

선체구조 판부재에서 해수부식현상에 기인하는 부식층의 피로강도분담효과에 관한 연구

김원범^{1*}

¹울산과학기술대학교 디지털기계학부 조선해양전공

Evaluation of Fatigue Strength Share Effect of the Rust Due to Corrosion at Ship Structural Plate

Won Beom Kim^{1*}

¹Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,
School of Digital Mechanics, Ulsan College

요 약 해양환경에서 사용되는 선박이나 해양구조물은 해수환경에서 쉽게 부식이 발생한다. 본 연구에서는 구조용 강재에서 부식생성물의 존재가 피로강도에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 이를 위하여 부식생성물을 제거한 시험편과 부식생성물이 부착된 시험편의 피로강도를 비교하고 부식생성물의 강도분담에 대하여 고찰하였다. 본 연구에서 부식생성물은 피로강도분담효과가 있으며, 부식생성물을 제거한 시험편의 피로강도는 부식생성물이 부착되어 있는 시험편보다 피로강도감소계수가 18.1% 감소하였다. 이상의 연구에서 부식생성물 내에서 강도상 유해물질이 없는 한 부식생성물은 피로강도에 유익함을 알 수 있었다.

Abstract Ship and offshore structures, those are to be used under the seawater conditions are prone to corrosion. In this research, the effect of rust existence on the fatigue strength at structural member of ship and offshore structure was investigated. For this purpose, fatigue tests for the rust removed specimen were conducted. In addition, the comparison of fatigue strength between rust removed specimen and rusted specimen was conducted. With these test results, fatigue strength share effect was investigated. Finally, at this research, it was found that there is fatigue strength share effect on the rust. In comparison of fatigue strength reduction factor, fatigue strength of the rust removed specimen is 18.1% lower than that of the rusted specimen. From the above, it was known that as far as there are not any harmful ingredients in it, rust on the steel plate is beneficial in an aspect of fatigue strength.

Key Words : Fatigue Strength, Fatigue Strength Reduction Factor, Corrosion, Rust

1. 서론

가혹한 해양환경에서 운용되는 선박 및 해양구조물에서는 끊임없이 반복되는 파랑에 의한 반복하중과 해양에서 기인하는 염분과 습기 등으로 인하여, 금속재료의 종류에 따라 발생형태에서도 차이가 나는 다양한 종류의 부식현상들이 발생한다. 부식반응 과정에서 철의 산화작용으로 인하여 부식생성물이 조성되며 또한 이와 같은

부식생성물은 구조부재의 강도상의 영향을 주어 해수중 피로균열진전수명에서는 켄지효과를 일으켜 균열지연효과를 나타내기도 한다[1]. 한편 이러한 부식생성물이 구조강도상 피로강도에 미치는 영향에 관한 연구결과는 찾기 쉽지 않다.

부식현상에 대한 연구는 그 기원이 오래된 연구 분야의 하나이지만 구조물에서 완전한 부식제거가 이루어지지 않고 있으며, 특히 선박이나 해양구조물과 같이 초대

*Corresponding Author : Won Beom Kim(Ulsan College)

Tel: +82-52-279-3135 email: wbkim@uc.ac.kr

Received February 4, 2013

Revised March 14, 2013

Accepted May 9, 2013

형 구조물에서는 부식 발생가능 개소가 매우 많기 때문에 완벽한 제어가 어렵다. 이와 관련하여 강재의 해수부식환경중에서의 피로균열의 거동을 파악하고 이로부터 강재의 피로수명 및 잔존수명을 고찰하는 연구들이 수행되었다[2].

한편, 선박에서는 건조시부터 부식값(corrosion margin)을 부여함으로써 년간 부식률을 고려하여 의도하지 않은 부식으로부터 발생하는 판함감소와 이에 따른 응력의 증가에 대비하고 있다. 해양환경에서 사용되는 선박 및 해양구조물에서는 부식이 빈번히 발생하며 표면에는 부식생성물이 생성된다. 이와 같은 부식생성물의 선체구조에서의 작용과 그 취급에 대하여 고찰의 필요성이 있다.

본 연구에서는 이와 같은 점을 바탕으로 부식환경에서 장기간 사용으로 인하여 부식생성물이 발생하였을 때, 부식생성물이 선체구조 및 해양구조물의 피로강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 실선에서 채취된 판재로부터 시험편을 제작하고 이전의 연구[3]와 비교하여 부식생성물인 녹(rust)이 피로강도에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 선박 및 해양구조물의 부식현상

2.1 선박 및 해양구조물의 부식 및 부식생성물

선박이나 해양구조물에서는 해수부식으로 인하여 구조부재의 강종에 따른 다양한 형태와 특성의 부식현상이 강재 표면에 나타난다. 또한 이와 같은 부식에서 탄소강의 경우 전면부식(general corrosion)에 의하여 구조물의 강재 두께를 감소시키며, 작용하는 동일한 하중에 대하여 응력이 증가하는 효과를 나타내게 되고 구조물의 강도에 직접적인 영향을 주게 된다.

이들의 해수중 자연전위에서의 강재 부식에 대한 전기화학적 반응은 다음과 같으며, 이에 대하여 복수개의 방식기술이 시행되고 있다[1].

Anode 에서의 철의 산화반응:

$$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$$

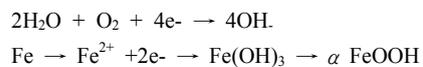
Cathode 측에서의 산소 환원반응:

$$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$$

Cathode 측 수소방출:

$$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow + 2\text{OH}^-$$

위와 같은 부식반응에 의하여 강재에서는 부식생성물이 발생하게 되는데, 이에 관하여 원유탱커의 부식거동에 관한 최근의 연구결과에서 VLCC의 COT(Cargo Oil Tank)의 천정부와 탱크 저판의 공식(pitting)상 부식에 대한 실선조사결과, COT 내에서는 산화철 FeOOH와 고체 황 S의 복합물의 형태를 나타내고 있다고 알려져 있다 [4]. 이런 물질은 Deck plate 뒷면을 덮고 있으며 그 일부가 박리되면 박리된 부분은 발청에 의하여 적색으로 보이거나 흑색으로 나타나게 되며[4] 여기서 원유(crude oil) 성분에서 기인하는 S의 석출은 부식반응과는 독립적인 현상으로 간주할 수 있으나, 이를 제외한 부식반응에서 산화철 FeOOH의 석출반응은 다음과 같이 나타낼 수 있다고 알려져 있다[4].



2.2 부식생성물층이 피로강도에 미치는 영향

이와 같은 부식생성물과 관련하여 이전의 관련 연구에서 부식이 발생된 부식재의 용접이음부 피로강도에 대한 연구결과들은 다수 있으나[5,6], 부식생성물이 강도에 미치는 영향을 고찰한 연구결과는 찾기 쉽지 않다.

본 연구에서는 부식생성물이 부착되어 있는 재료에 대한 이전의 피로강도 평가에 대한 결과[3]와 비교하여 동일한 재료에서 부식생성물 층을 제거한 시험편에 대한 실험을 통하여 피로강도를 비교하고 부식생성물과 피로강도와의 관련성에 관하여 고찰하였다.

3. 부식층제거 시험편 피로강도실험

3.1 시험재료

본 연구에서는 건조 후 17년간 운항한 광석/석유운반선에서 채취한 표면의 부식 쇠모가 매우 심한 선체구조판 부재에 대하여, 녹(rust)과 같은 부식생성물의 피로강도에 미치는 영향을 비교 고찰하기 위하여 표면의 부식생성물을 제거한 판 부재에 대한 피로강도를 조사하였다. 본 연구의 공시 판부재는 선체구조부재로 사용중 부식쇠모로 인하여 교체된 판부재에서 채취하였다.

이 선박은 광석/석유 운반선으로 사용되었던 까닭에 카고탱크 쪽은 기름성분에 의하여 검은색을 띠고, 밸러스트 탱크 쪽은 붉은색 녹이 나타나 있었다. 채취된 강판의 종류는 도면으로부터 일반선체용 A Grade인 것을 알 수 있었다. 채취한 판재의 원두께는 도면에서 13mm이었으

나 채취한 부재의 두께는 부식최모로 인하여 원래 두께에서 5.3~8.3mm로 두께가 감소되어 있었다.

인장시험을 위하여 채취한 부식한 판부재의 표면을 절삭가공하고 JIS 5호 시험편을 제작하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험결과는 Table 1에 나타내었다. Table 2에는 공시강판의 화학성분을 나타내었다. Table 1 및 2에서 나타난 기계적 성질 및 화학성분은 모두 일반 선체용 연강 A Grade 강판으로서 표준적인 값을 나타내고 있었다.

[Table 1] Mechanical properties of hull steel plate used

Direction	t(mm)	Y.P.(MPa)	T.S.(MPa)	EL (%)
L	4.75	308	474	38
	3.20	312	476	37
C	5.45	311	476	37
	4.85	313	473	37
	5.35	320	480	36

[Table 2] Chemical composition of hull steel plate used

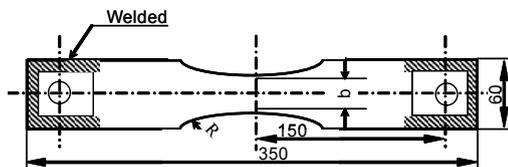
C	Si	Mn	P	S	Ceq
0.17	0.20	0.65	0.02	0.01	0.28

$$Ceq = C + \frac{1}{6} Mn + \frac{1}{5} (Cr+Mo+V) + \frac{1}{15} (Ni+Cu)$$

3.2 피로강도 시험조건 및 실험방법

본 연구에서는 이와 같이 채취된 강판을 사용하여 압연방향으로 시험편을 제작하였다. 시험편은 최소단면에서 응력집중률이 1.1이 되도록 Fig. 1과 같이 제작하고, 최소단면의 치수는 각각 18.4, 24.6, 26.5mm로 가공하였다. 시험편의 판 두께는 최소단면에서의 판 두께를 포인트 마이크로미터를 사용하여 각각 10개소에 대하여 측정하고 평균치를 사용하였다.

선체구조부재로 사용중 공시 강재에 발생되었던 부식생성물층에 대하여, 표면의 부식피트(pit)를 보존하며 부식생성물만을 제거하기 위하여 중성탈청제를 사용하여 부식생성물층만을 제거하였다.



[Fig. 1] Configuration and size of the test specimen



[Fig. 2] Conditions of surface and cross section of rust removed specimen



[Fig. 3] Conditions of surface and cross section of rusted specimen[3]

Fig. 2에서 시험편은 이상과 같은 과정으로 부식생성물층을 제거한 시험편의 형상을 나타내고 있고, Fig. 3은 비교를 위하여 앞선 연구에서 사용했던 부식생성물이 부착되어있는 시험편을 나타내고 있다.

표면의 부식생성물을 제거한 시험편에 대하여 대기중에서 피로시험을 실시하였다. 시험기는 용량 10Ton의 유압식 서보 인장압축 피로시험기를 사용하였으며 Sine파에 의하여 축력 편진인장 하중조건으로 하중을 부하하였다. 하중속도는 3~5Hz이며, 응력비는 0.1로 하였다.

3.3 실험결과

부식생성물층을 제거한 시험편의 대기중 피로시험결과는 다음의 Table 3과 같다. 부식생성물층을 제거한 시험편의 피로시험결과는 앞선 연구에서의 부식생성물층이 있는 시험편과 비교하여 피로강도상의 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다.

[Table 3] Fatigue test results of rust removed specimen in air condition

Specimen No.	Thickness (mm)	Width (mm)	$\Delta\sigma$ (MPa)	Nf (cycles)
1-1	6.53	26.5	194.2	449260
2-2	6.25	18.4	291.4	122060
3-3	6.45	24.6	210.9	270580

4. 부식생성물의 피로강도 분담효과

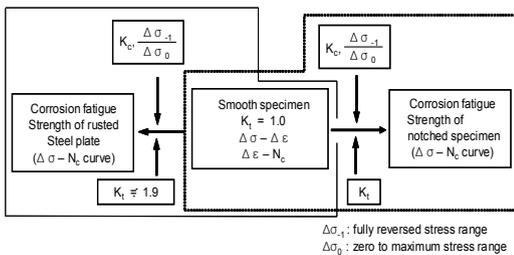
4.1 부식층제거 시험편의 피로시험 결과

앞선 연구[3]에서는 부식생성물을 부착한 시험편에 대하여 대기중 및 해수중에서의 피로시험을 실시하고 피로강도를 평가하였다.

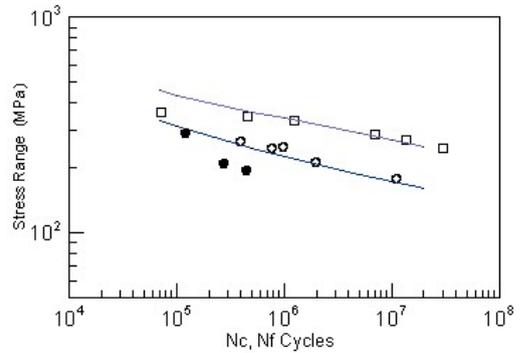
여기서 피로강도평가에 대해서는 종래의 대기중에서의 응력-변형률관계($\Delta\sigma - \Delta\varepsilon$)와 완전양진 일정변형률 피로시험결과($\Delta\varepsilon - Nc$)곡선이 파악되어 있으면 편진인장 하중 조건하에서의 노치평판시험편의 대기 및 해수중에서의 피로강도($\Delta\sigma - Nc$)관계를 추정 가능한 것으로부터 부식생성물이 부착된 시험편에 대하여 대기중 및 해수중에서의 피로강도를 추정하고, 추정치가 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

이 추정법을 그림으로 표현하면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $\Delta\sigma_{-1}/\Delta\sigma_0$ 는 평균응력의 영향을 나타내며, $\Delta\sigma_{-1}$ 는 완전양진공칭응력범위를, $\Delta\sigma_0$ 는 편진인장공칭응력범위를 나타낸다. Kc 는 시간에 의존하는 부식효과계수를 나타낸다. 앞선 연구에서 부식재 표면의 피로균열 발생점이 된 부식피트에 대하여 계산한 응력집중률의 값은 Kt 는 1.9이었다.

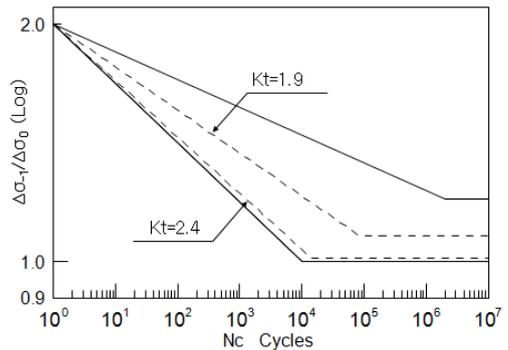
본 연구에서는 앞선 연구에서 사용한 이상의 피로강도 추정법을 사용하기로 하고, 부식생성물을 제거한 시험편에 대하여 대기중에서의 피로시험을 실시하고 추정법을 적용하여 평가하였다.



[Fig. 4] Estimation process of fatigue strength of notched specimen in seawater condition.



[Fig. 5] S-N diagram of fatigue test results of rust removed specimen(solid mark)



[Fig. 6] Mean stress effect for fatigue strength of notched specimen

위의 Fig. 5는 앞선 연구에서의 평활재 및 부식재의 대기중에서의 실험결과(□,○)와 본 연구에서의 부식생성물을 제거한 시험편의 대기중에서의 실험결과(●)를 비교하여 나타낸 그림이다.

상기 그림에서 □은 평활재의 대기중의 피로강도를 나타내고 있고, ○은 부식생성물이 덮여있는 시험편의 대기중에서의 피로시험결과이며 ●은 부식생성물을 제거한 시험편의 대기중의 피로시험결과이다. 위의 그림에서 ●은 부식생성물이 부착되어 있는 시험편에 비하여 피로강도가 저하하였음을 알 수 있다. 그림에서 선도는 앞에서 설명한 피로강도 추정법으로 각각 계산한 평활재와 부식재의 추정선을 나타내고 있다. 동일한 부재에서 부식생성물의 유무에 따라 피로시험결과가 다른 것을 그림으로부터 볼 수 있으며, 앞에서 설명한 추정법은 부식생성물이 부착되어 있는 시험편의 시험결과를 잘 반영하고 있는 것을 알 수 있다.

이에 따라 본 연구에서는 부식생성물을 제거한 시험편의 피로강도에 대하여 고찰하고 부식생성물의 피로강도 분담효과에 대하여 고찰하였다.

4.2 부식생성물층 제거시험편의 강도비교

대기중 피로시험 결과로부터 부식층을 제거한 시험편의 피로강도는 부식층이 있는 시험편에 비하여 피로강도가 저하함을 관찰할 수 있었다. 이들 시험편은 동일판재로부터 채취하였으며 표면의 부식피트(pit)의 요철도 동등함에도 불구하고, 부식층을 제거한 시험편의 피로강도가 저하하는 원인은 부식층이 피로강도를 분담하는 때문인 것으로 추정된다. 따라서 부식층이 존재하는 경우 염분과 같은 유해 성분이 흡수되어 있거나 또는 과도한 습기가 흡수되어 있거나 하는 유해성이 없다면 부식생성물층은 강도상으로 유해하지 않으며 오히려 하중분담효과를 나타내는 것으로 판단된다. 이에 따라, 부식생성물층의 피로강도분담율에 관한 고찰을 실시하였다. 먼저, 앞에서 설명한 피로강도추정법으로 본 연구의 부식생성물을 제거한 시험편에 대하여 대기중에서의 피로강도를 고찰하였다.

본 연구에서 부식생성물의 유무에 따른 피로강도차이에 대해 고찰할 때의 영향인자로서, Fig. 4의 피로강도추정법에서 부식효과계수에 대해서는 대기중에서 실험을 실시하므로 고려할 필요가 없으나, 평균응력의 영향($\Delta\sigma$, σ)과 응력집중률의 영향을 고려하였다.

시험결과에서 피로강도가 저하하였음을 알 수 있으며 따라서 부식생성물을 제거한 시험편에 대한 응력집중률은 앞의 추정법을 사용하여 평균응력의 영향을 고려하여 추정하고 피로시험결과와의 비교를 통하여 피로강도를 파악하였다. 이와 같은 방법에 의하여 본 연구결과와 부식생성물을 제거한 시험편의 응력집중률 K_t 는 2.4에 상당하는 값으로 추정되었으며 평균응력의 영향은 응력집중률 2.4에 대하여 Fig. 6과 같이 나타나어 피로강도추정에 고려하였다. 이와 같은 계산과정을 통하여 본 연구결과와 피로강도 추정선을 Fig. 7에서 점선으로 나타내었다.

4.3 부식층제거 시험편의 피로강도분담률

4.3.1 응력집중률의 증가율 고찰

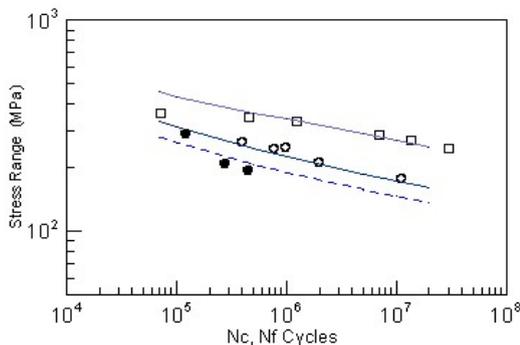
이상의 부식생성물을 제거한 시험편에 대해 추정된 응력집중률 대비 부식생성물이 부착된 시험편에 대한 응력집중률의 증가율을 계산하였다. 앞선 연구에서 부식생성물이 부착된 시험편에 대하여 피로균열 발생점에서의 응력집중률은 1.9로 계측되었다. 이에 비하여 본 연구에서는 피로강도추정법으로부터 피로시험결과와 응력집중률을 계산하여 약 2.4에 상당하는 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 부식생성물이 부착된 시험편과의 비교를 통하여 부식생성물을 제거한 시험편은 하중분담효과와 감소가 관찰되었으며 부식생성물이 부착된 시험편 대비 부식생성물을 제거한 시험편의 본 연구에서의 응력집중률 증가율은 26.3%로 나타났다.

4.3.2 피로강도감소계수의 비교

대기중 피로시험 결과와 피로강도 추정결과로부터 판단수명 10^6 사이클에서의 평활재에 대한 부식생성물 부착시험편과 부식생성물을 제거한 시험편의 피로강도감소계수를 비교하였다. 평활재에 대한 부식생성물 부착시험편의 피로강도 감소계수는 1.52, 부식생성물을 제거한 시험편의 피로강도감소계수는 1.79이었으며 부식생성물을 제거한 시험편의 피로강도감소계수 감소율은 부식생성물 부착시험편 대비 18.1%로 나타났다. 따라서 부식생성물이 피로강도상 유익한 효과가 있음이 나타났다. 이상으로부터 선체구조나 해양구조물의 부식생성물은 구조부재의 피로강도상 하중을 분담하여 피로강도에 기여하는 것으로 나타났다.

5. 결론

- 1) 본 연구에서 철강재에 부착되어 있는 부식생성물은 강도분담효과가 있음이 나타났다.
- 2) 피로강도에 있어 부식생성물 부착시험편과 부식생성물 제거시험편사이에는 평활재 대비 피로강도감소계수상 18.1%의 차이가 나타났다. 즉, 부식생성물이 부착된 시험편의 피로강도가 우월하다.
- 3) 건조한 상태의 부식생성물이라면, 강도의 관점에서는 제거할 필요성이 없는 것으로 판단된다.



[Fig. 7] Fatigue test result and fatigue strength estimation of rust removed specimen

References

- [1] W. B. Kim, "Corrosion Fatigue Crack Propagation Behaviour of TMCP Steel Plate at Ballast Tank of Ship Structure under the Condition of Cathodic Overprotection", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.13, No.6, pp.2465-2471, 2012.
DOI : <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.6.2465>
- [2] W. B. Kim, et al., "Evaluation of corrosion fatigue crack initiation life of 13Cr steel", Key Engineering Material, Vols.326-328, pp.1007-1010, 2006.
DOI : <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.326-328.1007>
- [3] W. B. Kim, et al., "Fatigue Strength Evaluation of Rusting Decayed Hull Steel Plate in Air and Artificial Sea Water Condition", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.43, No.4, pp.467-475, 2006.
DOI : <http://dx.doi.org/10.3744/SNAK.2006.43.4.467>
- [4] Literature Survey for the Further Use of TMCP Steel in Shipbuilding Industries, The Society of Naval Architects of Korea, pp.81, 84, 85, 2006.
- [5] M. Yuasa and T. Watanabe, "Fatigue Strength of Corroded Weld Joints", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 176, pp. 481-489, 1994.
DOI : http://dx.doi.org/10.2534/jjasnaoe1968.1994.176_481
- [6] M. Oka, H. Kitada and T. Watanabe, "Experimental Study on Static Strength of Corrosive Mild Steel", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 167, pp. 229-236, 1990.
DOI : <http://dx.doi.org/10.2534/jjasnaoe1968.1990.229>

김 원 범(Won Beom Kim)

[정회원]



- 1993년 2월 : 부산대학교 공과대학원 조선공학과 (공학석사)
- 1997년 6월 : Hiroshima대학교 대학원 공학연구과 조선구조공학전공 (공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 디지털기계학부 조선해양전공 교수

<관심분야>

파괴역학, 부식피로강도, 용접구조강도, 선체 및 기자재도면검사