

Push/Pull Effect를 고려한 보이스코일형 LOA의 특성해석 및 시험

장석명*, 정상섭*, 박희창**, 문석준**, 박찬일**, 정태영**
 *충남대학교 전기공학과, **한국기계연구원

Characteristics Analysis and Test of a Voice-Coil-Type LOA Considering the Push/pull Effects

S.M.Jang*, S.S.Jeong*, H.C.Park**, S.J.Moon**, C.I.Park**, T.Y.Chung**
 *Chungnam National Univ. **KIMM

Abstract - The effect of the coil flux, so called "push/pull effect", is to shift the airgap flux density variation due to the magnet alone by a certain amount. Thrust therefore is shift downward or upward. The push/pull effect was presented through the FEM analysis and static tests. We compared with the thrust obtained through the FEM analysis and static tests.

1. 서 론

리니어 진동 액츄에이터(LOA)는 정현파 또는 펄스형 구형파의 교번전압을 공급하여 일정 스트로크로 왕복구동을 하는 리니어모터이다. 그 중에서도 보이스코일형 LOA는 영구자석으로 이루어지는 계자와 보빈에 코일을 감은 가동체로 구성되며, 선형성과 고정밀제어성 등에서 특별히 우수한 장점을 갖는 액츄에이터이다. 따라서 스피커, 마이크로 폰 등은 물론이고 컴퓨터 드라이브, 위치제어 시스템 등의 초정밀 서보시스템 분야에서 구동원으로 널리 사용되고 있다.

그런데 코일에 의해 발생하는 자속밀도가 클 때, 특히 본 논문의 LOA 모델과 같이 통코일형 보이스코일 모터에서는 코일 자속에 의한 공극자속 밀도의 왜형이 크다. 이를 push/pull effect라 하며 직류전동기에서 전기자 반작용에 해당한다. 그러나 보이스코일형 LOA에서는 이러한 영향이 전류 방향과 크기, 코일 가동자의 위치에 따라 다르다. 따라서 설계 및 제어시스템에 응용하기 위해서는 공극자속 밀도의 왜형을 반드시 고려할 필요가 있다. 본 논문에서는 코일에 의해 발생하는 자속이 공극자속밀도에 미치는 영향, 즉 push/pull effect를 2-D FEM 해석과 LOA 가동자의 구속시험을 통해 분석하였다.

2. 본 론

2.1 보이스코일형 LOA와 Push/pull effect

2.1.1 해석 모델과 주요 사양

보이스코일형 LOA는 그림 1과 같이 영구자석에 의한 고정자와 플라스틱 보빈에 코일을 감은 가동자로 구성되며, 그 주요 사양은 표 1과 같다.

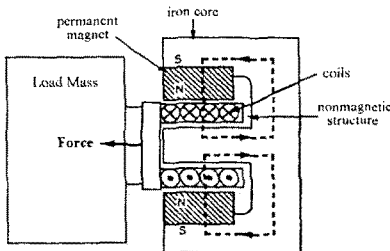


그림 1. 보이스코일형 LOA

표 1 보이스코일형 LOA의 설계 사양

항 목	사 양
부하 질량 (가동자질량 포함)	23 [kg]
코일당 턴수	55 turns/layer × 9 layers
코일 직경	1.0 [mm]
유효길이	150 [mm]
동작자속밀도	0.3 [T]
영구자석	NdFeB
전류밀도	5×10^6 A/m ²
공극	15 [mm]

2.1.2 Push/pull effect

보이스코일 모터는 영구자석을 포함한 자기회로와 코일의 조합으로 구성되었으며 그 발생력은 다음 식(1)로부터 얻는다.

$$F = kBIl \quad [N] \quad (1)$$

여기서 k : 자기회로 고유 계수, B : 자속밀도(T), I : 전류값[A]이다. L : 코일선재의 자계속 길이[m]. 그러나 위 식(1)은 영구자석에서 코일에 작용하는 자속밀도가 코일이 발생하는 자속밀도에 비해 대단히 큰 때에 성립되며, 코일에 의해 발생하는 자속밀도가 클 때에는 공극자속밀도의 왜형이 발생한다. 따라서 이러한 큰 자기구배로 인한 자기에너지의 경사에 기인하는 힘(자기력)을 고려할 필요가 있다. 특히 통코일형 보이스코일 모터에서는 보다 자기력의 영향을 받기 쉬우므로 이를 설계와 해석에서 반드시 고려해야 한다.

2.2 Push/pull effect를 고려한 특성 해석

2.2.1 영구자석만 또는 코일 여자만에 의한 공극 자속밀도 분포

그림 2(a)는 영구자석만 있을 경우에 영구자석에 의해 발생하는 자속경로를 보여준다. 자속은 대부분 공극을 지나 중심극으로 들어가고 누설자속은 적으므로 그림 2(c)에서 보듯이 공극자속밀도는 좌우 대칭적이다.

이에 반해 그림 2(b)는 영구자석은 없고 가동자 코일에 전류를 흘렸을 때의 자속경로이다. FEM 해석시 영구자석(NdFeB)은 투자율은 $1.05 \mu_0$ 이므로 코일에 관점에서는 공극이 매우 큰 편이며 낮은 인덕턴스를 갖게 된다. 따라서 자기회로의 열려진 부분에서 누설이 크고 끝단부분에서 공극자속밀도가 강하지만 공극 안쪽에서는 자속이 약하다.

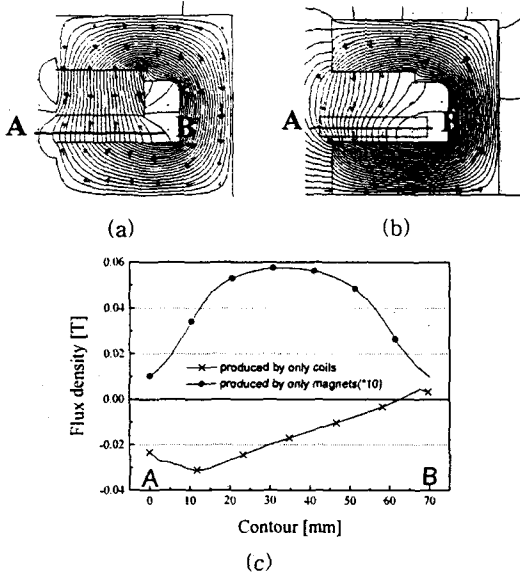


그림 2. 영구자석만 또는 코일전류만의 여자에 의한 자속경로와 공극자속 밀도분포

- (a) 영구자석만에 의한 자속경로
- (b) 코일전류만의 여자에 의한 자속경로
- (c) (a)(b) 두 경우의 공극자속 밀도분포

2.2.2 영구자석과 코일 여자시 공극자속밀도 분포

그림 3은 영구자석이 존재하고 코일전류의 방향에 따른 공극자속경로와 그 밀도분포를 보여준다. 그림에서 보듯이 공극 중심부에서 자기회로의 열려진 쪽까지의 공극 자속밀도는 영구자석에 의한 자속과 코일 전류에 의한 자속이 더해져 증가함을 알 수 있다. 그러나 반대방향의 전류를 공급할 경우 영구자석과 코일전류에 의한 자속이 상쇄되어 감소하였다. 그림 3c에서 이를 보여주듯이 영구자석 단독에 의한 자속밀도보다 어떤 ΔB 의 차이를 만든다. 그러나 영구자석 중심에서 자기회로 안쪽으로는 전류 방향에 따른 공극자속밀도의 변화가 없다.

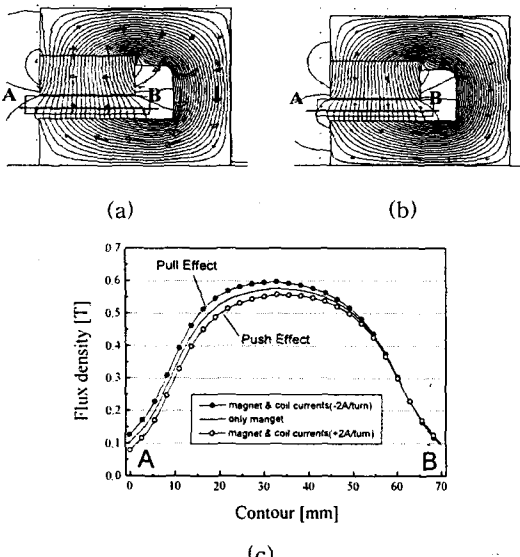


그림 3. 영구자석과 코일에 여자시켰을 때의 자속경로와 공극자속밀도 분포

- (a) 코일 전류 = +2A/turn : outer
- (b) 코일 전류 = -2A/turn : inner
- (c) (a)(b) 두 경우의 공극자속밀도 분포

2.2.3 코일 위치에 따른 공극자속밀도와 추력 변화

그림 4는 FEM 해석과 구속시험시 가동자의 위치를 정의한다. 영구자석의 중심에 기준선이 있으며 가동자의 위치는 이 기준선으로부터의 변위이다.

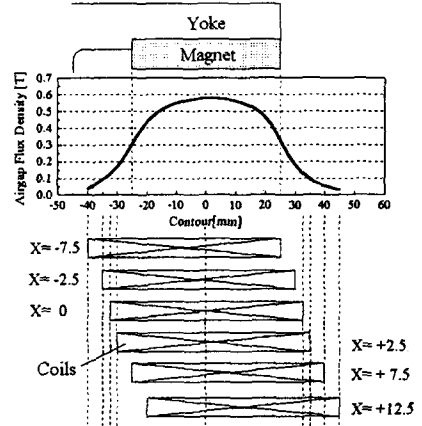


그림 4. FEM 해석과 시험을 위한 가동자의 위치

그림 5와 6은 코일 전류의 크기와 방향을 고려한 가동자 위치에 따른 평균 공극자속밀도 변화와 추력을 각각 보여준다. 그림에서 보듯이 가동자가 기준에 있을 때 코일은 최대자속밀도속에서 추력을 발생하며 코일전류의 방향에 따라 그 추력도 달라진다. 또한 영구자석만에 의한 공극자속밀도와 추력 분포는 push와 pull effect의 중간에 놓여있다.

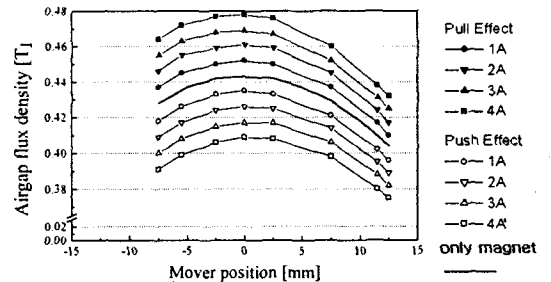


그림 5. 가동자 위치에 따른 평균치 공극자속밀도 분포

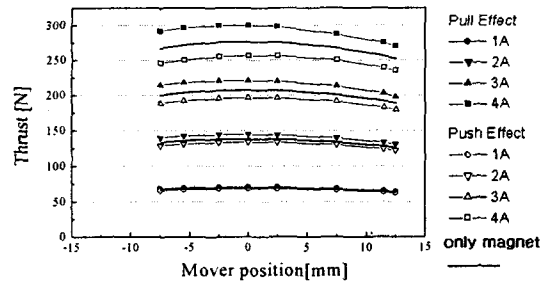


그림 6. 가동자 위치에 따른 추력 분포

2.3 구속 시험에 의한 추력 특성

2.3.1 실험 구성도 및 방법

그림 7은 구속시험을 위한 시험 구성도를 보여준다. 가동자는 strain gage에 의해 구속되었으므로 코일에 전류를 인가시키면 strain gage를 밀거나 당기게 되어 추력을 측정할 수 있다. 또한 strain gage를 고정시킨 장치는 코일위치에 따라 추력을 측정하기 위해 앞뒤로

움직일 수 있게 했다. 추력 측정시 load cell에서 측정된 힘은 앰프를 통해 출력되며, LOA에서 발생된 힘을 정확히 측정하기 위해 발생력에 대한 기계구조적 견고성, 측정 센서의 선형성과 반복성을 확인하였고 load cell과 indicator의 교정(Calibration)을 하였다.

또한, 시험은 가동자 최대 이동거리인 20mm 이내에 실시하였다. 그런데 코일 위치가 0mm나 20mm인 경우에는 힘의 발생 방향에 따라 Load cell에 구속된 가동자가 1-2mm 움직이므로 코일 위치의 여유도를 충분히 주었다.

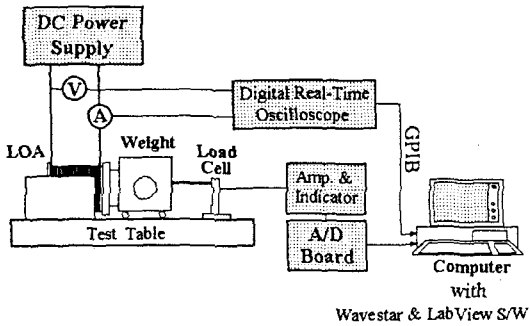


그림 7. 구속 시험을 위한 구성도

2.3.2 시험에 의한 추력 특성

그림 8은 Push/Pull Effect를 고려한 가동자 위치에 따른 추력 특성이다. 이 그림에서 가동자의 위치에 같다고 하더라도 전류의 방향, 즉 코일전류에 의한 자속이 영구자석에 의한 자속을 감소시키는가(Push), 아니면 증가시키는가(Pull)에 따라 발생 추력이 달라짐을 알 수 있다. 실제 Pull effect인 경우에 발생 추력이 상당히 증가하였다. 이는 LOA의 발생 추력의 비대칭성을 예상할 수 있다.

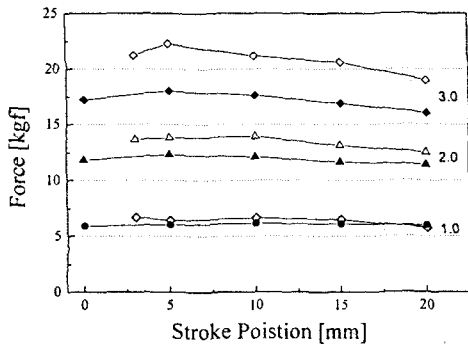


그림 8. Push/Pull Effect에 따른 추력 특성 비교

2.4 FEM 해석과 시험에 의한 추력 특성 비교

그림 9과 10은 Push/Pull Effect인 경우, FEM 해석과 시험에 의해 구해진 추력을 특성을 가동자 위치에 따라 비교한 그래프이다. 그림 9의 Pull effect인 경우 실험치가 FEM 해석치와 거의 일치함을 알 수 있다. 하지만 그림 10의 Push effect인 경우 실제 발생 추력과 약간의 차이가 있었다.

3. 결론

본 논문에서는 코일에 의해 발생하는 자속이 공극자속 밀도에 미치는 영향, 즉 push/pull effect를 2-D FEM 해석과 LOA 가동자의 구속시험을 통해 분석하였다.

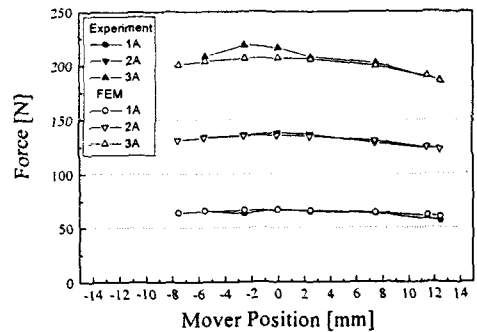


그림 9. Pull Effect의 경우, 입력전류를 고려한 가동자에 위치에 따른 추력 곡선

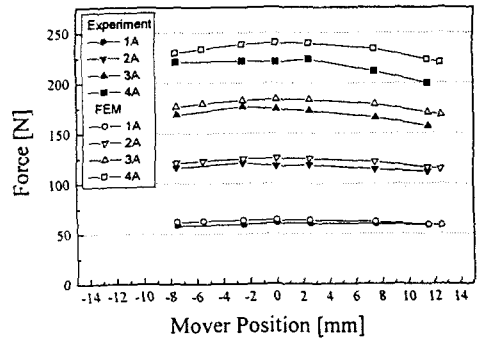


그림 10. Push Effect의 경우, 입력전류를 고려한 가동자에 위치에 따른 추력 곡선

보이스코일형 LOA, 특히 본 논문의 LOA 모델과 같이 롱코일형 보이스코일 모터에서는 Push/Pull effect가 전류 방향과 크기, 코일 가동자의 위치에 따라 다르다는 것을 FEM 해석을 통해 확인하였다. 즉, 자석과 코일에 의한 자속 사이의 상호작용은 공극자속밀도 곡선은 위나 아래로 이동하며 자석의 중심축을 기준으로 공극자속 또는 발생추력의 비대칭하게 만든다. 그리고 이러한 효과는 가동자를 구속시키고 전류의 크기와 방향, 그리고 가동자의 위치를 변화시키면서 수행한 특성시험을 통해 확인할 수 있었다.

결국, 보이스코일 LOA에서 자석과 가동자 코일에 의한 자속 사이의 상호작용으로 기인된 공극자속밀도와 추력 변화의 크기는 전류 크기와 방향, 가동자 위치의 함수이다. 이러한 변화는 좋은 설계와 서보 제어를 용이하게 하기 위해 최소화시켜야 한다.

(참고 문헌)

- [1] S.A. Nasar, I.boldea, "Linear Electric Motors : Theory, Design, and Practical Application", Prentice-Hall, Inc., 1987
- [2] S.A. Nasar, I.boldea, L.E. Unnewehr, "Permanent magnet, reluctance, and self-synchronous motors", CRC press, 1993
- [3] S.M. Jang et al. "The application of a voice coil type LOA for the active vibration control system", Trans., KIEE, Vol.46, No.6, JUN, 1997