

SM490A와 SS400 대기부식 시편의 피로 특성 평가

Fatigue of SS490A and SS400 Corroded Specimens

구병춘[†]

Byeong-Choon Goo

Abstract For structural design and diagnosis, quantitative relationship between corrosive degradation and variation of mechanical properties such as tensile strength and fatigue strength is needed. But it is difficult to find experimental data associated with corrosive degradation of structural structures in the literature. In this study, first of all I established the atmospheric corrosion test procedure. And using specimens of SM490A and SS400 on the atmospheric corrosion test bed, I carried out tensile and fatigue tests at regular intervals. And we studied the effect of post-weld heat treatment on the tensile and fatigue behaviour. It is found fatigue strength decreases as the atmospheric corrosion period increases.

Keywords : Atmospheric corrosion, Fatigue, SS400, SM490A

요 지 강 교량, 선로 구조물, 차량 구조물 등 철도분야에서 강 재료가 많이 사용되고 있다. 설계, 강도평가, 잔존수명 평가 등을 위하여 부식된 강 재료에 대한 인장강도, 피로강도 등이 필요하지만 우리나라의 경우 이 분야의 연구가 미진하여 축적된 데이터가 많지 않다. 본 연구에서는 철도 분야에서 많이 사용되는 대표적인 강 재료에 속하는 SM490A와 SS400에 대해 대기부식 시험절차를 확립하고 많은 시편을 대기부식에 노출시켜 일정한 시간 간격으로 수거하여 인장 및 피로시험을 수행하여 부식시간의 경과에 따른 인장 및 피로강도의 변화를 측정하였다. 처음 3-4개월 기간에 피로강도가 많이 저하하였고 그 이후에는 완만히 변화하였다. 그리고 후열처리 한 시편이 부식에 대한 저항이 더 크다는 것도 알 수 있었다.

주 요 어 : 대기부식, 피로, 강구조물, SS400, SM490A

1. 서 론

일반적으로 철도 분야에서 강 재료는 20~30여년 이상 긴 기간 동안 사용되므로 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. 구병춘 등[1-6]은 철도차량, 교량 등의 구조물에 많이 사용되고 있는 SS400과 SM490A 재질에 대해 대기부식시험과 염수분수시험을 실시하여 두 재질의 부식특성을 비교하였고, 대기부식 시간의 경과에 따른 인장강도와 피로강도의 변화

를 측정하였다. 김인태 등[7]은 강 교량용 무도장 SM490A 강재에 대해 부식 촉진 시험법으로 복합 환경 사이클 시험을 적용하여 부식시간과 부식량의 관계를 구하고 현장에서 측정된 자료와 비교하여 부식촉진 배율을 구하였다. 조효남 등[8]은 고속철도 강 교량의 생애주기비용 분석에 부식과 피로를 고려하지만 부식에 의한 강재의 피로강도 변화는 기존 문헌의 식을 적용하였다. 김민건[9]은 강 교량에 사용되는 내후성 강 SMA50W의 부식 및 피로강도에 미치는 산성안개의 영향을 가속환경시험장치를 이용하여 실험하였는데 PH 5 산성환경수로 1300회 분사한 시편의 피로한도가 증류수를 분사한 시편의 피로한도보다 21% 작은 결과를 얻었다. 저자는 피로한도의 저하를 부식 피트의 영향이라고 추정하였다. 김인태 등[10]은 지하철 공사현장에 사용되는 가시철 강재 SS400에 대해 실내 부식시험과 현장 노출시험을 실시하였다. 실내부식시험은 상대습도와 염화

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원
E-mail : bcgoo@krrri.re.kr
TEL : (031)460-5243 FAX : (031)460-5289

칼슘의 영향을 검토 하였고 현장노출시험은 실제 지하철공사 현장에 시편을 설치하였다. 부식 시간의 경과에 따른 부식 두께를 측정하였으나 기계적 성질의 변화는 측정하지 않았다. Katayama 등[11]은 공기 중의 소금기가 SM490A 재질의 대기부식 초기 특성에 미치는 영향을 모사하기 위해 시험장치를 만들어 온도를 제어하고 염수를 뿌리면서 실험을 하여 실제 대기 중에 놓인 시편의 부식과 유사하게 모사하였다. Natesan 등[12]은 인도 대륙의 해안가 10곳에 연강, 아연도금 강, 아연 및 알루미늄 시편을 대기부식에 노출시켜 염분, SO₂, 상대습도, 온도 및 오염물질의 영향을 조사하였는데 4 종류 시편의 대기부식에 대한 저항이 지역에 따라 그 순서가 다르게 나왔다. 위에서 살펴본 바와 같은 다양한 실험연구 외에도 대기부식에 의한 부식두께를 예측하기 위한 모델들도 있다. Cay et al.[13], Diaz and Lopez[14]는 인공 신경망 모델을 이용하여 부식 두께를 예측하고 기존의 선형 모델보다 정확히 예측할 수 있음을 보여 주었으며, Hoerle 등[15]은 젖음과 건조가 반복되는 장기간의 대기부식에 대해 기계적(Mechanistic) 모델을 제시하고 있다.

본 연구에서는 실제로 오랜 기간 동안 운용되고 있는 철도 차량의 부식 사례를 조사, 분석하고 대기부식 시편의 인장 및 피로특성을 분석하였다. 우선 대기부식 시험과 대기부식 시편의 산세처리 등 일련의 부식시험절차를 확립하고, 철도차량, 교량 등 구조물에 많이 사용되어 온 SM490A와 SS400 재질의 시편을 대기부식 베드에 올려놓고 일정 기간마다 수거하여 인장 및 피로시험을 수행하여 부식기간에 따른 인장과 피로특성의 변화에 대한 정량적인 자료를 확보하였다. 그리고 용접후열처리 한 시편과 후처리를 하지 않은 시편의 피로강도를 상호 비교하여 후열처리가 부식 특성에 미치는 영향에 대해 검토하였다.

2. 운행차량의 부식 현황 조사

2.1 부식 현황

객차의 하부는 차체의 재질 및 방청상태에 따라 부식의 진행상태가 다양하게 변화된다. Fig. 1은 차체 언더프레임의 부식 상태를 보여준다. 볼트가 연결된 부위에서 부식층이 떨어져 나갔다. Fig. 2는 새마을 객차의 차체 볼스터 부위로서 방청 도막이 소실되어 차체 볼스터 부위의 전체 표면이 심하게 부식되어 부식 생성물이 이탈되고 있음을 볼 수 있다. Fig. 3에서는 객차 센터실의 방청 도장부가 소실되어 모재의 표면에서 심한 부식이 진행되는 있는 상태를 보여 준다. Fig. 4는 화차 차체의 부식 진행상태를 보여주는 것으로서 표면부에서 부식이 심하게 진행되어 부식생성

물이 크게 성장하였다. 열차의 운행에 의해 발생하는 진동이나 충격 등에 의해 부식생성물이 모재에서 분리되면 모재의 두께가 점점 얇아져 강도와 강성이 줄어들게 되고 구조 안전성을 저하하게 된다. Fig. 5는 전동차 키스톤 플레이트의 부식 예를 보여준다.

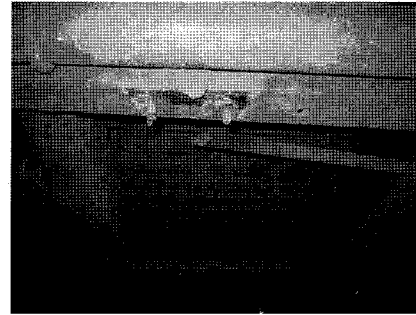


Fig. 1. Underframe of a Mugungwha

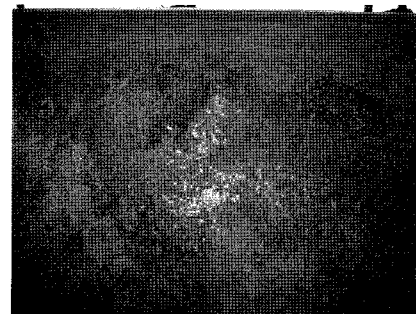


Fig. 2. Body bolster of a Saemaoul



Fig. 3. Center sill of a Saemaoul

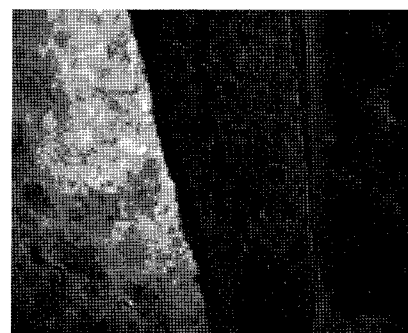


Fig. 4. Corrosion of a freight car body



Fig. 5. Keystone plates of an EMU

2.2 부식 두께 측정 및 방법

차체의 부식은 차량의 노후도와 연계되므로 구조물의 피로수명 및 재질강도에 중대한 영향을 미친다. 본 연구에서는 차체 주요 구조물의 부식두께를 측정하였다. 부식속도를 측정하는 방법으로는 두께 측정기를 이용하여 측정된 두께와 소재 설계시의 원소재의 두께를 비교하여 부식속도를 측정하는 방법과 전기화학적 방법을 사용하여 측정하는 방법이 있다[10-12]. 본 연구에서는 전자의 방법을 적용하였다.

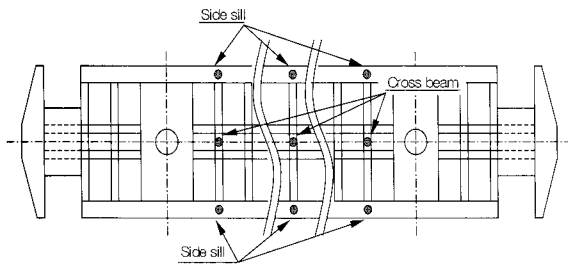


Fig. 6. Measuring points of corrosion thickness

2.3 운행차량의 두께 측정

약 10년 이전에 제작된 철도 차량의 경우 차체의 재질로는 주로 SS400이 사용되었다. 본 연구에서 무공화호 객차를 대상으로 사용년수가 10년~23년 된 차량을 선정하여 SS400으로 된 크로스 빔, 사이드 실의 부식두께를 측정하였다. 향후의 부식두께를 예측하기 위하여 사용년수에 따른 강판 두께를 추정도 하였다. 부식두께 측정은 실제 운용차량을 대상으로 하므로 구조물에 최소한의 영향을 주도록 초음파 두께측정기를 이용하여 두께를 측정하였다. Fig. 7은 객차의 사용년수에 따른 사이드실의 잔존 강판의 두께를 나타낸 것으로서 국내에서 제작된 차량의 객차로서 잔존 강판의 두께가 사용년수가 경과함에 따라 부식두께는 10년 경과된 차량의 평균두께 감소는 0.09mm, 23년 경과된 차량의 평균두께는 0.33mm 감소하였다. 여기서 언급하여야 할 것은 강판의 초기 두께이다. 정확한 부식 두께를 알기 위해서는 소재의 초기 두께

를 알아야 하는데 이는 차량 제작 시 부식 시험을 염두에 두고 측정하여 기록하지 않으면 알 수 없는 것이므로 초기 두께는 모두 도면상의 공칭 두께 4.5mm를 기준으로 하였다. Fig. 8은 Fig. 7의 데이터를 이용하여 잔존 강판의 두께를 예측하기 위하여 평균두께로 환산한 추세선이다.

Fig. 9에 나타낸 크로스 빔의 경우를 보면 사용년수에 따른 잔존두께는 4.41~4.33mm로서 잔존 크로스 빔의 두께가 사용년수가 경과함에 따라 부식두께가 4년 주기로 0.09~0.3mm 정도 감소하고 20년 이상 사용된 사이드 실보다 부식속도가 빠르게 나타남을 알 수 있었다. Fig. 10은 크로스 빔의 두께를 예측하기 위하여 평균두께로 환산한 추세선이다. 크로스 빔의 경우 사이드 실보다 부식으로 인한 두께의 감소율이 1.7배 정도 높게 나타났다. 이에 대한 원인으로는 사이드 실의 경우 차량의 측면에 위치하여 공기가 잘 유통되어 습도와 온도가 대기습도와 유사하나 크로스 빔은 차체 바닥 밑에 있어 습도가 높고 온도도 상대적으로 약간 높기 때문이라고 판단된다. 향후 상대습도, 온도, 기타 오염물질을 측정하여 정량적 데이터를 확보하면 구체적인 원인을 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

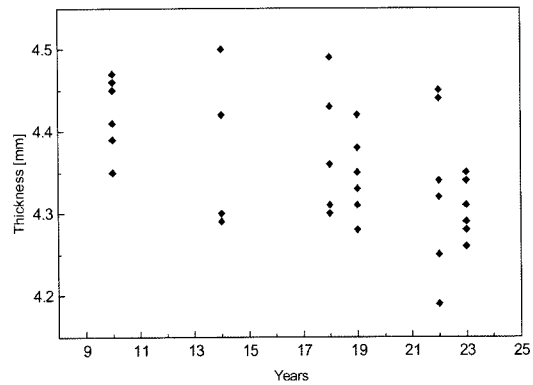


Fig. 7. Measured thickness of the side sills

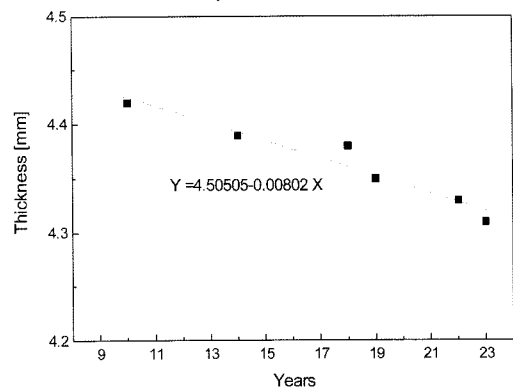


Fig. 8. Average thickness of the side sills

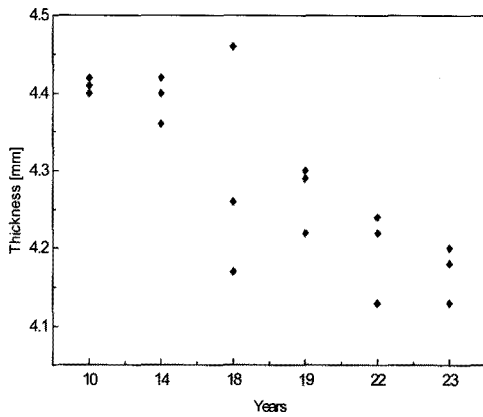


Fig. 9. Remaining thickness of the cross beams

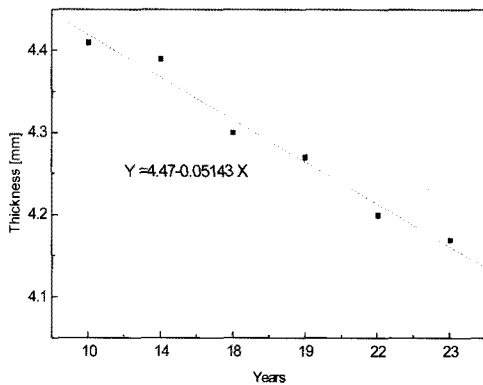


Fig. 10. Average thickness of the cross beams

3. 대기 부식시험 및 피로시험

3.1 대기 부식시험의 개요

미국 표준시험 기준 ASTM[16]에 따라 대기부식 시험대를 제작하고, SM490A와 SS400을 설치하여 대기부식시험을 실시하였다. 시편의 열처리 조건, 시험절차 등은 기존의 연구[6]와 동일하다. Table 1, 2는 각각 부식된 SM490A와, SS400 시편을 산 용액으로 세척한 후 두께를 측정할 결과이다. 3개월, 6개월 부식시편의 경우 비열처리 시편 3개, 비열처리 시편 1개에 대해 각각 6곳에서 두께를 측정하였다. SM490A의 경우 3개월 부식된 시편은 부식 전에 비해 0.135mm, 6개월 부식된 시편은 0.205mm의 부식손실이 발생하였고 SS 400의 경우에는 각각 0.035mm, 0.095mm의 부식손실이 발생하였다. 18개월, 24개월 부식시편의 경우는 부식 두께를 정밀하게 측정하지 못하였고 피로시험 전에 작용응력을 계산하기 위해 측정한 데이터로 정밀도가 약간 떨어진다. SS400은 표면부식의 진행속도가 SM490A에 비하여 현저히 작게 나타났다. 초기 노출 6개월까지 표면에는 국부적으로 불연속적인 부식 형상을 보여준다. 반면에 SM490A는 초기 3개월 노출 후에 표면의 50% 이상이 부식되는 경향을 보여주었으며 9개월 후에는 표면의 90%

이상이 전부 부식되었다[6]. 이러한 현상은 SM490A의 강 성분 중 망간의 양이 상대적으로 많기 때문이다. 망간은 산소와의 친화력이 좋으므로 대기에 노출되면 철보다 우선적으로 산화하게 된다. 표면에 철보다 먼저 산화막을 형성함으로써 철과 산소의 반응은 지연시켜 부식에 의하여 소지 철이 열화되어 취약해지는 현상을 억제하는데 도움이 되기 때문이다.

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.

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. 열처리를 하면 강 표면의 자유에너지가 낮아져 안정된 상태가 되기 때문에 부식반응이 상대적으로 늦게 일어난다고 알려져 있다 [17]. 표면에 형성된 부식물을 제거한 후에 현미경을 통하여 표면을 관찰한 결과에 의하면 SM490A는 부식이 전체적으로 고르게 진행된 흔적이 있는 반면에 SS400은 균대균대 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.

Table 1. Thickness variation, SM490A (unit: mm)

SM 490 A	부위1	부위2	부위3	부위4	부위5	평균	
부식 전 시편	10	10	10	10.1	10.2	9.995	
	9.9	9.9	9.9	9.95	10		
3개월	비열처리①	9.9	9.8	9.9	9.9	9.86	
	비열처리②	9.9	9.8	9.75	9.75		9.8
	비열처리③	9.8	9.9	9.9	9.95		9.95
	열처리①	9.8	9.95	9.8	9.9		9.9
6개월	비열처리①	9.9	9.85	9.9	9.85	9.85	9.79
	비열처리②	9.8	9.8	9.85	9.75	9.75	
	비열처리③	9.8	9.8	9.7	9.65	9.8	
	열처리①	9.9	9.85	9.8	9.8	9.8	
18	비열처리					9.7	
24	열처리					9.7	

Table 2. Thickness variation, SS400 (unit: mm)

SS 400		부위1	부위2	부위3	부위4	부위5	평균
부식 전 시편		9.6	9.7	9.7	9.6	9.7	9.645
		9.65	9.6	9.6	9.65	9.65	
3 개 월	비열처리①	9.6	9.55	9.5	9.5	9.6	9.61
	비열처리②	9.65	9.65	9.65	9.7	9.65	
	비열처리③	9.6	9.6	9.6	9.6	9.65	
	열처리①	9.6	9.65	9.6	9.6	9.6	
6 개 월	비열처리①	9.5	9.5	9.5	9.5	9.55	9.55
	비열처리②	9.55	9.6	9.5	9.5	9.6	
	비열처리③	9.6	9.65	9.55	9.55	9.6	
	열처리①	9.65	9.65	9.6	9.65	9.65	
18	비열처리						9.6
24	열처리						9.6

3.2 인장 시험

Fig. 11과 12는 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 시간 6개월까지는 항복강도와 인장강도가 낮아지다가 10, 16개월에서는 약간 증가하는 경향을 보인다. 이러한 현상에 대한 이유로는 소재가 대기부식에 약 10개월 정도 노출되면 부식에 의해 재료가 약간 경화되기 때문이라고 추론할 수 있다. 이를 확인하기 위해서는 인장시험과 함께 부식기간별로 시편의 경도 변화를 측정해 볼 필요가 있으나 본 연구에서는 이를 수행하지 못하였다. Table 3은 부식기간과 인장강도의 관계를 정리한 것이다.

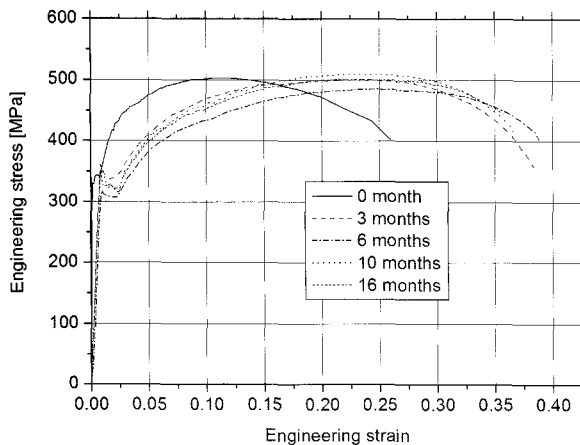


Fig. 11. Tensile curves of SS400

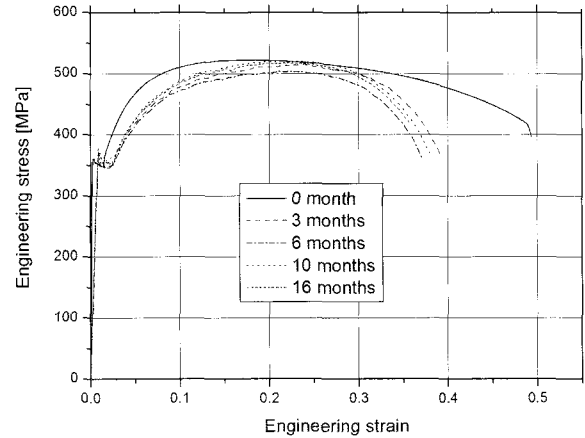


Fig. 12. Tensile curves of SM490A

Table 3. Tensile stresses vs. corrosion time

부식기간 (개월)		0	3	6	10	16
인장강도 (MPa)	SS400	503.1	501.7	486.2	510.1	502.3
	SM490A	522.5	515.4	504.1	520.8	518.6

3.3 피로 시험

앞에서 기술한 대기부식 시편을 채취하여 응력비 R=0.1, 주파수 15Hz에서 인장피로시험을 수행하였다. 피로시험의 응력진폭은 SM490A는 153MPa, SS400은 165MPa를 적용하였다. 일정하중에서 시편이 완전히 파단 될 때의 피로수명을 기준으로 하였다. Fig. 13은 SM490A의 대기부식 시편의 피로강도를 모재의 피로강도와 비교한 것이다. 6, 12, 18, 24개월 부식시편 모두 모재에 비하여 수명이 많이 줄어들었다. Fig. 14는 SS400에 대한 결과로서 모재에 비해 수명이 많이 짧아지지만 데이터의 산란 범위는 SM490A보다 작다. 3~24개월 대기부식시편의 피로강도는 모재에 비해 18~23MPa 정도 낮아지므로 구조물 설계 및 강도평가 시 부식에 의한 소재의 두께 변화뿐만 아니라 피로강도의 저하도 고려하여야 할 것으로 판단된다. 부식시편의 피로강도가 낮아지는 주된 원인은 부식으로 재료의 표면에 부식 피트가 발생되고 이 부위에 응력이 집중되기 때문이다. 동일한 대기부식 시간에 대한 3개 시편의 피로수명 데이터는 산란이 있으므로 평균하여 Table 4에 나타내었다. SS400의 경우 6개월과 12개월 대기부식 시편의 평균 피로수명은 거의 동일하고 나머지는 시간의 경과와 함께 감소함을 알 수 있다.

Fig. 15, 16은 각각 SM490A와 SS400에 대해 어닐링 열처리가 대기부식시편의 피로수명에 미치는 영향을 보여 준다. 열처리를 하지 않은 시편은 3개 시편에 대한 평균값이다. 열처리한 시편의 피로수명이 열처리 하지 않은 시편에 비해 많이 짧아짐을 알 수 있는데 이는 열처리를 하면 인장

강도가 낮아지고 피로에 대한 저항이 낮아지기 때문이다 [3]. 12개월 대기부식 시점에서 SS400의 경우 열처리를 한 시편의 수명이 하지 않은 시편에 비해 수명이 27% 짧고, SM490A의 경우 67% 짧다. 그러나 부식 기간별로 한 개씩 피로시험 한 결과이므로 피로시험 데이터의 산란을 고려한다면 향후 여러 개의 시편으로 피로시험을 하여 추가로 데이터를 확보할 필요가 있다고 판단된다.

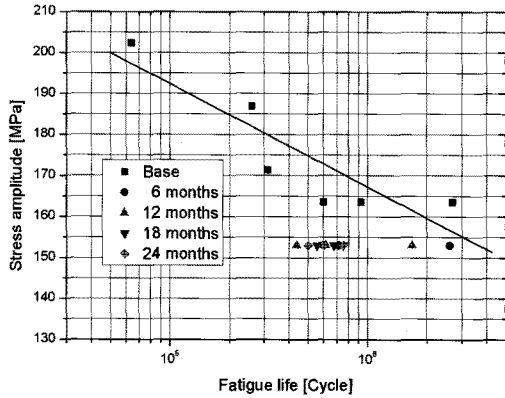


Fig. 13. Corrosion time vs. fatigue life of SM490A

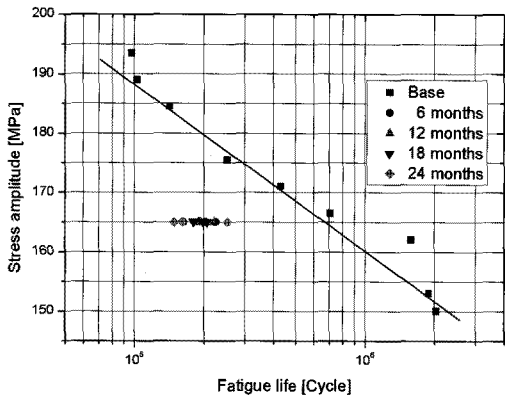


Fig. 14. Corrosion time vs. fatigue life of SS400

Table 4. Fatigue lives vs. corrosion time

부식기간 (개월)	0	6	12	18	24
피로수명 (사이클)					
SS400	2,119,833	197,437	202,001	195,317	187,873
SM490A	3,688,883	1,305,103	909,114	661,012	616,515

4. 결론

본 연구에서는 그동안 철도차량 구조물의 재질로 많이 사용되고 있는 SM490A와 SS400에 대해 장시간에 걸쳐 시행하고 있는 대기부식 시험과 일정 기간마다 수거한 시편에 대한 피로시험 결과를 기술하였다. 본 연구에서 얻은 주요한 결론은 다음과 같다.

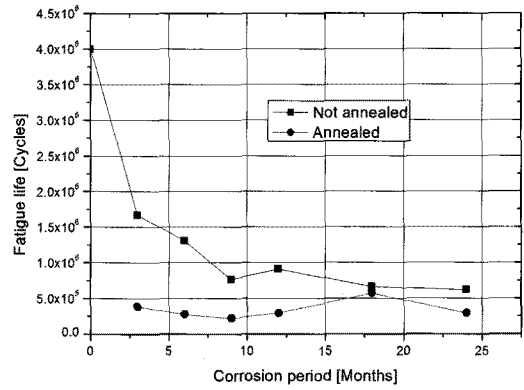


Fig. 15. The heat treatment effect to the fatigue life of SM490A

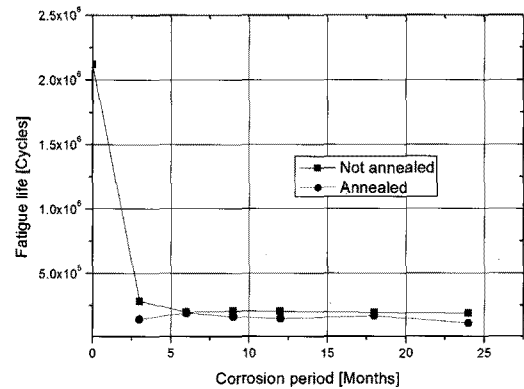


Fig. 16. The heat treatment effect to the fatigue life of SS400

1) 표면의 부식면적을 기준으로 할 때 SS400이 SM490A보다 상대적으로 부식이 작았다. 대기부식 12개월 시점에서 SS400의 경우 표면의 60%, SM490A의 경우 95%가 부식되었다.

2) 대기부식의 진행과 함께 항복강도, 인장강도 및 피로강도는 낮아지며 이에 대한 정량적인 자료를 확보하였다. 3~24개월 대기부식시편의 피로강도는 모재에 비해 18~23 MPa 정도 낮아지므로 구조물 설계 및 강도평가 시 부식에 의한 소재의 두께 변화뿐만 아니라 피로강도의 저하도 고려하여야 할 것으로 판단된다.

3) 어닐링 열처리를 한 부식 시편이 하지 않은 시편에 비해 상대적으로 피로강도가 더 낮았다. 12개월 대기부식 시점에서 SS400의 경우 열처리를 한 시편의 피로수명이 하지 않은 시편에 비해 27% 짧았고, SM490A의 경우 67% 짧았다.

4) 대기부식은 온도, 습도, 염분, 대기 가스의 구성 성분 등 여러 변수와 관계가 있어 많은 연구를 필요로 한다. 본 연구에서 다루지 못한 부식 피트의 경시변화와 피로강도에 미치는 영향, 소재의 경도변화 등은 향후 연구에서 수행될 것이다.

참고문헌

1. Oh, C. R, Goo, B. C.(2004), "A Study on the Corrosive behaviour of Rolling Stock Structures by Electric Experiments," Proceedings of the Korean Railway Society Fall Conference.
 2. Jang, S. K., Kim, Y. K., Oh, C. R., Goo, B. C.(2004), "Atmospheric Corrosion of Rolling Stock Structures," Proceedings of the Korean Railway Society Fall Conference.
 3. Goo, B. C. et al.(2004), "Development of Remaining Life Estimation Techniques for Rolling Stock Structures," (Ministry of Science and Technology, Report No.. M1-0203-00-0104, pp. 201-249.
 4. Goo, B. C. et al.(2004), "Development of Remaining Life Estimation Techniques for Rolling Stock Structures," KRRI Report No. 04-99, pp.155-191.
 5. Goo, B. C., Jang, S. K., Kim, Y. K.(2005), "A Study on the Atmospheric Corrosion and Fatigue of Rolling Stock Structures," Proceedings of the Korean Railway Society Spring Conference.
 6. Goo, B. C., Jang, S. K., Kim, Y. K.(2005), "A Study on the Corrosion and Fatigue of Structural Materials for Rolling Stock," Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 8, No. 4, pp.299-307.
 7. 김인태, 伊藤 義人(2007), "부식촉진실험을 이용한 강교용 무도장 강재의 부식내구성 평가," 한국강구조학회논문집 Vol. 15, No. 1, pp. 79-86.
 8. 조효남, 진홍민, 선종완, 윤만근(2008), "고속철도 강교량의 부식 피로신뢰성 기반 생애주기비용 분석," 한국철도학회논문집 Vol. 11, No. 1, pp.107-113.
 9. 김민건(2008), "무도장 교량에 사용되는 내후성 강재의 부식 및 피로거동에 미치는 산성안개의 영향," 대한기계학회논문집 A 권, Vol. 32, No. 1, pp.13-20.
 10. 김인태, 전상혁, 허정옥, 정진환(2009), "지하철 공사현장 환경하의 가시철 강재의 부식두께 감소량 추정," 한국강구조학회논문집 Vol. 21, No. 3, pp.301-310.
 11. Katayama, H., Noda, K., Masuda, H., Nagasawa, M., Itagaki, M., Watanabe, K.(2005), "Corrosion simulation of carbon steels in atmospheric environment," Corrosion Science, Vol. 47, No. 10, pp.2599-2606.
 12. Natesan, M., Venkatachari, G., Palaniswamy, N.(2006), "Kinetics of atmospheric corrosion of mild steel, zinc, galvanized iron and aluminium at 10 exposure stations in India," Corrosion Science, Vol. 48, No. 11, pp.3584-3608.
 13. Cai, J., Cottis, R. A., Lyon, S. B.(1999), "Phenomenological modelling of atmospheric corrosion using an artificial neural network," Corrosion Science, Vol. 41, No. 10, pp.2001-2030.
 14. Díaz, V., López, C.(2007), "Discovering key meteorological variables in atmospheric corrosion through an artificial neural network model Corrosion Science," Vol. 49, No. 3, pp.949-962.
 15. Hoerlé, S., Mazaudier, F., Dillmann, Ph., Santarini, G.(2004), "Advances in understanding atmospheric corrosion of iron. II. Mechanistic modelling of wet-dry cycles, Corrosion Science," Vol. 46, No. 6, pp.1431-1465.
 16. ASTM G 50-76(1997), "Standard practice for conducting atmospheric corrosion testing metals"
 17. Murray, G. M., Schweitzer, G. K., Heacker, F. K.(1988), "Corrosion system modelling using microcomputer programs for free-energy minimization," Corrosion Science, Vol. 28, No. 9, pp.923-932.
- 접수일(2009년 6월 24일), 수정일(2009년 7월 16일),
게재확정일(2009년 10월 1일)