

자기누설을 이용한 구조물 내 철근 유무 판별에 관한 연구

박일환, 한재만, 서강, 박관수  
부산대학교 전자전기공학과

A study for the Detection of the iron in the structure  
by using the MFL NDT

Il Hwan Park, Jea Man Han, Kang Seo, Gwan Soo Park  
Electronic and Electrical Engineering, Pusan National University

**Abstract** - 자기누설방식의 비파괴검사법은 자성체 구조물을 자화시켜 결합 구조물에서 단면적의 변화에 따른 자기 누설의 증가를 측정하여 결합 정도와 크기 등을 측정하는 비파괴검사법이다. 본 논문에서는 특히 구조물 내의 철근을 모델링하여 유한요소해석 결과와 자기누설 비파괴검사법을 이용한 측정 데이터를 비교해 보았다.

1. 서 론

구조물의 비파괴 검사법으로는 Magnetic Fluid를 이용한 Visual Method, Magneto Striction Method, Ultra Sonic Method, Acoustic Emission Method, 방사능 활용법, Eddy Current Method, Eddy Current에서 Coil을 분리한 Far Field Eddy Current Method 등이 있으며, 그 중에서 도전율과 투자율을 동시에 갖는 금속재료의 손상, 균열, 부식, 피로, 용접부위검사로 자기누설탐상법(MFL, Magnetic Flux Leakage Method)과 같은 전자기적인 방법이 주로 사용된다[1][7].

자기누설 탐상법은 지하나 수중에 매설되어 측정이 어려운 배관의 부식정도를 측정하기 위한 것으로, 배관 내부에 삽입되어 주행하면서 지하에 매설되어있는 배관의 내, 외벽에 발생하는 결함이나 부식상태를 감지하는 방법이다. 오늘날에는 배관을 건설, 유지, 보수, 해체하는 작업, 즉 배관을 운용하기 위한 모든 단계에서 사용되고 있다. 그러나 이런 기법은 지나치게 크기가 크고 무거워서 다양한 분야에 적용하기에 어려움이 많다. 현재 국내에서 운용되는 대표적인 용도는 한국가스공사에 의하여 매설되고 관리되고 있는 가스용 배관의 검출 시스템이다 [7][13].

본 논문에서는 이러한 자기누설 탐상기법의 소형화된 시스템[14]을 이용하여, 두 가지 방향의 환재 구조물의 신호에 대해 자기누설탐상 시스템을 이용하여 측정하고 검출 신호를 3차원 유한요소 해석 결과와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 자기누설탐상법의 원리

자기포화된 자성체에 있어서 단면적이 줄어들면 누설 자속이 증가한다. 따라서 자기누설 탐상법을 이용한 비파괴검사 시스템은 Fig.1과 같이 검사하고자 하는 대상물체에 외부에서 자기장을 인가하여 자기포화시킨 다음, 자기회로를 형성시킨다. 만약 대상물체가 자기 포화되고 결함이 있을 경우는 결함부분의 단면적이 줄어들게 되어 자기저항이 커지게 되고, 외부로 자기누설이 발생하게 되는데, 이 때 결함 전후의 누설되는 자기장의 변화를 측정하여 결함 정도를 판단할 수 있다.

2.2 자기누설 탐상시스템의 구성

자기누설 탐상시스템은 Fig. 2와 같이 검사대상을 자화시키는 Magnetic yoke 부와 누설자속을 감지하는 센

서 회로 부, 센서로부터 신호를 수집하여 외부 디스플레이 장치로 송출하는 데이터수집 부, yoke 부와 회로 부, 데이터수집 부가 부착될 소형운반기인 Body 부로 구성된다.

2.3 자기누설탐상시스템의 유한요소해석

해석하고자 하는 영역을 유한개의 요소로 나누고 요소 내의 자기 벡터 포텐셜을 구할 수 있다. 자기누설방식을 이용한 비파괴 검사기 시스템의 해석은 자기포화 곡선을 이용하는 비선형 문제이므로 오차가 일정 값 이하로 될 때까지 식 (6)을 유한요소법으로 반복 계산하여야 한다. 변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자계에서 성립하는 Maxwell 방정식과 그 보조방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \times H = J \tag{1}$$

$$B = \mu_0 (H + M) \tag{2}$$

$$B = \nabla \times A \tag{3}$$

여기서,  $\mu_0$ 는 진공에서의 투자율(permeability), A는 자기 벡터 포텐셜이다. 히스테리시스 현상이 없는 문제에서 자화량은 자화율  $\chi$ 로서

$$M = \chi H \tag{4}$$

와 같이 표현되지만 해석 영역 내에 히스테리시스 특성을 갖는 매질이 포함되어 있는 경우에는 자화량은 자계의 세기나 자속밀도에 관한 단순한 식으로 표현되지 않으므로 미지수로 남겨 두어야 한다. 일반적으로 자화

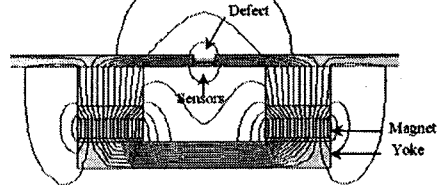


Fig. 1 자기누설탐상법의 원리

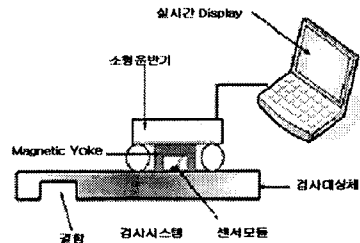


Fig. 2 자기누설탐상시스템의 구성

량  $M'$ 은 외부의 자계가 제거되면 사라지는 가역항

(reversible component :  $\chi H$ )과 외부의 자계가 제거되어도 사라지지 않고 자발자화 특성을 갖는 비가역항(irreversible component :  $M$ )의 합으로 나타낼 수 있다.

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

식(5)를 식(2)에 대입하면

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

와 같은 식을 얻는다.

## 2.4 자기누설 탐상법을 이용한 결함 검출

### 2.4.1 자기누설 탐상법을 이용한 결함 검출 범위

자기누설 탐상 시스템의 Main Signal인 누설자속 값에 있어서, 판단의 기준이 되는 것은 무결함 상태와 결함상태의 누설자속 차이인  $\Delta B$  값이다. 이  $\Delta B$  값이 Hall sensor 의 노이즈 범위인 10 G 이상일 때 결함검출 범위가 된다.

### 2.4.2 자기누설 탐상법을 이용한 결함 검출 실험

Detect Case Number는 Table 1 과 같다. Case I, 과 Case II는 철재구조물 Detecting Test를 위한 검사대상으로서, 검사방향과 같은 방향으로 놓여있는 철근 구조물인 지름 30mm 환봉을 Case I, 검사방향과 직각 방향으로 놓여있는 철근 구조물인 지름 30mm 환봉을 Case II 로 하였고 재질은 철재자재 중 주로 쓰이는 재질중의 하나인 S45C 탄소강을 사용하였다.

Table 1 Detect Case Numbering

검사종류	구조물 종류	Case Number
Metal Detecting	길이방향	Case I
	측면방향	Case II

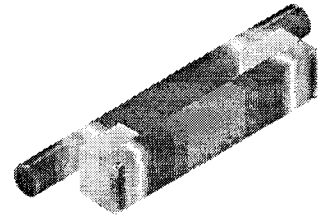
## 2.5 해석 및 실험 결과

Fig.3, Fig.4는 Defect Library 로써, 각 Case 에 대한 3D 유한요소 해석(F.E.M.)결과와 자기누설 비파괴검사 시스템을 이용한 검출 신호를 나타내었다. 여기서 Axial Value란 검사 시스템이 진행하는 방향으로의 자속밀도 값을 말하며, Radial Value란 시스템 진행 면에 대해 검사체 쪽인 연직하방향의 자속밀도 값을 말한다. 자기누설 탐상법에 있어서 두 신호는 각각 결함 깊이와 크기를 알 수 있는 신호로서 Axial Value는 검사체의 결함 깊이가 클수록 큰 값을 나타내며, Radial Value는 결함의 크기가 클수록 신호의 최고점과 최저점 사이의 수평 거리가 멀어지게 된다.

Fig.3은 검사방향과 같은 방향으로 놓여있는 철근 구조물에 대한 데이터로서 검출신호(c)의 진행방향신호에서의 침단부는 환재의 진입부와 끝단부에서 나타나는 자속밀도 차로 인한 검출 신호이다. Fig.4는 검사방향과 직각 방향으로 놓여있는 철근 구조물에 대한 데이터로서 측정결과에서는 시뮬레이션 결과와는 다르게 파형 왜곡이 발생하는데, 이는 자성의 영향으로 시스템 이동 속도가 일정치 못하여 발생하였다. 그러나 두 Case에서 볼 때, 구조물내의 철재구조물의 방향에 따른 검출 신호의 유형이 확연하므로 자기누설탐상법을 통해 비자성 구조물내 철재구조물의 방향과 개수를 파악 할 수 있다.

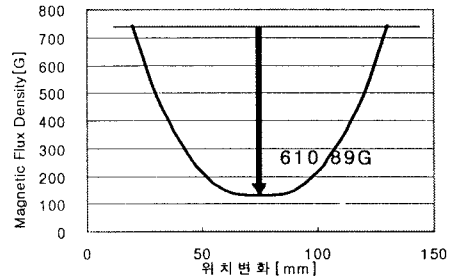
## 3. 결 론

본 논문에서는 자기누설 탐상기법의 소형화된 시스템을 이용하여, 구조물내 두 가지 방향의 철근 모델을 측정하고 3차원 유한요소 해석 결과와 비교하였다. 이를 통해 검사대상이 비자성체 구조물 내에 있더라도, 검출 신호의 특성 유형을 통해 철재 구조물의 방향과 개수를 구별해 낼 수 있다. 추후과제로서 검사대상에 많은 영향

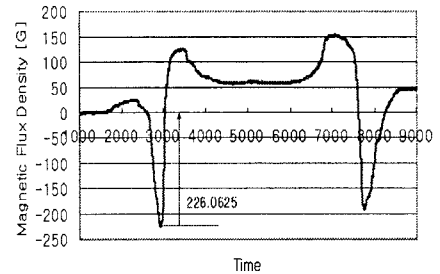


Component: BMOD  
270.783 10306.5 20342.2

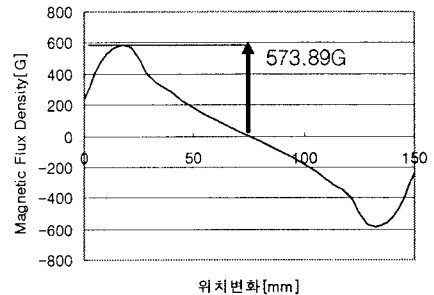
(a) 3D F.E.M. 해석 모델(217000 elements)



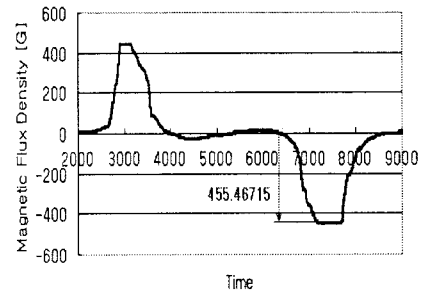
(b) 위치변화에 따른  $\Delta B$  해석 데이터(Axial Value)



(c) 위치변화에 따른  $\Delta B$  검출 신호(Axial Value)

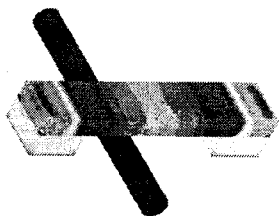


(d) 위치변화에 따른  $\Delta B$  해석 데이터(Radial Value)



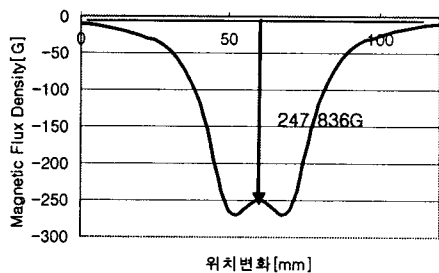
(e) 위치변화에 따른  $\Delta B$  검출 신호(Radial Value)

Fig. 3 Case I: 검사방향과 같은 방향으로 놓여있는 철근 구조물

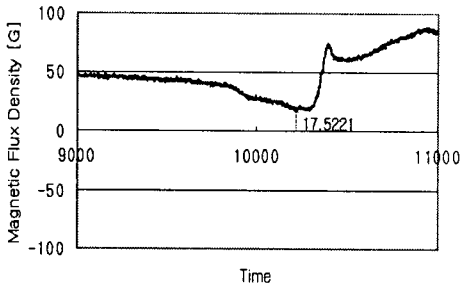


Component: BMOD  
0.00221548 0.816406 1.630597

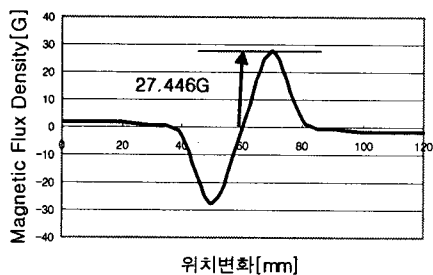
(a) 3D F.E.M. 해석 모델(245000 elements)



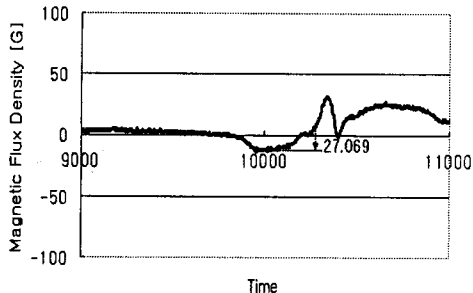
(b) 위치변화에 따른  $\Delta B$  해석 데이터(Axial Value)



(c) 위치변화에 따른  $\Delta B$  검출 신호(Axial Value)



(d) 위치변화에 따른  $\Delta B$  해석 데이터(Radial Value)



(e) 위치변화에 따른  $\Delta B$  검출 신호(Radial Value)

Fig. 4 Case II: 검사방향과 직각 방향으로 놓여있는 철근 구조물

을 받지 않으면서도 더욱 정밀하게 측정 할 수 있도록, Magnetic Core 의 최적화가 필요하며, 많은 Case 의 검사대상에 대한 데이터를 확보하여 자기누설탐상 시스템 과 Defect Library의 보완이 필요하다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Ruiz, N. Vera, P. Curpian, J. Martinez, D. Mata, "Matching pursuit-based signal processing method to improve ultrasonic flaw detection in NDT applications ", Electronics Letters, Vol.39, Issue 4, Feb 2003, pp.413-414
- [2] Dyck, D.N. Gilbert, G. Forghani, B. Webb, J.P. "An NDT pulse shape study with TEAM problem 27", Magnetics, IEEE Trans. on, Vol.40, Issue 2, March 2004, pp.1406-1409
- [3] Clauzon, T. Thollon, F. Nicolas, A. "Flaws characterization with pulsed eddy currents NDT", Magnetics, IEEE Trans. on, Vol.35, Issue 3, May 1999, pp.1873-1876
- [4] Hyang-Beom Lee, Dong-Hun Kim, "Impedance calculation for a plate with crack in eddy current NDT using 3D indirect BIEM", Magnetics, IEEE Trans. on, Vol.36, Issue 5, Sept 2000, pp.3131-3133
- [5] Chen, W. Zhang, G.S.Sun, Y.S. Chen, M.J. "Integrated third kind boundary condition for 2D eddy current problems and its application in NDT", Magnetics, IEEE Trans. on, Vol.29, Issue 2, Mar 1993 pp.1812-1815
- [6] Hyang-Beom Lee, Dong-Hun Kim, "Numerical analysis of eddy current NDT for a tube with cracks using 3D indirect BIEM", Magnetics, IEEE Trans. on, Vol.35, Issue 5, Sept 1999, pp.3724-3726
- [7] Vasic, D. Bilas, V. Ambrus, D. "Pulsed eddy-current nondestructive testing of ferromagnetic tubes", Instrumentation and Measurement, IEEE Trans. on, Vol.53, Issue 4, Aug 2004, pp.1289-1294
- [8] Ida, N. Lord, W. "A finite element model for three-dimensional Eddy current NDT phenomena", Magnetics, IEEE Trans. on, Vol.21, Issue 6, Nov 1985, pp.2635-2643
- [9] Gros, X.E. Zheng Liu, Tsukada, K. Hanasaki, K "Experimenting with pixel-level NDT data fusion techniques", Instrumentation and Measurement, IEEE Trans. on, Vol.49, Issue 5, Oct 2000, pp.1083-1090
- [10] K. K. Tandon, "MFL Tool Hardware for Pipeline Inspection", Materials Selection & Design, February 1997, pp. 75-79
- [11] D. L. Atherton and M. G. Daly, "Finite Element Calculation of Magnetic Leakage Detector Signals", NDT International, vol. 20, no. 4, August 1987, pp. 235-238
- [12] 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, 1996, pp. 1-11
- [13] Gwan Soo Park, Sang Ho Park, "Analysis of the velocity-induced eddy current in MFL type NDT", Magnetics, IEEE Trans. on, Vol.40, Issue 2, March 2004, pp.663-666
- [14] 박일환, 조지용, 조봉균, 이근보, 김덕건, 홍용환, 박치용, 박관수, "영구자석을 이용한 비파괴 검사기의 결합검출 기법에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B권, p1263~1264, July 2006.