

# 철도차량의 부식실태 및 현황

## Corrosion of Rail Cars

장세기\*                      김용기\*                      구병춘\*\*  
Seky Chang              Yong-Ki Kim              Byeong-Choon Goo

### ABSTRACT

Rail cars are subject to vibration, impact and wear which can cause severe defects leading to a fatal accident. Thus, they are designed and manufactured in consideration of such factors influencing their service lifetime. Under-frames are composed of steel and support most of load imposed on the car. Steel is very sensitive to corrosive environment and corroded even in a normal service condition. Regular maintenance can protect steel parts from corrosion by painting. However, an exposure of defect point to corrosive agents can make corrosion proceed to a considerable depth, which may cause the structure to remain under safety standard. It is necessary to understand corrosion behavior of rail cars in order to estimate unexpected accidents by corrosion.

철도차량의 하중을 지지하는 프레임 및 차체는 강재(steel)로 구성되어 있어서 충격, 진동 및 변형에 잘 견딜 수 있는 인성(toughness)과 강도(strength)를 갖고 있다. 차량의 수명은 사용조건에 따라 차이는 있지만 20년이 경과하면 안전진단 과정을 거쳐서 폐차를 할 것인지 계속 사용할 것인지를 결정하게 된다. 차량을 크게 구분하여 소모성 부품과 보수를 필요로 하는 부품으로 나눌 수 있으면, 대체로 소모성 부품은 일정한 기간이 경과하여 기능성 또는 미관이 떨어지면 신제품으로 교체를 하게된다. 보수를 요하는 부품은 주기적으로 검사를 하여 손상된 부위를 보수 처리하게 된다.

차체 하부는 사이드실(side sill), 센터실(center sill) 및 횡량(cross beam)으로 구성되어 있으며 전후 차량과의 연결을 지탱해주는 견인량(coupler)이 포함되어 있다. 이들 부위는 사용연수가 경과하면 전반적으로 부식과 균열이 발생하게 된다. 이와 같은 결함은 차량의 수명에 직접적인 영향을 미치게되며 적기에 유지보수를 하지 못하면 예기치 않은 사고를 일으켜서 인명피해를 야기시키게도 된다. 차체는 운행 및 사용환경에 의해서 부식이 심화되면 부분적으로 강판을 대체하거나 도장처리를 함으로써 재사용을 하게된다. 그러나 차량의 하중을 지지해주는 하부 프레임은 보수처리에 신중을 기하지 않으면 초기의 차량 제작 시에 설계한 하중값을 국부적으로 초과하여 균열의 지속적인 성장과 치명적인 파손을 가져올 수 있다.

차체에서 부식이 잘 발생하는 부위는 냉각기가 있는 지붕 및 유리창 창틀부위, 승강대 주위

---

\* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 책임연구원

\*\* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 선임연구원

등과 함께 객차 실내의 화장실, 세면실 주변을 들 수 있다. 차체 하부는 도장처리를 철저히 하고 있으나 운행 중에 자갈 등에 의해 표면이 손상을 받기도 하며 공장지대, 터널 속을 통과할 때 부식성이 강한 대기환경을 접하기도 하고 빗물에 노출되어 있으며 또한 대체로 습한 경향이 있기 때문에 부식이 일어나기 쉬운 조건에 놓여있다.

차체는 일반강(mild steel)과 스테인레스강(stainless steel)이 많이 쓰이는데 현재는 전동차 및 새마을호 차체는 스테인레스강을 사용하고 있다. 새마을호는 80년대 중반 이후 차체를 스테인레스강판(STS 304)으로 교체하였고 차체 하부도 일부를 제외하고는 고장력 내후성강(SMA490BP)을 사용하면서 부식에 의한 사용수명을 개선시키고 있다. 일반적으로 부식에 대한 저항성이 있는 내식성 강종은 소재 가격의 차이 때문에 제조원가의 상승요인이 있지만 장기적으로 볼 때 유지보수비와 안전사고에 의한 처리비용 등을 고려하면 더욱 경제성이 있다고 할 수 있다.

차량의 사용수명은 여러 가지 요인에 의해서 복합적으로 영향을 받지만 그 중에서 부식은 특히 중요한 요인으로 꼽을 수 있다. 강재의 부식은 서서히 일어나면서 차체 구조물의 두께를 침식하여가고 결국에는 초기의 설계 하중값을 국부적으로 초과하는 결과를 가져올 수 있기 때문이다. 즉, 차체의 하중을 받는 강재의 단면적이 감소하면 단위 면적당 지지하여야 하는 하중값이 증가하게 되어 국부적으로 하중이 집중되는 현상을 가져온다. 결국 가장 취약한 부위에서 발생한 균열은 전체적인 파괴를 일으키게 된다.

따라서 부식에 대한 체계적인 이해와 부식의 종류에 따른 특성을 파악하면서 철도차량의 수명예측을 통한 안정성의 확보에 필요한 자료를 제공하고자 한다.

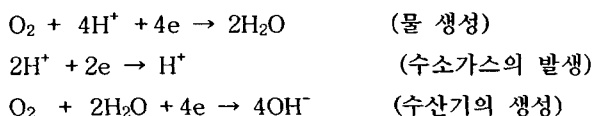
### 부식은 왜 일어나는가?

부식은 여러 가지로 정의될 수 있지만, 일반적으로는 “환경에 의하여 재료가 열화(degradation)되는 현상”이라고 정의될 수 있다. 다시 말하여 금속 또는 비금속 재료가 그 주변에 액체, 기체 또는 고체 환경과 반응하여 본래의 상태로부터 다른 상태로 변화하는 것을 뜻한다. 그런데 대부분의 경우 이러한 상태의 변화는 우리에게 바람직하기 보다는 바람직하지 않기 때문에 열화라는 표현을 사용한다.

이러한 재료의 열화(즉, 부식)과정은 대부분 전기화학적 반응(electrochemical reaction)으로 일어나게 된다. 전기화학적 반응이란 화학적 반응 이외에 반드시 전기적 전하의 이동이 반응에 포함되는 것을 말한다. 예를 들어 다음과 같이 금속 M이 부식되는 반응을 살펴보자.

금속이 부식된다고 하는 것은 금속이 금속이온으로 용해되어 전자를 내어놓는 것을 뜻한다. 즉,  $M \rightarrow M^+ + e^-$  (전자발생)

그러면 이러한 반응이 일어나는 주변 어느 곳에서는 이 반응으로 생성된 전자를 소모하는 반응이 일어나게 된다. 이러한 전자 소모반응으로서 주로 나타나는 것은 다음과 같은 수용액 중에 용해된 산소의 환원과 수소가스의 발생이다.



위에서 살펴본 것과 같이 전자를 내어놓는 산화반응이 일어나는 곳을 anode(양극), 반대로

전자를 소모하는 환원 반응이 일어나는 곳을 cathode(음극)라고 한다.

### 부식의 종류 및 특징

부식은 발생형태 및 기구(mechanism), 환경 등에 따라 여러 가지로 분류하고 있으나 크게는 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. 철도차량의 차체에서 발생하는 부식은 주로 습식형태이며 따라서 습식부식에 대한 종류 및 특징에 대해서 알아보기로 한다.

#### 1) 일반부식(General Corrosion)

이는 강재의 표면에 균일하게 발생하며 표면이 거칠고 탁해 보이는 특징이 있다. 이러한 형태의 부식은 표면처리 또는 합금계 성분조정 등에 의해서 부식속도를 조절하기가 비교적 용이하다. 이와 같은 부식은 가장 흔하게 발생하지만 산업적인 측면에서는 중요성이 떨어진다. 왜냐하면 표면에 고르게 발생하는 부식은 관찰이 쉽고 따라서 유지보수에 의해 쉽게 처리되기 때문이다. 하지만 방치하면 서서히 전체적으로 부식이 되어 위험한 상태까지 이르르기도 한다.<sup>1)</sup>

#### 2) 이종금속 접합부식(Galvanic Corrosion)

두 개의 다른 금속 혹은 같은 금속이라도 용존 산소량 등 부식환경 조건이 국부적으로 서로 다름으로 인하여 두 지점간의 전위차가 있게 될 때 전자의 이동이 시작되어 산화/환원 반응계를 형성하여 금속이 부식되는 현상을 총칭한다. 미세적으로 볼 때 거의 모든 금속의 부식현상은 일종의 이종금속 접합부식이라고 할 수도 있다.

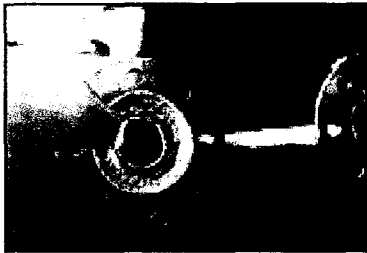


그림 1. 농도차 부식 사례

이종금속 접합부식은 다음과 같이 크게 3 종류로 분류할 수 있다.

- i) Galvanic Cell : 서로 다른 금속이 부식환경 내에서 접촉
- ii) Concentration Cell : 같은 금속의 두 부위가 농도차 부식 환경에 노출
- iii) Active/Passive Cell : Anode/Cathode의 면적비에 따라 부식속도 영향

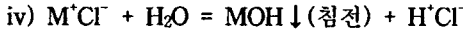
그림 1은 동일 금속이 국부적으로 다른 농도의 용액과 접촉하여 발생한 부식으로 인해서 파손된 경우를 보여준다.

#### 3) 틈 부식(Crevice Corrosion)

틈부식은 산업체에서 자주 발생되며 공업적으로 매우 중요한 형태의 부식이다.<sup>2,3)</sup> 틈부식은 일반적으로 두 금속 면이 접하고 있는 좁은 틈새에 수용액이 고여있는 상태에서 일어난다. 틈부식의 단계별 진행상황을 살펴보면 다음과 같다.

- i) 산화  $M \rightarrow M^+ + e$     환원  $O_2 + H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$
- ii) 산소고갈, 환원반응 정지

iii) 금속용해에 의한 양이온 과잉, 염소이온의 diffuse-in (전하평형)



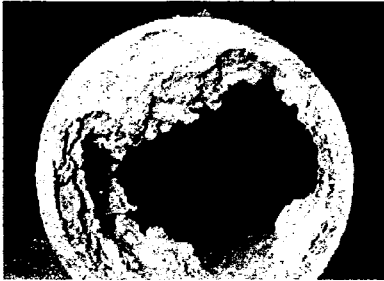
v) 산성도 증가, 부식가속

vi) 산소가 풍부한 틈새 외부에서 수산화물 생성 (cathode화)

틈부식을 방지하기 위해서는 연결부위 등에 볼트나 리벳의 사용 대신 가능한 한 용접을 하도록 하며 볼트나 리벳을 사용해야만 하는 경우에는 고무 또는 플라스틱 같은 가스켓을 잘 이용하여 틈이 생기지 않도록 하여야 한다.

#### 4) 공식(Pitting Corrosion)

공식은 틈부식처럼 부식파괴를 매우 심하게 유발시키는 부식현상의 하나이다.<sup>4,5)</sup>



틈부식의 특징은 다음과 같다.

- 틈새부식과 유사한 거동 (autocatalytic reaction)
- 공식 초기화(pit initiation)에 장시간 소요
- 거친 표면, 기계적 영향 받은 부위(냉간압연, 냉간단조 등)에서 발생용이

스테인레스강은 공식에 비교적 취약한 부류의 금속으로서 내공식성을 향상시키기 위해 여러 가지 합금원소를 첨가하는 방법이 강구되고 있다.

그림2. 공식에 의한 재료의 손상

#### 5) 입계부식 (Intergranular Corrosion)

입계부식은 스테인레스강의 용접시에 자주 나타나는 부식현상으로서 특징은 다음과 같다.

- 원인: 입계에 존재하는 불순물, 합금 석출물등에 의해 야기됨.
- 스테인레스강의 경우,
  - STS 304 (0.06~0.08C, 18Cr, 8Ni) → Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 형성(min 0.02C 이상)
  - 500~800℃에서 C의 입계확산 이동, 입계를 따라 Cr고갈 (예민화현상)
  - 입계는 anode, 입내는 cathode : area effect에 의해 급격 부식
  - 입계부식은 입계부식파괴로 발전.
- 대책: 열 영향부의 열처리 (크롬카바이드의 용해)
  - 탄소량을 0.02% 이하로 관리 (Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 생성 억제): STS 304L or 316L
  - Nb, Ta, Ti 등의 첨가 (새로운 카바이드 형성): STS 321 or 347

#### 6) 선별용해(Selective Leaching)

금속 합금계에서 전기화학적으로 active한 금속이 선별적으로 부식, 용해되는 현상으로서 부피변화는 작으나 기계적 강도의 감소 및 부식파괴를 유발시킨다. 황동(Brass: 70Cu-30Zn)의 경우,<sup>6)</sup> 산성에서 아연이 선별 부식되면서 구리만 잔재하여 붉은색으로 변하게 되는데, 이는 1% Sn을 첨가하거나 또는 극소량의 Sb, As, P등을 첨가함으로써 내식성 향상을 가져올 수 있다. 회주철(gray cast iron)에서도 철만 선별부식 용해되어 흑연조직(graphite network)만 남게되는 현상이 생긴다.<sup>7)</sup>

7) 응력부식 및 수소취성(Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement)

응력부식 현상은 재료가 부식분위기 하에 놓여있으면서 동시에 인장응력을 받게될 때 부식과 응력이 복합적으로 작용하여 입계 또는 입내를 따라 균열이 발생 성장하여 궁극적으로 재료의 파괴를 일으키는 현상을 말한다. 재료와 부식환경에 따라 다르기는 하나 대개의 경우 균열의 생성에는 잠복기(incubation period)가 존재하며, 일단 균열이 발생된 후에는 비교적 빠른 속도로 성장을 하여 갑작스런 파괴를 유발하게 된다.

수소취성은 응력부식의 한가지로 보아도 좋으나 특징은 부식 반응시 환우너반응으로 생성된 수소가 재료 내부, 특히 균열 선단으로 확산 침투하여 수소에 의한 취성효과가 크게 나타나는 점이다.<sup>8)</sup>

8) Fretting, Fatigue, Erosion Corrosion

재료가 마모, 피로, 진동 등의 반복적인 외부응력을 받는 동시에 부식 분위기 하에 놓이게 되면 결합부위의 발생 및 성장이 가속화되면서 사용수명이 크게 감소하는 효과를 가져온다. 이러한 부식과파 현상은 기계 부품류 및 외부 하중을 받는 구조물 등에서 자주 관찰된다.<sup>9)</sup>

9) 콘크리트부식(Corrosion in Concrete)

철근이 내장된 콘크리트 구조물에서 발생하는 부식형태로서 추정되는 원인들은 다음과 같다.

- 염분, 부식성 용액등이 콘크리트 내부로 침입→ 철의 부식→ 팽창, 균열
- 콘크리트 내의 균열을 따라 습기, 염분 등의 침입, 부식, 팽창, 균열

o 예방법

- Adequate depth of cover (embedding the steel deep enough)
- 물/시멘트 < 0.4
- 화학혼합물(chemical admixture)의 사용

o 치유법

- 균열 및 틈새를 보수
- 표면에 코팅처리
- 음극방식(전기적 방식)

10) 미생물 부식(Microbial Corrosion)

미생물에 의한 부식의 특징은 다음과 같다.

- MIC (microbiologically-influenced corrosion)
- 미생물의 존재 및 활동에 의하여 발생
- 유기 또는 무기 침전물 하에서 공식(pit)의 형태로 발생
- Biofilm은 보호환경을 조성하면서 부식을 촉진
- 정채된 물에서 MIC 발생 용이
- 용존산소나 수소이온(acid) 등이 존재시 발생 용이
- 혐기성 박테리아(anaerobic bacteria)의 경우, 환원성 화학물질 제공 → 선체의 rivet hole등

이와 같은 미생물 부식은 금속 콘텐서 표면의 생체막(biofilm), 수도관 내부, 댐의 방수로 등에서 발생하는데, 댐의 경우는 비둘기 배설물에 의한 암모니아 발생이 구리와셔(copper washer)부품의 응력부식을 야기시켜서 균열이 발생, 파괴된다. 대책으로는 내식성 소재의 선택, biocide의 사용, 금속표면의 유기 침전물 제거방법 등이 있다.

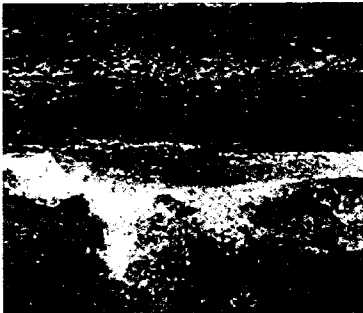
## 철도차량의 부식사례 조사

철도차량은 사용조건에 따라 부식의 발달에 차이를 나타내는데 공장지대나 해안지대를 주로 운행하는 경우에 부식속도는 빨라지는 경향을 보이게 된다. 이는 대기 중의 유해가스 성분인 이산화황 또는 염분의 영향 때문이다. 부식은 수분이 존재할 때 진행되는데 차량의 하부는 빗물이 들이치면 건조되는데 많은 시간이 요하게 된다. 또한 차량 하부는 세척이 용이하지 않으므로 강재의 표면에 흡착된 부식인자들은 씻겨지지 않은 채로 오랫동안 방치상태로 있게 된다. 자갈이나 날카로운 파편 등에 의해 표면 도장이 파손된 부위는 우선적으로 부식이 시작되며 일단 부식이 시작되면 강재와 도막사이의 틈새를 따라 부식이 확산되어 나간다. 시간이 지나면 밀착성이 우수한 도막들도 부식에 의해서 계면이 손상되어 부풀어 오르면서 강재로부터 떨어져 나가게 된다. 철도차량 차체를 보여주는 그림 3에서 부풀어오른 도막들이 파손되고 노출된 강재는 검붉은 녹이 되어가는 현상을 볼 수 있다.



그림 3. 부식에 의한 도막 파손

차량은 많은 이음새로 구성되어있으며 이러한 이음새들은 부식이 시작되기 쉬운 조건을 제공한다. 이음새 부위는 쉽게 세척이 안되며 먼지나 이물질 등이 흡착되기 쉬우며 습기도 항상 상대적으로 높게 유지된다. 부식성이 강한 인자들이 이러한 부위에 흡착되면 주변보다 농도가 높게 유지되며 취약한 부위에서 부



(a) 구조물 접촉부



(b) 볼트 이음새

그림 4. 철도차량 하부에서 발생하는 틈새부식 사례

식이 시작된다. 그림 4 (a)는 두 개의 강재가 맞닿은 부위의 틈새를 따라 부식이 진전되어 나가는 현상을 보여준다. 사진에서 밝은 부분이 부식에 의해 표면 손상된 부위이다. 이러한 현상은 체결부에서도 자주 관찰되는데 그림 4 (b)를 보면 볼트의 머리부분에 의해 생긴 강재와의 틈새에서 부식이 시작되어 있음을 알 수 있다.

## 마무리

최근들어 부식 문제에 대한 우리 사회의 관심이 날로 높아지고 있다. 이것은 부식으로 인하여 여러가지 경제적 손실은 물론이고, 때로는 소중한 인명의 손상까지도 입는 경우가 점차 늘어나고

있기 때문이다.

부식 발생으로 인한 손상은 크게 보아 다음과 같은 3가지 측면에서 생각될 수 있다. 첫 번째로는 경제성이다. 각종 기계설비, 차량, 선박, 교량 등의 부식으로 인한 경제적 손실은 막대하다. 두 번째로는 안전성이다. 부식은 때로는 매우 급격한 속도로 진행이 되어, 갑작스런 파공, 파단 또는 파괴 등을 유발할 수가 있고, 이렇게 되면 경제적 손실 뿐만 아니라, 인명의 손상도 가져오는 경우가 많다. 세 번째로는 자원 보존성이다. 이것은 주로 금속 자원 문제를 의미하는데, 지구상의 금속자원 매장량은 한정되어 있으므로 이러한 금속의 부식으로 인한 손실은 금속 자원의 고갈을 가져오게 된다. 이것은 또한 금속의 생산 및 제조와 관련된 에너지의 손실을 의미하기도 한다.

철도차량의 경우도 마찬가지로 경제성, 안전성 및 자원 보존에 있어서 부식에 의한 문제점을 고려하여야 한다. 철도차량은 차체 뿐만 아니라 각종 부품, 내장설비 및 냉각관 등 여러 곳에서 부식이 발생할 가능성이 높다. 정기적인 유지보수 처리 및 세척 등을 통하여 부식의 발생속도를 억제할 수도 있으며 이 외에도 양극반응의 조절, 음극반응의 조절, 절연체의 삽입, 이온의 흐름 차단과 폐쇄회로 구성 등을 통하여 기술적으로도 부식을 상당히 억제 할 수 있다. 이와 더불어 문화 수준의 향상과 함께 철도를 깨끗하게 사용하고자 하는 철도 이용자 및 관리자들의 자세변화가 밑바탕을 이루어야 하겠다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(NRL)의 지원으로 수행되고 있으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. C.J.Munger, Corrosion Prevention by Protective Coatings, NACE, Houston, p.176, 1984
2. E.V.Kunkel, Corrosion, Vol.10, p.260, 1954
3. D.A.Jones, Forms of Corrosion, Recognition and Prevention, NACE, Houston, p.19, 1982
4. B.E.Wilde and E.Williams, J. Electrochem. Soc., Vol.118, p.1057, 1971
5. B.E.Wilde and E.Williams, J. Electrochem. Soc., Vol.117, p.775, 1970
6. A.Cohen, Process Industries Corrosion, NACE, Houston, p.500, 1986
7. R.Steigerwald, Metal Handbook, Vol.13, Corrosion, 9th ed., ASM International, Metals Park, OH, p.132, 1987
8. R.T.Jones, Process Industries Corrosion, NACE, Houston, p.387, 1986
9. C.P.Dillon, Process Industries Corrosion, NACE, Houston, p.6, 1986