도시철도차량의 다층 구조물 부식 측정을 위한 비파괴 기법 연구
A Study on NDT Techniques for Evaluation of Corrosion in Multi-layered Conductive Structures of Urban Railroad Car of the paper

이찬우† 정종덕* 송성진**
Chan-Woo Lee Jung-Duk Chung Sung-Jin Song

ABSTRACT

THE CARBODY AND BOGIE FRAME OF AN URBAN RAILWAY VEHICLE CONSIST OF MULTI-LAYERED WELDING STRUCTURE. IN KOREA ENDURANCE LIMIT OF AN URBAN RAILWAY VEHICLE IS STSTED IN THE RULE OF MANAGING URBAN RAILWAY VEHICLE UNDER THE LAW OF URBAN RAILWAY. IN KOREA AN URBAN RAILWAY VEHICLE IS DESIGNED AND MADE TO KEEP ITS QUALITY OVER 25 YEARS. WHEN THE RAILWAY VEHICLE BECOMES 25 YEARS OLD, CORROSION OF CARBODY AND UNDER FRAME OF A RAILWAY VEHICLE IS EVALUATED ACCORDING TO THE NON-DESTRUCTIVE TESTING. IT CAN BE USED AS LONG AS 40 YEARS. IT IS STATED IN THE ARTICLE 4 'THE METHOD AND STANDARDS OF PRECISE DIAGNOSIS' UNDER THE RULE OF MANAGING RAILWAY VEHICLE IN KOREA. SO, IN THIS STUDY, WE HAVE INVESTIGATED PERFORMANCE OF PULSED EDDY CURRENT TESTING METHOD BY MEASURING THICKNESS VARIATION OF FABRICATE OF CARBODY AND UNDER FRAME FOR URBAN RAILROAD CAR. AND THEM, THE PROCESS OF EVALUATING REMAINING LIFE ACCORDING TO TESTING OF CORROSION AMOUNT IS INTRODUCED.

1. 개요

도시철도차량의 차체 골조 및 대차 프레임은 용접구조물로 되어있다. 국내의 경우 도시철도차량에 대한 사용연한은 도시철도법 도시철도차량관리에 관한 규칙에서 명시하고 있다. 국내의 경우 설계 시 최소 25년 이상 건전성을 유지할 수 있는 차량을 제작토록 되어있다. 또한 도시철도차량이 제작되어 사용되는 시점으로부터 25년이 도달한 차량에 대해서는 도시철도차량 관리에 관한 규칙 제4조 「정밀진단 방법 및 기준」에서 도시철도차량에 대한 비파괴 기법에 의한 차체 골조에 대한 부식 평가를 실시하여 최대 40년까지 사용할 수 있도록 되어있다. 이에 따라 본 논문에서는 다층 구조물로 이루어진 도시철도차량에서 발생되는 부식에 대한 종류와 부식 평가를 위한 비파괴 기법에 의한 부식 평가 방법을 소개하고자 한다.

2. 도시철도차량 부식 사례 분석

도시철도차량의 부식이 심한 부위는 차체언더프레임, 측면외판 그리고 응결수가 배출되는 부위이다. 본 연구에서는 상대적으로 습도와 Cl이 많은 지역인 부산교통공사 1호선 도시철도차량을 모델로 하였고

† 교신저자, 한국철도기술연구원, 고속철도연구본부
E-mail : cwlee@krri.re.kr
* 한국철도기술연구원, 도시철도표준화연구단
** 성균관대학교, 기계공학과

부식에 대한 현장 조사 결과 차체 언더프레임 및 차체 측면 외판 스폿 용접부에서 부식이 심하게 발생됨을 알 수 있었다. 특이 한 점은 차량 제작 시 빗물 및 수분의 유입을 억제하기 위한 실링부의 실링재가 25년 정도 운행함에 따라 열화로 인하여 실링재가 파손되면서 부식 환경에 노출되었다. 이에 따라 차체 구조물 주위의 수분이나 용접부의 산화·환원 작용에 의해 발생되는 습식 형태의 부식이 주로 발생되고 있다. 부식의 종류는 크게 습식 및 건식부식으로 나뉘며, 이는 부식 매질로서 수용액의 매개 유무를 근거로 한다. 습식부식은 일반 철도차량과 같은 철 구조물에서 흔히 발생하는 형태의 부식이며 건식부식은 일종의 고온산화로서 발전설비 등에서 자주 관찰된다. 도시철도차량 차체 언더프레임에 발생하는 습식 부식 형태 가운데서 이종금속접촉부식(Galvanic Corrosion)과 틈 부식(Crevice Corrosion)이 발생함을 알 수 있었다. 이종금속접촉부식과 틈 부식에 대한 부식 특성을 약술하면 다음과 같다.

(1) 이종금속 접합부식(Galvanic Corrosion)

재질이 다른 두 이종금속(Dissimilar Metal)이 용액 속에 담구어지게 되면 전위차가 존재하게 되고 따라서 이들 사이에 전자의 이동이 일어난다. 귀전위(Noble Potential)을 가진 금속의 부식속도는 감소하고 활성전위(Active Potential)를 가진 금속의 부식속도는 촉진된다. 즉 전자는 음극이 되고 후자는 양극이 된다. 이러한 형태의 부식을 갈바닉 부식 또는 이종금속접촉부식이라 한다. 부산교통공사 1호선 도시철도차량 언더프레임의 Side Sill은 Stainless steel로 되어있고 Rocker Rail은 Mild steel로 되어 있어 각각의 금속에 전위차에 의해 부식이 발생함을 알 수 있다.

(2) 틈 부식(Crevice Corrosion)

전해액에 노출된 금속 표면상의 어떤 틈(Crevice) 또는 가려진 부분내에서 국부적으로 심한 부식이 발생하는 것을 틈부식(Crevice Corrosion)이라 하며 구멍, 가스켓 표면, 포개어 있는 부분, 표면침전물, 볼트, 리벳헤드 밑의 틈 등에 정체된 적은 양의 용액과 관련이 있다. 부산교통공사 1호선 도시철도차량 차체 언더프레임은 Side Plate, Side Sill, Rocker Rail의 3단으로 이루어진 다층구조물 용접물이다. 다층 구조 용접물 사이 틈에는 전해액에 정체되어 부식이 발생한다. 그림 1은 부산교통공사 1호선 도시철도차량 차체언더프레임의 틈 부식 발생을 보여 주고 있다. 또한 도표 1은 틈 부식 발생 원리를 보여 주고 있다.

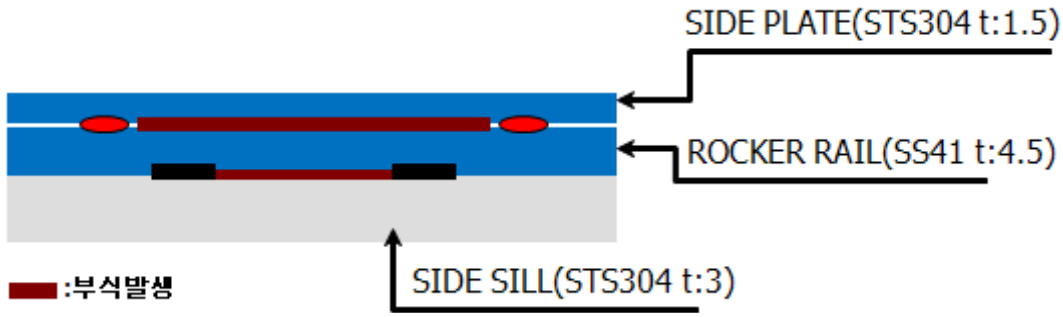


그림 1. 차체언더프레임의 부식발생 위치

도표 1. 틈 부식 발생 원리

산화 M → M^+ + e 환원 O2 + H2O	→	산소고갈, 산화반응 정지	→	금속이온 급속 수화, Cl^-로 인한 부동태 산	→	M^+Cl^- + H2O = MOH↓ +

+ 4e → $4OH^-$		화피막 파괴	H^+Cl^-

→ 부식속도증가

3. 다층 구조물 부식 측정을 NDE 기법

다층 용접 구조물로 되어 있는 도시철도차량의 부식 측정에 대한 NDE은 부식이 발생하는 부위의 용접종류와 주요부재 연결방법 그리고 단종재질이냐 이종재질이냐에 따라 달라진다. 도표 2는 다층 구조의 복합구조물로 이루어진 도시철도차량 차체부위에 대한 부식 측정 기법을 보여 주고 있다.

도표 2. 다층 구조의 복합구조물 부위인 차체언더프레임의 부식 측정 기법

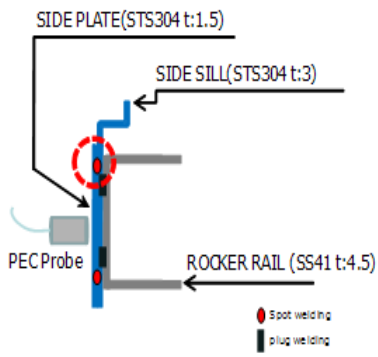
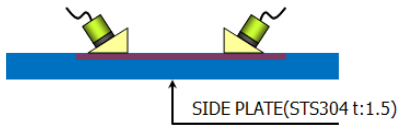
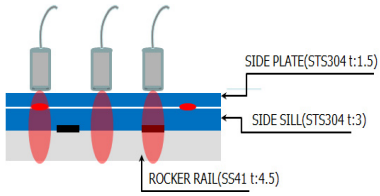
차체언더프레임 측면도	검사부	기법
		압전소자 여기 표면파 기법(PZT Induced Surface wave)
		펄스 와전류 기법 PECT (Pulsed Eddy Current Testing)

도표 2에서 보여주고 있는 압전소자 여기 표면파기법은 차체골조의 side sill(SS400)과 side plate(STS304)를 접합해 주는 스폿 용접부의 부식에 의한 용접부 표면의 부식 상태를 확인 할 수 있는 기법이다. 이 초음파 탐상기는 발신부, 수신부, 브라운관 표시부(CRT), 시간축부 및 전원부로 구성된다. 송신부는 고전압(500V 이상)의 전기펄스를 생성하고 그 전기펄스를 탐촉자 중의 진동자에 인가하여 초음파를 발생시키는 기능을 가지고 있다. 수신부는 반사하여 되돌아 온 에코를 수신하고 그 음압을 전압으로 바꾸는 동시에 증폭시키는 기능을 갖는 부분이다. 탐촉자는 탐상기 본체의 송신부로부터 송신되어 오는 전기신호를 초음파펄스로 변환하고, 수신된 초음파펄스를 전기신호로 변환하여 탐상기 본체에 보내는 역할을 한다. 그림 2는 철도차량의 표면파(Rayleigh wave)를 발생시키기 위하여 제작한 웻지(아크릴수지)와 사각탐촉자 그리고 조합된 탐상장비를 보여주고 있다. 표면파 발생을 위한 웻지의 재질에 따라 음파 속도가 다르게 나오므로 사각 탐촉자와의 각도도 재질에 따라 다르게 설계해야 한다. 이를 위해서는 웻지 재질의 음파속도를 식(1)~(3)을 이용하여 재질의 음파속도를 최적화하여 부식 상태를 검사할 수 있다. 본 연구에서는 표면파(Rayleigh wave) 발생을 위한 별도 제작되어진 아크릴 수지 웨지와 사각탐촉자를 사용하여 음파 속도를 계산하여 두께 감소율을 측정 시험을 부산교통공사 1호선 차량에 대한 시험을 통해 검증시험을 실시하였다. 시험 방법은 Side Plate에 표면파를 이용하여 Pulser와 Reciver의 간격을 각각 300mm, 500mm, 700mm 간격으로 측정한 신호 변화에 따라 재료의 물성 변화를 살펴보았다. 이를 통해 차체 Side Sill과 Side Plate 사이에 스폿 용접부에 대한 표면 부식 상태를 확인 한 결과 아주 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있었다.[1]

$$C = \sqrt{\frac{E(\text{탄성계수})}{\rho(\text{밀도})}} \quad (1)$$

$$C_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{K+(4/3)\mu}{\rho}} \quad (2)$$

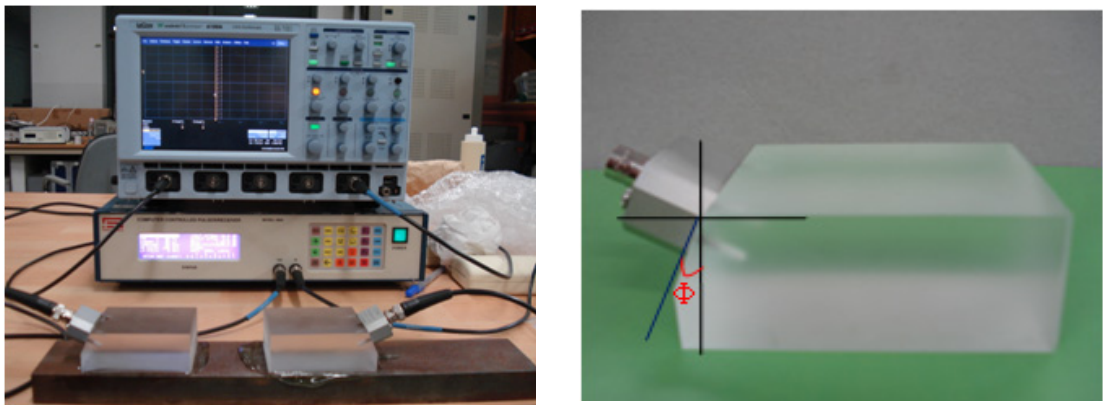
$$C_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3)$$

E = Young's modulus

ν = Poisson's ratio

K = 체적 탄성계수

G = 횡(전단) 탄성계수웻지의 각도도 과 탐촉자 와의 각도



(a) (b)

그림 2. 철도차량 부식평가를 위한 초음파 탐상 장비 구성도

(a) 초음파 탐상 장치 (b) 표면파 발생 아크릴 웻지

도시철도차량과 같이 다층 구조로 이루어진 접합부에 대한 비파괴검사 방식에 의한 부식률 측정 방법 중 두 번째로는 부식 두께를 측정하는 펄스와전류탐상기법이 있다. 이 기법의 원리는 코일에 교류 전류를 인가해주는 일반적인 전류탐상기법(ECT;침투깊이가 0mm에 가까움)에 코일에 pulse를 부가하여 인가해 주는 기법이 바로 PECT 기법이다. 이 기법은 침투 깊이가 알루미늄의 경우 90mm, 일반 강은 10mm로 ECT에 비교하여 탐상 깊이가 높은 상태이기 때문에 도시철도차량과 같이 다층 구조로 이루어진 구조물에 대한 부식 두께 검사에 적합한 검사 기법이다. 그림 3은 PECT 기법에 의한 다층 구조물에 대한 부식 두께 측정 블록다이어그램을 보여주고 있다. 또한 그림 4는 도시철도차량 언더프레임에 대한 부식량 측정을 위한 PEC Probe이다. 도표 2는 PEC Probe의 파라메터 값을 보여주고 있다.[2]

그림 4에서 보여주고 있는 PECT 장비를 부산교통공사 1호선 도시철도차량에 대한 부식량 두께 측정을 실시하였다. 이 때 측정 위치는 그림 5와 같고 측정 부위별 PECT 검사 결과가 도표 3에 제시되어 있다. PECT 방식에 의한 부식량 측정 결과 도표 3에서 보는 것과 같이 승객의 승하차로 교번하중이 가장 많이 받는 구간인 문 중앙부와 차량의 배수를 위한 우수관이 진폭 값이 가장 높게 나타났다. 이는 부식량이 큼으로 인해 가장 많이 두께가 감소하였음을 말해 주고 있는 것이다. 본 연구를 통해 철도차량과 같이 다층 구조물로 되어있는 용접구조물의 경우 PECT 기법을 통한 부식량 두께 측정은 매우 유용하게 활용할 수 있음을 보여주고 있다.

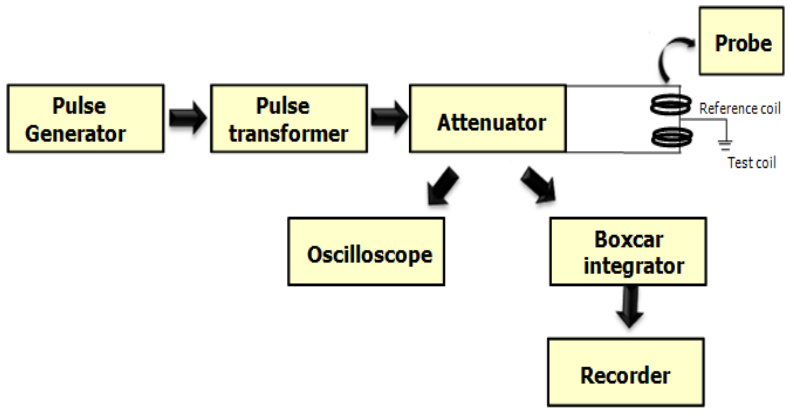


그림 3. PECT 기법에 의한 다층 구조물에 대한 부식 두께 측정 블록다이어그램

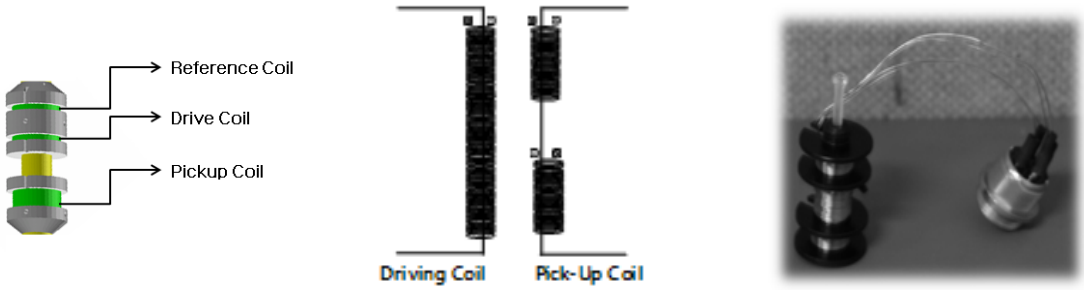


그림 4. 도시철도차량 언더프레임에 대한 부식량 측정을 위한 PEC Probe

도표 2. PEC Probe의 설계 파라메터 값

	Coil thickness(mm)	Length(mm)	Number of coil turns(N)
Drive Coil	0.38	27	250
Pick-up Coil(Top)	0.24	4	210
Pick-up Coil(bottom)	0.24	4	350

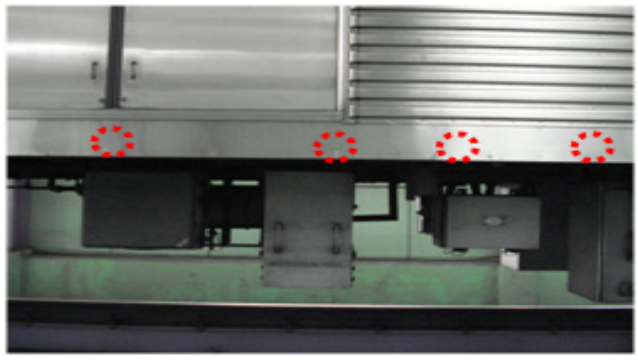


그림 5. 다층구조물인 차체언더프레임과 사이드실의 접합부 부식량 측정 위치

도표 3. 부산교통공사 1호선 도시철도차량 PECT 검사 결과

	진폭
문 중앙	856
문 끝	317
우수관	856
Under Frame 유	202
Under Frame 무	342

4. 결언

본 연구에서는 다층 용접 구조물로 이루어진 도시철도차량에서 발생되는 부식에 대한 종류와 부식 평가를 소개하였다. 부식 평가 대상 차량은 25년 이상 사용 되어진 부산교통공사 1호선 도시철도차량으로 하였다. 대상 차량에 대한 부식 검사 결과 부식이 심한 부위는 차체언더프레임, 측면외판 그리고 응결수가 배출되는 부위임을 확인 하였다. 도시철도차량의 부식 형태는 습식 부식 형태로 이종금속접촉부식(Galvanic Corrosion)과 틈 부식(Crevice Corrosion)이 발생함을 알 수 있었다. 또한 본 연구에서는 다층 용접 구조물로 되어 있는 도시철도차량의 부식 측정에 대한 비파괴 검사 방법으로 부식 발생 부위의 용접종류와 주요부재 연결방법 그리고 단종재질이냐 이종재질이냐에 따라 달라 비파괴 검사 방법을 달리 해야 함을 제시하였다.

차체골조의 스폿 용접부가 있는 side sill(SS400)과 side plate(STS304) 이종 재질 접합부의 용접부 표면 부식 상태를 확인은 압전소자 여기 표면파기법이 유용하다. 이에 비해 다층 용접 구조물 부위의 부식 두께를 직접 측정하는 경우에는 펄스와전류탐상기법이 유용함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 이찬우, 정종덕, “도시철도차량 비파괴 기법에 의한 부식평가 및 방법,” 한국정밀공학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, pp.1441-1442, 2010.
2. 송성진, 김학준 외, "도시철도차량 부식의 비파괴평가 기법 조사·분석 연구보고서", pp.25-31, 2009.