

# 차량구조물의 부식 거동에 관한 실험적 연구

## An experimental study on the corrosive behaviour of Rolling stock structures

오창록\*, 김용기\*\*, 장세기\*\*\*, 구병준\*\*\*\*

Chang-Rok Oh, Yong-Ki Kim, Se-Ky Jang, Byeong-Chun Goo

---

### Abstract

The present paper describes an experimental study on the corrosive behaviour of Rolling stock structures. It is important to predict corrosive behaviour of rolling stock structures for safe service and to know relation between corrosion and fatigue life. This paper practiced atmospheric corrosion test of SS400 and SM490A. This study practiced an additional test on the influence of heat-treatment. This test will examine corrosive behaviour and differences of SS400 and SM490A.

---

### 1. 서론

최근 들어 고속철도의 개통으로 철도차량에 대한 관심이 높아지고 있다. 철도차량은 저렴한 운임과 효율적인 수송능력을 가지고 있기 때문에 예전부터 각광받고 있는 교통수단이라 할수 있다. 이러한 철도차량의 수명은 일반적으로 20-30년정도로 상당히 길기 때문에 운행기간 중 발생할 수 있는 문제점에 대해 세심한 주의가 필요하다. 특히 철도차량은 운행중 불가피한 진동을 받게 되며 이러한 진동에 의해 영향을 받는 철도차량의 피로수명이 중요한 관심사로 부각되고 있다. 철도차량은 그 제작과정상 많은 용접공정을 거치게 되고 구조물의 형상 또한 복잡하기 때문에 피로수명에 영향을 미치는 요소들이 많고, 더불어서 오랜 사용기간동안 발생하는 차량의 부식은 이러한 요소들과 연계하여 피로수명에 영향을 미치리라 예상된다[1]. 철도차량에 일반적으로 사용되는 재료인 SS400과 SM490A의 부식특성을 알아보는 것은 철도차량의 피로수명을 예측하는데 있어 중요한 연구분야가 될 것이다. 본 연구에서는 두 재료의 부식 특성을 알아보고 부식과 피로수명과의 관계를 고찰하고자 한다.

---

\* 한국철도기술연구원 연구원, 비회원  
\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원  
\*\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원  
\*\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

## 2. 부식시험의 준비

본 연구실에서는 SS400과 SM490A의 부식특성을 알아보기 위해 대기부식시험, 염수분무시험 및 전기화학부식시험을 실시하고 있다. 이 중 대기부식시험은 자연상태에서 사용되는 구조물의 부식상황에 가장 유사한 조건을 제공하기 때문에 재료의 일반적인 부식진행상황을 예측하는데 중요한 시험이다[2]. 본 내용에서 실시한 대기부식시험은 일반적으로 철도차량에 사용되는 열간 압연 강재인 SS400과 용접성을 향상시킨 용접 구조용 압연강재인 SM490A으로 제작된 시험편을 사용하여 1차년도에는 매 3개월마다, 2-4차년도에는 매 6개월마다 비열처리시편 3개씩, 열처리시편 1개씩을 수거하여 관찰하게 된다. 부식된 시편은 부식표면적 측정 및 촬영, 산세처리 후 부식두께 측정, 표면관찰 및 Pit 깊이 측정을 통해 기본적인 부식특성을 파악하고 피로실험을 통해 부식과 피로수명과의 관계에 대한 연구를 행하게 된다[3]. 대기부식시험을 위해 제작된 시험대는 정남향을 향하게 설치되었고 미국표준시험기준(ASTM)에 따라 시험편의 거치 및 높이 등을 설정하였다.

## 3. 부식시험 결과

부식상태에 놓인 시편들은 정해진 시기에 수거된 후 외관촬영을 통해 부식표면적을 측정하게 된다. Fig. 1-6은 대기부식시험 실시 후 3개월, 6개월, 9개월이 경과된 후에 수거된 비열처리 시편들의 외관을 촬영한 사진들이다. Table 1은 수거된 시편들의 부식면적을 %로 정리한 것이다.

그림과 표에서 보는 바와 같이 SS400과 SM490A시편의 표면부식상태를 개월수에 따라 비교해보면 부식속도의 차이가 확연하다는 것을 알 수 있다. SM490A의 경우에는 3개월이 경과된 시점에서 30%이상, 6개월 시점에서 70% 이상, 9개월 시점에서 모든 시편이 90%이상의 부식면적을 나타내고 있는 반면 SS400의 경우에는 3개월 시점에서는 거의 부식이 발생하지 않았고 9개월 시점에서도 대부분이 30%정도의 부식상태를 나타내고 있다. 이렇게 두 재료가 확연하게 부식속도의 차이를 보이는 이유는 SM490A이 부식에 대한 저항력을 향상시키기 위해서 설계된 내후성강이기 때문이다. 내후성강은 초기에 부식층이 쉽게 형성되지만 이와같이 초기에 형성된 부식층은 공기중의 부식인자와 부식층 아래의 강재가 접촉하는 것을 방해하기 때문에 더 이상의 부식진행이 억제된다[4].

Table 1 Corrosion area(%)

	SS400			SM490A		
	시편 1	시편 2	시편 3	시편 1	시편 2	시편 3
3개월	1	20	2	80	30	50
6개월	20	40	5-10	85-90	70-75	90-95
9개월	60	25-30	30-35	90-95	85-90	95



Fig. 1 Corrosion for 3 months(SS400)



Fig. 2 Corrosion for 6 months(SS400)



Fig. 3 Corrosion for 9 months(SS400)



Fig. 4 Corrosion for 3 months(SM490A)



Fig. 5 Corrosion for 6 months(SM490A)



Fig. 6 Corrosion for 9 months(SM490A)

SM490A와 SS400의 부식속도 차이는 부식층 두께를 측정함으로써 더욱 확실히 확인할 수 있다. 다음 Table 2에 나타나는 데이터는 부식 전 시편의 두께와 부식층을 제거한 후 시편의 두께를 측정하여 비교한 것이며 Fig. 7은 그래프로 도식화한 것이다.

Table 2 Thickness of SM490A and SS400 after removing rust

		SM490A					SS400						
		부위1	부위2	부위3	부위4	부위5	평균	부위1	부위2	부위3	부위4	부위5	평균
부식 전 시편		10	10	10	10.1	10.2	9.995	9.6	9.7	9.7	9.6	9.7	9.645
		9.9	9.9	9.9	9.95	10		9.65	9.6	9.6	9.65	9.65	
3개월 부식	비열처리①	9.9	9.8	9.9	9.9	9.9	9.86	9.6	9.55	9.5	9.5	9.6	9.61
	비열처리②	9.9	9.8	9.75	9.75	9.8		9.65	9.65	9.65	9.7	9.65	
	비열처리③	9.8	9.9	9.9	9.95	9.95		9.6	9.6	9.6	9.6	9.65	
	열처리①	9.8	9.95	9.8	9.9	9.9		9.87	9.6	9.65	9.6	9.6	
6개월 부식	비열처리①	9.9	9.85	9.9	9.85	9.85	9.79	9.5	9.5	9.5	9.5	9.55	9.55
	비열처리②	9.8	9.8	9.85	9.75	9.75		9.55	9.6	9.5	9.5	9.6	
	비열처리③	9.8	9.8	9.7	9.65	9.8		9.6	9.65	9.55	9.55	9.6	
	열처리①	9.9	9.85	9.8	9.8	9.8		9.83	9.65	9.65	9.6	9.65	

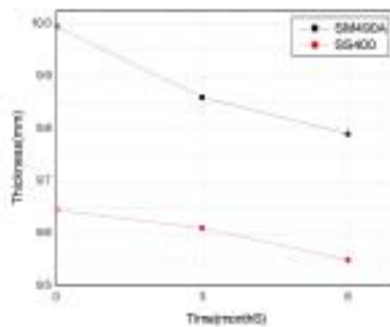


Fig. 7 Graph on change of specimen's thickness

부식 전 시편은 두 재료에서 각각 2개씩을 임의로 추출한 후 시편의 길이방향으로 5등분을 하여 각 부위의 두께를 측정하여 평균값을 구하였다. 부식시편은 10% 염산을 이용하여 부식층을 제거한 후 시편의 두께를 같은 방법으로 측정하였다.

표와 그림에서 알수 있듯이 SM490A의 경우 3개월 경과된 시점에서 0.135mm, 6개월 경과된 시점에서 0.205mm의 부식층이 발생된 반면 SS400의 경우에는 3개월 경과된 시점에서 0.035mm, 6개월 경과된 시점에서 0.095mm의 부식층이 발생되었다. SM490A이 SS400에 비해 부식이 상당히 빨리 진행된다는 것을 수치상으로 알 수 있다. SM490의 경우 부식손실량이 많고 부식속도가 빠르지만 균일 부식을 일으키는 것에 비하여 SS400의 경우에는 부식손실량이 적고 부식속도가 느리지만 국부부식을 일으키고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 살펴본 바와 일치하는 결과로서 내후 성장인 SM490A는 초기의 부식반응이 우수한 금속을 첨가하여 보호피막을 형성시키기 때문에 SS400보다 부식이 전체적으로 더 진행된 것으로 판단된다. 하지만 대기상태에서 진행된 초기 부식임을 감안할 때 이와 같은 차이는 정량적인 평가를 하기에 부족한 감이 있으며 보다 장기간에 의한 부식진행 후에 측정될 값들과 비교해 볼 필요가 있다. 또한 부식이 국부적으로 진행이 되는지 아니면 전체적으로 균일하게 진행이 되는지도 추후 부식에 의한 재료의 기계적 특성에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 조사도 함께 실시되어야 할것이다.

대기부식시험이 6개월과 9개월 경과된 SM490A와 SS400의 열처리된 시편들의 부식상태를 촬영한 사진들이 Fig. 8-11에 나타나 있다.



Fig. 8 Heat-treated SS400(corrosion for 6 months)



Fig. 9 Heat-treated SM490A(corrosion for 6 months)



Fig. 10 Heat-treated SS400(corrosion for 9 months)



Fig. 11 Heat-treated SM490A(corrosion for 9 months)

Fig. 8-11을 Fig 1-6과 비교해 보면 SM490A의 경우에는 열처리에 의한 방식효과가 크지 않은 반면 SS400의 경우에는 상당한 효과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

부식은 일반적으로 전 표면적에 걸쳐 넓고 고르게 발생하는 표면부식과 국부적으로 깊이 방향을 따라 발생하는 부식 등이 있다. 표면에 고르게 발생하는 부식은 외관이 좋아 보이지 않는 단점이 있지만 쉽게 부식되는 부위를 발견하고 조치를 취할 수 있다. 하지만 국부적으로 깊이 방향을 따라 발생하는 부식은 관찰이 용이하지 않으며 외부에서 응력이 가해졌을 때 응력의 집중점으로 작용하는 취약한 면이 있다. 응력이 집중되는 부위에서는 미세 균열이 발생되기 쉽고 외부 응력이 계속 작용하면 이러한 미세 균열은 점차 발전되어 재료의 균열 허용범위를 넘어서면서 예기치 않은 파괴에 이르게 되기 때문에 구조물의 피로수명에 있어서 중요한 영향을 미치게 된다. SS400과 SM490A시편에서 발생하는 부식이 응력집중요소로서의 작용여부를 알기 위해서는 광학현미경을 이용한 표면관찰이 필요하다.

Fig. 12-15는 SS400과 SM490A의 표면을 산세처리한 후 광학현미경을 이용해서 100배 확대촬영한 사진이다. 두 재료는 각각 3개월, 6개월 부식된 시편을 사용하였다.

산세처리 과정을 거쳤지만 조밀하지 않은 부식층만 제거되고 비교적 조밀하며 집착성이 강한



Fig. 12 Pitting corrosion of SS400 (corrosion for 3 months,  $\times 100$ )



Fig. 13 Uniform corrosion of SM490A (corrosion for 3 months,  $\times 100$ )



Fig. 14 Pitting corrosion of SS400 (corrosion for 6 months,  $\times 100$ )



Fig. 15 Uniform corrosion of SM490A (corrosion for 6 months,  $\times 100$ )

부식부위는 사진과 같이 강판 표면에 남아있음을 알 수 있다. SS400은 SM490A에 비해서 붉은 색의 녹이 많이 관찰되는데 이는 철 성분이 부식되었기 때문이다. 반면에 SM490A는 약간 푸른색을 띤 부식표면을 보여주는데 이는 내후성 설계를 위하여 첨가된 금속이 선택적으로 부식이 되었기 때문인 것으로 보인다.

앞서 보여진 전체적인 사진에서는 SM490A의 부식이 더 심한 것으로 관찰이 되었고 부식에 의한 손실 두께도 더 많은 것으로 측정이 되었지만 이는 매크로적인 관찰 및 측정의 결과이고 미세조직을 관찰한 결과는 다소 차이를 알 수 있다. SS400은 전반적인 표면부식 면적은 외관상으로 더 적은 것으로 나타났지만 이미 부식이 진행된 부위는 부식의 정도가 심하고 모재 금속인 철이 부식을 심하게 당하였음을 알 수 있다.

금속의 기계적 특성에 영향을 미치는 부식형태는 전체적으로 고르게 일어나는 부식보다는 국부적으로 심하게 발생하는 부식형태이다. 그림들을 비교해보면 SS400의 표면에는 짙은 색의 반점들이 SM490A보다 많이 관찰되는 것을 알 수 있다. 이러한 반점들은 일종의 pit로서 넓이방향보다는 깊이방향을 따라 부식이 진행되는 특성을 가진다.

Table 4는 SS400의 표면에 형성된 pit의 깊이를 3개월 및 6개월 부식시편에 대해서 측정한 결과이다.

Table 4 Depth of pit on SS400(mm)

	부위 1	부위 2	부위 3	부위 4	부위 5
3개월	0.0092	0.008	0.006	0.008	0.0084
6개월	0.0084	0.0212	0.0128	0.014	0.0088

Pit의 깊이는 평균적으로 3개월 부식된 상태에서는 0.00792mm, 6개월 부식이 경과한 상태에서는 0.01304mm로 거의 두배로 증가하였다. 아직은 심각한 수준이 아니지만 시간이 지남에 따라 더욱 깊게 발전될 가능성이 있다. Pit의 깊이가 깊어지면서 그 부위를 따라 부식이 촉진되며 선단부에 응력의 집중화 현상이 발생하여 미세균열로 발생할 수 있는 가능성이 높아진다. 이러한 미세균열은 지속적인 외부 응력에 의해서 성장, 진행하면서 구조물의 설계값보다 낮은 외부 응력에 의해서 파괴로 이르러기도 한다.

부식으로 인한 피로수명의 감소에 대해 알아보기 위해 6개월 부식된 SM490A와 SS400 시편을 피로실험한 결과를 Fig. 16과 Fig. 17에 나타내었다. 피로실험에 사용된 시편들은 열처리 되지 않은 시편들이며 부식시편은 6개월간 대기부식된 시편이다. 실험조건은  $R=0.1$ ,  $f=10\sim 15\text{Hz}$ 이었고 SM490A 부식시편은 응력진폭이 153MPa, SS400 부식시편은 응력진폭이 165MPa이었다. Fig. 16을 보면 부식된 SM490A 시편은 부식되지 않은 SM490A의 피로수명과 거의 유사한 피로수명을

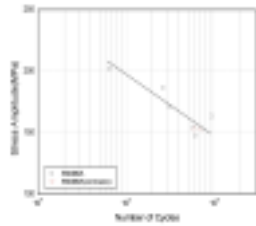


Fig. 16 Fatigue life of SM490A

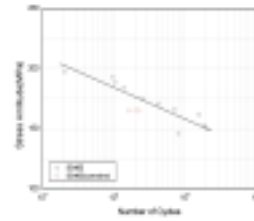


Fig. 17 Fatigue life of SS400

갖고 있음을 알 있다. 반면, Fig. 17에 나타난 SS400의 부식시편의 수명은 같은 응력조건에서 부식되지 않은 시편의 피로수명에 비해 상당히 짧은 수명을 가지고 있다. 이러한 사실은 앞서도 언급하였듯이 SM490A는 초기 부식속도는 빠르지만 균일한 표면부식을 일으키기 때문에 재료의 피로수명감소에 영향을 거의 미치지 않지만 SS400의 경우에는 응력집중요소로 작용하는 Pit가 많이 생성되는 국부부식을 일으키기 때문으로 분석된다. Pit는 깊이방향으로 부식이 진전되기 때문에 응력집중요소로 작용하여 구조물의 피로수명감소에 상당한 영향을 미치리라 예상된다.

## 6. 결 론

본 연구실에서는 철도차량의 수명을 예측하는 방법중 부식에 의한 피로수명의 감소에 대한 연구를 행하고 있으며 우선적인 부식특성을 알아보려고 한다.

- i) SM490A는 SS400에 비해 초기부식속도가 상당히 빠르지만 내후성강이기 때문에 이후의 부식 특성에 있어서는 SS400보다 더 우수할 것으로 예상된다.
- ii) 열처리에 대한 방식효과는 SS400이 SM490A에 비해 탁월하였다.
- iii) SS400과 SM490A의 부식은 균일부식과 Pitting 부식을 각각 나타내고 있다. 구조물의 응력집중요소는 피로수명을 상당히 감소시킬수 있는 작용을 하기 때문에 Pit를 발생시키는 SS400의 경우에는 부식속도가 늦더라도 SM490A보다 피로수명감소에 더 많은 영향을 준다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 김광범(1996), "Atmospheric corrosion of metals", 한국강구조학회, Vol. 8, No.2
2. Evans, U. R. Taylor, C. A. J, 장현구(1972), "Mechanism of atmospheric Rusting", 한국부식학회지, Vol. 1, No. 1
3. 변수일, 이용조(1993), "Recent Development on Atmospheric Corrosion of Metals", 한국부식학회지, Vol. 22, No. 14. 이의호, "부식과 방식 이론", 한국강구조학회, Vol. 8, No. 2, 1996
4. 이의호(1996), "부식과 방식 이론", 한국강구조학회, Vol. 8, No. 2