

## 자성유체씰의 열전달 해석

김옥현\*, 이희복<sup>+</sup>, 이민기<sup>+</sup>, 홍정희<sup>++</sup>, 곽용운<sup>++</sup>  
(논문접수일 2010. 03. 09, 심사완료일 2010. 04. 22)

### Analysis of Heat Transfer of a Magnetic Fluid Seal

Ock-Hyun Kim\*, Hee-Bok Lee<sup>+</sup>, Min-Ki Lee<sup>+</sup>, Jeong-Hui Hong<sup>++</sup>, Yong-Woon Kwak<sup>++</sup>

#### Abstract

Magnetic fluid seal is characterized by its simple design, low friction and being dustless. Those advantages are deduced from the fact that the sealing element is not a solid such as rubber or plastic but it is a fluid. Those are critical for application to a rotating shaft which is inserted into a vacuum chamber where high level of vacuum and cleanness are required. For the reason the magnetic fluid seal has become a standard for vacuum chambers for semiconductor and LCD processing.

It should be noted that its sealing performance is sensitive to temperature. If necessary, water cooling should be considered. Thus anticipation of the temperature distribution of the magnetic fluid seal is important before applying it. In this paper an FEM analysis of the heat transfer has been executed and compared with experimental results. An overall convective heat transfer coefficient has been adopted for the analysis, which results in satisfactory consistency of the theoretical and experimental results.

**Key Words** : Magnetic fluid seal(자성유체씰), FEM(유한요소법), Heat transfer(열전달), Convective heat transfer coefficient(대류열 전달계수), Rotating shaft seal(회전축씰), Vacuum process(진공공정)

## 1. 서론

자성유체란 액체 속에 직경 0.01~0.02 $\mu\text{m}$  크기의 자성분말을 계면활성화 처리하여 콜로이드 상태로 안정, 분산시킨

유체이다<sup>(1)</sup>. 자성 유체속의 자성분말에 의해 자성유체는 자석에 붙으며, 계면활성화 처리에 의해 자기장, 중력, 원심력이 가해져도 자성분말은 용액과 분리되지 않는다.

자성유체의 중요한 응용분야 중 하나가 자성유체씰(Mag

\* 충북대학교 기계공학과 (ohkim@chungbuk.ac.kr)  
주소: 361-763 충청북도 청주시 흥덕구 성봉로410(개신동)  
+ 충북대학교 대학원 기계공학과  
++ (주)태한글로벌 기술연구소

netic fluid seal)이다. 자성유체셀은 회전축을 씰링하기 위한 것으로 회전축과 하우징 사이의 틈새를 자성유체로 채워 씰링하는 것이며 자성유체는 보통 영구자석을 이용하여 붙잡고 있다. 기존의 메카니칼씰, 오링 등의 방법에서는 고체 마찰이 발생하므로 마찰저항이 크고, 마모에 의한 분진발생의 위험이 있고, 수명이 짧은 단점이 있으나, 자성유체셀은 유체접촉이므로 마찰저항이 작고, 마모가 없어 청결하며, 수명이 긴 장점을 갖는다. 이와 같은 장점에 의해 자성유체셀은 반도체, LCD 등의 진공공정을 위한 진공챔버 씰링에 독점적으로 사용되고 있다<sup>(2-5)</sup>.

자성유체셀의 성능과 수명은 자성유체의 온도에 영향을 받는다. 고온에서는 자성유체의 증발속도가 증가하며 또한 자력특성이 변하게 되므로 오랜 수명을 유지하려면 적정 온도에서의 사용이 필요하다. 필요시 자성유체셀은 별도의 냉각장치를 장착하게 된다. 성공적인 자성유체셀의 적용을 위해서는 실제로 적용했을 때의 자성유체셀 온도를 사전에 예측하여 이에 적절하게 대응할 필요가 있다.

본 논문에서는 진공챔버에 장착되는 자성유체셀에 대하여 유한요소법(FEM : Finite Element Method)으로 자성유체셀의 온도분포를 해석하는 과정과 방법을 제시하였다. 소형 챔버와 열원을 사용하여 실험을 수행하였으며 실험결과와 유한요소법에 의한 해석결과를 비교 검토하였다. 이와 같은 연구를 통해 자성유체셀의 온도분포를 효과적으로 예측할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 자성유체셀의 구성

Fig. 1에 본 연구에서의 해석 대상인 자성유체셀의 구성과 원리 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 자기회로는 다 음과 같이 구성된다. 즉, 영구자석 N극 → 좌측폴피스(Pole

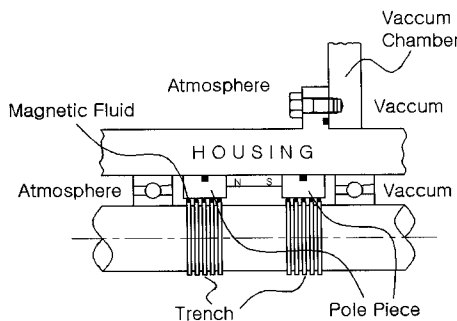


Fig. 1 Schematic of a magnetic fluid seal

piece) → 회전축 트랜치부 → 회전축 → 우측폴피스 → 영구자석 S극으로 자기회로가 형성되며, 자성유체는 폴피스와 회전축 트랜치 사이의 틈새에 도포되며 자력선에 의해 그 틈새에 붙잡혀 있게 된다. 폴피스와 접하고 있으며 요철이 가공되어 있는 회전축 부위를 트랜치라 부르며 이는 자성유체를 오링 형태로 붙잡아 두기 위한 것이다.

### 2.2 유한요소 모델링

자성유체셀의 축과 폴피스의 재질은 자성체인 스텐레스강으로 STS630이 사용되며, 하우징은 비자성체인 STS304가 사용된다. 그리고 하우징과 폴피스 사이의 오링 재료로써 고무가 사용되었다. 본 연구에서 사용된 이들 재료의 열전도율은 Table 1에 보인 바와 같다.

유한요소법으로 해석하기 위하여 ANSYS를 사용하였다. 요소의 모델로서 2차원 축대칭 모델을 선택하였으며 모델생성은 자동생성방법을 선택하였다. 하우징 외경에 억지끼워 맞춤으로 장착되는 폴피스는 그 외경이 하우징의 내경과 같으며, 회전축 트랜치부 외경은 폴피스 내경과 수백 마이크론의 틈새를 가지게 모델링되었다.

Fig. 2은 본 해석대상 자성유체셀의 주요치수를 보이고 있으며 Fig. 3은 ANSYS 해석시 생성된 유한요소 모델이다.

Table 1 Thermal conductivity for FEM analysis

Material	Thermal conductivity ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
STS 304	16.2
STS 630	16.3
air	0.02624 (at 77°C)
Mag. fluid	0.147
rubber	0.002

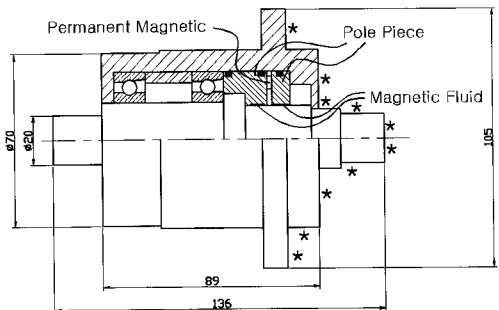


Fig. 2 Dimensions of a magnetic fluid seal (mm, ★'s are inside of chamber)

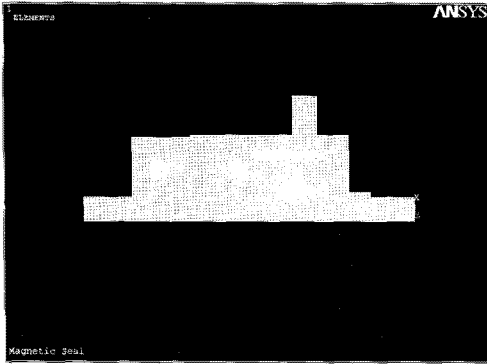


Fig. 3 FEM model of a magnetic fluid seal

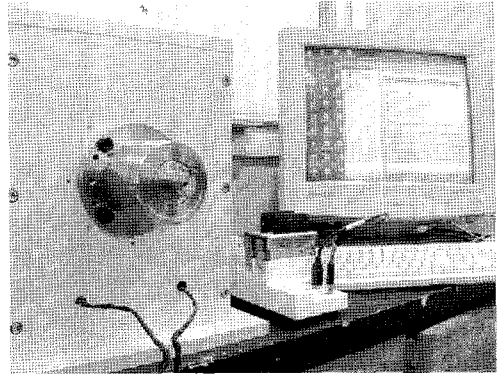


Fig. 4 Photograph of an experimental setup

### 2.3 경계조건

#### 2.3.1 온도경계조건

앞의 Fig. 2에서 ★ 표시가 되어 있는 면이 챔버내부와 접하고 있는 면이고 나머지 면들은 챔버 외부에 노출되어 있는 면이다. 챔버내부와 접하고 있는 면들의 표면온도는 실제로는 서로 다소 다를 것으로 예상되나 큰 차이는 없을 것으로 생각된다. 따라서 편이상 챔버내부와의 접촉면들의 온도는 모두 챔버내벽의 온도와 동일한 것으로 가정하였다.

#### 2.3.2 대류열전달 계수

앞의 Fig. 2에서 챔버외부 대기에 노출되어있는 면에서 자연대류열전달 해석을 위해서는 대류열전달계수를 결정하여야 한다. 대류열전달계수를 구하기 위한 많은 이론식들이 제시되어 있으나, 본 연구대상인 자성유체질의 경우 대류열전달 표면의 형상이 복잡하므로 각 면에 대하여 해당되는 각각의 대류열전달계수를 적용하는 것은 실용적 관점에서 바람직하지 못하며, 또한 이론식에 의한 값들이 실제와는 제법 차이가 있을 것으로 예상된다. 따라서 엔지니어링 관점에서 챔버외부에 노출되어 있는 모든 면들에 동일하게 적용할 수 있는 소위 유효대류열전달계수  $h_{eff}$ 를 정의하여 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각하였다. 이를 위해 아래와 같은 유효대류열전달계수 결정실험을 통하여 측정된 자성유체질의 온도분포와 ANSYS 해석결과로부터 구한 온도분포와의 오차를 최소로 하는 대류열전달계수 값을 유효대류열전달계수로 정의하였다.

## 3. 실험

### 3.1 유효대류열전달계수 결정실험

이 실험은 자성유체질의 챔버외부에 노출되어있는 면들

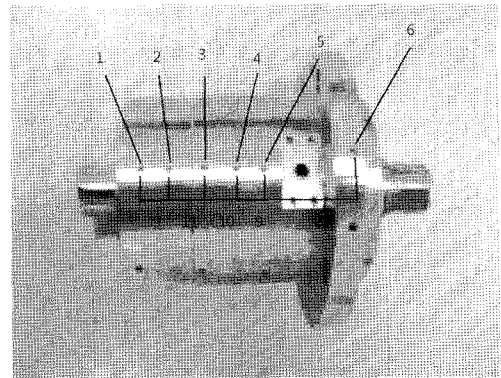


Fig. 5 Photograph of measuring points

Table 2 Measured Temperatures (Inner surface of chamber : 99°C, Ambient temperature = 26°C)

Position	1	2	3	4	5	6
°C	77	78	80	81	82	93

에 공통으로 적용하기 위한 대류열전달계수를 결정하기 위한 실험이다. Fig. 4에 본 실험장치의 전경을 보이고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 알루미늄합금으로 제작된 소형챔버의 외벽에 자성유체질이 장착되어있으며, 챔버 내부에는 전기 가열선이 들어가 있어 챔버 내벽의 온도를 원하는 온도가 되도록 가열하였다. 내벽의 온도는 99°C가 되도록 가열하였으며 이것은 반도체 공정에서 대략적인 진공챔버 내벽의 온도에 해당된다. 챔버 외부 대기온도는 26°C 이었다. 정상상태에 도달하였을 때 Fig. 5에 보는 바와 같은 6개 위치에서 6mm 깊이에서의 자성유체질의 온도를 측정하였다. 그 결과를 Table 2에 보였다. 모든 온도측정은 K-type 열전대를 사용하였다.

### 3.2 유효대류열전달계수 결정

챔버 외부의 대기와 접촉하고 있는 자성유체실의 표면에 동일하게 적용하기 위한 유효대류열전달계수는 앞의 실험에서 측정된 자성유체실의 6개 위치에서의 온도와 2절에서 설명한 ANSYS 해석결과와 온도와의 오차를 이용하여 최소자승오차법으로 구하였다. 즉, 유한요소 해석시 경계조건으로 챔버내부에 접한 면들의 온도는 실험에서 측정된 챔버 내벽의 온도 99°C로 동일하게 하였으며, 챔버 외부 대기에 접한 면들에서는 주변온도를 26°C로 하여 대류열전달계수를 변화시켜가며 해를 구하였다. 6개의 측정위치에 대하여 각 위치에서의 실험측정온도와 ANSYS 해석결과 온도의 차이의 제곱을 합한 값, 즉 자승오차의 합을 각 대류열전달계수 값에 대하여 구하였다. 이렇게 하여 이 온도차이 제곱의 합을 최소로 하는 대류열전달계수를 유효대류열전달계수로 정하였다. 아래의 Fig. 6는 유효대류열전달계수값의 변화에 따른

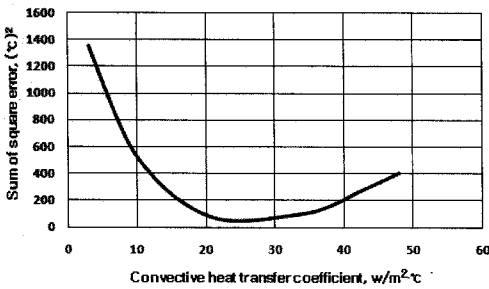


Fig. 6 Variation of square error with convective heat transfer coefficient (Inner wall surface of chamber : 99°C, Ambient temperature = 26°C)

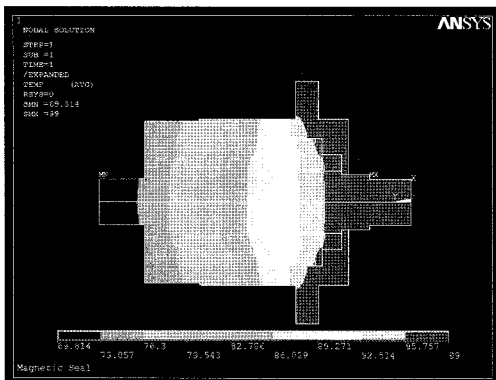


Fig. 7 Temperature distribution of a magnetic fluid seal (Inner wall surface of chamber : 99°C, Ambient temperature = 26°C,  $h_{eff} = 24.1\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$ )

차자승값의 합의 변화를 보인 그래프이며 이와 같은 결과로부터 유효대류열전달계수,  $h_{eff}$ 는  $24.1\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$ 으로 결정되었다.

Fig. 7은 이와 같이 결정된  $h_{eff} = 24.1\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$  일때의 ANSYS 해석결과를 보인 그림이며, Fig. 8은 이때의 각 측정위치에서의 실험측정온도와 유한요소해석 온도를 비교해 보인 그림이다. 이때 각 측정점에서의 실험측정값과 유한요소해석 결과값은 약 ±5.4% 이내의 차이를 보이고 있다.

### 3.3 확인실험

앞에서 구한 유효대류열전달계수의 효용성을 확인하기 위하여 챔버내벽의 온도를 32°C, 외부 대기온도는 17°C로 바꾸어 실험을 수행하였다. ANSYS 해석은 경계조건으로 챔버 내부에 접한 면들의 온도를 32°C, 챔버외부 주변온도를 17°C, 챔버 외부 공기에 접한 면에서의 대류열전달계수는 앞서 구한  $h_{eff} = 24.1\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$ 를 적용하였다. Fig. 9는 실험측정결과와 ANSYS에 의한 결과를 비교한 그림이다.

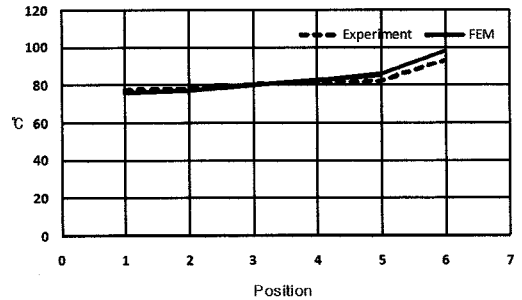


Fig. 8 Comparison between experimental and FEM temperatures (Inner wall surface of chamber : 99°C, Ambient temperature = 26°C,  $h_{eff} = 24.1\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$ )

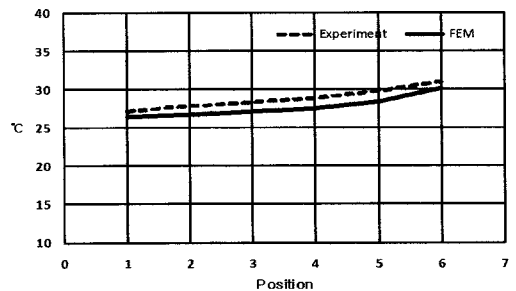


Fig. 9 Comparison between experimental and FEM temperatures (Inner wall surface of chamber : 32°C, Ambient temperature = 17°C,  $h_{eff} = 24.1\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$ )

그림은 실험결과와 수치해석결과가 서로 잘 일치함을 보이고 있으며 수치적으로는 약  $\pm 4.7\%$  이내의 오차였다. 이것은 본 연구에서 제시한 유효대류열전달계수를 이용한 유한요소 해석방법이 자성유체셀의 온도분포를 효과적으로 예측할 수 있음을 확인시킨다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 자성유체셀을 챔버에 장착할 때 정상상태에서의 자성유체셀의 온도분포를 예측하기 위한 방법을 제시하였다.

이것은 자성유체셀의 챔버내부에 접한 면들의 온도를 챔버 벽의 안쪽 표면온도와 동일하게 적용하고, 자성유체셀의 챔버외부 공기에 접한 면에서의 대류열전달계수는 동일한 하나의 유효대류열전달계수를 적용하는 방법이다.

유효대류열전달계수는 예비실험(또는 유효대류열전달계수 결정실험)을 통하여 유한요소법에 의한 온도분포값과 실험에 의한 온도분포값의 오차를 최소로 하도록 최소자승오차법에 의해 구한다.

확인실험을 통하여 이와 같이 제시된 온도 예측 방법이 실험 결과와 잘 일치하는 결과를 주는 바, 실용적으로 활용될 수 있는 유용한 방법이 될 수 있음을 보였다.

#### 후 기

이 논문은 2008학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- (1) Kanno, T. and Kouda, Y., 1997, "Preparation of magnetic fluid having active-gas resistance and ultra-low vapor pressure for magnetic fluid vacuum seals," *Tribology International*, Vol. 30, No. 9, pp.701-705.
- (2) Kim, C. K. and Na, Y. H., 1997, "Experimental Study on the Performance Characteristics of Magnetic Fluid Seals for a High Vacuum Systems," *Journal of KSTLE*, Vol. 12, No. 2, pp. 105-111.
- (3) Jibin, Z., 2003, "Design and Pressure Control of High Pressure Differential Magnetic Fluid Seal," *IEEE, Trans. on Magnetics*, Vol. 39, No. 5, pp. 2651-2653.
- (4) Borbath, I. and Kasco, Z., 2006, "Application of Magnetic Nanofluids in Rotating Seals," *Convergence of micro- and nanoengineering*, Bucharest, Romanian Academy Publ.House, pp.200-210.
- (5) Hiroshi, A., 2004, *Magnetic Fluid Seal*, US Patent: 6672592 B1.