

강자성 배관 외·내부 면의 단일 원형 홈의 깊이와 부피응력이 누설자속에 미치는 영향

Effect of Far and Near-side Single Circular Pit Depth and Bulk Stress on Magnetic Flux Leakage at Ferromagnetic Pipeline

유권상*[†], 박영태*, D. L. Atherton**, L. Clapham**

Kwon Sang Ryu*[†], Young Tae Park*, D. L. Atherton** and L. Clapham**

초 록 누설자속 (magnetic flux leakage: MFL) 신호는 매설된 송유관이나 가스관에 생성된 부식결합의 검사에 이용된다. 배관의 외·내부 면의 단일 원형 홈 (pit) 깊이와 부피응력 (bulk stress)이 축 (x) 방향, 원주 (y) 방향 및 방사상 (z) 방향의 누설자속에 미치는 영향을 3차원 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 자기이방성 물질을 이용하여 부피인장응력 (bulk tensile stress)과 수직 응력에 의한 MFL 신호변화를 계산하였다. 배관의 축 및 방사상 방향의 MFL 신호는 배관 외·내부 면의 결합 깊이가 깊어질수록, 부피인장응력이 커질수록 MFL 신호는 증가하였다. 그러나 원주 방향의 MFL 신호는 결합 깊이와 부피인장응력에 영향을 거의 받지 않았다.

주요용어: 누설자속, 유한요소법, 홈 깊이, 부피응력

Abstract Magnetic flux leakage (MFL) signals were used for corrosion inspection of buried oil and gas pipeline. 3D finite element analysis was used to examine the effects of far and near-side pit depth and tensile stress on MFL signals. Anisotropic materials were used, and the effects of simulated tensile stress on MFL were investigated. The axial and radial MFL signals depended on far and near-side single pit depth and on the bulk stress, but the circumferential MFL signal did not depend on them. The axial and radial MFL signals increased with increasing pit depth and the bulk stress, but the circumferential MFL signal was scarcely changed.

Keywords: magnetic flux leakage, finite element analysis, pit depth, bulk stress

1. 서 론

지하에 매설된 송유관이나 가스관은 유류나 가스를 먼 거리에 안전하게 운송할 수 있는 수단 중의 하나이고 그 매설 양은 매년 늘어나고 있다. 그러나 이들 배관들은 매설되어 있으므로 토압과 배관의 내부압력 (line pressure)에 의해 굽힘 응력

(bending stress)을 받는다[1-4]. 부식에 의한 홈과 같은 배관의 결합은 응력 상승자 (stress raiser) 역할을 하여 궁극적으로 배관이 파괴될 수 있다[5,6]. 따라서 주기적인 실시간 (in-service) 검사가 필요하며 MFL 측정법은 부식을 모니터링하기에 가장 적합한 방법 중의 하나이다[1]. 배관 외부 면이나 내부면의 부식 홈은 외부 자기장에 의해 MFL 신호를 생

성시키며, 이 신호는 탐지코일이나 Hall 소자에 의해 측정된다. MFL 신호를 측정함으로써 부식 홈의 깊이를 측정할 수 있고, 내부압력에 의해 유도된 국부적인 응력을 계산할 수 있으며 그 결과에 의해 배관의 수리나 교체를 결정할 수 있다. MFL 신호를 정밀하게 분석하기 위해서는 측정 프로브 (probe)의 측정속도와 내부 압력 응력 (line pressure stress)과 같은 운용조건을 고려하여야 한다[7,8].

본 논문에서는 배관 외·내부 면의 단일 원형 홈 깊이와 계산된 인장응력이 x -축 방향 (배관의 축방향), y -축 방향 (배관의 원주방향) 및 z -축 방향 (배관의 방사상 방향)의 MFL 신호에 미치는 영향을 3D 유한요소법을 이용하여 계산하였다.

2. 모델

배관의 원주방향으로 응력을 인가하면 그 방향의 접선방향으로 홈의 양끝에 응력 집중 (stress concentration)이 일어나는 것으로 알려져 있다[5]. 그리고 투자율은 인장응력방향으로 증가한다[9]. 응력 집중 효과와 홈의 깊이 영향을 계산하기 위하여 Fig. 1과 같은 모델을 사용하였다. Fig. 1(a)는 x - y 면의 평면도이다. Plate는 그것의 양단에 있는 영구 자석에 의해 x 방향으로 자화되고, 인장 응력은 y 방향으로 주어진다. Fig. 1(b)에서 볼 수 있는 바와 같이, 대칭성에 의해 모델의 1/4 면만이 MFL 신호 계산을 위하여 사용되었으며, 그 면적은 72 mm × 54 mm이고, 두께는 12 mm 이며, 홈의 직경은 12 mm이다. Plate 표면 1 mm 위의 50 mm × 40 mm의 넓이에 대해 MFL 신호를 계산하였다. 좌표 원점은 Fig. 1(c)와 1(d)와 같이 Plate의 중심에 있고, 자기이방성에 의해 스트레스를 인가하기 위한 특별 부분인 Outer와 Side가 홈 근처에 주어진다. Outer와 Side를 제외한 Plate 부분은 등방성 (isotropic)이다. Fig. 1(c)와 1(d)는 각각 y - z 평면의 측면도와 x - z 평면의 정면도로 경계조건을 규정하기 위한 공기 상자 (air box)를 포함하고 있다. 이 모델에서 사용한 경계조건은 Fig. 1(d)의 좌우측 모든 면에 대해 자기장 수직 경계조건 (field normal boundary condition)을 사용하였다.

Outer와 Side 영역의 이방성을 모델화하기 위하여 Infolytica 사의 소프트웨어 Magnet 6.5 version을 사용하였다[10]. 배관 축방향으로 높은 자기장(약 1.8 T)이 인가되도록 함으로 자화는 항상 자기장

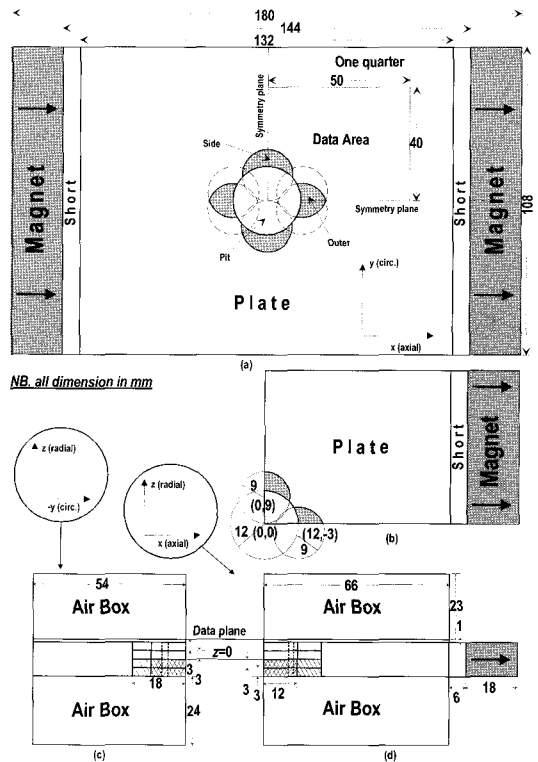


Fig. 1. Schematic diagrams of a single circular pit model. Pit penetration is from the far side of the data plane. (a) shows a plan view of the full model including two special anomalous regions in the Plate, Outer and Side. Only one quarter of the model is used due to the symmetry. The data is computed for an area of 50×40 mm, 1 mm above the Plate surface. (b) The quarter model. The external field is in the axial (x) direction, the applied tensile stress in the circumferential (y) direction. Under simulated stress the Outer region has an easy axis in the y direction and the Side region has easy axis in the x direction. (c) shows a cut of the model in the y - z plane, including the air boxes. (d) shows a cut in the x - z plane.

방향으로 배향되는 것으로 가정할 수 있으며, 그 값은 arc-tangent 함수로 다음과 같이 기술할 수 있다[8].

$$B = \mu_o \left\{ \frac{2M_s}{\pi} \arctan\left(\frac{H}{H_k}\right) + H \right\} \quad (1)$$

여기서 M_s 는 포화자화 (=1.7 MA/m)이고, H_k 는 이방성 자기장으로 본 논문에서는 응력에 의한 MFL 신호변화를 계산하기 위한 입력 인자이다.

식 (1)을 최대투자율로 표현하면

$$\mu_m = \mu_o \left(\frac{2M_s}{\pi H_k} + 1 \right) \quad (2)$$

이고, 최대투자율 μ_m 은 이방성자기장 H_k 에 반비례한다. Fig. 2는 H_k 에 따라 계산한 자화곡선이다. 이방성 자기장이 감소하면 투자율이 증가함을 알 수 있다.

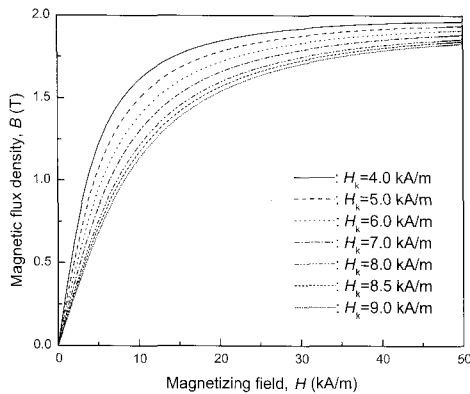


Fig. 2 Magnetization curves for various anisotropic parameters, H_k

배관 원주 방향의 응력에 의해 흠 근처에는 인장 응력이 집중되며[11], 이를 모델에 반영하기 위해 응력 방향으로 보다 낮은 이방성 자기장이, 그리고 수직방향으로는 높은 이방성 자기장이 사용되었다. 세 개의 직각 이방성 자기장 H_{kx} , H_{ky} 및 H_{kz} 는 물질의 자기이방성을 나타내며, Fig. 1과 같이 x 는 배관의 축방향, y 는 원주방향, z 는 방사상 방향을 나타낸다.

본 논문에서 등방성 물질인 경우 $H_{kx} = H_{ky} = H_{kz} = 9000$ A/m로, 높은 이방성에 의해 원주방향의 응력을 모사하기 위해 $H_{ky} = 4000$ A/m, $H_{kx} = H_{kz} = 9000$ A/m를, 축방향의 응력을 모사하기 위해 $H_{kx} = 6000$ A/m, $H_{ky} = H_{kz} = 9000$ A/m를 대입하여 계산하였다. 응력을 모사하기 위한 이방성 파라미터가 Table 1에 주어지 있다.

Table 1 Anisotropic parameters of specified regions

	Outer		Side	
	H_k (kA/m)	Direction	H_k (kA/m)	Direction
Isotropic	9	x,y,z	9	x,y,z
Low anisotropy (High permeability)	8	y	8.5	x
Medium anisotropy (Medium permeability)	6	y	7	x
High anisotropy (Low permeability)	4	y	6	x

3. 결과 및 논의

배관 외부 면 (보통 결함 탐상용 pig는 배관 내부를 지나기 때문에 외부 면은 data plane의 반대면임)에 있는 50 %의 흠에 대해 내부 면 위 1 mm에서 생성된 축, 원주 및 방사상 누설자속의 축 (x) 방향에 대한 profile, x - y 평면에서의 등고선 및 표면 도면 (surface plot)에 대해 흠이 없을 때의 누설자속을 (뺀 값이 각각 Fig. 3(a), Fig. 4(a) 및 Fig. 5(a)에 주어지 있다. 이 그림들에서 결함의 깊이가 누설자속에 미치는 영향을 계산할 수 있으며, 축 방향의 누설자속은 결함 끝 부분에서 양의 값에서 음의 값으로 바뀐다. 원주 방향의 누설자속은 Side 옆에서 최소값을 가진다. 방사상 방향의 누설자속은 원주 방향의 누설자속과는 달리 결함의 끝 부분에서 최소값을 갖는다. 축, 원주 및 방사상 방향에 대한 MFL 신호의 응력 영향을 나타내기 위하여 High anisotropy에서 계산한 MFL에서 등방성 (Isotropic)에서 계산한 MFL를 뺀 값을 나타내는 그래프가 Fig. 3(b), Fig. 4(b) 및 Fig. 5(b)에 각각 주어지 있다. 이 그림들에서 응력이 누설자속에 미치는 영향을 계산할 수 있으며, 축 방향의 누설자속은 Outer에서 최소값을 가진다. 원주 방향의 누설자속은 Outer에서 음의 값에서 양의 값으로 바뀌고, 방사상 방향의 누설자속도 Outer에서 음의 값에서 양의 값으로 바뀐다. 그리고 응력에 의한 MFL 신호변화는 영구자석에 의해 축 방향으로 정렬된 자화가 수직방향으로 인가된 응력에 의해 원주방향으로 회전하기 때문이다[12].

Side와 Outer의 Isotropic, Low anisotropy, Medium anisotropy 및 High anisotropy에 대한 피

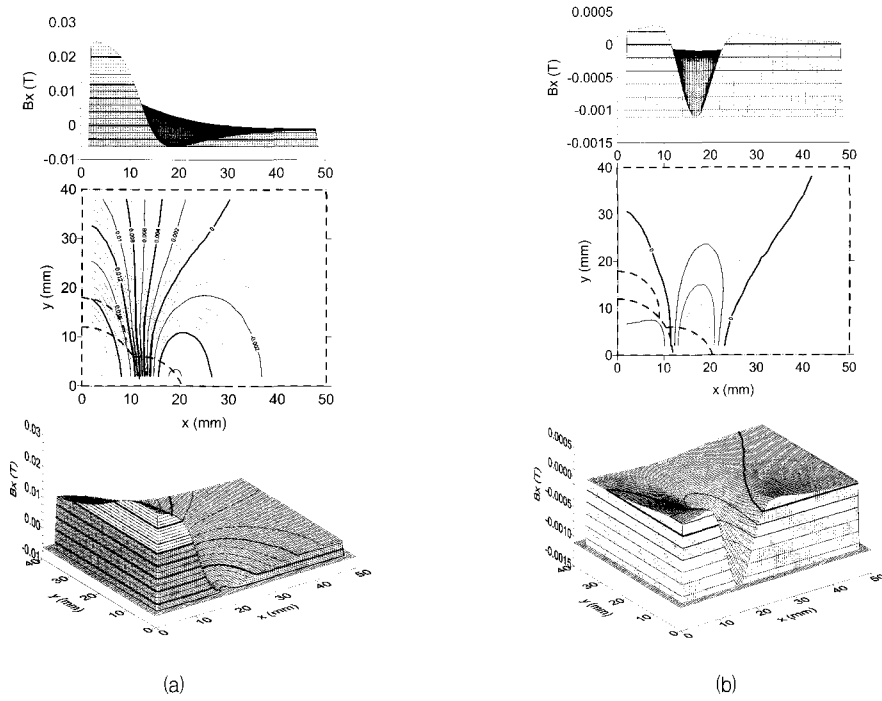


Fig. 3 Axial (x direction) profile, contour map, and surface plot of the anomalous axial MFL generated 1 mm above the near-side by a 50 % penetration 12 mm diameter far-side single pit obtained by subtracting (a) the no pit solution and (b) the corresponding isotropic solution

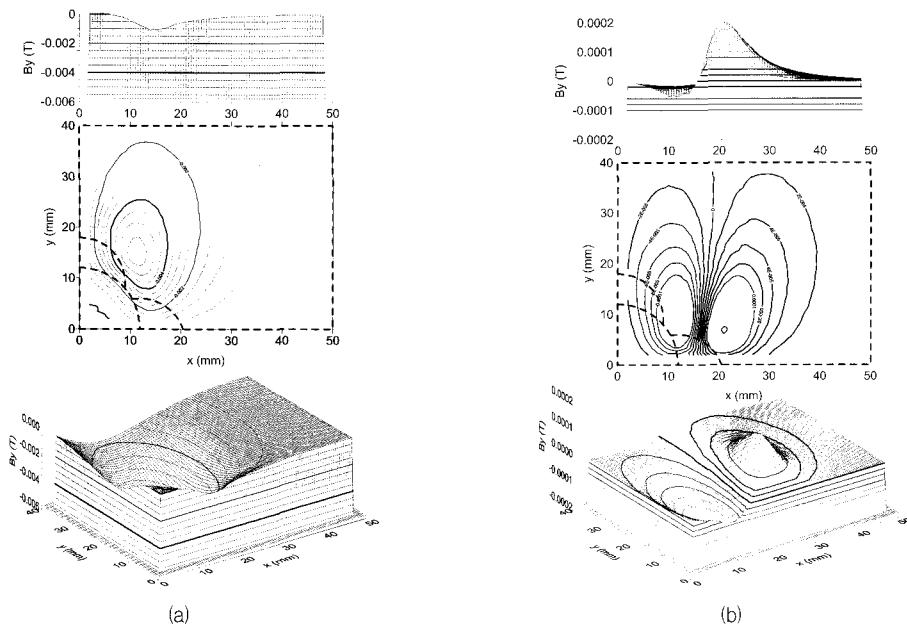


Fig. 4 Axial (x direction) profile, contour map, and surface plot of the anomalous circumferential MFL generated 1 mm above the near-side by a 50 % penetration 12 mm diameter far-side single pit obtained by subtracting (a) the no pit solution and (b) the corresponding isotropic solution

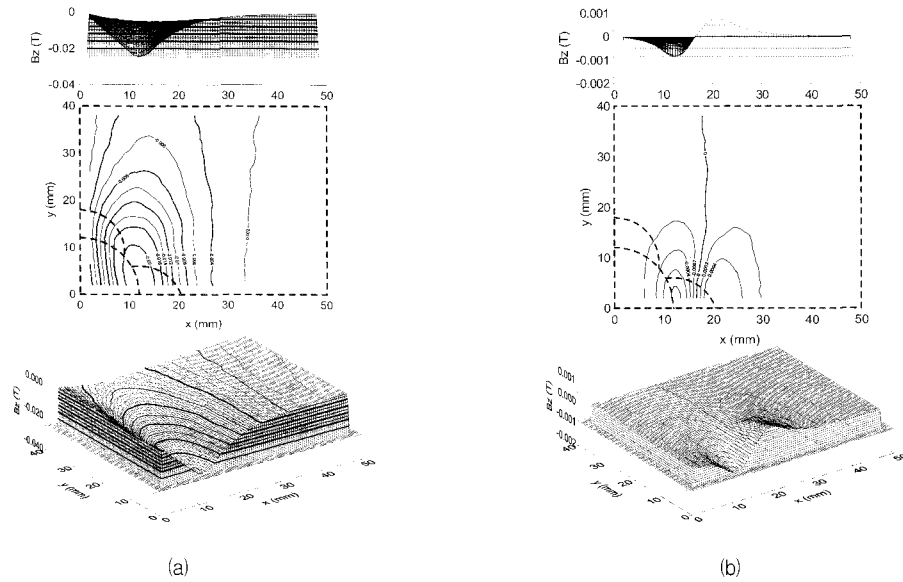


Fig. 5 Axial (x direction) profile, contour map, and surface plot of the anomalous radial MFL generated 1 mm above the near-side by a 50 % penetration 12 mm diameter far-side single pit obtained by subtracting (a) the no pit solution and (b) the corresponding isotropic solution

크 MFL 대 외부면 홈 깊이에 대한 효과가 Fig. 6에 주어져 있으며, 6(a)는 축 방향, 6(b)는 방사상 방향, 그리고 6(c)는 원주 방향의 MFL 신호를 나타낸다. 축 방향과 방사상 방향에 대한 MFL 신호는 깊이가 깊어질수록 응력이 커질수록 그 값이 커지나, 원주 방향의 MFL 신호는 그 크기가 작을 뿐만 아니라 변화도 거의 없다. 특히 Fig. 6(b)는 Mandal의 결과와 대단히 유사하다[6]. 내부면 홈 깊이에 대한

MFL 신호 변화는 Fig. 7에 주어져 있으며, 외부 면에의 효과와 마찬가지로 깊이가 깊어질수록 응력이 커질수록 그 값이 커짐을 알 수 있다. 그러나 내부면의 홈 깊이에 대한 MFL 신호는 선형적으로 변하나, 외부 면의 홈 깊이에 대해서는 비선형적으로 변함을 알 수 있다. 이는 외부 면의 경우 남아있는 배관 벽이 지속의 흐름을 방해하기 때문인 것으로 추측된다.

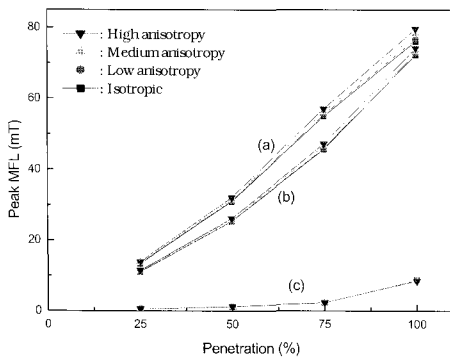


Fig. 6 Peak (a) axial, (b) radial and (c) circumferential MFL on the $x=0$ center line 1 mm above the plate for Isotropic, Low, Medium, and High anisotropy of the Side and Outer regions versus pit penetration from far side. The single pit has radius of 12 mm

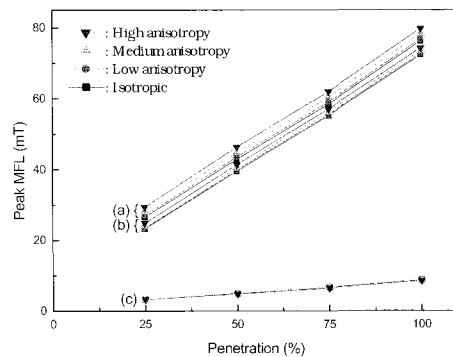


Fig. 7 Peak (a) axial, (b) radial and (c) circumferential MFL on the $x=0$ center line 1 mm above the Plate for Isotropic, Low, Medium, and High anisotropy of the Side and Outer regions versus pit penetration from near side. The single pit has radius of 12 mm

Fig. 8과 Fig. 9는 배관 외부 및 내부에서 등방성에 대한 세 가지 이방성의 퍼센트 MFL 변화를 나타내고 있으며, 내부 면에서 축 방향 및 방사상 방향의 퍼센트 변화는 이방성이 커질수록 증가하나, 원주 방향은 감소하는 경향을 보인다. 그러나 외부 면의 경우 이방성이 커질수록 퍼센트 변화는 커지나 깊이에 대한 변화는 일관된 모습을 보이지 않는다. 이는 흠과 data plane 사이에 존재하는 배관 면의 screen 효과에 기인하는 것으로 사료된다.

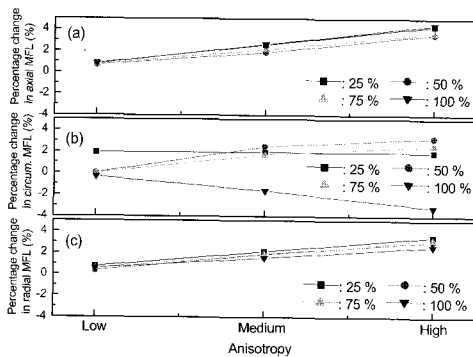


Fig. 8 The percentage change in (a) axial, (b) circumferential and (c) radial MFL at along ($y=0, z=7$) with respect to the isotropic at various anisotropies for 25%, 50%, 75%, and 100% far-side penetrations for the single pit.

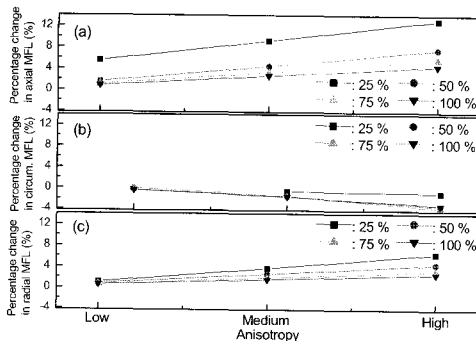


Fig. 9 The percentage change in (a) axial, (b) circumferential and (c) radial MFL at along ($y=0, z=7$) with respect to the isotropic at various anisotropies for 25%, 50%, 75%, and 100% near side penetrations for the single pit.

4. 결론

배관 내부압력에 의해 생성된 tensile circumferential stress, 배관 외·내부 면의 원형 흠 깊이가 MFL 신호에 미치는 효과를 조사하기 위하여 3 차원 유한요소법을 사용하였다. 응력이 증가하거나, 배관 외·내부 면의 흠 깊이가 깊어질수록 MFL 신호는 증가하였다. 응력과 관련된 MFL 신호의 변화는 자화 용이축의 방향 변경과 배관강의 이방성 정도에 기인한다.

흠의 깊이에 대한 축 및 방사상 MFL 신호의 증가는 내부 면의 흠에 대해서는 선형적이거나, 외부 면의 흠에 대해서는 비선형적이었다. 원주 MFL 신호는 거의 변화가 없었다. 따라서 MFL 신호에 의해 배관의 부식결함을 검사하는 경우 방사상이나 축방향의 누설자속을 측정하는 것이 유리하다. 내부 면의 흠에서 등방성에 대한 이방성의 백분율 변화는 흠의 깊이가 증가함에 따라 증가하며, 이는 자속선이 흠에서 배관 면을 쉽게 빠져나가기 때문이다. 그러나 외부 면의 흠에 대해서는 배관이 MFL 신호의 검출을 방해하므로 모사한 응력의 영향을 감소시켰다.

참고문헌

- [1] D. L. Atherton, "Magnetic inspection is key to ensuring safe pipelines", *Oil & Gas J.*, Vol. 87, No. 32, pp. 52-61 (1989)
- [2] D. L. Atherton, C. Jagadish, P. Laursen, V. Storm, F. Ham and B. Scharfenberger, "Pipeline inspection tool speed alters MFL signals", *Oil & Gas J.*, Vol. 88, No. 5, pp. 84-86 (1990)
- [3] P. Laursen and D. L. Atherton, "Effects of line pressure stress on magnetic flux leakage patterns", *British J. Nondestructive testing*, Vol. 34, No. 6, pp. 285-288 (1992)
- [4] R. Barnes and D. L. Atherton, "Effects of bending stresses on magnetic flux leakage patterns", *NDT & E International*, Vol. 26, No. 1, pp. 3-6 (1993)
- [5] T. W. Krause, R. W. Little, R. Barnes, R. M. Donaldson, B. Ma and D. L. Atherton, "Effect of stress concentration on magnetic flux leakage signals from Blind-hole defects in stressed pipeline steel", *Res. Nondestruct. Eval.*,

- Vol. 8, pp. 83-100 (1996)
- [6] K. Mandal, A. Corey, M. E. Loukas, P. Weyman, J. Eichenberger and D. L. Atherton, "The effect of defect depth and bending stress on magnetic Barkhausen noise flux-leakage signals", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 30, pp. 1976-1983 (1997)
- [7] L. Clapham, D. L. Atherton, A. Dhar, A. Hsu, C. Mandache, W. Mao and P. Weyman, "3D details of defect-induced MFL and stress in pipelines", *Ann. Rep. For Gas Res. Inst.*, contract # 5093-2605, p. 25 (2000)
- [8] W. Mao, C. Mandache, L. Clapham and D. L. Atherton, "The effect of bulk stresses on magnetic flux leakage signals", *Insight*, Vol. 43, No. 10, pp. 688-691, (2001)
- [9] W. Mao and D. L. Atherton, "Effect of tensile stress on the 3D reversible and irreversible differential magnetic susceptibilities", *J. Appl. Phys.*, Vol. 89, No. 11, pp. 7251-7253, (2001)
- [10] Infolytica Corp., P.O.Box 1144, 300 Leo Pariseau, Suite 2222, Montreal, Quebec, H2W 2P4, Canada; web site: <http://www.infolytica.com>
- [11] K. Mandal, D. Dufour, T. W. Krause and D. L. Atherton, "Investigation of magnetic flux leakage and magnetic Barkhausen noise signals from pipeline steel", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 30, pp. 962-973, (1997)
- [12] B. D. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley, Massachusetts (1972), pp. 271-271