

지하매설 가스관의 검사를 위한 누설자속탐상 PIG 설계에 관한 연구

Research on MFL PIG Design for the Inspection of Underground Gas Pipeline

박상호*[†], 박관수*

Sang Ho Park*[†] and Gwan Soo Park*

초 록 본 논문에서는 3차원 형태의 결함을 가진 지하매설 가스관에서 누설자속(magnetic flux leakage, MFL) 탐상법을 사용한 결함 검출에 관하여 연구하였다. 영구자석과 요크로 구성된 자기 시스템을 유한요소법을 사용하여 해석하고 동작점을 설정하였다. 가스관이 충분히 포화되지 않은 경우에는 측정이 곤란하며, 과대포화된 경우에는 결함에 의한 누설자속의 변화량이 적어서 측정이 곤란하므로 적절한 값을 설정하여야 하므로 자기 시스템의 동작점은 결함이 있을 때 누설자속 증가율이 최대가 되도록 설정하여야 한다. 본 논문에서는 3차원 비선형 유한요소법을 사용하여, 가스관에 결함이 있는 경우 결함의 크기, 깊이에 따른 결함신호를 예측하여 그 결과 가스관 포화상태의 적절여부, 홀 센서 range 및 resolution의 적정도 등을 연구하였다. 또한 홀 센서의 민감도 향상을 위하여 back-yoke를 사용하여 측정신호를 향상시키는 방법을 제안하였다.

주요용어 : 누설자속 탐상, MFL 피그, 동작점, 유한요소법

Abstract This paper describes the magnetic flux leakage(MFL) type non-destructive testing(NDT) system to detect the 3D defects in underground gas pipe. Magnetic systems with permanent magnets and yokes are analyzed by 3D non-linear finite element method(FEM) with optimum design. In case of under-saturation of gas pipe, sensing signals are too weak to detect. In case of over-saturation, the changes of the sensing signals are too low to detect the defects sensitively. So, the operating points of the magnetic system are optimized to increase the changes of the MFL signals. The effects of the depth and size of the defects on the sensing signals are analyzed to define the range and resolution of the MFL sensors. To increase the sensor's sensitivity, the back-yoke sensors are introduced and tested.

Keyword: MFL(magnetic flux leakage), MFL PIG, operating point, FEM(finite element analysis)

1. 서 론

지하 또는 수중 매설된 배관속을 센서를 탑재한 채로 주행하며 배관의 결함을 탐지하도록 개발된 PIG는 배관의 유지 보수에 필수적인 장비가 되었다.

현재 사용되고 있는 PIG는 용도에 따라 utility PIG와

inspection PIG로 분리할 수 있으며, inspection PIG는 배관 내부의 상태나 손상(예: dent, metal loss 등)을 조사하기 위한 PIG를 의미하며 용도에 따라 geometry PIG, MFL (magnetic flux leakage) PIG, ultrasonic PIG 등으로 구분할 수 있다[1].

MFL PIG는 가스관의 부식 등으로 인한 결함을 비파

피로 검출하는 방법으로[2-6], 이 방법은 가스관을 요크와 영구자석을 이용하여 자기시스템으로 만들고 이 가스관을 적절히 포화시킨 후 결함으로 인해 발생하는 누설자속을 홀센서를 이용하여 검출한다. 따라서 홀센서의 극격과 위치는 자기포화를 고려하여 설정하여야 한다.

본 논문은 영구자석과 요크로 구성된 자기시스템을 유한요소법을 이용하여 자기포화 동작점을 설정하였다. 동작점이 낮아서 가스관이 충분히 포화가 안된 경우에는 누설자속이 적어서 측정이 곤란하며, 동작점이 높아서 과대포화된 경우에는 결함에 의한 누설자속의 변화량이 적어서 측정이 곤란하므로 적절한 값을 설정하여야 한다. 그러므로 자기시스템의 동작점은 결함이 생겼을 때 누설자속이 최대가 되도록 설정하여야 한다.

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 MFL PIG시스템의 2차원과 3차원 해석, 선형과 비선형 해석 등의 기초 연구와 가스관의 결함이 있는 경우 결함의 크기, 깊이에 따른 해석을 실시하여 그 결과 가스관의 포화상태의 적절여부, 홀센서의 측정범위, 홀센서의 분해능 등을 연구하였다. 홀센서에 back-yoke를 사용하여 센서의 민감도를 향상시키는 방법에 관하여 연구하였다.

2. 해석이론

2.1. 지배방정식

변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자계에서 성립하는 Maxwell 방정식과 그 보조방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2)$$

$$B = \nabla \times A \quad (3)$$

여기서 μ_0 는 진공에서의 투자율(permeability), A 는 자기 벡터 포텐셜이다. 비선형 현상이 없는 문제에서 자화량은 자화율 χ 로서

$$M = \chi H \quad (4)$$

와 같이 표현되지만 해석 영역내에 비선형 특성을 갖는 매질이 포함되어 있는 경우에는 자화량은 자계의 세기나 자속밀도에 관한 단순한 식으로 표현되지 않으므로 미지

수로 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.

$$M = \chi H + M \quad (5)$$

식 (5)를 식 (2)에 대입하면

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

와 같은 식을 얻는다. 여기서 $\nu = 1/\mu$, $\mu = \mu_0 \mu_r$, $\nu_r = 1/\mu_r$, $\mu_r = 1 + \chi$ 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 게이지로부터 식 (8)과 같은 지배방정식을 얻는다.

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

2.2. 유한요소 정식화

해석영역을 고정 경계조건과 자연경계조건으로 나누고 고정 경계에서 고정경계조건을 만족시키며 한번 미분 가능한 가중함수 W 를 식 (8)에 곱한후 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

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

를 얻는다. 해석영역을 유한개의 요소로 나누고 요소내의 자기 벡터 포텐셜을 구할수 있다.

MFL을 이용한 NDT시스템은 자기포화 곡선을 이용하는 비선형 문제이므로 오차가 일정값 이하로 될 때까지 식 (6)을 유한요소법으로 계속 반복 계산하여야 한다.

2.3. 자기 포화커브에서 최적의 동작점

Fig. 1은 가스관 결함에 대한 개요도이다. 그림에서 Φ_a 는 결함이 없는 부분의 누설자속이며, Φ_c 는 결함이 있는 부분의 누설자속이다. Φ_b 와 Φ_d 는 각각 결함이 없을 때 와 있을 때의 가스관 내부의 자속이다. 결함이 있는 가스관 내부의 경우 자속밀도는 증가하게 되는데 만약 가스관이 포화되지 않으면 Φ_b 와 Φ_d 는 같게된다. 그렇게 되면 가스관 내부의 자속밀도는 B_{q1} 에서 B_{q2} 로 변하게 된다. 만약 가스관이 포화되면 가스관 내부의 자속밀도는 B_{p1} 에서 B_{p2} 로 변하게 된다. Φ_c/Φ_a 에 비례하는 누설 파라메트르 λ 라 하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \frac{B_{q2} - B_{p2}}{B_{q1} - B_{p1}} \quad (11)$$

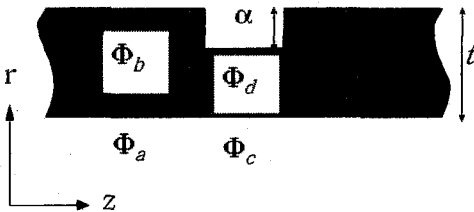


Fig. 1 Magnetic flux with defect in gas pipeline

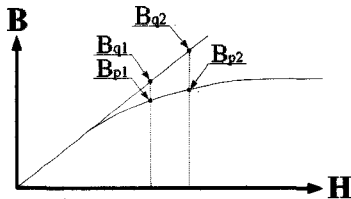


Fig. 2 The Magnetic saturation curves

Fig. 3(a)의 경우는 자기포화 동작점이 작을 경우 λ 의 크기는 작다. Fig. 3(c)의 경우처럼 동작점이 너무 클 경우 Φ_c 는 크지만 누설자속의 변화 Φ_c/Φ_a 의 크기는 작아지므로 λ 의 크기도 작다. Fig. 3(b)의 경우가 최적이다. 이 경우는 동작점이 포화상태에 접근하여 작은 결함에도 λ 값은 크게된다. 그래서 영구자석과 요크를 이용한 자기 회로 시스템의 최적설계는 측정 영역에서 λ 의 값이 최대가 되도록 동작점을 설계하여야 한다.

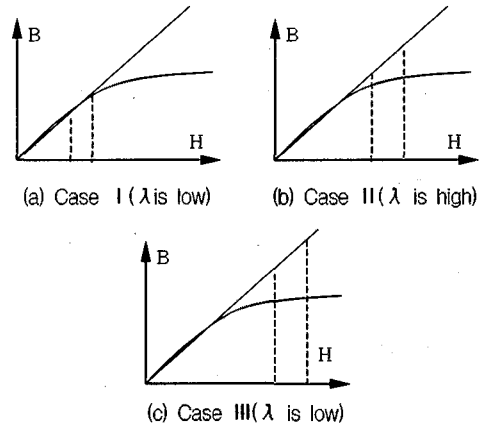


Fig 3 Three cases of the operating point and λ in same α

3. MFL PIG의 기초연구

MFL PIG는 Fig. 4와 같이 가스관의 부식 등으로 인한 결함을 검출하는 방법의 일종으로서 가스관을 요크와 영구자석을 이용하여 적절히 포화시킨 후 결함으로 인해 발생하는 누설 자속을 홀센서를 이용하여 검출한다. 따라서 홀센서의 규격과 위치는 자기포화를 고려하여 설정하여야 한다.

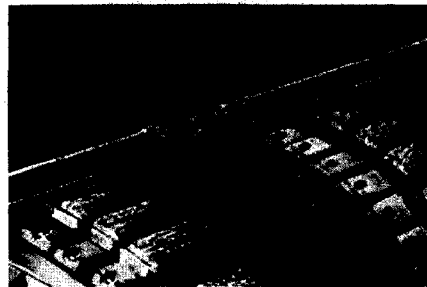
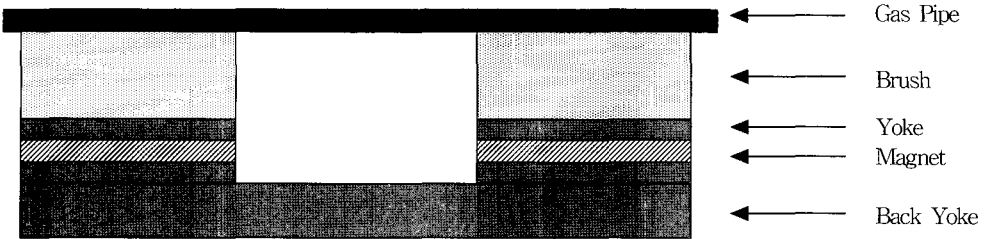


Fig. 4 MFL PIG diagram (Canada BJ)

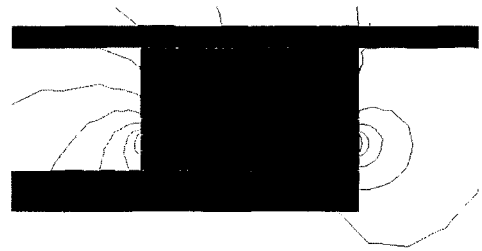
3.1. MFL PIG의 개요도

Fig. 5는 MFL PIG의 개요도이다. MFL PIG 해석시에 고려되어야 할 사항은 첫째 가스관의 적정 포화정도 둘째 브러쉬의 투자율의 해석방법 셋째 측정부분의 자속밀도의 크기이다. 이것을 만족시키기 위해서는 설계시점에서 결함이 없을 경우의 누설 자기장과 결함이 있을 경우의 누설자기장의 비율을 최대로 해서 제작할 경우 결함에 의한 감지신호를 최대로 할 수 있다.



3.2. MFL PIG의 2차원과 3차원에 대한 비교

Fig. 6과 Fig. 7은 MFL PIG의 2차원과 3차원에 대한 비교이다. 실제로는 원주방향의 yoke의 폭보다 가스관의 폭이 크나 2차원에서는 원주 방향의 가스관의 폭과 요크의 폭이 같다고 해석을 하게 된다. 그 결과 Fig. 6과 같이 2차원에서는 자속밀도가 가스관에서 높게 나타나지만 실제로 3차원에서는 가스관의 폭이 yoke보다 크다. 따라서 자속이 통과하는 면적이 크므로 실제 가스관의 자기장은 줄어든다.



(a) 2D analysis



(b) 3D analysis

Fig. 7 Analysis of MFL PIG by 2D/ 3D FEM

3.3. MFL PIG의 비선형 해석에 대한 검토

Fig. 8은 MFL PIG를 선형 해석하였을 경우와 비 선형 해석을 하였을 경우 그 해석결과를 비교한 것이다. MFL PIG 시스템은 가스관의 자기포화부분을 이용하는 것으로써 이것을 무시하고 선형으로 해석할 경우 Fig. 8과 같이 4[T]이상의 비현실적인 높은 값이 나온다. MFL PIG 시스템을 해석할 경우 반드시 비선형 해석을 하여야 한다.

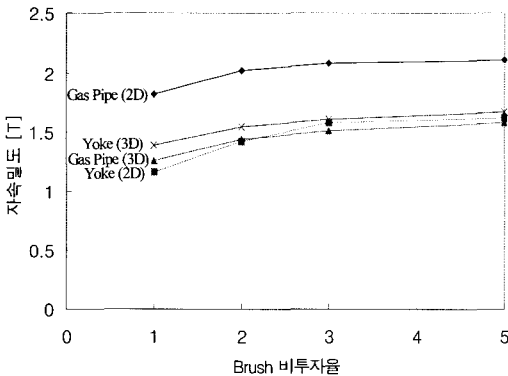


Fig. 6 MFL signals according to the relative permeability of the brush

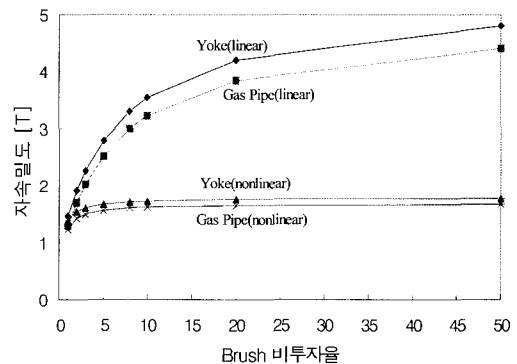


Fig. 8 Comparisons of MFL PIG signal in linear/nonlinear

Table 1 Magnetic flux densities inside the gas pipe in 3D nonlinear analysis

[단위: T]

투자율 \ 위치	Pipe	Brush	Yoke	Magnet	Back Yoke
1	1.5747	0.1353	0.4256	0.7982	1.5450
2	1.6403	0.2136	0.4631	0.8110	1.5937
3	1.6788	0.2640	0.5188	0.8188	1.6223
5	1.7214	0.3246	0.5606	0.8280	1.6546
10	1.7661	0.3902	0.6048	0.8381	1.6880
20	1.7871	0.4313	0.6335	0.8448	1.7099
50	1.8061	0.4553	0.6544	0.8496	1.7256
100	1.8135	0.4500	0.6645	0.8515	1.7318

4. MFL PIG의 결함에 유무에 따른 전자기적 해석

4.1. MFL PIG시스템에서 가스관의 포화정도 해석

Fig. 9는 MFL PIG의 3차원 해석 부분을 나타내었다. 자기장이 가스관의 중심부분에 집중됨을 알 수 있다. MFL PIG의 각 부분에 대한 3차원 비선형 해석결과는 Table 1에 나타내었다. 브러시의 투자율을 1-100까지 변화 시켰을 때 가스관의 자속밀도는 1.57 ~ 1.81[T]로 가스관을 포화정도는 적절하였다.

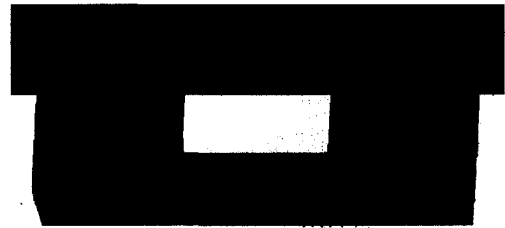


Fig. 9 Analysis of MFL PIG without defect

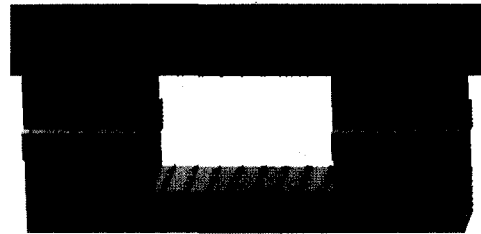


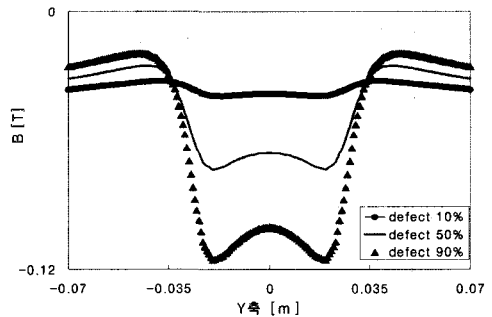
Fig. 10 Analysis of MFL PIG with defect

4.2. MFL PIG의 결함이 있을 경우의 3차원해석

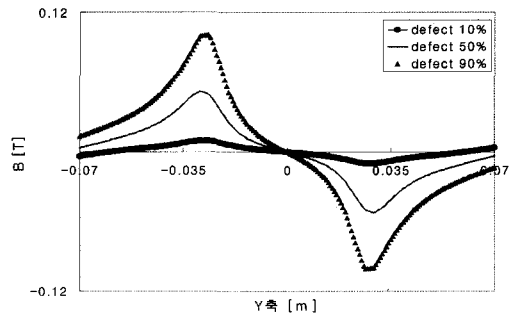
Fig. 10은 MFL PIG를 결함이 있을 경우 3차원 해석한 그림이다. 이 경우 결함이 있는 부분은 단면적의 감소하므로 자속밀도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이 경우 결함이 있는 부분의 가스관은 자기 포화되어 누설자속이 발생하게 된다.

4.3. MFL PIG의 결함 깊이에 따른 해석 결과

Fig. 11은 MFL PIG의 결함의 깊이에 따른 해석 결과이다. 결함의 깊이가 깊어질수록 감지 신호의 크기가 증가함을 알 수 있다. 결함의 깊이 증가에 따른 MFL 감지 신호의 영향을 분리해 낼 수 있으므로 MFL 신호로부터 결함의 깊이를 판별할 수 있고 그 결과로부터 가스관의 부식이나 결함의 증가경향을 판별할 수 있다.



(a) Bx (Radial Component)

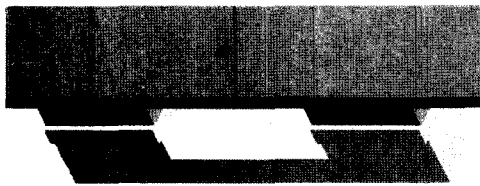


(b) By (Axial component)

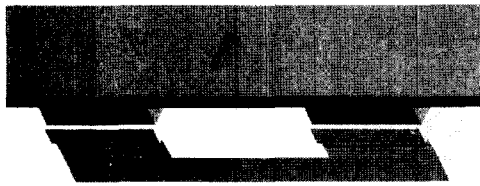
Fig. 11 MFL PIG signals according to defect depth

4.4. MFL PIG의 결함 크기에 따른 해석 결과

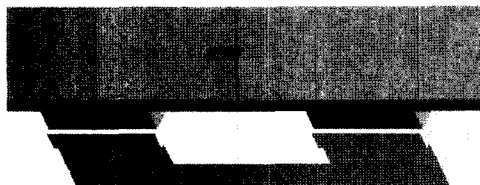
Fig. 12는 결함의 모양이며 Fig. 13은 결함의 크기에 따른 해석결과이다. 결함이 깊이가 일정하고 결함의 길이가 증가하면 신호의 폭이 증가한다. 결함의 깊이가 일정하고 결함의 폭이 증가할 경우 신호가 증가함을 알 수 있다. 이 결과를 신호처리하여 이미지화 하면 결함의 모양을 알 수 있다.



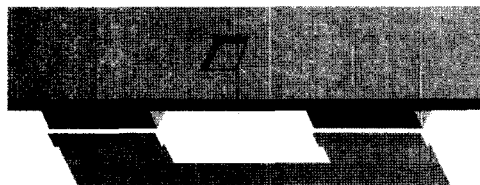
(a) defect 1t*1t



(b) defect 1t*3t

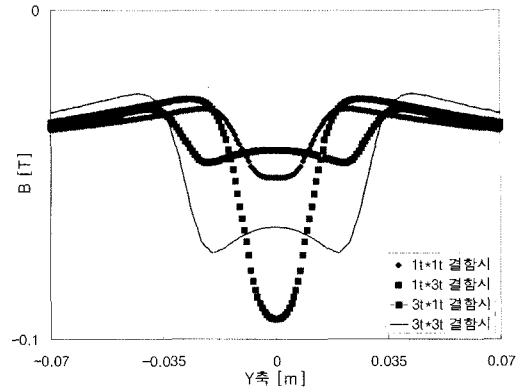


(c) defect 3t*1t

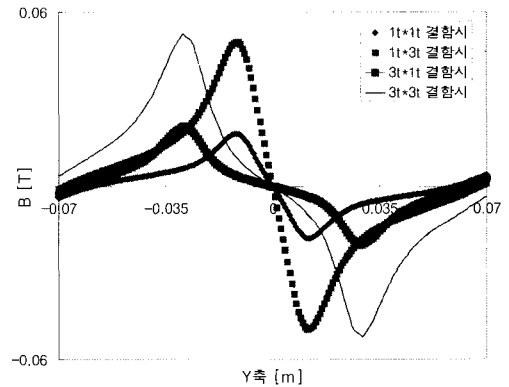


(d) defect 3t*3t

Fig. 12 Type of defect by size



(a) Bx (Radial component)

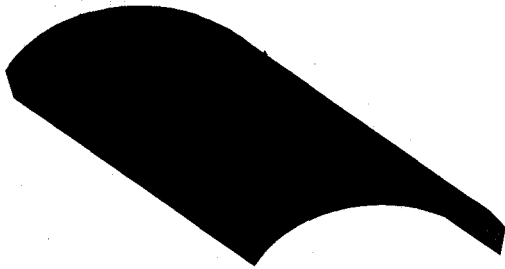


(b) By (Axial component)

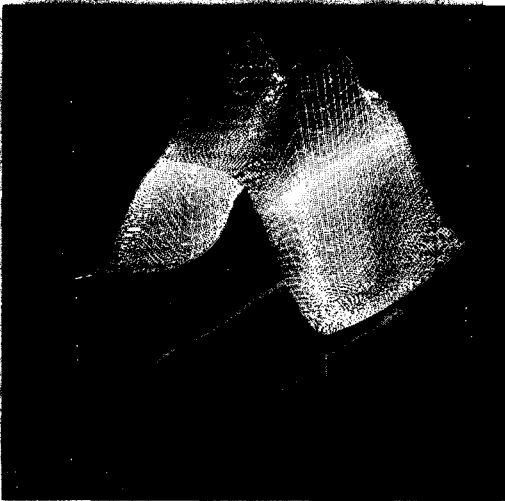
Fig. 13. MFL PIG signals according to the defect

4.5. MFL PIG의 센서 방향에 따른 검토

MFL PIG의 센스 박스 1개에는 3개의 홀센서가 들어 있다. 각각의 센서는 3가지 방향으로 결함을 검출한다. 따라서 본 연구에서는 3가지 방향에 대하여 각각의 신호 성분을 해석하였다. Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16은 3가지 방향의 신호를 3차원 그래프로 나타내었으며, 이미지를 합성하였다. 실제 결함의 크기는 $52.5 \times 52.5[\text{mm}^2]$ 이며 결함의 깊이는 90%이고 이것을 이미지 합성한 것과 실제 결함이 잘 일치함을 알 수 있다.



(a) Axial components of MFL

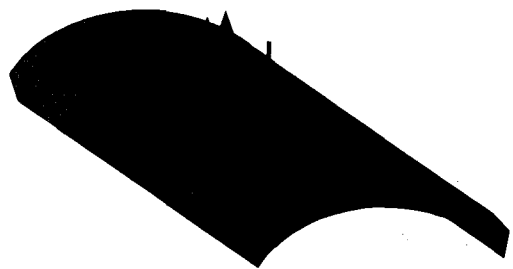


(b) MFL signals of axial component

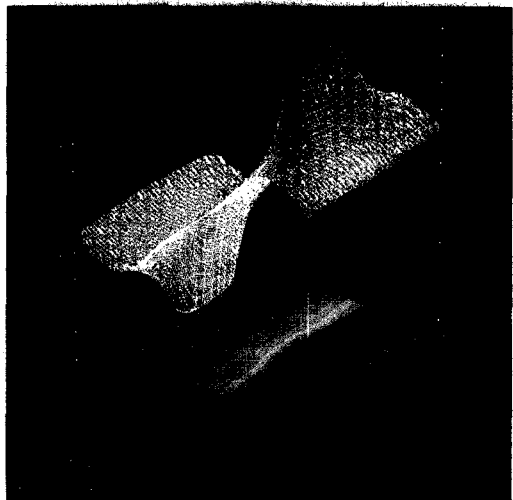


(c) MFL image of axial component

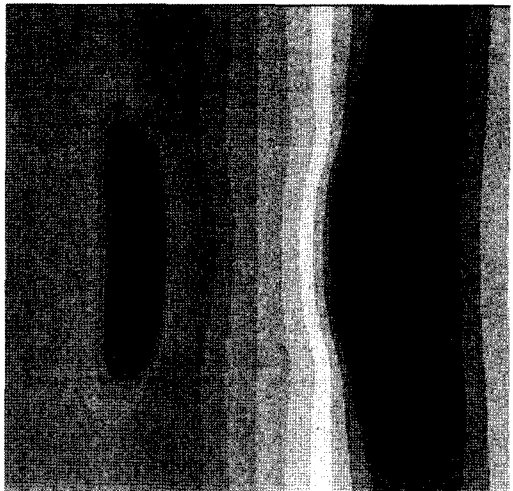
Fig. 14 Analysis of MFL signals by axial component



(a) Radial components of MFL

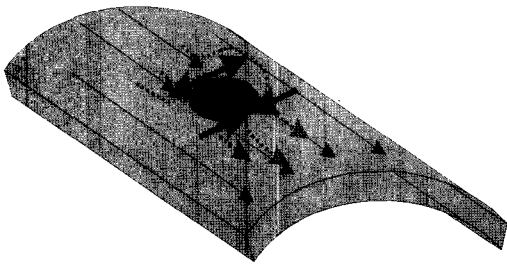


(b) MFL signals of radial component

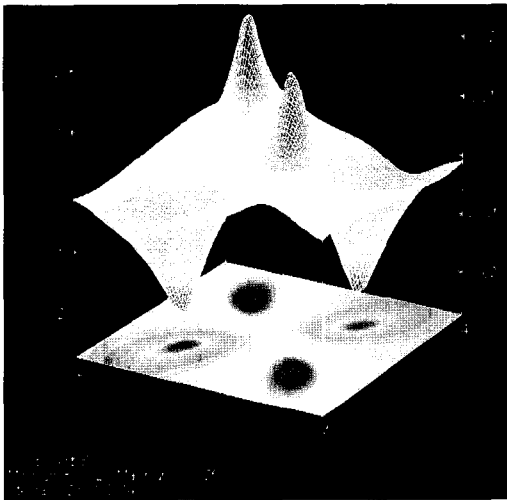


(c) MFL image of radial component

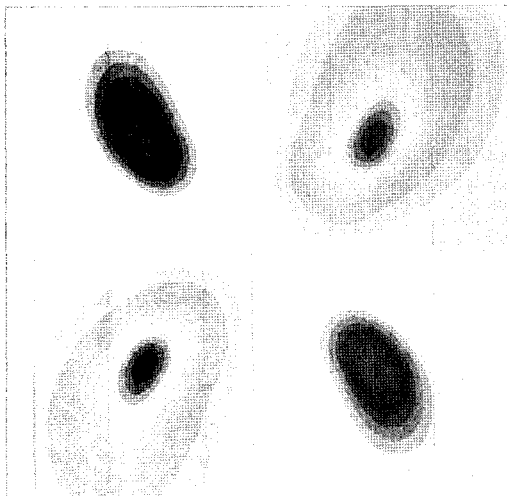
Fig. 15 Analysis of MFL signals by radial component



(a) Circumferential components of MFL



(b) MFL signals of circumferential component

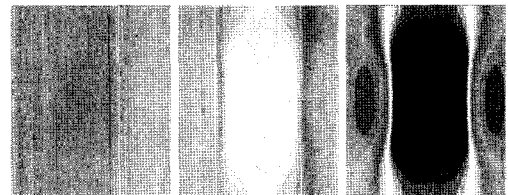


(c) MFL image of circumferential component

Fig. 16 Analysis of MFL signals by circumferential component

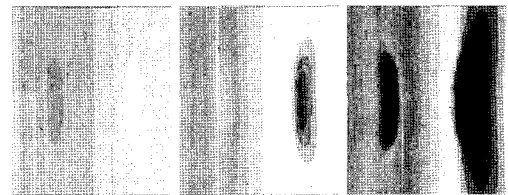
4.6. MFL PIG의 결함에 홀센서의 측정범위와 분해능 설정

결함의 깊이에 따라서 계산된 신호를 다시 이미지 합성한 것이 Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19이다. 해석결과 결함의 깊이가 클수록 검출되는 자기장이 커짐을 알 수 있다. 검출하고자 하는 결함의 최소 깊이는 홀센서의 분해능을 결정하는 요소이다. 따라서 홀센서의 분해능은 검출하고자 하는 최소깊이의 신호변화보다도 작아야 검출이 가능하다.



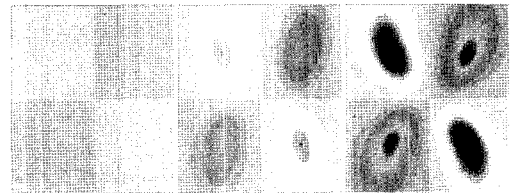
(a) 10% depth (Min:324G, Max:394G) (b) 50% depth (Min:254G, Max:734G) (c) 90% depth (Min:195G, Max:1100G)

Fig. 17 Images of defect depth by axial component



(a) 10% depth (Min:-99G, Max:99G) (b) 50% depth (Min:-519G, Max:519G) (c) 90% depth (Min:-1000G, Max:1000G)

Fig. 18 Images of defect depth by radial component



(a) 10% depth (Min:-12G, Max:12G) (b) 50% depth (Min:-79G, Max:79G) (c) 90% depth (Min:-216G, Max:216G)

Fig. 19 Images of defect depth by circumferential Component

홀센서의 측정범위는 해석결과 축 방향과 반경 방향의 홀센서는 -1500 ~ 1500[G]정도이며, 원주 방향은 -500 ~ 500[G]정도이면 모든 범위의 결함이 검출 가능하다. 홀센서의 분해능은 10%의 결함을 검출하고자 할 때 축방향은 신호변화가 70[G], 반경 방향은 신호변화가 100[G], 원주 방향은 신호변화가 10[G]이다. 따라서 축 방향과 반경 방향은 홀센서의 분해능이 50[G]정도이면 10%정도의 결함을 검출할 수 있다. 그러나 원주 방향의 홀센서의 분해능은 50[G]일 때는 10%의 결함이 있을 경우 홀센서의 분해능이 신호변화보다 5배정도 크므로 검출할 수 없다. 원주 방향의 10% 결함을 검출하고자 한다면 홀센서의 분해능은 최대 10[G]이하가 되어야 한다. 실제 FIG 주형 중에서는 편심등과 FIG의 흔들림에 의한 noise가 발생하고 이것 때문에 측정지점의 자기장에 큰 영향을 준다. 이것을 줄이고자 브러쉬를 채용하였으나 브러쉬만으로는 FIG 진행에 따른 noise를 완전히 제거하지 못한다. 이런 noise는 특정 주파수를 가지며, 고조파 성분이므로 low pass filter 등으로 제거할 수 있다.

4.7. 센서의 민감도 향상 설계

본 연구에서는 센서의 민감도를 증가시키기 위하여 센서안쪽의 back-yoke를 채용하였다. Fig. 20은 1.45×1.45[mm²], 1.45×4.35[mm²], 4.35×1.45[mm²]의 매우 작은 크기를 가지는 3가지 형태의 back-yoke이다. Table 2는 각각의 경우에 대하여 두 가지 검출 위치를 나타낸 것이며 각각의 위치에 대하여 감지신호의 변화를 해석하였다.

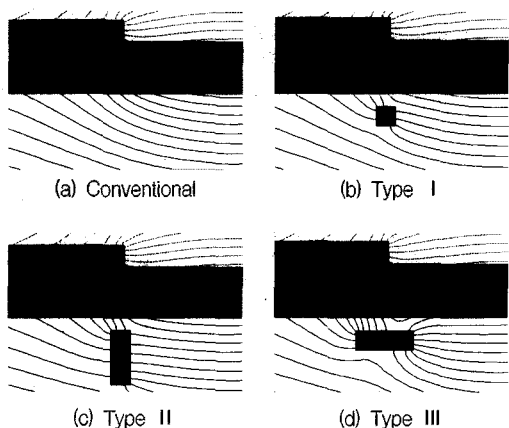


Fig. 20 Effects of the back-yoke on incrementation of the magnetic field densities

센서내의 자기장을 증가시키기 위한 back-yoke의 특성을 Table 2에 요약하였고, 센서 주위의 자기장을 종래의 back-yoke가 없는 경우와 비교하였다. 자기장은 back-yoke의 고 투자율로 인하여 yoke내에 집중되어진다. 그 결과 반경방향 성분은 TypeII 형태의 yoke에서 177[%] 증가하였고, 축방향 성분에서는 TypeIII 형태의 yoke에서 200[%] 증가하였다. 이 경우 홀센서의 분해능을 증가시킬 수 있으므로 민감도를 향상시킬 수 있다.

Table 2 Incrementation of the sensing signals with respect to the back yokes signals with yoke/signals without yoke(ratio)

Sensors	Bz [G]	Br [G]
	7.8/12.1 (64%)	33.3/24 (138%)
	15.3/11 (139%)	9.3/16.5 (56%)
	6.3/12.1 (52%)	35/24 (146%)
	22/11 (200%)	9.9/16.5 (66%)
	8/12.1 (66%)	42.5/24 (177%)
	11.9/9.7 (122%)	3.8/12.1 (31%)

5. 결 론

본 연구는 3차원 형태의 결함을 가진 지하매설 가스관을 MFL 탐상 방법에 의한 결함 검출에 관하여 연구하였다. 유한요소법을 사용하여 2차원과 3차원 해석, 선형과 비선형 해석등의 기초연구를 수행하였다. 이를 바탕으로 가스관의 결함검출 시스템에서 가스관은 적절한 포화정도, 홀센서의 측정범위, 홀센서의 분해능 등의 적정치에 대하여 해석하였다.

또한 본 연구에서 홀센서의 민감도를 향상시키기 위해 센서 안쪽에 back-yoke를 사용하였고 이 경우 민감도를 200%까지 향상시킬 수 있었다.

참고문헌

- [1] Jim Cordell, C. Eng, M. I. Mech. E, F. Inst. Pet and Hershel Vanzant, "In-line Inspection pigging," All about pigging, chapter 8, pp. 1-28, (1999)
- [2] H. Haines et al., "Advanced MFL signal analysis aids pipe corrosion detection," Pipeline & Gas Industry, pp. 49-63, (March 1999)
- [3] K. K. Tandon, "MFL Tool Hardware for Pipeline Inspection," Materials Selection & Design, pp. 75-79, (February 1997)
- [4] D. L. Atherton and M. G. Daly, "Finite Element Calculation of Magnetic Leakage Detector Signals," NDT International, Vol. 20, No. 4, pp. 235-238, (August 1987)
- [5] 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)
- [6] S. Mandayam, L. Udpa, S. S. Udpa and W. Lord, "Wavelet-based permeability compensation technique for characterizing magnetic flux leakage images Data," NDT&E International, Vol. 30, No. 5, pp. 297-303, (1997)
- [7] Richard P. Lippmann, "An Introduction to Computing with Neural Nets," IEEE ASSP MAGAZINE, pp. 4-22, (April 1987)