

도시철도차량 결함평가를 위한 비파괴검사 기법의 적용방안

A Study on Utilization of Nondestructive Inspection Method for Defects Evaluation in Electric Multiple Units

편장식†
Pyun, Jang-Sik

정종덕*
Chung, Jong-Duk

ABSTRACT

Nondestructive inspection(NDI) is a testing procedure used to easily inspect an object for internal defects, abnormalities, shape, and structure, etc. without destroying it. Typical candidates for NDI include buildings, railways, aircraft, bridges, underground pipelines and various types of factory equipment. Recent advances in nondestructive evaluation(NDE) technologies have led to improved methods for quality control and in-service inspection, and the development of new options for material diagnostics. This paper introduces the methods of a survey and assessment on NDI applications in Electric Multiple Units(EMU). The main objective of this paper was to obtain information on various applications of NDI technology in EMU.

1. 서 론

도시철도차량은 정상적인 운행상태에서 개조 및 대대적인 보수, 보강 없이 최소 25년간 사용할 수 있도록 설계되고 제작되도록 되어 있고, 차체는 언더프레임, 측면 구조를, 지붕 구조를 및 끝칸막이 구조를 등으로 구성되어 있다. 차체 및 대차를 구성하고 있는 모든 구조물들은 최대하중과 정상운행 조건하에서, 과도한 변형으로 인한 기기의 오동작을 방지하고 원활한 기능 수행을 위해 충분한 강도 및 강성이 유지되도록 되어 있다. 여러 가지 결함 등으로 인해 도시철도차량의 차체 및 대차가 강도 및 강성을 유지할 수 없는 상황이 발생하므로 이와 같은 상황을 미연에 방지하기 위하여 차량 제작시에 용접부에 대한 비파괴검사를 수행하고 있으며, 또한 사용내구연한이 도래한 차량에 대한 정밀진단시 비파괴검사를 수행하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 현재 적용중인 비파괴검사 방법의 현황 및 문제점을 분석하고, 새로이 적용 가능한 비파괴검사 기술에 대해 소개하고자 한다.

† 책임저자 : 비회원, 인하대학교 대학원(한국철도기술연구원),
도시철도표준화연구단, 학연박사과정

E-mail : jspyun@krri.re.kr

TEL : (031)460-5208 FAX : (031)460-5749

* 정회원, 한국철도기술연구원, 도시철도표준화연구단, 책임연구원

2. 비파괴검사 이론

비파괴검사(Nondestructive inspection)는 소재, 기기, 구조물 등의 종류에 상관없이 시험대상물을 손상시키거나 분리 혹은 파괴하는 작업과정 없이 결함의 유무와 그 상태 혹은 대상물의 성질, 상태, 내부구조 등을 알아내기 위한 검사방법을 말한다. 검사방법으로는 방사선투과검사(RT), 초음파탐상검사(UT), 자분탐상검사(MT), 침투탐상검사(PT), 와전류탐상검사(ET), 누설검사(LT), 음향방출검사(AE), 육안검사(VT), 적외선검사(IRT), 중성자투과검사(NRT) 등이 있다.

2.1 육안검사(Visual Testing)

육안검사는 가장 오래되고 가장 널리 쓰이고 있는 비파괴검사 방법 중 한 가지로서, 육안 또는 저배율의 확대경으로 검사가 가능한 방법이다. 이 검사의 대상이 되는 것은 재료의 표면결함, 부식상태 등을 검사할 수 있고, 어떤 경우에는 정량적으로 비교적 정확히 결정할 수도 있지만 이 검사방법을 사용하는 데는 오랜 경험이 있어야 한다.

2.2 방사선 투과검사(Radiographic Testing)

X-선이나 방사성 동위원소를 시험대상물에 투과시켜 필름 상에 나타나는 상을 판별하여 결함을 검출하는 방법이다. 필름상의 결함부위가 검은 모양을 가지게 되는데, 검고 밝은 정도의 차이로써 시험체의 결함 상태를 평가하는 것이다. 감마선은 방사성 동위원소(Radioisotope)를 사용하는데 이것은 자체적으로 불안정한 원소가 안정화(이것을 방사능 붕괴라 함)하는 과정에서 감마선을 방출하는 특정 원소를 이용하는 방법으로 보통 이리듐(Ir-192), 세슘(Cs-134), 코발트(Co-60) 등을 사용하고 있다. 엑스선과 감마선은 사실 같은 것이지만 통상의 산업현장에서는 감마선 즉, 방사성 동위원소를 많이 사용한다. 이러한 방사선이 물체를 통과하면 물체의 두께에 따른, 물체의 종류에 따라 필름에 다르게 작용하는데 이러한 원리로 검사대상의 빈공간, 개재물 등의 불연속을 검출한다.

2.3 초음파탐상검사(Ultrasonic Testing)

초음파검사법은 가청주파수를 넘는 음파, 보통 주파수 0.5~15MHz의 초음파를 피검사물에 보내어 매부의 결함도를 불균일층의 존재에 의한 초음파의 진행 교란에 의해 결함을 검출하는 방법이다. 시험체에 탐촉자를 놓고, 진동장에서 발생한 초음파 펄스를 시험체 중으로 진행시킨다. 초음파 펄스의 진행방향에 결함이나 시험체의 저면이 있으면 반사한 초음파 펄스가 탐촉자로 되돌아와서 수신된다. 이것을 브라운관상에 펄스신호로써 표시되어 관찰한다. 초음파 Energy의 손실과 더불어 재질 내를 진행하며, 계면에서 반사 하는데, 반사된 빔을 검출하여 분석하므로 결함의 존재 및 위치를 알아낼 수 있게 된다. 물체 내에 무언가 불연속부가 있으면 초음파는 반사하게 되며 그 반사된 신호의 크기, 물체의 밑바닥 신호로부터의 위치 등으로 불연속의 크기, 위치를 파악하는 것이다. 이러한 초음파탐상의 방법으로는 투과법, 반사법, 공진법의 세가지 방법으로 대별할 수 있다.

투과법은 피검사물체의 일면에서 초음파를 송신부로부터 연속적으로 보내어 반대측의 수신부에 도착하는 초음파의 강도를 비교하는 방법이다. 즉 결함에 의해 초음파의 도착이 교란되는 현상에서 결함의 크기를 판단할 수 있다. 이 방법은 박판제품 혹은 단면이 일정한 것, 표면층 가까이 있는 결함을 발견

해 내는데 편리하다. 반사법은 검사하는 물체에 수정의 초음파진동자를 대어 극히 단시간적으로 초음파를 투과하여 다른 결함 단면에서 반사되어 오는 음파를 수신 그 사이의 시간 지연에서 결함까지의 깊이를 알아내는 방법이다. 공진법은 발진자의 파장을 순차적으로 연속변화시켜 반파장의 정수배가 판두께와 동등할 때 입사파와 반사파가 공진하여 발생하는 것을 이용하는 것으로 판두께 측정, 공진의 강도에서 부식의 정도 또는 내부 결함의 유무를 가려내는 방법이다.

2.4 자분탐상검사(Magnetic Particle Testing)

강자성체인 검사 대상물을 자화하여 자속을 흐르게 하고 자분을 시험면에 뿌려서 결함부에 자분이 모여들어 형성된 결함분자 모양을 찾아내 그것을 평가함으로써 시험체 표층부에 존재하는 결함을 검출하는 방법이다. 자성체에 자장을 가하면 자성체는 자화된다. 만약 자성체의 표면이 깨끗하고 형상이 균일하다면 자화된 자성체의 자력선이 균일하며 이때 쇳가루(자분)를 자성체 위에 뿌리면 N극과 S극으로 형성된 자력선의 형태를 볼 수 있다. 만약, 자성체의 내부 또는, 표면에 어떠한 불연속부(불연속)가 존재한다면 균일한 자력선을 형성할 수 없는데 이것은 마치 자석을 쪼개어도 쪼개진 부분마다 N, S극이 존재하듯이 자화된 자성체의 불연속부는 각기 극을 형성하기 때문이다. 그러므로 이러한 부위에 자분이 모이게 되며 모인 자분의 형상은 불연속의 형상에 기인하게 된다.

2.5 침투탐상검사(Liquid Penetrant Testing)

시험편 표면에 침투액을 균열 등의 불연속부에 침투시킨 후 과잉의 침투액을 제거하고, 현상제를 적용시켜 침투된 침투액을 추출시켜 불연속의 위치크기 및 지시모양을 검사하는 방법이다. 침투탐상검사는 모세관 현상을 이용하는 것으로 시험방법 및 원리와 적용이 비교적 간단하다. 즉, 물체에 흠이 있으면 액체는 그 안으로 스며들게 되며, 물체의 표면에 개구부에 침투액을 침투시키고 깨끗이 닦은 다음 침투제를 아주 잘 빨아내는 분말 또는 현탁액을 표면에 도포하면 흠안에 남아있는 침투제가 흡출되어 눈에 보이게 되는데 보이는 부분에는 불연속의 존재를 표시하며, 아무것도 나타나지 않는다면 불연속이 없는 것으로 판정할 수 있다.

2.6 와전류탐상검사(Eddy Current Testing)

자분 탐상 방법과 비슷한 원리를 이용하는데 교류를 코일에 흘리면 코일 주위에는 변화하는 자장이 형성되고, 교류는 교번자장을 발생시킨다. 이 코일을 전도체 주위에 접근시키면 교번자장에 반대하는 교류가 전도체에서 발생하며 전도체에서 발생한 전류는 다시 전도체에 교번자장을 형성하고 이 교번자장은 다시 코일에 전류를 발생하게 한다. 이처럼 코일과 자성체는 복잡하게 영향을 주는데, 와전류란 이렇게 외부코일에 의하여 발생하는 전도체내부의 교류를 말하며, 와류검사는 비자성체에 한하는 것이 일반적이는데 그 이유는 자성체인 경우 자장을 제거해도 잔류자기가 남아 정상적인 신호 검출이 어렵기 때문이다.

2.7 누설탐상검사(Leak Testing)

각종 추적가스, 보통 헬륨이나, 암모니아계 가스를 내부 또는 외부에서 압력을 가하여 적용하고 그 반

대편에서 검출기로 추적가스의 누설률을 검사하는 방법과 진공 또는 가압하여 누설부위에 발포액을 도포하여 기포를 관찰하는 방법 등이 있다. 이외에도 압력을 가한 후 일정 시간이 지난 다음에 압력변화를 보는 방법도 있다.

2.8 음향방출검사(Acoustic Emission)

음향의 방출이란 고체가 변형 또는 파괴시에 발생하는 음을 탄성파로 방출하는 현상이며, 이 탄성파를 AE 센서로 검출하고 비파괴적으로 평가하는 방법을 AE법이라고 한다. AE는 재료가 파괴되기 이전부터 작은 변형이나 미세한 크랙(crack)의 진행과정에서 발생하기 때문에 AE의 발생 경향을 진단하여 재료와 구조물의 결함 및 파괴를 발견 및 예상할 수 있다. AE법은 주로 초음파 영역(수10kHz~수MHz)의 신호를 대상으로 하고 있어 초음파 탐상법과 비슷하지만 재료의 결함 자체가 방출하는 동적 에너지를 감지하는 점이 다른 비파괴검사 방법과 다르다.

2.9 적외선검사(IRT)

시험체 표층부에 존재하는 결함이나 접합이 불완전한 부분에서 방사된 적외선을 감지하고, 적외선 에너지의 강도 변화량을 전기신호로 변환하여 결함부와 건전부의 온도정보의 분포패턴을 열화상으로 표시하여 결함을 탐지하는 검사법입니다. 각종 재료표면 결함의 고감도 검출, 철근콘크리트의 열화진단, 강도 측정 등 복합재료의 내부 결함 검출과 열탄성효과에 의한 응력측정을 할 수 있다. 표면상태에 따라 방사율의 편차가 크기 때문에 결함 검출시 편차가 생기지 않도록 배경잡음, 전파경로에서 흡수산란의 영향을 제거할 필요가 있다.

2.10 중성자투과검사(NRT)

중성자가 물질을 투과할 때 물질과 상호작용에 의해 그 세기가 감쇠되는 현상을 이용한 비파괴 검사 방법으로 X-선이 전자와 반응하는 반면 중성자는 원자핵과 반응하여 침투 정도가 X-선보다 훨씬 깊고 분해능도 뛰어나다. 금속과 같이 밀도가 높은 물질이나 폭약류, 수소 화합물과 같이 가벼운 원소로 구성된 복합 물질의 비파괴 검사에 유용하다.

3. 도시철도차량 비파괴검사 사례

3.1 정밀진단시 도시철도차량의 비파괴검사 기준

도시철도차량의 차체 구조는 언더프레임, 측면 구조틀, 지붕 구조틀 및 끝칸막이 구조틀로 구성되어 있으며, 차체를 이루는 모든 구성품은 최대하중과 정상운행 조건하에서, 과도한 변형으로 인한 기기의 오동작을 방지하고 원활한 기능 수행을 위해 충분한 강도 및 강성이 유지되도록 되어 있다. 특히, 언더프레임은 수직하중 및 연결기를 통하여 전달되는 수평하중 및 대차를 통하여 전달되는 하중을 충분히 견딜 수 있는 구조가 요구되어 자분탐상 검사를 통하여 주요 부재중 가장 취약부분인 센터실, 사이실, 크로스빔 중 용접부 및 결함가능성이 있는 파손부위에 대하여 자분탐상검사를 실시하며, 부식상태를 확

인하기 위해 초음파탐상검사를 실시한다.

대차프레임의 비파괴검사 방법은 자분탐상검사와 방사선투과검사로 실시하며, 자분탐상검사는 대차프레임의 용접부 표면결함을 검사하기 위해 실시하였으며 방사선투과검사는 내부 균열여부를 판단하기 위해 검사를 실시한다.

3.2 도시철도차량 및 철도차량 비파괴검사 사례

사용내구연한이 도래되는 차량에 대한 정밀진단시 차체에 대한 비파괴검사는 그림 1과 같이 주요 용접부에 대해 자분탐상검사를 실시하고, 부식상태를 평가하기 위하여 그림 2와 같은 부위에서 초음파 두께측정을 실시한다.

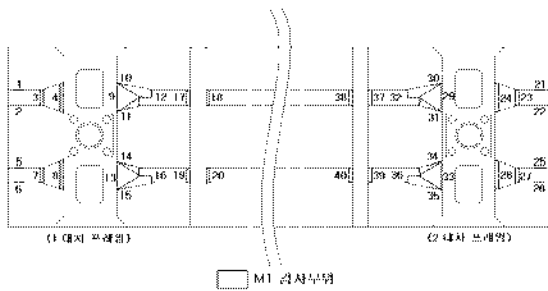


그림 1. 차체 용접부에 대한 자분탐상검사 위치



그림 2. 차체 부식상태 검사를 위한 초음파 두께 측정 위치

또한 대차프레임에 대한 비파괴검사는 용접부 표면결함검사(그림 3)를 위한 자분탐상검사와 용접부 내부결함검사(그림 4)를 위한 방사선투과검사를 실시한다.

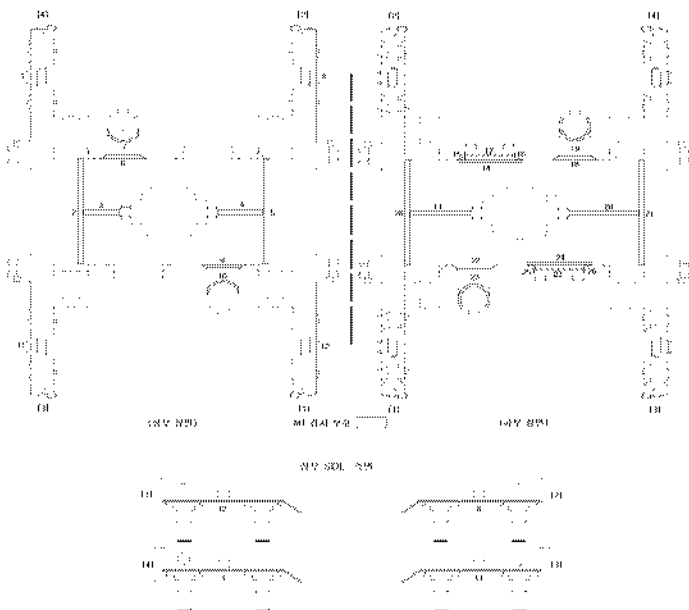


그림 3. 대차프레임의 자분탐상검사 부위

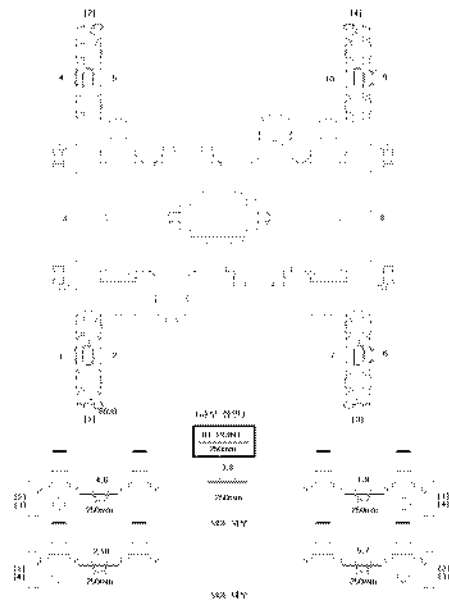


그림 4. 대차프레임 방사선투과검사 부위

차체에 대한 자분탐상검사 결과를 보면 일부 용접부에서 약 1~2mm 정도 크기의 원형결함이 소량 발견되었으며, 대부분의 용접부에서는 결함이 발견되지 않았다. 또한 초음파 두께 측정을 한 결과 두께에 대해서도 큰 변화가 없음을 볼 수 있었다. 대차프레임에 대한 MT 검사 결과 일부분에서 결함이 검출되었

으며, 이 결함이 사용에 의한 결함인지 아니면 초기 용접작업 불량에 의한 결함인지 확인하기 위하여 검출된 결함 중 길이가 가장 긴 결함에 대하여 용접부위에 대하여 표면만 그라인딩 작업 후 MT검사를 재 실시하였으며, MT검사 결과 결함은 검출되지 않았다. 이것은 용접작업 불량에 의한 결함으로 볼 수 있는 것으로 사료된다. 대차후레임에 대한 방사선투과검사 결과를 살펴보면 용접부의 취약지점인 Weld toe 또는 HAZ(Heat Affected Zone)에서의 균열이 발견되지 않았으며, 제작 당시 잔존하고 있던 기공과 슬래그만 일부 발견되었다. 전체적으로 비파괴검사결과를 분석하여 보면 사용에 의한 결함은 발견되지 않고 있으며, 발견된 결함의 경우 제작년도 당시의 용접작업 불량으로 판단된다. 도시철도차량 정밀진단에 적용하고 있는 비파괴검사 방법의 경우 차량 전체의 건전성을 평가하는데 부족한 부분이 있다. 이를 보완하기 위하여 검사가 어려운 부위에 대해 검사가 가능한 방법을 추가적으로 제시할 필요성이 요구되고 있다.

4. 펄스 와전류 검사(Pulsed Eddy Current Testing) 적용 고찰

교류전류를 사용하는 기존의 와전류검사방법과는 달리 펄스와전류검사방법은 반복적인 직류전압의 스텝파형에 의해 생성되는 역전압을 이용한다. 연속적인 직류전압이 구동코일에 인가될 때 검사대상체에서 발생한 와전류에 의해 전압펄스가 발생되고 이 전압신호를 측정함으로써 신호의 최대진폭, 감쇠시간 등을 분석하여 대상체의 두께 정보를 보다 정밀하게 측정할 수 있다. 또한 펄스와전류검사는 검사신호의 해석이 용이하고 동시에 다층구조물의 검사가 가능하며 두께 측정에 있어서 높은 정확성을 가지고 있다는 장점이 있다.

도시철도차량의 경우 외판 내부에 발생할 수 있는 부식결함 등에 대한 평가방법이 없어 비파괴검사를 통한 부식결함 평가를 수행하지 못하였으나 펄스와전류검사 방법을 적용하여 도시철도차량의 외판 부분과 같이 다층으로 이루어진 구조물에 대한 적용 가능성을 확인하기 위하여 예비시험을 실시하였다. 그림 5는 도시철도차량에 적용한 펄스와전류검사 장비사진과 측정하는 모습을 나타낸 것이다. 사용내구연한이 도래한 차량에서 일부 시험편을 채취하여 두께변화에 따른 Amplitude값 측정결과를 보면 두께 변화에 따라 Amplitude값이 변화하는 것을 볼 수 있었다. 실제 도시철도차량에 적용하여 측정한 결과 각 부위별로 Amplitude값이 차이가 나는 것을 볼 수 있었으며, 이는 부식에 의한 차이와 구조물의 형상이 다름에 따른 것으로 사료된다.

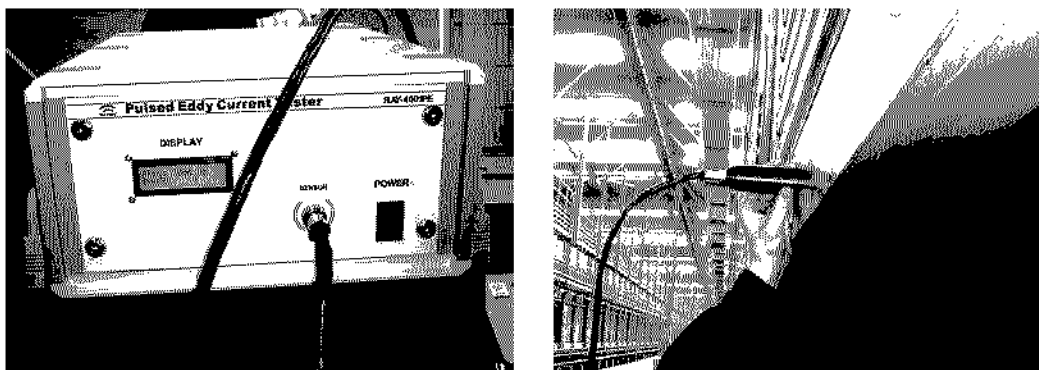


그림 5. 펄스와전류검사 장비

5. 결 론

본 논문에서는 각 산업분야에서 사용되어지고 있거나 연구가 진행 중인 비파괴검사방법에 대하여 서술하였으며, 현재 도시철도차량 정밀진단시 적용되고 있는 비파괴검사방법 및 검사결과에 대해 분석하였다. 정밀진단에서 사용되고 있는 비파괴검사방법은 자분탐상검사, 초음파 두께측정, 방사선투과검사 등이 적용되고 있으나 이 방법으로만은 정밀진단시 차량의 건전성을 평가하는데 많은 어려움이 있는데 이는 현재 적용되고 있는 비파괴검사 방법으로 검사가 불가능한 부위가 있기 때문이다. 검사가 불가능한 부위에 대해 펄스와전류검사방법을 적용하여 그 활용성을 일부 확인하였으며, 이 방법을 정밀진단에 활용하기 위해서는 좀 더 많은 연구를 통하여 데이터 확보, 검사 가능한 부위선정 및 적용기준 등을 확보할 필요가 있다. 정밀진단시 초음파탐상의 경우 두께 측정에만 활용하고 있으나 모재의 내부결함이나 점용접 부위 등의 결함평가에 적용이 가능할 것으로 판단되며 이 또한 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 권오양 (1999), “노후항공기의 비파괴시험 평가”, 비파괴검사학회지, V. 19, No. 1.
2. 박길강 (1993), “항공기에 적용되는 비파괴검사에 대한 고찰”, 비파괴검사학회지, V. 13, No. 2.
3. 이준현, 이진경, 박원수 (1999), “탄성파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴평가 기술”, 한국비파괴검사학회.
4. 김정남, 장길수, 박영훈 (2005), “철도차량의 비파괴검사에 관한 고찰”, 한국철도학회.
5. 이정기, 서동만, 이승석 (2005), “펄스 와전류를 이용한 알루미늄 두께 평가”, 비파괴검사학회지, V. 25, No. 1.
6. 강부병 (2008), “철도 구조물 비파괴검사 기술 동향”, 비파괴검사학회지, 한국철도학회지, V.11, No.4, pp.55-62.
7. 김정석, 오세용, 박익근 (2008), “음향방출법을 이용한 굽힘피로 손상된 소켓용접배관의 진단 및 감시”, 비파괴검사학회지, V.28, No.4, pp.323-330.
8. 한국철도기술연구원 (2004), “서울시 1호선 사고전동차 안전진단”.