

## 자성 유체를 이용한 Linear Actuator에 관한 연구

서강\*, 박관수  
한국해양대학교 전기 공학과

### A study on the Linear Actuator with Magnetic Fluid

Kang Seo\* and Gwan Soo Park  
Dept. Electrical engineering, Korea Maritime University

**Abstract** - 이전에 Magnetic Fluid를 이용하여 의료기기 등에 사용할 목적으로 Linear Actuator를 설계, 제작하였다. 그러나 이 모델은 공극의 높은 자기저항으로 인해 펌핑 압력이 낮고, 그 부피 또한 크다.

따라서 본 논문에서는 Yoke를 이용하여 Linear Actuator를 소형화하고 자기저항을 최소화함으로써 펌핑 압력을 향상시켰다. 또한 Linear Actuator의 3D해석을 통하여 Yoke의 폭, 두께, 간격에 대한 최적 크기를 계산하고 설계하였으며, 실제 제작 및 실험을 하였다.

#### 1. 서론

자성유체는 자성체의 성질을 갖는 액체이다. 자성유체는 다른 액체와는 달리 외부의 힘에 의해서 이동한다. 즉, 외부에서 자기장을 걸어줄 경우 자기장의 모양으로 모이게 된다. 지금까지는 자성유체의 적용범위가 그리 넓지 않으나 응용범위를 개척하기에 따라 액상 자성체의 성질을 이용한 특수 용도로 활용될 수 있다. 이전에 자성유체의 특징을 이용하여 의료용 기기 등에 적용 가능한 솔레노이드형 Linear Actuator를 개발하였다. 이 Actuator는 자기장으로 펌핑의 압력과 속도, 방향을 조절할 수 있다. 그러나 자기 회로가 솔레노이드 형식으로써 높은 자기 저항이 존재하기 때문에 펌핑 압력이 작고, Actuator의 부피 또한 크다.

따라서 본 논문에서는 Linear Actuator를 소형화하고 Yoke를 이용하여 자기저항을 최소화함으로써 펌핑 압력을 향상시켰다. 또한 Yoke의 폭, 두께, Yoke사이의 간격에 대한 최적화 설계를 하였다. 이러한 설계를 바탕으로 Linear Actuator를 제작, 실험하였다.

#### 2. Linear Actuator의 구조와 동작

##### 2.1 Linear Actuator의 구조

Fig. 1은 Linear Actuator의 구조를 단면적으로 나타낸 것으로 Thin Rubber에 Magnetic Fluid를 밀봉하여 넣게 된다. Fig. 2는 3D로 Linear Actuator를 나타낸 것이다. Fig. 2와 같이 Coil이 감긴 극 사이에 관이 있는 구조로 자기저항을 최소화하였다. 따라서

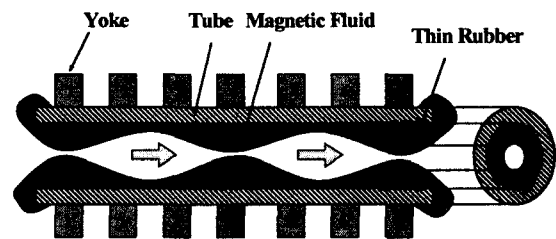


Fig. 1. Cross section of Linear Actuator.

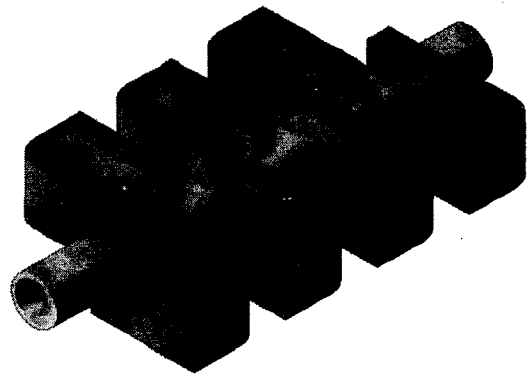


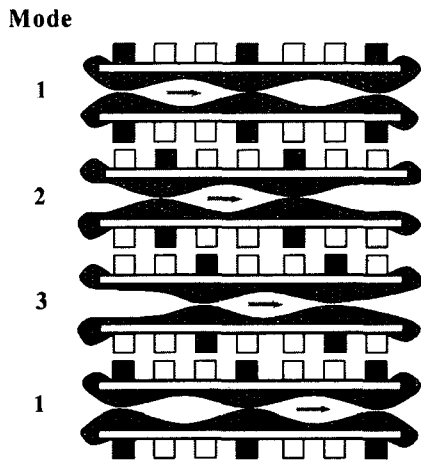
Fig. 2. Structure of Linear Actuator with Magnet Yoke.

서 Linear Actuator 동작에 중요한 요소인 자기장의 세기는 증가하고 Linear Actuator의 펌핑압력 또한 커지게 된다.

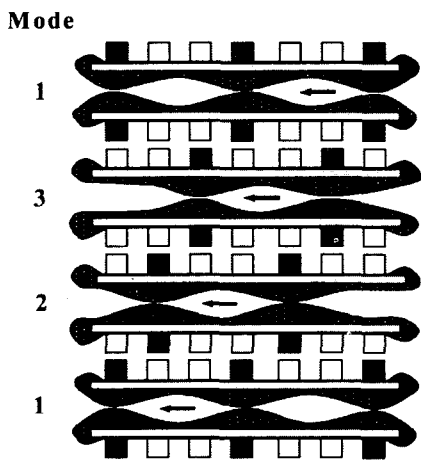
##### 2.2 Linear Actuator의 동작

Linear Actuator의 동작은 Forward, Backward, On / Off switching으로 크게 3가지로 구분할 수 있다. Forward는 3가지 모드로 구분하여 동작하며, mode 1은 1-4-7번 Yoke가 동작하고 mode 2는 2-5번, mode 3은 3-6번, mode 1로 다시 1-4-7번 Yoke가 동작하여 1 cycle을 이루어 펌핑한다. Backward는 Forward와 같이 4가지 모드로 구분되며, Forward의 동작과는 반대로 mode 1, mode 3, mode 2, mode 1

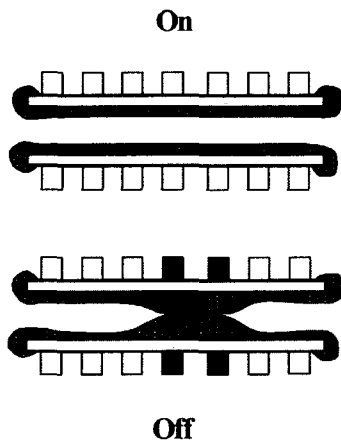
순의 1 cycle로 펌핑하는 것이다. Off Switching은 흐름을 차단하기 위한 것으로 4-5번 Yoke가 동작 유지하게 된다. Linear Actuator의 동작을 Fig. 3에 나타내었다.



(a) Forward



(b) Backward



(c) On/Off Switching

Fig. 3. Operating of the Linear Actuator

### 3. Linear Actuator의 설계 및 제작

#### 3.1 Linear Actuator의 설계

Linear Actuator를 유한 요소법을 이용하여 3D 해석하였다. Fig. 4에서 Linear Actuator의 자기장 분포를 보면 관내로 가는 자기장도 있지만 옆 Yoke로 가는 자기장도 존재를 한다. 이것은 Linear Actuator의 구조 중 Yoke의 폭, Yoke의 두께, Yoke의 간격에 따라 관내의 자기장 분포가 변하게 된다. 따라서 Linear Actuator의 관내 자기장을 최대화 하면서 소형, 경량화 시키기 위한 최적 설계가 필요하다. 또한, 관내에 자성유체에 따라서도 자기장의 분포가 변화하므로 유체의 양도 조절할 필요가 있다. 이에 따른 유한 요소법 해석 결과를 각 요소와 관의 직경의 비로 확인하였다. 이러한 결과를 그림 5에 나타내었다. Fig. 5에서 Yoke width/Tube diameter와 Yoke thickness/Tube diameter, Yoke gap/Tube diameter 모두가 0.6에서 최적화됨을 확인하였다. 자성유체의 양에 대한 것은 Fig. 6에 나타내었다.

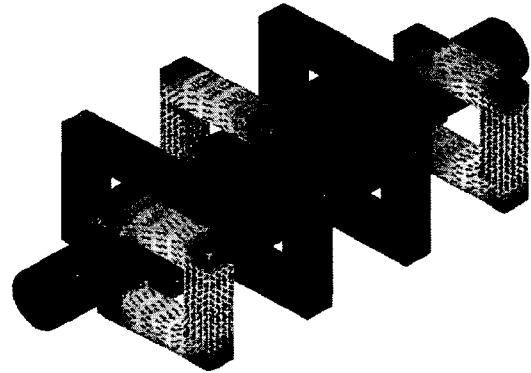
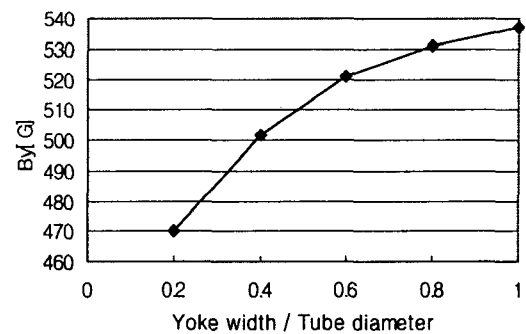
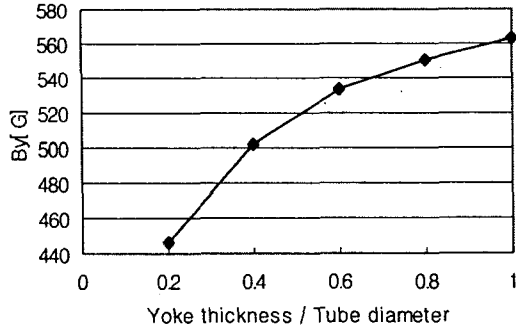


Fig 4. Magnetic Field Distribution by 3D Finite Element Method

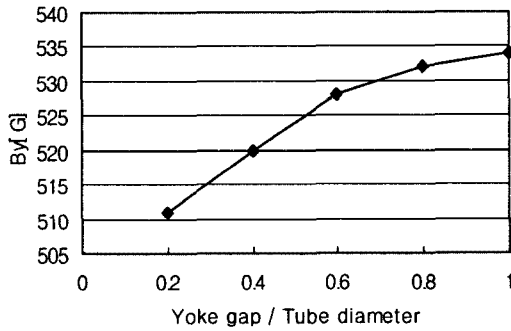


(a) Yoke width

테잎을 이용하였다.



(b) Yoke thickness



(c) Yoke gap

Fig. 5. Optimum Design of the Linear Actuator

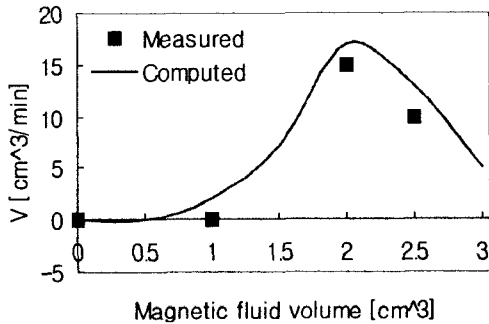
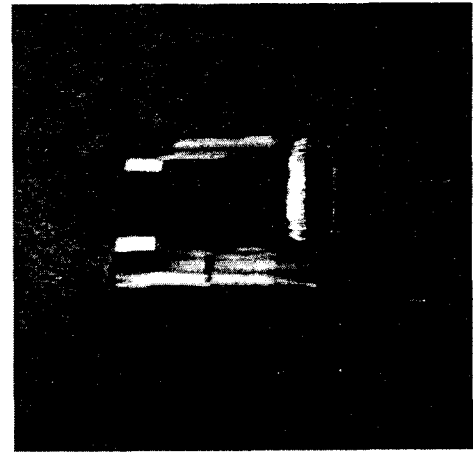


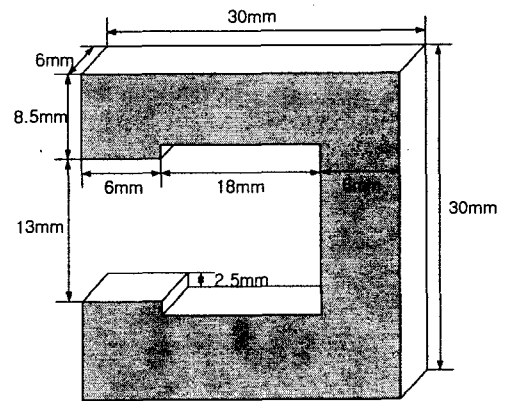
Fig. 6. Fluid Volume

### 3.2 Linear Actuator의 제작

최적 설계에 맞추어서 실질적인 Linear Actuator를 제작하였다. 외경 13mm이고 내경 12mm인 관에 맞추어서 규소강판을 적층하여 Yoke를 제작하였다. Fig. 7은 실제 제작한 Yoke의 사진과 Yoke size를 나타낸 것이다. 직경 0.2mm인 코일을 Yoke에 1000Turn을 감았다. 이러한 Yoke를 7개 제작하여 Fig. 8과 같이 Linear Actuator를 제작하였다. 관의 총 길이는 150mm이다. Yoke간의 간격은 8mm로 하였다. Coil과 Yoke사이의 절연은 절연지와 절연



(a) Yoke and Coil



(b) Yoke size

Fig. 7. Fabrication of the Yoke

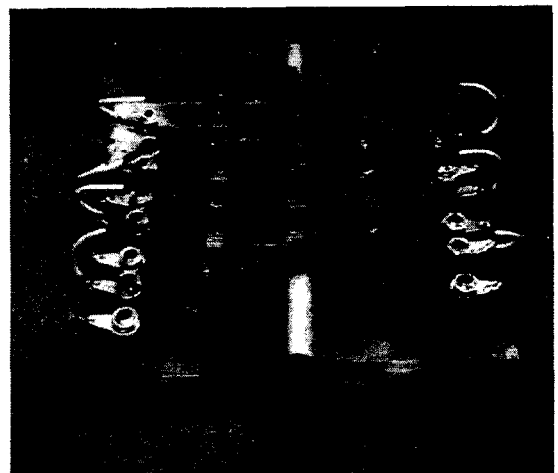


Fig. 8. Fabrication of the Linear Actuator

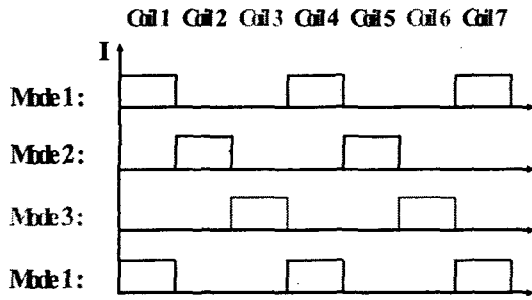
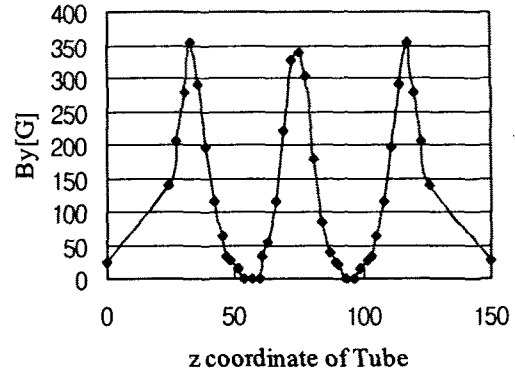


Fig. 9. Operating Current



(a) Measured Data

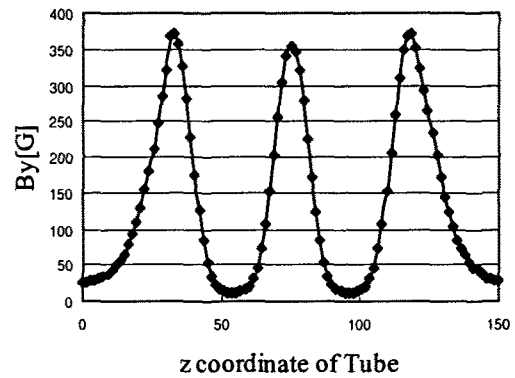
#### 4. Linear Actuator의 실험 결과 및 고찰

##### 4.1 Linear Actuator의 실험 방법

우선 Yoke 하나를 자화 시켜서 자기장의 세기를 측정하였다. 각 Yoke에 해당하는 Coil의 턴수는 일치하나 저항 값이 약간의 오차를 가지므로 각각의 Yoke에 대한 자기장 세기를 일치시켜야한다. 또한 Linear Actuator 관내의 자기장의 분포를 확인하기 위하여 관내 자기장을 mode1, mode 2, mode 3, Off Switching 별로 Gauss Meter로 측정하였다. 이때 직류 전류를 사용하였으며 Linear Actuator의 Operating Current를 Fig. 9에 나타내었다.

##### 4.2 Linear Actuator의 실험 결과

Table 1은 한 개의 Yoke에서 측정한 data들과 유한 요소법으로 계산한 data를 비교한 것이다. 여기서 유한 요소법으로 해석한 data와 실제 제작하여 측정한 data가 일치함을 알 수 있었다. 또한 직류 성분의 Operating Current를 mode별로 인가하여 각 mode 동작 시 관내의 자기장 분포를 유한 요소법으로 해석한 data와 비교하였고, Fig. 10은 mode 1을 비교한 것이고, Fig. 11은 mode 2를 비교한 것이다. 또한 Fig. 12는 mode 3을 비교하였으며, Fig. 13은 Off Switching 비교하여 나타낸 것이다.

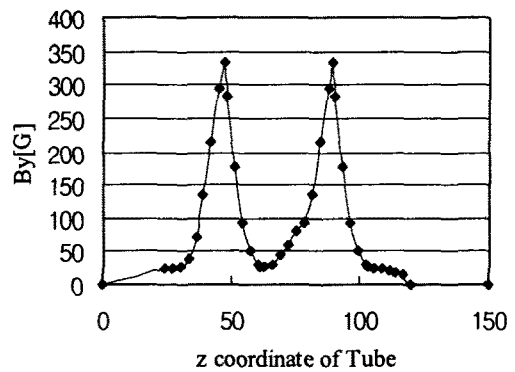


(b) Analyzed Data

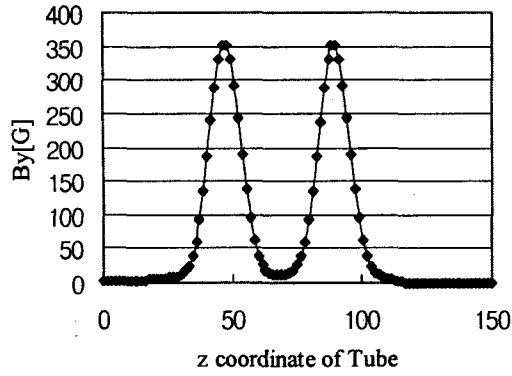
Fig. 10. Magnetic Field inside Linear Actuator (Mode 1)

Table 1. Compare of Analyzed and Measured Data

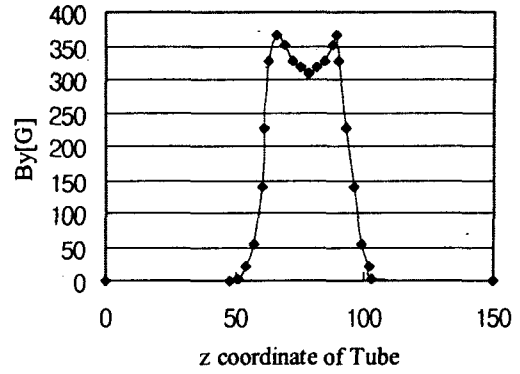
	Analysis	Measurement
Current	500 [AT]	500[AT]
Resister	6.737 [ $\Omega$ ]	8.2 [ $\Omega$ ]
Voltage	6.7 [V]	8.5 [V]
Magnetic Field	360 [G]	340 [G]



(a) Measured Data

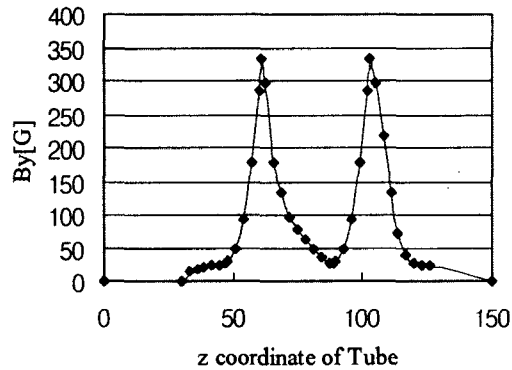


(b) Analyzed Data

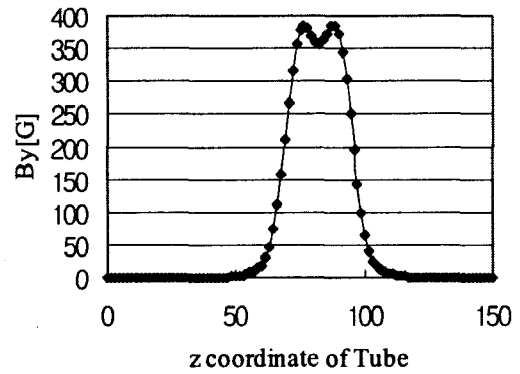


(a) Measured Data

Fig. 11. Magnetic Field inside Linear Actuator (Mode 2)

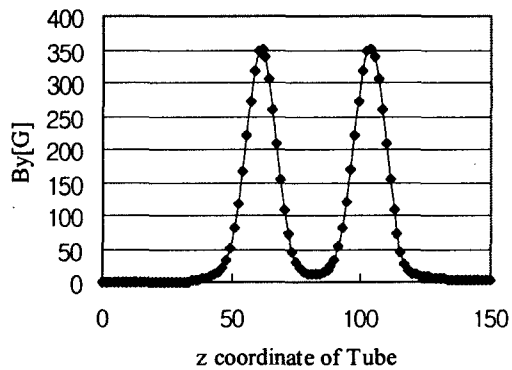


(a) Measured Data



(b) Analyzed Data

Fig. 13. Magnetic Field inside Linear Actuator ( Off )



(b) Analyzed Data

Fig. 12. Magnetic Field inside Linear Actuator (Mode 3)

### 4.3 고찰

4.2절의 실험 결과에서 알 수 있듯이 유한 요소법을 이용하여 계산한 결과와 제작하여 측정된 결과가 유사한 패턴을 가지는 것을 알 수 있다. Actuator를 제작하는데 있어 Magnetic Fluid의 밀봉하는데 어려움이 있으며, Thin Rubber의 선정에 있어서 자성 유체의 Force를 고려하여야 한다. 또한 Actuator 동작 시에는 지속적인 동작으로 인해 진행 방향의 끝부분에 Magnetic Fluid가 집중되는 것을 확인하였다. Magnetic Fluid의 점성과  $B_s$ 의 특성에 따라 스피드와 압력이 변화하게 된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 Magnetic Fluid를 이용한 Linear Actuator를 설계하고 제작하였다. 또한 자기저항을 최소화하기 위하여 Magnetic Yoke를 사용하여 관내의 자기장을 증가시키고, 펌핑 압력을 증가시켰다. 관내 자기장의 분포는 유한 요소법으로 계산한

Data와 유사한 패턴을 보이는 것을 확인하였다.

차후 Magnetic Fluid의 응집 문제를 해결하기 위하여 밀봉 방법에 대한 연구와 유체 유동의 특성을 파악해야 할 것이다. 또한 Magnetic Fluid의 점성과  $B_s$ 의 특성에 따른 스피드와 압력의 변화에 대해 검토하여 Operating Current의 제어 방법 및 효율적인 Operating Current에 대한 연구가 필요하다.

#### [참고 문헌]

- [1] S. Taketomi and S. Chikazumi, "Magnetic Fluid", Nikka Kogyo Simbunsha, 1987
- [2] D. Verotta, "A general solution for nonparametric control of a linear system using computer controlled infusion pumps." IEEE Trans.Magn. Vol.46, pp.44-50, Jan. 1999
- [3] M.J.Daoura and D.R.Meldrum, "Precise automated control of fluid volumes inside glass capillaries." J.Microelectromechan. Sy -st. Vol.8, No.1, pp.71-77 March. 1999
- [4] C.A.Borghi, A. Cristofolini and M.Fabbri, "Study of the design model of a liquid metal induction pump.", IEEE Trans.Magn. Vol.34, No.5, pp.2956-2959, Sept. 1998
- [5] G.S.Park and S.H.Park, "Design of magnetic fluid linear pump.", IEEE Trans.Magn. Vol.35 pp. 4058-4060, Sept. 1999
- [6] G.S.Park, D.H.Kim, S.Y.Hahn and K.S.Lee, "Numerical algorithm for analyzing the magnetic fluid seals.", IEEE Trans.Magn. Vol.30, pp.3351-3354, Sept. 1994
- [7] G.S.Park and S.H.Park, "New structure of the Magnetic fluid linear pump.", IEEE Trans.Magn. Vol. 36, No.5, pp.3709 -3711, Sept. 2000