
碩士學位論文

亞鉛被覆鋼材의 腐蝕疲勞特性

濟州大學校 大學院

機械工學科



1994年 12月

亞鉛被覆鋼材의 腐蝕疲勞特性


指導教授 金 貴 植




文 秀 中

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1994年 12月

文秀中の 工學碩士學位 論文을 認准함

 제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

審査委員長	金 貴 植	
委 員	許 鐘 哲	
委 員	金 貴 植	

濟州大學校 大學院

1994年 12月

**Corrosion Fatigue Characteristics
of Zinc Coating Steel**

Mun-Su Jung

Supervised by professor Gui-shik Kim

 제주대학교 중앙도서관
**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL
FULFILLMENT**

**OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY**

1994. 12.

목 차

Summary	1
I. 서 론	2
II. 재료 및 방법	
1. 재료 및 시험편	5
2. 실험 장치 및 실험 방법	10
III. 결과 및 고찰	15
1. 철의 부식에 의한 무게감량	15
2. 철의 방식과 아연의 무게감량	20
3. 부식 피로 강도	27
4. 부식피트 성장	30
5. 파단면 및 표면 관찰	33
IV. 결 론	37
V. 참고문헌	39

SUMMARY

To study the corrosion fatigue strength of SM45C steel, S72C steel and zinc coating steel, the rotary bending fatigue test was carried out the air and 3% NaCl solution. Decreased corrosion weight of zinc coating steel was investigated at three different environments, 15°C fresh water, 30°C fresh water and 15°C sea water.

Fatigue life in the corrosion environment is decreased in comparison with that in air. Fatigue limit in the air was about 20 kg/mm². But there was no fatigue limit in the corrosion environment. Fatigue strength of zinc coating steel in 3% NaCl solution was similar to fatigue strength of uncoating steel in the air. The corrosion pit depth of the S72C steel were increased with increasing time.

The zinc coating steel in the 30°C fresh water was decreased the most corrosion weight in three environments. Corrosion of steel was protected by sacrifice anodic action of zinc. The zinc coating steel in the sea water was increased weight by white-colored rust, CaCO₃, MgCO₃, Mg(OH)₂, attached at the surface of zinc coating steel.

Fatigue fracture of zinc coating steel in 3% NaCl solution and uncoating steel in the air were fractured by a main crack. But fatigue fracture of uncoating steel in 3% NaCl solution is fractured by much crack which were united.

I. 서 론

공업이 발달함에 따라 금속 재료들은 화학 장치, 자동차하판, 건축 자재, 가전용기, 해중시설, 지중 시설 및 원자로 등의 기계 구조용 재료로서 매우 다양하게 이용되고 있고, 또 이들은 가혹한 부식환경하에서 사용하게 되었다. 부식환경하에서 반복하중을 받는 부식 피로는 대기 중에서 보다 수환경에서 빠르게 파손에 도달하므로 이에 대한 연구가 중요시되고 있다 (Kenzou 등, 1983), (Ebara, 1993). 이러한 구조물의 파괴 원인은 거의 대부분의 피로에 기인한 것이며, 부식환경하에서의 피로 강도는 부식과 더불어 동하중이 동시에 상승 작용을 하므로 더욱 저하된다 (江 등, 1987). 따라서 해수 및 해풍으로 인한 부식피로 현상은 해양구조부재의 손상 및 파괴에 중요한 인자가 되며, 이러한 환경에서 돌발적인 파괴를 미연에 방지하고 인명과 재산의 피해를 최소화하는 안전 설계와 부식을 방지하는 것은 대단히 중요한 과제이다. 특히 구조물들이 부식에 의해 파괴되고 있으므로 부식 방지 처리가 필요하다.

한편, 금속 재료의 내열성, 내식성, 내마모성 특성을 향상시키는 표면개선편법으로서, 재료 표면에 얇은 막을 피복하는 기술이 주목되고, 적극적으로 이용되고 있다. 표면처리기술로서는 용사법, 도금, 물리적 기상증착법(PVD)과 화학적 기상증착법(CVD) 등이 있으며 이들에 의한 피복은 부식성, 고 내마모성, 저 마찰계수를 갖는 절삭 공구와 금형류 등과, 항공기의 가스터빈에 실용화를 하고 있다. 더욱이, 이들 피복재의 피복은 내열성, 내식성이 우수

하며 피복의 기능성을 적극적으로 이용한 기계, 구조용 재료의 개발이 더욱 활발해짐으로서 피복처리재의 강도 특성을 밝혀 두는 일은 매우 중요하다. 피복재의 부식방지 특성에 관한 연구자로는 Hiroshi 등(1989)이 있으나 이들의 연구는 주로 피복시의 물리적, 기계적 특성에 주목하고 있을 뿐 피복강재의 강도 문제에 대한 연구는 적고, 특히 강도 설계에 반영하기 위한 피로강도 특성에 관한 연구는 충분하게 행해져 있지 않고 있으며, 피복처리재의 피로강도 특성이 통일적으로 충분히 설명되고 있지 않는 상황이다.

최근 표면처리기술이 발달로 내식성이 요구되는 분야에 아연 및 주석 도금 강재가 많이 개발되고 있으며, 특히 부식 영향이 큰 해안 지대에서는 구조용 재료로서 아연도금강재가 많이 사용되고 있다. 이는 아연 성분이 대기중에서 내식성이 우수하고, 강에 대하여 희생 양극으로 작용하므로 소지재의 부식을 방지하는데 효과적이기 때문이다. 그러나 아연도금강의 피복시 피막 결합이 생기기 쉽고, 피막이 잘 형성된 경우라 할지라도 구조물 이용시 접합부나 동적응력을 받는 부위에 피막 결합이 생길 수 있으며, 특히 피로하중을 받는 구조물에는 피막 균열이 응력집중부가 되어 소지재에까지 성장할 수 있으므로 해안 지대는 해염영향에 의해 부식피로 파괴가 발생하게 된다. 특히 해안에서 100m 이내의 지점에서 아연의 부식 속도는 약 $4 \mu\text{m}/\text{year}$ 로 알려져 있어서 (玉田 등, 1987), 구조물의 사용 연한을 고려하여 아연 층의 두께가 $80 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 인 제품을 사용하는데 피복 층의 두께가 커짐에 따라 피막 자체가 잔류응력을 가지므로 잔류응력에 의한 피막의 결합을 초래하기 쉽다.

아연도금강재의 부식감량 및 부식기구 해석에 관한 연구를 나열하면,

해안 지역에서 아연도금강의 내식성 연구 (Yoshio, 1988), 사이클릭 부식 실험에서 도막하의 부식 (孫과述川, 1992), 도막하의 부식과 물질 이동 (春山 등, 1989), 아연의 대기부식속도 (官田 등, 1989), 아연도금 볼트의 균열 발생에 미치는 도금처리의 영향 (清水 등, 1992) 등으로, 아연도금강재의 부식속도와 방식 기구에 대한 연구가 대부분이며 구조물 사용시 필연적으로 받게 되는 동적피로하중이 부식환경에 중첩된 경우의 부식피로의 영향에 대해서는 보고가 거의 없다.

椋見 (1987)은 표면 처리로서 질화 처리한 타프트라이트 처리강재의 부식 피로를 연구하여 표면처리재의 부식피트 발생 및 표면처리 강재의 부식피로 강도가 대기중 피로강도 보다 저하하여 부식처리강재의 일반적 부식피로 특성과 유사함을 보고하고 있다.

아연도금강재에 대한 국내 연구로서는 아연도금강판의 Spot 용접시 피로거동에 관한 연구 (서창민 등, 1992)가 있으나 용접에 주목하여 피로거동을 해석한 것이며, 아연도금강재의 부식피로거동에 대한 연구는 거의 보이지 않는다. 따라서 아연도금강재의 구조물의 사용시 구조물의 안전성, 신뢰성에 중대한 영향을 미치는 부식피로강도 및 부식피로기구의 해명은 필요하다.

본 연구에서는 염수환경하에서 아연피복 탄소강의 부식피로강도 특성을 파악하기 위해서 탄소강과 아연피복강재의 부식감량조사, 부식피로강도 및 파단면관찰등을 검토하여 아연피복강재의 부식피로강도 기구를 해명하였다.

II. 재료 및 방법

1. 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 기계구조용탄소강 SM45C와 S72C이며 그 화학성분과 기계적성질은 Table 1과 2에 나타내었다. Table 1에서는 재료의 화학성분중 내부식저항이 큰 성분인 Si와 Mn이 S72C가 SM45C 보다 많이 함유되어 있다. Table 2의 기계적성질은 Fig. 1(SM45C), Fig. 2(S72C)의 인장 실험으로 부터 작성한 것이다. Fig. 1과 2에서 SM45C와 S72C의 인장 특성을 보면, SM45C의 항복강도는 약 49 kg/mm^2 이며, 연신율은 약 32.4%이며, S72C의 항복강도는 약 71 kg/mm^2 , 연신율은 약 9%이다. SM45C가 S72C보다 항복강도는 작고 연신율은 크다.

Fig. 3은 실험에 사용된 회전굽힘피로시험편의 형태와 치수를 낸다. (a)는, SM45C (b)는 S72C이다. SM45C 시험편의 전체길이는 210mm로 하였으며 그중 표점거리는 50mm이고 직경은 11mm이다. 그리고 (b)는 S72C의 시험편의 전체길이는 110mm로 하였으며, 표점거리는 50mm이고 직경은 11mm이다. 이들 시험편은 선반을 사용하여 정밀 가공한 후 표면을 에머리페이퍼(#2000)로 정세 연마한 후 버핑하여 경면 연마하였다.

아연 피복은 시험편을 경면연마한후 아연용사법에 의해 피복하였으며 용사층의 두께는 약 $22 \mu\text{m}$ 이었다.

Table 1. Chemical compositions of material (wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu
SM45C	0.445	0.207	0.0674	0.04	0.016	-
S72C	0.72	0.25	0.42	0.022	0.022	0.18

Table 2. Mechanical properties of material

Material	σ_y kg/mm ²	σ_M kg/mm ²	ϵ %
SM45C	49.10	64.93	32.37
S72C	70.64	114.95	8.88

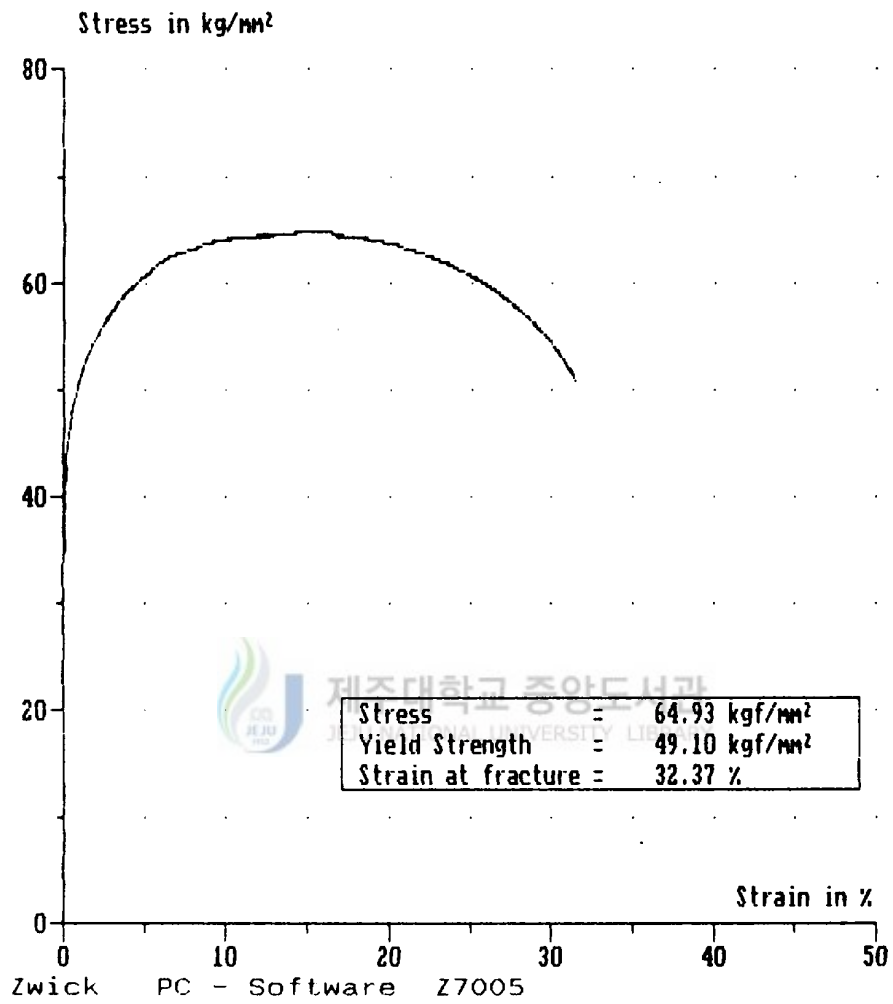


Fig. 1 Mechanical properties of SM45C.

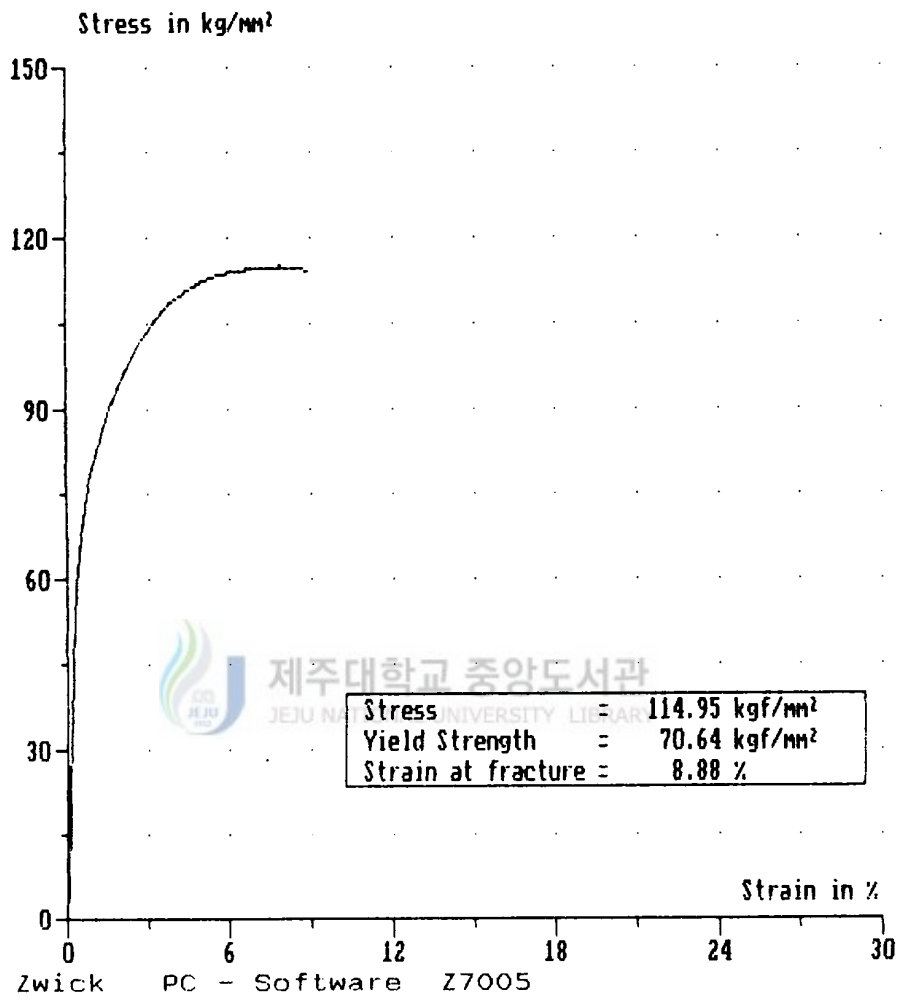
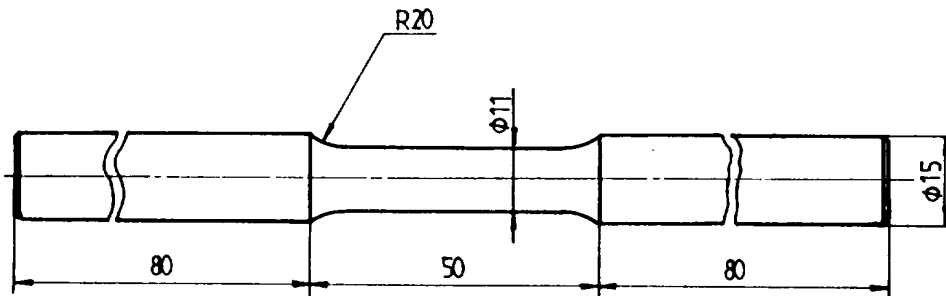
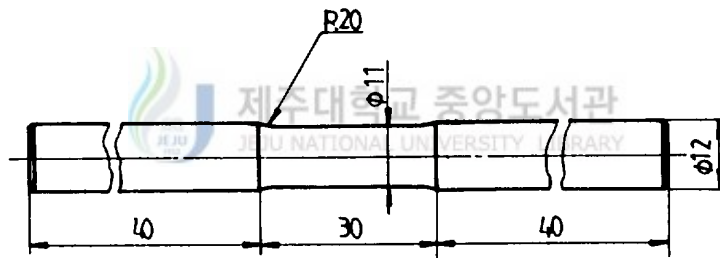


Fig. 2 Mechanical properties of S72C.



(a) SM45C



(b) S72C

Fig. 3 The shapes and dimensions of test specimens

2. 실험장치 및 실험 방법

아연피복강재의 부식특성을 조사하기 위해 3종류의 환경에서 수조에 시험편을 침지한 후 임의 시간에 대하여 무게를 측정하여 무게 감량을 계산하였다.

무게감량 $\Delta W = \frac{W_1 - W_2}{W_1}$ 여기에서 W_1 = 침지전의 무게, W_2 =

침지 후 부식 생성물을 제거한 무게이다. 무게측정시에 부식생성물은 초음파 세정기로서 제거한 후 정밀 천정으로 측정하였다. 부식환경은 실은청수, 30°C 청수, 실은해수이며 1주일에 1회 실험용수를 교환했다.

부식피로 실험장치는 Fig. 4에 나타낸것처럼 피로시험기와 부식장치로 나누어진다. 본 실험에 사용한 피로시험기는 회전굽힘피로시험기 (제일정밀 Co.)이며 최대 용량은 10 kg · m이다. 삼상모터를 사용하여 시험편을 회전하며, 회전속도를 최저 0~1800 rpm의 범위 내에서 조정할 수 있도록 인버터를 설치하여 디지털 속도계에 의해 회전속도를 측정하였다. 또 부하 사이클은, 100 : 1의 워엄감속기어를 갖는 카운터로서 측정하였다. Fig. 5는 회전굽힘피로시험기의 단면과 각부 명칭을 나타내었다. 시험기의 본체는 모터, 베어링, 카운터, 프레임등으로 구성되어 있으며 하중의 조절은 무게추를 사용하여 조절할 수 있도록 되어있다.

한편 부식수 순환장치는 Fig. 6과 같다. 부식 피로 시험의 환경조건은 실은 공기중과, 3% NaCl 수용액이다. 여기서 3% NaCl 수용액은 부식용액의 표준용액으로 ASTM규격 인공해수와 부식특성이 유사함이 보고되어 있으므로(角田 등, 1987) 이를 부식용액으로 채택하였다. 부식수의 순환장치는 부식조와 수조로 이루어지며 부식조는 투명 아크릴로 제작하였다. 부식에 영향을

받지않는 플라스틱 펌프를 사용하여 3% NaCl 수용액을 항온수조로부터 부식조로 공급하고 다시 항온수조로 순환되도록 제작하였다. 그리고 수용액량을 5 l로 하고, 일주일마다 교환해서 순환시켰다.

한편 부하 응력은 S72C는 $\sigma_a = 50, 40, 30 \text{ kg/mm}^2$ 에서 SM45C는 $\sigma_a = 40, 30, 20 \text{ kg/mm}^2$ 에서 실험을 행하였고, 파단후 시험편의 파단면을 정밀 관찰하여 각각의 조건에 대해서 비교 검토하였다.



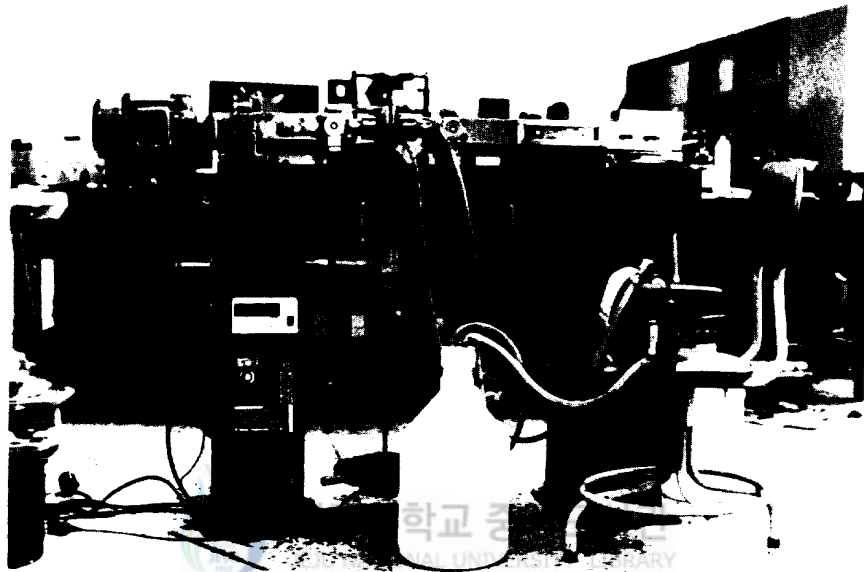
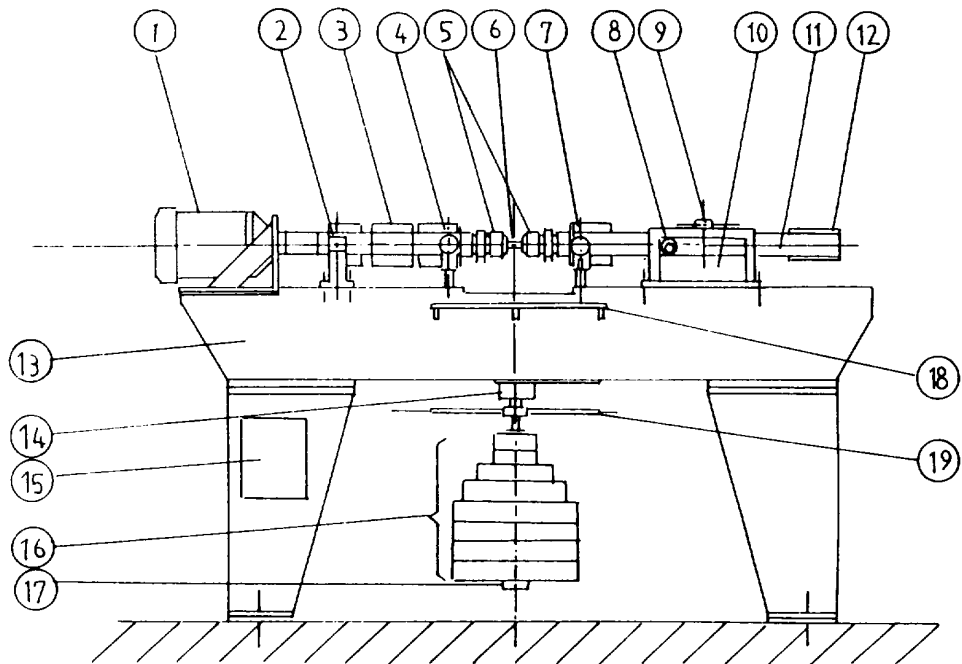


Fig. 4 Apparatus of corrosion fatigue test.




- 
제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY
- | | |
|--------------------|---------------------|
| 1. MOTOR | 11. MOUNTING PLATE |
| 2. FULCRUM BEARING | 12. BALANCE WEIGHT |
| 3. BALANCE WEIGHT | 13. FRAME |
| 4. FULCRUM BEARING | 14. JACK |
| 5. CHUCK HOLDER | 15. INVERTER |
| 6. TEST PIECE | 16. WEIGHT |
| 7. FULCRUM BEARING | 17. RECEIVER VESSEL |
| 8. MOVING BEARING | 18. FURNACE SUPPORT |
| 9. COUNTER | 19. HANDLE |
| 10. FULCRUM GUIDE | |

Fig. 5 Block diagram of rotary bending fatigue testing machine.

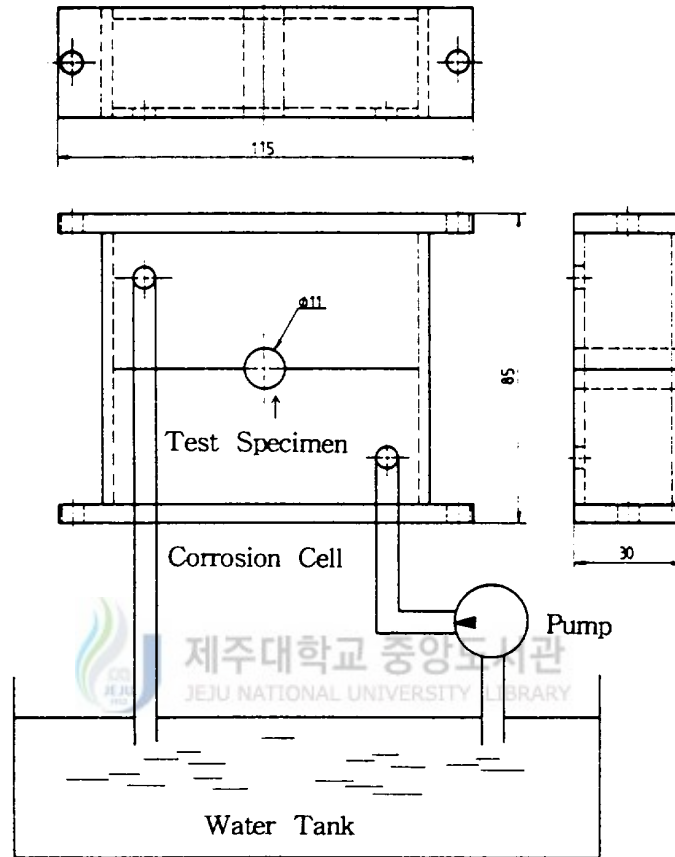


Fig. 6 Shape and dimension of corrosion cell.

III. 결과 및 고찰

1. 철의 부식에 의한 무게감량

Fig. 7은 SM45C와 S72C의 무피복강재의 실은 해수중, 30°C 침수중에서의 부식 감량을 측정한 그래프이다. SM45C와 S72C의 강재는 해수중, 30°C 침수중에서 적색녹이 표면에서 관찰되었다. 또 무게감량은 SM45C가 S72C 보다 큼을 알 수 있다.

철의 부식기구 는 다음과 같이 검토된다. 산소를 포함한 전해액 중에 강재를 침지 하였을때 철의 표면에는 다음과 같은 양극 반응이 생긴다.



(1) 식의 용존산소를 포함한 전해액중에서는, 다음의 (2) 식의 음극반응도 일어나는데 이 반응기구는 Fig. 8에 나타내었다.



이 반응 기구에 대한 분극특성의 모식도를 작성하면 Fig. 9와 같이 표시할 수 있으며 여기에서 (1)과 (2)식의 반응은 ①과 ②로서 표시되었다.

산소의 평형전위 ($\phi_{\text{e}^{02}}$) 는 철의 평형전위 ($\phi_{\text{e}^{\text{Fe}}}$) 보다 높으므로, 철전극이 anode, 산소전극이 cathode로 되어 부식전지를 형성하고, 강재 내부에는 cathode로 부터 anode에, 전해액중에서는 anode로 부터 cathode로 부식전류가 흘러서 양전극의 전위는 전류밀도에 따라 곡선 ①, ② 처럼 변화한다. 양전극간의 전자의 수수는 평형이 되어야 하므로 양전극의 표면적이 같으면 전

류밀도가 같게 되는 자연부식전위 (ϕ_c^{Fe})로서 철의 부식이 진행된다. 따라서 Fig. 7에서 무피복재의 부식은 위에서 서술한 부식기구에 의해 부식되었다고 생각된다.

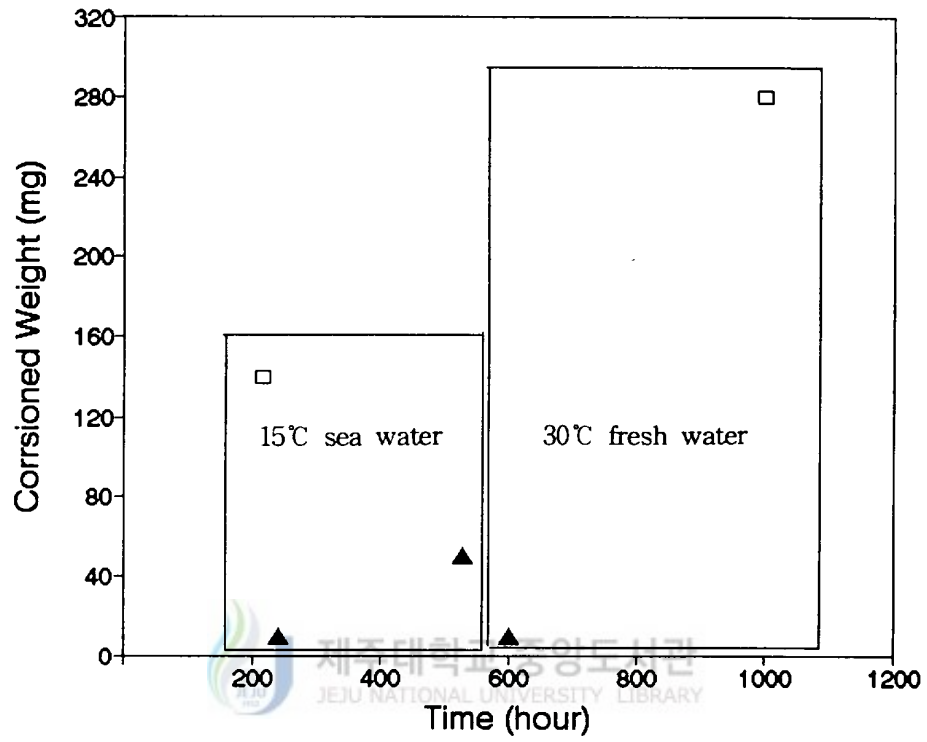
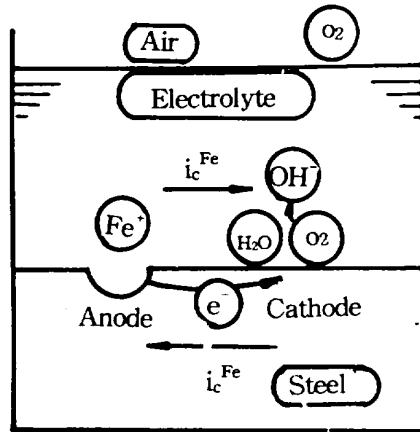


Fig. 7 Decreased corrosion weight of SM45C and S72C.



제주대학교 중앙도서관
Fig. 8 Modeling of corrosion cell.

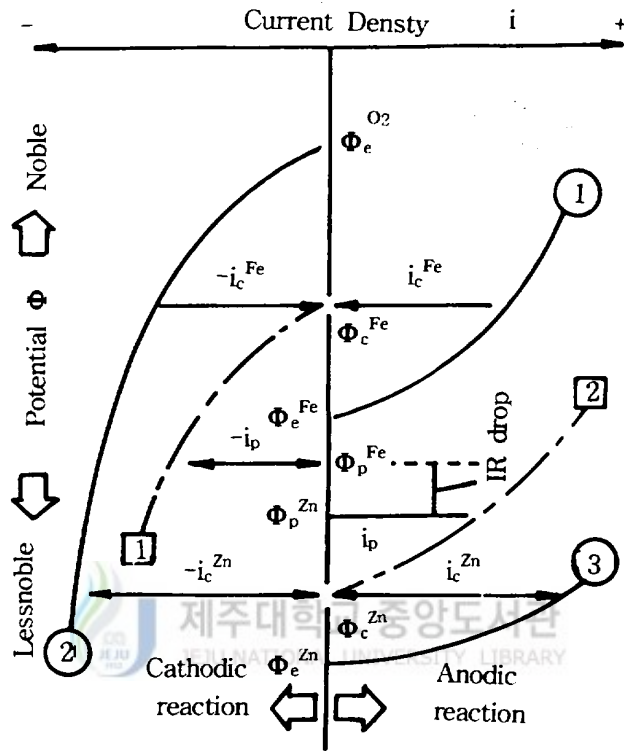
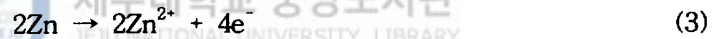


Fig. 9 Schematic polarization characteristics.

2. 철의 방식과 아연의 무게 감량

Fig. 8의 용존산소를 포함하는 전해액중에서, 철의 자연부식전위 (ϕ_c^{Fe})으로 부식상태에 있는 철에 (1) 식의 anode 반응을 방해하는 방향으로 전류를 외부에서 공급하면, 철은 cathode 측으로 되고, 그 전위와 전류밀도는 Fig. 9에 보이는 일점쇄선 ①에 따라 변화한다.

외부로부터의 전류를 크게 하여, 전류밀도가 증가하고 전위가 철의 평형전위 ϕ_e^{Fe} 이하로 되면, (1) 식의 철의 anode 반응은 진행하지 않고, 철이온의 용출 즉 부식은 정지하여 방식상태가 된다. 음극방식에 필요한 전류를 외부의 전원에서 보조전극을 통해 공급하는 방식이 외부전원법이며, 철보다 이산화 경향이 큰 아연, 알루미늄, 마그네슘 등의 희생 양극에 의해 부식전지를 형성하여 방식 하는 경우가 유전양극법이다. 희생 양극으로 아연을 사용한 경우, 아연표면에 있어서 철 - 산소계 전지와 같은 아연 - 산소계 부식전지가 구성되어 다음식의 Anode 반응이 진행된다.



아연 전극은 Fig. 9의 실선 ③을 따라 분극하여, 자연부식전위 ϕ_c^{Zn} 에서 아연의 부식이 진행된다. 이 아연 - 산소계 부식전지에 위식의 anode 반응을 촉진하는 방향의 외부전원을 가하면 외부분극특성은 일점쇄선 ②와 같이된다.

아연과 철의 전극간을 접속하면, 아연의 자연부식전위는 철의 평형 전위보다 낮기 때문에 철전극은 cathode 반응을 생기게 하고, 아연은 anode 반응을 하게 되어 철과 아연은 ①과 ②의 분극 특성을 갖게되며 이때의 철의 전위(방식전위)는 철의평형전위 이하가 되므로 철은 부식이 방지되며 아연의

부식은 촉진된다.

Fig. 10, 11, 12은 실온청수중, 30°C 청수, 해수중의 아연피복강재의 철의 방식에 의한 아연의 부식 감량을 나타낸 것이다. 청수중, 30°C 청수중, 해수중에 침지한 시험편에 대하여 초음파 세척후 부식 상황을 조사한 결과, 아연성분의 백색녹이 발생하였다. 침지중의 시험편은 어느 환경에서도 철의 부식을 알아볼 수 있는 적색녹은 관찰되지 않았다. 그러므로 아연피복강재 침지에서 도금된 아연에 의해 철의 부식은 방지되었다. 그림중의 직선은 모든 데이터에 대하여 최소자승법에 의해 구한 예측선을 나타낸다.

Fig.10과 11의 실온청수와 30°C 청수중에서 시험편의 수중침지부터 약 1000시간 내의 부식상태는 철의부식은 나타나지 않고 아연이 부식이 관찰되었다. 양 환경중에서 아연의 부식감량은 온도가 높은 30°C의 청수중 침지 시험편이 실온의 것 보다 약 3배이상 부식감량이 크다.

Fig. 12의 실온 해수중의 무게감량은 수중침지 초기에는 아연의 부식에 의한 무게감소가 보이거나 침지 후 약 170시간 이후에는 무게가 증가하였다. 그 원인은 해수중 침지 초기에는 Zn의 방식 전위가 안정화되지 않아서 Zn의 부식이 진행되었으나, 그 이후 침지 시간의 경과에 따라 음극 방식 전위가 저하함에 따라 해수중의 Ca, Mg 성분이 CaCO_3 , MgCO_3 , Mg(OH)_2 로 석출되어 이 석출물이 시험편 표면에 다량 부착되어 있어서 부식 증량의 증가로 나타난 것이다 (Rajpathak와 Hartt, 1987 ; Wolfson와 Hartt, 1981).

Fig. 13는 실온해수중, 30°C 청수중, 실온 청수중에서 부식 무게 감량의 예측선을 나타내었다. 이 직선들은 청수중에서보다 30°C 청수중에서 직선의 기울기가 크고 절편도 크다. 30°C 청수중에 침지 시켰을 경우가 실온청수중

에서 경우 보다 부식이 더 많이 발생되고 있음을 보여 주고 있다. 한편 해수
중에서는 시간이 경과함에 따라 무게가 증가하였다.

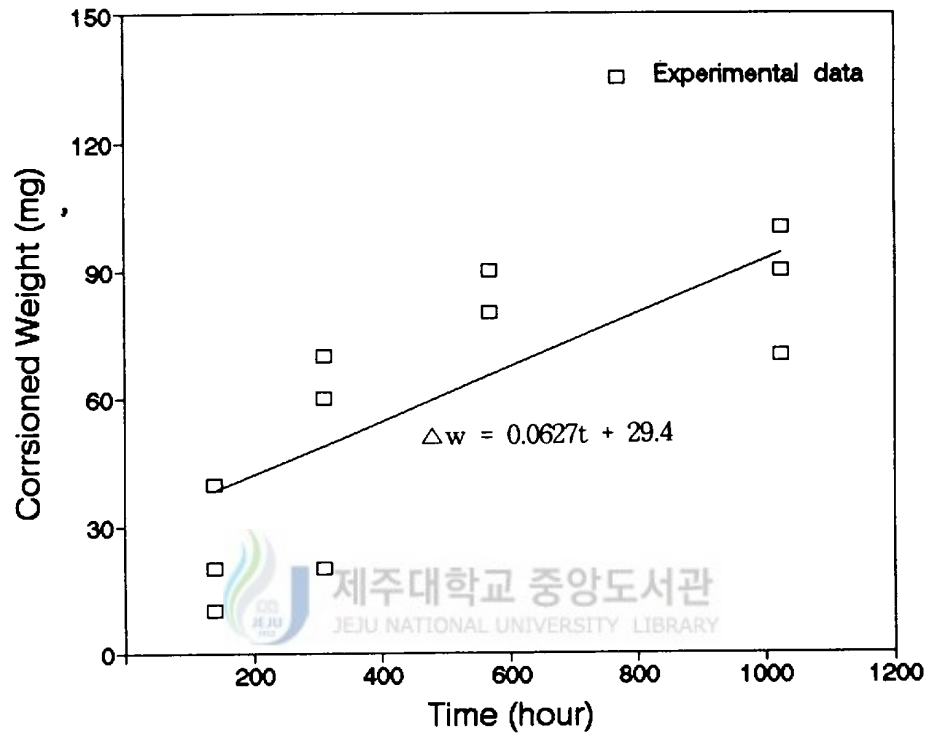


Fig. 10 Decreased corrosion weight of zinc coating steel in 15°C fresh water.

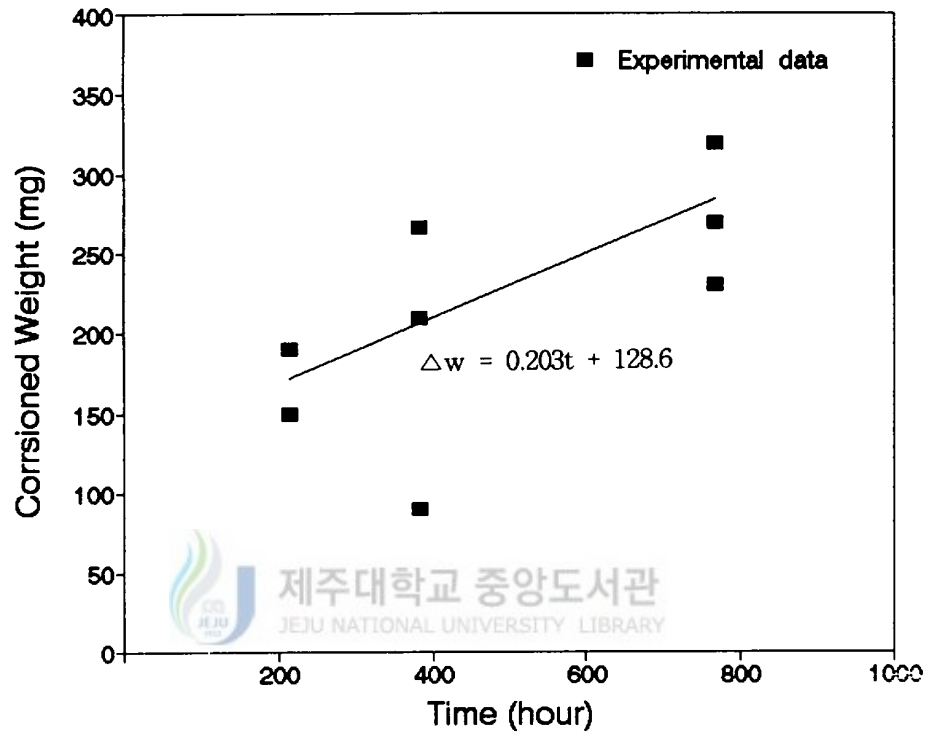


Fig. 11 Decreased corrosion weight of zinc coating steel in 30°C fresh water.

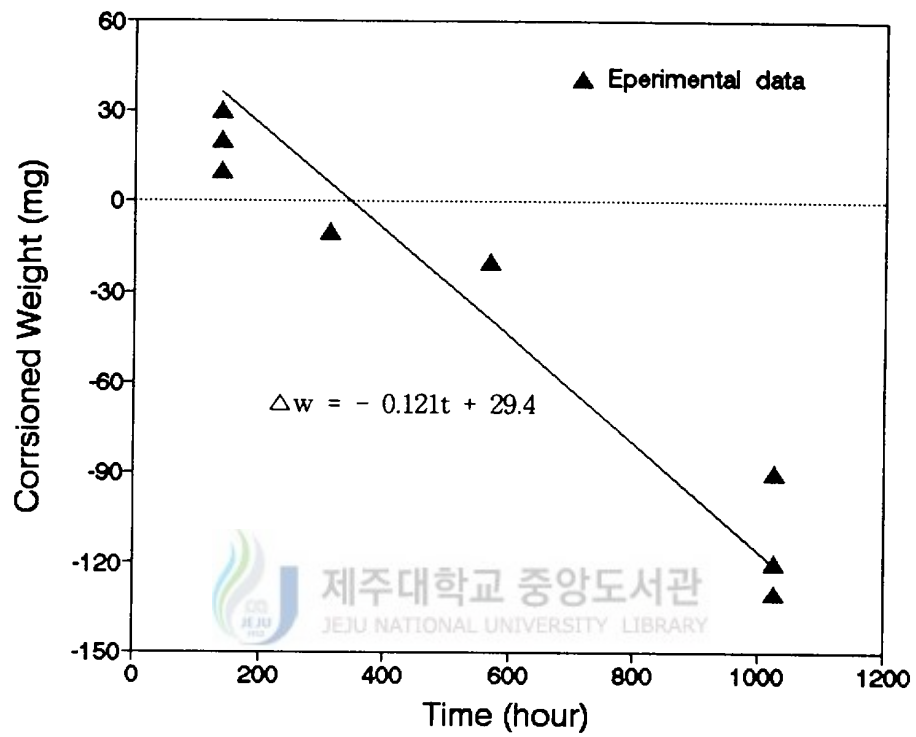


Fig. 12 Decreased corrosion weight of zinc coating steel in 15°C sea water.

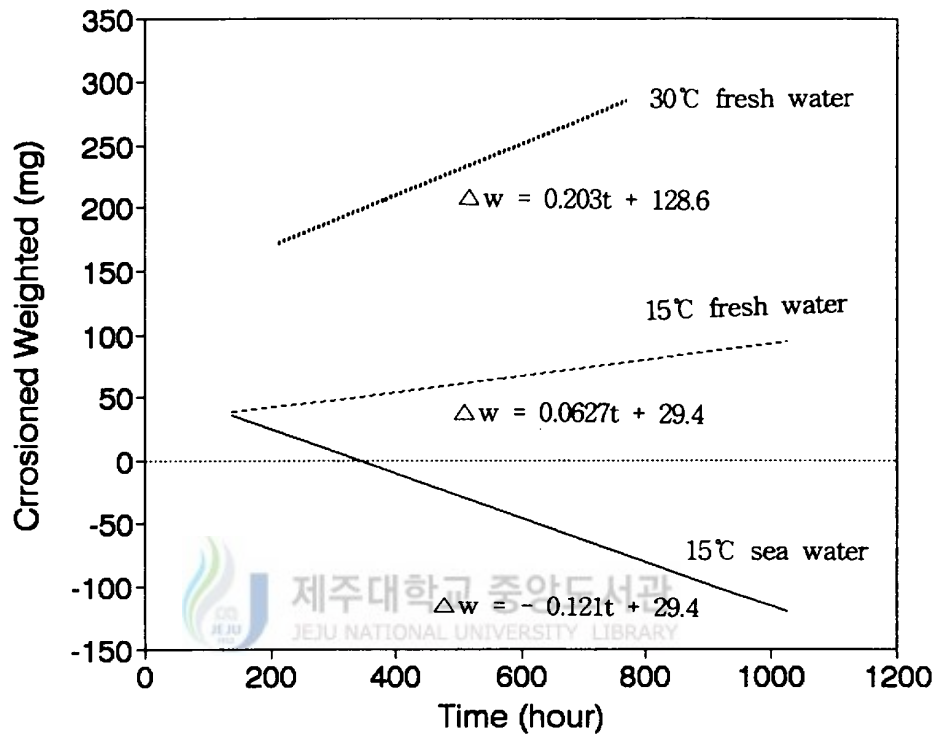


Fig. 13 Comparison of estimated lines in three corrosion environments.

3. 부식피로강도

Fig. 14은 SM45C와 S72C의 2 종류의 탄소구조용강을 공기중과 3% NaCl 수용액 중에서 응력레벨을 20~60 kg/mm²의 범위에서 응력을 변화시키면서 회전 굽힘 피로실험한 응력-수명선도를 나타내었다. 먼저 공기중의 실험결과를 보면 S72C와 SM45C 모두 피로한이 나타났으며, 응력은 S72C가 SM45C 보다 크다.

한편 3% NaCl 용액중의 S72C의 부식피로강도는 공기중의 피로강도보다 저하하며 피로한이 나타나지 않았다. 이는 3% NaCl 용액중 철의 부식작용 때문이다. 부식피로 시험중 철의 부식은 전면 부식과 부식피트 형상을 보였다. 부식 환경에서의 강도가 공기중의 강도보다 저하하는 것은 전면 부식에 의한 단면 감소와 부식피트에 의한 응력집중현상 때문으로 생각된다.

그리고 S72C의 3% NaCl 용액중의 피로강도는 SM45C의 공기중의 피로한 이하의 응력에서도 파단 되었다. 부식 환경하에서 피로한도가 명확하게 나타나지 않는 것은 부식으로 인하여 피로균열 발생이 용이하기 때문이라고 생각된다. 공기중과 부식환경중의 피로 실험결과를 비교하여 보면 공기중에서 보다 3% NaCl 수용액에서 재료의 피로 수명이 현저하게 감소하였다. 이것은 공기중에서의 피로수명은 기계적 성분에만 좌우되나 부식피로 수명은 기계적 성분과 환경 성분의 상호작용에 좌우되기 때문이다.

한편 아연에 의한 방식시의 S72C의 피로시험결과는 동일 재료의 공기중의 실험결과와 유사하다. 이는 아연피복에 의한 철의 방식효과를 나타낸다. 공기중과 아연피복재의 피로시험후 시험편표면 균열발생과 성장은 파단에 이

른 1개의 주균열 뿐이나, 3% NaCl 용액중의 시험편은 파단에 이르는 주균열
과 그 외에 수 많은 균열들이 관찰되었다.



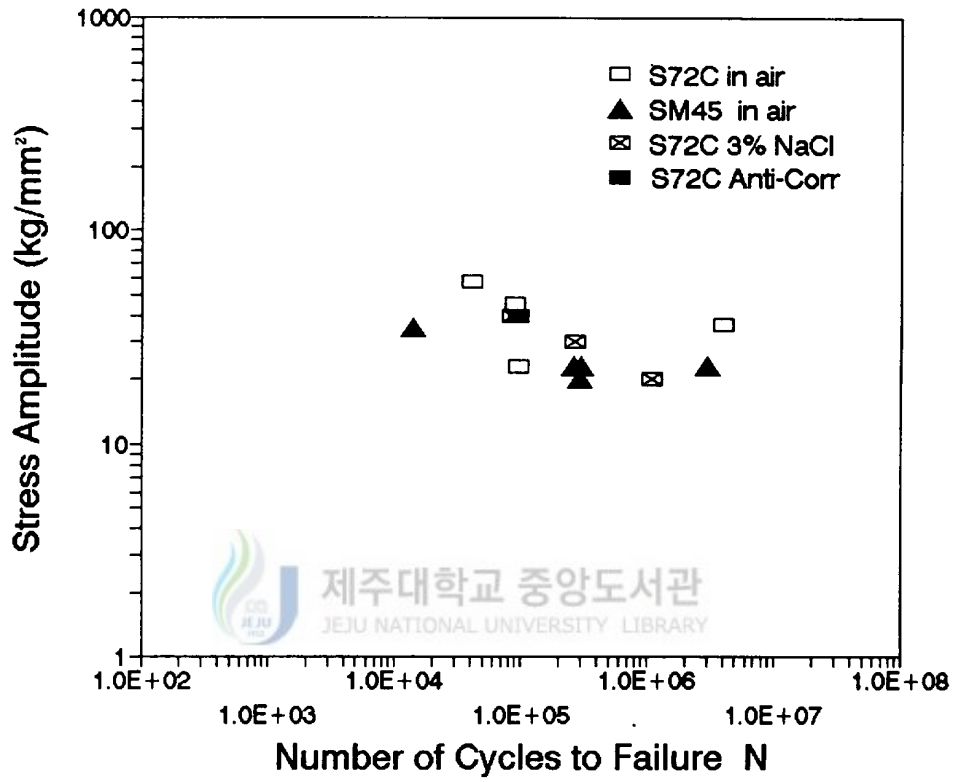
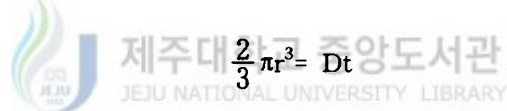


Fig. 14 S-N curve of S72C and SM45C in air and 3% NaCl solution.

4. 부식 피트 성장

Fig. 15는 3% NaCl 수용액중 부식피로 시험편의 부식피트의 성장을 나타낸 그림이다. 횡축은 시간을 종축은 부식피트의 깊이를 나타내었다. 부식피트는 침지초기에 형성되어 실험시간의 경과에 따라 성장하였다. Fig. 15중에는 각 측정점을 지수칙으로 가정하여 최소자승법에 의해 구한 곡선으로 나타내었다. 이 곡선에 의하면 부식피트의 깊이는 시간의 0.22승에 비례하여 성장하고있다.

Kondo(1987)는 부식피트의 성장을 이론적으로 검토하기 위하여 반구형의 부식피트가 일정 부식속도에서 성장한다고 가정하고 반구형 부식피트의 체적이 시간 t 에 비례하여 증대하는 것으로 간주 하여 부식피트의 깊이 r 은 시간의 1/3승에 비례하여 성장한다고 보고하였고, 저합금강 2.5% NiCrMoV와 3.5% NiCrMoV강의 부식피트성장은 이에 따른다고 보고하였다.



그러므로 $r \propto t^{1/3}$ 로 표현할 수 있다.

여기서 D 는 상수이다.

본 실험결과에서의 부식피트의 깊이 성장은 시간의 1/3승에 비례하는 이론적인 결과와 차이가 있다. 이론적인 부식피트의 성장은 부식전류가 일정하다고 가정하여 물질이동량 즉 체적변화율이 일정하다는 가정하에서 구한 것이다. 부식반응은 부식면의 노출 등에 의해 지배되고 부식전류가 항상 일정하지 않을 것으로 생각하여 보면 이론적인 부식피트의 성장은 실제환경하에서의 부식피트의 성장과는 차이가 있을 것으로 보인다.

또, 본 실험에서의 부식피트 성장은 피로응력이 가하여진 후의 부식피트의 성장을 조사하였으므로 응력이 부식피트의 성장에 영향을 미쳤을 가능성을 배제할 수 없지만 Nakajima와 Tokaji (1993)의 3% NaCl 용액중의 탄소강 S45C의 부식피트 성장이 시간의 0.199-0.224승에 비례한다는 결과와 거의 유사하다. 또 Masuda 등(1985)은 3% NaCl 용액중의 스텐레스 SUS403강의 부식피트 성장은 시간의 0.63승에 비례한다고 보고하고 있다. 따라서 부식피트 깊이성장은 환경 및 재료에 따라 차이가 있음을 알 수 있다.

부식피로 파괴기구는 초기에 다수의 부식피트가 형성되어 성장하고 그것을 기점으로 해서 다수의 균열이 발생한다. 이 다수의 균열이 각각 성장하여 합체되어서 구조물들이 파괴에 이른다고 생각된다. 단지 부식피트의 발생 수명은 전체의 수명에 대해서 작기 때문에 무시하면 다음과 같은 피로수명 N_f 를 얻을 수 있다.

$$N_f = N_{pg} + N_{cg}$$

여기서, N_{pg} 은 부식피트 성장수명, N_{cg} 은 균열 성장 수명이다. 이 식을 기초로 하여 부식피로수명을 예측할 경우에는 부식피트 성장 특성을 파악하는 것이 중요하며, 이에 대한 정도있는 연구가 기대된다.

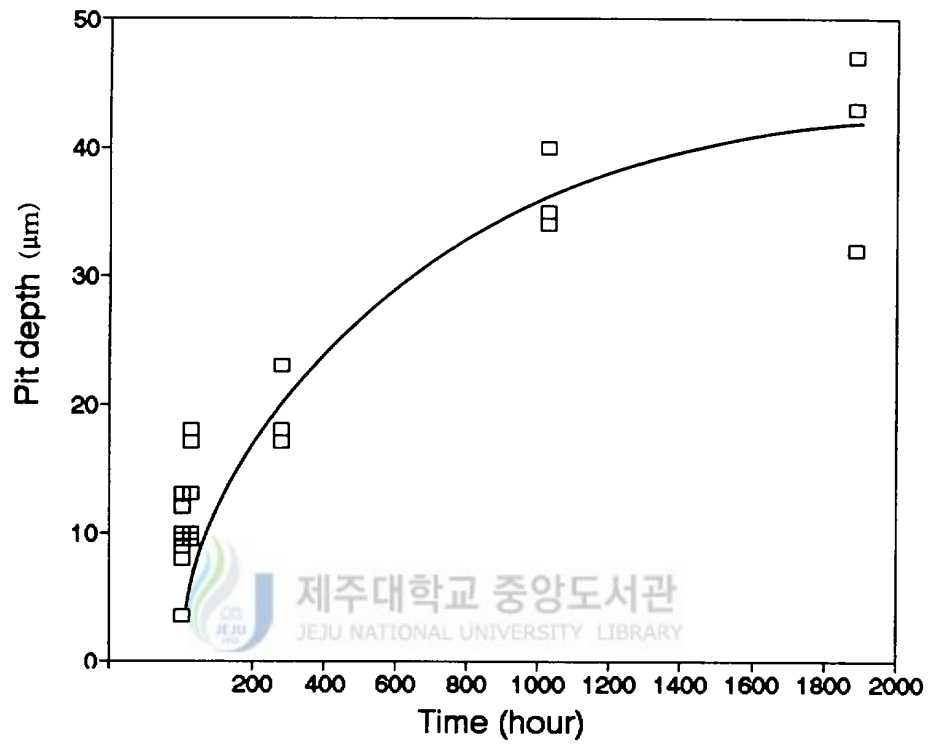


Fig. 15 Relations between time and corrosion pit depth.

5. 파단면 및 표면관찰

Fig. 16, 17은 피로시험후 파단된 면을 관찰한 사진이다. Fig. 16은 공기 중에서 피로시험을 행한 경우의 파단면이다. 이 파단면의 표면부에서는 서로 다른면에서 발생한 균열을 구분하는 파단선을 발견할 수가 없다. 그러므로 공기중에서의 피로수명은 기계적응력성분에 의해서만 좌우되고 균열합체가 없이 한개의 주균열이 성장에 의해 파단되었음을 알 수 있다. 따라서 공기중의 피로파괴는 응력의 영향에 의해서 이루어지며 부식환경하에서 피로파괴는 응력과 환경성분의 상호작용에 의해 파단된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 17는 3% NaCl 수용액하에서의 시험을 행했을 경우의 S72C의 파단면이다. Fig. 17에서 파단면의 표면부에서 내부로 파괴방향과 평행한 굽은 선들은 서로 다른면에서 발생한 균열을 구분하는 파단선이다. 이러한 파단선의 발생은 인접한 여러곳에서 발생한 균열들이 합체되어서 파단에 이르러 만나는 단면을 나타낸 것으로서 저응력으로 갈수록 파단선이 굴곡이 커짐을 관찰되는 것으로 보아 응력의 영향보다 부식의 영향이 커서 균열합체가 많이 형성되어 파단에 도달되었음을 알 수 있다.

Fig. 18은 나재 시험편을 공기중과 3% NaCl 수용액, 아연피복강재를 3% NaCl 수용액에서 피로시험한 후의 표면부들이다. 나재시험편을 공기중에서 실험한 표면부와 아연피복강재를 3% NaCl 수용액중에서 실험한 표면부는 부식피트와 균열의 발생하지않고, 한개의 주균열에 의해서 파단되었음을 알 수 있다. 좌측끝이 파단면을 나타낸다. 반면 나재 시험편을 3% NaCl 수용액에서 실험한 표면부에서는 다수의 부식피트가 발생하였고 피트가 성장하

여 균열에 이르고 여러 균열들이 합체가된 상태를 보여 주고 있으며 좌측끝이 요철이 심한 모습을 보여 주는 파단면으로 부터 이러한 진행상태에 의해 파단 된 것을 알수 있다.



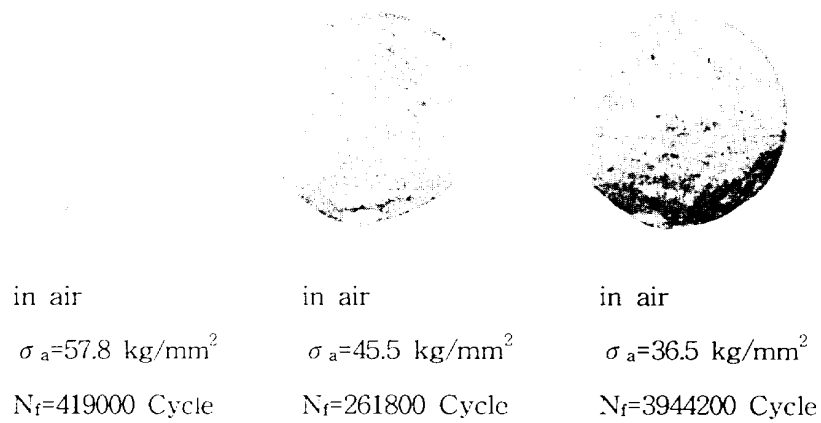


Fig. 16 Fractographs of fatigue fracture of S72C in air.

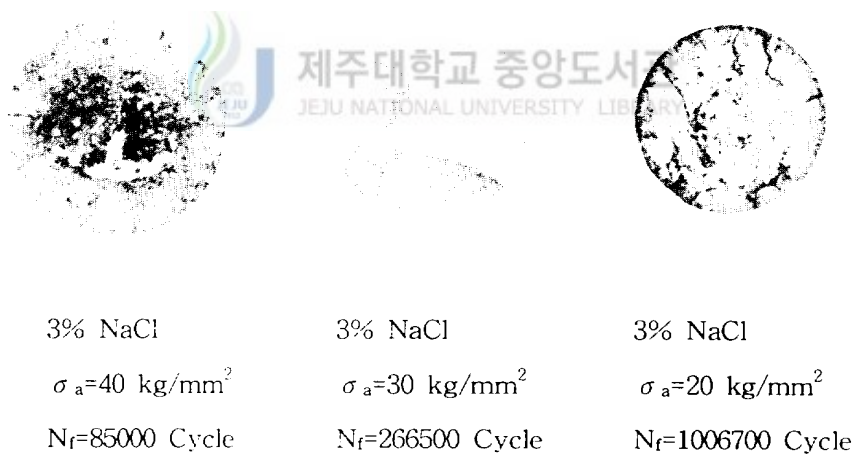


Fig.17 Fractographs of surface fatigue fracture of S72C in the 3% NaCl solution.

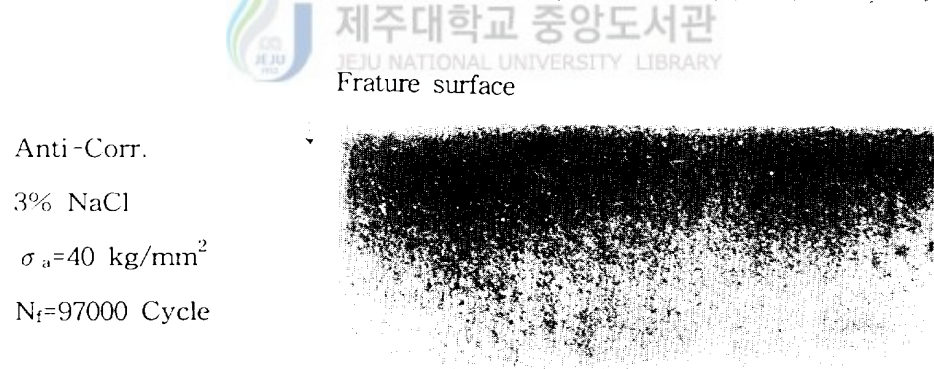
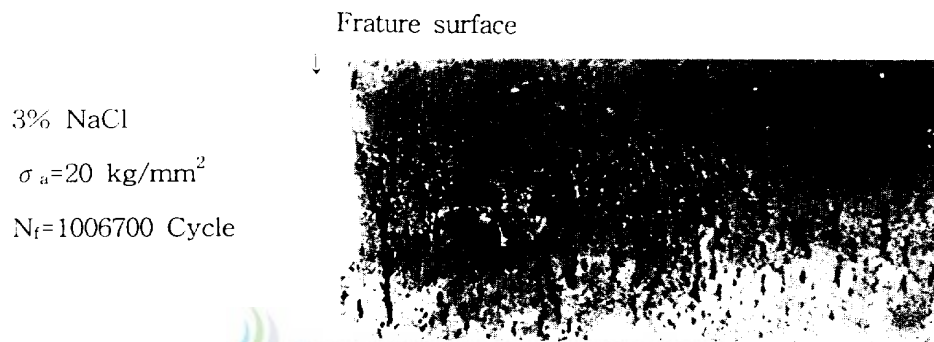
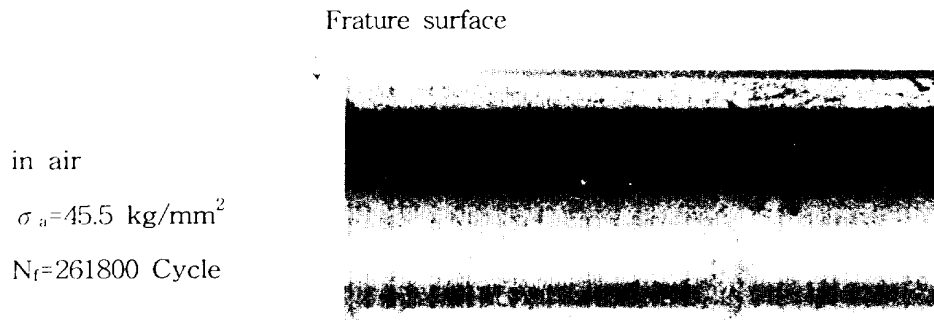


Fig. 18 Photographs of surface after fatigue fracture.

IV. 결 론

SM45C와 S72C의 탄소강의 나재와 아연피복 강재의 각 환경중의 부식 특성과 공기중과 3% NaCl 수용액중에서 피로 시험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 아연피복강재의 실온 청수중, 30°C 청수중, 실온 해수중에서의 부식특성은 아연의 희생양극작용에 의해 철의 부식 방지되었으며, 아연의 부식정도는 실온 청수중보다 30°C 청수중이 3배 이상 크게 나타나므로 아연부식에 온도가 큰 영향을 미친다.
2. 실온해수중에서의 아연피복 강재의 부식특성은 아연의 희생양극작용에 의해 철의 부식은 방지되고, 음극방식에 의해 해수중의 Ca, Mg의 성분인 백색 석출물이 아연피복강재에 부착되어 무게가 증가하였다.
3. 3% NaCl 수용액중의 부식 피로강도는 공기중의 피로강도에 비하여 저하하였고 공기중에서는 피로한도가 나타난 반면, 3% NaCl 수용액 중에서는 피로 한도가 나타나지 않았다. 한편 아연피복강재의 부식피로강도는 공기중의 피로강도와 거의 비슷하다.
4. 3% NaCl 용액중의 아연피복강재의 피로파괴는 한개의 주균열에 의해

이루어지고 3% NaCl 중의 나재는 다수의 균열이 합체되어 파단에 이른다.

5. 부식피트 성장은, 시간의 지수함수로 표시되고 부식 시간의 0.22승에 비례하여 증가하였다.

V. 참고 문헌

- 棧見, 1987, タフトライド處理したCr-Mo鋼の腐食疲勞強度,高張力鋼の海洋環境強度の綜合的評價に關する研究報告書. 51-55.
- 春山, 棧利, 水流, 1989, 塗裝鋼板における塗膜下腐食と物質移動, 防食技術, 38, 429-436.
- 清水, 船具, 山本, 1992, 熔融亞鉛鍍金めきボルトの裂發生に及ぼすめき處理の影響, 材料, 41, 470, 1636-1641.
- Ebara, R., 1993, 構造材料の腐食疲勞研究の現況と今後の課題, 59, 557, 1-11.
- Hiroshi, I., M. Kenzon. and K. Toshio, 1989, Prevention of Corrosion Cracking in Liquid Ammonia Tanks by Zinc Spraying, Boshoku Gijutsu, 38, 321-326.
- 江原, 山田, 1981, 海洋構造物用高張力鋼の腐食疲勞舉動, 三重工技報, 18, 5, 31-36.
- 角田, 西島, 1987, 人工海水, 自然海水, 3.5% NaCl·水中 腐食特性, 鐵鋼の環境強度部會 第3回 Symposium前集, 105-110.
- 宮田, 竹越, 高澤, 1989, 海洋地域における亞鉛の大氣腐食速度の測定, 材料と環境, 38, 540-545.
- Kenzou, F., A Kazuo. and Hisashi, 1983, The Fatigue Strength of a Microduplex Strainess steel in 20% NaCl Solution, Proceeding of the 26th Japan Congress on Materials Research, 26, 118-123.

- 高野, 井關, 仲田, 高田, 1993, 海洋地域における熔融亜鉛めき鋼の耐食性, 材料, 42, 472, 934-940.
- Kondo, Y., 1987, Prediction Method of Corrosion Fatigue Crack Initiation Life Based on Corrosion Pit Growth Mechanism, JSME(A), 53, 495, 1983-1987.
- Masuda, C. et, al, 1985, Corrosion Fatigue Life Prediction for SUS403 Stainless Steel in 3% NaCl Aqueous Solution, JSME(A), 52, 408, 1764-1769.
- Nakajima, M. and K. Tokaji, 1993, Corrosion Fatigue Life Distributions and Growth Behavior of Corrosion Pits in Long-Life Region of a Medium Carbon Steel, JSME(A), 59, 565, 2089-2094.
- 玉田, 宋, 清水義月, 1992, 防食材料の耐食性支配因子, Zairyo-to-Kankyo, 41, 89-95.
- Rajpathank S.S. and H.H. Hartt, 1987, Formation of Calcareous Deposits within Simulated Fatigue Crack in Seawater, Corrosion-NACE, 43, 6, 339-347.
- 徐昌敏, 姜成守, 黃南性, 吳相樺, 1992, 亞鉛鍍金 鋼板의 点銲接材의 疲勞舉動에 관한 研究, 韓國海洋工學會誌, 6, 21-34.
- 孫 旭臨, 述川茂男, 1992, 鋼と接銲した亞鉛のサイクル腐食試験における腐食の發生, 材料と環境, 41, 741-750.
- Yoshio, H., 1988, Corrosion Protection by Metallic Coatings and Its Practical Use, Boshoku Gijutsu, 37, 616-625.

Wolfson S.L. and W.H. Hartt, 1981, An Initial Investigation of Calcareous Deposits Unop Cathodic Steel Surfaces in Seawater, NACE, 37, No.2, February, 70-76.



감사의 글

본 논문이 완성되기 까지 성심으로 지도하여 주신 김 귀식 교수님께 감사드리오며, 항상 지도와 편달을 해주시고 논문교열에도 힘써주신 김만수 교수님, 허종철 교수님 그리고 항상 관심을 갖고 격려해 주신 권기린 교수님, 현명택 교수님, 임종환 교수님께도 감사를 드립니다.

그리고, 실험재료를 공급해 주신 금정산업 주식회사의 김보균 사장님, 기초데이터에 도움을 주신 제주 공업 기술원 관계자 여러분에게 감사드립니다. 아울러 본 연구 기간중 여러 어려움을 같이 해결하여 주시고, 도움을 베풀어준 오맹종, 현창해, 한진규, 고경남, 현경수 등 대학원생 여러분에게 감사드립니다.

끝으로 본 연구과정을 마칠때까지 성심으로 뒷바라지를 하여주신 부모님과 정숙, 정복, 정렬누님 그리고 귀여운 동생 종인에게 감사드리며, 오늘이 있기까지 정성과 사랑으로 보살펴 주신 모든 분들께 이 작은 결실을 드립니다.