

누설자속탐상의 수치해석

Numerical Analysis of Magnetic Flux Leakage Inspection

이향범*, 김 신*

Hyang-Beom Lee* and Sean Kim*

초 록 본 논문에서는 누설자속탐상에 대한 전자기 수치해석을 수행하였다. 수치해석방법으로 2차원 유한요소법을 이용하였다. 자기벡터포텐셜을 미지수로 사용하였으며, 자기비선형(磁氣非線型)을 고려한 자장해석을 수행하여 자기포화에 의한 영향을 고려하였다. 수치해석 결과를 검증하기 위하여 실험장치를 자체 제작하여 실험을 수행하였다. 시료로는 SM 45C 탄소강을 사용하였으며, 표면에 몇 가지 결함을 생성하였다. 시편과 실험장치를 이용하여 결함을 검출하는 비파괴검사를 수행하였다. 결함의 깊이 변화 및 결함의 형상변화에 대하여 결과를 비교검토했다. 수치해석 및 실험에서 유사한 결과를 얻었으며, 수치해석을 통하여 누설자속탐상의 시뮬레이션이 가능함을 보였다.

주요용어: 누설자속탐상, 유한요소법, 비선형, 수치해석

Abstract: In this paper, electro-magnetic numerical analysis of MFL(magnetic flux leakage) method is presented. For the electromagnetic numerical analysis, 2-D FEM(finite element method) is used. The magnetic vector potential is used as a variable. The analysis of the magnetic field considering the magnetic nonlinearity is performed for the effect of the magnetic saturation. For the verification of the validity of the numerical simulation results, by using the lab-made experimental setup, non-destructive inspection is performed. The SM 45C carbon steel is used as a specimen and the artificial defects are made on the specimen. The non-destructive testing for the detection of the defect is performed. The results according to the variation of the defect depth and the defect shape are obtained. The experimental results are compared to the numerical ones, and we conclude that the numerical results are similar to the experimental ones. So the possibility of simulation of the MFL by using the numerical analysis is shown in this paper.

Keywords: MFL(magnetic flux leakage), FEM(finite element method), nonlinearity, numerical analysis

1. 서 론

세계 경제가 발전함에 따라 원유 및 천연 가스와 같은 에너지가 대량으로 필요로 하게 되어 1950년대 이후로 많은 석유 파이프 및 가스 파이프라인들이 매설되어 왔다. 이를 이용하여 도시와 도시, 도시와 산업지구 및 국경을 지나 이웃 나라로 에너지를 공급해 왔다. 현재 이렇게 매

설된 배관들은 세월이 지나면서 배관계통의 외부 환경 또는 내부 환경 영향에 의한 부식, 열화, 스트레스, 파괴 등으로 인하여 노후화 되고 있으며, 시간이 갈수록 가속화되어 사고의 위험에 노출되어 있다. 이에 대한 설비의 교체 및 보수 필요성이 증대되어 많은 돈과 시간을 투자하고 있다. 근래 20여년전부터는 석유 파이프 및 가스 파이프라인 등에 발생할 수 있는 부식과 결함에 대한 검사를 위해 많

은 연구 및 검사가 진행되어지고 있다[1-4].

누설자속탐상 검사 방법은 일반적으로 가스파이프나 석유 파이프의 결함을 검출하는데 효과적인 검사방법이다[5]. 이 방법은 다른 비파괴검사방법에 비하여 고도의 검사원의 기량이 필요하지 않고 고속 검사가 가능하다. 또한, 출력이 전기신호로 얻어지므로 자동화 할 수 있으며 기록의 보존이 가능하므로 객관적인 시험이 가능하다는 장점이 있다. 누설자속탐상을 위해 강자성체를 자화시킬 필요가 있는데 자화장치로는 영구자석이나 전자석을 사용하게 된다[6]. 전자석을 사용하는 경우에는 자속을 발생시키는데 필요한 전원으로 배터리를 사용하게 되는데 배터리의 용량에 따라 검사 구간이 결정되기 때문에 장거리 검사에는 적합하지 않다. 하지만, 영구자석을 사용하게 되는 경우에는 전원 및 여자 코일이 필요로 하지 않기 때문에 경제적이며 자화장치의 경량화 및 장거리 검사가 가능하다는 장점이 있다[7,8].

본 논문에서는 누설자속탐상의 시뮬레이션을 위하여 몇 가지 형태의 결함에 대하여 비선형 특성을 적용한 2차원 전자기 수치해석을 수행하였다. 전자기 수치해석 방법으로는 2차원 유한요소법을 사용하였다[9,10]. 변수로는 자기 벡터포텐셜을 사용하였다. 누설자속탐상은 자기포화현상을 이용하므로 시편에 대한 자기비선형곡선을 적용하여 전자기 수치해석을 수행하였다. 또한, 수치해석 결과를 검증하기 위하여 영구자석을 이용한 실험장치 및 시편을 제작하였다. 시편의 재질은 SM 45C 탄소강이다. 자화를 위하여 자화원으로 NdFeB 영구자석을 사용하였다. 결함의 깊이 및 결함의 형상에 변화에 주어 시편을 제작하였으며, 제작된 시편에 대하여 비파괴검사를 수행하였으며, 수치해석 결과와 비교하여 그 결과를 제시하였다.

2. 전자기 수치해석

2.1. 유한요소법

누설자속탐상법은 자성체에 자장을 걸고, 누설자속을 탐지하여 결함의 유무를 판단하는 방법으로 전자기적으로는 정자장문제(magneto-static problem)이다. 본 논문에서는 자화장치가 시편에 속도기전력을 유기하지 않을 정도로 천천히 움직인다는 가정 하에 문제를 해석하였다. 이러한 전자기문제를 풀기 위해서는 다음에 주어진 맥스웰방정식에 해석대상의 형상, 물질상수, 경계조건을 고려하여 계산하면 된다. 정자장문제를 위한 맥스웰방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} \dots\dots\dots (1)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} + \bar{B}_r \dots\dots\dots (3)$$

여기서 \bar{H} 는 자장의 세기(magnetic field intensity), \bar{B} 는 자속밀도(magnetic flux density), \bar{J} 는 전류밀도(current density), \bar{B}_r 은 잔류자속밀도(remnant magnetic flux density), μ 는 자기투과율(磁氣透磁率, permeability)이다.

위의 맥스웰방정식을 풀기 위하여 식 (2)로 부터 다음과 같은 자기벡터포텐셜을 정의 할 수 있다.

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \dots\dots\dots (4)$$

식 (3)과 식 (4)를 (1)에 대입하면 식 (5)와 같은 정자장문제를 표현하는 포아송방정식(Poisson's equation)형태의 지배방정식(governing equation)을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \left\{ \frac{1}{\mu} (\nabla \times \bar{A} - \bar{B}_r) \right\} = \bar{J} \dots\dots\dots (5)$$

식 (5)는 유일한 해 \bar{A} 를 보장하지 못한다. 따라서, 해의 유일성을 보장하기 위하여 \bar{A} 는 다음의 쿨롱게이지조건(Coulomb's gauge condition)을 만족하여야 한다.

$$\nabla \cdot \bar{A} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

우리가 계산하고자 하는 문제는 2차원 문제이며, \bar{A} 및 \bar{J} 가 z, x 방향성분은 존재하지 않고 y 축방향성분만 존재하고, A_y 및 J_y 가 y 축방향으로 변화가 없다면 다음 식과 같은 2차원문제로 해석이 가능하다.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$= -J_y - \frac{1}{\mu} \frac{\partial B_{rx}}{\partial z} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial B_{rz}}{\partial x}$$

위 수식에 유한요소정식화 과정을 적용하게 되면 다음과 같은 대형시스템 행렬식이 얻어진다.

$$[K][A] = [F] \dots\dots\dots (8)$$

여기서 $[K]$ 는 시스템행렬이며, $[F]$ 는 구동벡터이다. 각 요소에서의 시스템행렬 및 구동벡터는 다음과 같다.

$$K_{ij}^e = \int_{S^e} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial N_{ie}}{\partial z} \frac{\partial N_{je}}{\partial z} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial N_{ie}}{\partial x} \frac{\partial N_{je}}{\partial x} \right] dS^e \quad (9)$$

$$F_j^e = - \int_{S^e} J_y N_{je} dS^e \quad \dots\dots (10)$$

$$- \int_{S^e} \left[\frac{1}{\mu} B_{rz} \frac{\partial N_{ie}}{\partial x} - \frac{1}{\mu} B_{rx} \frac{\partial N_{ie}}{\partial z} \right] dS^e$$

여기서, N_{ie} 는 각 요소에서의 형상함수(shape function)이다.

위의 시스템행렬식에 경계조건을 적용한 후 행렬식을 계산하면 각 절점에서의 자기벡터포텐셜 \bar{A} 를 구할 수 있다. 또한, 자기벡터포텐셜로부터 자속밀도는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$B_z = \frac{\partial \bar{A}}{\partial x} = \sum_{i=1}^s A_{ie}^{(e)} \frac{\partial N_{ie}}{\partial x} \quad \dots\dots (11)$$

$$B_x = - \frac{\partial \bar{A}}{\partial z} = - \sum_{i=1}^s A_{ie}^{(e)} \frac{\partial N_{ie}}{\partial z} \quad \dots\dots (12)$$

여기서, 첨자 s 는 각 요소에서의 미지절점수이다.

2.2. 수치해석 결과

누설자속탐상은 송유관 및 가스관에 대하여 많이 수행되는 비파괴검사기법이다. 따라서, 본 논문에서는 가스관에서 사용하는 탄소강 SM 45C에 결함이 있는 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석의 검증을 위한 간이 실험에 필요한 시편의 크기는 두께 12[mm], 폭 100[mm], 길이 600[mm]로 제작하였다. 실제 시편의 두께는 연마를 한 관계로 12[mm]보다는 약간 작아진다. 그림 1에 시편의 형상을 보여주고 있다. 시편의 중앙에 길이 및 폭이 모두 24[mm]인 결함을 생성하였다. 같은 길이 및 같은 폭에 대하여 깊이 및 형상을 변화시켜서 다섯 개의 시편을 제작하였다. Table 1에 5가지 시편에 대한 사양을 나타내었다. 시험편 D1, D2, D3은 사각형의 단면에 깊이를 각각 0.65, 1.3, 6.0[mm]로 가공하였으며, 시험편 D4, D5는 시험편 D3을 기준으로 같은 깊이에 대칭 및 비대칭 경사를 주어서 제작하였다.

누설자속탐상은 자기포화를 이용하는 탐상기법으로 수

치해석 수행 시 반드시 자기포화를 고려하여야 한다. 포화가 되지 않을 경우 결함이 존재하더라도 누설자속의 양이 적어지기 때문에 적절한 포화가 될 수 있을 정도로 자장을 인가하여야 한다. Fig. 2에서는 SM 45C 탄소강에 대한 비선형특성곡선을 보여주고 있다. 사용된 영구자석은 NdFeB로 잔류자속은 0.4[T]를 사용하였다. 또한, 요크 및 브러쉬부분의 비투자율은 1500을 사용하였다. 또한, 실험장치에 전류를 인가하는 부분은 없으므로 전류밀도는 영을 사용하였다.

Table 1 Specification of Specimen unit [mm]

	두께	결함 형태	결함 크기		
			가로	세로	깊이
D1	11.85		24.10	23.95	0.65
D2	11.70		23.85	23.75	1.3
D3	11.95		23.90	23.85	6.0
D4	11.80		24.10	23.40	5.9
D5	11.35		24.05	23.85	6.1

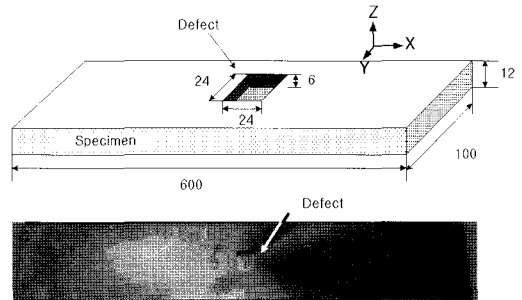


Fig. 1 Specimen

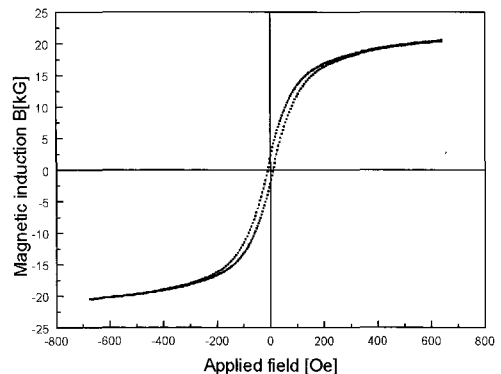
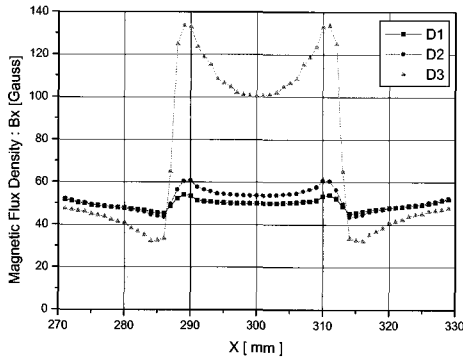


Fig. 2 B-H curve of SM 45C carbon steel

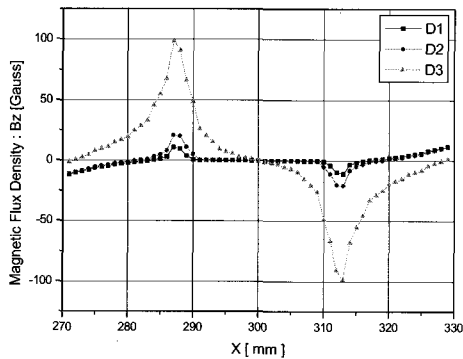
수치해석은 2.1절에서 기술한 유한요소법을 이용하였다. 2차원 유한요소법을 적용하기 위하여 시편의 폭의 중앙부분을 모델링하였다. 정확한 시뮬레이션을 위해서는 3차원 수치해석기법을 이용하여야 하지만, 누설자속탐상에 대하여 약간의 오차를 감수한 특성분석을 위해서는 2차원 유한요소법으로도 충분하며, 2차원 유한요소법의 경우 3차원 유한요소법에 비하여 빠른 시간에 결과를 파악할 수 있다는 장점이 있기 때문에 본 논문에서는 2차원 유한요소법을 사용하였다.

수치해석의 결과에서 X축은 시편의 길이방향을 나타내며, Z축은 시편의 윗 방향을 나타내겠다. 즉, X방향 성분은 시편의 표면의 접선방향성분이며, Z방향 성분은 시편의 표면의 법선방향성분을 의미한다.

Fig. 3과 Fig. 4에서는 유한요소법을 이용한 수치해석 결과를 보여주고 있다. 각 그림에서 (a)는 누설자속의 시



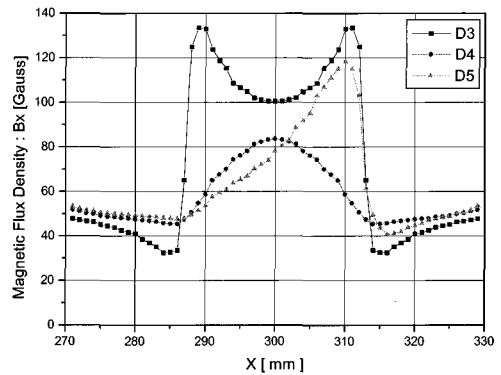
(a) Tangential component of magnetic flux density



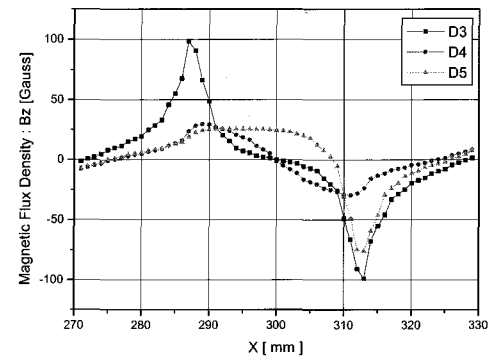
(b) Normal component of magnetic flux density

Fig. 3 Numerical result : magnetic flux density for D1, D2, and D3 specimens

편의 표면에 대한 접선방향성분이며, (b)는 누설자속의 시편의 표면에 대한 법선방향성분이다. 그림 3에서는 결함의 깊이 변화에 따른 신호를 나타내고 있다. 깊이가 깊어짐에 따라 신호의 크기가 커지는, 즉, 누설자속의 크기가 거의 비례적으로 커지고 있음을 보여주고 있다. 또한 접선성분의 경우 결함의 주변부보다는 결함의 중심부로 갈수록 자장의 세기가 낮아지는 결과를 보여주고 있다. Fig. 4에서는 결함의 형태 변화에 따른 신호의 변화를 보여주고 있다. 결함의 최대 깊이가 6[mm]로 같기 때문에 신호의 최대 크기가 비슷함을 알 수 있다. D3 및 D4의 대칭결함에 대해서는 신호도 대칭적으로 검출됨을 알 수 있다. D5의 경우 결함이 비대칭이기 때문에 신호 또한 비대칭으로 나오고 있음을 살펴 볼 수 있다. 이러한 수치해석 결과로부터 결함의 깊이 변화, 결함의 형태 변화에 따라 신호가 달라짐을 알 수 있었으며, 이 신호를 분석함에 따라 결함의 크기, 결함의 형상 등에 대한 정보를 추출하는 것이 가능함을 알 수 있다.



(a) Tangential component of magnetic flux density



(b) Normal component of magnetic flux density

Fig. 4 Numerical result : magnetic flux density for D3, D4, and D5 specimens

3. 실험방법 및 결과

3.1. 실험방법

수치해석 결과를 검증하기 위하여 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 Fig. 5에 나타내었다. 시편의 재질은 SM 45C 탄소강을 사용하였다. 두께 0.5[mm]의 PN-18 규소강판을 적층하여 요크를 구성하였으며, 시편을 자화시키기 위하여 NdFeB 영구자석을 사용하였다. 요크 및 영구자석부분과 철판사이에 철브러쉬를 채용하여 자로를 형성하였다. 결함에 의하여 발생하는 누설자속을 검출하기 위하여 Allegro사의 홀 센서 A3508을 사용하였다. 홀 센서에서 검출되는 신호를 명확히 보기 위하여 OP-Amp를 이용하여 신호를 증폭하였으며, 잡음을 제거하기 위하여 저역통과필터를 사용하였다. 신호를 컴퓨터로 가져오기 위하여 National Instrument사의 PCI-6023E DAQ보드를 사용하였다. 또한, National Instrument사의 LabVIEW 5.1을 이용하여 GUI(Graphic User Interface)를 이용한 운용프로그램을 개발하였다. 이 운용프로그램을 이용하여 자속밀도신호를 수집하였다. Fig. 6에서는 누설자속탐상을 위한 시스템 블록도를 보이고 있다.

실험을 위한 과정은 다음과 같다. 누설자속을 감지하기 위한 홀센서는 자화장치의 정중앙에 위치시켰으며, 시편

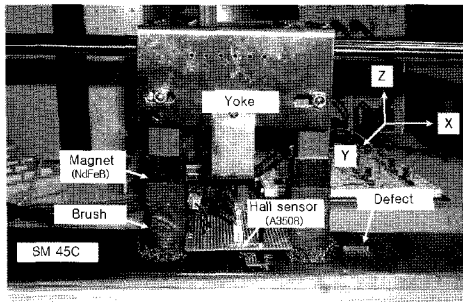


Fig. 5 Experimental Set-up

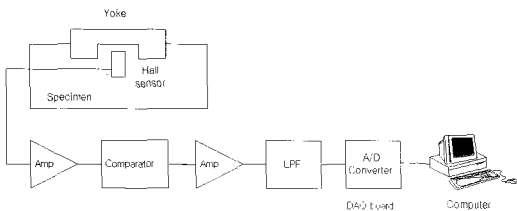
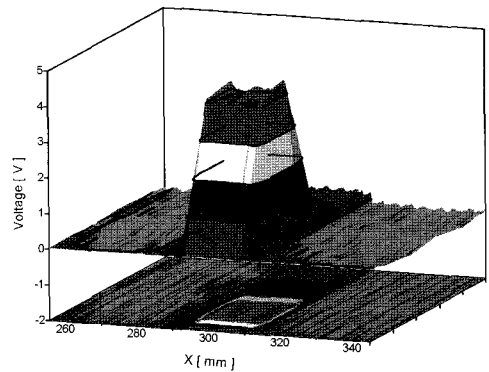


Fig. 6 Block diagram

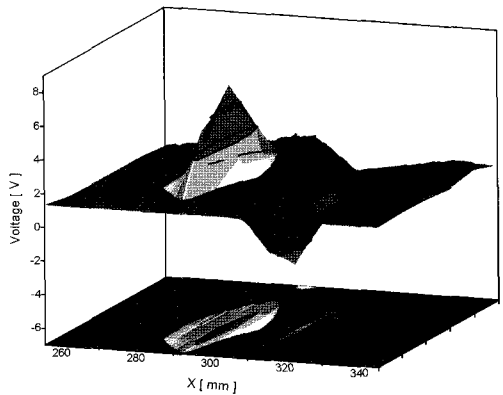
의 폭 방향으로 6개의 홀센서를 배치하였다. 시편의 표면에서 홀센서 사이의 거리는 1[mm]로 유지하였다. 시편에 가공된 결함을 검출하기 위하여 자화장치 및 홀소자는 시편의 길이방향(X축 방향)으로 이동시키면서 신호를 컴퓨터로 수집하였다.

3.2. 실험 결과

결함 깊이 및 형상변화에 대하여 고찰하기 위하여 시편 D3을 기준으로 삼았다. 시편 D3에 대하여 자화장치 내에 위치한 6개의 홀센서로부터 검출된 신호를 Fig. 7에 나타내었다. 검출된 신호를 3차원으로 표시하였기 때문에 결함의 크기 및 결함의 형태를 쉽게 파악할 수 있다. Fig. 7에



(a) Tangential component of magnetic flux density

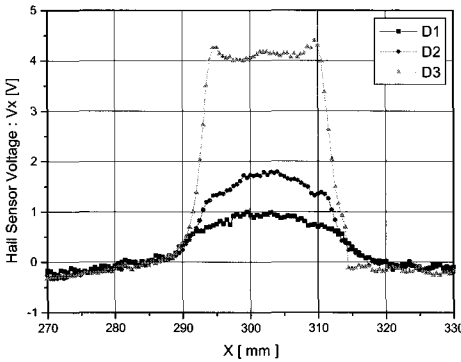


(b) Normal component of magnetic flux density

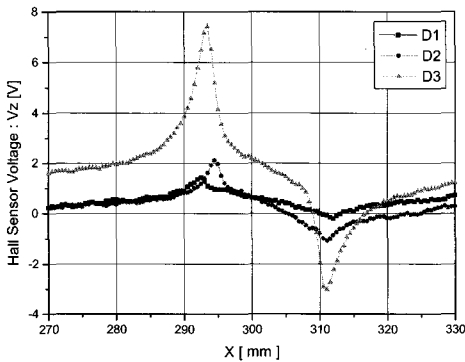
Fig. 7 Experimental result : magnetic flux density for D3 specimen

서 시편폭의 증상을 기준으로 신호가 대칭적으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 결합의 중심으로부터 어느 정도까지는 신호가 변화가 거의 없으며, 결합의 끝단에 가까워 올수록 신호의 변화가 보이기 시작한다. 따라서, 시편폭을 기준으로 중심부분을 모델링하게 되면, 2차원 수치 해석을 이용하더라도 결합의 특성을 충분히 반영하는 결과를 얻을 수 있다는 것을 예측할 수 있다. 실험결과와 수치 해석 결과를 비교하기 위하여 시편폭을 기준으로 중심 부분에서의 신호를 추출하여 사용하겠다.

Fig. 8에서는 시편 D1, D2, D3의 결합에 대하여 실험 결과를 보여주고 있다. 이들 시편은 형태는 동일하며, 결합의 길이만 0.65[mm], 1.3[mm], 6.0[mm]로 서로 다르다. Fig. 8의 실험결과는 Fig. 3의 수치해석 결과와 비교되는 실험결과이다. 접선성분의 경우에서 시편 D3의 신호를 보면 결합의 중심부로 갈수록 신호가 약해지는 것을



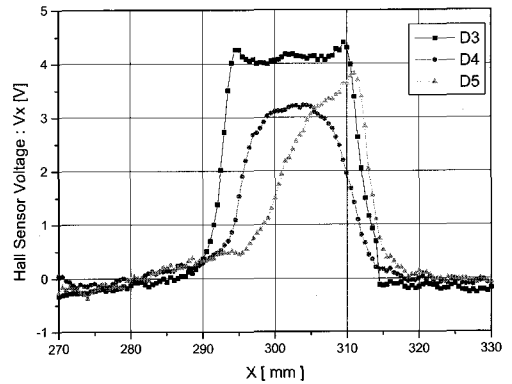
(a) Tangential component of magnetic flux density



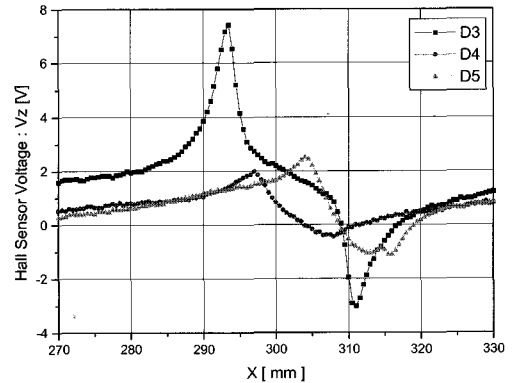
(b) Normal component of magnetic flux density

Fig. 8 Experimental result : magnetic flux density for D1, D2, and D3 specimens

볼 수 있다. 이는 수치해석결과에서 이미 확인한 결과이다. 시편 D1 및 시편 D2에서는 시편중앙부위에서의 신호가 시편 D3의 경우와는 약간 다른 패턴을 보여주고 있다. 하지만, 전체적으로 유사한 결과를 보여주고 있으며, 법선성분의 경우 유사한 결과를 나타내고 있다. 수치해석 결과의 경우 접선성분의 신호에서는 좌우대칭, 법선성분의 신호에서는 상하대칭을 보여주고 있다. 실험결과의 경우 접선성분의 신호에서는 좌우대칭을 잘 보여주고 있지만, 상대적으로 법선성분의 신호에서는 상하대칭이 되기는 하지만, 약간의 오프셋(offset)을 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 아마도 자화에 의한 철판에 잔류하는 잔류자속때문으로 사료된다. 시험을 수행하기 전에 탈자를 시키더라도 시험을 수행하면서 자화가 진행되는 것으로 사료



(a) Tangential component of magnetic flux density



(b) Normal component of magnetic flux density

Fig. 9 Experimental result : magnetic flux density for D3, D4, and D5 specimens

된다. 교류자장이 아닌 직류자장을 이용하여 자화를 시키고 있으며, Fig. 2의 비선형특성곡선에서도 히스테리시스 현상이 보이고 있다. 2차원 유한요소해석의 경우 비선형 특성은 고려되지만, 히스테리시스현상은 고려하지 못하므로 결과에서 어느 정도의 차이는 발생할 수 있다. 이러한 영향을 고려한다면 실험 및 수치해석결과에서 경향이 상당히 유사함을 확인할 수 있다.

수치해석 결과의 경우 자속밀도를 이용하여 결과를 나타내었다. 실험결과와 비교하여 National Instrument사의 PCI-6023E DAQ보드 및 LabVIEW에서 얻어진 신호를 이용하여 신호를 나타내었다. 신호가 미약하여 증폭하였으며, 필터를 사용하였기 때문에 자속밀도로 나타내지 않고 전압으로 나타내었다.

Fig. 9에서는 결함의 크기와 깊이가 같고 그 형태가 서로 다른 시편 D3, 시편 D4 및 시편 D5에 대한 실험 결과를 나타내었다. Fig. 9의 실험결과는 Fig. 4의 수치해석 결과와 비교되는 실험결과이다. 형상의 변화에 따라 신호의 크기가 변화됨을 살펴볼 수 있다. 먼저 접선성분을 살펴보면, 시편 D3은 결함의 시작과 끝에서 경사가 급하며, 시편 D4는 상대적으로 경사가 완만하다. 따라서, 신호에서도 그러한 경향이 반영되어 있으며, 결함의 형태와 마찬가지로 좌우대칭의 신호를 보여주고 있다. 시편 D3과 시편 D4의 접선방향의 결과를 비교하면, 비록 결함의 깊이는 같을 지라도 결함의 기울기가 달라짐에 따라 최대자속밀도의 크기도 달라짐을 알 수 있다. 또한 경향으로 보아 결함의 체적과 연관 있으리라 사료된다. 즉 결함의 체적에 비례하여 최대자속밀도의 크기가 나타남을 볼 수 있다. 시편 D5는 한쪽에서만 경사가 급하게 제작되었다. 또한, 경사가 완만한 부분도 시편 D4의 경사보다 더 완만하다. 따라서, 신호를 살펴보면 시편 D3 및 시편 D4의 신호보다 더 완만하게 되어 있으며, 기울기가 급한 부분의 신호는 시편 D3의 결과와 거의 동일함을 볼 수 있다. 법선성분의 결과를 보면, Fig. 8에서와 비슷하게 약간의 오프셋이 있음을 볼 수 있다. 결함의 형상이 대칭인 경우 신호도 대칭으로 얻어지지만, 시편 D5와 같이 대칭이 아닌 결함의 경우 신호도 대칭이 되지 않음을 확인할 수 있다.

이상의 실험을 통하여 수치해석결과의 타당성을 검증할 수 있었다. 정확한 해석을 위해서는 3차원 계산 및 히스테리시스등을 고려하여야 하겠다. 하지만, 누설자속탐상장비의 설계 등에 있어서는 2차원 해석만으로도 충분히 유용하게 사용될 수 있으리라 사료된다.

4. 결 론

강자성체 구조분의 비파괴검사방법중의 하나인 누설자속탐상에 대하여 전자기 수치해석을 수행하였다. 자기백터포텐셜을 변수로 사용하는 2차원 유한요소법을 이용하여 전자기시뮬레이션을 수행하였으며, 누설자속탐상의 특성상 자기비선형을 고려한 해석을 수행하였다. 해석대상으로는 두께 12[mm]의 탄소강 SM 45C 시편을 사용하였다. 시편의 두께에 대한 영향을 고려하기 위하여 결함의 폭과 깊이가 두께의 두배인 결함을 시편에 생성하였다. 결함의 깊이의 변화 및 형상의 변화에 대하여 누설자속탐상의 신호가 어떻게 변하는지에 대하여 수치해석을 수행하였다. 해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 자체 제작한 실험장치를 이용하여 강자성체 표면에 존재하는 결함을 검출하는 비파괴검사를 수행하였다. 규소강판을 이용하여 요크를 만들고, 여기에 철브러쉬 및 NdFeB 영구자석을 이용하여 자화장치를 구성하였다. Allegro사의 A3508 홀센서를 이용하여 누설자속을 검출하고 National Instrument사의 DAQ보드 및 LabVIEW를 이용하여 컴퓨터로 자료를 저장하여 분석하였다. 수치해석의 결과와 실험의 결과를 비교한 결과 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었으며, 누설자속탐상에 대하여 전자기 수치해석이 충분한 정확도를 가지고 수행됨을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구의 결과에 따라 전자기 수치해석이 누설자속탐상장비의 설계에 유용하게 사용 될 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

- [1] Dominic Paisley, Nathan Barrett, Owen Wilson, "Roles of flow, metal studied in UK corrosion failures", Oil & Gas Journal, Vol. 97, Issue 33, (1999)
- [2] B. V. Samoilov, "In-line inspection, repairs used on aging Russian product lines", Oil & Gas Journal, Vol. 96, Issue 47, (1998)
- [3] Susan E. Miller, Michael A. Gardiner, Clive R. Ward, "In-line inspection detects early cracking on Canadian crude-oil line", Oil & Gas Journal, Vol. 96, Issue 39, (1998)
- [4] Robert J. Reid, "World's pipeline industry, while

-
- safe and reliable, must learn to cope with change", Oil & Gas Journal, Vol. 96, Issue 35, (1998)
- [5] S. Leonard and D. L. Atheron, "Calculations of the Effects of Anisotropy on Magnetic Flux Leakage Detector Signals", IEEE Trans. on Mag., Vol. 32, No. 3, pp. 1905-1909, (1996)
- [6] 임종수, 손대락, 임기현, "교류누설자속을 이용한 물 표면 결함 탐상기술 개발". 한국비파괴검사학회, 2000 추계학술발표회, pp. 332-341, (2000)
- [7] J. B. Nestleroth, T. A. Bubenik, Magnetic Flux Leakage (MFL) Technology For Natural Gas Pipeline Inspection, GRI, February (1999)
- [8] Blitz, Jack, Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing, IOP Ltd, (1991)
- [9] K. J. Binns and P. J. Lavrenson and C. W. Trowbridge, The Analytical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Fields, John Wiley & Sons, (1992)
- [10] M. V. K. Chari and P. P. Silvester, Finite Elements in Electrical and Magnetic Field Problems, John Wiley & Sons, (1980)