

비접촉 자속누설 계측 기반 연속체 구조물의 비파괴평가 기술

Nondestructive Evaluation Technique for Continuum Structures Using Non-Contact Magnetic Flux Leakage(MFL) Measurement

박승희 (성균관대학교 건축토목공학부 조교수)

Seunghee Park (E-mail: shparkpc@skku.edu)

최근 초장대 교량, 대형 플랜트 및 고속철도와 같은 초대형 사회기반시설물의 건설이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 기반시설물에서 장대교량의 케이블, 플랜트의 배관, 철도구조물의 레일은 가장 핵심이 되는 부재라고 할 수 있는데 이러한 부재들은 일정한 단면이 연장된 연속체의 형태를 가지면서 강자성체인 특성을 가지고 있다.



그림 1. 사회기반시설의 연속체 구조물

이러한 연속체 구조물의 경우 대부분 외부환경에 노출되어 있어 다양한 환경적, 물리적 요인으로 인해 부식, 크랙, 단선과 같은 국부손상이 발생하게 될 수 있는데 이러한 손상에 대한 초기 대처가 늦을 경우 특정부의 응력 집중, 유체누출 등과 같은 원인으로 구조물 전체의 대형 사고로 이어질 수 있는 위험성을 가지고 있다.

따라서 이러한 위험성을 조기에 방지하기 위해 부재에 발생한 손상을 조기에 발견할 수 있는 검사법이 필수적인데, 짧게는 수십 미터에서 길게는 수천 킬로미터까지 이어지는 거대한 연속체

구조물의 특성상, 적용되는 검사법은 신뢰성과 더불어 경제성을 반드시 요구하게 된다.

이에 뛰어난 신뢰도와 높은 재현성의 장점을 지니고 있는 마그네틱 센서 응용기술들이 항공, 선박, 교량 케이블 등을 포함한 다양한 강자성체 구조물의 비파괴 평가에 매우 널리 활용되어 왔다 [1-4]. 마그네틱 센서는 그 종류가 다양하므로 계측하고자 하는 대상 구조물의 구조적 특성에 맞춰 사용하도록 되어 있는데, 그 중 파이프 및 와이어와 같은 연속체 구조물을 대상으로 한 검사에 있어서는 자속누설탐상법을 이용한 검사가 주를 이루고 있다 [5-9].

자속누설탐상법은 포신의 결함 탐상을 위해 1868년 영국에서 처음으로 개발되었는데 포신을 자화시켜 나침반을 이용하여 표면을 검사하는데 사용되었었다 [10]. 20세기에 자기센서가 처음으로 개발된 이후, 자속누설탐상법은 현재까지 지속적으로 많은 발전을 이루었으며 그 적용 범위 역시 매우 넓은 영역으로 확대되고 있다 [11].

1. 자속누설탐상법의 기본 원리

강재 시편이 자화되어 있을 때 강재는 자석과 같은 특성을 띄게 되는데, 이러한 강재에 국부손상이 발생했을 때 결함 부분에서 자기장의 통과 단면적이 줄어들게 되고 손상 틈의 공기는 자석만큼의 자기장 밀도를 가지지 못하기 때문에 그림 2와 같이 손상부에 자속누설이 발생하게 된다. 이러한 원리에 기초하여 자속의 누설을 비접촉 방식으로 계측함으로써 강재의 국부손상을 검색할 수 있다. 자속누설의 비접촉 계측 원리는 그림 3에서 보는 바와 같이 영구자석에 의하여

발생된 자기장이 요크(yoke)를 통하여 시험체로 유도되어 시험체를 자화시키게 되는데, 이런 상황에서 시험체의 부식 또는 외부 충격으로 인한 두께 변화가 있을 경우 시험체의 유효 단면적이 감소하여 발생하는 누설 자속을 홀센서로 측정하여 결함을 검출하는 방식이다 [12,13].

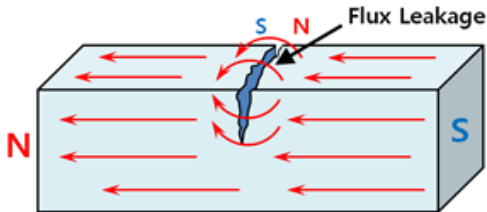


그림 2. 자속누설 발생 원리

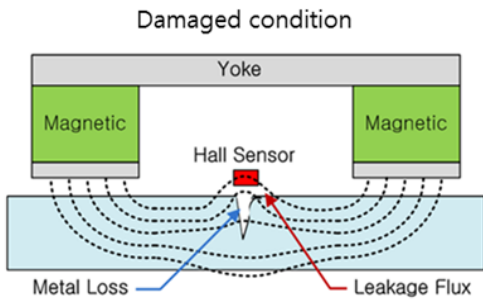


그림 3 자속누설 비접촉 계측 원리

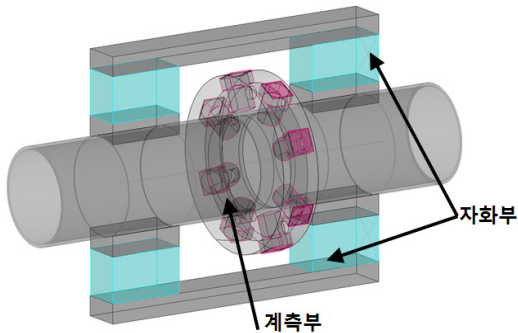


그림 4. 자속누설 센서 헤드의 구성[14]

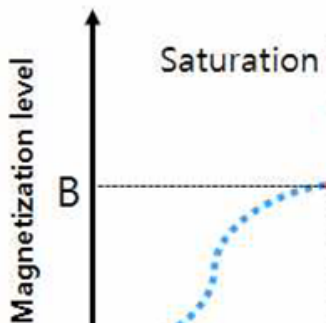


그림 5. 자기이력곡선의 포화자화 구간

자속누설의 비접촉 측정을 위한 센서 헤드는 그림 4와 같이 시편을 자화시키는 자화부와 누설되는 자속을 계측하는 계측부 두 부분으로 크게 나눌 수 있는데, 자기장에 놓이는 시편의 자화는 그림 5와 같은 자기이력곡선을 따르게 된다. 이때, 일관성 있는 시험 결과를 얻기 위해서는 반드시 그림 5에서 실선으로 나타낸 포화자화 상태에서의 자속누설탐상 수행이 필수적이다. 따라서 시편을 충분히 포화 자화시킬 수 있는 A 이상의 자기장 강도를 가지는 강력한 영구자석 또는 전자석을 이용하게 된다.

손상부에서 누설되는 자속의 세기는 그림 3에서 보여지듯, 근거리에서 떨어진 홀센서를 사용하여 비접촉 계측할 수 있는데, 그림 6과 같이 홀센서가 자기장에 놓였을 때 전류와 자기장의 방향에 수직하는 홀 전압이 발생하는 홀효과로 인해 계측되어진다 [15]. 궁극적으로, 이를 이용하여 누설자속의 세기를 계측 가능한 전압 값으로 변환하여 측정하는 것이다 [16].

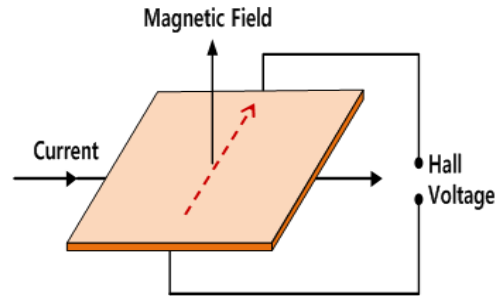


그림 6 홀 효과 (Hall effect)

이 때, 홀센서의 경우 시편과의 거리에 따라 민감도에 큰 차이를 보이므로 시험체와 센서가 최대한 근접할 수 있게 설계할 필요가 있다.

2. 자속누설 신호의 종류 및 특성

홀 센서는 센서 헤드의 진행방향을 기준으로 총 3개의 방향에 대한 자기누설선속을 측정하게 된다. 즉 시험체의 진행방향과 동일한 축(axial) 방향, 진행방향과 수직이고 단면과 수평방향인 반경(radial)방향, 축 방향 및 반경방향과 수직이며 시험체의 원주에 따라 정의되는 원주(circumferential) 방향으로 누설자속을 측정하여 결함의 크기를 추정하게 된다. 그림 7에 결함영

역에서 각 방향에 대한 누설자속의 분포를 나타내었다 [13]. 축방향 신호는 결함의 시작부분부터 신호의 크기가 증가하고 결함의 중심영역에서 그 크기가 최대를 이루는데, 결함의 중심영역을 지나게 되면 신호의 크기가 다시 줄어드는 패턴을 보여준다. 반경방향 신호는 결함의 시작과 끝 부분에서 신호의 크기가 최대를 이루게 되면서 서로 반대 극성으로 나타나게 된다. 원주방향 신호는 결함의 시작에서 원주방향 양쪽으로 자기선속이 발생하여 끝 부분에서 자기선속이 다시 모여드는 형태이다. 따라서 원주방향의 신호는 결함의 길이와 폭 정보를 모두 가지고 있지만 신호의 크기가 작아 극히 사용성이 떨어지게 된다.

이러한 신호는 공통적으로 손상부에서 아래와 같은 특성을 나타내어 상대적인 손상의 정량화를 가능하게 한다. 먼저 손상의 길이가 길어질수록 계속되는 자기누설 신호의 폭은 넓어지고 진폭은 작아지는 특성을 보인다. 손상의 폭 역시 자기누설 신호의 크기와 형태에 영향을 미치게 되는데 축방향 신호를 원주방향으로 나타낼 경우 손상이 발생한 영역에서 손상의 폭이 넓어질수록 자속량은 증가함을 보이지만 신호폭의 변화는 미비하다. 이는 자기장이 시험체에 남으려는 경향이 있고 원주방향으로 번지는 특성을 가지기 때문이다. 실제로 자기 신호를 분석해보면 블루밍 현상 (blooming effect)에 의해 실제 손상의 형상에 비해 원주방향으로 번져 보이는 경향이 있다. 손상의 깊이 역시 자기누설신호에 영향을 미치는데 손상의 깊이에 비례하여 누설자속의 크기가 커진다 [17,18].

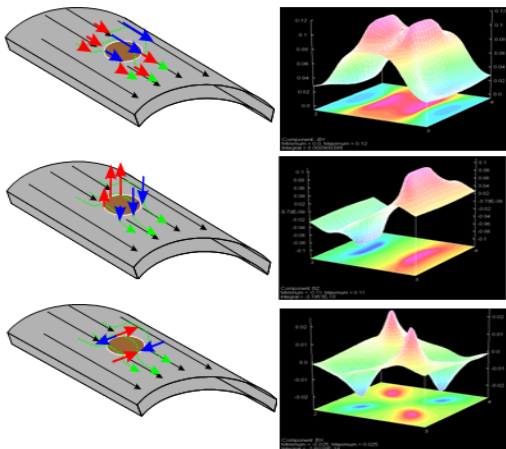


그림 7. 센서 방향에 대한 누설자속 분포[13]

3. 자속누설계측 신호처리 및 손상진단기법

실제 자속누설 센서를 통해 계측된 신호는 그림 8과 같이 다양한 노이즈를 포함한 형태로 계측되어 진다. 이러한 형태로 수집된 원신호 상태에서는 손상여부를 객관적으로 파악할 수 없었고 전문적인 지식을 갖춘 전문가에 의해서만 주관적으로 판단되어 온 한계가 있어 왔다.

이러한 신호를 이용하여 객관적인 손상 검색을 수행하기 위해서는 신호에 영향을 주는 내 외부적인 요인에 대한 보상이 요구되며 센서 신호의 노이즈 제거 및 센서 신호간의 교정이 필요하다. 노이즈는 다양한 필터링 과정을 통해 제거될 수 있는데 일반적으로 사용되는 필터로는 밴드패스

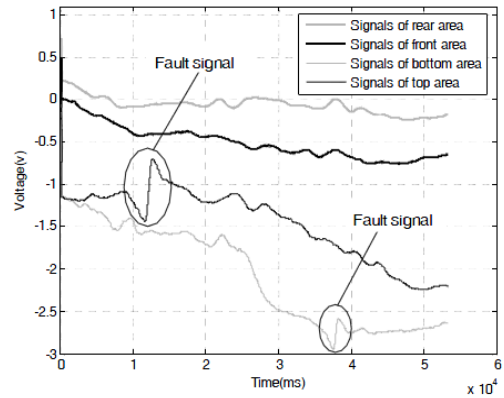


그림 8. 일반적인 자속누설 원신호[18]

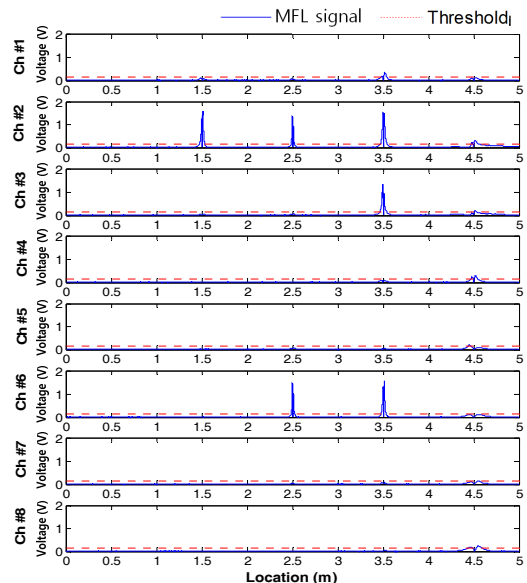


그림 9. 신호처리된 자속누설신호 및 임계값[14]

필터 (band pass filter), 평균필터 (mean filter), 중간값 필터 (median filter), 가우시안 필터 (Gaussian filter) 등이 있다.

또한 각 센서별 감도차 및 환경적 요인으로 인한 신호 품질의 차이가 발생할 수 있고 이는 결합의 추정에 어려움을 주므로 캘리브레이션 (calibration)을 통해 그림 9와 같이 각 센서의 초기 세팅의 베이스 라인 값을 맞춰주고 바이어스를 제거하거나 이동평균을 이용하여 신호의 변화량을 파악하는 방법과 같은 신호처리 과정을 필요로 한다 [17,19].

이렇게 신호처리된 신호로부터 손상을 분류해내기 위해 통계적 방법을 통해 임계값 (threshold)을 설정하는 방법이 적용이 시도되고 있으며 또한 손상의 정량화를 위해 누설신호의 침투값 간

거리 및 진폭 정보 등을 이용하는 방법 외에도 radial basis function network(RBF), multi-layer perceptron (MLP)과 같은 신경망을 이용하는 방법 및 자기신호의 역 (inverse)문제를 다루는 방법 등 다양한 접근이 시도되고 있다 [14,17,20].

4. 자속 시각화 및 로봇 기술의 활용을 통한 자속누설탐상기법의 사용성 향상

최근 데이터 처리 및 통신 기술의 발달과 함께 자속누설신호를 보다 시각적으로 직관적이고 효과적으로 전달하여 전문 지식이 없는 관리자도 손상여부를 객관적으로 판단할 수 있게 하려는 시도가 이뤄지고 있다 [21-24].

그 중 대표적으로 수많은 센서를 2차원으로 집

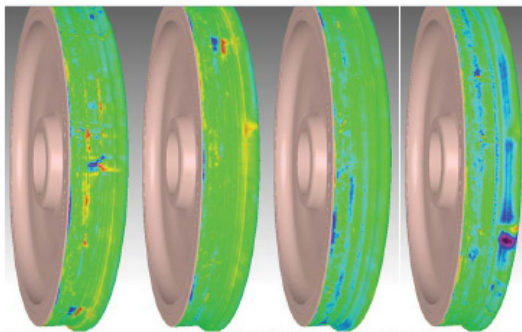


그림 10. 차륜 자기영상의 텍스처 매핑 결과[22]

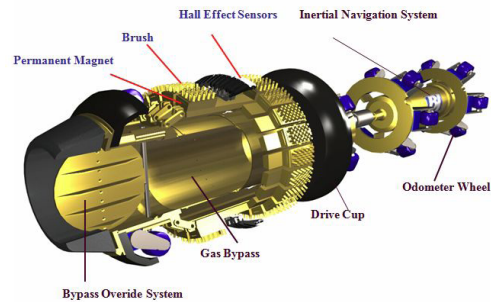


그림 13. 자속누설계측용 피그형 배관탐상 로봇[25,26]

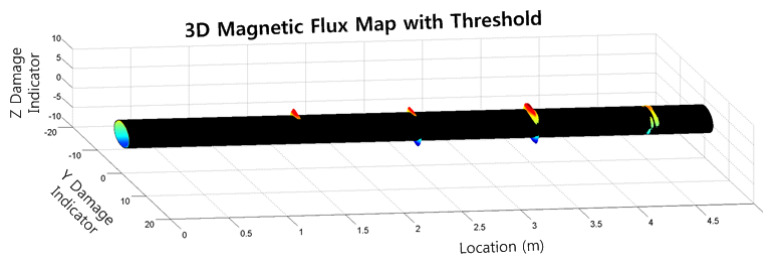


그림 11. 케이블 자속누설신호의 3D 영상화를 통한 손상 검출[24]

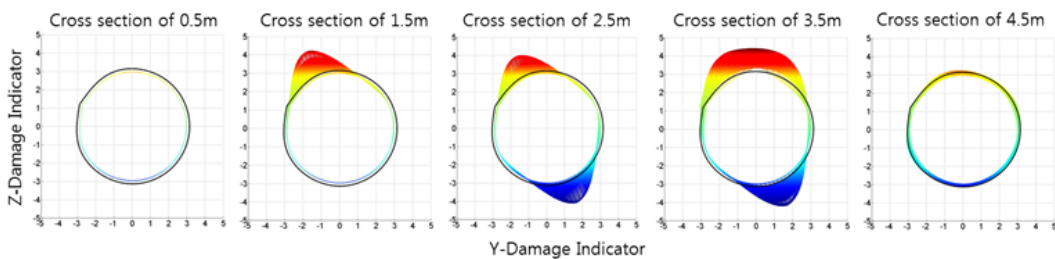


그림 12 영상화된 자속누설신호를 통한 케이블 단면 손상정보 가시화[24]

적하여 카메라와 같이 자기영상을 찍어내는 자기 카메라 기술이 개발되었고 [21,22], 1차원의 홀 센서 배열로부터 스캔된 자속정보를 활용하여 알고리즘적으로 실제 시험체의 형상과 유사한 형태로 시각화된 자기장 분포를 나타냄으로써, 사용자에게 손상정보를 직관적으로 제공하는 자속누설 시각화 알고리즘도 또한 연구되어왔다 [23,24]. 그림 10-12와 같이 3차원으로 시각화된 손상 정보는 사용자가 원하는 손상위치 및 손상정도에 관한 정보를 다양한 형태로 추출하여 제공할 수 있다는 점에서 그 활용가치가 높다고 할 수 있다.

한편 대부분 광범위하게 분포하며 접근이 힘든 선형구조물의 특성을 극복하고자 인력을 대체하여 보다 안전하고 효율적으로 자속누설신호를 획득하기 위해서 대상 구조물에 최적화된 로봇기술이 적극적으로 응용되고 있다. 대표적인 예로 배관구조물 내부를 이동하며 자속누설 데이터를 획득하기 위해 그림 13과 같이 PIG형 자속누설탐상 로봇이 개발되었으며 [25,26] 사장교 및 현수교의 대형 케이블 부식 및 단선 모니터링을 위해 케이블 등반 로봇에 자속누설 센서헤드를 탑재하여 데이터를 획득 후 교량 하부에 위치한 디바이스로 무선 전송하여 손상을 진단하는 시스템이 그림 14와 같이 개발되어지고 있다 [14,24].

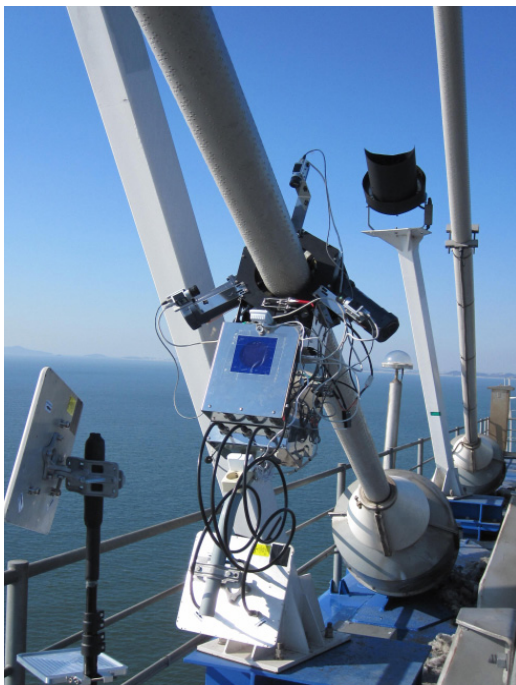


그림 14 자속누설계측용 케이블 등반 로봇[14,24]

5. 결론

이상에서 정리한 자속누설탐상기술은 점검하고자 하는 연속체 구조물의 표면에 계측센서를 부착 혹은 매립시킬 필요가 없는 비접촉 계측 방식을 사용하므로, 사람의 직접적인 접근이 어려운 곳일지라도 이동형 로봇기술과 접목시켜 언제라도 상시적으로 점검할 수 있다는 장점이 있다. 또한 수십 미터에서 수천 킬로미터까지 건설되어지는 장대교량 케이블, 플랜트 배관, 철도구조물 레일 등의 연속체 구조물의 특성상 본 기술은 단 한 개의 센서헤드가 비접촉 이동식 스캔을 통하여 빠른 속도로 점검할 수 있는 기술이므로, 가장 경제적이고 신뢰성 있는 비파괴 평가 기술이라 할 수 있다.

향후, 적용대상 구조물에 따른 운용성, 이동성, 전원공급 등의 문제점들이 보완된다면, 실질적으로 비파괴 검사 시장에서 다양한 산업계로의 공급효과가 상당히 큰 비파괴 평가 신기술로 자리매김할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] K. Mandal et al., "Investigations of magnetic flux leakage and magnetic Barkhausen noise signals from pipeline," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 30, No. 6, pp. 962-973 (1999)
- [2] S. Sumitro et al., "Elasto-magnetic sensor utilization on steel cable stress measurement," *Proc. 1st fib Congress*, pp. 79-86 (2002)
- [3] M. L. Wang et al., "Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring," Springer, Dordrecht (2005)
- [4] J. Lee et al., "Nondestructive testing and crack evaluation of ferromagnetic material by using the linearly integrated hall sensor array," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 2310-2317 (2008)
- [5] H. R. Weischedel, "The inspection of wire ropes in service: a critical review," *Materials Evaluation*, Vol. 43, No. 13, pp. 1592-1605 (1985)

- [6] H. R. Weischedel and C. R. Chaplin, "Inspection of wire ropes for offshore applications," *Materials Evaluation*, Vol. 49, No. 3, pp. 362-367 (1991)
- [7] D. L. Atherton, "Magnetic inspection in key to ensuring safe pipelines," *Oil and Gas Journal*, Vol. 87, No. 2, (1987)
- [8] M. Coktepe, "Non-destructive crack detection by capturing local flux leakage field," *Sensors and Actuator A-Physics*, Vol. 91, pp. 70-72 (2011)
- [9] C. Mandache et al., "Defect separation considerations in magnetic flux leakage inspection", *Insight*, Vol. 47, No. 5, pp. 289 - 293 (2005)
- [10] G. Dobmann and P. Holler, "Physical analysis methods of magnetic flux leakage," *Research Technique in Nondestructive Testing*, Vol. 4 (1980)
- [11] 조성호, "가스 배관 검사용 지능형 피그 시스템을 위한 자기누설 및 전자기 초음파 탐상 기법 연구", 성균관대학교 박사학위논문, (2011)
- [12] K. Mandal and D. Atherton, "A study of magnetic flux-leakage signals," *Journal of Applied Physics*. Vol. 31, pp. 3211-3217 (1998)
- [13] 서강, "자계해석기법을 이용한 자기누설 비파괴검사 시스템의 성능 향상에 관한 연구", 부산대학교 박사학위논문, (2007)
- [14] 박승희 외 4인 "자속누설 센서를 이용한 강케이블의 국부 단면손상 검색", *한국전산구조공학회 논문집*, 제25권 4호, pp. 287-292 (2012)
- [15] J. E. Lenz, "A review of magnetic sensors," *Proc. IEEE*, Vol. 78, No. 6, pp. 973-989 (1990)
- [16] E. Ramsden, "Hall-Effect Sensors: Theory and Applications," Newnes, Oxford. (2006)
- [17] 김태욱, "지하 가스 배관의 결함 크기 추정을 위한 MFL 신호 분석", 경북대학교 석사학위논문, (2009)
- [18] 김희민 외 6인, "자기누설 비파괴검사 시스템에서 축방향 미소결함 측정에 관한 연구", *한국자기학회지*, 제22권 제2호 pp. 49-57 (2012)
- [19] F. Xu, X. Wang and H. Wu, "Inspection method of cable-stayed bridge using magnetic flux leakage detection: principle, sensor design, and signal processing," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26 No. 3, pp. 661-669 (2012)
- [20] J. Y. Lee and M. Afzal, "Hierarchical rule based characterization of MFL signals obtained from natural gas pipeline inspection," *Neural Networks, IJCNN2000*, Vol. 5, pp. 24-27 (2000)
- [21] 이진이, "스캔형 자기카메라의 영상처리에 관한 연구", 대한기계학회 2005년도 춘계학술대회 논문집 (2005)
- [22] 이진이, 황지성, 권석진, 서정원, "초고속 스캔형 자기카메라에 의한 고속열차 차륜 탐상", *대한기계학회논문집A*, 제32권, 제11호, pp. 943-950 (2008)
- [23] 김재준, 김병수, 이진이, 이순걸, "선형 홀센서 배열을 사용한 결함 검사 알고리즘 개발", *한국정밀공학회지*, 제27권, 제11호, pp. 30-36 (2010)
- [24] J.-W. Kim, C. Lee, S. Park and J. J. Lee, "Magnetic flux leakage- based steel cable NDE and damage visualization on a cable climbing robot," *Proceedings of SPIE's Symposium on Smart Structures/NDE* (2012)
- [25] Canadian National Energy Board, website, <http://www.ned-one.gc.ca>
- [26] K. K. Tandon, "MFL tool hardware for pipeline inspection," *Mater. Performance*, Vol. 36, No. 2, pp. 75-79 (1997)