

반응표면법을 이용한 DC솔레노이드 밸브의 형상 최적화

윤희성, 황인성, 고창섭, 김동수*, 윤소남*
충북대학교 전기공학과, 한국기계연구원*

Shape Optimization of DC Solenoid Valve Using Response Surface Method

Hee Sung Yoon, In Sung Hwang, Chang Seop Koh, Dong Soo Kim*, So Nam Yun*
Chungbuk National University, Korea Institute of Machinery & Materials*

Abstract - DC솔레노이드 밸브의 성능을 나타내기 위해 여러 가지 중요한 파라미터들이 존재한다. 최소 혹은 최대 스트로크 시의 흡입력, 온도상승, 소비전력 그리고 동작시간 등이 있다. 본 논문에서는 동작시간을 최소화시키기 위해 반응표면법을 이용하여 DC솔레노이드 밸브의 형상 최적화를 수행하였고 그 결과를 유한요소법을 이용하여 검증한다.

1. 서 론

DC솔레노이드 밸브의 성능을 나타내기 위해 여러 가지 파라미터들이 존재한다. 예를 들어, 최소 혹은 최대 스트로크 시의 흡입력, 온도상승, 소비전력, 그리고 동작시간 등이 있다. 이러한 파라미터들은 기기의 사용 분야에 따라 그 중요성이 각기 다르다. 하지만 일반적으로 온도상승과 소비전력이 정격조건을 만족한다면 흡입력이 크고 동작시간이 짧은 것이 좋다.

동작시간과 흡입력은 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 흡입력이 클수록 동작시간이 짧다. 동작시간을 감소시키는 가장 쉬운 방법은 흡입력을 증가시키기 위해 기자력을 증가시키는 것이다. 하지만, 이 경우 권선전류나 권선 턴 수를 증가시켜야 하며 이는 소비전력과 온도를 상승시킬 우려가 있다. 다른 방법으로는, 플런저와 코어의 자극면 형상 변화를 통해 스트로크-흡입력 특성을 변화시키는 방법이 있다. 자극면 형상 종류에 따라 스트로크-흡입력 특성이 각기 다르다. 예를 들어, Conical-faced type의 경우, Flat-faced type에 비해 최대 스트로크에서의 흡입력은 증가하나 최소 스트로크에서의 흡입력이 감소하는 특성을 나타낸다[1]. 이러한 특성은 스트로크 길이나 부하 조건에 따라 동작시간에 좋게, 혹은 나쁘게 작용할 수 있다.

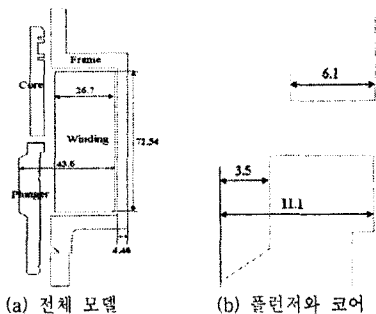
본 논문에서 사용한 모델은 최대 스트로크에서의 흡입력 증가가 동작시간에 크게 영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 동작시간을 감소시키기 위해, 최대 스트로크에서의 흡입력을 증가시키기 위한 설계변수를 제안하고 반응표면법(Response Surface Method)을 이용하여 형상 최적화를 수행하였다. 그리고 그 결과를 유한요소법을 이용하여 검증한다.

2. 본 론

2.1 기본 모델의 특성

2.1.1 기본 모델 사양

그림 1과 표 1은 본 논문에서 사용한 해석모델의 사양을 나타낸다.



〈그림 1〉 해석 모델

〈표 1〉 해석 사양

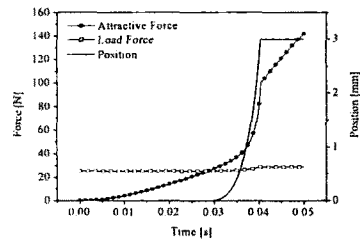
전압	125[V]	스프링(부하)	스프링상수	1.18[N/mm]
소비전력	60[W]		초기 압축길이	21.5[mm]
스트로크	3[mm]	권선사양	저항	261.18[Ω]
잔류자기방지공극	0.5[mm]		턴 수	10354

2.1.2 기본 모델 동특성

기본 모델 해석을 위해 상용프로그램인 Maxwell을 이용하여 동특성 해석을 시행하였다. 해석 시간은 50[ms], 시간 간격은 0.125[ms]로 하였다.

그림 2는 기본모델의 시간-흡입력, 부하, 위치 곡선을 나타낸 것이다. 부

하힘은 약 25[N]으로, 흡입력이 부하힘보다 크게 되는 순간 플런저가 움직임을 볼 수 있다. 플런저는 약 28.5[ms]에 움직이기 시작해서, 약 40.5[ms]에 완전히 흡착됨을 볼 수 있다. 결과에서 보듯이, 플런저가 움직이기 전의 시간이 플런저가 움직이는 동안의 시간보다 더 길기 때문에 동작시간을 감소시키기 위해서는 플런저가 움직이기 전의 시간을 감소시킬 필요가 있다. 즉, 플런저가 움직이기 전의 시간을 감소시키기 위해서는 최대 스트로크에서의 흡입력을 증가시켜 부하힘보다 커지는 시간을 감소시켜야 한다.

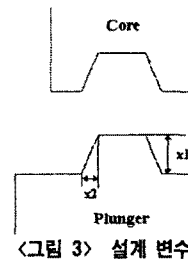


〈그림 2〉 기본 모델의 시간-흡입력, 부하, 위치 곡선

2.2 반응표면법을 이용한 동작시간의 저감

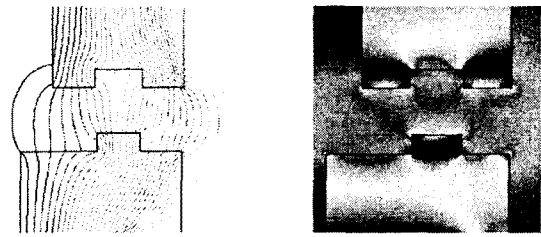
2.2.1 동작시간 저감을 위한 설계 변수 설정

앞서 언급했듯이, 동작시간을 감소시키기 위해서는 최대 스트로크에서의 흡입력을 증가시킬 필요가 있다. 최대 스트로크에서의 흡입력을 증가시키기 위해 그림 3과 같은 설계 변수를 제안한다.



〈그림 3〉 설계 변수

설계 변수 x1은 그림 4와 같이 공극에서의 자속 경로 길이를 감소시켜 자기저항을 감소시키고 자속을 증가시키게 된다. 그리고 자속을 한 부분으로 집중시켜 자속밀도를 증가시키고 흡입력을 증가시킨다.



(a) 자속 분포 (b) 자속 밀도
〈그림 4〉 설계 변수 x10에 의한 자속, 자속밀도 분포

하지만 x1의 길이가 잔류자기방지공극보다 클 경우 스트로크가 증가함에 따라 플런저와 코어가 겹치는 경우가 발생하게 된다. 이 경우 그림 5(a)와 같이 자속이 경로 1을 따라 통과하게 되고 이 자속은 r-방향으로의 힘을 발생시키게 된다. 즉, 경로 1을 통과하는 자속은 z-방향으로의 흡입력에 전혀 영향을 주지 않고 오히려 흡입력을 감소시키게 된다. 그림 6의 non-x2 model은 그림 5(a) 모델의 흡입력, 위치 곡선을 나타낸 것으로 플런저가 코어에 겹치는 순간 흡입력이 감소함을 보여준다. 그 결과 부하힘보다 작게

됨으로서 플런저가 반대방향으로 이동하여 동작시간이 증가함을 볼 수 있다.

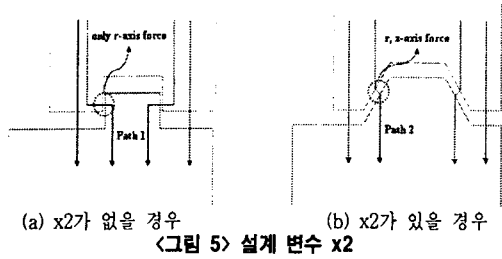
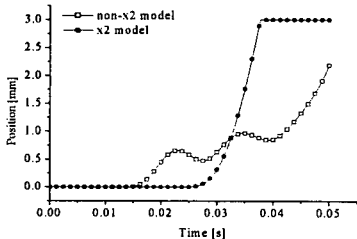
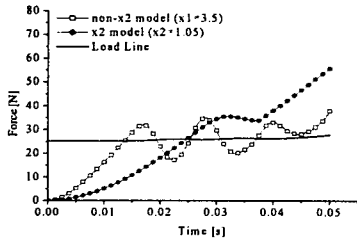


그림 5(b)와 같이 설계 변수 x2를 더함으로써 경로 2와 같은 대각선방향의 가속을 발생시키고 z-방향의 힘을 발생시킴으로써 전체 흡입력의 감소를 다소 막을 수 있다. 그림 6의 x2-model은 그림 5(b)모델의 특성을 나타낸 것으로 흡입력의 감소를 줄임으로써 동작시간이 감소함을 볼 수 있다.



〈그림 6〉 x2 유무에 따른 특성 곡선 비교

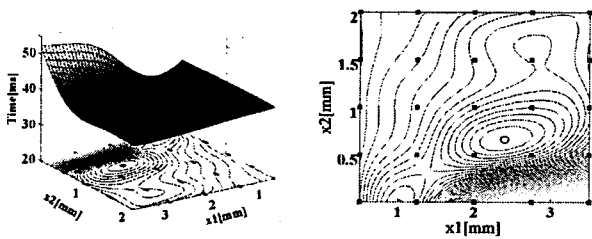
2.2.2 최적 설계

반응표면법을 이용하여 최적화를 하기 전에 먼저, 설계 변수의 범위와 목적함수를 정한다. 변수 범위와 목적함수는 표 2와 같다.

〈표 2〉 설계 변수 범위와 목적함수

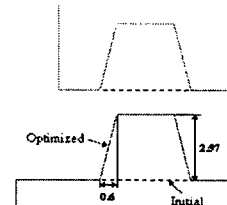
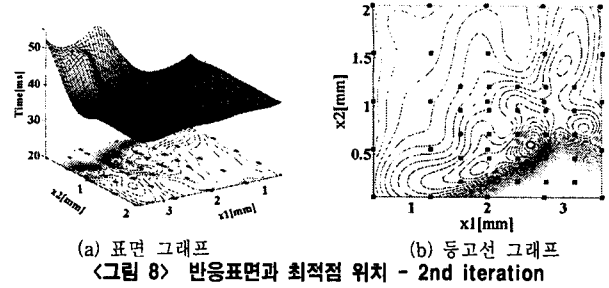
x1	x2	Objective Function
0.5~3.5[mm]	0.05~2.05[mm]	동작시간[ms]

첫 번째 Iteration에서의 샘플 포인트는 각 변수의 범위를 균등하게 5분할하여 총 25개이다. 그림 7(a)와 (b)는 반응표면법에 의해 생성된 표면 그래프와 등고선 그래프이다. 목적함수를 최소화하는 최적점은 그림 7에서 원형으로 크게 표시된 부분으로 그 값은 (2.4, 0.71)이다.



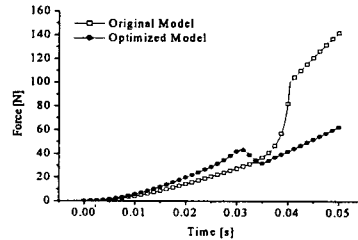
두 번째 Iteration에서는 앞서 구해진 최적점을 중심으로 샘플포인트를 추가로 생성시킨다. x1, x2의 범위는 첫 번째 Iteration 범위의 1/2로 한다. 그림 8(a)와 (b)는 두 번째 Iteration에 의해 생성된 표면그래프와 등고선 그래프이다. 목적함수를 최소화하는 최적점은 (2.57, 0.6)으로 최적점이 이동했음을 볼 수 있다.

그림 9는 기본 모델과 최적화 모델의 형상을 비교한 것이다.

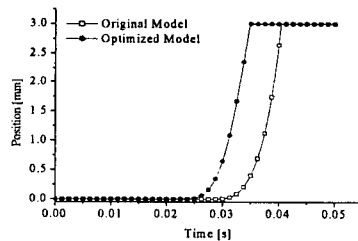


〈그림 9〉 기본 모델과 최적화 모델의 비교

그림 10은 최적화 모델과 기본 모델의 흡입력 파형을 나타낸 것이다. 그림 10의 최적화 모델의 흡입력 곡선을 보면 플런저가 코어에 접치는 순간 흡입력이 순간적으로 감소함을 볼 수 있다. 하지만 부하힘보다 크기 때문에 플런저의 동작시간에는 크게 영향을 미치지 않는다. 그림 11을 보면 흡입력의 순간적인 감소가 플런저의 움직임에 크게 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. 그리고 최적모델의 동작시간은 약 34.875[ms]이며 기본모델의 동작시간 40.5[ms]와 비교하여 약 14[%]정도 감소되었음을 볼 수 있다.



〈그림 10〉 흡입력 곡선 비교



〈그림 11〉 위치 곡선 비교

3. 결 론

본 논문에서는 동작시간을 감소시키기 위한 설계변수를 제안하고 반응표면법을 이용하여 형상 최적화를 수행하였다. 그리고 그 결과를 유한요소법을 이용하여 검증하였다. 두 번의 Iteration을 통해 최적점을 구하고 그 결과 기본모델에 비해 동작시간을 약 14[%] 감소시킬 수 있었다.

본 논문에서 제시한 설계변수는 플런저와 코어가 접치는 순간 흡입력이 감소하고 기본모델에 비해 최소 스트로크에서의 흡입력이 감소하는 단점을 가지고 있다. 최적화 결과, 흡입력은 부하힘보다 충분히 크기 때문에 동작시간에 크게 영향을 미치지 않았다. 하지만 추후 이러한 문제점을 보완할 수 있다면 동작시간을 감소시키기 위한 좋은 방법이 될 것이다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] Herbert C. Roters, Electromagnetic Devices, John Wiley & Sons, US A, 1995
- [2] 中田高義, 有限要素法による直交電磁石の設計と応用, 森北 出版株式会社, Japan, 1991
- [3] Sang-Baeck Yoon, Jin Hur, Yon-Do Chun and Dong-Seok Hyun, "Shape Optimization of Solenoid Actuator Using the Finite Element Method and Numerical Optimization Technique", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol 33, No. 5, pp4140~4142, 1997.