

아연피복강재의 부식피로 균열성장특성

김 귀 식* · 현 창 해** · 현 경 수*** · 오 맹 중***

Corrosion Fatigue Crack Growth Characteristics of Zinc Coating Steel

Gui-Shik Kim*, Chang-Hae Hyun**, Kyung-Soo Hyun*** and Maeng-Jong Oh***

ABSTRACT

Corrosion fatigue crack growth behaviors of Zinc coating steel, SGH41, in 3% NaCl aqueous solution was investigated with a hydraulic fatigue testing machine. A hydraulic fatigue test machine was manufactured using a personal computer, a proportional valve one, a hydraulic system. Corrosion fatigue crack growth rates of SGH41 is reduced than that of the uncoated steel by anti-corrosion effect of zinc. Paris rule, $da/dN=C(\Delta K)^m$ is applied about the relation between the stress intensity factor range, ΔK , and crack growth rate, da/dN , of both the coated specimen and the uncoated one. Where the slope of the correlation, m , is 2.24 for the coated specimen and 3.66 for the uncoated one. The corrosion sensitivity, $(da/dN)_{corr}/(da/dN)_{air}$, of the coated specimen was smaller than that of the uncoated specimen.

Key words : Crack growth rates, Zinc coating steel, Anti-corrosion effect, Corrosion fatigue, Corrosion sensitivity

1. 서 론

해안 지대에서 강의 부식 속도는 해염입자의 량, 기온, 강우량 등에 의해 차이가 있지만 100 ~ 1000 μm 정도로 추정⁽¹⁾되고 있으므로 해안

지역에서 사용되는 구조용 강재에 있어서는 반드시 부식 방지 처리가 필요하다. 부식 방지를 고려한 구조용 강재로는 아연 코팅강재를 많이 사용하고 있는데 이는 부식 환경 중에서 아연이 철강에 대하여 희생양극으로 작용하여 소지재인 강의 부식을 방지하는데 효과적이기 때문이다. 아연 코팅강재의 부식 혹은 피로에 대한 연구로는 해안지역에서 아연 코팅강판의 피로거동에 대한 연구⁽²⁾ 등이 보고되고 있으나 아연 코팅강재의 부식피로에 대한 연구는 거의 없다. 따라

* 제주대학교 기계공학과
Dept. of Mechanical Eng., Cheju Nat'l Univ.
** 한림공업고등학교
Hanlim Technical High-school
*** 제주대학교 대학원
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

서 아연 코팅강재를 구조용 부재로 이용하는 경우 신뢰성있는 기계구조물의 설계를 위해서는 실사용환경중의 부식 피로 특성에 대한 연구가 필요하다.

부식 피로 특성에 대한 연구를 위해서는 다양한 환경조건과 여러 가지 하중조건을 충족시킬 수 있는 시험기가 필요하나 고가이며 국내에서는 제작회사가 없으므로 기계구조물의 수명, 안전성 평가의 실험에 중요한 피로시험기의 제작을 위한 기초 연구가 필요한 실정인데 저자들은 피로시험기의 제작에 대하여 별도로 보고한 바 있다⁽³⁾.

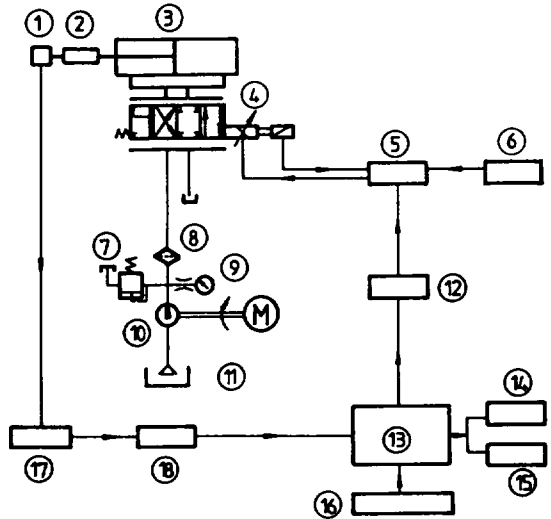
본 연구에서는 퍼스널 컴퓨터와 비례전자밸브 및 유압기기 등의 기기들을 구성하여 제작한 유압 피로시험기를 사용하여 아연 코팅강재 SGH41에 대하여 염수중 부식 균열성장 특성을 검토하였다.

II. 재료 및 방법

2.1 유압피로시험기의 제작

유압피로시험기의 제작에 대하여는 별도로 보고한 바가 있으므로⁽³⁾ 여기에서는 구조 및 운용에 대하여 간단히 서술한다. 유압피로시험기의 구성을 Fig. 1에 나타낸다. 유압 동력원으로 사용한 유압펌프는 기어 펌프(Uchida Co.)로서 토출량은 8.6 cc/rev 이며, 유압 펌프고동용 전동기는 회전수 1720 rpm이고, 정격출력은 3.7 kW 이다. 비례전자밸브는 증폭기로부터 공급되는 전류 신호에 비례한 유량을 유압 실린더로 공급하도록 하였다. 제어기로는 퍼스널 컴퓨터를 사용하며, 연속계 신호와 이산계 신호를 연결시켜 주는 A/D 및 D/A 변환기는 14비트의 분해능을 갖는 PCL-714(Advantch Co.)를 사용하였다. 유압 실린더에서 시험편에 가해지는 하중은 로드 셀에서 감지하여 A/D 변환기를 통하여 퍼스널 컴퓨터로 읽어드리고, 실험 상황을 화면에 나타내도록 하며 원하는 데이터를 저장할 수도 있고, 직접 플로터로 출력할 수 있도록 하였다. 또한 시험기의 운용을 위한 응용 소프트웨어는

Quick Basic 언어를 사용하였다.



- | | |
|---|-----------------------|
| 1. load cell | 10. hydraulic pump |
| 2. test specimen | 11. hydraulic tank |
| 3. hydraulic cylinder | 12. D/A converter |
| 4. proportional control valve | 13. personal computer |
| 5. proportional control valve amplifier | 14. printer |
| 6. power supply | 15. plotter |
| 7. relief valve | 16. keyboard |
| 8. filter | 17. strain amplifier |
| 9. pressure | 18. A/D converter |

Fig. 1 Schematic diagram of fatigue testing machine

2.2 시험편 및 실험방법

본 연구에 사용한 실험재료는 포항제철주식회사 제품인 열연용 아연코팅 강판인 KSD350G SGH41의 판재이며, 재료의 화학적 성분은 Table 1에, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다. 시험편은 아연 코팅시험편(coated specimen)과 코팅부를 연마하여 제거한 나재시험편(uncoated specimen)으로 두께 2mm의 판재를 Fig. 2와 같은 형상으로 가공하였다. 노치의 형상은 길이 10mm 이고 노치 선단 부근의 각도는 60도로 가공하였으며, 균열성장 길이를 측정하기 위하여 시험편의 양측면을 에머리페이퍼(#2000)로 정세 연마하였다.

Table 1 Chemical composition(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	SAL
0.158	TR	0.64	0.019	0.007	0.025

Table 2 Mechanical properties

YP(kg/mm ²)	TS(kg/mm ²)	EL(%)
39.2	51.5	32

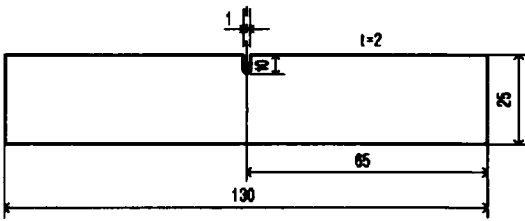


Fig. 2 Test specimen (unit : mm)

실험 환경은 3% NaCl 수용액을 사용했으며, 실험온도는 실온이다. 부식조는 투명한 아크릴로 제작하여 실험도중 이동 현미경을 사용하여 부식 수조 밖에서 시험편의 균열 성장 상태를 측정할 수 있게 하였다. 실험용액의 용량은 5ℓ로 하였고, 수용액의 농도 변화와 오염을 방지하기 위하여 1주일에 1회 새로운 용수로 교환하였다.

피로시험에 있어서 공기중에서 약 0.5mm의 예비균열을 발생 시켰으며, 본 실험은 공기중과 3% NaCl 수용액 중에서 하중 반복 속도(f) 4.3Hz의 정현파형으로 실시하였다.

부식 피로 균열 성장의 측정은 1/50mm의 측정오차를 갖고 있는 하이트게이지에 배율 100배의 현미경을 부착한 이동 현미경을 사용하였다. 균열성장 속도의 정리에 있어서 응력확대계수의 계산은 평판의 편노치 시험편의 경우이므로 Yagsne⁽⁴⁾식을 이용하였으며 그 내용은 다음과 같다.

$$(\Delta K) = \sigma \sqrt{\pi a} F(\zeta) \quad (1)$$

여기에서 $0.5 < \zeta \leq 0.6$ 일 때

$$F(\zeta) = 1.12 - 0.213\zeta + 10.55\zeta^2 - 21.72\zeta^3 + 30.39\zeta^4 \quad (2)$$

$0.5 > \zeta > 0.2 \geq$ 일 때

$$F(\zeta) = 0.265(1-\zeta)^4 + (0.857+0.265\zeta)/(1-\zeta)^{1.5} \quad (3)$$

여기에서 $\sigma = P/(BW)$, $a = t + c$, $\zeta = a/W$ 이다.

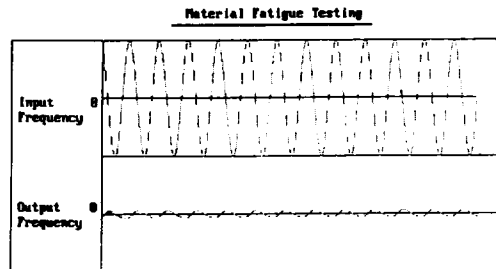
(B : 시험편의 두께, W : 시험편의 폭, t : 노치의 길이, c : 노치선단에서의 균열 길이, P : 하중, σ : 응력, a : 전체의 길이, F : 시험편 형상계수)

실험후 시험편의 파단면 관찰은 전자 현미경을 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1 피로시험기의 성능

Fig. 3은 피로시험에 있어서 부하된 하중 파형을 나타낸 것으로 컴퓨터에서 양진 하중의 정현파형을 입력했을 때 로드셀로부터의 출력 파형과 실험 사이클수, 실험 시간 그리고 실험 주파수를 모니터에 나타낸 것이다. 컴퓨터에서 입력된 파형에 의해 시험편의 응답으로 주어지는 출력파형이 정상적인 정현파형이므로 시험기의 작동이 정상적임을 알 수 있다.



Period - 31 (TIMES)
Experiment Time - 0.870125 (sec)
Experiment Frequency - 3.03724 (Hz)

Fig. 3 Typical wave signal at loading (Pressure : 10kg/cm²)

3.2 부식 피로 균열 성장 특성

공기 중과 3% NaCl 수용액 중에서 SGH41재의 코팅시험편과 나재시험편의 피로 균열 길이와 사이클 수와의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 먼저 나재시험편의 3% NaCl 중과 코팅시험편의 공기중을 비교하여 보면 동일 부하 사이클에서 나재시험편의 3% NaCl 중에서가 균열이 길다. 이것은 3% NaCl 중의 나재시험편이 피로 하중과 더불어 부식의 영향을 받았기 때문이다. 여기에서 공기중 코팅시험편의 결과를 비교한 것은 공기중에서는 코팅층의 응력부담효과를 무시할 수 있을 것으로 간주되므로 두 데이터를 직접 비교하였다. 다음으로 3% NaCl 수용액 중에서 코팅시험편과 나재 시험편의 부식 피로 하중에 의한 균열성장은 코팅시험편의 아연 성분이 방식 작용을 하기 때문에 코팅시험편이 나재 시험편 보다 균열 성장길이가 훨씬 짧게 나타나고 있다.

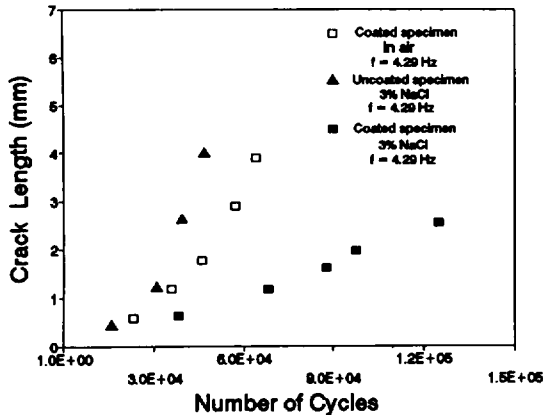


Fig. 4 Relationship of crack length and number of cycles

한편, 코팅시험편의 공기중과 3% NaCl 수용액 중에서의 결과는 동일 부하 사이클에서 3% NaCl 수용액 중에서의 균열 성장이 공기중의 것 보다 짧게 나타나는데 이것은 코팅층의 아연이 철 보다 이온경향이 크기 때문에 아연의 양극반응과 철의 음극 반응으로 인하여 부식이 억제되고, 아연의 부식으로 인한 생성물이 균열 폐구현상^{5,6)} 때문으로 생각된다. 부식 생성물의

균열 폐구현상 등에 대하여서는 Komai 등⁵⁾은 부식 생성물의 균열폐구현상을 부식 생성물에 의한 쉼기효과로 평가하고 있는데, 이는 부식 생성물이 균열 선단에서 쉼기작용을 함으로서 균열 성장이 지연되는 것으로 본 실험에서도 이러한 현상 때문에 3% NaCl 중에서 코팅시험편의 균열 성장속도가 저하하였다고 생각된다.

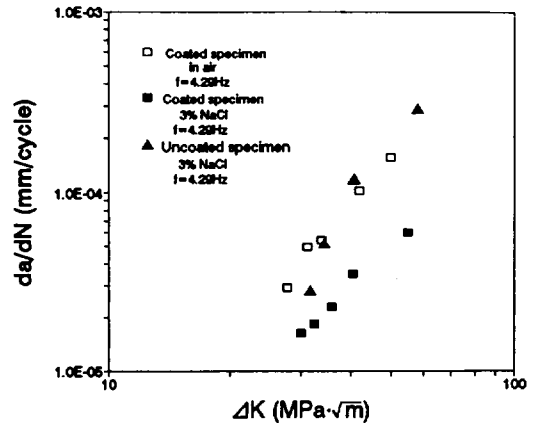


Fig. 5 Relationship between crack propagation rate and stress intensity factor range

Fig. 5는 공기중과 3% NaCl 수용액 중에서 SGH41의 코팅시험편과 나재시험편의 균열 진전속도 da/dN 와 응력확대계수범위 ΔK 값과의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 나재시험편의 3% NaCl 수용액 중에서의 균열 성장 속도는 부식의 영향에 의해 코팅시험편의 공기중 보다 빠르다. 그리고 3% NaCl 수용액 중에서의 나재시험편과 코팅시험편의 균열 성장 속도는 나재시험편이 코팅시험편 보다 빠르다. 이는 아연에 의한 전기 방식 효과와 전술한 바와 같은 균열 폐구현상 때문이다. 그리고 da/dN 은 ΔK 값이 커짐에 따라서 양 로그스케일의 그래프에서 직선적으로 증가하고 있으므로 다음과 같은 Paris의 법칙을 적용할 수 있다⁷⁾.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \tag{4}$$

Table 3은 Fig. 5에서 실험치를 (4)식의 Paris의 법칙에 의하여 최소자승법으로 계산한 실험상수 C와 m값으로 정리한 것이다.

Table 3 The experimental constants C and m of Paris' rule [$da/dN = C(\Delta K)^m$]

Environment	Experimental constant	m	C
3% NaCl (Coated specimen)		2.34	7.0×10^{-9}
3% NaCl (Uncoated specimen)		3.66	1.05×10^{-10}
in air (Coated specimen)		2.78	3×10^{-9}

Table 3에 의하면 코팅시험편은 공기중과 3% NaCl 중의 결과를 비교하여 보면 실험상수 C값은 3% NaCl 수용액 중에서 증가하고 있는데 비해 기울기를 나타내는 실험 상수 m값은 작아지고 있고, 3% NaCl 수용액 중에서의 나재시험편은 실험 상수 C값이 가장 작은데 비해 기울기를 나타내는 m값은 가장 크게 나타나는 경향을 보이고 있다.

3.3 부식감응성

Fig. 6은 3% NaCl 수용액에서 SGH41의 코팅시험편 및 나재시험편의 부식감응성 S에 대한 응력 확대 계수 범위 ΔK 와의 관계를 나타낸 것이다. 부식감응성은 Fig. 6의 실험치에 의해 공기중에서 균열 성장 속도 $(da/dN)_{air}$ 에 대한 NaCl 수용액 중에서 $(da/dN)_{cor}$ 의 비로 계산한 것이다. 즉, $S = (da/dN)_{cor} / (da/dN)_{air}$ 이다.

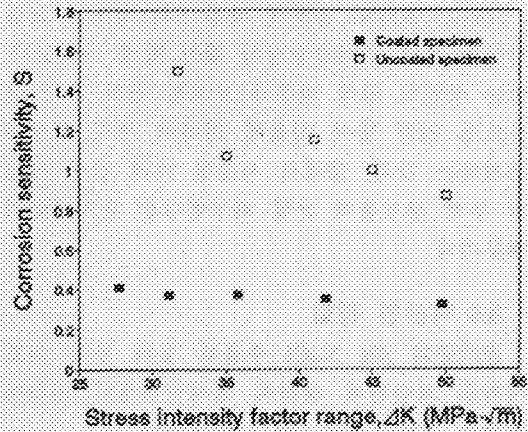
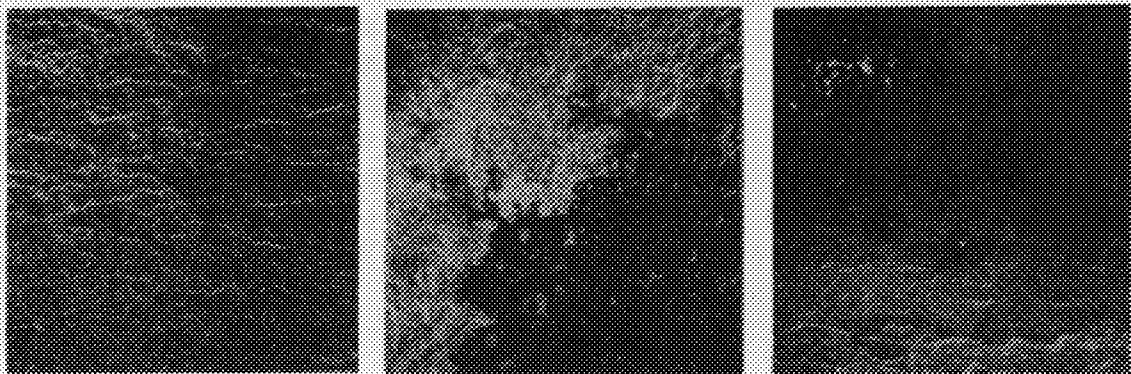


Fig. 6 Relationship between corrosion sensitivity and stress intensity factor range

먼저 ΔK 의 대소에 따른 S의 관계를 살펴보면, 나재 시험편과 코팅시험편 모두 ΔK 값이 작은 영역일 수록 부식감응성이 크며, 코팅시험편의 부식 감응성은 나재시험편의 1/3 정도이다. 그리고 ΔK 값이 큰 영역일 수록 코팅시험편 보다 나재시험편의 부식 감응성의 감소가 크다. 부식 감응성이 ΔK 값이 작은 영역일 수록 크게 나타나는 이유는 균열 초기 단계에서는 반복 응력에 비해 부식의 영향이 더 민감하기 때문이다. 또한, ΔK 값이 큰 영역은 부식 피로 파괴 단계에서 부식보다 반복 응력의 영향이 더 커지기 때문이다.



(a) in air (coated specimen) (b) 3% NaCl (uncoated specimen) (c) 3% NaCl (coated specimen)

Fig. 7 Fractography (×40)

그리고 코팅의 유무에 따른 S의 정도는 코팅 시험편 보다 부식감응성이 훨씬 작게 나타났다. 이는 아연의 양극 반응과 모재의 철의 음극 반응으로 인한 방식 작용에 의하여 부식 현상이 억제되는 것과, 앞에서 서술한 바와 같이 아연의 부식 생성물이 균열 폐구현상을 유지하였기 때문이다.

3.4 파단면 관찰

공기중과 3% NaCl 수용액 중의 부식 피로 시험후 파단면에 대하여 전자현미경에 의하여 관찰한 결과는 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7의 (a)는 공기중, (b)는 3% NaCl 수용액 중의 나재시험편, (c)는 3% NaCl 수용액 중의 코팅시험편의 파단면을 나타낸다.

공기중의 파단면은 입내 연성파면을 나타내고 있고, 3% NaCl 중의 나재시험편은 철의 부식 생성물이 파면에 잔존되어 있는 상태로 보이고 있다. 한편 3% NaCl 수용액 중의 코팅시험편은 아연의 부식 생성물이 파단면에 나타난 상태로 보인다. 이는 부식 용액 중의 나재시험편은 부식에 의해 공기중의 시험편 보다 균열 성장 속도가 가속됨을 나타내고 있다. 동일한 부식 환경 중에서의 코팅시험편은 나재시험편과 전혀 다른 양상 즉, 아연의 부식 생성물에 의한 균열을 나타내고 있다. 따라서 앞에서 서술한 바와 같이 아연의 전기 방식 작용과 아연의 부식 생성물에 의해 코팅시험편의 부식 피로 균열 성장 속도가 저하되는 현상을 나타내고 있다.

IV. 결 론

퍼스널 컴퓨터와 비례전자밸브 및 유압 기기를 이용하여 유압피로시험기를 제작하여 3% NaCl 수용액 중에서 SPH41의 부식 피로 균열 성장 특성에 대해 검토한 결과, 3% NaCl 수용

액 중에서의 SGH41의 부식 피로 균열 성장 속도는 아연의 전기 화학적 부식 방지 작용과 부식 생성물에 의한 균열폐구현상으로 인하여 부식에 의해 가속된 나재시험편 보다 저하하였다. 또한, 응력확대계수범위 ΔK 값이 작은 영역에서는 아연 코팅시험편의 부식 감응성은 나재 시험편의 1/3 정도이며, ΔK 값이 전 영역에 걸쳐서 코팅시험편의 부식감응성은 거의 변하지 않으나 나재시험편의 부식감응성은 점차 저하하였다.

참고문헌

1. Q & A. 1992, 海岸地帯の鋼構造物の防食法, Zairyō-to-Kankyō, Vol. 41, pp.199-200.
2. 서창민, 강성수, 황남성, 오상섭, 1992, 아연도금강판의 점용접재의 피로 거동에 관한 연구, 대한기계학회논문집, Vol. 16, No. 8, pp. 1503-1510.
3. 김귀식, 현창해, 현경수, 오맹중, 1995, 유압피로시험기제작, 제주대학교 공과대학 부속 산업기술연구소, Vol. 6, pp.34-40.
4. Yagane, 1988, 破壊力學, 培風館, pp.31-36
5. 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 松田喜彦, 1982, 鋼の腐食疲労き裂進展に對する腐食生成物の力學的効果, 日本機械學會論文集(A), Vol. 46, No. 412, pp. 1337-1343.
6. 駒井謙治郎, 遠藤吉郎, 1984, 腐食疲労き裂進展における腐食生成物のくさび 効果に關する研究, 日本機械學會論文集(A), Vol. 50, No. 456, pp. 1453-1460.
7. Gerberish, W.W., Van stone, R.H., Gunderson, A.W., 1982, Fatigue Properties Fracture Mechanics for Selection of Metallic Structural Materials, ASTM, Metals park, Ohio, pp. 65-77.