

도시철도차량 구조체의 부식특성 및 비파괴평가기법 연구 A Study on Corrosion Property and Nondestructive Inspection Method of Urban Transit EMU Structure

*정종덕¹, #편장식²

*J. D. Chung¹, #J. S. Pyun(jspyun@krii.re.kr)

¹ 한국철도기술연구원 도시철도표준화연구단, ² 인하대학교(한국철도기술연구원)

Key words : Nondestructive Inspection, Pulsed Eddy Current Testing, Salt Mist Test

1. 서론

도시철도차량의 구조체는 정상적인 운행상태에서 개조 및 대대적인 보수, 보강 없이 설계수명까지 사용할 수 있으며, 정밀 진단을 통하여 차량의 상태에 따라 최대 15년까지 연장사용이 가능하다. 설계수명까지 사용하도록 제작된 차량의 구조체는 언더프레임, 측면 구조물, 지붕 구조물 및 끝칸막이 구조물 등으로 구성되어 있으며, 이러한 구조체는 최대하중과 정상운행 조건 하에서, 과도한 변형으로 인한 기기의 오동작을 방지하고 원활한 기능 수행을 위해 충분한 강도 및 강성이 유지되도록 되어 있다. 그러나 구조체의 부식 및 결함 등으로 인해 도시철도차량의 차체 및 대차가 강도 및 강성을 유지할 수 없는 상황이 발생할 수 있다. 이에 본 논문에서는 구조체에 사용되는 재질들의 부식특성을 살펴보고 각 재질별 부식가속화시험 및 적용 가능한 비파괴 평가기법에 대해 서술하고자 한다.

2. 재질별 부식특성

현재 운행 중인 도시철도차량 구조체는 고장력 내후성장재(SMA490BP, SPA-H, SPA-C), 스테인레스 강관(SUS301L, SUS304), 알루미늄 합금(6005A-T6) 등으로 제작되고 있으며, 구조용 강재의 경우 도시철도를 처음 개통한 이후로 지금까지 사용되고 있으며, 최근에는 알루미늄 합금으로 제작된 차량이 운행되고 있다.

내후성장재는 일반적으로 대기환경에서 녹 발생이 적은 강을 말하며, 즉 내식성이 일반강에 비해 우수하다. 일반강에 첨가하지 않는 구리(Cu), 크롬(Cr), 니켈(Ni) 등을 합금원소로 첨가하여 내식성을 향상시켰다. 일반강에 비해 4~8배 내식성을 갖고 있으며, 대기환경에 노출된 초기에는 일반강과 유사하게 녹이 발생하지만 시간이 경과할수록 일반강에 비해 이 안전 층이 환경에 대한 보호막이 되어 더 이상의 부식 진행을 억제하게 된다.

스테인레스 강은 철에 크롬과 니켈의 합금을 첨가하여 제조한 것으로 강의 표면에 산소와 크롬이 결합한 산화물 형태를 식별할 수 없을 만큼 얇은 산화크롬 보호피막을 형성하여 산소의 침투를 막아주는 효과가 있다. 강의 내식성은 사용환경이 부동태를 유지하는 조건에 따라 차이가 나지만 일반적으로 산화성이 강한 분위기에서도 매우 우수한 내식성을 나타낸다.

알루미늄과 알루미늄 합금중에서 내식성이 가장 우수한 것은 순 알루미늄이다. 즉, Fe나 Cu등과 같은 불순물이 적을수록 내식성이 우수하나, pH4~8.5인 수중에서 내식성이 우수하나 Cl⁻가 많을 경우 공식이나 틈부식이 발생하기 쉽다. 그리고 알루미늄의 특징에는 양성금속으로서 알칼리성 수용액 중에서 AlO₂⁻를 생성하여 부식이 된다.

이러한 재료들은 환경조건에 따라 부식의 형태 및 부식속도가 차이가 나는데 공중지대나 해안지대를 주로 운행하는 경우에 부식 속도가 빨라지는 경향을 보이게 된다. 부식은 금속이 수분 중에 노출되어 있는 경우 진행이 되는데 도시철도차량 하부의 경우 수분에 노출되면 건조하는데 많은 시간이 필요하며, 세척이 용이하지 않아 강재의 표면에 수분이 오랫동안 노출되어 부식의 원인이 된다. Fig. 1은 도시철도차량 구조체의 하부부분인 언더프레임 주요 부위의 부식현상을 나타낸 것이다.



Fig. 1 Corrosion of car-body structure

3. 부식가속화 시험

부식가속화 시험은 현재 운행 중인 도시철도차량에 사용되고 있는 재료들에 대해 환경조건이 부식에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 시험을 실시한다. EPR(전기 화학적 부식) 시험을 통하여 환경조건에 따른 표준시험의 부식물을 측정하고 그 결과를 동일 조건의 염수분무시험의 비교분석 데이터로 이용하여 부식가속화 시험의 신뢰도를 향상시키고자 한다.

3.1 EPR 시험

전기-화학적 분극시험은 부식현상이 재료와 환경간의 전기화학적 반응임을 감안해 인위적인 전위를 가해줌으로써 부식전위, 부식전류밀도, 부동태 전류밀도, 기본부동태전위, 임계양극 전류밀도, 임계공식전위 등을 측정하여 재료의 전기화학적 부식특성을 평가하는 방법으로, ASTM G5(Making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurement)에 표준시험법이 규정되어 있으며, Fig. 2는 EPR 시험 장비를 나타낸 것이다. 도시철도차량 구조체의 제작시 실제 사용되는 재료를 선정하여 ASTM G5 규격에 나타나 있는 (10X10X10)mm³ ERP 시험편을 제작하고, 시험편의 한쪽면만 부식시키기 위해 다른 면들은 시험편에 실리콘 처리를 하였다. 부식조 안에는 해안가와 비슷한 환경을 조성하기 위해 ASTM D-1141-52 인공해수 제조법을 참조하여 NaCl 수용액의 농도를 설정하여 부식환경을 조성하였다.

3.2 염수분무시험

염수 분무 시험은 시험체를 스프레이식의 염수 분무에 일정한 온도에서 소정의 시간 연속적으로 폭로한 후 그 외관 변화로 관찰하며 혹은 특정 성능의 변화를 측정 시험하는 것이다. 규정시간 경과후 혹은 시험체 손상의 징후가 나타날 때까지 염수분무를 계속하여 육안관찰에 의한 외관변화를 확인하고, 균열, 변태색, 휨, 분리, 연화 등을 관찰하고 부식량을 측정한다. 시험방법은 한국산업 규격 KS D 9502 방법에 따라 시행하며, 시험용 소금 용액은 KS M ISO 6353-2(R32)에 규정한 염화나트륨 0wt%, 1wt%, 3.5wt%로 시험을 하며 시험시간은 2h, 6h, 48h, 96h, 168h,

240h, 720h, 1000h로 한다. Fig. 3은 염수분무시험 장비를 나타낸 것이다.

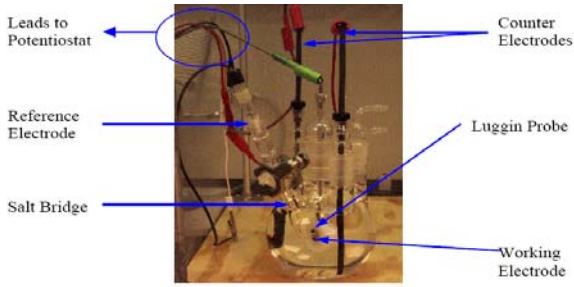


Fig. 2 Corrosion cell for polarization test

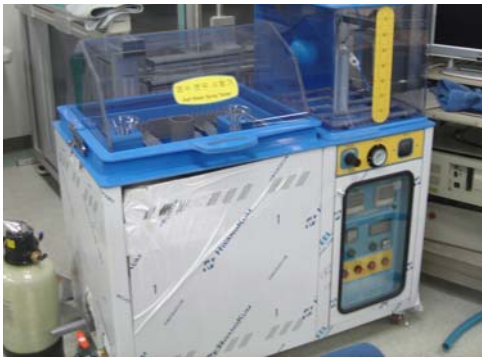


Fig. 3 Salt mist test

3.3 부식가속화 시험 시편

부식가속시험에 사용된 시편은 현재 제작되어 운행 중인 차량과 동일한 재질을 사용하여 제작하였으며, 실제 차량제작과정과 동일한 방법으로 시편을 제작하였다. Table 1은 각 시편 제작시 사용된 재질을 나타낸 것이며, Fig. 3은 각 시편의 형상을 나타낸 것이다.

Table 1 Carbody materials

No.	Materials
Specimen 1	SMA490BP, SPA-H, (SPA-C)
Specimen 2	SUS301L, SUS304
Specimen 3	6005A-T6



(a) Specimen 1 (b) Specimen 2 (c) Specimen 3

Fig. 4 Weld part corrosion specimen

3.4 시험 결과

EPR 시험결과는 부식전류밀도를 측정하여 부식속도를 구할 수 있으며, 추가적인 시험을 통해 각 재질별로 환경조건에 따른 부식속도, 부식률을 구할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 실제 제작과정과 동일한 방법으로 제작된 시험편(Fig. 4)을 활용하여 염수분무시험을 수행할 것이며, 그 결과로 각각의 환경조건에 맞는 부식률 구할 수 있을 것이며, 구조체에 발생하는 부식의 특성을 확인할 수 있을 것이다.

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

교류전류를 사용하는 기존의 와전류검사방법과는 달리 펄스 와전류검사방법은 반복적인 직류전압의 스텝과형에 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, Fig. 4와 같이 여러 장의 판재가 용접되어 있는 경우 판재사이의 부식 등에 대한 평가방법이 없어 부식결함 평가를 수행하지 못하였으나 펄스와전류검사 방법을 적용하여 도시철도차량의 외판 부분과 같이 다층으로 이루어진 구조물에 대한 적용 가능성을 확인하기 위하여 예비시험을 실시하였다. Fig. 5는 도시철도차량에 적용한 펄스와전류검사 장비사진과 측정하는 모습을 나타낸 것이다.



Fig. 5 Pulse - eddy current testing

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. PECT기법은 표준시편을 기준으로 상대적 평가를 수행해야 하기 때문에 두께감소를 정량적으로 평가하기는 쉽지 않다. 또한 데이터의 신뢰도를 높이기 위해서는 도시철도 차량의 운행 초기부터 주기적으로 PECT측정 데이터를 측정하므로써 부식 진행에 따른 재질의 물성변화와 두께변화의 정량적인 데이터를 구축할 수 있을 것이다.

5. 결론

구조물의 수명은 여러 가지 요인에 의해 복합적으로 영향을 받지만 그 중에서 부식에 대한 영향이 중요한 부분이라고 할 수 있을 것이다. 강제의 부식은 서서히 일어나면서 차체 구조물의 두께가 감소하면서 초기의 설계 하중 값을 국부적으로 초과하는 부분이 나타날 수 있다. 향후 부식가속도 시험을 통해 차량 구조체의 부식특성 및 재료별 부식특성을 확인할 수 있을 것이며, 부식 환경에 따른 정량적인 부식량을 구할 수 있을 것이다. 기존의 비파괴검사 방법은 도시철도차량 구조체의 건전성을 평가하는데 많은 어려움이 있으며 이는 현재 적용되고 있는 비파괴검사 방법으로 검사가 불가능한 부위가 있기 때문이다. 검사가 불가능한 부위에 대해 펄스와전류검사방법을 적용하므로 그 활용성을 일부 확인하였으며, 부식가속도 시험 시험편에 PECT 기법을 적용하여 재료별 부식특성을 확인하므로써 신뢰성 있는 활용방법을 찾을 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 이정기, 서동만, 이승석 (2005), “펄스 와전류를 이용한 알루미늄 두께 평가”, 비파괴검사학회지, V. 25, No. 1.
2. 한국철도기술연구원, 도시철도차량 표준화유지발전 연구 2 차년도 최종보고서.