

가스공급배관에서 응력부식균열 군에 의해 교란된 자속의 유한요소 모델링

Finite Element Modeling of Perturbation Fields due to Colonies of Stress Corrosion Cracks(SCCs) in a Gas Transmission Pipeline

양 선 호*
 Sunho Yang*

초 록 기존의 누설자속 탐상용 pig를 이용한 가스배관 검사시 축 방향 결함의 검출은 매우 어렵다. 본 논문에서는 원주 방향의 전류와 축 방향 응력부식균열(SCC)의 상호작용을 이용한 새로운 기술을 소개한다. 이 방법의 타당성은 유한요소법을 통하여 연구하였는데, 이러한 상호작용의 유한요소 해석은 재료의 비선형성, 무제적성 균열의 작은 크기, 속도 효과를 고려한 시간 단계별 계산등으로 인한 컴퓨터성능 제한으로 매우 어렵다. 이 논문에서는 이 문제점을 해결하기 위해 교란방법(perturbation method)을 이용한 새로운 방법을 제시하였다. 전체 해석과정은 순차적으로 수행할 수 있는 4개의 간단한 과정들로 나누어 수행하였다. 모델링 결과는 이 방법이 하나의 SCC 또는 여러개가 존재하는 SCC 군을 효과적으로 검출 할 수 있음을 보여 주었다.

주요용어: 누설자속탐상, 응력부식균열, 속도효과, 교란자계

Abstract: The detection of axial cracks using conventional MFL pig is a significant challenge in the gas pipeline inspection. In this study, a technique using interaction of circumferentially induced currents with axial stress corrosion crack is presented. The feasibility of this technique is investigated using finite element modeling. Finite element analysis of such interaction is a difficult problem in terms of both computation time and memory requirements. The challenges arise due to the nonlinearity of material properties, the small size of tight cracks relative to that of the magnetizer, and also time stepping involved in modeling velocity effects. This paper presents an approach based on perturbation methods. The overall analysis procedure is divided into 4 simple steps that can be performed sequentially. Modeling results show that this technique can effectively detect colonies of SCC as well as single SCC.

Keywords: magnetic flux leakage, stress corrosion cracks, velocity effects, perturbation fields

1. 서 론

응력부식균열 (Stress Corrosion Cracking, SCC)은 배관 결함 탐상에 있어서 매우 큰 문제이다. 배관의 SCC에 대

한 첫 사례는 1965년에 보고 되었다. 이후, SCC의 본질과 이에 대한 문제점에 대해 많은 연구가 진행되었다[1]. SCC는 응집, 사용환경 그리고 온도에 기인하여 발생하며 배관에 결함을 생기게 하고 커지게 한다. 개별 결함은 일

반적으로 최대 응력에 직각으로 발생하고 배관 축 방향에 평행하게 발생한다[2]. 일반적으로, 천연가스공급배관의 비파괴검사방법으로는 누설자속탐상법(MFL)이 많이 사용된다. 이 탐상 방법에서는, 배관 벽은 축 방향으로 자화되고 배관에 생기는 결함에 의해 발생하는 누설자속을 감지하기 위해 원주방향으로 배열된 Hall 센서를 사용한다. Fig. 1은 전형적인 'pig'로 불리는 누설자속탐상장비와 배관벽 안의 자속분포를 보여준다. 영구자석을 사용하여 형성되는 축 방향의 자계는 원주방향의 결함의 탐상에는 유용하나 축 방향으로 형성되는 SCC에는 민감하지 않다. 이 문제에 대한 해결방법으로는, 영구자석의 움직임에 의해 발생하는 원주방향의 전류에 의한 자계를 이용하는 것이다 [3]. 배관 안에서 탐상장비는 배관 축 방향으로 움직이므로, $\vec{v} \times \vec{B}$ 에 의한 운동 기전력(motional emf)은 영구자석의 두 극 사이에서는 무시될 수 있다. 그러나, 자극 부

근에서는 방사(radial) 방향의 자속이 축 방향으로 이동하므로 매우 큰 원주방향의 전류가 배관내에 유도된다. Fig. 2에서 보여주듯이, 이렇게 유도된 전류와 축 방향의 SCC는 전류의 교란(perturbation current)을 일으키게된다. 교란된 전류에 의해 발생하는 자계는 축 방향의 SCC의 존재에 대한 많은 정보를 가지고 있다. 본 논문에서는 SCC 검출을 위한 이 방법의 이론적 검토를 보여줄 것이다. Atherton and Mergelas는 와류전류와 결함간의 상호작용에 관해 연구한 바 있으며, 결함은 표면의 솔레노이드(solenoidal)전류와 전류 루프(loop)의 조합으로 모델 되었다[4]. 그러나, 이 모델은 다소 정량적 접근이었다. 본 논문에서는, 축 방향의 SCC에 의한 원주방향의 전류 교란현상을 유한요소법을 사용하여 모델링 하였다. 전류교란은 magnetizer의 원격영역(remote region)에서 고려되었다. 원격영역에서의 속도에 의한 유도자계의 시뮬레이션을 위해 3차원 유한요소법이 사용되었고, 이 자계에 대한 SCC의 영향을 고찰하였다. 하나의 대칭적인 SCC에 의한 교란자계의 검출 가능성은 [5]에 보여주었다. 그러나, 일반적으로 SCC는 군집적으로 발생하므로, 대칭성을 보장 할 수 없다. 본 논문에서는 SCC군을 탐상 할 수 있는 모델을 제시하였다.

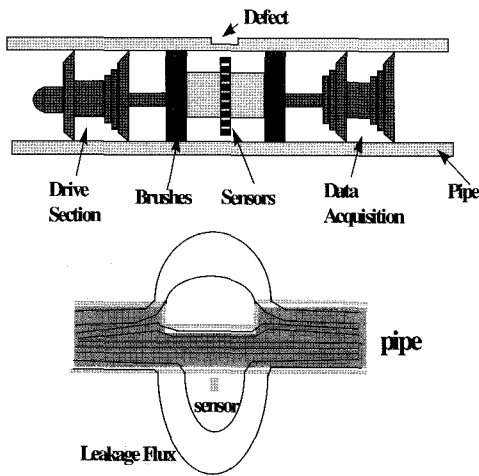


Fig. 1 Schematic of pig and flux distribution in the pipewall.

2. 유한요소해석기법

축 방향의 SCC와 원주방향의 전류의 상호작용 모델링은 컴퓨터성능 제한 등으로 매우 어렵다. 강자성 재료의 비선형성과 속도효과 시뮬레이션을 위한 시간단계별 계산(time stepping) 등이 모델링을 아주 어렵게 한다. 이와 같은 문제의 해결을 위해 본 논문에서는 전체 작업을 순차적으로 수행 할 수 있는 4개의 간단한 하부 작업으로 나누어 수행하였다. 이 절차를 간단히 정리하면 다음과 같다.

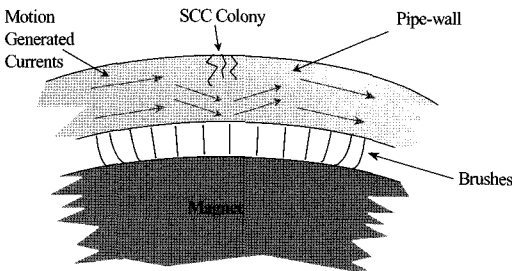


Fig. 2 Perturbation of motion induced current

- Step 1. 배관과 상대적으로 축 방향으로 움직이는 magnetizer에 의해 결함이 없는 배관벽에 발생하는 속도에 의한 유도전류 \vec{J}_0 를 계산하였다.
- Step 2. 먼저 결함은 부도체라고 가정하고, SCC를 나타내는 절점(node)i에 전류 $-\vec{J}_0$ 를 인가함으로써 밀착결함(tight crack)을 모델링 하였다. 그리고, 총 교란전류 \vec{J}_p 를 구하였다.
- Step 3. 코일을 사용하여 측정할 수 있도록 교란 자속

밀도를 Step 2의 결과를 이용하여 계산한다.

Step 4. 교란 자속으로 인해 유도되는 코일 기전력을 계산한다.

각 step과 관련한 자세한 사항은 아래에 설명하였다.

Step 1. 속도에 의한 유도전류계산 (Calculation of Velocity Induced Currents)

이 step에서는 결함이 없는 배관과 그 속에서 일정한 속도 \vec{v} 로 움직이는 magnetizer가 모델링 되었다. 지배방정식은

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} = \vec{J}_s - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \vec{v} \times \nabla \times \vec{A} \dots\dots\dots (1)$$

결함이 없을 때 형태는 축 대칭이고 따라서 지배방정식은

$$\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rA_\phi) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\partial A_\phi}{\partial z} \right) \right] \dots\dots\dots (2)$$

$$= \sigma \frac{\partial A_\phi}{\partial t} + \sigma v_z \frac{\partial A_\phi}{\partial z} - J_s$$

$\sigma \frac{\partial A_\phi}{\partial t}$ 항은 결함과 magnetizer 사이의 거리 변화에 의해 발생하는 시변자계 때문에 생기는 전류밀도이다. 결함이 없는 배관의 경우 이 항은 0 이다. 속도 항 $\sigma v_z \frac{\partial A_\phi}{\partial z}$ 은 Leismann-Frind법을 이용하여 모델링되었다[6]. 1D 경우의 Leismann-Frind 식은[7]:

$$\left[\frac{\sigma}{\Delta t} - \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \theta_a \frac{\sigma v^2 \Delta t}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] A^{n+1} \dots\dots\dots (3)$$

$$= J_s + \left[\frac{\sigma}{\Delta t} + (1 - \theta_a) \frac{\sigma v^2 \Delta t}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \sigma v \frac{\partial}{\partial z} \right] A^n$$

결함이 없는 배관 내에서 속도에 의한 유도전류 \vec{J}_0 는 다음과 같다.

$$\vec{J}_0 = -\sigma \vec{v} \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \dots\dots\dots (4)$$

Fig. 3은 결함이 없는 배관에서 속도가 5 m/s일 때 배관에 분포되어있는 속도에 의한 유도전류를 보여준다. 배

관의 내벽(1) 배관벽의 중간(2) 그리고 배관의 외벽(3)에서의 전류분포를 보여준다. 전류는 배관 내벽에서 외벽으로 갈수록 줄어든다.

Step 2. SCC에 의한 교란전류계산 (Calculation of Perturbation Current by SCC)

우선 원격영역에 채적이 0인 밀착결함 (Ω_{defect})이 있다고 가정한다. 이 step에 있어서 기본적인 가정은 원격영역에서의 선형성이다. 이 가정은 원격장 영역에 유도되는 전류가 매우 작으므로 정당화될 수 있다. SCC에 의해 생기는 총 전류 \vec{J}_t 는 결함이 없는 배관에 생기는 전류 \vec{J}_0 와 SCC에 의한 교란전류 \vec{J}_p 의 합이다.

$$\vec{J}_p = \begin{cases} -\vec{J}_0 & \text{on } \Omega_{defect} \\ \text{unknown} & \text{on } \Omega_{defect}^c \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

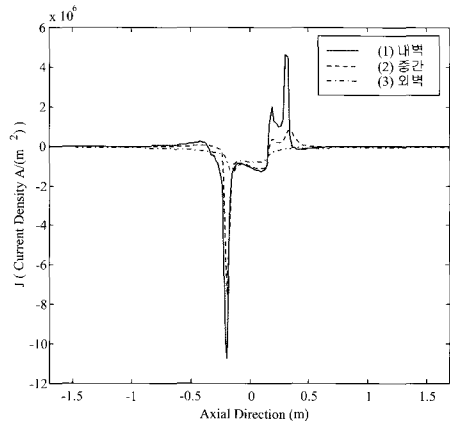


Fig. 3 Motion induced current distribution in the pipe wall (velocity : 5 m/s),

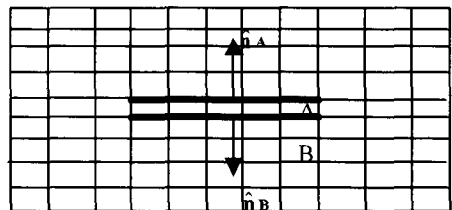


Fig. 4 Double layer source model

여기서 Ω_{defect}^c 는 균열외의 영역을 뜻한다. 총 전류는

$$\vec{J}_t = \vec{J}_0 + \vec{J}_p \dots\dots\dots (6)$$

결합 Ω_{defect} 에서는

$$\vec{J}_p = -\vec{J}_0 = \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla V \right) \dots\dots\dots (7)$$

여기서 V 는 전기스칼라포텐셜이다. $\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ 항을 무시하고, Neumann 경계조건을 결합의 양면에 주면

$$\frac{\partial V}{\partial n} \Big|_i = -\frac{\vec{J}_0}{\sigma} \text{ on } A \quad \frac{\partial V}{\partial n} \Big|_i = \frac{\vec{J}_0}{\sigma} \text{ on } B \dots\dots\dots (8)$$

각 A와 B의 법선방향은 Fig. 4에 표시되어 있다. 배관 벽안의 축 방향의 SCC에 의한 교란전류 \vec{J}_p 의 분포를 구하기 위해 다음과 같은 Laplace 방정식을 풀었다.

$$\nabla^2 V = 0 \dots\dots\dots (9)$$

Step 3. 교란전류에 의한 자계 계산 (Calculation of Current Perturbation Fields)

이 step에서는 교란전류에 의한 자속밀도를 계산하였다. 지배방정식은 벡터자기포텐셜로 나타내지는 3차원 Poisson방정식이다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} = \vec{J} \dots\dots\dots (10)$$

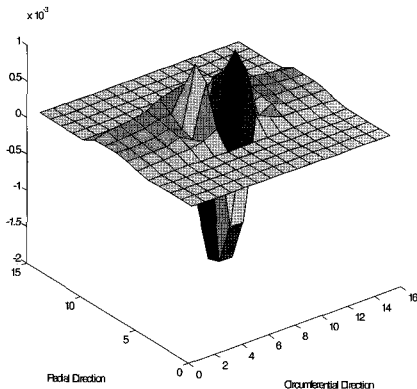


Fig. 5 Axial component of fields for a 8 cm length and 60% depth defect

여기서 \vec{J}_p 는 step 2에서 구한 교란전류이다. 위 식의 해는 \vec{A} 의 첫 번째 근사해이며, 식 (7)에서 $\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ 항의 계산에 사용되어 step2와 3이 수렴될 때까지 반복 계산된다. 최종 해 \vec{A} 는 교란전류에 의한 자속밀도, $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ 를 구하는데 사용된다. Fig. 5는 step 3에서 얻은 축 방향 성분의 자속밀도 B_z 분포이다. 결합신호는 자계의 축 방향성분 B_z 와 직각으로 위치한 코일에 유기되는 전압을 측정함으로써 얻을 수 있다.

Step 4. 교란자속으로 인한 코일 유도기전력 계산 (Calculation of induced coil emf due to perturbation flux)

탐상 장비의 움직임은 고정되어 있는 pig릿 센서코일과 이와 상대적으로 움직이는 결합에 의해 모델링되었다. 각 위치에서, 축 방향의 성분에 의한 총 자속 ϕ 는 다음과 같고

$$\phi_i = \int B_z \cdot ds \dots\dots\dots (11)$$

센서코일에 유기되는 기전력은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$V_i = -N \frac{d\phi_i}{dt}, \quad i = 1, 2, \dots, n \dots\dots\dots (12)$$

여기서 V_i 는 교란전류에 의한 자계의 축 방향 성분으로 계산된 결합신호이고, N 은 코일의 권선수 이다.

3. 수치해석결과

Fig. 6은 본 논문에서 제시한 4단계 해석방법의 전체과정을 보여준다. Fig. 7은 유한요소법에서 사용된 검사대상형태이다. Magnetizer와 센서코일은 두께가 9mm인 배관 안에서 고정된 속도 5m/s로 움직인다. 결합이 없을 때에는, 형태가 축 대칭이므로 step 1에서는 각 시간 단계에서 속도에 의해 유도된 전류를 구하기 위해 축대칭 모델이 사용되었다. Step 2와 step 3에서는, 축 방향의 SCC근처의 사각형으로 표시된 부분을 step 1의 전류를 이용하여 3차원으로 모델링 하였다. 센서는 1권선 코일로

간주하였다. 이 코일은 배관내벽에서 0.1cm 아래, magnetizer로부터 30cm 뒤쪽의 원격영역에 위치하고 2.45cm × 6.25cm 크기이다. 코일면은 배관의 축 방향과 직각이다. 결함신호는 교란자계의 축 방향 성분에 의해 코일에 유기 되는 전압이다. SCC군을 모델링 하기위해 2층의 절점(double layer node)모델이 사용되었다. 같은 깊이와 길이 (60% 깊이와 8cm 길이)의 두개의 평행한 결함이 모델링 되었다. 이 모델에 의한 교란전류는 Fig. 8(a),(b)에 보였다. 총 전류는 Fig. 8(c),(d)에서 볼 수 있다. Fig. 9는 하나의 SCC(파선)과 두 개의 평행한 SCC(실선)에 의한 유도 전압을 보여준다. SCC군을 모델링 하기 위해서, 배관 축과 각을 이루는 SCC를 고려해야 할 경우, Neumann 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial V}{\partial n} \Big|_i = -\frac{\vec{J}_0}{\sigma} \cos \theta \dots\dots\dots (13)$$

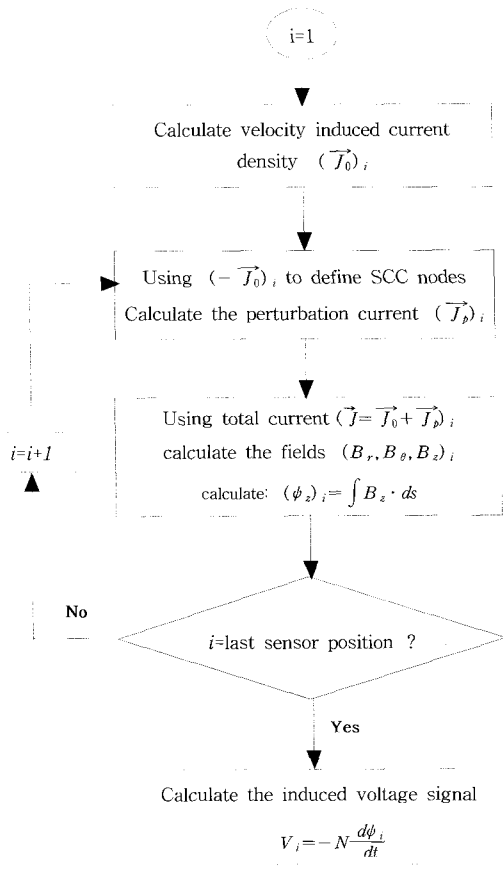


Fig. 6 Flow chart of the four-step procedure

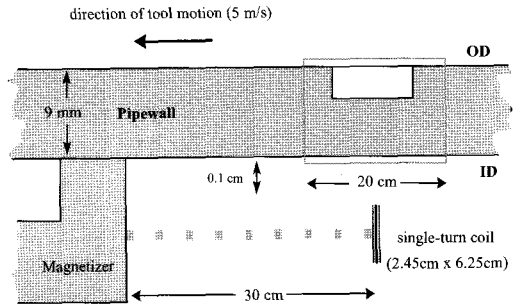
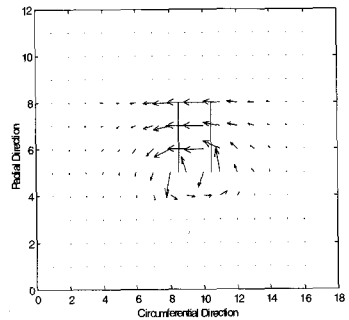
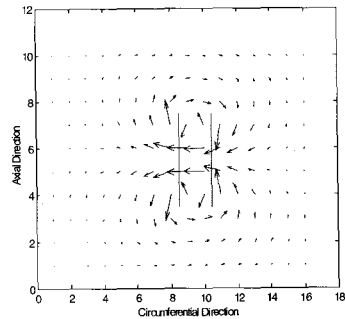


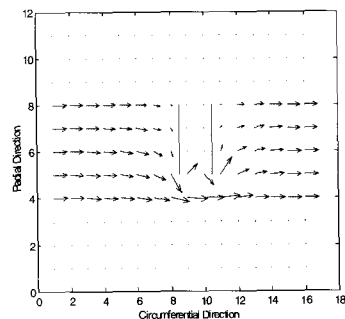
Fig. 7 Geometry used in the simulation



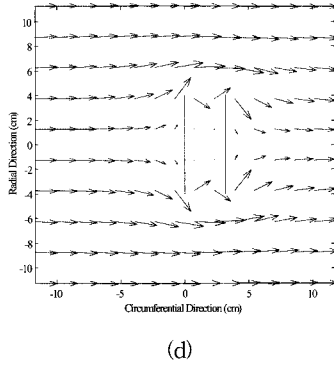
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 8 Step 2 results using double layer source model, perturbation current
 (a) side view
 (b) top view, total current (background + perturbation current)
 (c) side view
 (d) top view

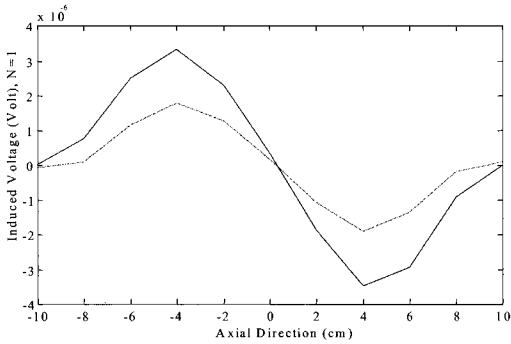


Fig. 9 Induced voltage due to single and parallel SCC

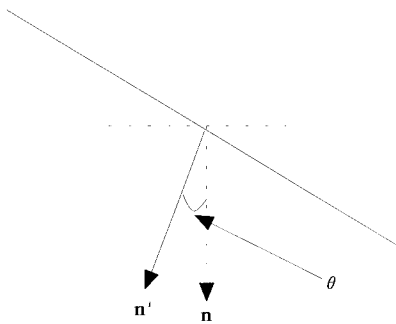


Fig. 10 Angle θ between the normal direction n to the parallel defect and normal direction n' to the angular defect

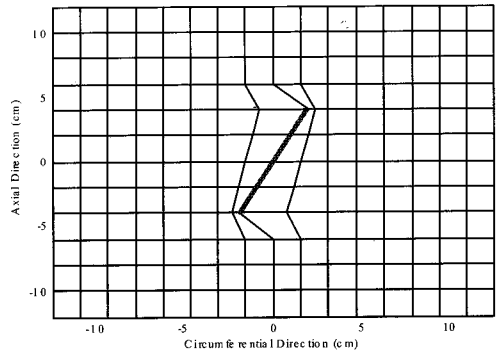


Fig. 11 Mesh for angular defect

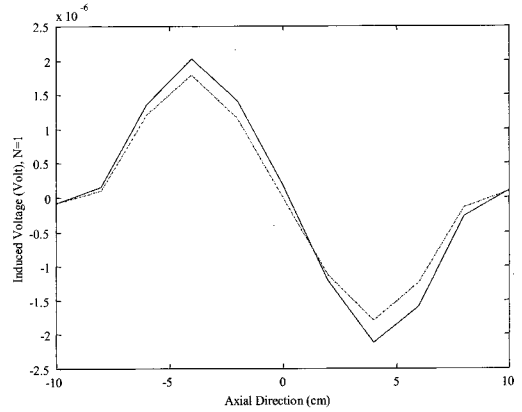


Fig. 12 Induced voltage for parallel and angular defect

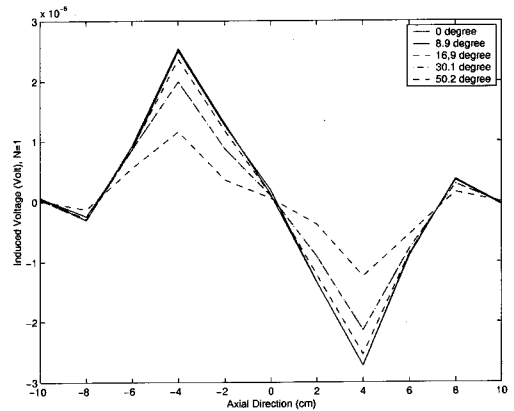
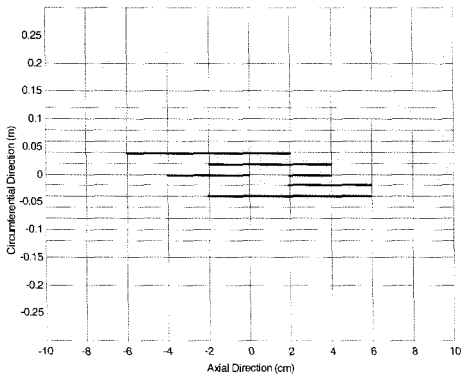
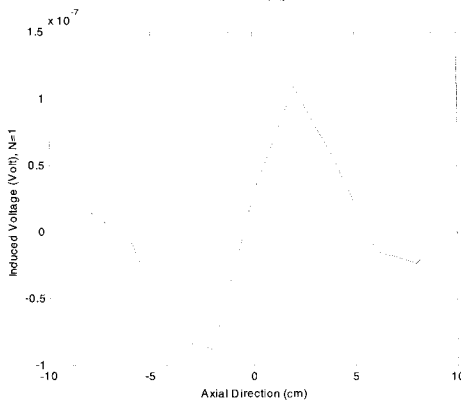


Fig. 13. Induced voltage signals as a function of different angles

여기서 Fig. 10에 표시한 θ 는 축 방향과 평행한 결함의 법선방향 n 과 축 방향과 각을 이루는 결함의 법선방향 n' 이 이루는 각이다. Fig. 11은 각을 이루는 결함의 요소분할도를 보여준다. 이 경우에 있어서 결함이 이루는 각은 26 도이다. Fig. 12는 각을 이루는 결함에 의한 유도전압의 감소를 보여준다. 실선은 전류와 직각을 이루는 결함에 의한 신호이며, 파선은 전류와 각을 이루는 결함에 의한 신호이다. Fig. 13은 각도별 신호 변화를 보여준다. 본 논문에서는 두 가지 경우의 SCC군이 연구되었다. Table 1은 각 경우의 SCC군의 결함 사양을 보인 것이다. 먼저, Fig. 14 (a)와 같이 배관 축과 평행한 6개의 결함으로 이루어진 SCC군에 의한 신호를 Fig. 14(b)에서 보았다. 두 번째 경우의 SCC군은 Fig. 15(a)에서 보여주듯이 각도를 가지는 결함과 축과 평행한 결함으로 이루어졌고, 결과 신호는 Fig. 15.(b)에 보였다.

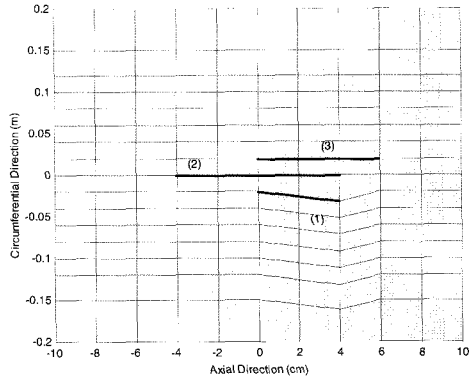


(a)

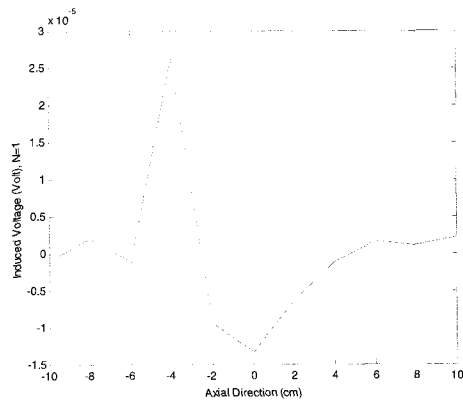


(b)

Fig. 14 Case 1 (a) defect profile and (b) induced voltage signal



(a)



(b)

Fig. 15 Case 2 (a) defect profile and (b) induced voltage signal

Table 1 Defect profile for each case

Case	결함 번호	결함 길이 (cm)	결함 깊이 (%)	결함 각 (degree)	결함 위치	
					원주방향 위치 (m)	축 방향 위치 (cm)
Case 1	1	8	60	0	-0.04	-2 ~ 6
	2	4	40	0	-0.02	2 ~ 6
	3	4	40	0	0.0	-4 ~ 0
	4	2	80	0	0.0	2 ~ 4
	5	6	60	0	0.02	-2 ~ 4
	6	8	60	0	0.04	-6 ~ 2
Case 2	1	4	60	16.7	-0.02	0 ~ 4
	2	8	40	0	0.0	-4 ~ 4
	3	6	60	0	0.02	0 ~ 6

4. 결 론

본 논문에서는 배관의 SCC 검출을 위해 속도에 의해 유기되어 균열에 의해 교란된 전류에서 발생하는 교란 자속을 이용하는 방법의 타당성을 검증하였다. 원주방향의 전류와 축 방향 SCC의 상호작용이 유한요소법을 이용하여 모델링 되었는데, 전체 과정을 아래와 같이 4개의 순차적인 작업으로 나누어 수행하였다.

- (1) 속도에 의한 유도전류
- (2) SCC에 의한 전류 왜곡
- (3) 왜곡전류에 의한 왜곡자계
- (4) 왜곡자계에 의한 유도 전압

하나 또는 SCC군에 대한 수치해석이 수행되었으며, 임의 방향의 SCC군을 시뮬레이션 하기 위해 2층 절점(double layer node) 모델이 사용되었다. 수치해석 결과는 모델에 의한 결합신호가 측정 가능한 신호임을 보여주었으며, 본 논문에서 제시한 방법이 SCC군의 탐상에 있어서 매우 유용하게 사용될 수 있음을 보여주었다.

참고문헌

- [1] A. E. Crouch, C. M. Teller, J. L. Fisher, and G. M. Light, "Assesment of technology for detection of stress corrosion cracking in gas Pipelines", Topical Report, GRI, April (1994)
- [2] T.A. Bubenik, D.R. Stephens, B.N. Lies, and R.J. Eiber, "Stress corrosion cracks in pipelines: characteristics and detection considerations", Topical Report, GRI, April (1995)
- [3] Y. S. Sun, W. Lord, G. Katragadda and Y. K. Shin, "Motion Induced Remote Field Eddy current Effect in a Magnetostatic Non-destructive Testing Tool: A finite Element Prediction", IEEE Trans. Mag., Vol. 30, No. 5, pp. 3304-3307, (1994)
- [4] B. J. Mergelas and D. L. Atherton, "Discontinuity interaction and anomalous source models in through transmission eddy current testing", Material Evaluation, Vol. 54, pp. 87-92, January (1996)
- [5] S. Yang, Y. Sun, L. Udpa, S. S. Udpa, and W. Lord, "3D Simulation of Velocity Induced fields for Nondestructive Evaluation", IEEE Trans. Mag., Vol. 35, No. 3, pp. 1754-1756, (1999)
- [6] H. M. Lesimann and E. O. Friend, "A Symmetric-Matrix Time Integration Scheme for the Efficient Solution of Advection-Dispersion Problems," Water Resource Research, Vol. 25, pp. 1133-1139, (1989)
- [7] Y. K. Shin, Numerical modeling of probe velocity effects for electromagnetic NDE, Ph.D. Dissertation, Iowa State University, Ames, IA, (1992)