

# 마그네틱씰 개발 및 기밀 평가 시험

김옥현<sup>#</sup>, 이민기<sup>\*</sup>

## Development of a Magnetic Seal and the Leak Test

Ock-Hyun Kim<sup>#</sup>, Min-Ki Lee<sup>\*</sup>

(Received 25 February 2011; received in revised form 31 March 2011; accepted 11 April 2011)

### ABSTRACT

Magnetic seal uses a magnetic fluid to seal a gap between a rotating shaft and housing. It is distinguished from other kinds of seals from the fact that solid contact does not occur in the seal. This implies that it is free from solid rubbing thus dustless and provides a clean circumstance. That is the reason why the magnetic seal is used exclusively for most of vacuum chambers in semiconductor process where dustless clean circumstance is critical.

A magnetic seal has been developed of which design parameters are determined based on published data, and an air pressure test has been done to examine its sealing capability. Effects of some design parameters have been studied through FEM analysis. The results show some notable aspects of design parameters and provide suggestions for developing the seals. Regarding the sealing capacity of the magnetic seal the factor to match the theoretical value with the actual one was found to be 0.4~0.7, which means still there is some discrepancy between theory and actual.

**Key Words** : Magnetic Seal(마그네틱씰), Magnetic Fluid(자성유체), Vacuum Chamber(진공로), Semiconductor Process(반도체 공정), Seal(밀봉), Rotating Shaft(회전축)

### 1. 서 론

상대운동이 없는 정적(static)인 두 면 사이의 공간은 오링, 가스켓 등을 이용하여 비교적 쉽게 밀봉할 수 있다. 그러나 회전축과 같이 상대운동이 발생하는 두 면 사이를 밀봉하는 것은 정적인 경우에 비해 고려해야 할 사항이 많고 어렵다. 메카니칼씰, 립씰

등이 회전축의 밀봉에 흔히 사용되는 방법이다. 이와 같은 밀봉 방법에서는 회전축과 씰 사이에 고체 마찰이 발생하게 되어 마모에 의한 분진이 발생하며 씰의 수명이 단축된다. 마그네틱씰은 이와 같은 단점이 극복된 씰로서 회전축과 하우징 사이의 틈새를 자석에 붙는 유체인 자성유체를 사용하여 씰링한다<sup>[1-5]</sup>. 영구자석을 이용하여 자성유체를 틈새의 원하는 위치에 붙잡아 둔다. 이와 같은 원리의 마그네틱씰은 고체마찰이 발생하지 않으므로 분진이 발생하지 않고 수명도 길다. 이와 같은 이유로 마그네틱씰은 높은 청정도가 요구되는 반도체 공정용 진공챔버 등

\* 충북대학교 기계공학과 대학원

# 교신저자 : 충북대학교 기계공학부

E-mail : ohkim@chungbuk.ac.kr

에 독점적으로 사용되고 있다.

본 연구에서는 문헌에 발표되어 있는 자료를 바탕으로 마그네틱씰을 개발하였다. 주요 설계치수는 발표된 자료에 근거하여 결정되었다.

ANSYS 프로그램을 사용하여 마그네틱씰의 자장 해석을 FEM으로 해석하였다. FEM 자장 해석결과와 마그네틱씰의 씰링 내압에 관한 이론식을 이용하여 씰링능력을 이론적으로 예측하였다. 공기 가압 시험을 통하여 씰링 성능을 실험적으로 확인하였으며 그 결과를 이론적 예측치와 비교 검토하였다.

존재하는 경우 이들 각 트렌치는 총 부하기압인 1기압을 분담하게 된다.

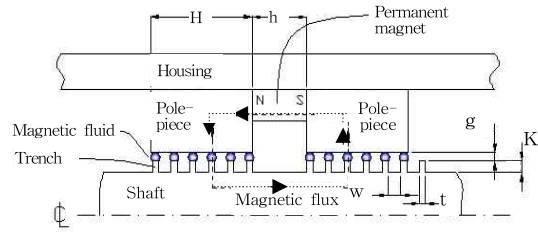


Fig. 1 Schematic of a magnetic seal

## 2. 마그네틱씰 개발

### 2.1 마그네틱씰의 원리

Fig. 1은 마그네틱씰의 구조도를 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 마그네틱씰은 영구자석, 폴피스, 회전축, 하우징으로 구성된다. 회전축에는 트렌치가 수 개 형성되어 있으며, 각 트렌치 이빨 끝에 자성유체가 발라져 있다. 영구자석 N극으로부터 나온 자속(magnetic flux)은 폴피스를 통해 자성유체, 트렌치, 축을 통해 영구자석 S극으로 들어간다.

자성유체는 Perfluoropolyether 등과 같은 용액에 나노 크기의 자성체를 계면활성화 처리를 하여 콜로이드상태로 분산시킨 유체이다<sup>6)</sup>. 용액 내에 분산되어 있는 나노 크기의 자성입자에 의해 자성유체는 자속밀도(magnetic flux density)가 높은 트렌치(trench) 이빨과 폴피스 사이의 틈으로 끌려 들어가는 힘을 받게 된다. 이와 같이 자성유체를 트렌치 이빨 끝에 붙들어 두는 자력에 의해 자성유체는 회전축의 양단 사이의 압력차가 존재하는 환경에서도 저압측으로 빨려 들어가지 않고 트렌치 상단의 틈새 자리를 지키며 밀봉을 유지하게 된다.

마그네틱씰의 대표적인 적용분야는 특히 청정환경이 요구되는 반도체, LCD 제조공정에 사용되는 진공챔버이다. 진공챔버 안에서 처리되는 소재의 이송, 배치 등을 위해 챔버 외부에서 전기모터 등에 의해 구동되는 회전축이 챔버 안으로 삽입되게 된다. 진공챔버에 적용하는 경우 마그네틱씰은 총 1기압을 버티며 밀봉기능을 수행해야 하며, 수개의 트렌치가

### 2.2 마그네틱씰의 설계제작

마그네틱씰의 주요 설계변수 값은 많은 문헌에 그 대체적인 치수 범위가 발표되어 있다. 본 연구에서는 이들 문헌에 기초하여 Table 1과 같이 주요 설계치수를 결정하였으며, 영구자석은 시장에서 쉽게 구입할 수 있는 네오디움 자석으로 선택되었다.

Table 1 Dimensions of a magnetic seal, mm

Gap, g	Height of magnet, h	Thickness of tooth, t	Bottom width, w
0.16	5	0.35	0.8
Height of pole-piece, H	Height of tooth, K	Shaft diameter	
10	0.6	32.6	

마그네틱씰의 내압능력을 실험적으로 확인하고 이론에 의한 예측과 비교하기 위하여 자속밀도를 변화시킬 수 있도록 영구자석과 폴피스와의 간격을 변경시킬 수 있도록 제작하였으며, Fig. 2에 제작된 트렌치가 형성된 마그네틱씰의 부품 사진을 보였다.

## 3. FEM 해석

### 3.1 폴피스의 자속밀도 해석

이론해석을 통해 마그네틱씰의 내압 능력을 예측할 수 있다면 매우 유용할 것이다. 마그네틱씰에서

트렌치 한 개당 자성유체가 터지지 않고 지지할 수 있는 압력차  $\Delta p$ 의 이론식은 아래식 식 (1)과 같이 알려져 있다<sup>[5]</sup>.

$$\Delta p = \xi \cdot B_g \cdot M_s \quad (1)$$

여기서,  $B_g$ 는 트렌치 윗 틈새의 자속밀도,  $M_s$ 는 자성유체의 포화자화,  $\xi$ 는 보정계수이다<sup>[5]</sup>.

이 식을 이용하여 마그네틱씰의 내압능력을 예측하기 위해서는 틈새 자속밀도  $B_g$ 의 추정치가 필요하다. 이를 위해 ANSYS FEM 해석 프로그램을 사용하였다.

식 (1)에서 보는 바와 같이 마그네틱씰의 씰링 능력은 트렌치 윗 틈새의 자속밀도가 중요하다. 그러나 Fig. 1에서 보는 바와 같이 마그네틱씰이 모두 조립된 상태에서는 트렌치 이빨 윗 틈새의 자속밀도 측정은 틈새가 너무 협소하고 폴피스와 하우징의 간섭이 있어 불가능하다. FEM에 의한 자속밀도 해석결과와 실제 측정값과의 근접 여부를 확인하기 위하여 Fig. 2와 같이 자속밀도 측정이 용이한 영구자석과 폴피스만의 자속밀도를 3차원 FEM으로 해석하였다. Fig. 3은 그 결과를 보인다. 폴피스는 내경 35.2mm, 외경 62mm, 높이(H) 10mm이며 상대투자율(relative permeability)은 1000으로 하였다. 영구자석은 직경 8mm, 높이(h) 5mm이며 폴피스 원주둘레에 20개가 배치된다. 보자력은 912kA/m, 상대투자율은 1.1로 하였다. Fig. 3이 1, 2위치에서의 자속밀도 실제 측정값은 270, 180mT로 FEM 해석 결과인 275, 183mT와 정량적으로 잘 일치하는 결과를 보였다.

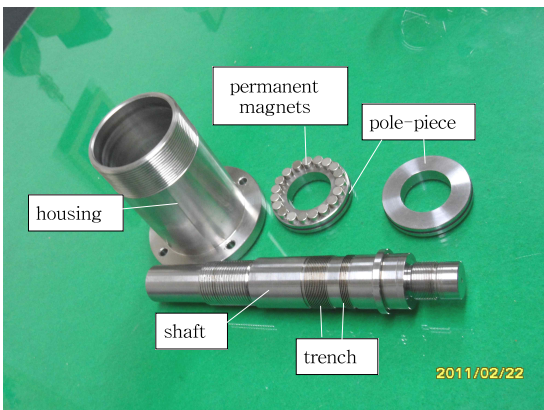


Fig. 2 Photograph of magnetic seal parts

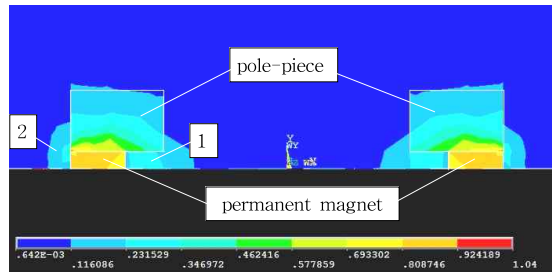


Fig. 3 Contour of magnetic flux density of pole-pieces and magnets

## 2.2 영구자석의 형상에 의한 영향

마그네틱씰의 주요 설계변수는 Fig. 1에 보인 바와 같은 트렌치폭  $t$ , 틈새간격  $g$ , 폴간격  $w$  등이다. 이들에 의한 영향과 설계 추천 값은 여러 문헌에서 발표된 바 있다.<sup>[1-5]</sup>

마그네틱씰에 사용되는 영구자석은 Fig. 2에 보인 바와 같은 작은 디스크 형태의 것을 폴피스 원주방향으로 여러개 위치시키는 것과 Fig. 4에 보인 바와 같이 링 형태의 것을 사용할 수 있다. 이 두가지 형태에 대하여 틈새 간격의 변화에 따른 틈새 자속밀도 변화를 3차원 FEM으로 해석하였다. Table 1의 파라메타 값들을 사용했으며, 자성유체의 상대투자율은 1.4로 하였다. Fig. 5는 3차원 FEM 해석결과에 의한 틈새 자속밀도 변화를 보인다. 그림에서 보는 바와 같이 링 형태의 자석의 경우가 작은 디스크 형태의 자석의 경우보다 자속밀도가 다소 크게 나타났으나 그 차이는 크지 않았다. 틈새 간격 변화에 따른 자속밀도 변화가 작은 것이 바람직하며 그것은 가공 오차에 의해 틈새간격이 변하더라도 틈새의 자속밀도 변화가 작아 자성유체가 틈새에서 씰링을 유지한다는 의미가 된다. 영구자석의 높이  $h$ 에 관하여 그 영향을 검토하였으며, Fig. 5의 결과와 같이 링 형태 영구자석의 경우와 다수의 작은 디스크 형태의 영구자석의 경우가 차이가 없음을 근거하여 영구자석의 높이에 의한 영향을 2차원 FEM해석을 통해 검토하였으며 그 결과를 Fig. 6에 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 영구자석의 높이가 큰 경우가 틈새 자속밀도가 크고 트렌치 틈새간격의 변화에 따른 자속밀도의 변화가 적은 경향을 보이는 것으로 나타났으며 바람직함을 알 수 있다.

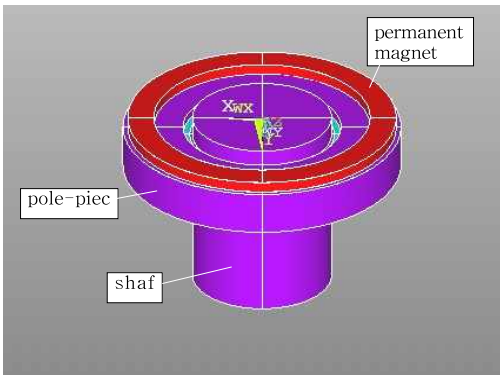


Fig. 4 Ring type of permanent magnets

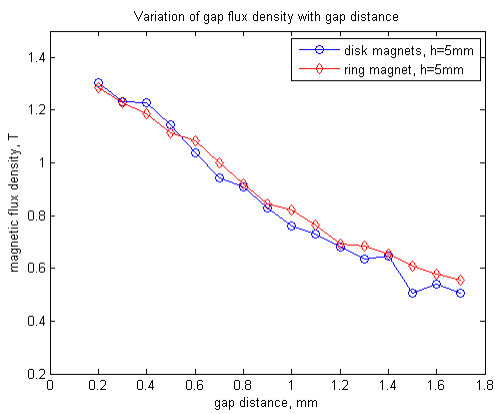


Fig. 5 Variation of magnetic flux density in gap with the gap distance

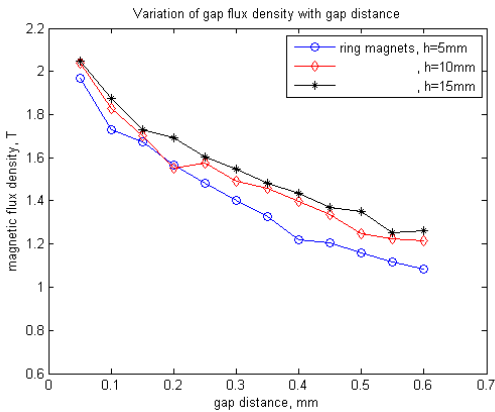


Fig. 6 Variation of magnetic flux density in gap with magnet height

### 3. 실험

#### 3.1 장치 구성 및 방법

개발된 마그네틱의 기밀 능력을 확인하기 위하여 Fig. 7에 보인 바와 같은 공기 가압 기밀 시험을 수행하였다. 그림에서 보는 바와 같이 압축공기의 유량을 극소로 하여 서서히 챔버에 흘려주며, 시간에 따른 챔버 내부의 공기압을 측정하였다. 공기압 측정결과는 Fig. 8과 같다. 유효 트렌치 개수는 10개이며, 실험적으로 트렌치 틈새에 발생하는 자속밀도를 변화시키기 위하여 영구자석과 폴피스 사이에 비자성체로서 간격을 만들었으며, 그 간격의 변화에 따른 기밀 성능을 실험적으로 측정하였다.

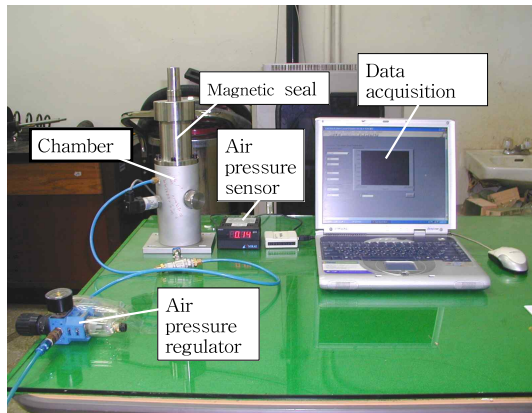


Fig. 7 Photograph of an experimental setup

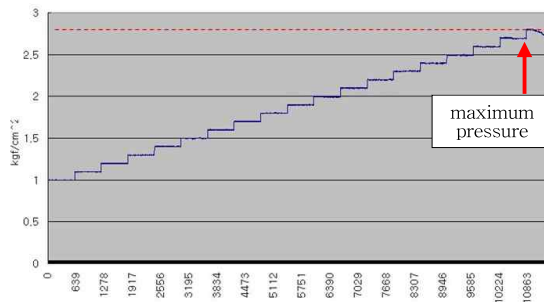


Fig. 8 Record of an air pressure leak test

### 3.2 실험 결과 및 고찰

Table 2에 위에서 설명한 바와 같은 실험을 통해 측정된 내압력과 FEM에 의한 자장해석을 통한 식 (1)에 의한 이론적 내압력을 비교하였다. 식 (1)에서의 포화자화  $M_s$ 는 39100A/m로 하였다.

Table 2의 결과로 부터 식 (1)의 보정계수  $\xi$ 가 약 0.4~0.7 사이의 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 이것은 이론 해석시 사용한 부품의 자기적 특성 파라미터의 오차, 비선형성, 실험과정에서의 오차, 수치 해석 오차 등이 복합적으로 작용한 것이다.

**Table 2 Comparison of leak air pressure between experiments and FEM analysis**

Magnet-polepiece distance, mm	0	2	3	4
Experiments, kgf/cm <sup>2</sup>	2.8	2.7	1.3	1.3
FEM & Eq. 1, kgf/cm <sup>2</sup>	6.48 $\xi$	3.27 $\xi$	2.29 $\xi$	1.68 $\xi$

### 4. 결 론

반도체 공정용 진공챔버와 같이 청정 환경에서 독점적으로 사용되고 있는 마그네틱씰을 개발하였다. 주요 설계변수의 영향을 FEM 해석과 실험을 통하여 고찰하였으며 그 결론은 다음과 같다.

1. 이론적 기밀능력 예측치와 실험치의 차이를 보정하는 보정계수는 0.4~0.7 사이인 것으로 나타났다. 보정계수가 1이 아닌 것은 이론식과 실제 사이의 괴리, 이론해석시 사용한 물성치 오차, 수치해석 및 실험 오차 등이 복합적으로 작용한 것으로 보인다.
2. 영구자석의 높이가 클수록 트렌치 틈새간격의 변화에 의한 자속밀도의 변화가 적고 틈새 자속밀도가 증가하는 경향을 보이므로 유리하다. 영구자석의 형태에 관하여는, 여러개의 소형 디스크형태의 자석을 사용하는 것과 하나의 링 형태의 자석을 사용하는 것은 별로 차이가 없다.

### 후 기

이 논문은 2010학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

### 참고문헌

1. Kim, C. K. and Na, Y. H., "Experimental Study on the Performance Characteristics of Magnetic Fluid Seals for a High Vacuum System," Journal of KSTLE, Vol. 13, No. 2, pp. 105-111, 1997.
2. Szydlo, Z., Ochonski, W. and Zachara, B., "Experiments on Magnetic Fluid Rotary Seals Operating Under Vacuum Conditions," Tribotest Journal, Vol. 11, No. 4, pp. 345-354, 2005.
3. Zou, J., Zou, Jim. and Hu, Jian., "Design and Pressure Control of High Pressure Differential Magnetic Fluid Seals," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 39, No. 5, pp. 2651-2653, 2003.
4. Szydlo, Z., and Matuszewski, L., "Experimental Research on Effectiveness of the Magnetic Fluid Seals for Rotary shafts Working in Water," Polish Maritime Research, Vol. 14, No. 4, pp. 53-58, 2007.
5. Borbath, I., Kacso, Z., David, L., Potencz, I., Bica, D., Marinica, O. and Vekas, L., "Application of Magnetic Nanofluids in Rotating Seals," Convergence of micro- and nanoengineering, Bucharest; Romanian Academy Publ.House, pp. 200-210, 2006.
6. Berger, P. et al, "Preperation and Properties of an Aqueous Ferrofluid," Journal of Chemical Education, Vol. 76, No. 9, 1999.