

철도차량의 비파괴검사에 관한 고찰

The review of Non-Destructive Testing regarding railway vehicle

김 정 남*
Kim, Jung-Nam

장 길 수**
Jang, Gil-Soo

박 영 훈***
Park, Young-Hyun

ABSTRACT

Non-Destructive Testing (NDT) is test method which finds the mechanical or natural or artificial defects of the interior or exterior of those without destructing materials and welded products. NDT is a means to assess the perfection of a component or system perfection. NDT images defects using scattered light, sound, electric current, magnetic fields and X-ray. Each NDT method has merits and demerits in the detecting ability of defects according to evaluated subjects. Defects can affect the serviceability of the material or structure, so NDT is important in guaranteeing safe operation as well as in quality control. In this review, we considered the methods of NDT applied to current railway vehicle manufacturing

1. 서론

오늘날 산업현장에서 생산품의 신뢰성 제고, 구조물의 안전진단 및 내구성 확보를 위하여 다양한 방법의 비파괴검사를 이용하여 미래에 발생할 수 있는 사고 또는 재해를 예방하고 있다.

비파괴검사는 그 대상물에 손상을 주지 않고 대상물의 내부상태나 결함 등을 알아내기 위한 검사를 말한다. 이러한 비파괴검사 방법에는 육안검사, 침투탐상검사, 자분탐상검사, 초음파탐상검사, 방사선투과검사 등 여러 가지 방법이 있으며, 어떠한 검사방법을 어떻게 적용하는가는 비파괴검사 대상물의 종류 및 검사목적 등에 따라 적절히 선택하여야 한다.

특히 안전성이 중요시되는 철도, 항공기, 선박과 같은 대형수송기관, 원자력산업, 압력용기 또는 방위산업 등과 같은 분야에서는 제품의 성능에 악영향을 미치는 결함의 존재 여부를 검사할 필요성이 급증하고 있으며, 또 산업의 발달에 따라 공정합리화 및 에너지의 효율적인 이용방안으로써 비파괴검사 기술의 이용 및 검사기술의 급속한 발달이 요구되어 지고 있다.¹⁾

철도차량분야에서 비파괴검사는 신조차 제작시 차체 및 대차 용접부위를 중심으로 한 제작검사, 차륜, 차축 진단검사, 가스압접 및 테르밋용접 레일 등의 용접부검사 및 기존 운행차의 열화평가를 목적으로 한 정밀진단 등 차량, 시설면에서 다양하게 이용되어지고 있다.

본고에서는 현재 Stainless steel 철도차량 제작시 적용되어지고 있는 비파괴검사의 기초원리 및 검사방법, 적용기준에 대하여 차체 용접부위를 중심으로 기술하고자 하며, 향후 적용가능한 검사방법을 문헌상 조사를 통해 제시하고자 한다.

* 책임저자 : (주)로템 기술연구소 연구원, 정회원

** (주)로템 기술연구소 선임연구원,

*** (주)로템 기술연구소 수석연구원,

2. 본론

2-1. 비파괴검사의 정의 및 목적

비파괴검사는 재료, 부품, 구조물이 방사선, 음파, 전자기, 열 등의 물리적 성질이 조직의 이상이나 불연속의 존재로 인하여 변화하는 것을 이용하여 물리적 성질의 변화량을 측정함으로써 역으로 조직의 이상이나 불연속의 존재와 정도를 검출하는데 기본을 두고 있으며 대상물에 손상을 입히거나 파괴하지 않고 검사하는 기술이다. 이는 제품의 품질관리 및 품질보증의 중요한 수단으로 생산원가의 절감, 제조기술의 개량 및 신뢰성 향상을 위하여 널리 이용되고 있다.²⁾

2-2. 비파괴검사방법의 분류

검출하고자하는 결함의 부위에 따라 Surface testing method와 Volumetric testing method로 분류한다. Surface testing method는 표면 및 표층부에 존재하는 불연속을 탐상하는 방법으로 육안검사, 자분탐상검사, 침투탐상검사 및 와전류탐상검사가 이에 속한다. Volumetric testing method는 내부에 존재하는 불연속을 탐상하는 방법으로 방사선투과검사와 초음파탐상검사가 있다.³⁾

1) 방사선투과검사 (Radiographic Testing)

X-선, γ -선은 물체를 투과하는 성질이 있으며, 시험체의 밀도 및 두께 등에 따라 그 투과하는 정도가 달라지므로 시험체를 투과할 때 내부에 결함이 있으면 시험체로부터 투과되어 나오는 방사선량에 차이가 생기게 된다. 이때 시험체 뒤에 X-선 필름을 부착시키면 투과된 방사선량에 따라 필름의 감광 정도가 달라지면서 필름상에 농도차가 생기면서 특정상을 형성하게 되는데 이를 관찰하여 내부에 존재하는 결함의 위치, 크기 등을 판정할 수 있다.

2) 초음파탐상검사 (Ultrasonic Testing)

초음파란 사람의 귀로 들을 수 없는 파장이 짧은 음파(소리)를 말하며, 금속 등의 물체 속을 쉽게 전파하고 서로 다른 물질과의 경계면에서는 반사하는 특성이 있다. 초음파를 시험체 내부로 전파시키면 시험체 내부에 결함이 존재하는 경우 불연속에 의해 초음파가 반사하게 된다. 이 반사파를 검출하여 반사파에 대한 정보를 분석하면 결함의 유무와 위치, 크기 등을 판별할 수 있다.

3) 자분탐상검사 (Magnetic Particle Testing)

시험체에 자장을 적용하여 자화시키면 자속이 발생한다. 이때 시험체의 표면 또는 표면하에 결함이 있으면 자속이 누설되면서 불연속의 끝단부에 자극이 발생하고 국부적인 자장을 형성하게 된다. 이 때 시험면에 자분을 적용하면 불연속 부분의 국부 자장에 의하여 자분이 모이게 됨으로써 결함의 위치와 크기를 알 수 있게 된다.

4) 침투탐상검사 (Liquid Penetrant Testing)

침투탐상검사는 표면결함을 검출하는데 효율적인 방법으로, 원리가 단순하고 사용하기가 간편하여 현장에서 많이 이용하고 있다. 침투탐상검사는 금속재료뿐만 아니라, 비금속재료에도 이용할 수 있으며, 시험체의 형상이 복잡하더라도 검사가 가능하다. 그러나 표면 결함만 검출 가능하고 모세관현상을 기본원리로 하는 방법이므로 다공성 시험체에는 적용할 수 없다.

5) 육안검사(Visual Testing)

육안검사는 사람의 눈으로 결함의 유무나 부재의 변형 등 이상여부를 확인하는 방법으로 간단한 검사기기를 이용하여 수행할 수 있으나 오랜 경험과 지식 및 기량을 가져야한다.

Table.1,2는 대상물의 결함부위에 따른 비파괴검사방법 검출능력을 비교한 것이다.⁴⁾

Table.1 표면결합 검출 : 자분탐상검사(MT)와 침투탐상검사(PT) 비교

구 분		자분탐상검사	침투탐상검사
대상재질	금속	강자성체	○
		비자성체	×
	비금속재료		×
대상결함	개 구		◎
	비 개 구		◎
	표면직하 결함		○

주) ◎ : 검출감도 좋음 ○ : 가능 × : 불가능

Table.2 내부결합 검출 : 방사선투과검사(RT)와 초음파탐상검사(UT) 비교

구분		방사선투과검사	초음파탐상검사
대상결함	체적결함	◎	○
	면상결함	○	◎
결함에 관한 정보	형 상		◎
	치수	길 이	◎
		높 이	△
	위 치 (깊 이)		△

주) ◎ : 검출감도 좋음 ○ : 가능 △ : 현재로서는 불가능 × : 불가능

이상에서 언급한 검사방법은 어느 정도 시험의 목적을 달성할 수 있고, 동시에 경제성, 조작성이 우수하여 일반적으로 산업현장에서 가장 많이 이용되는 검사방법들이며, 철도차량분야에서도 그 예외는 아니다. 이외에도 와류탐상검사(Eddy current testing), 누설탐상검사(Leak testing), 스트레인측정(Strain measurement), 음향방출시험(Acoustic emission testing), 열화상 해석법(Thermography) 등 매우 다양한 검사방법이 적용되어지고 있다. 열화상 해석법의 경우는 노후 전동차의 정밀진단시 각종 배관류, 전선류 및 기기류의 경년열화를 측정하는데 사용되어지며, 스트레인 측정은 차체 및 대차의 정하중시험에 적용되어지고 있다.

2-3. Stainless steel 철도차량의 비파괴검사

1) Stainless steel 철도차량의 구조 및 용접방법

Stainless steel 판재는 내부식성과 고강도 특성으로 차체 판재의 두께 감소가 가능하여 경량화에 유리하고, 차체 표면의 다양한 표면처리가 가능하므로 외관의 미려함을 높일 수 있다. 기존의 차체재질인 연강에 비하여 상대적으로 고가이지만 유지보수 및 경량화에 따른 운행비용 측면에서 볼 때 유용성을 가지고 있어 철도차량 차체 재질로의 적용이 증가하고 있는 추세이다.⁵⁾

철도차량의 차체는 하부구조(Underframe), 측구조(Side structure), 지붕구조(Roof structure), 단부구조(End structure)로 구성되어 있으며, 박판구조물이므로 접합을 위해서 Spot welding이 주로 적용되고, 수밀이 요구되는 지붕과 같은 곳에는 연속저항용접인 Seam welding, 하부구조와 같은 후판구조에는 Spot welding과 함께 Arc welding이 이용된다.⁶⁾

2) Stainless steel 철도차량의 비파괴검사방법 및 부위

Stainless steel 철도차량의 제작공정시 비파괴검사는 다음의 절차에 따라 수행되어지고 있다. 아크용접 부위의 경우는 BS EN 970 (Non-destructive examination of fusion welds-Visual examination)에 따라 전용접부위에 대하여 100% 육안검사를 실시하며, 용접품질이 Category 1으로 지정된 주요 용접부위에 대해서는 자분탐상검사 또는 침투탐상검사 등의 비파괴검사를 수행한다. Table.4는 아크용접부에 대한 용접 품질 및 이에 따른 결함의 품질등급을 규정한 기준으로

검사해야할 용접부위의 구조 및 중요도에 따라 그 기준이 다르게 설정되어 있다.

Table.3 아크용접부위 검사 주기

Weld Quality	Frequency of Inspection		Remarks
	Visual Inspection	NDT	
Category 1	100 %	100 %	
Category 2	100 %	Note 1	

Note 1. 육안검사에서 결함이 발견되었거나 부적합한 용접증거가 있을 경우 검사자는 NDT를 요구할 수 있음.

Table.4 아크용접부위 검사 기준

Quality	Description
Category 1	내부 및 표면 NDT가 수행되어야 할 Weld Quality 1 아크용접부로 ISO 5817에 의거 결함등급은 B(엄격) 이상임.
Category 2	내부 및 표면 NDT가 필요없는 모든 다른 아크용접부로 ISO 5817에 의거 결함등급은 C(중간) 이상임.

주) ISO 5817 : 강의 아크용접이음-불완전부의 품질등급 지침

예로 Fig.1의 (a) Carbody structure에서 기호 W1으로 표기된 부분은 End collision post와 Under frame 용접부, Corner post와 Under frame 용접부, Cab main frame과 Under frame 용접부를 지정한 것으로 각각의 부위에 대하여 침투탐상검사를 수행하고, 검출된 불안전부 혹은 결함의 등급은 Category 1, 즉 ISO 5817의 B등급 이상을 만족해야 하는 용접부위들이다. W1 이외의 용접부위는 육안검사만 적용하며 그 기준도 Category 2. C등급을 만족하면 합격되는 용접부위들이다. (d) Under frame end section의 경우는 기호 W1인 침투탐상검사뿐 아니라 기호 W2로 표기된 자분탐상검사를 병행해야 하며 기준은 (a)의 경우와 동일하다.

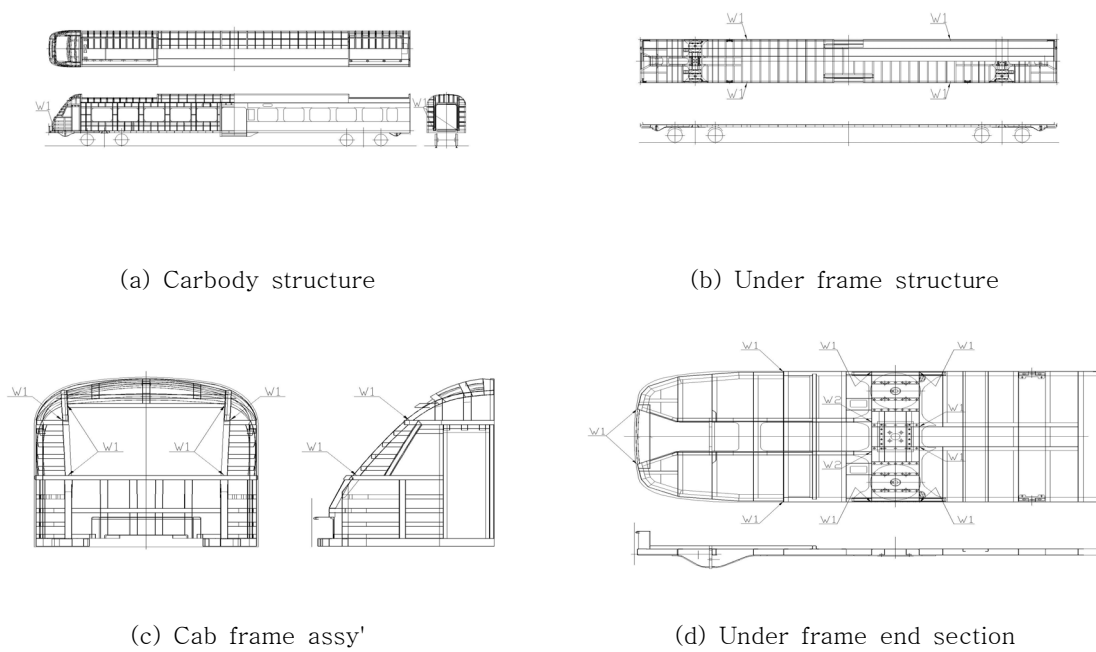


Fig.1 차체 부위에 따른 비파괴검사 대상부위

저항점용접 부위는 JIS Z 3140 (점용접부의 검사방법)에 따라 육안검사를 실시하며 그 기준은 Table.5와 같다.

Table.5 JIS Z 3140 (점용접부의 검사방법) 용접부의 등급

용접부의 등급	기계적 성질 및 평활도
A 급	특히 강도를 필요로 하는 용접부
B 급	강도를 필요로 하는 용접부
C 급	A 급, B 급 이외의 용접부
AF 급	A 급의 품질을 가지며 또한, 표면이 평활해야 하는 용접부
BF 급	B 급의 품질을 가지며 또한, 표면이 평활해야 하는 용접부
CF 급	C 급의 품질을 가지며 또한, 표면이 평활해야 하는 용접부

비파괴검사 결과가 기준이하인 경우는 보수용접 혹은 폐기해야 하며, 보수용접 후에 재검사를 받아야 하며 필요할 경우 방사선투과검사를 실시해야 한다.

3) 도시철도차량 정밀진단시 비파괴검사

사용내구연한이 도래된 도시철도차량의 안전운행 적합성 여부를 진단하는 도시철도차량 정밀진단에서 차체의 정밀진단방법으로 비파괴검사가 수행되어지고 있다. 구조체 용접부에 대한 표면검사는 육안검사와 비파괴검사로 구분하며, 육안검사는 목측 및 측정기구를 이용하고 비파괴검사는 침투탐상검사와 자분탐상검사를 실시한다. 육안검사결과 표면결함이 의심되는 부위는 다른 비파괴검사를 실시하며 표면결함에 대한 한계는 C급 이상으로 한다. 내부결함검사는 표면결함검사에 의한 의심부위, 결함이 생기기 쉬운 개소(볼스터 부분, 센터실과 볼스터 연결부위, 크로스빔과 사이드실 연결부위, 센터실과 엔드실 연결부위, 창문 및 출입문 모서리 부위 등), 응력집중부 부근의 개소에 대하여 방사선투과검사 또는 초음파탐상시험을 실시한다.⁷⁾

2-4. 점용접부에 대한 음향방출법(Acoustic Emission Monitoring)의 이용

Stainless steel 철도차량의 점용접부를 검사할 수 있는 비파괴검사방법은 육안검사와 침투탐상검사가 있으나 이 방법들은 모두 표면결함에만 국한될 뿐 내부결함은 확인할 수 없다. 또한 차체와 같은 대형구조물의 점용접부를 전수검사하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소요된다. 이에 용접공정중에 비접촉식으로 시험체 내부에 생기는 결함을 검출할 수 있는 검사방법으로 최근 음향방출법(Acoustic Emission Monitoring)이 연구되어지고 있다.⁸⁾

음향방출법은 물체의 균열 또는 국부적인 파단으로부터 방출되는 응력파(Stress Wave Emission)를 센서로 검출하는 방법이다. 이 시험방법은 실시간으로 결함의 진원지와 결함의 상태를 추적할 수 있으며, 국부적인 결함의 검출 이외에 전체 구조물의 상태를 Monitoring할 수 있는 장점이 있다. 음향방출법의 단점으로는 안정화된 결함, 즉 진행이 멈춘 균열 등은 검출할 수 없으며, 센서의 감도에 따라 결함의 검출결과가 좌우된다. 또한 음향방출이 구조물의 여러 구조상세를 따라 전달될 때 결함의 정확한 위치를 찾기는 어려우며, 이러한 경우에는 초음파탐상법과 같은 국부적인 결함검출법을 병행하여야 한다.

저항점용접에 있어서 첫 번째로 용접재료에 전극이 접촉될 때와 압착이 진행될 때 신호가 방출되며, 전극의 형상조건과 용접재의 표면에 따라 방출특성이 달라진다. 두 번째로 발생하는 신호는 전류가 흐르기 시작할 때 소성변형, nugget형성, 마찰 그리고 용융과 팽창 등이 생기면서 발생한다. 이 중 nugget형성에 관계하는 신호가 높은 에너지를 가진다고 알려져 있으며, 이때 발생하는 신호는 점용접부의 특성을 대변하는 정보를 가지고 있다. 용접전류가 차단된 후에도 응고에 의한 신호가 방출되며, 이 신호에 의해 nugget의 크기와 inclusion에 관한 정보를 얻을 수 있다. nugget 크기는 용접부의 건전성에 직접적인 영향을 주는 것으로 이를 적당하게 제어할 필요가 있

고 이러한 제어수단으로서 AE가 응용될 수 있다.

그러나 용접공정중에서의 AE응용은 수많은 난점을 가지고 있어 아직까지는 그 응용에 제한적이다. 용접중에는 필연적으로 AE검출을 방해하는 요인들 즉, 결함에 관계없이 용융금속의 냉각과정에서의 응고 및 변태에 의한 소리 방출, 아크용접에 있어서의 아크 잡음, 슬래그의 파단 등에 의한 잡음 등 결함발생을 on-line으로 검출하는 수단으로서 AE를 사용하기 위해서는 이와 같은 방해요인들을 목적으로 하는 신호와 구별시키는 특별한 방법들이 요구되어지고 있다.

3. 결론

본고에서는 현재 철도차량에 적용되어지고 있는 비파괴검사에 대하여 각 방법별 정의 및 원리를 문헌조사를 통해 기술하였고, 철도차량 현장에서의 검사 적용 예를 들어보았다. 이미 비파괴검사는 철도차량의 운용이나 전체적인 검사 등의 한 부분으로 되어 어느 한 부분이라도 소홀히 하여 누락될 수 없는 중요한 부분으로서 그 자리매김을 하고 있다. 각각의 시험방법에 대한 원리, 세부 검사방법의 이해 및 올바른 기준 적용은 철도차량의 안전성 확보를 위하여 필수적이라 할 수 있다. 또한 AE와 같이 다른 산업분야에서 사용되고 있거나 연구되어지고 있는 검사방법도 향후 적용할 수 있도록 신기술 개발에 동참하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 정용무, (1994), "비파괴검사개론", Journal of KWS, Vol.12, No.4, pp.1
2. 장홍근, (2000), "방사선을 이용한 비파괴검사의 현황", 기술사, 6, pp.20
3. 정광교, "비파괴검사의 기초", 선박검사기술협회, pp.64~71
4. 한국비파괴검사진흥협회, (2000), "비파괴검사 안전관리 및 육성제도 구축에 관한 연구", 과학기술부, pp.186
5. 서승일, (2004), "스테인레스강 철도차량 차체 설계기술", 한국철도학회지, 제7권, 제2호, pp.39
6. 서승일, (2004), "스테인레스 철도차량 차체 제작과정에 관한 고찰", 한국철도학회지, 제7권, 제3호, pp.35
7. 한국철도기술연구원, (1999), "도시철도차량 정밀진단지침 연구보고서", 건설교통부, pp.26~27
8. 정희돈 외 2인, (1993), "용접부검사법으로서의 Acoustic Emission", 대한용접학회지, 제11권, 제2호, pp.8~9,