

## 철도차량 구조재료의 부식 및 피로 특성 연구

### A Study on the Corrosion and Fatigue of Structural Materials for Rolling Stock

구병춘\* · 장세기\* · 김용기\*

Byeong-Choon Goo · Se-Ky Jang · Yong-Ki Kim

#### Abstract

In general, structural integrity of rolling stock structures should last more than 25 years. During the lifetime corrosive degradation occurs. For structural design and diagnosis, quantitative relationship between corrosive degradation and variation of mechanical properties such as tensile strength and fatigue strength is needed. In this study, first of all we established the atmospheric corrosion test procedure. At regular intervals using specimens of SM490A and SS400 on the atmospheric corrosion test bed, we carried out tensile and fatigue tests. The fatigue strength decreases as the atmospheric corrosion period increases. In addition we studied the effect of post-weld heat treatment on the tensile and fatigue behaviour and performed electrochemical corrosion tests.

**Keywords :** Corrosion(부식), Electrochemical Corrosion Test(전기화학부식시험), Fatigue(피로), Mechanical Properties(기계적 성질), Tensile test(인장시험), Rolling Stock(철도차량)

## 1. 서론

20~30여년의 긴 기간 동안 운행되는 철도차량에 사용되는 강 구조물은 시간의 경과와 함께 부식열화를 겪게 되어 피로에 대한 저항이 낮아진다. 따라서 부식의 진행에 따른 인장 및 피로거동의 변화에 대한 정량적인 자료는 설계자나 진단자에게 매우 중요한 것이다. 국내의 경우 최근 철도차량 구조물의 부식에 대해 구병춘 등의[1-4] 연구가 있지만 이 분야에 대한 연구가 미진한 것이 현실이다.

본 연구에서는 우선 대기부식 시험과 대기부식 시편의 산세처리 등 일련의 부식시험절차를 확립하고, 철도차량 구조재료로 사용되고 있는 대표적인 강재인 SM490A와 SS400 시편을 대기부식 시험대에 올려놓고 일정 기간마다 수거하여 인장 및 피로시험을 수행하여 부식기간에 따른 인장과 피로특성의 변화에 대한 정량적인 자료를 확보하였다. 그리고 용접후열처리 한 시편과 하지 않은 시편의 피로강도의 상호 비교시험을 수행하였고 또한 다양한 부식

용액을 이용하여 시편에 대한 전기화학 부식시험을 통하여 SM490A, SS400, SUS205L 및 SUS304의 부식특성을 비교 분석하였다.

철도차량은 다양한 지역을 운행하기 때문에 다양한 대기오염물질과의 접촉에 의해 부식이 발생한다. 대기오염물질이 수분과 반응에 의해 부식환경을 조성하는 부식성 분위기에 노출되면 재질 열화를 동반한 내식성의 저하로 부식 발생이 일어나므로 실험분위기는 기본 수용액을 3차 증류수로 하였다. 기타 다양한 용액에서 철도차량의 대차와 차체 구조재인 SS400, SM490A와 차체에 사용되는 SUS205L 및 SUS304에 대해 전기화학적 분극시험을 통해 재료별 부식거동과 부식경향 및 부식속도를 측정하였다.

## 2.1 전기화학 분극시험

전기화학 분극시험용 모든 시편은 1cm×1cm 크기로 저속 시편 절단기를 사용하여 절단한 후 구리(Cu) 도선을 연결하여 땀납(soldering)시킨 후 호마이카로 포장하여 마운팅하였다. 마운팅된 시편은 SiC 연마지(# 800~2000)로 기계적인 연마를 마치고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말로 1 $\mu$ m까지 연마한 다음 부식시험을 실시하였다. 부식 전위와 부식 속도는 정전압

\* 책임자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 차량기계연구본부, 선임연구원  
E-mail : bchgoo@krri.re.kr

TEL : (031)460-5243 FAX : (031)460-5289

\* 정회원, 한국철도기술연구원, 미래기술실용화사업단, 책임연구원

장치(potentiostat, Gammy 2400)를 사용하여 전기화학적으로 측정하였다. 표준전극(reference electrode)으로는 SCE (Saturated Calomel Electrode)를 사용하였고, 상대전극(counter electrode)으로는 백금(Pt) 전극을 사용하였다. 부식 용액은 산성비와 유사한 용액으로 하였으며, 부식 반응으로 생긴 기포가 시편 표면에 부착되는 것을 막고 용액의 균일성을 유지하기 위해 자석식 교반기로 교반하였다. 부식 전위는 시편을 용액에 담그고 2시간이 경과한 후 측정하였으며, 부식 속도는 potentiostatic 방법으로 양극 분극 및 음극 분극으로 부식 전위를 5~10 mV 만큼 변화시키면서 15분이 지난 후 전류값을 측정하여 Tafel 곡선으로부터 linear polarization method를 이용하여 구하였다.

2.2 시험결과

Fig. 1~4는 pH를 변화시킨 수용액 중에서 부식시험을 실시한 결과이다. 재질에 따른 분극곡선은 전형적인 Tafel 거동을 나타내었다. 산성비와 증류수 용액에서 SS400과 SM490A 합금은 부동태 영역의 존재 없이 전류밀도가 계속

상승함을 알 수 있으며, 서로 유사한 활성화 분극 거동을 나타내었다. SUS205L과 SUS304 합금은 산성비와 3.5% NaCl 수용액 내에서 부동태 영역을 나타내었다. 알칼리수용액에서는 SUS205L과 SUS304는 약간의 부동태 영역을 나타내었고, SS400이 다른 금속에 비해 활성화 분극거동을 나

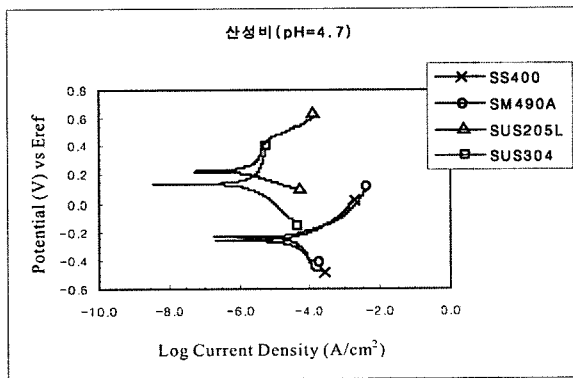


Fig. 1. Corrosion current vs. potential, pH 4.7

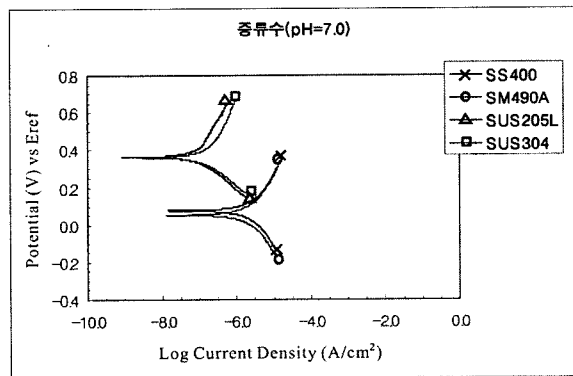


Fig. 2. Corrosion current vs. potential, pH 7.0

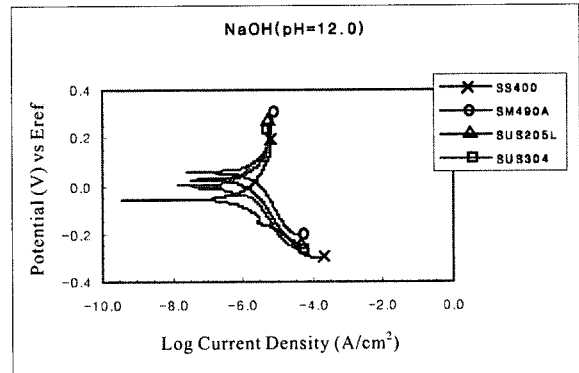


Fig. 3. Corrosion current vs. potential, pH 12.0

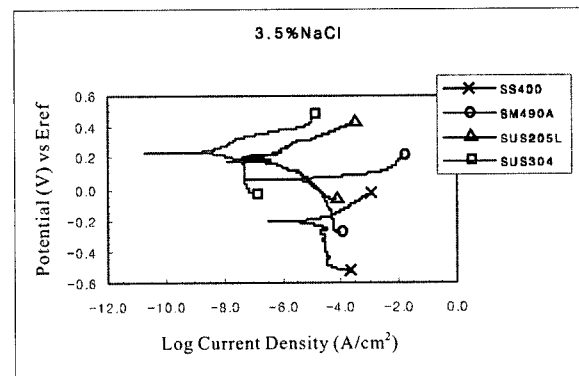


Fig. 4. Corrosion current vs. potential, pH 6.2

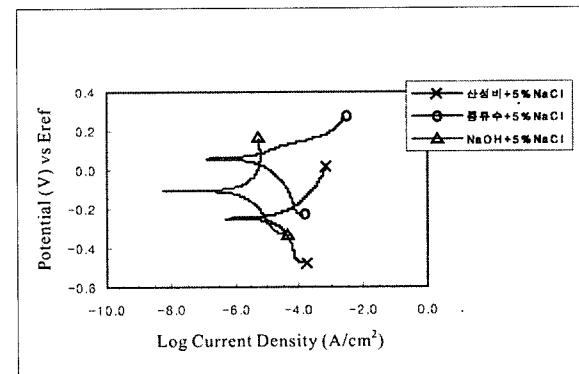


Fig. 5. Corrosion current vs. potential, SS400

타내었다. SS400과 SM490A의 분극곡선의 경향이 다소 높은 위치의 전류밀도 쪽으로 이동하는 것으로 보아 스테인레스 강에 비해 부식의 정도가 심해짐을 알 수 있다.

Fig. 5~8은 5% NaCl을 첨가한 수용액 내에서의 부식 거동을 보여준다. SS400, SM490A 합금의 경우 5% NaCl을

첨가할 때 pH 7에서 약간의 부동태영역을 보였다. 산성영역에서는 부식 전류밀도의 증가와 더불어 활성화 분극거동을 나타내었으며, 알칼리영역에서는 서로 유사한 분극거동을 나타내었다. SUS205L, SUS304 경우 산성 및 중성영역에서 약간의 부동태 영역을 나타내었다. 부식 전류 밀도는 SS400과 SUS205L에서는 유사한 전류밀도를 나타내었으며, SUS304는 알칼리영역에서 SUS205L 보다 분극곡선의 경향이 다소 높은 위치의 전류밀도 쪽으로 이동하는 것으로 보아 부식의 정도가 심해짐을 알 수 있다.

### 2.3 부식속도 측정

부식 속도는 potentiostatic 방법으로 양극 분극 및 음극 분극으로 부식 전위를 5~10 mV 만큼 변화시키면서 15분이 지난 후 전류값을 측정하여 Tafel 곡선으로부터 linear polarization method를 이용하여 구하였다. 부식속도를 측정하기 위하여 선형분극시험으로 분극저항 Rp를 측정한 후 Stern-Geary의 식을 [5] 이용하여 부식전류밀도  $i_{corr}$ 를 계

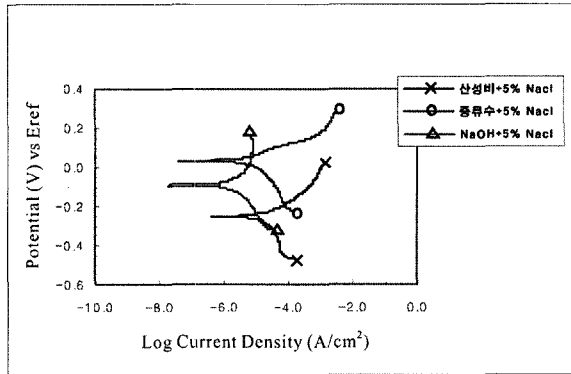


Fig. 6. Corrosion current vs. potential, SM490A

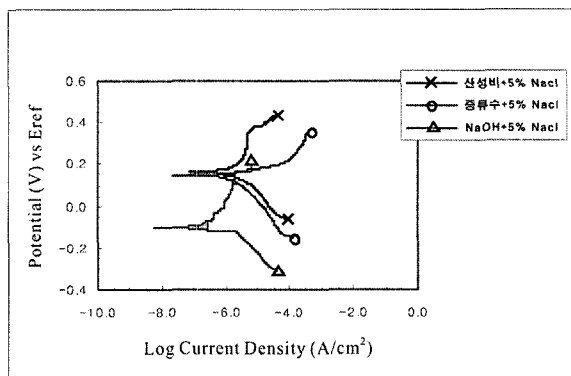


Fig. 7. Corrosion current vs. potential, SUS205L

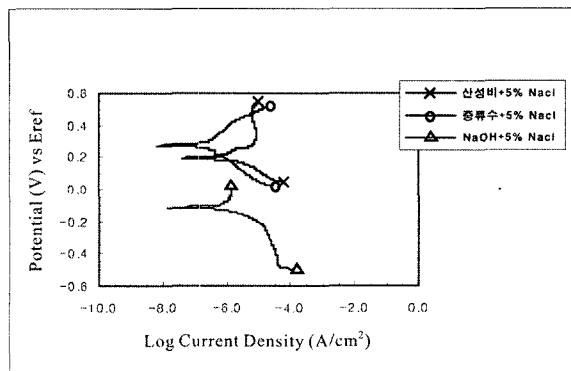


Fig. 8. Corrosion current vs. potential, SUS304

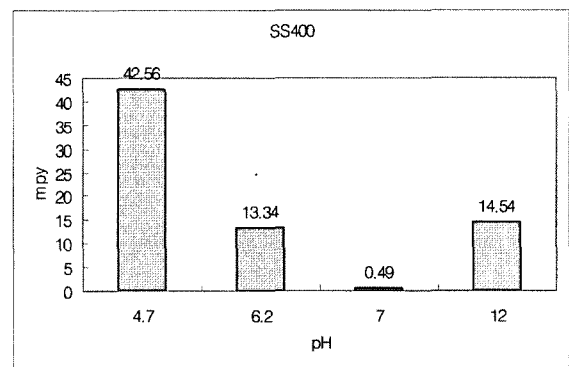


Fig. 9. Corrosion rates by linear polarization, SS400

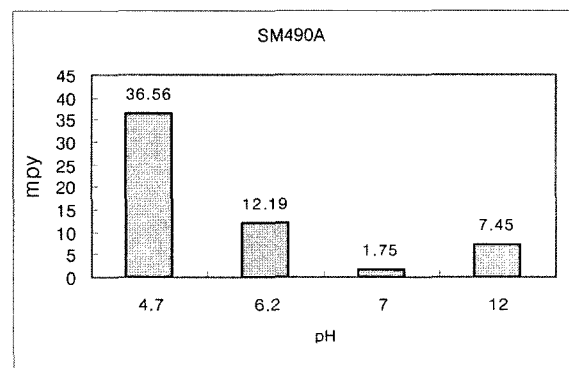


Fig. 10. Corrosion rates by linear polarization, SM490A

산한 다음 Faraday식을 [6] 이용하여 부식속도(mpy)로 환산하였다.

Fig. 9~12는 부식속도의 측정결과를 보여준다. 부식속도는 산성비 영역에서 높게 나타났다. SS400과 SM490A는 스테인레스 강보다 8~15배 정도 높았으며, 염수 및 알칼리 영역에서도 다소 부식속도가 높음을 알 수 있다. SM490A 강종은 내후성강으로 설계되어 장시간 사용할 때 부식에 의한 저항이 SS400 강종보다 우수하게 설계되어 있다. 내후성 강에는 부식에 매우 민감하게 작용하면서 안정된 산화막을 형성시키는 금속이 첨가된다. 따라서 대기 중에 노출되면 표면에 얇은 산화피막을 쉽게 형성시키고 이후의 부식 진행은 매우 느리게 진전되는 특성을 지니고 있다. 그러나 본 전기화학 실험에서는 이러한 특성을 구별하기 어려운데 이는 표면층에 이미 형성된 산화막에 의한 영향으로 판단할 수 있다.

Fig. 13~15는 부식용액에 5% NaCl 용액을 첨가한 경우 소재별 부식속도이다. 산성영역에서는 ① SS400 ② SM490A ③ SUS205L ④ SUS304의 순서로 부식속도가 작아짐을 알 수 있다. 그리고 SUS205L이 SUS304보다 2.2배 정도 부식속도가 높음을 알 수 있었다. 증류수에 3.5% NaCl을 첨가한

용액에서는(Fig. 14 pH6.2) SM490A가 SS400보다 1.5배 정도의 높은 부식속도를 나타내었다. 알칼리영역에서도 SM-490A가 SS400보다 1.4배 정도의 높은 부식속도를 나타내었다. SUS205L와 SUS304는 중성영역에서는 유사한 부식속도를 보였으며, SUS304는 알칼리영역에서 다소 높게 나타나고 있다. 그리고 SUS205L과 SUS304의 경우 NaCl에

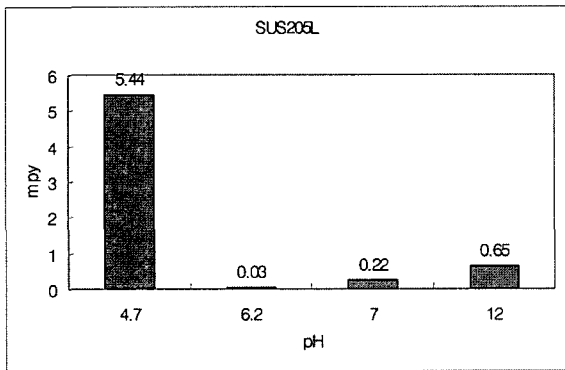


Fig. 11. Corrosion rates by linear polarization, SUS205L

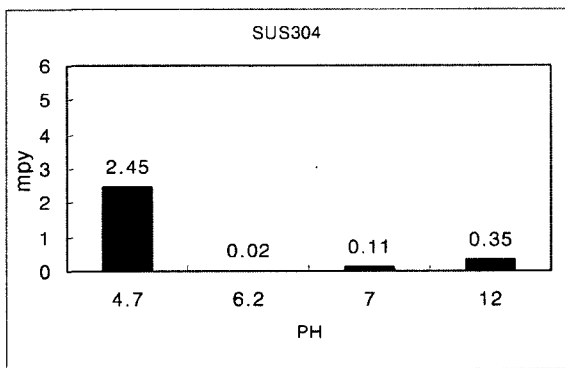


Fig. 12. Corrosion rates by linear polarization, SUS304

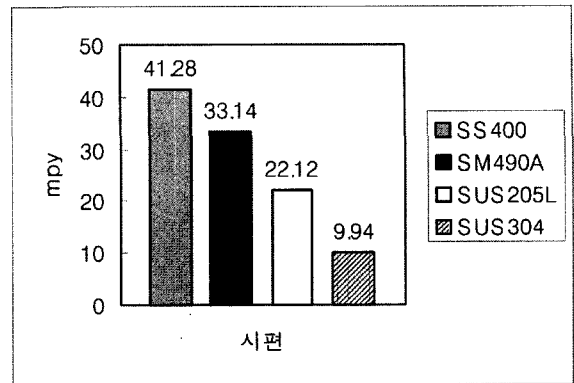


Fig. 13. Corrosion rates by linear polarization, pH 4.7

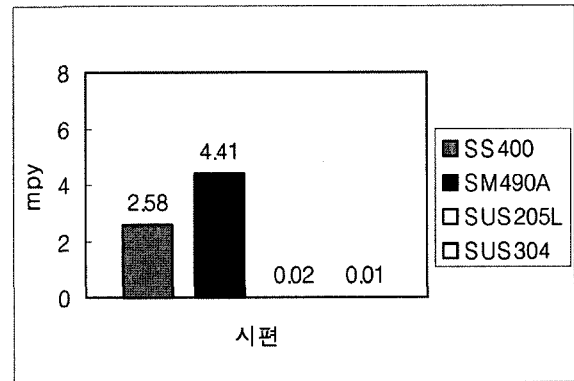


Fig. 14. Corrosion rates by linear polarization, pH 6.2

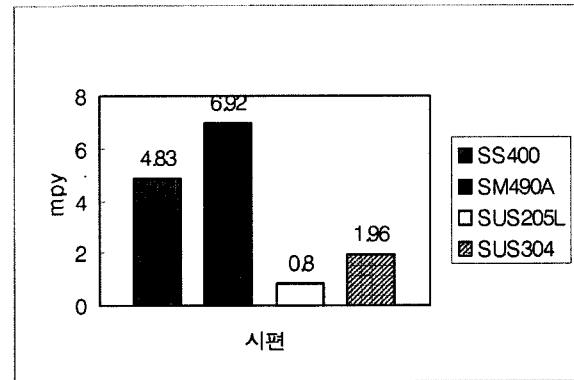


Fig. 15. Corrosion rates by linear polarization, pH 11.2

의해 부식속도가 증가하지만 SS400과 SM490A의 경우 부식속도에 별 변화가 없다.

### 3. 대기부식시험

#### 3.1 대기 부식시험의 개요

Fig. 16과 같이 대기부식 시험대에 SM490A와 SS400을 설치하여 대기부식시험을 실시하였다. 시험대는 정 남향을 향하게 설치하였고 미국 표준시험 기준(ASTM)에 따라 시험편의 거치 및 높이 등을 설정하였다. 전기화학적 부식 시험 방법은 강종의 부식거동에 대한 정성적인 자료를 제공하는 반면 대기부식에 의한 시험은 장시간의 시간이 요하는 단점이 있지만 실제의 자연 환경에서 부식이 일어나는 상태를 관찰할 수 있다는 장점이 있다.

시험은 SS400과 SM490A에 대해 각각 열처리되지 않은 시편 30개, 열처리된 시편 10개씩 총 80개의 시편을 사용하였다. 시간에 따른 부식정도를 알아보기 위해 각 시편들은 설치된 시점을 기준으로 시험 1차 년도에는 3개월에 한번씩, 시험 2, 3, 4차 년도에는 6개월에 한 번씩 채취하게 되며

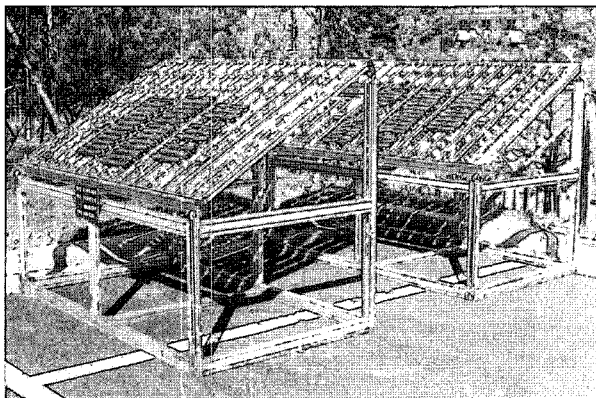


Fig. 16. Atmospheric test bed

Table 1. Atmospheric corrosion test schedule

	SS 400		SM 490 A	
	비 열처리 시편	열처리 시편	비 열처리 시편	열처리 시편
시편 갯수	30개	10개	30개	10개
수거 방법	1차년도 3개월마다 비 열처리시편 3개, 열처리시편 1개씩 수거			
	2, 3, 4차년도 6개월마다 비 열처리시편 3개, 열처리시편 1개씩 수거			

채취시편의 개수는 비열처리 시편 각 3개씩, 열처리 시편 각 1개씩이다. Table 1은 대기부식시험의 진행상황을 개략적으로 정리한 것이다. Fig. 17에는 열처리에 의한 부식특성을 알아보기 위해 실시한 열처리의 온도이력, Fig. 18에는 시편 수거 후 실시되는 실험내용을 간단하게 나타내었다.

Fig. 19 및 20은 SS400 및 SM490A 두 종류의 강재를 실제로 대기 중에 노출시킨 후, 자연적인 조건에서 12개월까지 부식을 시킨 표면형상을 보여준다. SS400은 초기 3개월 노출에선 부분적으로 점상의 부식만 진행되고 전체적으로는 양호한 부위가 더 많게 나타난다. 반면에, SM490A는 노출 초기부터 전체적으로 표면부식이 50% 이상 진행되는 것을 알 수 있다. 그러나 표면에 초기 발생한 부식이 이후의 부식에 대한 저항으로 작용하여 부식속도를 더디게 하는 효과를 나타내는데 이러한 강재를 내후성강이라고 한다. SM490A는 이러한 특성을 어느 정도 지니고 있다.

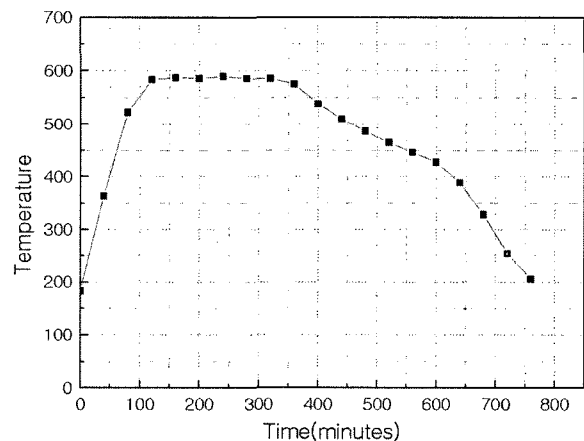


Fig. 17. Heat treatment curve

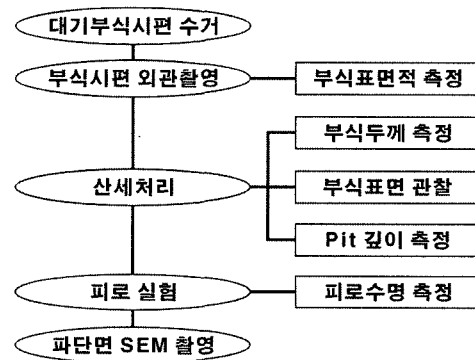


Fig. 18. Corrosion test procedure

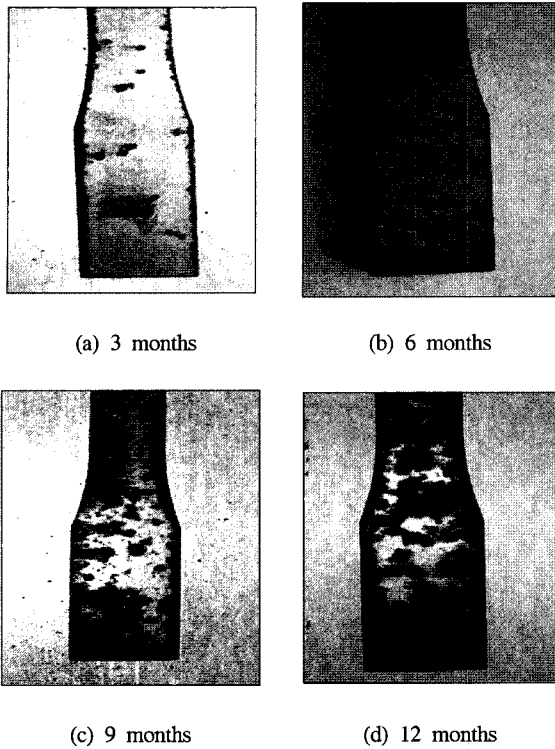


Fig. 19. Surface corrosion vs. the time of exposure to the atmosphere, SS400

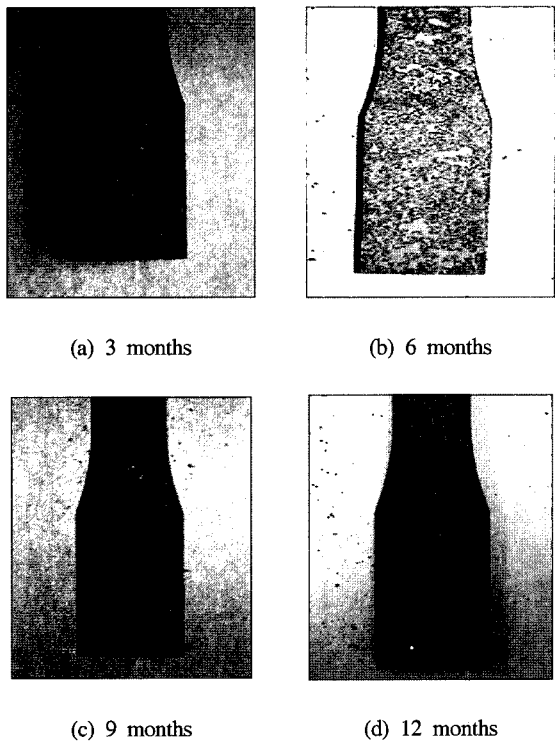


Fig. 20. Corrosion shape vs. the time of exposure to the atmosphere, SM490A

Table 2는 표면에서 진행된 부식의 면적률을 보여준다. SS400은 표면부식의 진행속도가 SM490A에 비하여 현저하게 작게 나타났다. 초기 노출 6개월까지 표면에는 국부적으로 불연속적인 부식 형상을 보여준다. 반면에 SM490A는 초기 3개월 노출 후에 표면의 50% 이상이 부식되는 경향을 보여 주었으며 9개월 후에는 표면의 90% 이상이 전부 부식되었다. 이러한 현상은 SM490A의 강 성분 중 망간의 양이 상대적으로 많기 때문이며, 망간은 산소와의 친화력이 좋으므로 대기에 노출되면 철보다 우선적으로 산화하게 된다. 표면에 철보다 먼저 산화막을 형성함으로써 철과 산소의 반응은 지연되어지며 따라서 부식에 의하여 열화되어 취약해지는 현상을 억제하는데 도움이 되기 때문이다.

한편 용접 후열처리를 한 시편과 하지 않은 시편의 대기 부식 정도를 비교해 본 결과 열처리를 하지 않은 강판의 부식이 상대적으로 더 작음을 알 수 있었다(Fig. 21). SM490A 및 SS400 모두 열처리를 한 경우에 부식이 상대적으로 덜 진행되었음을 알 수 있다. SS400의 경우 9개월이 지난 후에

Table 2. Corrosion area ratio(%) vs. exposure time to the atmosphere

재질	3개월	6개월	9개월	12개월
SS400	10	20	40	60
SM490A	50	80	90	95

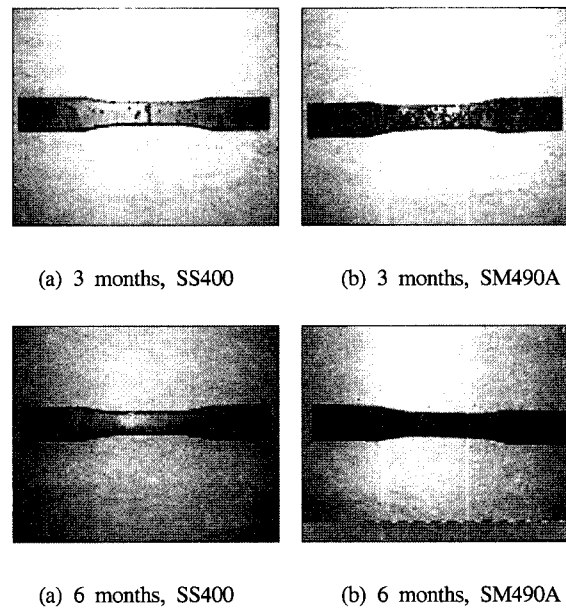


Fig. 21. Effect of heat treatment on the corrosion. Heat treated as of Fig. 17

도 표면부식이 거의 진행되지 않고 있다. 그리고 열처리를 한 경우에도 SM490A가 SS400에 비해서 초기부식속도가 빠르게 나타나고 있다. 이러한 열처리에 대한 부식속도의 저하는 열처리에 의해 내부응력이 어느 정도 완화되었기 때문이다. 동일한 금속 내에서 부식반응은 에너지 측면에서 높은 상태가 낮은 상태일 때보다 쉽게 진행된다.

강재의 표면이 고르게 넓은 면적에 걸쳐서 부식이 진행되는 일반부식보다 국부적으로 깊이 방향을 따라 부식이 진행되는 구멍부식이 구조물에서는 더욱 위험하게 작용한다. 일반부식은 육안으로 쉽게 관찰되므로 유지보수를 통하여 쉽게 대비할 수 있으나 구멍부식을 비롯하여 틈새에서 진행되는 틈새부식(crevice corrosion) 등은 관찰이 용이하지 않은 반면에 국부적인 부식손상의 효과가 크므로 사전에 대비를 하지 못하면 예기치 않은 결과를 초래할 수도 있게 된다. 본 연구에서는 표면에 형성된 부식물을 제거한 후에 현미경을 통하여 표면을 관찰하였다. SM490A는 전체적으로 고르게 부식이 진행된 흔적이 있는 반면에 SS400은 균데균데 부식이 심하게 진행되었다. SS400의 심한 부식부위는 깊이 방향으로 부식이 진행된 구멍부식이 관찰되었으나 SM490A는

겉보기에만 부식의 면적이 많을 뿐 깊이방향으로 진행된 부식은 12개월의 대기부식 노출 이후에도 관찰되지 않았다.

### 3.2 대기부식시편의 인장특성

Fig. 22와 23은 SS400과 SM490A 판형 인장시편에(JIS Z 3121-1993, No. 1A) 대해 대기부식 시간을 달리하면서 0.1mm/minute의 속도에서 시험한 응력-변형률 곡선이다. 각 곡선은 3개의 시편에 대한 평균값을 구하여 도시한 것이다. 대기부식 시간이 증가함에 따라 동일 변형률에서 강도가 낮아지는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 3, 6개월 부식 시편의 경우 기계적 거동이 매우 유사함을 알 수 있다.

### 3.3 대기부식시편의 피로특성

앞에서 기술한 대기부식 시편을 채취하여 응력비  $R$ =최소응력/최대응력=0.1, 주파수 15 Hz에서 인장피로시험을 수행하였다. 일정하중에서 시편이 완전히 파단 될 때의 피로

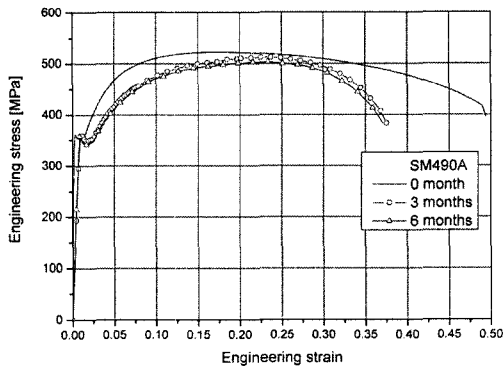


Fig. 22. Tensile curves of corrosive specimens, SS400

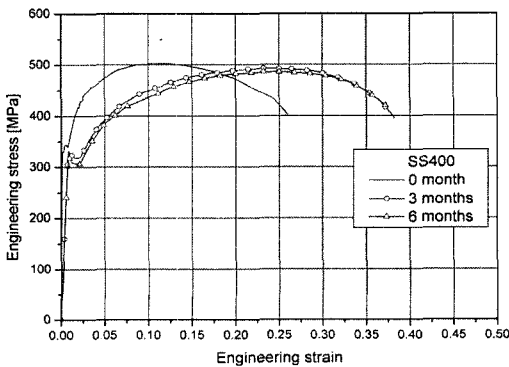


Fig. 23. Tensile curves of corrosive specimens, SM490A

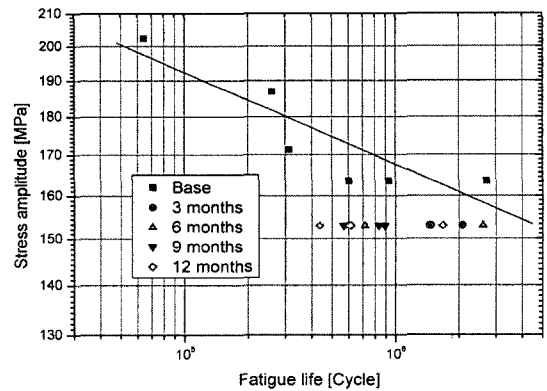


Fig. 24. The relation between atmospheric corrosion time and fatigue life of SM490A

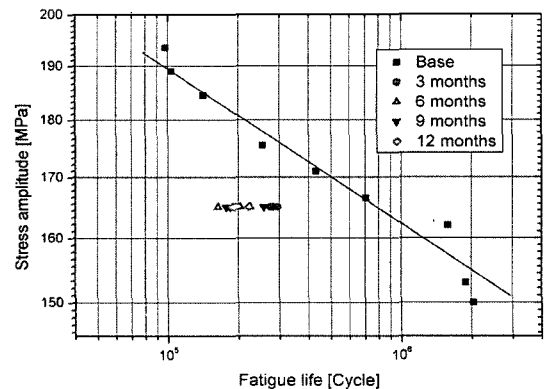


Fig. 25. The relation between atmospheric corrosion time and fatigue life of SS400

수명을 기준으로 하였다. Fig. 24는 SM490A의 대기부식 시편의 피로강도를 모재의 피로강도와 비교한 것이다. 3, 6, 9, 12개월 부식시편 모두 모재에 비하여 수명이 많이 줄어들었다. 그러나 부식 기간에 따라 점진적으로 수명이 줄어들지 않는데 이는 피로 데이터는 산란이 매우 크므로 예상되는 결과라고 할 수 있다. Fig. 25는 SS400에 대한 결과로서 SM490A와 같이 점진적으로 수명이 줄어들지 않는다. 일반적으로 피로 데이터의 산란은 작용하중의 크기에도 영향을 받는다. 작용하중의 크기에 의한 영향을 무시하고 비교할 때 데이터의 산란 범위는 SS400이 SM490A보다 작음을 알 수 있다. Fig. 26, 27은 각각 SM490A와 SS400에 대해 열처리가 대기부식시편의 피로수명에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 열처리를 하지 않은 시편은 3개 시편에 대한 평균값이다. 열처리한 시편의 피로수명이 열처리하지 않은 시편에 비해 수명이 많이 짧아짐을 알 수 있다. 인장강도와 마찬가지로

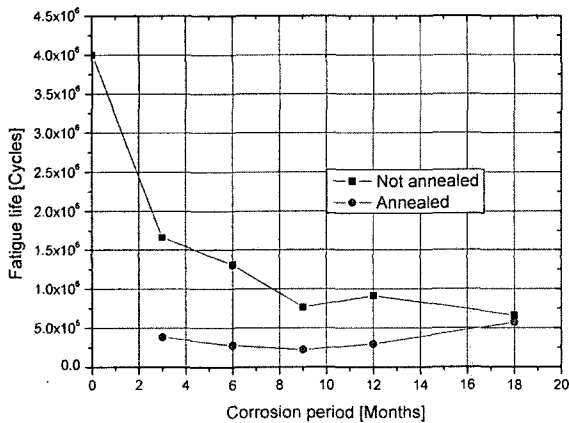


Fig. 26. The heat treatment effect on the fatigue life of SM490A

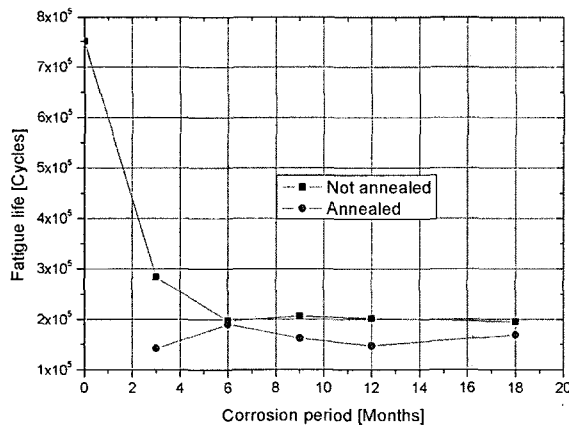


Fig. 27. The heat treatment effect on the fatigue life of SS400

피로 강도가 상당히 줄어들고 그 이후에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 부식에 의한 인장강도와 피로강도의 변화 경향이 밀접한 상관관계가 있는 것으로 판단할 수 있으므로 지속적인 관찰이 요구된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 그동안 철도차량 구조물의 재질로 많이 사용되고 있는 SM490A, SS400, SUS205L 및 SUS304에 대한 전기화학 부식시험, 장시간에 걸쳐 시행하고 있는 대기 부식 시험 그리고 일정 기간마다 수거한 시편에 대한 인장 및 피로시험 결과를 기술하였다. 본 연구에서 얻은 주요한 결론은 다음과 같다.

- (1) 부식에 대한 구조용 강역의 거동특성을 평가할 수 있는 대기부식 시험절차를 개발하고 SM490A와 SS400에 적용하여 이들 강역의 부식 특성을 평가하였다.
- (2) 표면의 부식면적을 기준으로 할 때 SS400이 SM490A보다 상대적으로 부식이 작았다.
- (3) 국부적으로 깊이 방향을 따라 진행되는 구멍부식의 경우 SS400이 SM490A보다 상대적으로 부식이 더 심하였다.
- (4) 열처리를 한 시편이 하지 않은 시편에 비해 부식이 더 심하였다.
- (5) 대기부식의 진행과 함께 항복강도, 인장강도 및 피로강도가 낮아지는데 초기 3개월 동안의 강도 저하가 크고 그 이후에는 서서히 감소하였다.
- (6) 열처리를 한 시편이 하지 않은 시편에 비해 상대적으로 피로강도가 더 낮았다.
- (7) 차체에 사용되는 SUS205L과 SUS304는 모든 용액에서 강 재료인 SS400과 SM490A보다 부식속도가 작다. SUS205L의 부식속도는 부식용액에 따라 SUS304보다 크기도 하고 작기도 하다.
- (8) 부식된 차량 구조물의 수명평가를 위해서는 부식과 피로에 관한 정량적인 데이터가 필요한데 이런 연구는 긴 시간과 비용이 소요되므로 지속적인 지원이 필요함을 알 수 있었다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(NRL)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.



## 참고문헌

1. 오창록, 구병춘, “전기화학 부식시험에 의한 부식용액별 부식 특성 연구,” 한국철도학회 추계학술대회논문집, 2004
2. 장세기, 김용기, 오창록, 구병춘, “철도차량 구조물의 대기부식 특성,” 한국철도학회 추계학술대회논문집, 2004
3. 구병춘 외, “철도차량 구조물의 잔존수명 평가기술 개발” 과학기술부 국가지정연구실사업(M1-0203-00-0104), 2004.
4. 구병춘 외, “철도차량 구조물의 잔존수명 평가기술 개발”, KRRRI 연구 04-99, 한국철도기술연구원, 2004.
5. M. Stern and A. L. Geary, J. Electrochem. Soc. Vol.104, pp.56, 1957
6. S. W. Dean, “Handbook on corrosion testing and evaluating,” John Wiley, 1971