

자성유체시일의 자속분포에 관한 수치적 연구

김청균 · 차백순 · 민진기* · 정성천*

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터
*삼성전기주식회사 종합연구소

Numerical Study on the Magnetic Flux Distribution of a Magnetic Fluid Seal

Chung Kyun Kim, Baeg-Soon Cha, Jin-Ki Min* and Sung-Cheon Jung*

*Tribology Research Center, Hongik University
R & D Center, Samsung Electro-Mechanics Co.

Abstracts—This paper presents the magnetic flux distributions of a ferrofluid seal at the sealing gap between the pole pieces and the rotating shaft. The optimized shape of pole pieces has been determined by using the computer simulations. The computed results indicate that the sloped pole piece of 27° shows good flux distributions compared with that of the conventional flat pole pieces and may reduce frictional heats due to a reduced surface contact areas of magnetic fluids.

Key words—magnetic fluid, magnetic fluid seal, sealing gap, pole piece, relative permeability.

1. 서 론

시일(seal)은 내부의 밀봉된 유체가 외부로 누출하는 것을 차단하거나 외부의 유체가 밀폐된 용기내로 침입하는 것을 차단하기 위하여 개발된 핵심 기계요소로 회전축의 상대속도와 밀봉압력의 증가는 다양한 새로운 시일의 필요성을 제기하였다.

산업용 기계장치에서는 기계평면시일(mechanical face seal)이나 오일시일(oil seal)과 같은 기존의 접촉식 밀봉방식을 사용해도 우수한 밀봉성능을 갖는 것이 대부분이나, 정도 차이는 있지만 이러한 접촉식의 밀봉은 항상 일정량의 누설을 허용해야 하고, 시일이 사용됨에 따라서 마찰·마멸이나 접촉면의 국부적인 변형에 따른 누설량은 점진적으로 증가되는 현상을 보여주기 때문에 완벽한 밀봉을 요구하는 곳에 사용하기에는 부적합하다. 특히 반도체 장비나 컴퓨터와 같은 첨단기계에서 고속용 초정밀 부품 개발은 새로운 밀봉장치의 필요성을 제기하였고, 그중에서도 완벽한 밀봉성능을 장기간에 걸쳐서 유지해야 하는 요

구가 많아졌다[1]. 이러한 목적을 위하여 개발된 자성유체(magnetic fluid)는 자계의 영향을 강하게 받는 특수유체로 회전축(rotating shaft)과 극편(pole piece) 사이의 영구자석에 의하여 정위치·고정되어 항상 유체와 마찰을 하면서 밀봉작용을 한다. 자성유체를 사용하여 밀봉작용을 완벽하게 수행할 수 있도록 개발된 밀봉장치가 자성유체시일(magnetic fluid seal)이다.

회전축의 밀봉간극을 통하여 이동하는 먼지를 차단할 수 있도록 평판형의 극편 사이에 공급된 자성유체에 대한 자기장 분포도를 유한요소법으로 해석하였다[2]. 여기서 중요한 밀봉압력은 영구자석으로부터 나와 자성유체를 지나는 자속의 세기에 의하여 결정되는데, Lutset[3]는 이들에 대한 연구를 이론적으로 제시하였다. 또한 영구자석은 열에 취약하기 때문에 자성유체의 점성마찰에 의하여 발생하는 마찰열의 특성을 온도분포와 마찰 토오르크의 개념으로 해석한 연구에 따르면 극편-회전축-영구자석으로 형성된 공간의 크기는 영구자석의 냉각과 관련이 많다는 사실이 밝혀졌다[4].

본 연구에서는 회전축에 침입하는 각종 이물질을 완벽하게 차단하기 위하여 사용된 자성유체시일에 대한 자속밀도의 분포도를 해석하고, 이 결과를 기반으로 설계 파라메타인 극편의 형상적 특성에 대하여 수치적으로 해석·설계하고자 한다.

2. 자성유체시일 구조

자성유체를 이용하여 회전축 밀봉에 사용된 자성유체시일 유니트는 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 영구자석을 두 개의 극편 사이에 두고 회전축에는 일정한 밀봉간극으로 유지하면서 하우징에 고정되어 있다.

자성유체는 회전축과 극편 내경측인 선단부 사이의 간극에 소량 공급되어 회전축 둘레가 마치 O-링 형상의 환형띠를 형성한 것처럼 보인다. 즉, 영구자석으로부터 방출된 자속은 강자성체인 극편을 거쳐서 자성유체에 자장을 걸고, 다시 자성체인 회전축의 외경부에 근접된 소재내부를 지나 영구자석으로 되돌아가는

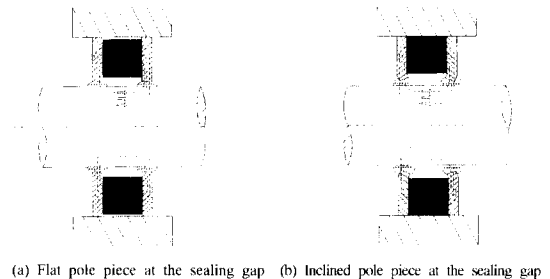
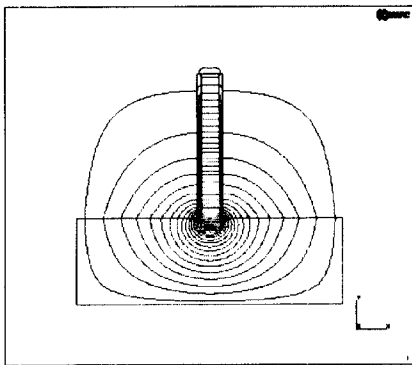


Fig. 1. Typical configuration of magnetic fluid sealing mechanism.



환상의 띠로 형성된 자성유체 박막에 의하여 회전축을 밀봉하게 된다. 이 때에 회전축의 밀봉특성은 영구자석의 자속밀도, 극편의 형상, 밀봉간극, 자성유체의 특성 등에 따라서 크게 달라지는데, 자성유체시일에 관련된 파라메타는 특허와 제조공법에 크게 의존하는 첨단기술이기 때문에 자성유체 기술이 극소수 그룹에 의하여 독점적으로 사용되고 있다.

3. 해석결과

3-1. 자속의 벡터장

자성유체시일 주위의 자속밀도 분포에 대한 해석은 자성유체시일의 밀봉압력 크기를 결정하는 가장 중요한 파라메타이기 때문에 본 연구에서는 비선형 유한요소해석 프로그램인 MARC[5]를 사용하여 자속밀도 분포도에 대하여 고찰하였다. 또한 시일의 자속밀도 분포도 해석을 위하여 사용된 영구자석, 극편, 자성유체, 회전축에 대한 자기적 특성치는 대단히 중요하다. 본 연구에서 사용한 영구자석의 자속밀도는 $0.28[T]$ 이고, 영구자석, 극편, 자성유체, 회전축의 상대 투자율(relative permeability)은 0.872, 1600, 2, 1000으로 각각 주어진다.

Figs. 2와 3은 Fig. 1에서 제시한 대표적인 자성유체시일 모델의 자속밀도 특성에 대하여 수행한 수치적 해석 결과의 일부를 보여주고 있다. 이들의 해석결과에 따르면 극편 주변에서 유사한 자기장 분포도를 보여주고는 있지만, 실제로는 자성유체가 극편의 하단부에 접촉하는 면적과 극편의 경사각에 따라서 많이

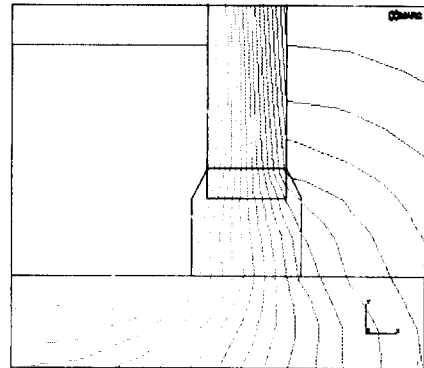


Fig. 2. Magnetic flux distributions of vector potentials for a model Fig. 1(a).

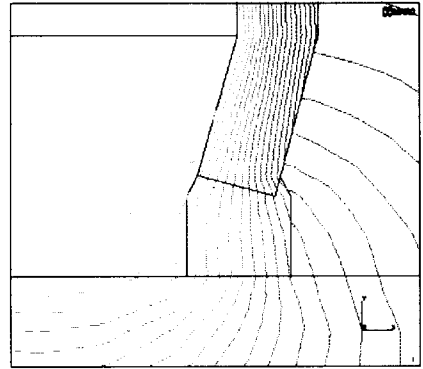
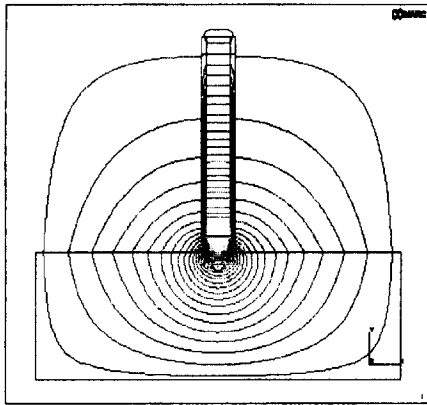


Fig. 3. Magnetic flux distributions of vector potentials for a model Fig. 1(b).

달라진다는 사실이 고찰되었다.

3-2. 극편의 형상 설계

자성유체시일의 극편 형상은 자성유체 주위에 분포하는 자속에 직접적인 영향을 주는 파라메타로 본 연구에서는 Fig. 4에서 제시한 대표적인 극편 모델 7가지에 대하여 자속밀도 분포도를 해석하였다.

Fig. 4에서 극편의 형상 A는 극편의 외경측인 상단부가 영구자석의 일부를 감쌀 수 있도록 직각으로 깎은 모델로 영구자석과 극편의 조립이 용이하다는 장점을 갖고는 있으나, 자성유체와 회전축 사이를 정상적으로 통과해야 하는 자속의 일부가 극편의 상단부로 유도되어 손실되는 문제점이 있다.

극편 형상 모델 B는 모델 A의 문제점을 보완하기 위하여 극편의 상단부를 직각으로 깎은 형상을 직선 형태로 제작한 가장 오래된 극편 모델로 상단부로 손실되는 자속을 어느 정도는 감소시킬 수 있으나 일정량의 자속의 손실은 피할 수 없고, 영구자석의 조립상 문제점을 갖고 있다. 형상 모델 C는 모델 형상 B의 극편 상단부를 영구자석의 끝단면과 동일한 위치에서 조립될 수 있도록 영구자석의 외경측을 키운 형상으로 상단부로의 자속 손실이 매우 적게 발생하기 때문에 자속의 세기 측면에서 유리한 점을 많이 갖고는 있으나 영구자석이 하우징과 직접 접촉으로 인한 열전도와 절연성의 문제점을 갖고 있다. 극편 모델 설계에서 A는 극편의 상단부를 깎음으로 인한 문제점과 모델 B는 평편한 극편을 사용하였을 때의 조립상 문제점을 해결하기 위하여 모델 D와 E는 회전축과 접촉하는 내경쪽 극편을 90°로 절곡하고, 극편을 양쪽

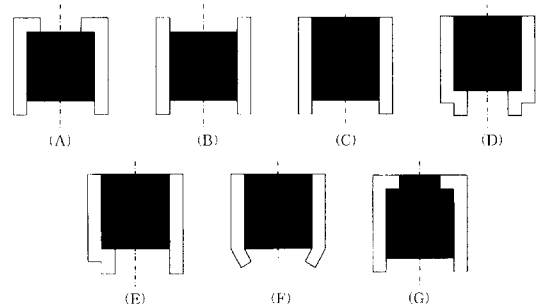


Fig. 4. Typical types of pole piece model.

또는 한쪽에 설치함으로써 자력선 세기가 극편 상단부로 손실되는 것은 방지할 수 있다. 그러나 극편의 내경쪽 하단부를 90°로 깎은 지점에서 공기중으로 자속의 일부가 유출되기 때문에 모델 C에 비하여 약간 약화된 결과를 나타내지만, 극편의 하단부가 직각이기 때문에 자석의 조립 측면에서 모델 A와 같이 매우 유리하다. 모델 D는 자속밀도 분포도가 대칭적으로 나타나지만, 모델 E는 양쪽의 극편을 통해 흐르는 자속이 비대칭적으로 발생하는 특징을 갖고 있다.

극편의 모델 형상 F는 극편의 내경부 하단부가 일정한 경사각을 갖도록 설계된 모델로 경사각의 크기에 따라 자속의 변화가 다르게 발생하므로 최적의 경사각을 결정하는 것이 대단히 중요한 과제이다. 실제로 극편을 일정한 각도로 정밀하게 절곡(bending)한다는 것은 어려운 프레스 작업이다. 극편의 형상 모델 G는 형상 모델 A에서 상단부로 유출되는 자속손실을 완화시키기 위하여 자석을 극편의 상단 끝까지 채운 형태로 시일의 조립은 용이하지만 영구자석과 하우징

이 조립에 의하여 서로 맞닿기 때문에 문제가 발생되며, 자석의 제작 비용이 많이 드는 단점이 있다.

Fig. 5는 자성유체시일 모델 7가지에 대한 자속을 나타낸 결과로 자성유체가 회전축과 접촉하는 실제면을 통과하는 자속의 크기를 보여주고 있다. 극편의 상단부로 손실되는 자속은 극편의 상단부 형태에 따라서 달라지는데, 여기서는 A의 상단부 형상이 가장 나쁜 모델로 해석되었고, C의 형상 모델이 가장 양호한 자속 분포도를 보여주며, 자속의 크기는 A, B, C 모델에 대하여 0.949×10^{-8} , 1.033×10^{-8} , 1.077×10^{-8} Wb로 각각 나타났다. 비대칭 형상을 보여준 모델 E는 왼쪽 극편과 이어진 자성유체를 통과하는 자속의 세기는 1.040×10^{-8} Wb로 형상 모델 D와 거의 유사한 값을 가지며, 오른쪽의 자성유체를 통과하는 자속의 세기는 1.084×10^{-8} Wb로 형상 C 보다는 약간 증가한 값을 보여주고 있다. 이와 같이 극편의 좌우에서 서로 다른 값의 자속의 세기를 갖는 이유는 왼쪽 극편의 경사로 인하여 자속이 자성유체를 통과하지 않고 극편을 빠져나가 오른쪽 자성유체의 아래면을 통과하기 때문이다.

경사진 형상 모델 F는 극편의 내경쪽 하단부에 15° 의 경사각을 갖으며, 이 모델에 대한 해석결과에 의하면 자속의 세기는 0.8361×10^{-8} Wb로 다른 형상 모델에 비해 매우 낮은 값을 보여주고 있다. 그러나 극편의 내경부 경사각을 변화시키면 자속의 세기는 크게 달라지는 경향을 보여주고 있다. 일례로 극편의 경사각이 27° 인 형상 모델 F인 경우에 대한 수치적 해석 결과에 의하면 자속의 세기는 0.995×10^{-8} Wb로 0.949×10^{-8} Wb의 값을 갖는 형상 A보다 향상된 구조를 보여주고 있다.

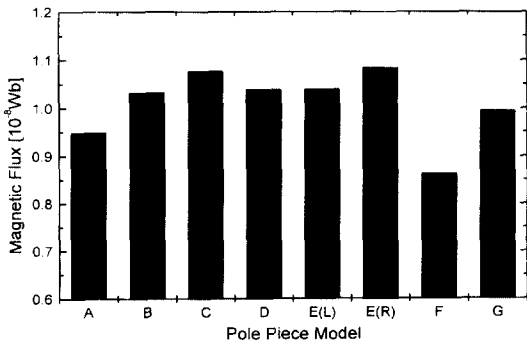


Fig. 5. Magnetic flux for a various pole piece model.

3-3. 설계변수 해석

자성유체 주위의 자속에 영향을 미칠 수 있는 설계 변수는 앞에서 언급한 극편의 형상 이외에도 극편과 회전축 사이의 밀봉간극(sealing gap), 영구자석의 두께와 극편의 두께에 대한 비, 자성유체의 특성, 그리고 영구자석이 갖는 자속밀도 등이 있다.

본 연구에서는 기존의 여러 가지 극편 모델에 대비되는 새로운 형상설계를 위해서 Fig. 4(F)와 같이 극편 하단부의 경사각이 자속밀도의 분포에 미치는 영향을 해석함으로써 최적의 경사각을 구하고, 그 결과를 가장 양호한 자속의 세기를 나타내고 있는 대표적인 극편 형상인 C와 비교하였다.

Fig. 6은 극편 모델 Fig. 4(F)에서 경사각 α 가 $0 \sim 50^\circ$ 까지 변화할 때 자성유체의 아래면을 통과하는 자속의 세기와 이 때에 자속이 통과하는 자성유체와 회전축이 서로 접촉하는 면적을 나타낸 해석결과이다. 경사각이 0° 인 경우는 평편한 극편인 Fig. 1(A) 혹은 Fig. 4(C)에 해당하는 경우이고, 이 때에는 자성유체가 극편의 최하단부로부터 0.4 mm 높이까지 채워진 것으로 가정하였다(Fig. 2 참조). 극편에 경사각이 있는 Fig. 1(B)의 경우는 Fig. 3에서 보여주는 것처럼 자성유체가 극편과 접촉하는 지점에서 표면장력으로 회전축과 만나는 지점의 표면 접촉면적이 넓어지는 것을 고려하였다.

Fig. 6에서 경사각이 0° 일 때 자속의 세기와 표면 접촉면적이 각각 1.077×10^{-8} Wb와 2.827 mm^2 의 값을 가진다. 이 값들은 경사각이 15° 를 갖는 모델 F인 경우에 각각 0.741×10^{-8} Wb와 1.838 mm^2 로 감소하였다가 표면 접촉면적은 50° 까지 3.201 mm^2 의 값으로 점

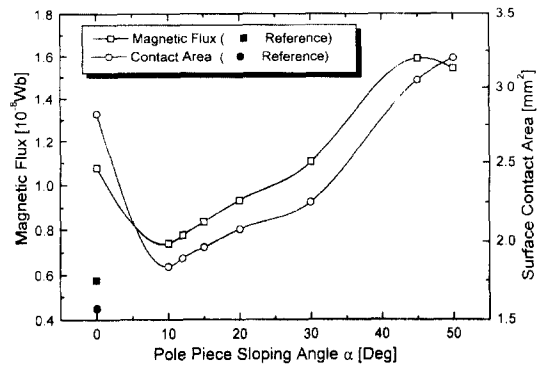


Fig. 6. Magnetic flux and surface contact area as a function of sloping angles of the pole piece.

차적으로 증가하였고, 자속의 세기는 45° 까지 $1.543 \times 10^{-8} \text{Wb}$ 로 증가하였다가 50° 에서는 $1.398 \times 10^{-8} \text{Wb}$ 로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 45° 이상의 경사각을 갖는 극편에서 자속의 세기가 감소하는 것은 자성 유체의 실제 접촉면적이 계속 증가함에도 불구하고 과도한 경사각으로 인하여 자속의 벡터장이 자성유체와 회전축 사이를 통과하지 않고, 공기중으로 빠져나가 다른쪽 극편으로 유입되는 회로를 형성하기 때문이다.

Figs. 6~10에서 기준점(reference)으로 제시된 모델은 경사각이 없는 모델 Fig. 4(C)의 경우에 대해 자성 유체를 극편의 아래 끝단면까지만 유입하였을 때 해석한 결과들을 나타내고 있다. Fig. 6에서 보여준 기준점의 자속의 세기는 $0.576 \times 10^{-8} \text{Wb}$ 이고, 표면 접촉면적은 1.571 mm^2 이다. 이들은 자성유체가 극편의 최하단부로부터 0.4 mm 높이까지 채워졌을 때 각각 $1.077 \times 10^{-8} \text{Wb}$ 와 2.827 mm^2 의 값을 갖으며, 자속의 세기는 87% 증가하나 마찰열과 밀접한 관계를 갖는 표면 접촉면적 역시 80% 정도 증가하는 상태를 보여주고 있다. 극편에 경사각을 주었을 경우는 27° 부근에서 경사각이 0° 인 극편에서 발생하는 자속의 세기와 같은 값을 갖으며, 이 때의 표면 접촉면적은 2.2 mm^2 로 경사각이 0° 인 경우에 비해 22.2% 정도 감소한 값을 보여주고 있다. 그러므로 극편의 경사각을 27° 로 설계할 경우 경사각이 0° 인 경우와 거의 같은 자속의 세기를 발생하고, 마찰열 측면에서 접촉단면이 줄어들기 때문에 더욱 유리해진다.

Fig. 7은 극편의 경사각이 0° 에서 50° 까지 변화할 때 극편과 회전축 사이에 공급되는 자성유체 유량과 이 때에 발생하는 자속에 대한 자성유체 유량을 나타낸 비자성유체유량(specific magnetic fluid volume)을 보여준 결과이다. 경사각이 0° 인 평편한 모델 Fig. 4(B)에서 극편의 아래면으로부터 0.4 mm 까지 채운 경우 필요한 자성유체는 0.233 mm^3 이고, 이 값은 경사각이 10° 로 증가하면 0.2 mm^3 로 감소하였다가 50° 일 경우 0.463 mm^3 까지 지속적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 경사각이 0° 인 평편한 모델 Fig. 4(B)에서 극편의 아래면까지 자성유체를 채울 경우(기준점)에 필요한 자성유체는 0.156 mm^3 으로 가장 작은 값을 나타내고 있다. 비자성유체유량은 경사각이 0° 인 경우 $0.218 \text{ mm}^3/\text{Wb}$ 이고, 경사각이 10° 에서는 $0.27 \text{ mm}^3/\text{Wb}$ 로 증가하였다가 40° 까지 완만하게 감소하며,

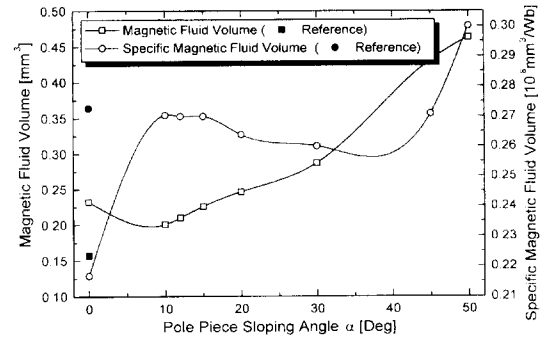


Fig. 7. Magnetic fluid volume and specific magnetic fluid volume as a function of sloping angles of the pole piece.

그 이후 다시 급격히 상승하여 경사각이 50° 에서 $0.3 \text{ mm}^3/\text{Wb}$ 의 값을 갖는다. 극편의 경사각이 0° 이고, 자성유체가 극편의 아래면까지 채워졌을 때 비자성유체 유량은 $0.273 \text{ mm}^3/\text{Wb}$ 로 자성유체가 0.4 mm 까지 채워진 경우에 비해 25.8%의 높은 값을 나타내며, 마찰열 발생 측면에서 유리한 결과를 나타낸 경사각이 27° 인 경우에는 20.7%의 높은 값을 나타내어 자성유체 유량비의 측면에서는 경사각이 0° 이고, 자성유체 유량이 극편의 밑면에서 0.4 mm 까지 채운 경우가 가장 양호한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 8은 극편과 회전축 사이의 밀봉간극 δ 의 변화가 자성유체의 하면을 통과하는 자속의 세기에 미치는 영향을 나타내고 있다. 유한요소해석을 위한 기본 모델로 사용한 밀봉간극 $\delta=0.1 \text{ mm}$ 일 때 발생하는 자속의 세기는 경사각이 0° 와 15° 에서 $1.077 \times 10^{-8} \text{Wb}$ 와 $0.846 \times 10^{-8} \text{Wb}$ 의 값을 갖으며, δ 를 0.2 mm 로 증가하면 자속의 세기는 각각 48.6%와 46.5% 감소하고,

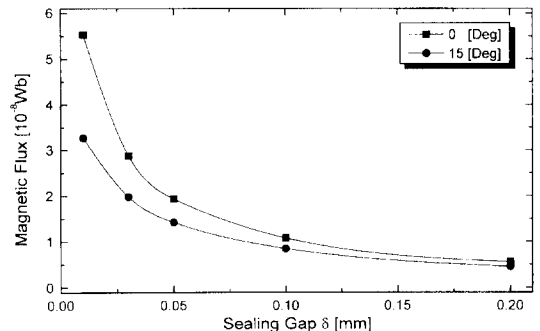


Fig. 8. Magnetic flux as a function of the sealing gap.

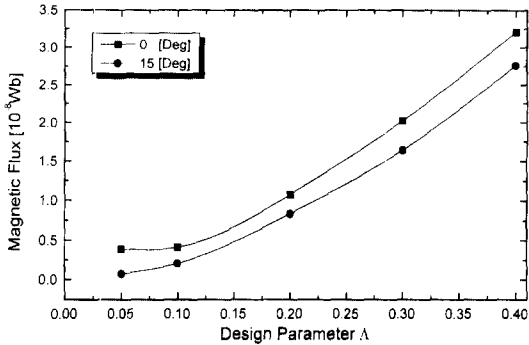


Fig. 9. Magnetic flux as a function of the design parameter A.

밀봉간극 δ 를 계속 증가시키면 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보이고 있다. 여기서 δ 값이 0.1 mm에서 0.01 mm로 감소하면 자속의 세기는 각각 414%와 287%로 급격히 증가하는 것을 보여주고 있다. 극편 하단부의 경사각이 15°인 경우 δ 가 작아짐에 따라 경사각이 0°인 경우와 자속의 세기에 대한 차이가 점차 커져서 δ 가 0.1 mm인 경우 차이가 27.3%이던 것이 δ 가 0.01 mm로 감소할 때는 69.1%로 커진 것을 보여주고 있다.

영구자석의 두께 대비 극편의 두께비도 자속의 세기에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데, 이 비를 A로 표시하였다. Fig. 9는 A의 변화에 따른 자속 세기의 변화량을 보여주고 있다. 기본 모델에서는 A의 값이 0.2이고, 경사각이 0°와 15°인 경우에 발생하는 자속세기의 차이는 위에서 설명한 27.3%의 값을 갖는다. A의 값이 증가함에 따라, 즉 영구자석의 두께에 비해 극편의 두께가 증가할수록 자속의 세기도 증가하는 것을 보여주고 있다. A의 값이 0.2에서 0.4로 2배 증가한 경우 자속의 세기는 경사각이 0°와 15°인 경우에 대해서 각각 198%와 230% 증가한 것을 보여주고 있으며, A가 0.4일 때 두 경사각에서 발생하는 자속세기의 차이는 16.5%로 A가 0.2일 때 보다 비율의 차이가 줄어들고 있다.

Fig. 10은 영구자석의 자속밀도 세기가 자성유체에서 발생하는 자속의 세기에 미치는 영향을 보여주고 있다. 자속밀도가 증가함에 따라 자속의 세기는 거의 선형적으로 변화하고 있으며, 경사각이 15°인 경우는 0°인 경우에 비해 작은 기울기를 가지고 있다. 자속밀도의 세기가 0.28T에서 2.28T로 8배 증가한 경우 경사각이 0°와 15°인 경우에 대한 자속의 세기는 모두

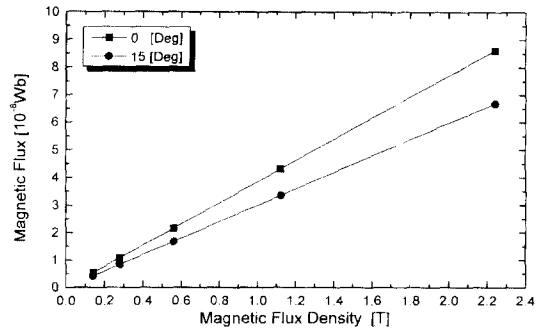


Fig. 10. Magnetic flux as a function of magnetic flux density.

7배씩 증가한 것을 보여주고 있으며, 두 경사각의 차이에서 발생하는 자속세기의 차이는 자속밀도가 0.28T와 2.24T일 때 모두 28.8%이다.

4. 결 론

본 연구에서는 극편의 형상 변화에 따른 밀봉간극에서의 자속밀도 분포도를 해석하여 새 모델에 대한 새로운 형상의 극편을 설계하였다. 그 결과 극편의 내경쪽 하단부를 영구자석 쪽으로 일정한 경사각을 주었을 때 발생하는 자속의 세기는 큰 변화가 나타났으며, 경사각을 27°로 설계할 경우 자속의 세기는 경사각을 0°로 한 경우와 거의 비슷한 자속의 세기를 보여주고 있다. 그러나 27°로 경사진 극편 모델에서는 자성유체가 회전축과 접촉하는 면적이 22.2% 감소하였기 때문에 자성유체에 의한 열발생 완화 측면에서 우수한 결과를 보여주고 있다.

극편과 회전축 사이의 간극을 작게하면 할수록 자속의 세기는 급격히 증가하는 매우 양호한 결과를 보이고는 있으나, 극편의 정밀가공에 따른 높은 정밀도와 조립공차가 엄격해진다는 어려움이 있다. 일정한 크기의 영구자석 두께에 대해 극편의 두께가 증가할수록 자속의 세기도 증가함을 보이고 있으며, 영구자석의 자속밀도를 증가시키면 자성유체에서 유인되는 자속의 세기는 선형적으로 증가되는 영향을 미치고 있다.

참 고 문 헌

1. Raj, K. and Moskowitz, R., "Commercial Applications of Ferrofluids," J. of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 85, pp.233-245, 1990.

2. Williams, R. A. and Malsky, H., "Some Experiences Using a Ferrofluid Seal Against a Liquid," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-16, No. 2, pp.379-381, 1980.
3. Lutset, M. O. and Starovoitov, V. A., "Experimental Studies of High-Speed Cryogenic Magnetic Fluid Seals," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-16, No. 2, pp. 343-346, 1980.
4. Kim, C. K. and Kim, H. K., "A Study on the Friction Torque and Temperature Distribution of Magnetic Fluid Seals," J. of the KSME, Vol. 21, No. 1, pp.3425-3434, 1996.
5. MARC User's Manual, Version K6.2, MARC Analysis Research Co., 1996.