는 현상이 두드러지고 있다. 문헌상의 자료를 이용하면, 일반적으로 점성마찰계수가 0.4 이상이면 PWM 방식은 유효하며, PWM 주파수는 시스템 고유진동수의 2에서 4 배까지가 적당하다. 또한, 고체 동마찰력의 10배 이상의 진폭을 주면, PWM 주파수 범위를 100에서 400[Hz] 내에서 사용이 가능하다.

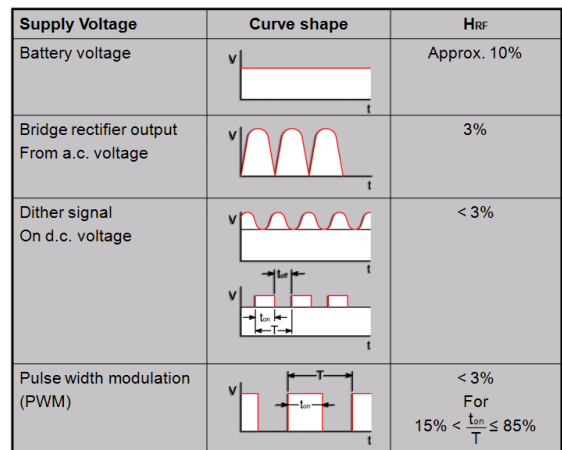
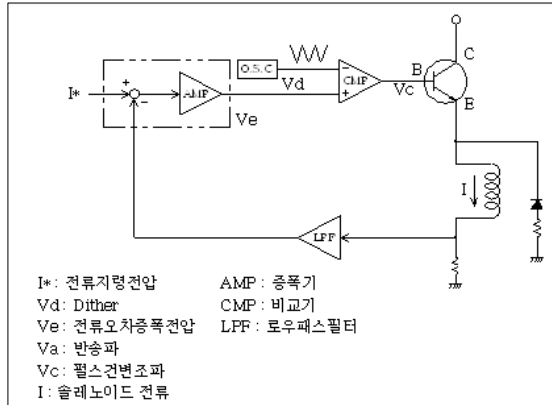
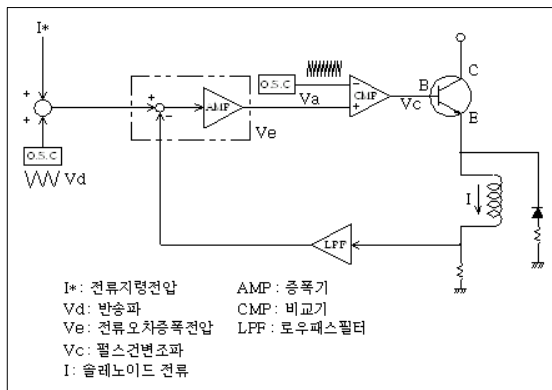


그림 1 Kinds of valve input voltage shape

그림 2의 제어회로는 최근에 많이 사용하는 비례 솔레노이드 응답성 향상을 위한 것으로 a)와 같이 일정한 주기내에서 듀티율을 조정하는 방법도 사용되고 있지만, b)와 같이 메인주기 내에 마이너 주기를 삽입하여 시스템을 고속으로 제어하는 회로들이 선보이고 있다.



a) Conventional type controller



b) High speed controller

그림 2 Controller circuit improvement strategy

3.3 코일의 온도 특성을 고려한 성능 개선 전략

코일의 온도 특성은 흡인력, 밸브 시스템의 안정성 및 내구/수명과 깊은 관련이 있는 인자이다.

식 (2)는 코일의 온도 상승치를 나타내는 것으로, 최종적인 솔레노이드 설계 종료시에 반드시 확인하여야 하는 절차이다.

$$\theta = I_h^2 R_h / (2\lambda \cdot l_m h) \quad (2)$$

여기에서, θ : 온도상승치, I_h : 여자전류, R_h : (20°C +설계 목표 온도 상승치)에서의 코일 저항, λ : 설계 목표 온도 상승치에서의 코일의 열방출 계수, l_m : 1회 감기는 코일의 평균 길이, h : 보빈 내에 코일이 차지할 거리를 나타낸다. 식 (2)를 통하여, 코일의 높

이, 점적율, 동선의 저항율, 연속 통전 시간, 기자력이 계산되어진다.

3.4 자기회로 및 단면적 개선 전략

자기회로는 응답성, 간단한 구조, 소형화, 동작 안정화 및 조립공정 개선과 깊은 관련이 있는 인자로서, 흡인력 F 는 식 (3)을 이용하여 회로를 개선할 수 있다.

$$F = \frac{1}{2} \frac{\Phi^2}{\mu_o \cdot S} = \frac{B^2 \cdot S}{2\mu_o} \quad (3)$$

자속(Φ)는 저항 요소가 없어야 잘 흐르기 때문에 자기회로적으로 저항 요소가 적은 일체형 구조가 요구된다. 또한, 솔레노이드 액추에이터 내부는 비교적 복잡한 구성을 하고 있기 때문에 개념 설계가 완료된 시점에서는 등가자기회로법과 상용 소프트웨어를 이용하여 구조를 최적화 할 필요가 있다. 가동자와 고정자 사이의 단면적은 흡인력, 소형화 및 저소비전력화와 밀접한 관련이 있는 인자로서, 흡인력 식은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$F = \frac{1}{2} \mu_o \cdot SN^2 \frac{i^2}{x^2} \quad (4)$$

그림 3은 가동자의 형상에 따라서 달라지는 흡인력 특성 예를 보이는 것으로 식 (4)에서와 같이 동일 권수, 동일 입력전류 및 동일 변위에서는 단면적이 흡인력 특성에 크게 좌우한다는 것을 알 수 있다.

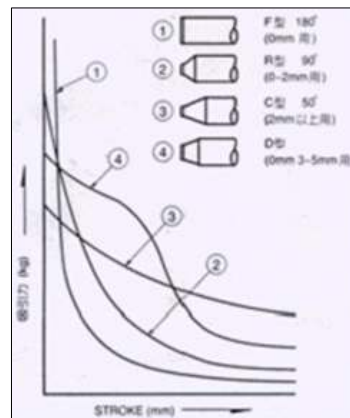


그림 3 Attraction force characteristics by cross sectional area variation of plunger

3.5 공극을 이용한 성능 향상 개선 전략

온-오프 솔레노이드 액추에이터나 비례솔레노이드 액추에이터의 경우, 이탈 불량이나 흡인력 저하 현상이 일어나는 원인중의 하나는 부적절한 공극의 채용이다. 공극이 없거나 작게 되면 매우 큰 흡인력은 얻

을 수 있는 반면에 잔류자속 밀도가 존재하여 전원 통전이 없는 상태인데도 불구하고 얼마동안 통전중인 상태를 유지하게 되어, 응답성이 매우 떨어지는 경우가 발생한다.

그림 4는 공극의 변화에 따라서 재료의 자속밀도 및 자계강도가 변화하는 특성을 도시한 것으로, 공극이 커질수록 자속밀도가 떨어지고 있음을 알 수 있다. 이것은 공극이 크면 클수록 흡인력이 떨어지고 있음을 의미하고, 이로 인하여 응답성 저하가 예상되고, 보다 많은 전력 소비가 예상된다. 따라서, 실험적 혹은 수치 해석적으로 정밀한 검토가 이루어진 후에 가동자와 고정자 사이의 간극을 정하는 것이 바람직하다⁶⁻⁷⁾.

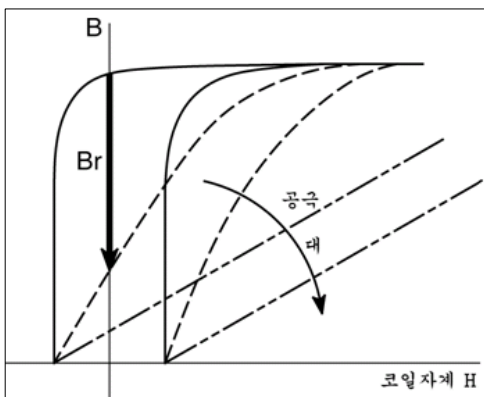


그림 4 B-H characteristics by air gap variation

3.6 재료를 이용한 성능 개선 전략¹⁰⁻¹²⁾

그림 5는 자성재료의 일반적인 자기이력곡선을 도시한 것으로, 이 선도를 이용하여 포화자속밀도, 잔류자속밀도, 보자력, 초투자율 및 최대투자율을 동시에 확인할 수 있다.

일반적으로 솔레노이드 밸브용으로 사용되는 자성 재료에서 요구되는 사항은 첫째로 철손이 적어야 한다. 철손은 곧 발열을 의미하고, 발열은 흡인력 저하를 동반하므로 반드시 고려되어야 한다. 철손과 관련된 인자들로서, 히스테리시스 손실과 보자력, 잔류자속 밀도와 와전류 손실이 있는데 이들 인자들의 수치는 적을수록 좋다고 할 수 있다.

둘째로는 최소 작동전압과 최소작동 전류 및 흡인력과 관련된 인자로서, 투자율과 포화자속 밀도가 있는데, 이들 인자들은 클수록 이득이다.

셋째로는 내식성과 내마모성 등 사용환경에 대한 고려가 필요하다. 이들 인자들 중에는 사소하나마 표면처리 및 도금이 용이하고, 환경오염에 강하고, 심지어는 환경을 오염시키지 않는 재료들이 고려되어야 한다.

마지막으로는 가격인자이다. 우수한 특성을 갖는 재료가 가격이 높은 것은 사실이지만 가공성 및 변형성도 고려되어야 한다. 쉽지 않은 가공으로 인하여 시간적, 인적으로 더 많은 투자가 이루어지거나, 교환주기가 짧은 원인으로 인하여 가격이 상승하는 요인으로 작용할 수도 있기 때문이다.

표 3은 대표적인 연자성 재료의 특징을 보이는 것으로, 일반적으로 많이 쓰이는 순철에서부터 고포화자속밀도 특성을 갖는 퍼먼듀(Fe-50Co-2V)까지 기록하였다. 때문에 전술한 바와 같이, 솔레노이드 밸브의 기능특성, 사용환경, 소형화, 경제성 등을 고려하여 재료를 선정해야 한다. 최근에는 자기특성, 내식성, 가공성, 도금성 뿐만 아니라 가격면에서도 경쟁력이 있는 전자스테인레스(Fe-Cr-X) 계열이 많이 응용되고 있다.

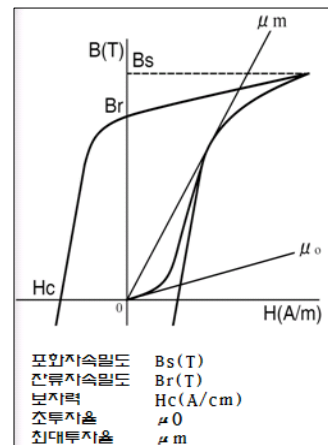


그림 5 Hysteresis curve of magnetic material

표 3 Characteristics of soft magnetic materials

종류	특징	결점
순철(Fe) 패삭순철(Fe-Pb)	저렴, 냉단성, 도금, 자기특성, 절삭성	내식성, 경도, 저전기저항
규소철(3%Si) 패삭순철(3%Si)	저렴, 자기특성, 경년변화, 절삭성	냉단, 도금, 내식, 저전기저항
퍼멀로이(PB) (Fe-48Ni)	냉단, 도금, 자기특성, 전기저항	고가, 난삭, 저경도, 내식성
퍼멀로이(PC) (Fe-80Ni)	냉단, 도금, 자기특성 (고투자율)	고가, 난삭, 저경도, 저포화자속밀도
퍼먼듀(permendur) (Fe-50Co)	자기특성(고포화자속밀도) (연자성재료중 최고)	가격고가, 난삭, 내식성

4. 자속-자계 분석기(B-H analyzer)의 원리

4.1 자화곡선 측정 원리

일반적으로 자성재료의 자성밀도 B와 자계 H는 비례 관계에 있지 않으며, 그림 6과 같이 히스테리시스

스 특성을 갖는다. 그림 6과 같이 시료인 자성재료에 자화를 시키면, O-P1 선을 따라서 자속밀도 B가 증가하여 포화치 B_{max} 인 점 P1에 이른다. 다음에 자계 H를 서서히 감소시키면 B는 앞의 O-P1 선을 되돌아가지 않고 P1-P2로 진행하여, H를 0으로 하여도 B는 0이 되지 않고 잔류자기 B_r이 존재하게 된다. 또한, H를 부(-)의 방향으로 증가시키면 B는 감소하여 H=-H_c인 점 P3에서 B가 0이 된다. 이 때의 H_c를 보자력이라 한다. 계속하여 H를 부(-)의 방향으로 증가시켜 가면, B는 부(-)의 포화치 P4에 이른다. 다음에 H를 정(+)의 방향으로 증가시키면, B는 곡선 P4-P5-P6을 거쳐서 P1에 이른다. 이와 같이 B-H 곡선은 자계 H를 증감시켜 그 크기가 어떠한 값으로부터 원래의 값으로 되돌아오는 1 사이클의 루프를 그린 것이다. 이 루프 P1-P2-P3-P4-P5-P6-P1을 히스테리시스 루프라 하고, 최초의 O-P1 사이를 정규 자화곡선이라 한다.

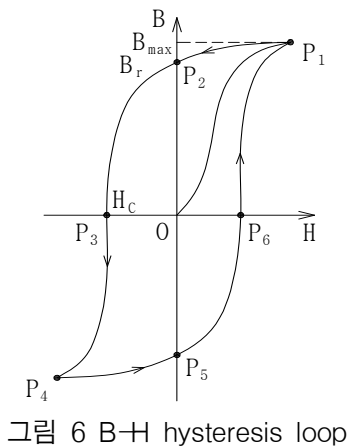


그림 6 B-H hysteresis loop

4.2 오실로스코프에 의한 자화곡선의 측정

그림 7에 측정회로를 보인다. 그림 7과 같이 자성 재료에 1차 코일 및 2차 코일을 구성하여, 전류 I를 보내면 자계 H는 식(5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$H = \frac{N \cdot I}{L} \text{ [A/m]} \quad (5)$$

여기에서, N은 자화 코일 권수이고, L은 평균 자로 길이이다(그림 7에서 파선으로 표시된 부분). 저항 r의 양단에 전압을 측정하면, 1차 코일(좌측)에 흐르는 전류 I를 알 수 있다. 피측정 철심의 코일 권수는 이미 알고 있기 때문에 식(5)로부터 쉽게 자계 H를 구할 수 있다.

자속밀도 B는 다음의 과정을 통하여 측정가능하다. 1차 코일에 발생한 자속의 대부분 혹은 일부는

자기회로를 통해서 2차 코일로 전해진다. 2차 코일과 쇄교하는 자속 ϕ 는 자성체의 단면적을 S, 자속밀도를 B라 하면, 식(6)의 관계로부터 구할 수 있다.

$$\phi = B \cdot S \quad (6)$$

일반적으로 B-H 분석기는 그림 7의 개념을 이용하여 보다 상세하고, 실질적인 이론들이 도입되었으며, 측정 오차를 최소화하기 위하여 정밀 소자들을 사용하였다. 최근에는 고성능 A/D 변환기와 대용량 저장장치를 이용하여 계측 지연을 최소화하고 있으며, 측정 분해능을 향상시키는 동시에 사용자가 원하는 수치나 그래프를 쉽게 볼 수 있도록 기본적으로 GUI를 구축하고 있다.

B-H analyzer는 순수한 재료만의 특성을 분석하는 장비에서부터 실제 현장에 사용되는 조건에서의 특성을 분석하는 장비에 이르기까지 여러 종류가 출시되고 있으나, 범용적이지 못하고, 거의 주문 제작이기 때문에 비교적 가격이 고가인 문제점이 있다. 때문에 일부 대학에서는 우수한 성능을 갖는 증폭기(Amplifier)만을 구매하고, 적분기나 간단한 장비 및 프로그램 등은 자체적으로 만들어 사용하고 있다⁸⁻⁹⁾.

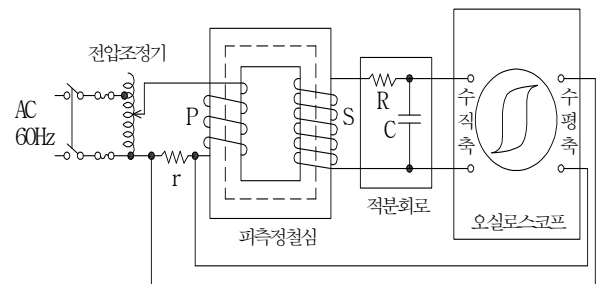


그림 7 B-H measurement concept using oscilloscope

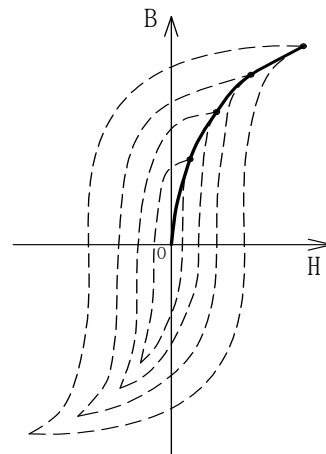


그림 8 Measured and calculated curve

5. 결 론

유공압용 솔레노이드 및 밸브의 성능 향상을 위한 전략으로 기계부, 제어부 및 자성재료부의 특성들을 서술하였으며, 우수한 자성재료를 선정하기 위한 기초적인 내용들이 고찰되었다. 솔레노이드 밸브를 연구/개발하거나 혹은 이 밸브를 현장에 적용하는 과정에 있어서는 반드시 전기-기계 에너지 변환 기술, 기계 메커니즘 기술, 코일 및 자성재료 기술들이 논의되어야 할 것으로 사료된다. 특히, 재료 선정에 있어서는 재료 자체의 고유 특성도 중요하지만, 재료의 사용 환경 및 최종적으로 어떠한 구조를 갖는지, 혹은 최대 작동 주파수 영역은 어떻게 되는지 등을 고려할 필요가 있다.

끝으로, 국내 유공압 관련 중소기업의 최대 애로사항 중의 하나인 자성재료와 관련하여, 보다 많은 연구자가 생겨나고, 또한 성능이 우수한 B-H Analyzer가 국내에서 개발되어 사용되었으면 하는 바람이 있으며, 더 나아가서는 부품/소재산업이 활성화되어 국제적으로도 경쟁력을 가지는 계기가 되었으면 한다.

참고 문헌

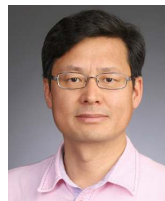
- 1) H. L. Feuser, "Development and optimization of industrial proportional pressure-relief valves", Proceedings of the 48th national conference on fluid power, pp. 509~514, 2000.
- 2) H. TANAKA, "고속전자밸브에 관한 연구", 일본기계학회논문집(C), Vol. 50, No. 457, pp. 1594~1601, 1984.
- 3) H. TANAKA 외 2, "Electro-hydraulic digital control of 3-way on/off solenoid valves", 일본기계학회논문집(B), Vol. 50, No. 457, pp. 2663~2666, 1984.
- 4) 성낙진, "액츄에이터 입문(메카트로닉스 시리즈 ②)", 대림출판사, pp. 9~39, 1994.
- 5) 신희렬, "자동화를 위한 유압제어 기술", 복두출판사, pp. 193~205, 1999.
- 6) 양협, 노종문, "유압부품의 설계 및 선정", 태훈출판사, pp. 183~188, 2000.
- 7) H. Tanaka, "전자비례밸브용 솔레노이드의 FEM 해석", Power design, Vol. 26, No. 6, pp. 32~41, 1986.
- 8) 황재원 외 4, 유닛인젝터용 고속응답 솔레노이

드 설계 및 응용에 관한 연구", 자동차공학회는 문집, 제 6권 제 1호, pp. 43~51, 1998.

- 9) H. Tanaka, "전기-유압 비례밸브", Power design, Vol. 27, No. 3, pp. 28~32, 1989.
- 10) Y. Ishiyama, "유공압용 연자성 재료", Fluid power system, Vol. 30, No. 7, pp. ~30, 1999.
- 11) 송창섭, 윤장상, 서종범, "비례전자식 유량제어밸브의 해석에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제 10권, 제 1호, pp. 100~107, 1993.
- 12) G. Geißler, "Modellbildung von Proportional-magneten mittels konzentrierter Parameter", Ö+P, Vol. 45, No. 1, pp. 49~52, 2001.
- 13) B. P. Lequesne, "Finite-Element Analysis of a Constant-Force Solenoid for Fluid Flow Control," IEEE, Tran. Industrial Application, Vol. 24, No. 4, pp. 574~581, 1988.
- 14) H. C. Roters, "Electromagnetic Devices", John Wiley & Sons, 1955.
- 15) B. Lequesne, "Dynamic Model of Solenoids under impact excitation, including motion and eddy currents," IEEE Tran. on MAG, Vol. 26, Issue 2, pp. 1107~1116, 1990.
- 16) 최인호, 고창섭, 정태경, 한송엽, 솔레노이드 액츄에이터 전자기 시스템의 유한요소 해석, 대한전기학회논문지, Vol. 40, No. 11, pp. 1105~1113, 1991.
- 17) Y. Xiuke, J. S. Ryu, C. S. Koh and X. Dexin, "Comparison of Force Calculation Methods in 2D and 3D Finite Element Method," KIEE Internatioal Tran. on EMECS, Vol. 11B-4, pp. 137~145, 2001.

[저자 소개]

윤소남(책임저자)



E-mail : ysn688@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7155

1963년 7월 29일생

1990년 부경대학교 기계공학부 석사, 1994

년 동 대학원 박사과정 졸업, 2005년 어번

대 마이크로나노시스템/재료연구실 객원연

구원, 1994년~현재 한국기계연구원 책임연구원, 스마트 액추

에이터, 유공압밸브 및 에너지 수확기 개발 연구에 종사, 유

공압시스템학회, 대한기계학회, 동력기계공학회, 한국정밀공

학회, 일본유공압시스템학회 등 회원, 공학박사

[저자 소개]



윤동원

E-mail: dwyun@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7769

1976년 5월 29일생

2004년 광주과학기술원 기전공학과 석사,

2004년 국방과학연구소 연구원, 2005년~

현재 한국기계연구원 선임연구원, 전자기

장 및 구조 유한요소해석/최적설계, 전기기기 해석/설계, 로
봇 및 지능기계 개발 연구에 종사, 대한기계학회, 한국정밀공
학회, 한국동력기계공학회 등 회원, 공학석사