

영구자석을 이용한 지오메트리 피그용 캘리퍼 시스템의 검출감도 향상에 관한 연구

박상호*, 박관수*, 조성호**, 유휘룡**, 노응우**
 *한국해양대학교, **한국가스공사

Study on the Sensitive Detection in Geometry PIG Caliper System using Permanent Magnet

S.H. Park*, G.S. Park*, S.H. Cho**, H.R. Yoo** and Y.W. Rho**

*Dept. Electrical Engineering, Korea Maritime Univ., **KOGAS R&D Center

Abstract - 배관의 덴트 및 주름의 형태·크기와 위치, buckle의 여부와 위치, 배관의 난형도 및 곡률을 파악하기 위해서 사용되는 Geometry PIG의 캘리퍼 시스템에 Mechanical Finger를 back-yoke의 유무, 영구자석의 크기, Pin Hole의 위치와 영구자석의 위치 등을 3차원 비선형 유한요소법으로 해석한 후 이를 바탕으로 최적설계를 하여 이를 실제 제작하여 측정치와 비교하였다.

Sensor에 가해지는 자기장의 크기를 키워야 하며 이를 위해서는 자석의 외경, 내경, Pin Hole 위치등의 최적 설계가 필수적이다.

1. 서 론

Geometry PIG는 배관 자체의 위치 변동, 배관 내부의 덴트(Dent) 및 주름(Wrinkle)의 형태·크기와 위치, buckle의 여부와 위치, 배관의 난형도(Ovality) 및 배관의 곡률(Curvature)을 결정하기 위하여 사용된다⁽¹⁾. 그리고 이러한 기능을 수행하기 위해서 배관 내에서 PIG의 이동경로를 결정하여 GIS(Geometric Information System)상의 맵핑(Mapping)을 위한 INS(Inertial Navigation System)과 덴트의 형태와 크기 및 난형도를 결정하기 위한 캘리퍼(Caliper) 시스템, 주행거리계 그리고 데이터 처리 시스템으로 구성된다.

현재 Geometry PIG에 탑재되어 운용되고 있는 캘리퍼 시스템은 초음파를 이용하는 소나링(Sonar Ring) 시스템과 영구자석이 결합된 Mechanical Finger 시스템으로 구분된다. 소나링 시스템은 배관내의 매체가 액체인 경우에만 적용이 용이하다는 단점 때문에 Mechanical Finger가 주로 사용되고 있다.

Mechanical Finger의 센싱모듈은 이방성 영구자석, Hall Sensor, 그리고 back-yoke로 구성되어있다. Mechanical Finger의 정보를 검출하기 위해서는 측정과정의 noise보다 Hall Sensor에 가해지는 자기장의 크기가 커야한다. 이를 위해서는 자석의 외경, 내경, 두께 및 Pin Hole의 위치등 최적설계가 요구된다.

따라서 본 논문에서는 이방성 영구자석을 사용하는 Mechanical Finger를 back-yoke의 유무, 영구자석의 크기, Pin Hole의 위치와 영구자석의 위치등을 유한요소법을 이용하여 비선형 3차원 해석을 하였으며, 이 결과를 바탕으로 최적설계를 하였다. 실제 제작된 Mechanical Finger의 측정값과 해석결과를 비교하였다.

2. 본 론

2.1 유한요소법에 의한 자기장 해석 및 최적 설계

그림 1은 Mechanical Finger의 회전각을 측정하기 위한 센싱모듈의 구조이다. 즉, 센싱모듈은 이방성 영구자석, Hall Sensor 그리고 Finger Arm과 연결되어 영구자석을 회전시키는 back-yoke로 이루어져 있다. Finger Arm의 변위에 대한 정보를 정밀하게 측정하기 위해서는 측정과정에서 발생하는 Noise에 비하여 Hall

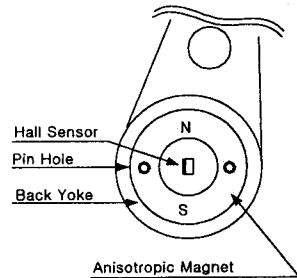


그림 1 센싱 모듈의 구조

2.1.1 지배방정식⁽²⁾

이방성 영구자석에 의하여 발생하는 자기장을 해석하기 위하여 유한요소법(Finite Element Method)을 도입한다. 변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자계에서 성립하는 Maxwell방정식과 그 보조방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \times H = J \tag{1}$$

$$B = \mu_o(H + M) \tag{2}$$

$$B = \nabla \times A \tag{3}$$

여기서 μ_o 는 진공에서의 투자율(permeability), A는 자기 벡터 포텐셜이다. 히스테리시스 현상이 없는 문제에서 자화량은 자화율 χ 로서

$$M = \chi H \tag{4}$$

와 같이 표현되지만 해석 영역내에 히스테리시스 특성을 갖는 매질이 포함되어 있는 경우에는 자화량은 자계의 세기나 자속밀도에 관한 단순한 식으로 표현되지 않으므로 미지수로 남겨두어야 한다. 일반적으로 자화량 M'은 외부의 자계가 제거되면 사라지는 가역항(reversible component : χH)과 외부의 자계가 제거되어도 사라지지 않고 자발자화 특성을 갖는 비 가역항(irreversible component : M)의 합으로 나타낼수 있다.

$$M = \chi H + M \tag{5}$$

식(5)를 식(2)에 대입하면

$$H = \nu B - \nu_r M \quad (6)$$

와 같은 식을 얻는다. 여기서 $\nu = 1/\mu$, $\mu = \mu_o \mu_r$, $\nu_r = 1/\mu_r$, $\mu_r = 1 + \chi$ 이다. 이것을 식 (1)에 대입하면 식 (6)의 관계로부터

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J + \nu_r \nabla \times M \quad (7)$$

회전에 의한 벡터 관계식과 coulomb 게이지 조건에서 식 (8)과 같은 지배방정식을 얻는다.

$$-(\nabla \cdot \nu \nabla) A = J + \nu_r \nabla \times M \quad (8)$$

2.1.2 유한요소 정식화

해석영역을 고정 경계조건과 자연경계조건으로 나누고 고정 경계에서 고정경계조건을 만족시키며 한번 미분 가능한 가중함수 W를 식 (8)에 곱한 후 전체 영역에서 적분하면 아래와 같은 식을 얻는다.

$$\int_{\Omega} W (\nabla \cdot \nu \nabla) A + J + \nu_r \nabla \times M d\Omega = 0 \quad (9)$$

Green 정리와 경계조건으로부터

$$\int_{\Omega} \{-\nu \nabla W \nabla \cdot A + W J - \nu_r \nabla W \times M\} d\Omega = 0 \quad (10)$$

해석영역을 유한개의 요소로 나누고 요소내의 자기 벡터 포텐셜을 구할 수 있다.

2.2 자기장 해석결과

2.2.1 2차원과 3차원에 따른 해석

이방성 영구자석을 2차원과 3차원으로 각각 해석하여 이를 비교하였다.

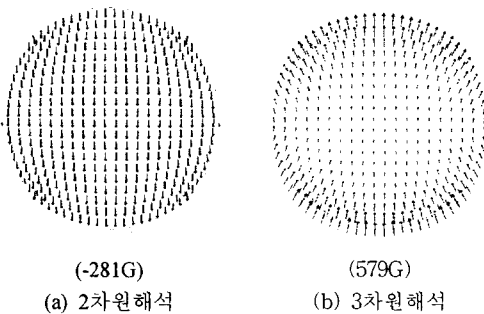


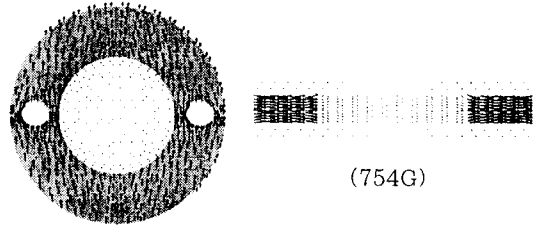
그림 2. 이방성 영구자석 내경 안의 자기장 2차원과 3차원 해석비교

그림 2에서 해석된 그림은 영구자석의 내경 안의 Hall Sensor의 센싱 부분을 나타낸 것이다. 2차원 해석을 보면 해석값 뿐만 아니라 일반적인 경우와는 반대로 자기장의 방향 자체가 반대인 것을 알 수 있다. 이것은 위 표면의 자기장의 방향과 두께부분의 자기장의 방향이 반대이기 때문이며 두께부분의 자기장이 2차원 해석시는 아주 크다고 보기 때문에 이것으로 인한 자기장으로 인해서 자기장이 반대방향으로 생성된다. 또 2차원으로 해석한 자기장은 균일한 반면 3차원은 중심에서

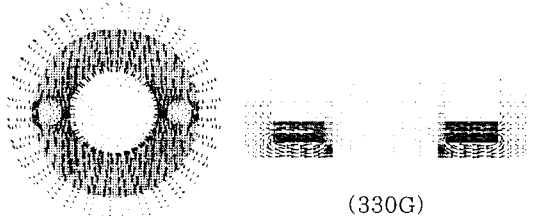
표면으로 갈수록 자기장의 세기가 커진다는 것을 알 수 있다. 위 구조는 두께가 납작하여 2차원 근사 해석조건이 성립하지 않기 때문이다. Finger Magnet를 해석할 때는 3차원으로 해석하여야 하며, 본 연구에서는 모든 해석을 3차원으로 해석하였다.

2.2.2 back-yoke유무에 따른 해석

본 연구의 Finger Arm 에 사용되는 영구자석의 구조상 일반적인 경우와 달리 back-yoke가 있는 경우 오히려 Hall Sensor부분의 자기장이 절반이하로 감소함을 그림 3에서 알 수 있다. 이것은 영구자석과 back-yoke의 구조상 영구자석에서 생성되는 자기장이 Hall Sensor로 집중되지 않고 back-yoke로 자료가 생성되기 때문이다. 그렇지만 구조를 고려해 볼 때 back-yoke는 영구자석을 고정 및 기계적 강도를 고려할 때 반드시 있어야 한다.



(a) back-yoke가 없는 경우의 자기장



(b) back-yoke가 있는 경우의 자기장

그림 3 back-yoke에 대한 해석

2.2.3 영구자석 크기와 Pin Hole에 대한 해석

Hall Sensor 부위의 자기장의 크기를 키우기 위하여 마크네트의 내경은 16[mm]로 일정하게 하고 외경의 크기를 바꿔가며 해석한 결과 표 1과 같다.

표 1의 결과에 의하면 외경이 큰 영구자석의 경우 Hall Sensor 부위의 자기장이 오히려 작은 것을 알 수 있는데, 이것은 Finger Arm의 구조상 영구자석의 크기가 커짐에 따라 발생하는 역자계(Demagnetizing Field)도 함께 커지기 때문이다.

표 1 영구자석 크기에 따른 자기장

외경의 크기	26[mm]	30[mm]	40[mm]
자기장의 크기	354[G]	330[G]	293[G]

Pin Hole의 위치에 대한 해석으로 내경의 크기가 16[mm]이고 외경이 40[mm]인 영구자석의 Pin Hole이 영구자석의 가운데 일 때는 자기장의 세기가 293[G]이다. Pin Hole의 위치를 영구자석의 가운데에서 2.5[mm] 내경 쪽으로 이동할 경우 자기장은 320[G]로 증가한다. 또 Pin Hole의 재질을 비자성체의 경우보다 철을 사용할 경우 더 자기장의 값이 더 적

게 나오는 것을 해석결과 알 수 있었습니다. 위의 해석 결과로 알 수 있는 것은 영구자석은 작은 것이 더 많은 자기장을 발생시키며, Pin Hole은 영구자석의 중심보다는 내경에 가까울수록, Pin Hole의 재질은 철보다는 비자성체를 사용할 경우 더 크다는 것을 해석결과 알 수 있었습니다. 그렇지만 최적설계를 하기 위해서는 해석결과와 함께 구조적인 문제를 함께 검토하여야 합니다. 그래서 자기장은 8[%]적이나 기계적인 강도등을 고려하여 Pin Hole의 위치는 가운데로 정했으며, Pin Hole의 재질은 비자성체로 결정하였다.

2.2.4 영구자석 위치에 대한 해석

앞 절에서 해석한 결과 back-yoke가 없는 경우가 있는 경우보다 더 큰 자기장이 나타남을 알 수가 있었다. 이것은 영구자석과 back-yoke가 너무 가까워서 자료가 영구자석과 back-yoke로 형성되기 때문이다. 그러나 Finger Arm의 구조상 back-yoke를 제거할 수 없으므로 본 연구에서는 영구자석을 back-yoke에서 일정한 거리로 띄운 구조를 설계하였다. 이 경우 유한요소법에 의한 해석결과 띄우기 전보다 그림 4와 같이 Hall Sensor 부위의 자기장을 3배정도 큰 값으로 얻을 수 있었다. 이것은 영구자석과 back-yoke의 거리를 띄움으로써 Hall Sensor 부위로 자료가 형성되기 때문이다.

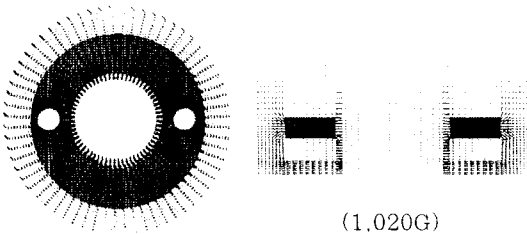


그림 4 영구자석 시스템의 새로운 design

2.2.5 Finger Magnet의 최적설계

Hall Sensor 부위의 자기장을 크게 하기 위한 Finger Magnet의 최적설계 결과 영구자석의 크기는 내경이 16[mm], 외경이 30[mm]이며, back-yoke가 영구자석과 3[mm] 떨어져 있을 경우 최적설계 이전에 비하여 약 3배정도 큰 값인 1.020[G]의 자기장을 얻을 수 있었으며 Hall Sensor 부위에서 이정도 자기장이 얻어지면 Hall Sensor의 출력값을 증폭할 필요가 없기 때문에 신호 증폭에 따르는 noise도 대폭 감소시킬 수가 있었다.

2.3 성능 평가 실험 및 분석

제 2장 2절의 최적 설계에 의해서 그림 5와 같은 캘리퍼 시스템이 제작되었다. 감도가 5 [mV/G]인 Hall Sensor를 사용한 결과 90~10[]의 각 변위에 대하여 증폭기 없이 0.3~4.9 [V]의 출력을 얻었다. 4.9[V]는 980[G]로 제 2장 2절의 해석결과 및 최적설계가 유효적절함을 보여준다. 그림 6는 Finger Arm의 회전 에 따른 Wheel의 높이 변화와 출력 전압과의 관계를 보이고 있다. H_D 는 식(11)과 같이 표현된다.

$$H_D = L \sin(\theta) + D \quad (11)$$

여기서 L 은 Finger Arm의 길이이고, D 는 Wheel의 반경이다.

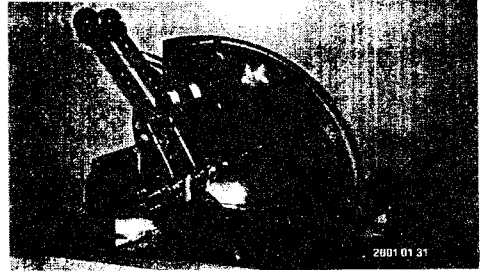


그림 5 개발된 mechanical finger

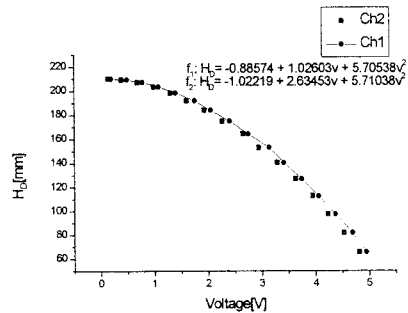


그림 6 wheel의 높이에 따른 센서 출력값

3. 결 론

본 논문에서는 이방성 영구자석을 사용하는 Mechanical Finger를 유한요소법을 이용하여 비선형 3차원 해석을 하였으며, 이 결과 back-yoke의 유무, 영구자석의 크기, Pin Hole의 위치와 재질과 영구자석의 위치등을 해석하여 최적설계를 도출한 후 이를 이용하여 비접촉이면서 탈부착이 쉽고, 구동드라이버 혹은 증폭기의 제작이 쉽고, 정밀도가 높은 캘리퍼 시스템의 Mechanical Finger를 개발하였다. 실제 제작된 Mechanical Finger의 측정값과 해석결과를 비교하여 잘 일치하는 결과를 얻었다. 이 경우 Hall Sensor 부위의 자기장이 출력값을 증폭할 필요가 없기 때문에 신호 증폭에 따르는 noise도 대폭 감소시킬 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Crouch A. E., 1993, "In-Line Inspection of Natural Gas Pipelines", Gas Research Institute Topical Report GRI -91/0365, pp. 12~16.
- [2] G.S.Park, S.Y.Hahn, K.S.Lee, H.K.Jung, "Implementation of Hysteresis Characteristics using Preisach Model with M-B Variables," IEEE Trans. Magn., vol. 29, no. 2, pp. 1542-1545, March 1993.
- [3] Jim Cordell, C.Eng. M.I.Mech.E. F.Inst.Pet and Hershel Vanzant, 1999, "In-line inspection pigging", All about pigging., chapter 8, pp. 1~28.
- [4] J. Bruce Nestleroth, Steven W. Rust, and David A. Burgoon, "Determining Corrosion Defect Geometry from Magnetic Flux Leakage PIG Data", The NACE International Annual Conference and Exposition CORROSION 96, Paper No. 44, pp. 1-11, 1996.