

부식손상된 강재의 피로강도 평가에 관한 실험적 연구

박광명¹ · 정영수² · 김인태^{3*}

¹석사과정, 부산대학교, 사회환경시스템공학과, ²연구교수, 부산대학교, 지진방재연구센터, ³교수, 부산대학교, 사회환경시스템공학과

An Experimental Study on Fatigue Life Evaluation of Corroded Steel

Park, Kwang Myeong¹, Jeong, Young Soo², Kim, In Tae^{3*}

¹Graduate Student (Master Course), Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

²Reserach Professor, Seismic Research and Test Center, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

³Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

Abstract - This study aims to evaluate and predict the fatigue strength of steel members in bridge structures, focusing on the corrosion damages. To evaluate the fatigue strength of corroded steel, corroded members were cut from the temporary steel structures and steel bridge exposed in long-term atmospheric environment, and fatigue tests were conducted after measuring the surface profile and calculated stress concentration factor through fast Fourier transform. Based on corrosion levels classified from the corrosion thickness ratio, analyzed the relationship between minimum cross section area and fatigue crack point, fatigue strength of the corroded steel were evaluated.

Keywords - Steel bridge, Fatigue test, Surface geometry, Corrosion level, Effective thickness, Fatigue life

1. 서론

현재 국내에서 공용중인 강도로교는 약 5,700여 개 소이며^[1], 2024년에는 전체 강교량 중 공용년수 30년 이상의 강교량은 약 554개소로 향후 노후 강교량의 비율이 증가할 것으로 예상된다. 또한 최근 해외에서는 인프라 시설물의 노후화 및 유지관리 미흡에 따른 강교량의 붕괴사례가 보고되고 있다^[2]. 따라서 강교량의 성능을 보완 및 보전하기 위해서는 노후 강부재의 안전 성능 및 내구성능 평가법의 개발이 필요하다.

강구조물의 경우 대기 중의 수분과 산소 등 부식환경에 노출되어 부식손상이 발생한다. 강구조물의 부식 예방을 위해 도장, 희생양극 등의 방식법이 적용되고 있으나, 도장 등의 방식피복이 적용된 강재의 경우에도

부식환경에 장기간 노출되면서 방식피복의 열화 및 강재의 부식손상이 발생하고 있다. 그리고 강재는 부식손상으로 인하여 단면이 감소하고 표면요철에 의한 응력집중이 발생하여, 반복하중이 작용할 경우 피로균열이 발생할 우려가 크다^[3]. 가시설 구조물의 경우에는 도장이나 방식피복 처리가 실시되지 않아 부식환경에 직접 노출되어 부식손상으로 인한 응력집중 및 내하력 저하가 발생한다^[4]. 또한 대형차량의 통행량이 증가함에 따라 부식손상 및 피로균열이 발생하는 사례가 증가하고 있다. 따라서 강교량의 효율적인 유지관리 및 장수명화를 위하여 부식손상된 강재의 피로강도 평가에 대한 검토가 필요하다.

국내외에서 부식열화 및 유효두께를 이용하여 부식손상된 강부재의 정적 내하력을 평가하는 다양한 방법이 검토되었으며 다양한 평가법이 제안^{[3],[5]-[7]}되는 한편 부식손상부의 피로균열의 발생 메커니즘^{[8]-[12]} 등에 관한 연구가 진행되고 있다. 그러나 부식손상 정도에 따른 피로강도 저하 및 피로설계등급 평가 등의 정량적인 피로강도 평가법에 대한 검토는 부족한 실정이다.

본 연구는 부식손상된 강재의 피로수명 평가를 위하여 실제 대기환경하에서 부식손상된 강재를 절취하여

Note.-Discussion open until April 30, 2024. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 05, 2023; revised on July 30, 2023; approved on August 03, 2023.

Copyright © 2023 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-2497 Fax. +82-51-513-9596

E-mail. itkim@pusan.ac.kr

1 mm 간격으로 표면형상을 측정하였다. 그리고 부식 두께비에 근거하여 부식손상 정도를 3단계로 분류하고 고속푸리에변환(fast Fourier transform, FFT) 분석을 통하여 1 mm 간격으로 부식표면의 응력집중계수를 계산하였다. 그 결과, 부식손상 정도에 따라서 피로강도 등급을 평가하는 부식손상된 강재의 피로강도 평가법을 제안하였다.

2. 실험방법

2.1 시편제작

본 실험에서는 약 7년간 사용된 지하철 가시철 구조물 주형보의 웨브(W 시편)와 플랜지(F 시편)에서 절취한 강재와 약 75년간 해상에서 공용된 강교량(영도대교)에서 절취한 강부재(Y 시편)를 인장시편 규격(KS B 0801 1A호)에 준하여 Fig. 1과 같이 피로시편을 제작하

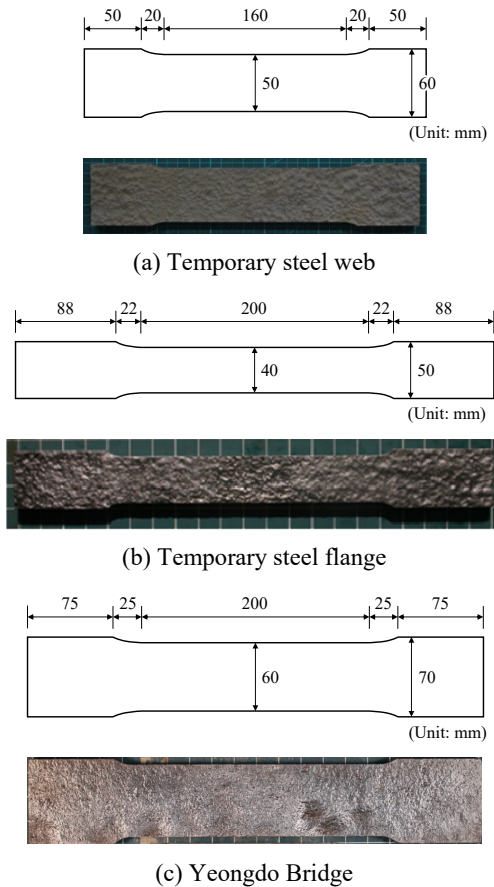


Fig. 1. Fabrication of fatigue test specimens

였다. 그리고 KS D ISO 8407에 준하여 염산 수용액에 시편을 24시간 침수시킨 후, 표면의 잔존 부식생성물을 증류수와 강재 브리시를 사용하여 완전히 제거하였다. 또한 무부식 강재의 피로강도 평가를 위하여 가시철 플랜지와 동일한 크기로 두께 10 mm의 무부식 강재(N 시편) 3개도 제작하였다.

2.2 표면형상 측정 및 잔존두께 계산

본 연구에서 사용된 시편의 부식생성물을 제거하고 Fig. 2와 같이 3차원 표면형상측정기를 사용하여 시편 표면의 앞면 및 뒷면의 형상을 축방향 1 mm, 폭방향 1 mm 간격으로 측정하였다. 그리고 앞면과 뒷면 형상을 결합하여 부식된 강재의 잔존두께를 계산하였다. 그 결과를 이용하여 다음의 최소두께, 평균두께, 유효두께^[4]와 최소평균두께를 계산하였다.

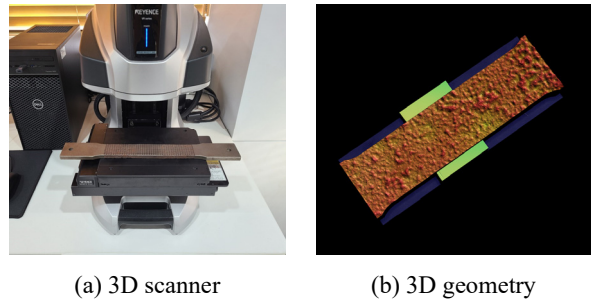


Fig. 2. 3D measurement of specimen geometry

- 최소두께(t_{min}): 모든 측정 잔존두께의 최솟값
- 최대두께(t_{max}): 모든 측정 잔존두께의 최댓값
- 평균두께(t_{avg}): 모든 측정 잔존두께의 평균값
- 유효두께(t_{eff}): 모든 측정 잔존두께의 평균값에서 표준편차를 뺀 값 ($t_{avg} - S$)
- 최소평균두께($t_{avg,m}$): 폭 방향 평균두께의 최솟값
- 부식두께비(μ): 최소두께와 최대두께의 비 (t_{min}/t_{max})

2.3 부식두께비에 따른 부식등급산정

부식두께비(μ)는 강재의 부식손상 정도를 나타내는 지표 중 하나로, 부식두께비가 작을수록 부식손상 정도가 심함을 의미한다. 강재의 부식등급은 Table 1과 같이 부식두께비(μ)로 분류하였다. 각 시편의 부식등급은 잔존두께의 최솟값/최댓값 비(μ)의 값이 0.75 이상인

Table 1. Results of 3D measurement and fatigue test

Specimen no.	Residual thickness (mm)				μ (rank)	Standard deviation	Stress range (MPa)	SCF	Top (%)	Fatigue life (cycles)	Comment
	t_{min}	t_{avg}	t_{eff}	$t_{avg,m}$							
W1	6.63	8.67	8.01	7.94	0.60(II)	0.66	200	1.79	0.11	97,000	-
W2	7.42	9.58	8.98	9.03	0.65(II)	0.60	200	1.74	1.13	267,000	-
W3	7.74	9.66	9.12	8.97	0.65(II)	0.54	200	1.67	0.36	154,000	-
W4	7.36	9.81	9.19	9.43	0.62(II)	0.62	200	1.54	2.98	279,000	-
W5	7.35	9.37	8.78	8.63	0.65(II)	0.59	150	2.11	1.47	300,000	-
W6	7.47	9.36	8.81	8.77	0.67(II)	0.55	150	1.60	3.17	656,000	-
W7	7.04	9.37	8.75	8.73	0.61(II)	0.63	150	1.55	1.47	592,000	-
W8	6.82	9.04	8.42	8.36	0.62(II)	0.62	125	1.76	0.03	1,346,000	-
W9	6.89	9.16	8.59	8.50	0.61(II)	0.57	125	1.57	1.11	2,222,000	-
W10	6.63	9.15	8.44	8.24	0.59(II)	0.71	125	1.75	0.03	966,000	-
W11	7.36	9.81	9.19	9.43	0.62(II)	0.62	100	-	-	3,000,000	No failure
W12	6.87	8.82	8.23	8.18	0.65(II)	0.59	100	-	-	3,000,000	No failure
W13	7.74	9.66	9.12	8.97	0.65(II)	0.54	100	-	-	3,000,000	No failure
F1	9.07	10.49	10.13	10.10	0.79(III)	0.36	200	1.35	0.21	242,000	-
F2	9.61	10.59	10.28	10.25	0.83(III)	0.31	200	1.28	0.56	286,000	-
F3	9.40	10.77	10.47	10.50	0.80(III)	0.30	200	1.18	1.24	735,000	-
F4	9.78	10.83	10.50	10.50	0.82(III)	0.33	200	1.37	0.01	566,000	-
F5	8.89	10.31	10.06	10.03	0.80(III)	0.26	150	1.28	2.51	1,974,000	-
F6	9.46	10.73	10.45	10.38	0.83(III)	0.28	150	-	-	3,000,000	No failure
F7	9.42	10.48	10.12	10.48	0.83(III)	0.36	150	-	-	3,000,000	No failure
F8	9.74	10.77	10.51	10.49	0.85(III)	0.26	115	-	-	3,000,000	No failure
F9	9.54	10.66	10.29	10.66	0.82(III)	0.37	100	-	-	3,000,000	No failure
Y1	11.48	12.33	12.14	12.12	0.90(III)	0.18	190	-	-	3,000,000	No failure
Y2	7.94	11.47	10.73	11.12	0.64(II)	0.74	132	1.65	0.01	600,000	-
Y3	8.67	11.49	11.05	10.29	0.69(II)	0.44	177	-	-	3,000,000	No failure
Y4	6.89	11.27	10.04	8.64	0.55(II)	1.23	173	-	-	3,000,000	No failure
Y5	9.15	11.31	10.88	10.91	0.75(II)	0.43	174	-	-	3,000,000	No failure
Y6	8.70	11.71	11.07	11.20	0.69(II)	0.64	180	-	-	402,000	Data error
Y7	4.72	12.12	10.71	10.74	0.36(I)	1.41	186	1.98	0.01	303,000	-
Y8	10.12	11.31	10.92	11.13	0.83(III)	0.39	218	1.40	0.17	196,000	-
Y9	9.97	11.38	11.02	10.98	0.81(III)	0.36	219	1.35	0.01	297,000	-
N1	9.79	9.81	9.80	9.80	0.99(III)	0.02	200	-	-	3,000,000	No failure
N2	9.77	9.80	9.78	9.78	0.99(III)	0.03	250	-	-	3,000,000	No failure
N3	9.81	9.79	9.79	9.79	0.99(III)	0.01	275	-	-	3,000,000	No failure

경우 Level III(부식손상 정도 낮음), 0.75 미만 0.5 이상인 경우 Level II(부식손상 정도 보통), 0.5 미만일 경우 Level I(부식손상 정도 높음)으로 정의하였다^[3]. 가시설 구조물의 웨브(W 시편)는 부식량이 상대적으로 높고 표면의 요철이 거칠기 때문에 Level II로 분류되

었으며, 가시설 구조물의 플랜지(F 시편)는 부식량이 상대적으로 미미하고 표면 요철이 완만하여 Level III로 분류되었다. 영도대교(Y 시편)의 경우, 부식형상 및 요철이 다양하게 발생하여 부식등급 역시 Level I, II, III로 나타났다.

2.4 사용강재의 기계적 특성

피로실험의 응력범위를 결정하기 위하여 인장실험을 실시하였다. 인장시편은 피로시편과 동일하게 제작하였으며, 기계가공에 의해 부식된 표면을 평평하게 절삭하여 최소두께 이하가 되도록 하였다.

본 실험에서 사용된 인장시편으로는 부식된 가시설시편(W, F 시편)과 영도대교 시편(Y 시편)을 각각 3개씩, 총 9개를 제작하여 변위제어로 인장실험을 실시하였다. 인장실험 결과, 각 시편의 평균 항복응력과 평균 극한응력을 Table 2에 나타냈다.

Table 2. Mechanical properties of test material

Type	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)
Specimen W	311	458
Specimen F	307	450
Specimen Y	280	430

2.5 피로실험 조건

본 피로실험에서는 Fig. 3와 같이 250 kN의 동적 피로시험기를 사용하여, 일정 진폭하중으로 응력범위는 100 MPa, 125 MPa, 150 MPa, 200 MPa를 적용하였으며, 반복하중 속도는 피로시험기의 진동이 최소가 되는 6 Hz-10 Hz로 설정하였다. 단, 반복하중의 최솟값은 10 kN으로 하였으며, 최대 반복 횟수는 피로설계등급의 피로한도를 고려하여 300만 회로 설정하였다.



Fig. 3. Fatigue test setup

3. 피로균열의 거동

3.1 파단위치

잔존두께 측정 결과, 부식손상 등급 및 피로실험결과를 Table 1에 나타냈다. 부식손상된 강재는 정적 인장하중을 재하했을 때 최소평균두께를 가지는 단면(이하 최소단면이라 칭함)에서 발생하였다^[4]. 이에 반복하중에 의한 피로파단도 최소단면에서 발생하는지 여부를 검토하기 위하여, 시편의 폭 방향으로 두께의 평균값을 산출하여 최소단면의 위치(최소평균두께)와 피로파단의 위치를 비교하였다.

부식손상 정도(이하 부식등급이라 칭함)에 따른 파단 후의 시편 외관과 최소단면의 위치, 피로파단이 발생한 위치의 대표적인 예를 Fig. 4에 나타냈다. 부식손상 정

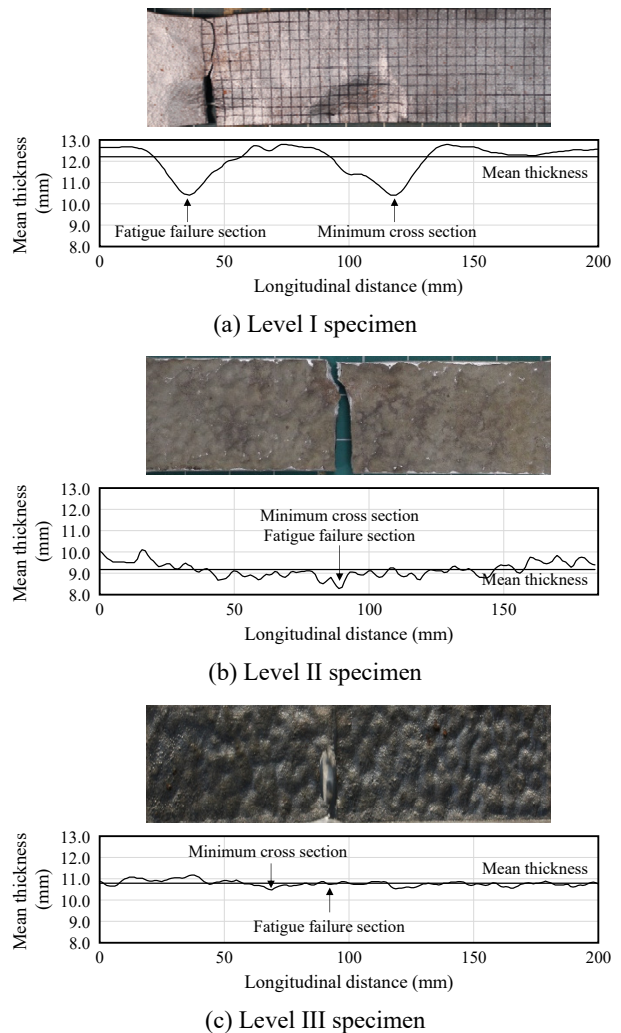


Fig. 4. Fatigue failure locations

도가 심한(Level I) 시편의 경우, 피로파단면과 최소단면의 위치는 일치하지 않았다. 그리고 부식손상 정도가 중간(Level II)인 시편의 경우, 18개의 시편 중 2개의 시편만 피로파단면과 최소단면이 일치하였다. 한편 부식손상 정도가 낮은(Level III) 시편의 경우, 12개의 시편 중 1개의 시편만 피로파단면과 최소단면의 위치가 일치하였다. 따라서 부식손상된 강재의 피로파괴는 정적 인장실험과 달리 최소단면에서 발생하는 것은 아님을 확인하였다.

3.2 피로균열 발생 및 진전

피로균열의 발생 위치는 크게 모서리, 모서리와 근접한 곳과 모서리에서 멀리 떨어진 곳 3가지로 분류할 수 있다^[13]. 시편의 파단형태와 파단면을 파단의 진행형태에 따라서 구분하였을 때, Fig. 5(a)에 나타난 것과 같이 균열발생 위치가 시편의 모서리 부분에서 떨어져 있을 경우 반(半)타원 형태로 피로균열이 진전하는 것을 확인할 수 있었다.

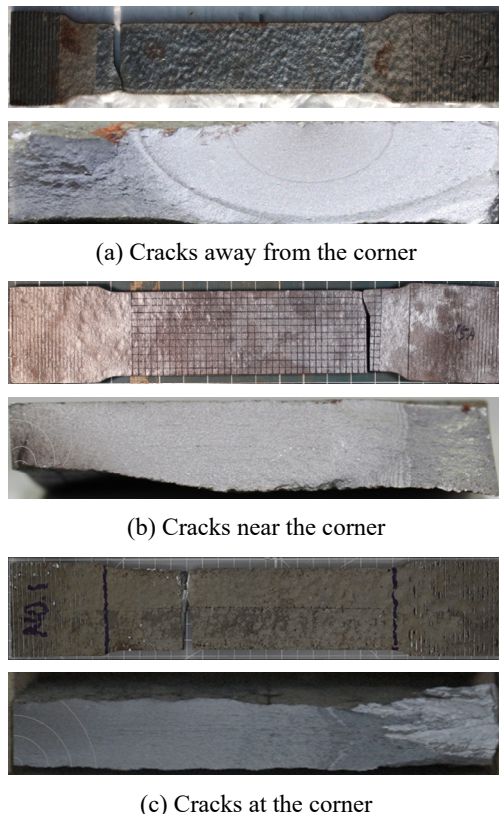


Fig. 5. Corrosion surface and fracture surface after fatigue test

Fig. 5(b)와 같이 균열발생 위치가 시편의 모서리 부분 근처인 경우 초기균열은 반타원 형태로 진전하다가 1/4원형 형태로 진전하였으며, 최종적으로 관통형 균열로 진전하는 것을 확인할 수 있었다. 한편 Fig. 5(c)는 시편의 모서리에서 균열이 발생한 경우로, 초기에는 1/4원형 형태로 진전하다가 관통형 균열로 진전하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 피로수명 평가

4.1 부식두께비와 응력집중계수와와의 관계

부식된 표면의 응력상태를 평가하기 위해 FFT분석 기법^[17]을 이용하여 축방향 1 mm, 폭방향 1 mm 간격으로 모든 표면형상 측정에서의 응력집중계수를 계산하였다. 응력범위, 피로수명 및 피로균열이 발생한 지점의 응력집중계수를 Table 1에 나타냈다. 그리고 부식표면형상 측정으로 계산된 부식두께비와 피로파단으로 이어진 피로균열 발생 위치에서의 응력집중계수(SCF)를 Fig. 6에 나타냈다. Fig. 6에 나타난 것과 같이, 부식두께비와 응력집중계수 간에는 반비례의 선형관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 부식손상 정도가 심할수록 응력집중계수가 증가하는 경향이 있음을 확인할 수 있다.

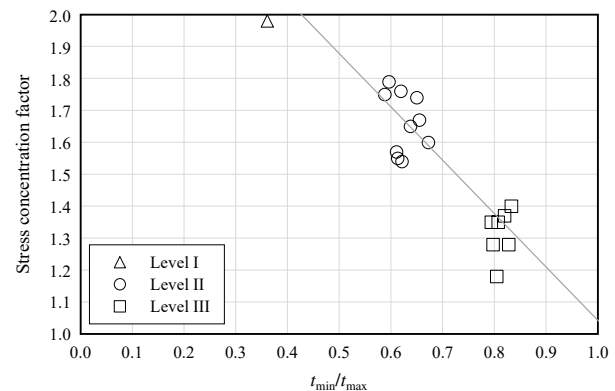


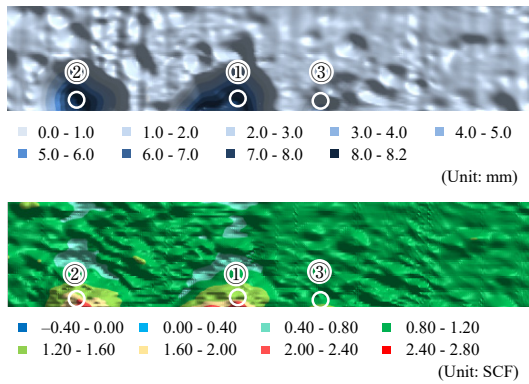
Fig. 6. Relationship between SCF and corrosion thickness ratio

Fig. 7(a)–Fig. 7(c)는 부식등급 I부터 III에 따라 분류한 것으로 부식된 시편의 표면형상과 응력분포를 나타냈다. 그리고 각 시편에서 응력집중계수가 가장 큰 위치(①), 두 번째 큰 위치(②), 세 번째 큰 위치(③)도 표시하였다. 이들 상위 3개소의 응력집중계수는 부식손상 정

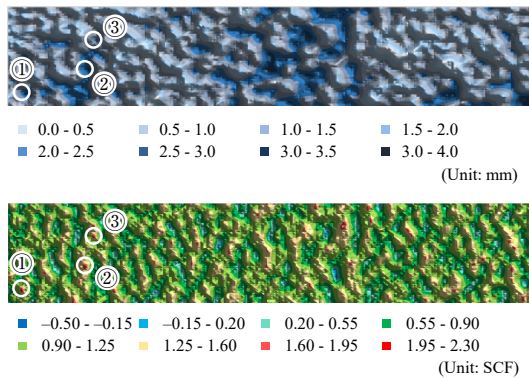
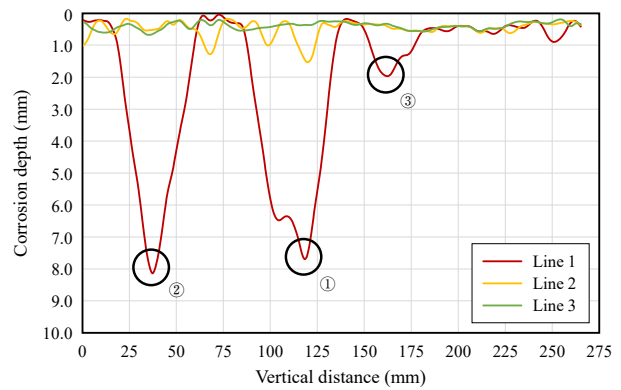
도가 미미할수록 작아지는 경향이 있음을 알 수 있다. 그리고 동일 시편 내에서 응력집중이 상대적으로 큰 상위 3개소를 대상으로 축방향의 형상을 Fig. 7에 나타냈다. Fig. 7(a)에 나타낸 것과 같이 최대 부식감소량이 발생한 위치는 ②의 위치이지만, 최대 응력집중계수는 ①의 위치에서 발생하였다. 다른 경우에도 이와 유사하게, 부식감소량이 큰 곳에서 응력집중계수도 크게 발생하지만, 부식감소량의 최대 위치와 응력집중계수의

최대 위치는 다르게 나타난 경우가 대부분이었다. 따라서 부식감소량이 최대인 곳에서 응력집중계수가 최대가 되는 것은 아님을 확인하였다.

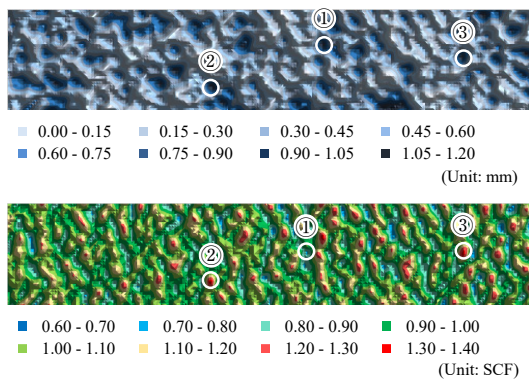
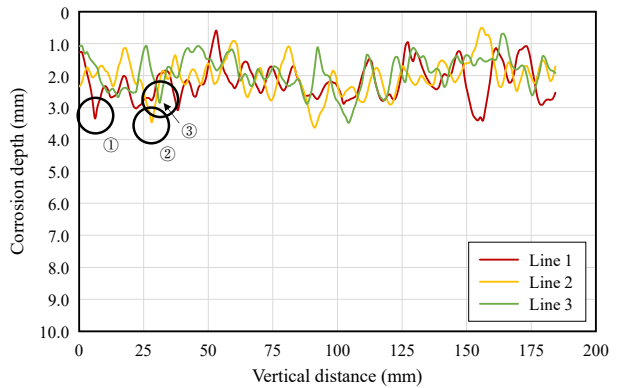
Table 1에 피로균열이 발생한 지점에서의 응력집중계수가 시편 전체의 응력집중계수 중에서 위치하는 상위 백분율을 나타냈다. 시편에 따라 다소 차이는 있지만, 피로균열은 응력집중계수의 상위 약 3 % 이내인 지점에서 발생함을 알 수 있다.



(a) Level I specimen



(b) Level II specimen



(c) Level III specimen

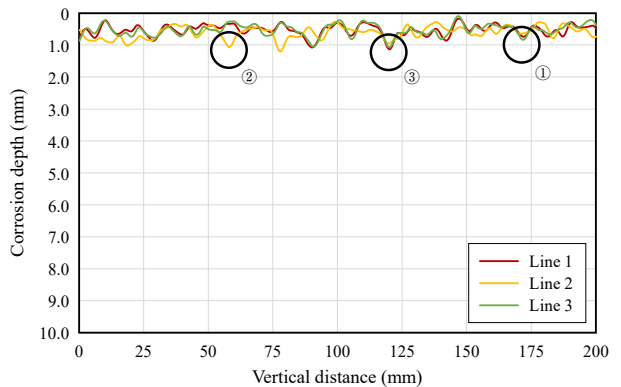


Fig. 7. Stress distribution and stress concentration factor

4.2 부식손상에 의한 피로등급 감소

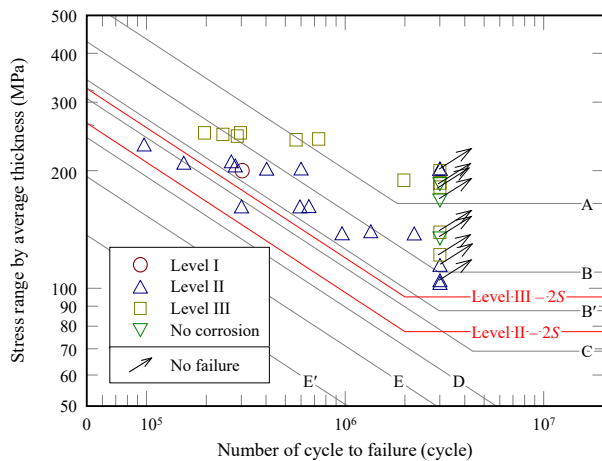
강재 및 용접이음의 피로설계에는 피로설계등급이 널리 사용되고 있지만, 부식된 강재의 피로설계등급은 제시되어 있지 않다. 따라서 공용 중인 부식손상된 강부재의 피로저항성 및 피로내구성을 평가하기 위해서는 부식손상된 강재의 피로등급 및 피로등급의 감소 정도에 대한 검토가 필요하다.

무부식 강재 또는 용접이음의 피로강도를 평가할 때의 응력범위는 작용하중과 모재의 단면적을 이용하여 간단하게 계산할 수 있다. 그러나 부식손상이 발생한 경우에는 두께가 일정하지 않고 불규칙하게 변화하므로 응력범위 계산을 위한 두께 및 단면적 산정이 곤란하다. 이에 본 연구에서는 부식표면형상 측정으로부터 산출할 수 있는 평균두께·최소두께·최소평균두께·유효두

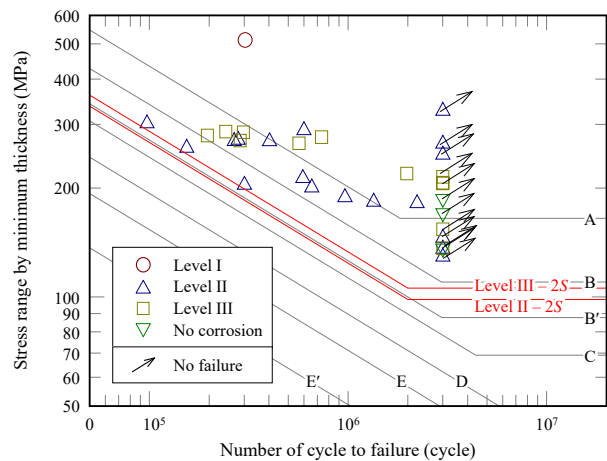
께로 계산한 응력범위를 이용하는 피로강도 평가법에 대해 검토한다.

피로수명을 평균두께, 최소두께, 최소평균두께 및 유효두께로 계산된 응력범위로 Fig. 8에 나타냈다. 그리고 도로교설계기준^[15]의 피로설계등급과 최소자승법으로 계산한 피로파괴된 데이터(Level II, Level III)의 평균회귀곡선 - 2S(S: 표준편차)의 곡선도 나타냈다. 또한 부식손상 정도에 따라 피로설계등급을 Table 3에 정리하였다.

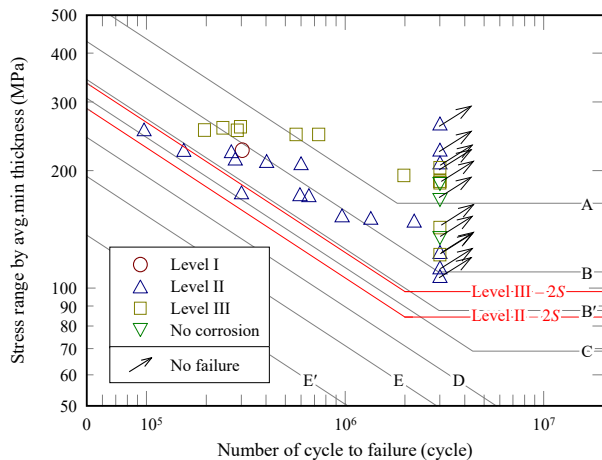
Fig. 8에 나타난 것과 같이 무부식 시편 3개는 응력범위 200 MPa, 250 MPa, 275 MPa에서 3백만 회까지 피로균열이 확인되지 않았다. 따라서 무부식 시편의 피로한도는 275 MPa 이상으로, 피로설계 A등급을 만족함을 알 수 있다. 그리고 부식등급 Level III는 피로설계등급 B'와 C, 부식등급 Level II는 피로설계등급 C



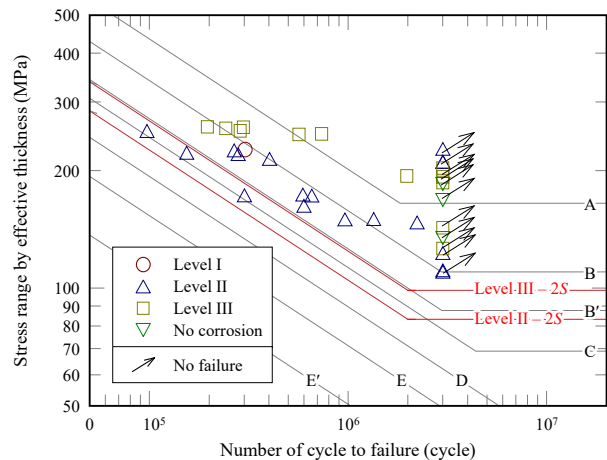
(a) Stress range by average thickness



(b) Stress range by minimum thickness



(c) Stress range by avg.min thickness



(d) Stress range by effective thickness

Fig. 8. Stress range by different types of thickness

Table 3. Fatigue design class according to the degree of corrosion damage

Type	No corrosion	Level III	Level II	Level I	Mean - 2S
Average thickness	A	C	D	B'	D
Minimum thickness	A	B'	C	A	C
Avg.min thickness	A	C	D	B'	D
Effective thickness	A	C	D	B'	D

와 D를 만족함을 알 수 있다.

한편 부식등급 Level I은 피로설계등급 B'와 A를 만족함을 알 수 있다. 따라서 Fig. 8에 나타난 것과 같이 국부부식이 발생한 부식등급 Level I 시편 1개를 제외하고 평가하면, 무부식 강재의 부식손상 정도가 심해질 때 피로설계등급은 최대 4등급까지 감소함을 알 수 있다.

피로시험 데이터의 평균 - 2S 회귀곡선과 피로설계곡선을 비교하면 최소두께의 경우 모든 피로시험 데이터는 피로설계등급 C를 만족함을 알 수 있다. 그리고 평균두께, 최소평균두께 및 유효두께의 경우에는 모두 피로설계등급 D를 만족함을 알 수 있다.

4.3 부식손상된 강재의 피로강도 평가법

부식손상된 강재는 무부식 강재와 달리 두께 및 단면적이 일정하지 않아 피로강도 평가를 위한 응력범위 계산이 곤란하다. 본 연구에서는 평균두께, 최소두께, 최소평균두께, 유효두께를 이용하여 피로강도를 평가하였다. 이들 두께는 부식손상된 부재의 두께 측정 또는 표면형상 측정으로부터 계산할 수 있지만, 측정 위치 또는 측정 수에 따라 달라질 수 있다. Kim *et al.*^{[4],[7]}은 부식손상된 강재 표면을 1 mm × 1 mm 간격으로 측정된 경우와 20 mm × 20 mm 간격으로 측정된 경우의 평균두께와 유효두께의 오차는 ±5 % 이내임을 확인하였다. 따라서 부식손상된 강재의 피로등급은 측정간격을 20 mm × 20 mm로 하여 산출한 평균두께 또는 유효두께의 응력범위로 Table 3와 같이 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

평균두께로 계산한 응력범위를 이용하여 피로한도를 검토하면, Fig. 8(a)에 나타난 것과 같이 부식손상 Level II의 피로한도는 약 150 MPa이며 Level III의 피로한도는 약 190 MPa이다. 그리고 실제 강교량에서 차량이

통행할 때 주요 부재에서 측정되는 응력범위는 주로 100 MPa 이하로 분포한다는 점을 고려하면, 부식손상 Level II 정도에 의한 강재의 피로손상은 발생하지 않을 것으로 추정된다.

5. 결론

본 연구에서는 7년간 사용된 지하철 가시철 강재와 75년간 사용된 영도대교 강재에서 절취한 부식손상된 강재의 표면형상 측정, 응력집중계수 산정 및 피로실험을 실시하였다. 그 결과를 정리하면 아래와 같다.

- (1) 부식손상된 강재의 피로 파괴는 정적 인장실험과 달리 최소단면에서 발생하는 것이 아님을 확인하였다.
- (2) 부식손상정도가 Level III, Level II, Level I으로 증가함에 따라 응력집중계수는 선형적으로 증가하는 경향이 있음을 확인하였다. 그리고 부식감소량이 최대인 지점에서 응력집중계수가 최대가 되는 것은 아님을 확인하였다.
- (3) 부식손상된 강재의 피로균열은 응력집중계수의 상위 약 3 % 이내인 지점에서 발생함을 알 수 있다. 또한 부식손상 정도가 심해지면 피로설계등급은 최대 4등급까지 감소함을 알 수 있다.
- (4) 최소두께, 평균두께, 최소평균두께 및 유효두께를 이용한 부식손상된 강재의 피로설계등급을 평가하여 제시하였다.

본 연구에서는 부식시편 시편 31개의 피로실험결과에 근거하여 부식손상된 강재의 피로강도를 평가하였으며, 향후 피로실험 데이터의 축적 등의 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌(References)

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022) *Yearbook of Road Bridge and Tunnel Statistics*, Korea (in Korean).
- [2] Korea Facilities Safety Corporation (2019) *Study on the Maintenance and Reinforcement Method (Draft) of Facilities Including Bridges and Tunnels*, Korea (in Korean).
- [3] Mun, J.M., Jeong, Y.S., Jeon, J.H., Ahn, J.H., and Kim, I.T. (2017) Experimentally Evaluating Fatigue Behavior of Corroded Steels Exposed in Atmospheric Environments, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.3, pp.193-204 (in Korean).
- [4] Kim, I.T., Chang, H.J., and Cheung, J.Y. (2010) An Experimental Study on the Evaluation of Residual Tensile Load-Carrying Capacity of Corroded Steel Plates of Temporary Structure, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.5, pp.399-409 (in Korean).
- [5] Lee, M.J., Ahn, J.H., and Kim, I.T. (2014) Shear Buckling Strength and Behaviors of Steel Plate Girder with Asymmetrical Shear Resistant Web Panel by Local Corrosion, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.2, pp.105-118 (in Korean).
- [6] Appuhamy, J.M.R.S., Kaita, T., Ohga, M., and Fujii, K. (2011) Prediction of Residual Strength of Corroded Tensile Steel Plates, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.11, No.1, pp.65-79.
- [7] Kim, I.-T., Dao, D.K., Jeong, Y.-S., Huh, J., and Ahn, J.-H. (2017) Effect of Corrosion on the Tension Behavior of Painted Structural Steel Members, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 133, pp.256-268.
- [8] Bhuiyan, S., Mutoh, Y., Murai, T., and Iwakami, S. (2008) Corrosion Fatigue Behavior of Extruded Magnesium Alloy AZ61 Under Three Different Corrosive Environments, *International Journal of Fatigue*, Elsevier, Vol.30, pp.1756-1765.
- [9] Perkins, K.M., and Bache, M.R. (2005) Corrosion Fatigue of a 12%Cr Low Pressure Turbine Blade Steel in Simulated Service Environments, *International Journal of Fatigue*, Elsevier, Vol.27, pp. 1499-1508.
- [10] Xu, S.-H., and Wang, Y.-D. (2015) Estimating the Effects of Corrosion Pits on the Fatigue Life of Steel Plate Based on the 3D Profile, *International Journal of Fatigue*, Elsevier, Vol.72, pp.27-41.
- [11] Rusk, D.T., Hoppe, W., Braisted, W., and Powar, N. (2009) Fatigue Life Prediction of Corrosion-Damaged High-Strength Steel Using an Equivalent Stress Riser (ESR) Model, Part II: Model Development and Results, *International Journal of Fatigue*, Elsevier, Vol. 31, No.10, pp.1464-1475.
- [12] Masaki, K., Ochi, Y., and Matsumura, T. (2006) Small Crack Property of Austenitic Stainless Steel with Artificial Corrosion Pit in Long Life Regime of Fatigue, *International Journal of Fatigue*, Elsevier, Vol.28, No.11, pp.1603-1610.
- [13] Kainuma, S., Hosomi, N., and Kim, I.T. (2007) Fatigue Behavior of Corroded Structural Steel Members in Boundary with Concrete, *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications, Vol.348-349, pp. 245-248.
- [14] Kim, H.-S., Toledo, K.K., Jeong, Y.-S., and Kim, I.T. (2020) A Simple Approach for Evaluating the Stress Concentration Factor of a Corroded Surface Using the Fast Fourier Transform, *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, Vol.115, 104612.
- [15] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010) *Highway Bridge Design Standard (Limit State Design)*, Korea (in Korean).

요약: 본 연구에서는 부식손상된 강부재의 피로강도 평가법에 대해 실험적으로 검토하였다. 실제 대기환경에서 7년간 노출되어 부식손상된 가시설 주형보와 75년간 해상환경에서 공용된 강교량에서 절취한 시편을 각각 22개와 9개 제작하여 부식표면형상을 측정하고 고속푸리에변환 분석을 통해 응력집중계수를 계산하여 피로실험을 실시하였다. 그 결과, 부식표면형상 측정으로 산출한 부식두께비로 부식등급을 분류하고, 최소단면과 피로파단의 그 관계에 대해 분석하였으며, 부식등급에 따른 피로균열 진전거동 및 응력집중계수를 검토하였다. 그리고 평균두께, 최소두께, 최소평균두께 및 유효두께에 근거하여 피로등급을 평가하고, 최종적으로 부식손상된 강재의 피로강도 평가법을 제안하였다.

핵심용어: 강교량, 피로실험, 표면형상, 부식등급, 유효두께, 피로수명