

호흡기용 영구자석형 자기 액츄에이터의 최적설계

박상민, 황규윤, 권병일

한양대학교

Optimal Design of Permanent Magnetic Actuator for Artificial Respirator

Sang Min Park, Kyu Yun Hwang, Byung Il Kwon
Hanyang University

Abstract - This paper proposes optimized actuator to obtain a improved position control ability and respiratory performance with reduced weight. Respiratory organ uses actuator and controls patient's respiratory air volume. Therefore, actuator decides respiratory performance. Redesign actuator using surface response method. Actuator that is reestablished through 3D-simulations searches whether have suitable characteristic to respiratory organ.

영구자석의 형상에 대한 고려를 하지 않아 위치와 전류에 대한 힘의 크기가 비선형적으로 증감하여 정확한 힘조절이 힘들다. 호흡기는 그럼 2와 같이 환자의 호흡조절을 위해 들숨과 날숨에 따라 정해진 압력을 정확하게 공급하여야 한다. 하지만 기존의 액츄에이터를 사용할 경우 압력조절에 오차가 발생한다. 이를 개선하기 위하여 호흡기 압력조절용 액츄에이터를 설계하고자 한다.

1. 서 론

자기 액츄에이터는 전자기적 에너지를 운동에너지로 변환하는 대표적인 장치중 하나이다. 간단한 기계적 구조와 뛰어난 속응성으로 인해 소변위 왕복 직선운동 시스템에 적합하다. 시스템에 액츄에이터를 사용하면 기계적 변환 장치가 줄어들어 시스템 구조가 간단해질 뿐 아니라 효율적인 시스템 구성이 가능하다. 이로 인하여 액츄에이터는 전기, 기계분야 및 의료분야 등에 광범위하게 사용되고 있다[1].

이중 의료분야에 사용되는 액츄에이터는 동작 신뢰도가 높고 특수목적에 맞는 설계가 이루어져야 한다. 호흡기 액츄에이터는 환자의 호흡에 의해 부하가 결정되고, 호흡량을 제어하는 정확한 힘을 발생시켜야 하므로 동작특성에 있어 선형적인 움직임이 요구되므로 이에 알맞은 설계가 필요하다.

본 논문은 호흡기에 정확한 해석을 위하여 3차원 유한 요소법(3D Finite Element Method)을 사용하여 액츄에이터의 해석 정확도를 높인다. 최적 설계를 위한 설계 변수의 선택은 기계적 구조의 제약하에 액츄에이터 성능에 큰 영향을 미치는 인자로 결정한다. 설계변수는 반응표면법(RSM Response Surface Method)을 이용하여 최적값을 찾는다. 최적 설계된 액츄에이터와 기본 모델의 특성을 비교 분석 한다.

2. 자기 액츄에이터 설계

2.1 호흡기용 액츄에이터

의료 호흡기는 환자의 총 호흡량(tidal volume)을 설정하여 환자의 호흡이 변하더라도 설정된 값을 일정하게 유지, 공급해 주어야 한다. 이를 위해 호흡기용 액츄에이터는 벨브의 간격을 유지하기 위한 선형적인 힘이 요구된다.

기본 모델의 액츄에이터는 그림1과 같이 영구자석을 포함하는 고정자와 보빈에 코일을 감은 가동자로 구성된다. 동작 원리는 영구자석에 의한 자계 속에 전류가 흐를 때 발생하는 로렌츠 힘에 의하여 가동자가 이동한다. 이때 힘은 전류량에 비례하여 발생하고 전류의 방향이 바뀌면 추력의 방향도 바뀌게 된다.

기존 액츄에이터의 설계 시 자속포화, 자속경로 그리고

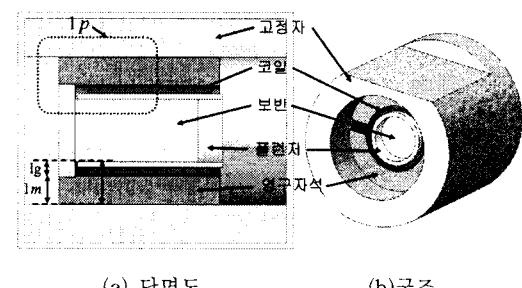


그림 1 호흡기용 액츄에이터 기본 모델

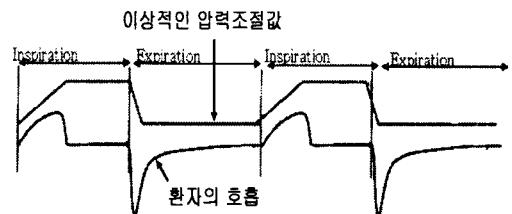


그림 2 액츄에이터에 의한 호흡조절

2.2 추력 특성

액츄에이터에서 발생하는 추력 F 는 공극 자속밀도 B_g , 코일의 턴수 N 과 전류의 크기 i 에 의해 식 (1)과 같이 표현된다.

$$F = NB_g I \times i \quad (1)$$

공극 자속 밀도 B_g 는 영구자석에 의한 자속 B_{PM} 과 코일에 의해 발생하는 자속 B_{coil} 의 합으로 결정된다. 액츄에이터의 추력 F 는 영구자석에 의해 발생하는 일정한 자속밀도와 코일에 의해 발생하는 자속밀도는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$F = Nli(B_{PM} + B_{coil}) \quad (2)$$

코일에 의한 자속밀도는 식 (3)과 같다.

$$B_{coil} = \frac{Ni\mu_0}{2(l_m + l_g)} \quad (3)$$

여기서 식 (3)을 식 (1)에 대입하여 식 (4)를 얻을 수 있다.

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

3. 액츄에이터의 최적설계

3.1 반응표면법을 이용한 최적설계

RSM은 여러 개의 설계변수 x_1, x_2, \dots, x_k 가 복합적인 작용을 하여 어떤 반응 변수 y 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석 방법을 말한다. 설계변수에 대응되는 응답 또는 출력값은 일반적으로 실제 실험이나 컴퓨터에 의한 해석으로 얻어지게 된다. k 개의 설계변수에 대한 실제 응답 y 는 식 (5)와 같이 표현 할 수 있다.

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (5)$$

반응함수 f 는 미지의 함수로 취급되며, 설사 알려져 있더라도 매우 복잡한 함수로 표현되거나 나타내기가 매우 어렵다. 그래서 f 의 근사함수인 y 를 Taylor 급수 전개하여 다항식 모형으로 나타낼 수 있다. 이중 2차 다항식 모델은 다양한 함수의 모양을 나타낼 수 있을 뿐만 아니라 근사 다항식의 계수를 쉽게 구할 수 있으며 많은 연구에 의하여 그 유효성이 검증되었다.

중심합성계획법(CCD Central Composite Design)을 이용하여 근사화된 함수는 식 (6)과 같이 표현 할 수 있다.

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{j=1}^k b_j x_i x_j + \sum_{j \neq i} b_{ij} x_j^2 + error \quad (6)$$

여기서 x_1, x_2, \dots, x_k 는 설계변수, b_0 는 회귀계수, error는 응답의 통계적인 오차항으로, 평균이 0이고 분산 σ^2 을 가지는 정규분포로 가정한다.

본 논문에서 사용된 y 는 추력의 표준 편차이다. 근사적인 함수의 정확성을 증명하기 위해 결정계수 R^2 은 식 (7)과 같다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST}$$

$$SST = \sum_{u=1}^N (Y_u - \bar{Y})^2 \quad SSR = \sum_{u=1}^N (\hat{Y}_u - \bar{Y})^2 \quad (7)$$

N 은 CCD의 전체실험수이며 Y_u 는 FEM을 통해 얻은 실제 반응값, \bar{Y} 는 평균값, \hat{Y} 는 근사화한 식에 의한 반응값이다.

3.2 최적 설계

기존 모델의 설계는 대략적인 계산과 경험적 지식만을 기반으로 제작한 모델이므로 자속의 포화를 고려하지 않

고 설계를 하였다. 따라서 액츄에이터의 크기가 커지고 필요 이상의 공간을 차지하게 되었다. 그리고 액츄에이터의 비선형적 움직임이 커져 정확한 제어가 어렵게 되었다. 그럼 3은 초기모델의 위치에 대한 추력의 변화를 나타낸다.

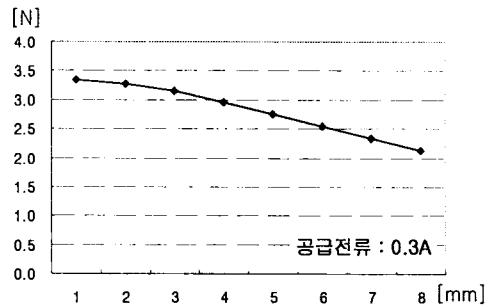


그림 3 위치에 따른 추력의 크기

플런저가 이동하면 코일의 전류와 영구자석의 자장과 교차되는 양이 줄어들어 로렌츠힘이 감소하게 된다. 그리고 코일에 의한 자속 경로 중 l_g 의 길이가 증가하여 코일에 의한 자속값이 작아지게 되어 추력의 크기가 감소한다.

기존의 액츄에이터보다 추력의 선형적 특성을 향상시키고 액츄에이터의 소형화를 위해 다음과 같은 설계변수와 목적 함수를 사용하였다. 소형화를 위해 결정한 설계변수는 그림4에 도시하였으며, 표1에 설계변수의 범위를 나타내었다.

보빈의 직경을 얇게 할 경우 포화가 쉽게 발생하여 추력에 큰 영향을 미치게 된다. 보빈의 크기와 자석의 두께는 반비례 하므로 이를 고려하여 두께를 변화시켰다. 영구자석의 길이는 액츄에이터의 체적과 선형성에 영향을 주므로 목적 함수와 가중치를 설정하여 길이를 결정하였다. Stator의 폭은 자속의 포화와 체적에 영향을 미치므로 이를 고려하여 선정하였다.

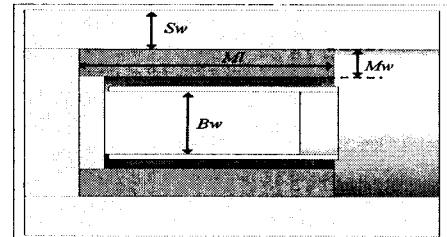


그림 4 설계변수

표 1 설계변수의 범위

		설계변수 범위(mm)				
		-2	-1	0	1	2
x_1	Bw :보빈 직경	6	8	10	12	14
x_2	Mw :영구자석 두께	3	4	5	6	7
x_3	Mt :영구자석 길이	26	28	30	32	34
x_4	Sw :Stator 폭	3	4	5	6	7

기본모델[mm] $x_1:12.6, x_2:5.5, x_3:30, x_4:7.75$

목적함수 y_{FORCE_AVEDEV} : 추력의 표준편차 (8)

제약 함수

- $y_{Force} > 0.27$: 추력의 최소 크기
 $y_{size} < 60$: 액추에이터의 최대 체적
 $y_{PM_size} < 10$: 영구자석 최대 체적

3.3 최적 결과

위의 과정을 거쳐 계산된 설계변수는 표2와 같다. 최적 설계된 액추에이터를 3D Simulation을 이용하여 특성을 분석하였다.

표 2 최적 설계값

		설계변수 [mm]	
		기본모델	최적모델
x_1	Bw :보빈 직경	12.6	13.52
x_2	Mw :영구자석 두께	5.5	3
x_3	ML :영구자석 길이	30	34
x_4	Sw :Stator 폭	7.75	4.662

표 3과 같이 최적 설계된 액추에이터는 초기 설계된 액추에이터보다 추력의 표준편차가 0.36에서 0.12로 그림 5에서 보는 바와 같이 약 65% 감소하여 호흡기의 위치 조절 능력이 향상되었음을 알 수 있다. 보빈의 직경과 영구자석의 두께가 줄어들어 전체 체적의 경우 자속 포화를 고려하여 초기 모델보다 약 44% 감소하였다. 그림 6은 액추에이터 Simulation의 자속 밀도 분포이다.

표 3 결과 비교

목적 함수	추력 편차	평균추력	전체 체적	영구자석 체적
기존 모델	0.36[N]	0.28[N]	62.5[cm ³]	11.5[cm ³]
개선 모델	0.12[N]	2.6[N]	34.95[cm ³]	5.96[cm ³]

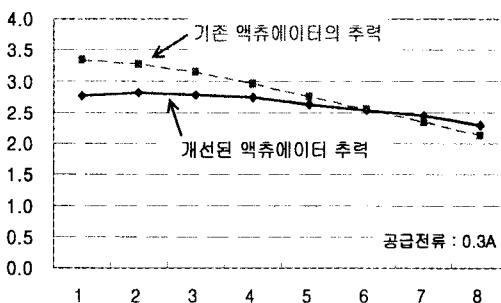


그림 5 개선된 액추에이터의 추력 특성

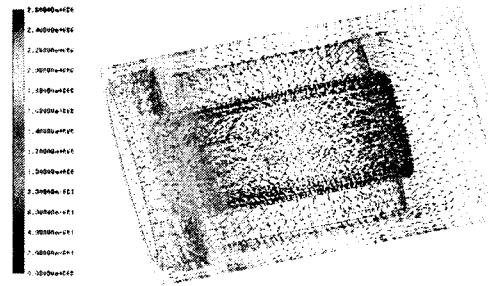


그림 6 액추에이터 3D Simulation 결과

4. 결 론

호흡기용 액추에이터의 최적설계를 반응표면법을 이용하여 최적 설계를 수행하였다. 기존 액추에이터는 호흡 조절 벨브를 제어하는 힘의 크기가 비선형적으로 발생하였다. 이를 개선하기 위하여 힘과 선형성에 영향을 미치는 파라미터를 선정하여 재설계 하였다. 그 결과 비선형적인 특성을 감소시키고 체적을 줄일 수 있었다. 위치에 따른 추력의 표준편차를 약 65% 감소하여 풀린저의 위치에 영향을 적게 받으면서 선형적인 힘을 낼 수 있게 되었다. 체적은 포화를 고려하여 약 44%가량 줄어들었다.

하지만 설계변수 최적화를 통한 액추에이터의 성능 향상이 전체 시스템의 성능향상이라고 결정하기에는 부족하다. 그러므로 액추에이터의 부하를 고려한 동특성 파악과 공기압 부하를 고려한 시뮬레이션 해석을 통한 검증과 실험이 이루어지면 더 좋은 결과가 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Sung Baek-Ju, Lee Eun Woong, Lee Jae-Gyu "A design method of solenoid actuator using empirical design coefficients and optimization technique" Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International Volume 1, 3-5 May 2007 Page(s):279 - 284
- [2] Messine, F., Nogareda, B., Lagouanelle, J.-L. (1998), "Optimal design of electromagnetic actuators: a new method based on global optimization", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 34 No.1, pp.299-308.
- [3] Fitau, E. Messine, F. Nogareda, B. "The electromagnetic actuator design problem: a general and rational approach" Magnetics, IEEE Transactions on Volume 40, Issue 3, May 2004 Page(s):1579 - 1590
- [4] A.V. Lebedev, E.A. Lomonova, A.J.A. Vandendput , D.A.H. Laro "Optimal design considerations for a linear actuator with active magnetic suspension" IEEE EPE, Dresden, Germany, 2005, 11-14 September, papernr.430, 10p
- [5] Byunghoon Bae Nakhoon Kim Hongseok Kee Seonho Kim Yeon Lee; Kyihwan Park "Design and analysis of an electromagnetically driven valve for a glaucoma implant" Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Volume 1, 2001 Page(s):145 - 150 vol.1
- [6] 박성현, 현대설계법, 민영사, 2001