

# 펄스 와전류(Pulsed eddy current)를 이용한 도시철도차량의 Under Frame Side Sill 부식 평가

## Inspection of corrosion in under frame side sill for rolling stocks using pulsed eddy current testing

김용지\*1      송성진†      김학준\*2      정종덕\*\*1      이찬우\*\*2  
Kim, Woong-Ji   Song, Sung-Jin,   Kim, Hak-Jun   Chung, Jung-Duk   Lee, Chan-Woo

### ABSTRACT

Under frame side sill of rolling stock structure is designed for preventing corrosion in order to meet mechanical requirements. However during long operation time more than 20 years, there are corrosion in the under frame side sill caused by environmental effect, vibration and etc. So, detection and evaluation of the corrosion in the under frame nondestructive is one of important issues to extend their life time. Most of nondestructive methods are not easy to apply for detecting corrosion in the under frame side sill, since the under frame side sill consist of there layered with different material (stainless steel - stainless steel - mild steel) and each layer is connected by spot weld and plug weld. Fortunately, pulsed eddy current method claimed that it can be measured not only thickness change but also corrosion under their insulation layers. So, in this study, we have investigated performance of pulsed eddy current testing method by measuring thickness variation of fabricate of mock-up specimens. The investigation results obtained from mock-up specimens and the corrosion evaluation results of the aged rolling stocks will be presented.

### 1. 서 론

철도차량의 U/F 구조물은 방식이 잘 되도록 설계되었다. 하지만 사용연수가 20년이 경과되어 빗물이나 습한 환경에 지속적인 노출과 차량 운행 중의 진동 및 여러 외부 요인들로 인하여 U/F Side Sill에 부식이 발생한다. 부식의 정도에 따라 소재의 두께가 변화한다. 응력-변형률 선도를 보면 부식으로 인한 소재는 항복강도와 인장강도가 부식이 발생하지 않은 소재와 비교하여 낮게 나왔다. 비파괴검사를 이용하여 부식의 검출 및 평가하여 차량의 잔존수명을 예측하여 안전성과 경제성을 고려한다. 다층구조(STS304-STSS304-SS41)로 되어있는 U/F Side Sill은 재질의 특성이 다르고 두께가 두껍기 때문에 부식 측정이 쉽지 않다. 따라서 두꺼운 다층구조의 두께를 측정 가능한 PECT(Pulsed Eddy Current Testing) 기법을 이용하였다. 본 연구는 부식의 정도에 따라 소재의 두께감소를 측정하고 위하여 표준시험편을 제작하고 PECT를 이용하여 다층구조의 두께변화에 따른 부식의 정도를 평가하였다.

† 책임저자 : 비회원, 성균관대학교, 비파괴평가연구실, 교수  
E-mail : sjsong@skku.edu

TEL : (031)290-7451 FAX : (031)290-5276

\*<sup>1</sup> 비회원, 성균관대학교, 비파괴평가연구실, 박사과정

\*<sup>2</sup> 비회원, 성균관대학교, 비파괴평가연구실, 연구교수

\*\*<sup>1</sup> 정회원, 한국철도기술연구원, 도시철도표준화연구단, 책임연구원

\*\*<sup>2</sup> 정회원, 한국철도기술연구원, 차륜계도연구실, 책임연구원

## 2. 휠도차량 Under Frame 부식

휠도차량의 하중을 지지하는 프레임 및 차체는 강재로 구성되어 있다. 그러므로 충격, 진동 및 변형에 잘 견딜 수 있는 인성과 강도를 필요로 한다. 휠도차량의 수명은 환경 및 여러 가지 요인에 따라 차이는 있지만 20년이 경과하면 차량의 건전성을 평가하여 제차할 것인지 계속 사용할 것인지를 결정해야 한다. 사용연수가 경과하면 전반적으로 부식과 균열이 발생하게 되는데 이와 같은 결함은 차량의 수명에 직접적인 영향을 받는다.

부식은 금속이 액체용액에 의해 퇴보되는 현상이라고 정의될 수 있다. 주위 환경과의 전기화학적 또는 화학적 반응에 의해 금속에 가해지는 파괴적인 공격이라고 할 수 있다. 그림1은 도시휠도차량의 하부프레임으로 부식으로 인하여 구조물에 산화철이 발생하고 충격이나 진동에 의해 산화철이 떨어져 나왔다. 이러한 메커니즘으로 인하여 U/F, Side Sill, Rocker Rail에 두께가 감소한다. 설계당시의 구조물의 안전기준의 두께에 따른 허용하중이 부식으로 인하여 증가하기 때문에 안전상 문제가 될 수 있다. 우선 부식이 일어나는 원인과 부식의 종류와 특성에 관하여 알아본다.

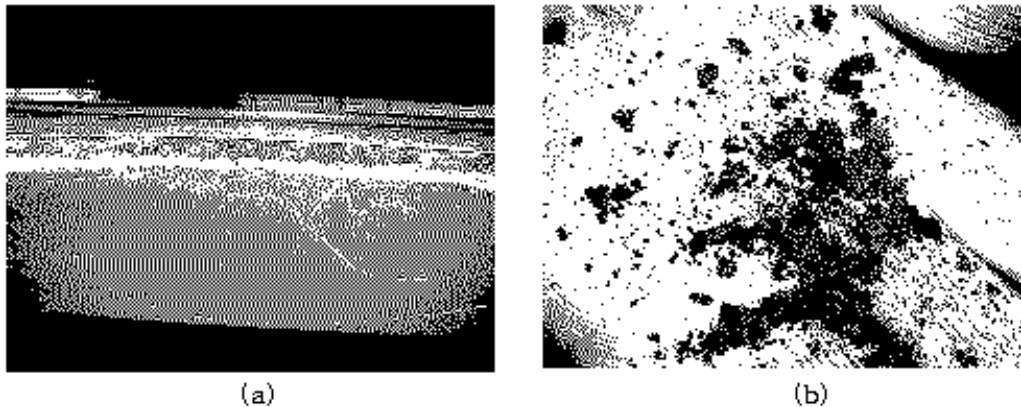


그림1. 도시휠도차량 부식 사례 (a)U/F 부식 (b)부식으로 인한 산화철

### 2.1 휠도차량 U/F의 부식 종류 및 특성

부식의 종류는 크게 습식 및 건식부식으로 나뉘며, 이는 부식 매질로서 수용액의 매개 유무를 근거로 한다. 습식부식은 일반 구조물에서 흔히 발생하는 형태의 부식이며 건식부식은 일종의 고온산화로서 발전설비 등에서 자주 관찰된다. 휠도차량의 차체에서 발생하는 부식은 주로 습식형태이다. 휠도차량 하부프레임에 주로 발생하는 부식은 이종금속접촉부식(Galvanic Corrosion)과 틈부식(Crevice Corrosion)이 발생한다. 다음과 같은 부식의 특성을 살펴본다.

#### 2.1.1 이종금속접촉부식(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)를 가진 금속의 부식속도는 감소하고 활성전위(Active Potential)를 가진 금속의 부식속도는 촉진된다. 즉 전자는 음극이 되고 후자는 양극이 된다. 이러한 형태의 부식을 갈바닉부식 또는 이종금속접촉부식이라 한다. 금속 또는 합금의 위치는 기 전력 계열에서의 그들 성분원소의 위치와 대부분 일치한다. 도표 1. 갈바닉계열의 어떤 주어진 환경에서 실제 측정된 전위에 따른 금속과 합금을 차례대로 내열한 것이다. 휠도차량 하부프레임의 Side Sill은 Stainless steel로 되어있고 Rocker Rail은 Mild steel로 되어 있어 각각의 금속에 전위차에 의해 부식이 발생함을 알 수 있다.

도표 1. 갈바닉계열( sea water)

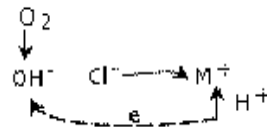
↑	
귀방향 (음극적)	Platinum
	Gold
	Graphite
	Titanium
	18-8 Mo stainless steel 11-30% Cr(passive)
	Inconel(passive)(80 Ni, 13 Cr, 7 Fe)
	Bronzes(Cu-Sn)
	Copper
	Brasses(Cu-Zn)
	Cast iron
활성방향 (양극적)	2024 aluminum(4.5 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)
	Zinc
	Magnesium and magnesium alloys
↓	

### 2.1.2 틈부식(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. 철도차량 하부프레임은 Side Plate, Side Sill, Rocker Rail의 3단이 용접되어있다. 용접부 사이의 틈에 전해액에 정체되어 부식이 발생함을 보았다.



(a)

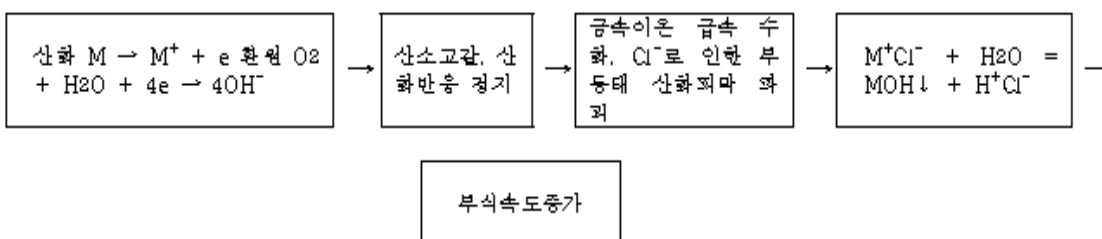


(b)

그림2. Under Frame 틈부식 (a)Side Sill 틈부식 부위(용접부) (b) 틈부식의 발생원리

그림2.(a)는 하부프레임의 Side Sill과 Rocker rail의 용접사이의 틈이 존재함을 알 수 있다. 틈 사이에 전해액이 침투되어 그림2.(b)에서와 같이 금속M(철 또는 강)이 용해와 산소의 환원을 한다.

도표 2. 틈부식 발생 원리



### 3. 부식측정을 위한 PECT(Pulsed Eddy Current Testing) 검사 기법

#### 3.1 PECT 원리

다층 구조물의 부식평가를 위해 펄스 와전류탐상기법을 이용한다. 이 기법의 원리는 다음과 같다. 코일에 교류전류를 인가해주는 일반적인 ECT는 침투깊이( $\delta$ )가 낮은 반면 코일에 pulse를 인가해주는 PECT의 침투깊이는 알루미늄의 경우 90mm, 일반 강은 10mm로 ECT에 비교해 높다. 식(1)에서와 같이 침투깊이( $\delta$ )는 주파수( $f$ ), 투자율( $\mu$ ), 전기 전도도( $\sigma$ )에 영향을 받는다. 투자율과 전도도는 재질이 갖는 고유의 값이므로 고정된 값이다. 따라서 주파수의 값을 변화시켜 침투깊이를 조절할 수 있다. EC의 경우 시간에 따른 주파수의 대역에 한계가 있기 때문에 침투깊이 또한 한정되어 있다. PEC의 경우는 그림.3(b)에서와 같이  $A\Delta t = 1$  식에서  $\Delta t$ 가 0에 가까워질 때  $A$ 는 무한대가 된다. 0~ $\infty$ 의 amplitude의 대역폭을 가지고 있으므로 EC보다 깊은 침투깊이가 가능하다.

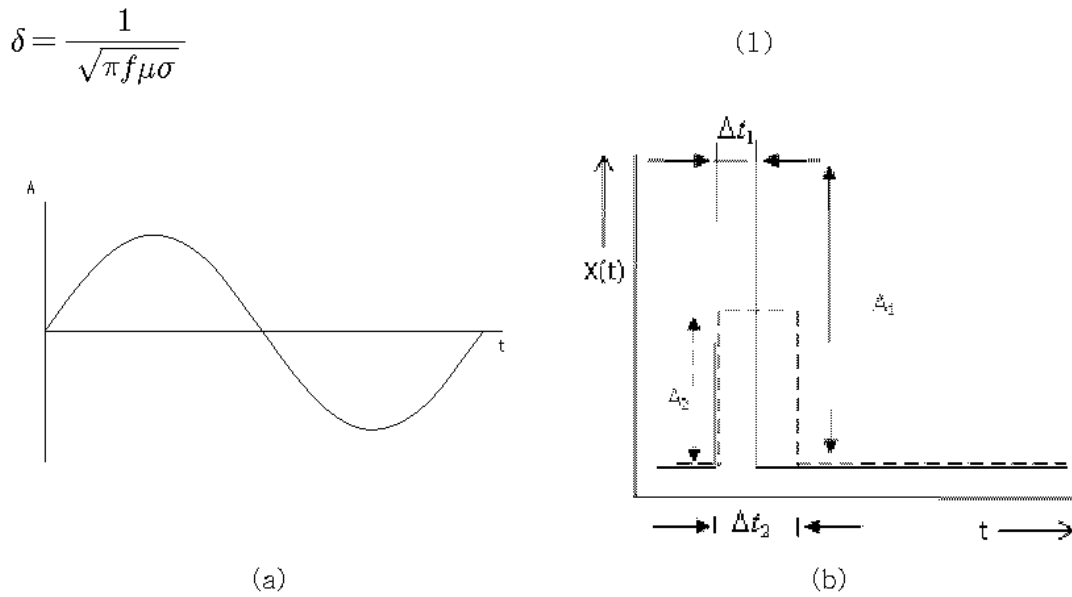


그림3. Probe Coil에 교류와 펄스 인가신호 (a) 교류 신호 (b) 펄스 신호

침투깊이는 전자기장과 관련되어 있고 와전류가 발생할 때 침투깊이문제를 Maxwell 방정식을 이용하여 풀 수 있다. Maxwell 방정식은 모든 거시적인 전자기적 현상을 표현할 수 있는 방정식들로 이루어져 있다. 맥스웰방정식 중에서 와전류탐상에 관련된 방정식들은 식(2~4)와 같다. E는 전계의 세기, H는 자계의 세기, B는 자속밀도, J는 전류밀도, J0 전원전류밀도, Je 와전류밀도이다. 자속밀도 B와 자계의 세기 H, 와전류밀도 와 전계의세기 B 사이의 관계는 식(5~6) 같다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad : \text{Faraday's Law} \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \quad : \text{Maxwell-Ampere's Law} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad : \text{Gauss's Law} \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (6)$$

식(2)에 식(5)을 대입하면 식(7)와 같은 식이 되어 식(3)과 식(7)을 고려하면 식(8)이 된다. 식(7)에 식(8)을 대입하면 식(9)와 같다. 전류밀도를  $e^{i\omega t}$ 로 가정하여 바꾸다.(와전류는 표면침투깊이의 영향으로 깊이방향으로 급격하게 감소)

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}, \vec{H} = \frac{\vec{J}}{\nabla} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\partial \mu \frac{\vec{J}}{\nabla} \\ &= \nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\frac{\mu \partial \vec{J}}{\partial t} \end{aligned} \quad (9)$$

와전류밀도  $J_e$  값을 구하기 위해 Ohm's law에 의해  $\vec{E}$  는  $\vec{J}/\sigma$ 로 나타낼 수 있다. 식(9)를 정리 하면 식(10)이 되고  $J_e$  에 대하여 정리하면 식(11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla^2 \times \vec{J} = \mu \sigma \frac{\vec{J}}{\partial t} \quad (10)$$

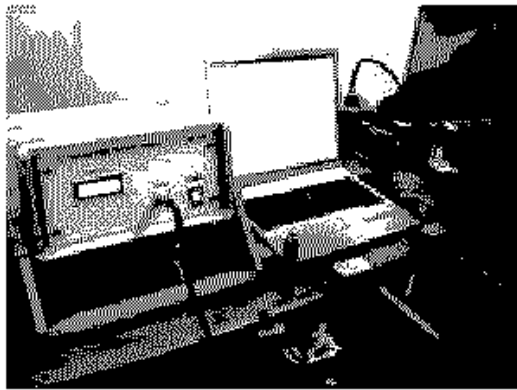
$$\vec{J}_e = \vec{J}_0 e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta) \quad (11)$$

이식은 두 가지 구성요소로 분리하면 식(12)와 같다. 이는 와전류밀도가 침투깊이에 따라 기하급수적으로 감소함을 나타낸다.

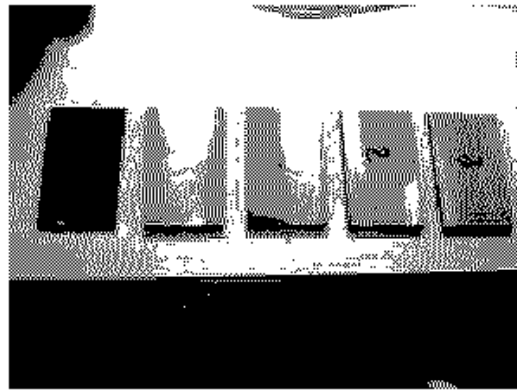
$$\frac{J_e}{J_0} \propto e^{-x/\delta} \quad (12)$$

### 3.2 PECT 부식두께 감육 측정

그림4.(a)는 사용연수 20년이 지난 철도차량의 U/F 부식 부위를 채취하여 PECT장비로 부식에 따른 두께변화와 물성변화를 측정해 보았다. 그림4.(b)는 PECT를 이용하여 layered 된 재료의 두께변화를 측정가능한지를 알아보기 위하여 각각 0.5mm씩 절삭하였다. 그림4.(b)왼쪽부터 원소재, 표면처리만한 시편, #1 0.5mm 절삭, #2 1mm절삭, #3 1.5mm절삭한 시편.



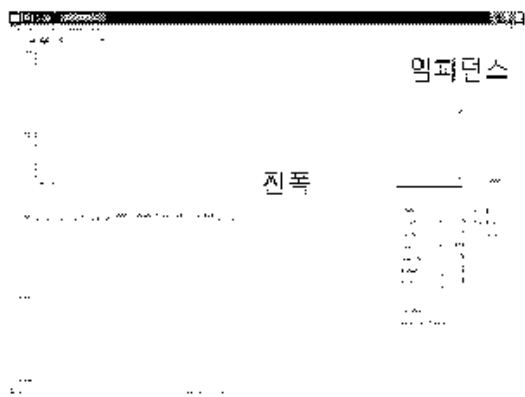
(a)



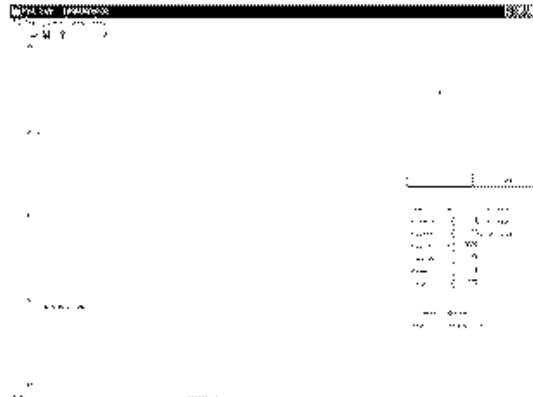
(b)

그림4. PECT (a) 펄스 와전류시험 (b) 시험편

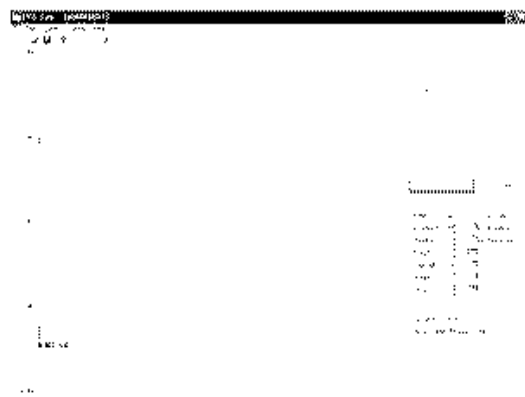
그림5.과 같이 창의 왼쪽은 진폭, 오른쪽은 임피던스를 나타낸 그래프이다. 각각의 값을 비교해보면 두께의 감소에 따라 진폭의 값이 증가하는 것을 볼 수 있고 위상각은 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 진폭이 증가함은 두께가 감소에 따라 전기적 저항이 줄어들기 때문이다. 반면 위상각의 변화는 물성의 변화를 의미하는데 이러한 변화가 없다는 것은 물성이 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 그림6.은 두께감소에 따른 진폭 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는바와 같이 두께가 감소하면 진폭이 증가하였다. 따라서 PECT를 이용하여 부식으로 인한 layer 재료의 두께감소 측정이 가능함을 볼 수 있었다.



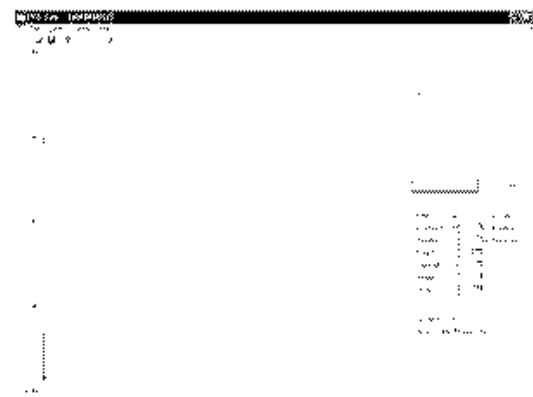
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 5. PECT 실험 결과 (a) 원소재 (b) #1 (0.5mm 절삭) (c) #2 (1mm 절삭) (d) #3 (1.5mm 절삭)

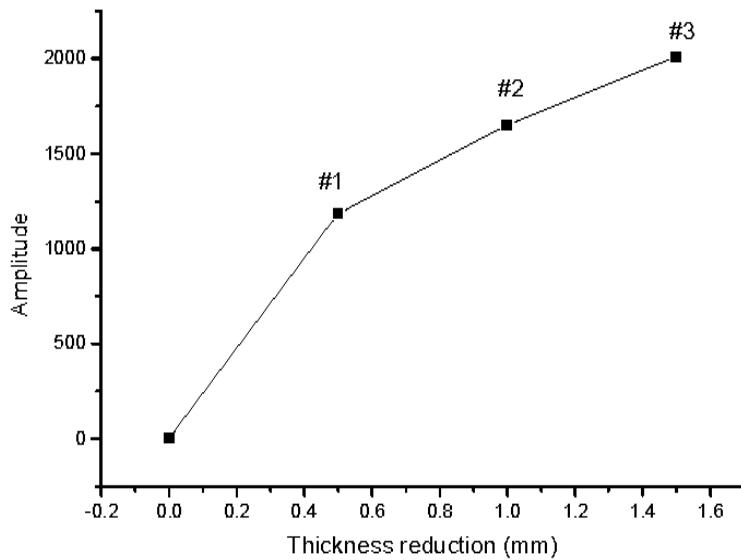


그림.6 두께감소에 따른 Amplitude 변화 선도

### 3.3 운행 중인 철도차량 PECT 검사

철도차량의 부식 측정을 위해 차량기지를 방문하여 펄스 와전류탐상기법을 이용하여 부식을 측정하였다. 그림7은 Under Frame 구조와 측정위치를 보여주고 있다. 측정위치는 문 중앙, 문 끝부분, U/F 존재, 우수관, U/F 등 총 5부위를 측정하였다.

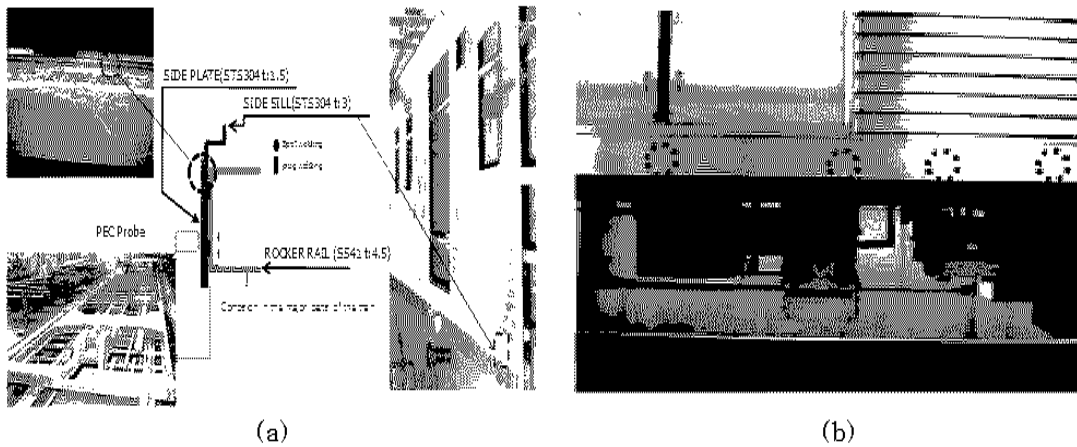


그림7. PECT를 이용한 철도차량의 부식측정 : (a)U/F 부식측정 (b) 측정위치

도표 3. 부산 도시철도차량 PECT검사 결과

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

도표 3. 에서 보는 것과 같이 승객의 승하차로 교변하중이 가장 많이 받는 구간인 문 중앙부와 차량의 배수를 위한 우수관이 진폭 값이 가장 높게 나타났다. 이는 그림6의 결과로부터 두께가 가장 많이 감소하였음을 알 수 있다

#### 4.결 론

철도차량 Under Frame의 부식을 비파괴평가 기법인 PECT를 이용하여 평가하였다. 그림7.(a)에서 보는 것과 같이 spot과 plug 용접이 되어 있는 다층 구조의 Under Frame을 펄스 와전류탐상 기법을 통하여 두께 감육을 측정했다. 그 결과 두께 변화에 따른 진폭 값의 변화를 알 수 있었다. PECT기법은 표준비교시편을 기준으로 상대적 평가를 하기 때문에 두께감소를 정량적으로 평가하기는 쉽지 않다. 그러므로 데이터의 신뢰도를 높이기 위해서는 철도차량의 운행 초기부터 주기적으로 PECT측정 데이터를 축적하여야 한다. 향후 연구 진행 방향은 PECT를 이용하여 부식에 따른 재질의 물성변화와 두께변화의 정량적인 데이터 구축을 위한 연구를 진행할 계획이다.

#### 참고문헌

1. Gui Yun Tian, Yong Li (2009), "Study of lift-off Invariance for Pulsed Eddy-Current Signals", Vol.45.No.1,pp 184-191
2. XIAO-WEI DAI, REINHOLD LUDWIG (1990), "Numerical Simulation of Pulsed Eddy-Current Nondestructive Testing Phenomena" Vol.26,No.6,pp 3089-3096
3. Yong Li, Gui Yun Tian (2008),"Fast analytical modelling for pulsed eddy current evaluation" vol.41 ,pp 477-483
4. 구병춘 (2004), "철도차량 구조물 잔존수명평가 1단계보고서", 한국철도기술연구원
5. S. Goguere (1999), "Pulsed Eddy-Currents for Corrosion Detection", Royal military College of Canada Kingston, Ontario
6. 이학열 (2004), "금속부식공학", 연경문화사.
7. 이용 (2000), "와류탐상검사", 도시출판 골드.
8. William H.Hayt, Jr (2005), "전자기학 7판", (주)한국맥그로힐.