

강자성 배관 외 · 내부 벽의 racetrack형 결함깊이와 부피응력이 누설자속에 미치는 영향

유권상* · 박영태

한국표준과학연구원 전자기표준부, 유성우체국사서함 102호 304-600

손대락

한남대학교 물리학과, 대전시 오정동 113, 300-791

D. L. Atherton, L. Clapham

Department of Physics, Queen's University, Kingston, ON, K7L 3N6, Canada

(2002년 12월 12일 받음, 2003년 3월 24일 최종수정본 받음)

비선형 자기이방성 물질을 이용하여 3차원 유한요소법으로 강자성 배관 벽에 형성된 결함 근처에서 누설되는 자속에 미치는 부피인장응력(bulk tensile stress) 및 수직 응력의 영향을 계산할 수 있다. 배관의 외 · 내부 벽의 racetrack형 결함(racetrack pit) 깊이와 계산된 부피응력(bulk stress)이 축(x) 방향, 원주(y) 방향 및 방사상(z) 방향의 누설자속에 미치는 영향을 계산하였다. 그 결과 배관의 축 및 방사상 방향의 MFL 신호는 배관 외 · 내부 면의 racetrack 결함깊이와 부피인장응력에 의해 영향을 받으며, 결함의 깊이가 깊어질수록 부피인장응력이 커질수록 MFL 신호는 증가하였다. 그러나 원주 방향의 MFL 신호는 결함깊이와 부피인장응력에 거의 영향을 받지 않았다.

주제어 : racetrack형 결함, 3차원 유한요소법, 누설자속, 결함깊이, 부피응력

I. 서 론

송유관이나 가스관은 유류나 가스와 같은 많은 양의 유체를 빠르고 안전하게 먼 거리에 운송할 수 있는 수단 중의 하나이고 그 매설 양은 매년 늘어나고 있다[1]. 매설된 배관은 토압과 항복강도의 70%에 해당하는 내부응력(line pressure)에 의해 인장응력(tensile stress)을 받는다[2-5]. 부식에 의한 홈과 같은 배관의 결함은 응력 상승자(stress raiser) 역할을 하여 궁극적으로 배관이 파괴될 수 있다[6, 7]. 따라서 주기적인 실시간(in-service) 검사가 필요하며 누설자속(Magnetic Flux Leakage: MFL) 측정법은 부식을 모니터링하기에 가장 적합한 방법 중의 하나이다[2]. 배관 외부 벽이나 내부 벽의 부식 홈은 MFL 신호를 생성시키며, 이 신호는 탐지코일이나 Hall 소자에 의해 측정된다. MFL 신호의 측정은 부식 홈의 깊이를 측정할 수 있고, 내부압력에 의해 유도된 국부적인 응력을 계산할 수 있으며 그 결과에 의해 배관의 수리나 교체를 결정할 수 있다[8]. MFL 신호를 정밀하게 분석하기 위해서는 측정 프로브의 측정속도와 내부 압력 응력(line pressure stress)과 같은 운용조건을 고려하여야 한다[9, 10].

본 논문에서는 배관 외 · 내부 벽의 racetrack 형 결함깊이

와 계산된 인장응력이 x-축 방향(배관의 축 방향), y-축 방향(배관의 원주 방향) 및 z-축 방향(배관의 방사상 방향)의 MFL 신호에 미치는 영향을 3D 유한요소법을 이용하여 계산하였다.

II. 3D 유한요소법 모델

MFL 신호는 배관의 응력상태에 강하게 종속한다[11]. 강(steel)은 양의 자기변형(positive magnetostriction)을 가지므로, 응력이 없는 경우 180° 자구는 자화용이축을 향하여 정렬하나, 응력이 작용하면 응력인가방향으로 정렬한다[12]. 즉, 투자율이 응력 방향으로 증가한다. 투자율은 자기이방성으로 계산할 수 있으므로, 응력집중효과와 결함깊이 영향을 계산하기 위하여 Fig. 1과 같은 모델을 사용하였다. Fig. 1(a)는 x-y면의 평면도이다. Plate는 양단에 있는 영구자석에 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 사용되었다. Plate의 면적은 72 mm×54 mm이고, 두께는 12 mm이며, 홈의 장축은 70 mm, 단축은 24 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

*Tel: (042)868-5164, E-mail: ryuks@kriss.re.kr

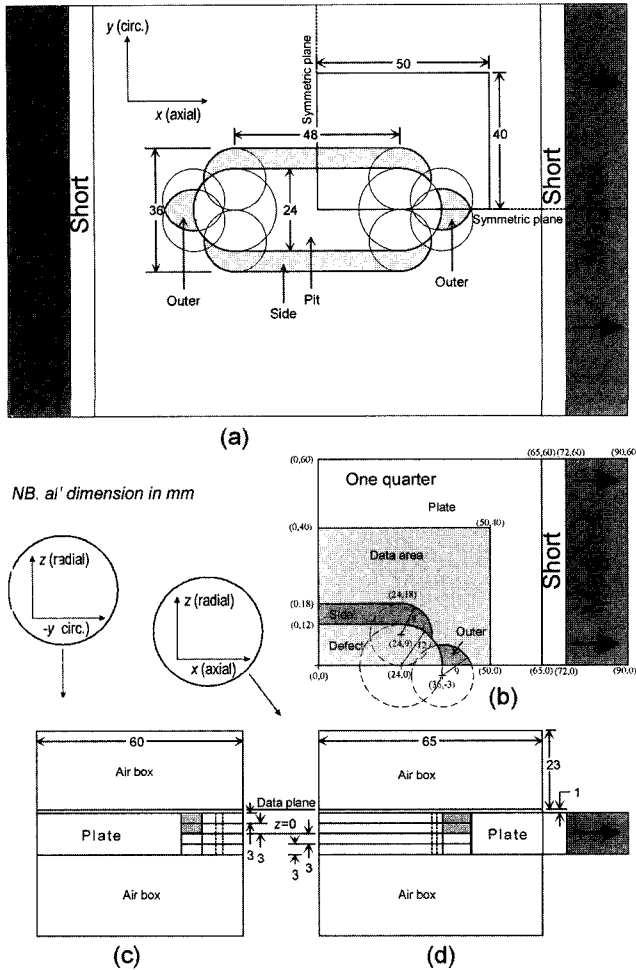


Fig. 1. Schematic diagrams of a racetrack pit model. Pit penetration is from the near-side of the data plane. (a) shows a plan view of the full model including two special anomalous regions in the Plate, Outer and Side. Only one-quarter of the model is used due to the symmetry. The data is computed for 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. The racetrack type defect has a 70 mm major axis and 24 mm minor axis.

스트레스를 인가하기 위한 특별 부분인 Outer와 Side가 홈 근처에 주어졌다. Outer와 Side를 제외한 Plate 부분은 등

방성 (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.

Outer와 Side 영역의 비선형 자성을 모델화하기 위하여 Infolytica 사의 소프트웨어 Magnet 6.5 version을 사용하였다 [13]. 배관의 축방향으로 높은 자기장(약 1.8 T)이 인가되도록 함으로 자화는 항상 자기장 방향으로 배향되는 것으로 가정할 수 있으며, 그 값은 arc-tangent 함수로 기술할 수 있다[10].

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

여기서 M_s 는 포화자화(=1.7 MA/m)이며, H_k 는 이방성에 종속되는 이방성 자기장으로 본 논문에서는 응력을 계산하기 위한 입력 인자이다.

식 (1)을 최대 투자율과 이방성 자기장으로 표현하면

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

이다. 여기서 μ_o 는 진공의 투자율이고, 최대투자율 μ_m 은 이방성자기장 H_k 에 반비례한다.

배관 원주 방향의 응력에 의해 홈 근처에는 인장 응력이 집중되며[14], 이를 모델에 반영하기 위해 응력 방향으로 보다 낮은 이방성 자기장이, 그리고 수직방향으로는 높은 이방성 자기장이 사용되었다. H_{kx} , H_{ky} 및 H_{kz} 는 물질의 세 방향의 직각 이방성 자기장을 나타내며, Fig. 1과 같이 x는 배관의 축방향, y는 원주방향, z는 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, 축 방향의 응력을 모사하기 위해 $H_{kx} = 6000$ A/m, $H_{ky} = H_{kz} = 9000$ A/m를 대입하여 계산하면 된다[10]. 응력을 모사하기 위한 이방성 파라미터가 Table 1에 주어져 있다.

III. 결과 및 논의

일반적으로 결함 탐상용 pig는 배관 내부를 지나기 때문에 내부 벽은 Fig. 1의 data plane이며, 내부 벽에 있는 50%의

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 (stress)]	8	y	8.5	x
Medium anisotropy [Medium permeability (stress)]	6	y	7	x
High anisotropy [Low permeability (stress)]	4	y	6	x

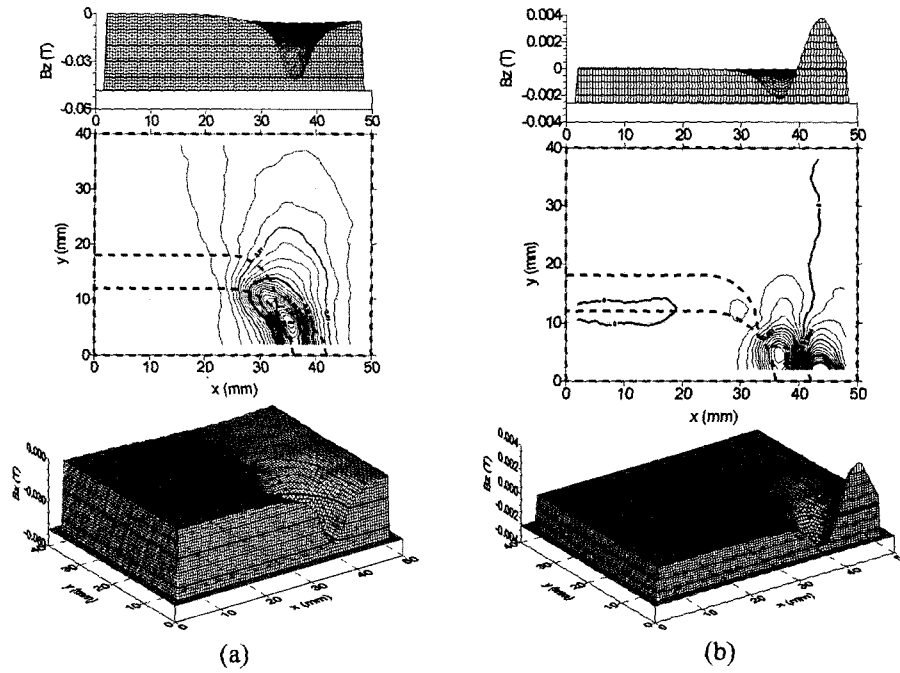


Fig. 2. Axial (x direction) profile, contour map, and surface plot of the anomalous radial MFL generated 1 mm above the inner surface by a 50% penetration near-side racetrack pit obtained by subtracting (a) the no pit solution and (b) the corresponding isotropic solution.

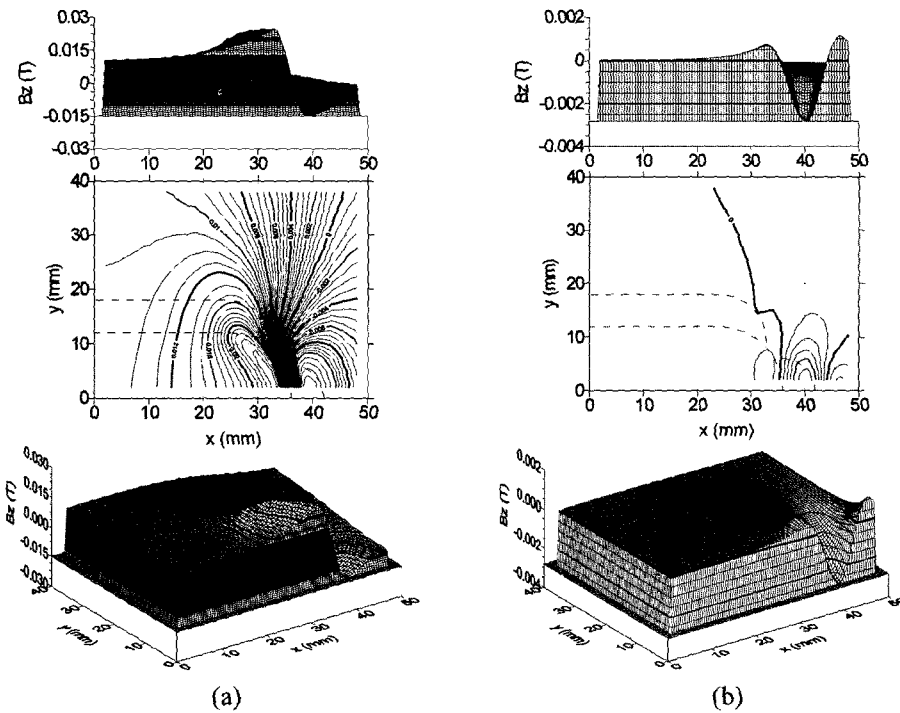


Fig. 3. Axial (x direction) profile, contour map, and surface plot of the anomalous axial MFL generated 1mm above the near-side by a 50% penetration near-side racetrack pit obtained by subtracting (a) the no pit solution and (b) the corresponding isotropic solution.

홈에 대해 내부 벽 위 1 mm에서 생성된 축, 원주 및 방사상 MFL 신호의 축 (x) 방향에 대한 profile, x-y 평면에서의 등고선 및 표면 도면(surface plot)에 대해 홈이 없을 때의 MFL

신호를 뺀 값이 각각 Fig. 2(a), Fig. 3(a) 및 Fig. 4(a)에 주어져 있다. 이 그림들에서 결함의 깊이가 MFL 신호에 미치는 영향을 계산할 수 있으며, 방사상 방향의 MFL 신호는 결함

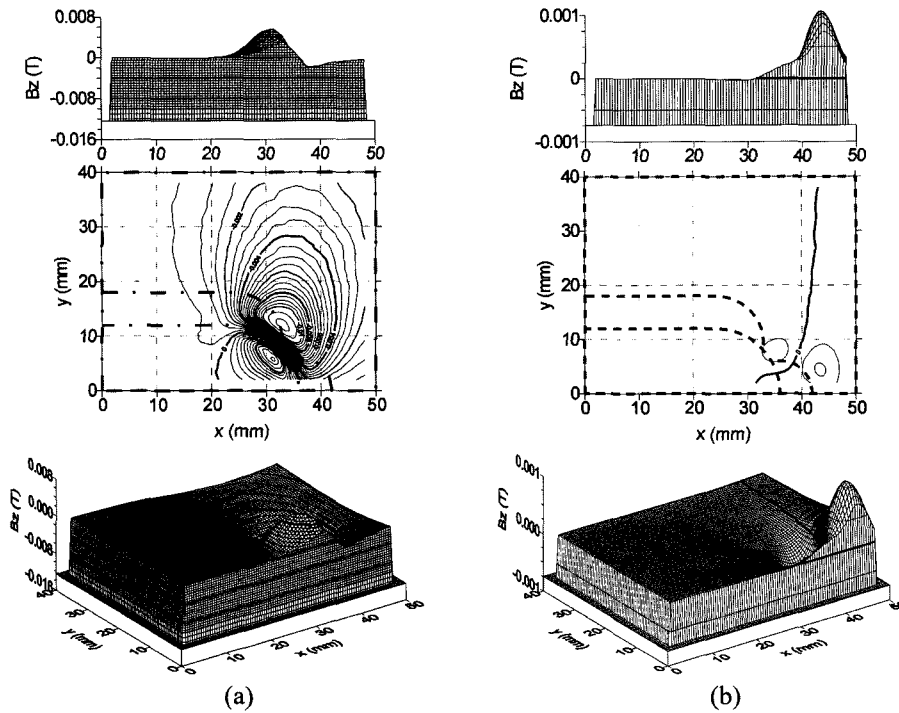


Fig. 4. Axial (x direction) profile, contour map, and surface plot of the anomalous circumferential MFL generated 1 mm above the near-side by a 50% penetration near-side racetrack pit obtained by subtracting (a) the no pit solution and (b) the corresponding isotropic solution.

의 끝 부분에 가장 크게 나타난다. 그리고 축방향의 MFL 신호는 결함 끝 부분에서 양의 값에서 음의 값으로 바뀌는 것을 알 수 있으며, 원주 방향의 MFL 신호도 바뀌나 그 크기가 미미함을 알 수 있다. 축, 원주 및 방사상 방향에 대한 MFL 신호의 응력 영향을 나타내기 위하여 높은 이방성(High anisotropy)에서 계산한 MFL 신호에서 등방성(Isotropic)에서 계산한 MFL 신호를 뺀 값을 나타내는 그래프가 Fig. 2(b), Fig. 3(b) 및 Fig. 4(b)에 각각 주어져 있다. 이 그림들에서 응력이 MFL 신호에 미치는 영향을 계산할 수 있으며, 방사상 방향의 MFL 신호는 Outer에서 음의 값에서 양의 값으로 바뀌나 결함 깊이의 영향보다 10배 정도 적음을 알 수 있다. 그리고 축방향의 MFL 신호는 Outer에서 가장 큰 값을 가지며 원주 방향의 MFL 신호는 Outer에서 최대값을 가지나 두 방향보다 작음을 알 수 있다. 응력에 의한 MFL 신호변화는 영구자석에 의해 축방향으로 정렬된 자화가 수직방향으로 인가된 응력에 의해 원주방향으로 회전하기 때문이다[15].

Side와 Outer의 등방성, 낮은 이방성(Low anisotropy), 중간 이방성(Medium anisotropy) 및 높은 이방성에 대한 peak-to-peak 방사상 MFL($y = 0 \text{ mm}$, $z = 7 \text{ mm}$) 대 내부 벽 홈 깊이에 대한 효과가 Fig. 5에 주어져 있으며, 5(a)는 축 방향, 5(b)는 방사상 방향 그리고 5(c)는 원주 방향의 MFL 신호를 나타낸다. 축 방향과 방사상 방향에 대한 MFL 신호는 깊이가 깊어질수록 응력이 커질수록 그 값이 커지나, 원주 방향의

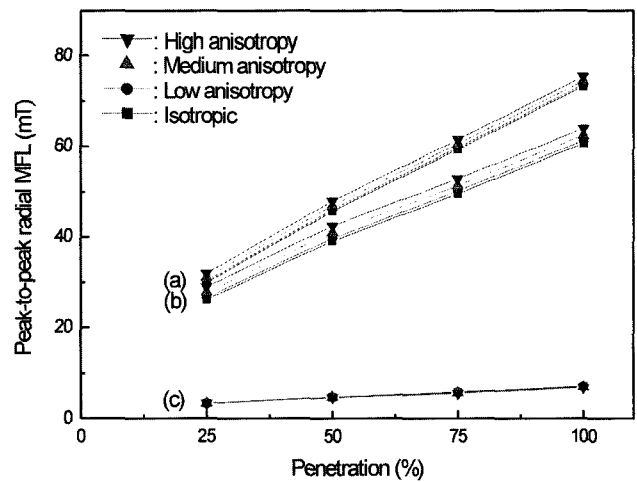


Fig. 5. Peak-to-peak (a) axial, (b) radial and (c) circumferential MFL on the $x=0$ center line 1 mm above the plate, ($y=0$, $z=7$), for Isotropic, Low, Medium, and High anisotropy of the Side and Outer regions versus pit penetration from far side.

MFL 신호는 그 크기가 작을 뿐만 아니라 변화도 거의 없다. 외부 벽의 홈 깊이에 대한 MFL 신호 변화는 Fig. 6에 주어져 있으며, 내부 벽에서의 효과와 마찬가지로 깊이가 깊어질수록 응력이 커질수록 그 값이 커짐을 알 수 있다. 그러나 내부 벽의 홈 깊이에 대한 MFL 신호는 선형적으로 변하나 외부 벽의 홈 깊이에 대해서는 비선형적으로 변함을 알 수

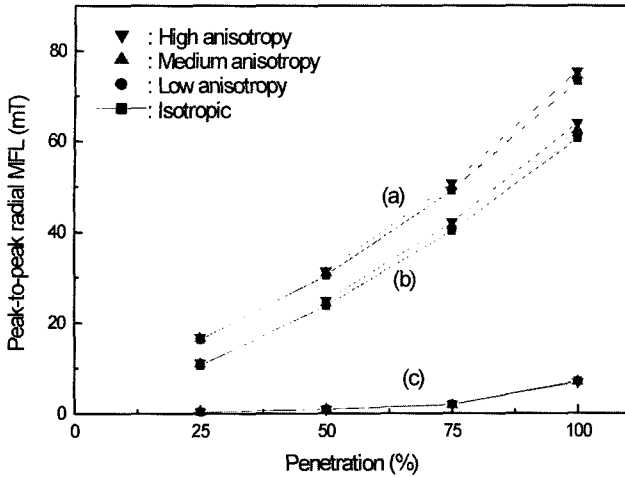


Fig. 6. Peak-to-peak (a) axial, (b) radial and (c) circumferential MFL on the $x=0$ center line 1 mm above the Plate, ($y=0, z=7$), for Isotropic, Low, Medium, and High anisotropy of the Side and Outer regions versus pit penetration from near side.

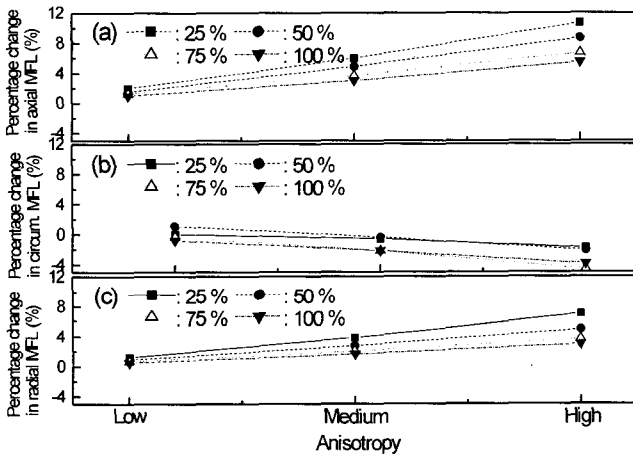


Fig. 7. The percentage change in (a) axial, (b) circumferential and (c) radial MFL at along ($y=0, z=7$) with respect to the no-stress value at various anisotropies for 25%, 50%, 75%, and 100% far-side penetrations for the double pit.

있다. 이는 외부 벽에 있는 결함의 경우 남아있는 배관 벽이 자속의 흐름을 방해하기 때문인 것으로 추측된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 배관 내부 벽과 외부 벽의 결함에서 등방성에 대한 세 가지 이방성의 백분을 MFL 신호변화를 결함의 깊이함수로 나타내고 있으며, 축 및 방사상 방향의 백분을 변화는 이방성이 커질수록 증가하나, 결함깊이가 깊어질수록 감소한다. 원주 방향의 백분을 변화는 이방성이 커질수록 감소하는 경향이 있으나, 결함깊이에 대해서는 일관된 경향을 보이지 않는다. 이는 결함과 data plane 사이에 존재하는 배관 벽의 screen 효과에 기인하는 것으로 사료된다.

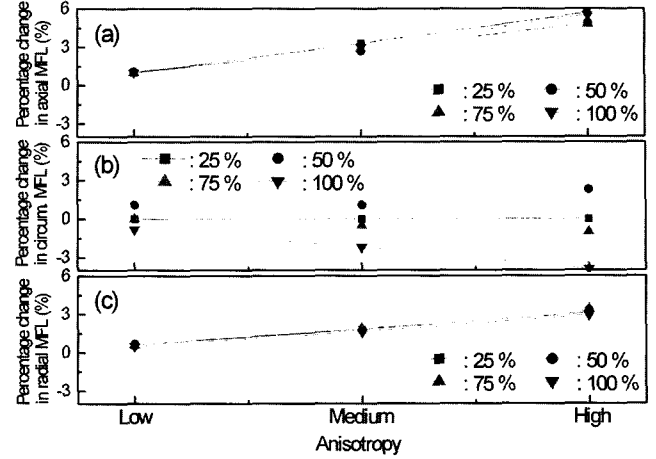


Fig. 8. The percentage change in (a) axial, (b) circumferential and (c) radial MFL at along ($y=0, z=7$) with respect to the no-stress value at various anisotropies for 25%, 50%, 75%, and 100% near side penetrations for the double pit.

IV. 결 론

3차원 유한요소법을 사용하여 배관 내부압력에 의해 생성된 tensile circumferential stress, 배관 내·외부 벽의 결함깊이가 MFL 신호에 미치는 효과를 계산하였다. 응력이 증가하거나, 배관 내·외부 벽의 결함깊이가 깊어질수록 MFL 신호는 증가하였다. 응력에 의한 MFL 신호변화는 영구자석에 의해 축 방향으로 정렬된 자화가 원주 방향으로 인가된 응력에 의해 원주 방향으로 회전하기 때문이다.

결함의 깊이에 대한 축 및 방사상 MFL 신호의 증가는 내부 벽의 결함에 대해서는 선형적이나, 외부 벽의 결함에 대해서는 비선형적이었다. 원주 MFL 신호는 거의 변화가 없었다. 내부 벽의 결함에서 등방성에 대한 이방성의 백분을 변화는 결함의 깊이가 증가함에 따라 감소하였으며, 이는 자속선이 결함에서 배관 벽을 쉽게 빠져나가기 때문이다. 그러나 외부 벽의 결함에 대해서는 배관이 MFL 신호의 검출을 방해하므로 모사한 응력의 영향을 감소시켰다. MFL 검사의 목적은 배관의 최대 허용 압력을 계산하기 위해 결함의 깊이를 평가하는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 김영환, "배관의 진단(I)", 비파괴검사학회지, **18**(2), 121(1998).
- [2] D. L. Atherton, Oil & Gas J., **87**(32), 52(1989).
- [3] D. L. Atherton, C. Jagadish, P. Laursen, V. Storm, F. Ham and B. Scharfenberger, Oil & Gas J., **88**(5), 84(1990).
- [4] P. Laursen and D. L. Atherton, British J. Nondestructive testing, **34**(6), 285(1992).
- [5] R. Barnes and D. L. Atherton, NDT&E International, **26**(1), 3

- (1993).
- [6] T. W. Krause, R. W. Little, R. Barnes, R. M. Donaldson, B. Ma and D. L. Atherton, *Res. Nondestr. Eval.*, **8**, 83(1996).
- [7] K. Mandal, A. Corey, M.E. Loukas, P. Weyman, J. Eichenberger and D. L. Atherton, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **30**, 1976(1997).
- [8] K. S. Ryu, D. L. Atherton, L. Clapham, *Insight*, **44**(5), 285(2002).
- [9] L. Clapham, D. L. Atherton, A. Dhar, A. Hsu, C. Mandache, W. Mao and P. Weyman, *Ann. Rep. For Gas Res. Inst.*, contract # 5093-2605, p. 25(2000).
- [10] W. Mao, C. Mandache, L. Clapham and D. L. Atherton, *Insight*, **43**(10), 688(2001).
- [11] L. Clapham, K. Mandal, R. Sabet-Sharghi, D. L. Atherton, T. Holden, A. Teitsma, P. Laursen and B. Mergeles, *Proc. 1st International Pipeline Conference*, Calgary, June 7-11, 1, 505(1998).
- [12] T. W. Krause, L. Clapham, and D. L. Atherton, *J. Appl. Phys.* **75**(12), 7983(1994).
- [13] Infolytica Corp., P.O. Box 1144, 300 Leo Pariseau, Suite 2222, Montreal, Quebec, H2W 2P4, Canada; web site: <http://www.infolytica.com>.
- [14] K. Mandal, D. Dufour, T. W. Krause and D. L. Atherton, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **30**, 962(1997).
- [15] B. D. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley, Massachusetts (1972), pp. 271-274.

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

K. S. Ryu* and Y. T. Park

Electromagnetics Metrology Div., KRISS, Taejon 305-600, Korea

D. Son

Department of Physics, Hannam University, Taejon, 300-791, Korea

D. L. Atherton and L. Clapham

Department of Physics, Queen's University, Kingston, ON, K7L 3N6, Canada

(Received 12 December 2002, in final form 24 March 2003)

Non-linear anisotropic materials were used to simulate the effects of bulk tensile stress in 3D finite element analysis (FEA). FEA was used to calculate the effects of near and far-side racetrack pit depth and simulated bulk tensile stress on magnetic flux leakage (MFL) signals. The axial and radial MFL signals were depended on near and far-side racetrack pit depth and on the bulk stress, but the circumferential MFL signal was not depended on them. The axial and radial MFL signals increased with greater pit depth and applied bulk stress, but the circumferential MFL signal was scarcely changed.

Keywords : racetrack pit, 3D finite element analysis, magnetic flux leakage, pit depth, bulk stress