

자성유체 밀봉시스템의 치 형상에 따른 내압 특성해석

김동훈 · 한송엽

서울대학교 전기공학과

서울시 관악구 신림동 산 56-1, 151-742

박관수

한국해양대학교 전기공학과

부산시 영도구 동삼 1동, 606-791

이기식

단국대학교 전기공학과

서울시 용산구 한남동, 140-714

(1993년 11월 22일 받음)

자성유체는 액체상태의 강자성체로서 가해진 자계의 세기에 따라 유체의 형상이 변하며, 이러한 유체의 형상변화는 자계의 세기를 다시 변화시키므로 자성유체를 응용한 기기를 해석하기 위해서는 유체의 형상과 자기장을 동시에 구해야 한다. 본 논문에서는 중력, 압력 자계의 세기 등에 따라 변하는 자성유체의 형상을 기존의 간략화된 가정[1-6] 없이 직접 구하기 위하여 비선형 유한요소법과 유체방정식을 모두 해석할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 본 방법을 이용하여 각각의 외부조건에 상응하는 자성유체의 형상을 구하였고 실험을 통하여 얻은 유체 형상과 비교하였으며 이를 토대로 자성유체의 양과 치(pole piece)의 형상변화에 따른 밀봉시스템의 내압 특성을 해석하였다.

I. 서 론

가동부위가 있는 전기기기 시스템을 밀봉하기 위한 기법으로 제안된 자성유체 밀봉시스템은 자성유체의 전자력을 이용하여 차폐하는 것으로 기계적 밀봉시스템에 비하여 마찰이 없어 가동부위의 기동저항이 없고 수명이 반영구적이며 축의 변형에 대한 허용오차가 크다는 등의 장점이 많다. 그러나 이러한 장점을 갖는 밀봉시스템을 보다 효율적으로 사용하기 위해서는 유체방정식과 자기장 해석이 동시에 수행되어야 한다.

액체상태인 자성유체를 이용한 밀봉시스템은 인가되는 자계의 세기, 원심력, 중력 그리고 유체 막의 양단에 걸리는 압력 차에 의해 그 형상이 변화한다. 이러한 자성유체 형상변화는 해석하려는 기기의 특성에 큰 영향을 미치게 되므로 자성유체를 응용한 기기를 해석하기 위해서는 자성유체의 형상과 기기의 특성을 모두 고려할 수 있는 수치해석기법이 필요하다.

지금까지는 자성유체 밀봉시스템을 해석하기 위한 연구논문으로서 유체의 형상을 고려하지 않고 1차원적 모델링을 사용하거나 자계의 세기만을 계산한 등자계선(equi-H line)을 바탕으로 등압선(isobar)을 이용한 간략화된 2차원적 해석[4]이 부분적으로 행해져 왔다.

본 논문에서는 밀봉시스템에 주어지는 외부조건을 고려하여 유체 내부에서 성립하는 베르누이(Bernoulli) 방정식과 유체의 경계면 즉 표면에서 성립하는 압력조합식을 사용하여 유한요소법을 이용한 반복계산을 통해 자성유체의 형상과 밀봉시스템의 특성을 해석할 수 있는 수치 알고리즘을 제시하였다. 그리고 이 방법을 이용하여 각각의 외부 조건에 상응하는 자성유체의 형상을 구하여 실제 실험을 통해 얻어진 자성유체 형상과 비교하였다. 이를 토대로 자성유체의 양과 치의 형상 변화가 밀봉시스템의 내압 특성에 미치는 영향과 시스템의 특성변화를 구하였다.

II. 해석모델 및 기본이론

해석에 사용한 자성유체 밀봉시스템의 구조는 Fig. 1(a)와 같다. Fig. 1(b)는 자성유체가 있는 부분을 확대한 그림이다.

자성유체의 형상을 구하기 위해서는 유체의 내부 Ω 와 경계면 Γ 상에서의 위치에 따른 압력의 분포를 알아야 한다. 유체 내부에서의 압력의 분포를 구하기 위해서 자성유체는 비압축성 액체라는 가정하에서 유체방정식을 풀다.

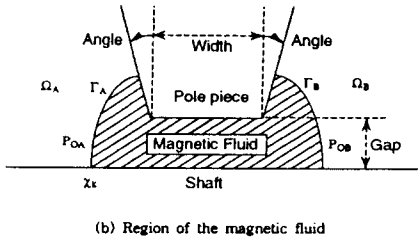
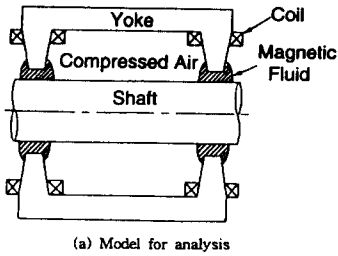


Fig. 1. Schematics of sealing apparatus.

가정으로부터 유체 내부의 압력에 대한 식을 구하면,

$$p_i = \int M dH - \rho g h + c \quad (1)$$

- p_i : 자성유체 내부 압력
- M : 자성유체의 자화
- H : 자계의 세기
- ρ : 자성유체 밀도
- g : 중력 가속도
- h : 축 중심으로부터 높이

이 된다. 식 (1)에서 우변의 첫째 항은 자성유체의 내부에서 자기력에 의하여 생기는 유체 내부압력에 기여를 나타내고 둘째 항은 중력에 의해 내부압력에 기여하는 항이며 c 는 외부조건에 의해 결정되는 상수이다.

한편 Fig. 2에서는 자성유체와 비자성유체의 경계면에

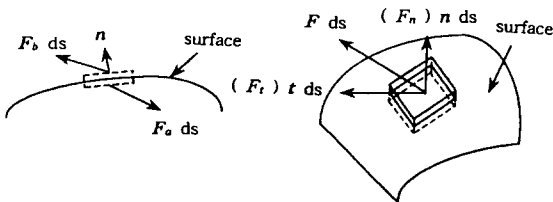


Fig. 2. Forces on the surface of magnetic fluid.

작용하는 압력의 분포를 경계면 상에 작용하는 힘을 이용하여 구한다. 미소면적 ds 에 가해지는 응력 F 를 응력텐서 σ_{ij} 를 사용하여 표시하면 다음과 같다.

$$F_i = \sigma_{ij} n_j. \quad (2)$$

$$(\sigma_{ij} = - \left[p + \int_0^H \frac{\partial}{\partial y} (vM) dH + \frac{\mu_0}{2} H^2 \right] \delta_{ij} + H_i B_j$$

v : 비체적

μ_0 : 공기중 투자율

B : 자속밀도

여기서 $n = (n_x, n_y, n_z)$ 은 경계면상의 법선벡터이다. 응력 F 를 경계면 상의 법선방향의 성분과 접선방향의 성분으로 분해하면

$$F = F_n n + F_t t \quad (3)$$

와 같이 된다. 여기서 n, t 는 각각 경계면 상의 법선방향 벡터와 접선방향 벡터를 나타낸다. 자성유체 경계면 상에서 작용하는 응력 F 는 자성유체와 비자성유체 사이에서 같아야 하므로 즉, $F_a = F_b$ 이므로 응력 F 의 접선방향의 식은 $F_{at} = F_{bt}$ 이고 법선방향의 식은 $F_{an} = F_{bn}$ 이다. 이것으로부터 다음과 같은 자성유체의 경계면 상에서 성립하는 압력조합식을 얻을 수 있다.

$$p_o = p_i + \int M dH + \frac{1}{2 \mu_0} M_n^2. \quad (4)$$

p_o : 자성유체 밖의 압력

M_n : 경계면상의 자화의 법선성분

III. 알고리즘

자성유체 경계면 상에서는 주어진 각각의 외부조건에 따라 유체는 식 (1), (4)를 모두 만족해야 하므로 식 (1)을 식 (4)에 대입하면

$$c = p_o - 2 \int M dH + \rho g h - \frac{1}{2 \mu_0} M_n^2 \quad (5)$$

을 얻을 수 있다. 자성유체는 인가되는 자계의 세기, 중력 그리고 양단에 걸리는 압력 차에 따라 유체의 경계면 상에서 식 (5)의 c 값은 결정되고, 이러한 c 의 값은 경계면 상에서는 항상 같아야 한다. 그러므로 식 (5)로부터 여러 가지 외부조건에 따라 유체의 부피가 주어지면 그에 해당

하는 유체의 형상을 구할 수 있다. 이를 위해서는 다음의 알고리즘에 따라 유한요소법을 이용한 반복계산이 수행되어야 한다.

- step 1 : 유체부피 V_0 와 외부압력 p_{OA}, p_{OB} 를 입력시킨다.
- step 2 : 유한요소법을 사용하여 영역 Ω_A 와 Ω_B 안에서의 자계의 세기 H^i 를 계산한다.
- step 3 : 각각 p_{OA} 와 p_{OB} 를 사용하여 식 (5)에 의해 영역 Ω_A 와 Ω_B 안에서의 c 값을 계산한다.
- step 4 : 영역 Ω_A 안에서 유체의 경계면상의 좌표값을 임의의 x_k 로 취하여 c 를 계산한다.
- step 5 : c 값이 같은 선을 따라 유체의 경계면을 나타내는 Γ_A 와 Γ_B 를 결정한다.
- step 6 : Γ_A 와 Γ_B 에 의해 결정된 유체부피 V_k 를 계산한다.
- step 7 : 만약 $\|V_k - V_0\|$ 이 충분히 적지 않으면 x_k 값을 조정하고 step 4로 되돌아간다.
- step 8 : 만약 $\|H^i - H^{i-1}\|$ 이 충분히 적지 않으면 step 2로 되돌아간다.

주어진 압력에 대하여 위의 계산이 수렴하면 이때의 Γ 선이 유체의 형상이 된다. 압력이 증가함에 따라 Γ 선은 유체방정식과 자계방정식이 동시에 만족되는 평형상태로 이동하게 되며, 압력이 더욱 증가하여 그러한 평형상태가 존재하지 않으면 자성유체 막은 터지고 위의 계산은 수렴하지 않으며 이때의 압력차이가 이 조건에서의 차폐용량이 된다.

IV. 적용결과 및 고찰

1. 자성유체 형상

해석에 사용된 모델은 치의 틈(gap), 폭(width), 각도를 각각 0.4 mm, 0.5 mm, 15°로 하였다. 그리고 회전축의 지름은 100 mm로 하여 해석하였다. 여기서 사용한 자성유체는 제품번호 MGFT081B1 으로서 제품의 특성은 유체의 비중은 1.11 kg / ℓ, 40 °C에서의 점성은 70 cp, 자화강도는 7 kOe 에서 180 G, 최대온도는 140 °C 이다.

Fig. 3은 축이 정지하고 있을 때 치의 왼편에서 걸리는 압력이 오른편에 비해 점점 증가함에 따라서 유체표면이 오른쪽으로 밀리는 현상을 보여준다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 유체 내부에서 발생하는 압력은 주로 자기력에 의한 기여분이고 이때 자성유체의 양 경계면은 각각 외부의

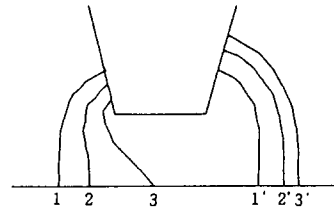


Fig. 3. Movement of surface by increase of pressure difference.

(1-1' : $\Delta p = 0$ kPa, 2-2' : $\Delta p = 8$ kPa, 3-3' : $\Delta p = 16$ kPa)

압력과 이 기여분에 의해서 생기는 내부압력이 같아지는 곳에서 결정된다.

2. 실험결과

자성유체 형상을 구하는 계산결과의 타당성을 조사하기 위하여 Fig. 4와 같은 실험장치를 구성하였다. 실험장

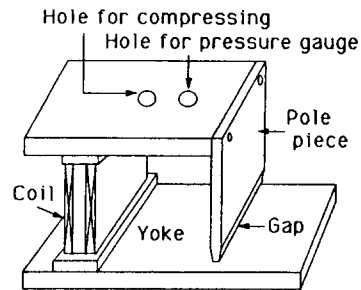


Fig. 4. Experimental device.

치는 치, 요크(yoke), 압력계, 압력조절 장치 및 자장의 세기를 제어할 수 있는 코일로 구성되었다. Fig. 4에서 앞, 뒷면은 관찰과 사진을 찍기 위하여 아크릴 판을 부착하였다. Fig. 5에서는 치의 중심으로부터 틈(gap) 사이의 자장 세기를 측정 값과 계산 값을 비교하였다. 자성유체는 주사기를 이용하여 틈 사이로 주입하였으며, 기압차이를 높일 때 자성유체가 밀리는 현상을 비디오로 촬영하여 사진을 얻었다. Fig. 6에서 (a)는 치 양단의 압력차가 0 kPa 일때 계산에 의해 얻은 유체 형상이고 (b)는 실제 실험에 의해 사진을 찍어 얻은 자성유체의 형상이다. 그리고 Fig. 6의 (c), (d)는 치의 왼편의 압력이 오른편에 비해 7 kPa 정도 클 때 각각 계산결과와 사진을 통해 얻은 영상과의 비교를 보여준다. 내압차가 증가함에 따라 유체의 양 표면이 주어지는 조건하에서 평형상태에 이를

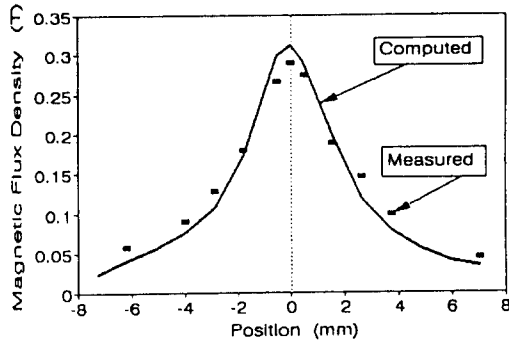


Fig. 5. Magnetic flux density across the gap.

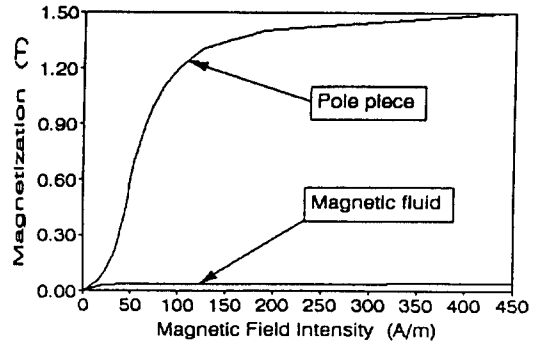


Fig. 7. Nonlinear curves of pole piece and magnetic fluid.

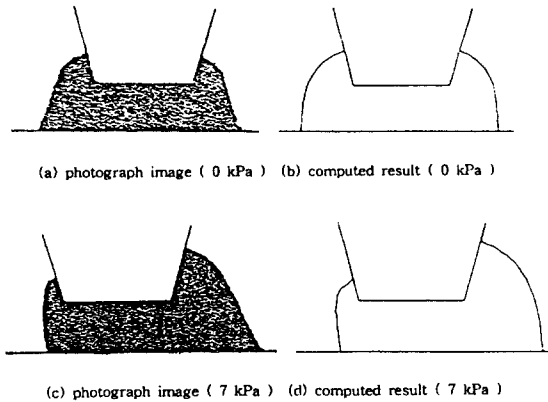


Fig. 6. Surface boundary configuration.

때까지 이동함을 알 수 있다. 실험결과 모의 형상과 실제 유체의 형상이 잘 일치함을 알 수 있었다.

3. 자성유체 양에 따른 내압 특성

Fig. 7은 실험 및 해석에 사용한 치와 자성유체의 포화 곡선을 나타낸다. 이 곡선은 비선형 계산시 Newton-Raphson 법에 사용된다. Fig. 8은 자화전류와 축이 정지하고 있을 때 밀봉시스템에서 회전 축과 치 사이의 틈에 들어가는 자성유체의 양에 따라 시스템이 견딜 수 있는 최대 내압을 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 유체의 양이 증가함에 따라 밀봉시스템이 견딜 수 있는 최대 내압차는 계속해서 증가하는 것이 아니라 포화됨을 알 수 있다.

4. 치형상에 따른 내압 특성

치의 형상변화는 시스템의 내압 특성에 영향을 준다. 이러한 영향을 조사하기 위하여 Fig. 9와 같은 세가지 형

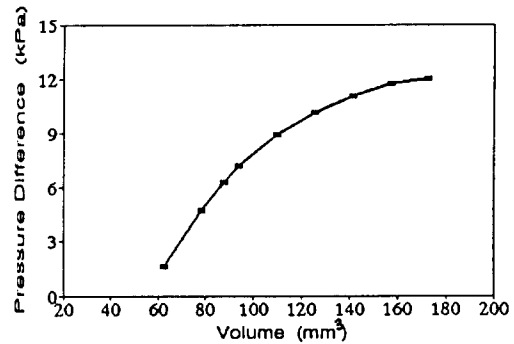


Fig. 8. Seal capacity vs. amount of fluid.

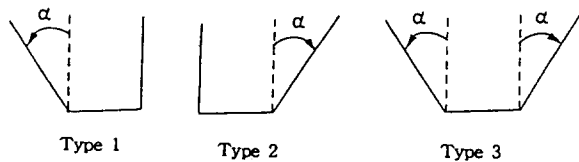


Fig. 9. Three types of pole piece.

태의 치 구조에 대한 시스템의 내압 특성을 살펴보았다.

Fig. 10은 자화전류, 자성유체의 양 및 치의 폭이 일정하게 유지되는 상태에서 밀봉시스템의 치의 형상변화에 따른 특성을 나타낸다. 이 경우는 치의 왼편에서 인가되는 외부압력이 오른편의 외부압력 보다 항상 크다는 가정 하에서 치의 왼쪽과 오른쪽의 각도를 각각 변화시켜면서 밀봉시스템의 최대 내압차의 변화를 살펴 보았다. 그림에서와 같이 type 2와 type 3는 각도가 증가함에 따라 최대 내압차가 급격하게 줄어들고 있음을 볼 수 있다. 그러나

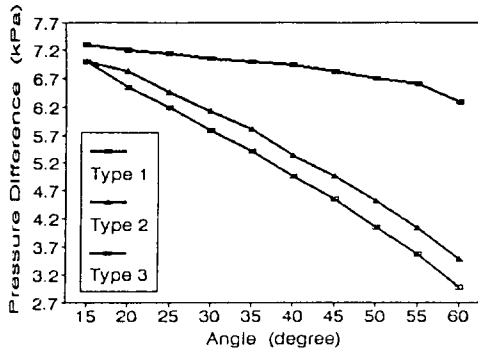


Fig. 10. Seal capacity vs. angle of pole piece.

치의 각도가 왼쪽으로만 증가하는 type 1의 경우는 밀봉시스템의 최대 내압차의 변화가 완만하게 줄어들음을 볼 수 있다.

Fig. 11은 특정한 각도를 갖는 치 형상에서 치의 중심

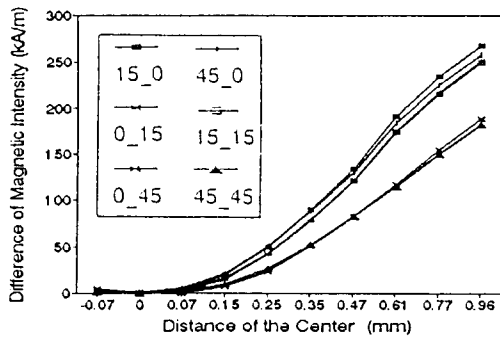


Fig. 11. Difference of magnetic field intensity across the gap.

으로부터 각 위치에 대한 자계의 세기를 상대적으로 보여 주고 있다. Fig. 11에서 type 2와 type 3는 각도가 증가할 때 중심으로부터의 위치가 멀어짐에 따라 자계의 세기의 차가 감소하여 같은 조건하에서 밀봉특성이 감소함을 알 수 있고 type 1은 각도가 증가할 때 중심으로부터의 위치가 멀어짐에 따라 자계의 세기의 차에 거의 변화가 없어 같은 조건하에서 밀봉특성의 변화가 완만함을 알 수 있다. 또한 치의 중심으로부터의 위치가 멀어짐에 따라 자계의 세기의 차는 모든 경우에 대해서 점차 포화가 되므로 자성유체의 양이 증가에 따른 최대 내압차가 포화됨

을 알 수 있다.

그러므로 자성유체를 이용한 밀봉시스템의 특성을 향상시키기 위한 중요한 요소로는 치의 형상 즉 각도, 폭 및 틈 등의 변수를 조정하여 치의 중심으로부터 각각의 위치에서 상대적인 자계 세기의 차를 얼마만큼 크게하느냐에 있다고 할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 기존의 1차원적 근사법이나 자계의 세기만을 고려한 방법들과는 달리 압력, 중력 그리고 자계의 세기 등의 여러가지 조건들이 밀봉시스템에 미치는 영향을 고려하여 자기장과 유체 방정식을 비선형 유한요소법을 통한 반복 계산으로 직접 자성유체의 2차원적인 형상을 구함으로써 자성유체를 이용한 밀봉시스템의 내압 특성을 해석하였다. 또한 이를 바탕으로 밀봉시스템의 치 형상 변화에 대한 내압 특성을 해석하였다. 자성유체를 이용한 밀봉시스템의 특성해석 결과 시스템의 내압 특성을 향상시키기 위해서는 치의 형상 즉 각도, 폭 및 틈 등의 변수를 조정하여 치의 중심으로부터 상대적인 자계 세기의 차가 중요한 요소로 작용하고 있음을 알 수 있었다.

여기서 제시한 해석방법은 자성유체를 이용한 여러가지 장치의 디자인과 장치해석에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

참고 문헌

- [1] V. E. Fertman, V. A. Novikov and A. K. Sinitsyn, J. Magnetism Magn. Mater. **39**, 133(1983).
- [2] M. S. Sarma, J. Appl. Phys., **55**(6), 2595 (1984).
- [3] Taketomi susami and Chikasumi sousin, Magnetic Fluid, Nikkan Kogyo Simbunsha(1987).
- [4] Zou Jibin and Lu Yongping, IEEE Trans. on Mag., **28**(6), 3367(1992).
- [5] V. K. Rakhuba, V. B. Samoilov and V. A. Chernobai, J. Magnetism Magn. Mater. **39**, 152(1983).
- [6] R. A. Williams and H. Malsky, IEEE Trans. on Mag., **16**(2), 379(1980).

Characteristic Analysis of the Magnetic Fluid Seal considering the Shape of the Pole Piece

Dong-hun Kim, Song-Yop Hahn

*Department of Electric Engineering,
Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

Gwan-Soo Park

*Department of Electric Engineering,
Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*

Ki-Sik Lee

*Department of Electric Engineering,
Dankook University, Seoul 140-714, Korea*

(Received 22 November 1993)

Magnetic fluid is ferromagnetic material in liquid state, so the surface configuration of magnetic fluid affects the magnetic field, and vice versa. To analyze the devices with magnetic fluid, the magnetic field equations and hydrodynamic equation should be solved simultaneously. This paper presents the numerical algorithm to obtain the surface configuration of fluid under the influence of gravity, pressure and magnetic field without conventional simplified assumption[1-6]. The algorithm consists of nonlinear finite element method and ferro-hydrodynamics, such as Poisson equations and Bernoulli equations, respectively. The simulated configurations of fluid are compared with experimental results, and the influence of the amount of fluid and pole piece shape on the seal capacities are analyzed.