비례 솔레노이드의 특성 이해

윤소남 · 류재섭 / KIMM 첨단산업기술연구부
ysn688@kimm.re.kr

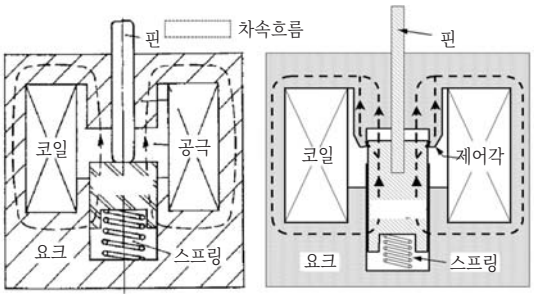
서 론

솔레노이드(Solenoid)는 그리스어의 「Solen」에서 유래된 것으로 관 모양의 구조를 갖는 부품이라는 의미를 갖는다. 통상적으로는 솔레노이드라 불려지고 있지만, 전자석 혹은 전자 솔레노이드라는 용어도 공용으로 사용되고 있다. 솔레노이드는 공식적으로 「교류 또는 직류 여자 코일에 전압을 인가하여 자기력에 의하여 가동철심에 직접적으로 직선적인 운동을 주는 기능부품」, 혹은 JIS에서와 같이 「교류 또는 직류의 여자 코일에 통전하여 가동철심을 움직임으로써 전자(電磁)에너지를 기계적 운동으로 변환하는 플런저형 전자석」으로 정의하고 있으며, 솔레노이드의 직선적 운동을 이용하여 압력, 유량, 방향을 On/Off 형식으로 제어하는 밸브를 총칭하여 솔레노이드 밸브라 한다.

비례전자 솔레노이드(Proportional solenoid)는 입력전류가 일정하면 플런저의 변위에 관계없이 일정한 힘을 발생시키고, 입력전류에 비례하는 힘을 얻을 수 있는 특성을 가지고 있어, 압력제어 및 유량제어용 밸브와 같은 서보제어용으로 많이 이용되고 있다. On/Off 솔레노이드의 경우에는 플런저의 이동이 완료되는 시점에서의 특성 또는 이동시간이 중요하지만, 비례 솔레노이드의 경우에는 플런저의 이동 변위 전체에 대해서 위치를 제어할 수 있는 특성, 히스테리시스 특성 및 동적응답 특성이 매우 중요하다.

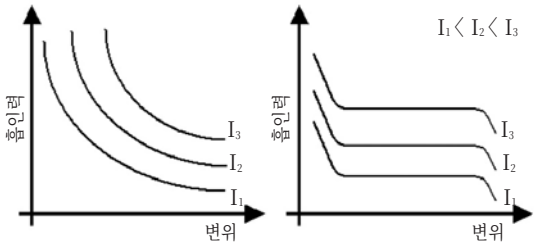
비례 솔레노이드는 On/Off 솔레노이드에 없는 제어각(制御角; Control cone)을 가지고 있는 구조이며, 플런저가 이 구간을 지나는 동안에는 변위에 관계없이 일정한 흡인력을 발생시킨다. 따라서 On/Off 솔레노이드의 경우에 발생하는 흡인력은 플런저(Plunger)의 변위와 입력전류의 함수가 되지만, 비례 솔레노이드의 경우는 입력전류의 함수만으로 간주할 수 있다. 입력전류에 따라 발생하는 자기력에 의해 플런저가 이동하고, 이와 동시에 플런저에 연결되어 있는 스프링에 의해 반발력이 증가하여 플런저의 이동은 자기력과 스프링 반발력이 같은 지점에서 정지하게 된다. 이와 같은 힘의 균형에 의하여 기체 또는 유체의 양이나 압력 및 방향을 비례적으로 제어하게 된다.

일반적으로 On/Off 솔레노이드의 구조는 매우 간단하기 때문에 그림 1-(a)에 보이는 것과 같이 하나의 자기회로(Magnetic circuit)로 근사화하여 발생



(a) On/Off 솔레노이드 (b) 비례 솔레노이드

그림 1. 솔레노이드의 형상



(a) On/Off 솔레노이드 (b) 비례 솔레노이드

그림 2. 변위-흡인력 특성

하는 흡인력을 계산할 수 있다. 이 때 발생하는 흡인력은 그림 2-(a)에 보이는 것과 같이, 입력 전류가 일정하면 플런저의 변위만을 변수로 하여 계산할 수 있으며, 크기는 변위의 제곱에 반비례하는 특성을 가지고 있다.

비례전자 솔레노이드의 경우에는 제어각에 의한 영향으로 그림 1-(b)와 같이 제어각 부근에서의 자기회로를 여러 개로 나누어 취급하여야 한다. 제어영역 내에서 발생하는 비례전자 솔레노이드의 흡인력은 그림 2-(b)에 보이는 것처럼 변위에 관계없는 일정한 흡인력을 얻을 수 있다. 이것은 플런저를 통해서 흐르는 자속(Magnetic flux)이 공극을 통해서만 흐르는 것이 아니라 제어각을 통해서 흐르는 누설 자속(Leakage flux)이 발생하기 때문이며, 제어각에서는 자기 포화가 발생하기도 하여 제어각을 통해서 흐르는 자속의 양이 제한되기도 한다. 따라서 비례전자 솔레노이드의 경우에 등가자기 회로법에 의한 흡인력의 계산은 복잡한 자기회로, 자성체의 비선형성 및 자기 포화와 같은 현상을 고려하여야 하므로 계산하기가 매우 어렵고, 정확한 계산결과를 기대하기 힘들다.

본 고에서는 유한요소 해석에 의하여 비례전자 솔레노이드의 정상상태 특성을 해석하고, 플런저의 변위에 관계없이 일정한 힘을 발생시키는 특성을 확인하고자 한다. 그리고 비례전자 솔레노이드의 특성을 결정하는 제어각의 형상에 따라 변화하는 변위-흡인력 특성을 비교 · 분석하여, 성능이 향상된 비례전자 솔레노이드를 설계하는데 필요한 데이터를 제공하고자 한다.

특성 해석 결과

그림 3에는 비례 솔레노이드의 특성인 변위에 관계없는 일정한 흡인력을 얻기 위한 방법으로 제안된

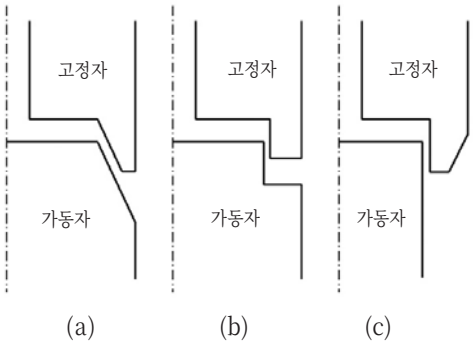
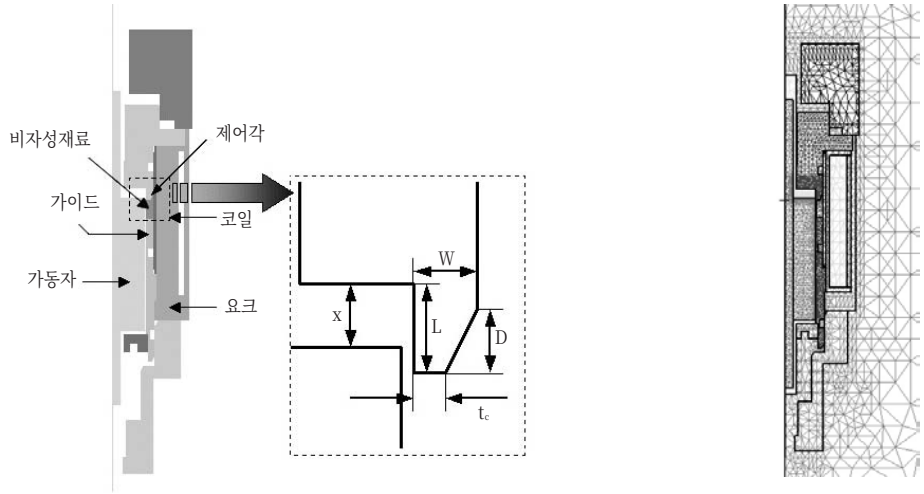


그림 3. 플런저와 제어각의 형상

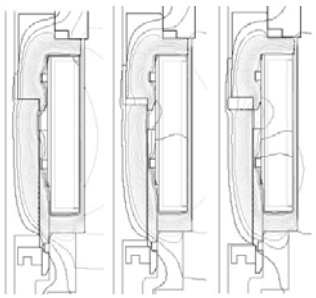


(a) 비례 솔레노이드의 구성요소와 제어각의 형상 (b) 요소분할도

그림 4. 비례 솔레노이드 해석모델

Type	L	D	t_c
Type 1	3.5mm	2.5mm	2.25mm
Type 2		2.5mm	1.34mm
Type 3		2.5mm	0.65mm
Type 3-2		3.5mm	0.65mm
Type 4		2.5mm	0.00mm
Type 4-2		3.5mm	0.00mm

표 1. 해석 모델에 따른 제어각의 치수



(a) 0.2mm (b) 2.0mm (c) 3.4mm

그림 5. 플런저의 위치에 따른 자속분포 해석결과
(L=3.5, D=2.5, t_c=1.34)

여러 가지 형상의 제어각과 플런저를 보이고 있다. 각각의 형상은 조금씩 차이가 있지만, 이것은 변위가 작아지면서 플런저와 제어각 사이로 흐르는 자속이 증가하는 현상은 같기 때문에 결과적으로 비슷한 특성을 갖는다. 본 고에서는 그림 3-(c)의 형상에 대해서 유한요소법에 의해 해석하고 특성을 비교하였다.

그림 4는 해석모델을 보이는 것으로, 그림 3-(c)의 형상을 갖는 모델의 축단면의 1/2을 해석영역으로 설정하였다. 그림 4-(a)는 해석모델의 구성요소와 제어각의 자세한 구조를 나타냈으며, (b)는 삼각형 요소를 이용한 요소분할도이다. 본 고에서는 제어각의 형상에 따른 특성의 변화를 중점적으로 설명하기 때문에 해석 대상 비례 솔레노이드의 상세사양을 서술하지 않았으며, 해석을 수행한 제어각 모델에 대한 수치는 표 1에 정리하였다.

그림 5는 제어각 형상이 각각 L=3.5, D=2.5, t_c=1.34mm이고, 플런저의 변위가 각각 0.2, 2.0,

3.4mm 움직였을 때의 자속분포 특성을 보이는 것으로, 플런저가 고정자와 떨어져 있다 하더라도 제어각 부분을 통하여 많은 자속이 흐르고 있다는 것을 알 수 있으며, 변위가 가까워질수록 제어각 부분으로 흐르는 자속도 많아져 제어각 부분에서는 자기포화가 발생하여 흡인력에 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

(1) 제어각의 형상 변화에 의한 특성 비교

그림 4-(a)에 보이는 바와 같이, 비례 솔레노이드의 흡인력 특성에 영향을 미치는 변수에는 여러 가지가 있지만, 본 고에서는 제어각의 전체 두께 W를 고정시키고 제어각의 길이 L, 제어각의 두께 tc, 그리고 테이퍼 면의 길이 D를 변화시키면서 변위 x에 따른 흡인력 특성을 해석하여 비교하였다. 이 때 솔레노이드의 입력전류는 1.0A, 권선수는 1419turns 이었다.

① 제어각 길이(L)의 영향

그림 6에는 제어각의 두께가 최대(t_c=W)일 때, 제어각의 길이 L에 대한 변위-흡인력 특성 곡선을 보이고 있다. 플런저 변위 x가 제어각의 길이보다 큰 경우 (x≥L)에는 제어각이 없는 경우(L=0)와 비교해서 자기저항이 작아지기 때문에, 플런저에 작용하는 흡인력이 커짐을 알 수 있다. 그러나 변위가 감소하여 제어각의 길이보다 작은 경우에는 제어각을 통해서 흐르는 자속이 많이 발생하여 공극에서의 자속밀도가 작아져 흡인력이 작아진다. 변위가 작아질수록 흡인력은 감소하며, 변위가 충분히 작아지면 흡인력은 다시 증가한다.

그림 6의 해석 결과에 의하면 L=1.75mm인 경우에 변위에 관계없는 일정한 흡인력을 갖는 것으로 나타나지만 그 구간이 너무 짧은 단점이 있고, 3.5mm인 경우에는 변위가 작아지면서 흡인력이 작아지는 것을 볼 수 있다. 따라서 상대적으로 긴 구간의 일정 흡인력 구간이 필요한 경우에는 제어각의 폭 W와 테이퍼 면의 길이 D를 조절할 필요가 있다.

② 제어각 두께(t_c)의 영향

제어각의 길이 L을 3.5mm, 테이퍼 면의 길이 D를 2.5mm로 하고 두께 t_c를 변화시켜 솔레노이드의 흡인력 특성을 해석한 결과를 그림 7에 보이고 있다. 제어각의 두께가 작아질수록 흡인력 특성은 개선되어 type 3과 type 4의 경우에는 변위에 따른 흡인력 변화가 작아지는 특성을 보이고 있다. 해석 결과에

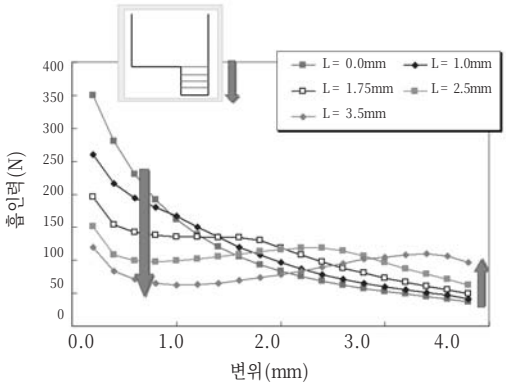


그림 6. 제어각 길이 변화에 따른 특성

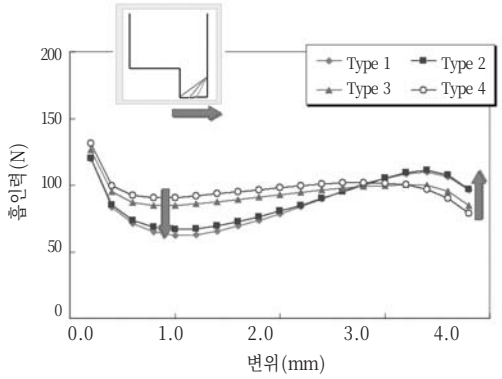


그림 7. 제어각 두께 변화에 따른 특성

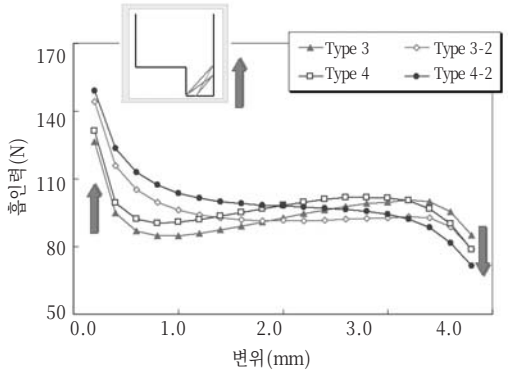


그림 8. 제어각 깊이 변화에 따른 특성

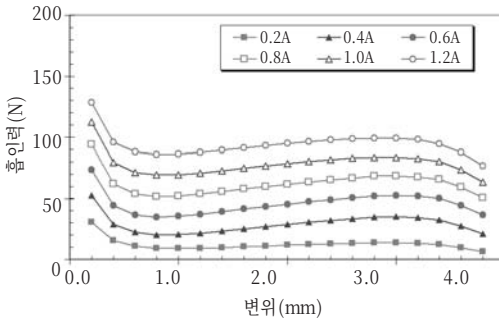


그림 9. 전류 변화에 따른 흡인력 특성

의하면 제어각의 두께는 제어각 전체 폭의 1/4 이하가 되도록 하는 것이 적당하다고 판단된다.

③ 테이퍼 면의 길이(D)의 영향

흡인력 특성이 비교적 좋은 Type 3과 Type 4에 대해서 테이퍼 면의 길이 D를 변화시켜 특성을 비교하였다. 그림 8에 보이고 있는 해석결과에 의하면, 테이퍼 면의 길이가 길수록 특성은 개선되는 것을 알 수 있다. 테이퍼 면의 길이 D와 제어각의 두께 t를 동시에 고려하면, $t_c=0$인 것보다는 약간의 두께를 가지면서 테이퍼 면의 길이는 제어각의 길이와 같을 때 가장 좋은 특성을 가진다.

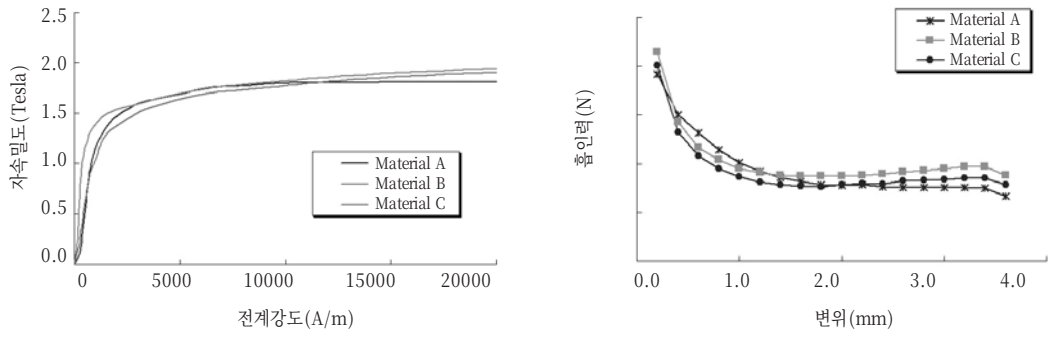
결론적으로 비례 솔레노이드의 특성은 일정 흡인력을 필요로 하는 제어구간의 길이가 길어질수록 제어각의 길이 L과 테이퍼 면의 길이 D는 길어지고, 제어각의 두께 t_c는 작아진다는 것을 알 수 있다. 그림 9에는 비례 솔레노이드의 입력전류에 비례하는 변위-흡인력 특성 곡선을 보이고 있다.

비례 솔레노이드의 성능향상 방안

① 재료연구의 필요성

솔레노이드 액츄에이터에 사용되는 재료의 특성은 솔레노이드의 특성을 결정짓는 가장 중요한 요인 중의 하나이다. 특히 솔레노이드는 자기적 특성을 이용한 것이기 때문에 솔레노이드의 사용 목적과 종류에 따라서 조금씩 차이가 있지만 자성재료의 선정이 매우 중요하다. 자성재료의 특성 중에서 특히 중요한 인자는 비투자율(Relative permeability)과 전기 저항률(Resistivity) 또는 전도율(Conductivity)이다.

솔레노이드에서 발생하는 흡인력은 일반적으로 공극에서의 자속밀도의 제곱에 비례한다. 또한 공극에서의 자속밀도를 결정짓는 가장 중요한 요인은 자성재료의 비투자율이기 때문에 자성재료의 신중한 선택이 필요하다. 대부분의 자성재료의 비투자율은 비선형 특성을 갖는다. 자성재료가 포화되지 않는 경우에는 선형으로 근사화하여 해석하는 경우도 있지만, 정확한 해석을 하기 위해서는 자성재료의 비투자율과 관계되는 자화특성을 알아야 정확한 솔레노이드의 특성을 예측할 수 있다. 다음의 그림은 서로 다른 세 종류의 자성재료를 이용할 경우에 발생되는 흡인력의 특성을 보이고 있다. 그림 10-(a)는 각 재료의 자화특성 곡선을 보이고 있으며, 그림 10-(b)는 솔레노이드의 변위-흡인력 특성을 보이고 있다.



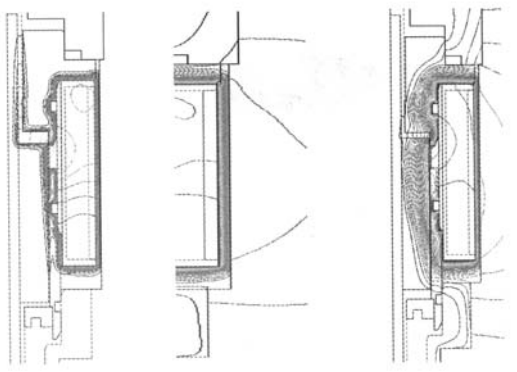
(a) 자화특성곡선 (b) 변위-흡인력 특성

그림 10. 자성재질 변화에 따른 흡인력 특성

또한 대부분의 자성재료는 전도율도 크기 때문에 와전류(Eddy current)가 발생하여 솔레노이드의 동작 특성에 영향을 미치게 된다. 특히 빠른 응답특성을 요구하는 고속 솔레노이드의 경우에는 와전류에 의한 영향으로 응답시간이 지연되는 경우도 발생할 수 있다. 따라서 솔레노이드 액츄에이터를 설계하기 위해서는 이러한 재료의 특성이 솔레노이드의 특성에 미치는 영향을 정확히 알고 있어야 하므로, 재료에 관한 연구가 병행되어야 할 것이다. 그림 11에는 과도상태에서 와전류에 의한 자속분포의 변화를 보이고 있다.

② 최적설계 이론 도입의 필요성

솔레노이드 액츄에이터를 설계함에 있어서 설계변



(a) t=0ms (b) t=10ms (c) t=50ms

그림 11. 과도상태에서의 자속선도

수가 될 수 있는 인자는 솔레노이드의 형상, 재료의 물질 상수, 입력 전류 등 여러 가지가 될 수 있다. 고려해야 할 설계변수가 하나일 경우에는 직접 설계변수를 변화시켜 가면서 해석하고 설계를 할 수 있지만, 설계변수가 여러 개가 되면 설계변수들을 직접 변화시켜 가면서 해석하는 것은 시간적인 측면에서도 오래 걸릴 뿐 아니라 매우 비효율적인 방법이 된다. 특히 비례 솔레노이드의 경우에는 제어각의 형상이 솔레노이드의 특성에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 제어각의 형상을 표현할 수 있는 여러 개의 변수들을 모두 고려해야 하는 어려움이 있다. 그러나 본 연구뿐만 아니라, 기존의 논문들에서는 이러한 문제점을 해결하지 못하고 직접 제어각의 형상 또는 플런저의 형상을 변화시키면서 해석하여 최적 형상을 찾는 경우가 대부분이다.

최근에는 전자소자의 형상최적 설계를 위하여 여러 가지 최적화 방법들을 이용하여 수행되고 있다. 최적화 알고리즘은 원하는 목적함수(Objective Function), 또는 비용함수(Cost Function)를 설정하고, 이 목적함수를 최대 또는 최소로 하는 설계변수를 얻어내는 방법이다. 최적화 방법에는 결정론적인 알고리즘(Deterministic algorithm)과 확률론적인 알고리즘(Stochastic Algorithm)이 있다.

결정론적인 알고리즘은 기본적으로 목적함수의 미분을 필요로 하기 때문에 목적함수가 직접 미분 가능한 함수여야 한다. 이러한 결정론적인 알고리즘은 미분을 이용하기 때문에 계산 속도는 빠른 대신에, 국소 최적점(Local Optima)에 빠질 확률이 높아지는 단점이 있다. 주로 사용하는 결정론적인 알고리즘은 Steepest Decent, Conjugate Gradient, Levenberg Marquadt법, 그리고 민감도 해석(Sensitivity analysis) 등이 있다.

확률론적인 알고리즘은 전역 최적점(Global Optima)을 구할 수 있는 장점이 있지만 설계변수가 많아지면 계산시간이 길어지는 단점이 있다. 유전 알고리즘(Genetic Algorithm:GA), 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing:SA), 진화 전략(Evolution Strategy:ES), 면역 알고리즘(Immune Algorithm:IA) 등이 확률론적인 알고리즘에 속한다.

따라서 설계변수가 많아지는 비례 솔레노이드의 최적설계를 위해서는 최적화 기법을 도입하여 수행하는 것이 바람직하며, 이 방법에 대해서 앞으로 연구가 진행되어야 할 것이다.