

## 유압피로시험기의 제작

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

### A Manufacture of Hydraulic Fatigue Testing Machine

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

#### ABSTRACT

A hydraulic fatigue test machine was manufactured using a personal computer and a proportional valve, a hydraulic system. This machine was controlled loading waves and stress ratios, frequency by personal computer. A numerical simulation for the dynamic quality of this machine was done by 4 order Runge-Kutta method. Corrosion fatigue crack growth behaviors of SPH41 in 3% NaCl aqueous solution were investigated with this machine. Corrosion fatigue crack growths of this steel were reduced than the uncoated steel by anti-corrosion effect of zinc.

**Key words** ; Fatigue testing machine, Crack growth, Loading wave, Corrosion fatigue

#### 1. 서 론

첨단 산업이라 할 수 있는 항공, 우주, 해양개발, 신에너지 개발 분야부터 일반 구조용 부재에 이르기까지 금속 재료들의 사용 환경은 공업이 발달함에 따라 다양해지고, 가혹한 조건에서 사용하게 되었다. 기계 부품에 정하중이 아닌 시간에 따라 변화하는 하중 즉, 피로 하중이 가하여졌을 때 미세한 균열이 발생하여 서서히 파단에 이르는 것이 피로파괴의 특성이다.

이러한 피로 현상에 대한 연구는 1829년 J.

Albert에 의해 처음 시작되었으며, 피로 균열의 진전 거동에 대한 연구는 1970년대초 Elber에 의하여 피로 균열 開口현상이 보고된 이후 미소한 균열에 관한 연구와 피로 변동 하중의 피로 문제에 관한 연구 등 수많은 연구들이 행하여졌다. 최근에는 피로파괴 해석에 파괴 역학적 수법과 파단면 정밀관찰 등에 의해 피로 균열 성장 거동의 문제를 해석하고 있다.

특히 해양 구조물이나 선박 등에 사용되는 부재는 외력 및 파랑에 의한 하중과 해수에 의한 부식 작용을 동시에 받기 때문에 공기 중에 비하여 그 피로 수명이 현저하게 감소한다<sup>(1)</sup>. 이러한 환경에서 돌발적인 파괴를 미연에 방지하고 인명과 재산의 피해를 극소화하는 안전 설계와 그 수명을 정확하게 예측하기 위하여 환경에 따른 재료의 기초적 성질을 정확히 파악하는 데

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

대단히 중요하다.

금속의 피로에 대한 실험은 항공기, 선박, 해양구조물 등의 수명 예측에 대단히 중요하게 대두되어 외국에서는 유압서보 피로시험기 개발에 대한 연구가 활발히 전개되고 있고<sup>(2)</sup>, 컴퓨터를 이용하여 피로 거동을 고정밀도로 측정 한 사례도 보고 되고 있다<sup>(3)</sup>. 국내에서도 피로시험기와 퍼스널 컴퓨터의 인터페이스를 시도한 예가 있으며<sup>(4)</sup> 퍼스널 컴퓨터에 의한 피로시험 자동화 및 피로거동 측정<sup>(5)</sup>, 컴퓨터를 이용한 랜덤팅형 작성과 피로시험에 관한 연구<sup>(6)</sup> 등이 보고 되고 있지만 현재까지 염가의 국산화된 피로시험기가 개발되지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 퍼스널 컴퓨터와 비례 전자밸브 및 유압기 등을 이용하여 확장이 용이한 피로시험기를 제작하여, 동적 특성을 파악하고 이 자체 제작한 피로시험기를 이용하여 부식피로 균열성장에 대하여 검토하였다.

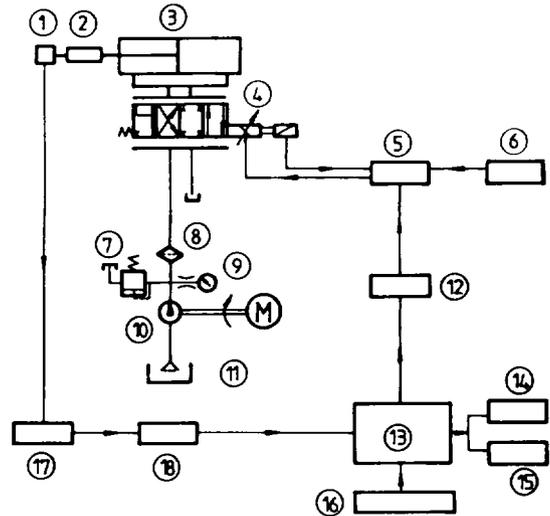
## II. 유압피로시험기 제작

### 2.1 시스템의 구성

본 연구에서 제안하는 피로 시험기는 유압 펌프, 유압 밸브, 유압 실린더 및 제어기로 구성되어 있으며, 구성도를 Fig. 1에 그리고 사양을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Principal part of fatigue testing machine

Item	Model	Maker	Remark
Proportional control valve	0811404034	BOSCH	$P_{max}$ 315bar
Proportional control valve amplifier	0811405030	BOSCH	
A/D, D/A Converter	PLC-714	ADVANTCH CO.	14bit
Load cell	LUB-1TB	KOYWA	Cap. 1ton
Personal computerr	80386	ATOM	
Hydraulic cylinder	63-50	NAMDO	Cap. 6ton
Power supply	SM-60	NICE ELECTRONIC CO.	30V, 3A
Strain amplifire	DPM-612A	KYOWA	=5V
Hydraulic pump	GSD-AOS08A, -AO	UCHIDA	8.6cc/rev
Relief valve	BT-0374	FUJIKEN	
Electric motor	TTH-0374HP, -505K	ULJI Electricity	1720rpm, 6A
Printer	HP-505K	SAMSUNG HP	
Filter	15P 1 10C 50MM 1 88	PARKER	



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

Fig. 1 Composition diagram of fatigue testing machine

Fig. 2는 피로 시험기의 블록 선도를 나타낸 것으로 컴퓨터에서 발생된 하중 파형 신호는 밸브 제어기를 거쳐 밸브 스펴을 구동시킨다. 이

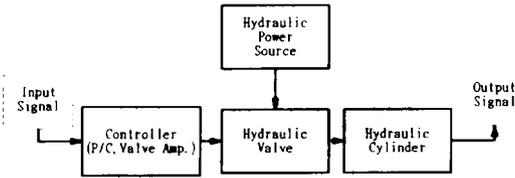


Fig. 2 Block diagram of open loop system

때, 유압원으로부터 공급된 유압력은 밸브를 통하여 유압 실린더로 공급되어 실린더가 작동한다. 시스템 운용의 프로그램 순서도는 Fig. 3에 나타내며 주요 서브루틴문의 내용은 다음과 같다.

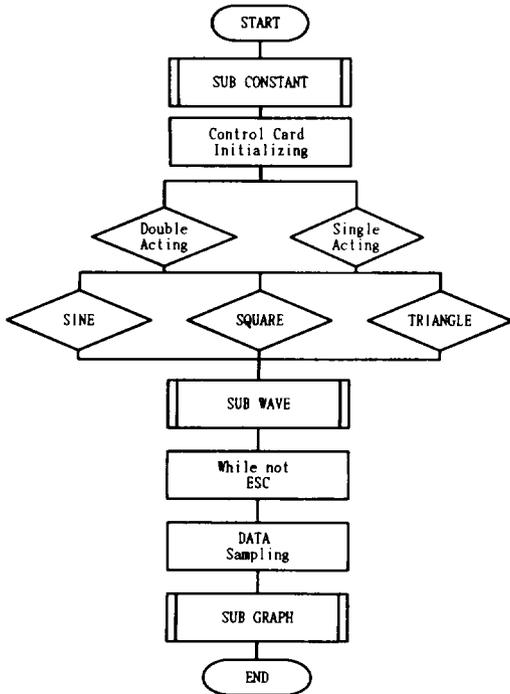


Fig. 3 Flow chart of control system

- (1) CONSTANT : 시스템과 관련된 각종 상수의 초기값과 물리적 변수값을 입력.
- (2) WAVE : 양진의 정현파, 사각파, 삼각파형, 그리고 편진의 정현파, 사각파, 삼각파형의 신호를 사용자의 선택에 따라서 밸브로 보냄.

- (3) GRAPH : 취득된 데이터를 화면에 그래프로 출력.

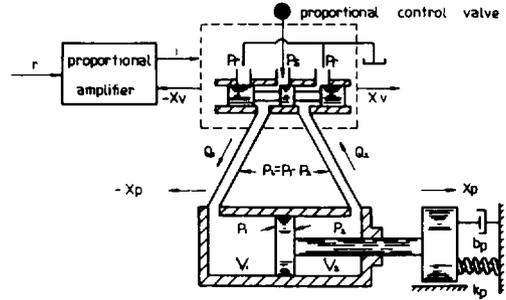


Fig. 4 Hydraulic circuit for numerical analysis

### 2.2 시스템의 동특성

본 연구에서 제안하는 시스템의 동특성을 위하여 구성된 유압 회로도를 Fig. 4에 나타낸다.

Fig. 4에서 나타내는 바와 같이 이 시스템은 밸브 제어기로부터의 신호가 밸브에 인가되면 비례 전자 밸브는 입력 신호에 비례하여 왼쪽 ( $x_v$ ) 혹은 오른쪽 ( $-x_v$ )으로 움직이게 되고, 밸브의 움직임에 따라 유압원의 압력유는 실린더의 헤드부 혹은 로드부로 공급되어 힘을 가하게 된다. 피로 시험 조건에 따라 양진(압축과 인장)을 필요로 하는 경우는 실린더 헤드부와 로드부에 번갈아 압력유를 공급하게 되고, 편진 압축을 필요로 하는 경우는 실린더 헤드부, 편진 인장을 필요로 하는 경우는 실린더 로드부에 압력유를 가하면 된다.

이 유압 회로도의 밸브-실린더-부하계 사이의 모델링을 하기 위하여 다음과 같은 제한 조건을 설정하고 각 경우에 있어서의 운동방정식을 유도하였다.

- (1) 공급압력  $P_s$ 는 언제나 일정하다.
- (2) 회로내의 공동현상은 없다.
- (3) 밸브 및 실린더로부터의 누설은 없다.
- (4) 탱크로의 귀환압력은 제로(0)이다.

#### 2.2.1 실린더 헤드로 압력이 공급될 때(압축시)

실린더 헤드부로 압력이 공급될 때,  $P_s$ 와  $P_1$  사이의 연속 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_v \cdot C_v \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_s - P_1)} = A_{\rho 1} \cdot \frac{dx_p}{dt} + \beta(V_1 + A_{\rho 1} \cdot x_p) \frac{dP_1}{dt} \quad (1)$$

$A_v$ : 비례전자밸브의 개구 면적,  $C_v$ : 비례전자밸브의 유량계수,  $\rho$ : 기름의 밀도,  $P_s$ : 공급압력,  $P_1$ : 실린더 헤드부 작동압력 ( $-x_v$  일때는 귀환압력),  $A_{\rho 1}$ : 실린더 헤드부 단면적,  $x_p$ : 피스톤 변위,  $\beta$ : 기름의 압축율,  $V_1$ : 밸브에서 실린더 헤드부까지의 체적,

$P_2$ 와  $P_3$  사이의 연속 방정식은 다음과 같다.

$$A_v \cdot C_v \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_2 - P_3)} = A_{\rho 2} \cdot \frac{dx_p}{dt} - \beta(V_2 - A_{\rho 2} \cdot x_p) \frac{dP_2}{dt} \quad (2)$$

$V_2$ : 실린더 로드부에서 밸브까지의 체적

밸브의 운동 방정식 및 실린더의 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K \cdot i = m_v \cdot \frac{d^2 x_p}{dt^2} + b_v \cdot \frac{dx_p}{dt} + k_v \cdot (x_v + x_{v0}) \quad (3)$$

$$P_1 \cdot A_{\rho 1} - P_2 \cdot A_{\rho 2} = m_p \cdot \frac{d^2 x_p}{dt^2} + b_p \cdot \frac{dx_p}{dt} \quad (4)$$

$K$ : 밸브의 이득,  $i$ : 밸브 구동 전류,  $m_v$ : 밸브 스프링의 질량,  $b_v$ : 밸브 스프링의 마찰 계수,  $x_v$ : 밸브 스프링의 변위,  $k_v$ : 밸브 스프링의 스프링 상수,  $P_2$ : 실린더 로드부 압력,  $A_{\rho 2}$ : 실린더 로드부 단면적,  $m_p$ : 피스톤의 질량,  $b_p$ : 피스톤의 마찰 계수

## 2.2.2 실린더 로드부 압력이 공급될 때(인장시)

실린더 로드부로 압력이 공급될 때,  $P_3$ 와  $P_2$  사이의 연속 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_v \cdot C_v \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_3 - P_2)} = A_{\rho 2} \cdot \frac{dx_p}{dt} + \beta(V_2 + A_{\rho 2} \cdot x_p) \frac{dP_2}{dt} \quad (5)$$

$P_1$ 과  $P_3$  사이의 연속 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_v \cdot C_v \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_3)} = A_{\rho 1} \cdot \frac{dx_p}{dt} - \beta(V_1 - A_{\rho 1} \cdot x_p) \frac{dP_1}{dt} \quad (6)$$

밸브의 운동 방정식 및 실린더의 운동방정식은 다음과같이 나타낼 수 있다.

$$K \cdot i = m_v \cdot \frac{d^2 x_p}{dt^2} + b_v \cdot \frac{dx_p}{dt} + k_v \cdot (x_v + x_{v0}) \quad (7)$$

$$P_2 \cdot A_{\rho 2} - P_1 \cdot A_{\rho 1} = m_p \cdot \frac{d^2 x_p}{dt^2} + b_p \cdot \frac{dx_p}{dt} \quad (8)$$

## 2.2.3 이론 해석에 필요한 물리 정수

수치 계산에 필요한 각종 상수들 중에서 비례전자 밸브에 관련된 상수는 이 제품의 생산 회사의 카탈로그를 참고로 하였으며, 그 외에 계산에 사용된 수치들을 아래에 제시한다.

시스템 사용 압력 [ $P_s$ ] =  $14 \times 10^5$  [ Pa ] 혹은  $18 \times 10^5$  [ Pa ]

작동유의 밀도 [ $\rho$ ] =  $860$  [ kg/m<sup>3</sup> ]

작동유의 압축율 [ $\beta$ ] =  $5.4 \times 10^{-10}$  [ m<sup>2</sup>/N ]

실린더 헤드부 단면적 [ $A_{\rho 1}$ ] =

$$\frac{\pi}{4} \times 0.0063^2$$
 [ m<sup>2</sup> ]

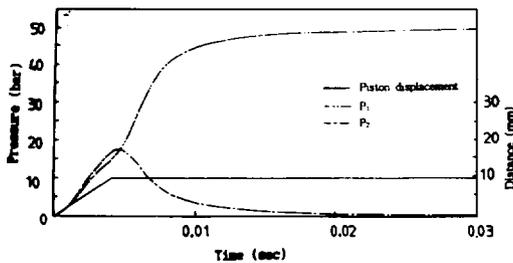
실린더 로드부 단면적 [ $A_{R2}$ ] =  
 $\frac{\pi}{4} \times (0.0063^2 - 0.003^2)$  [ $m^2$ ]  
 실린더 로드 질량 [ $m_p$ ] = 2 [kg]  
 밸브 A포트에서 실린더 헤드부까지의 체적  
 [ $V_1$ ] =  $1.96 \times 10^{-5}$  [ $m^3$ ]  
 밸브 B포트에서 실린더 로드부까지의 체적  
 [ $V_2$ ] =  $1.25 \times 10^{-5}$  [ $m^3$ ]  
 실린더 피스톤의 마찰 계수 [ $b_i$ ] =  
 98 [ $N \cdot s/m$ ]

상기의 방정식들을 이용하여 시스템의 동특성을 시뮬레이션하기 위하여 4계 Runge-Kutta법을 사용하여 수치해석을 하였다.

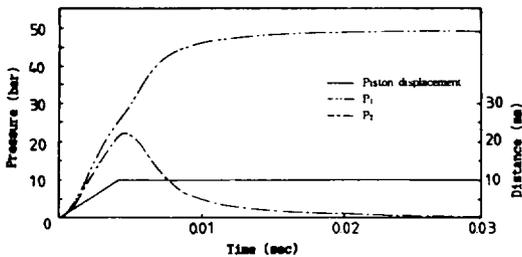
### III. 결과 및 고찰

#### 3.1 시스템의 동특성

피로시험기의 작동은 유압이 실린더 헤드부로 공급되는 경우와 로드부로 공급되는 경우로 나



(a) when  $P_1$  is enhanced head part



(b) when  $P_1$  is enhanced rod part

Fig. 5 Result of simulation ( $P_1$  : pressure of supply,  $P_2$  : pressure of return)

눌 수 있다. 실린더 헤드부로 압력이 공급되는 경우의 공급압력의 변화와 Return 부의 압력 변화 및 피스톤의 변위는 Fig. 5의 (a)에 나타내었고, 실린더 로드부로 압력이 공급되는 경우는 (b)에 나타내었다.

두 상황을 비교해보면 실린더헤드부로 압력이 공급될때 Fig. 5(a) 밸브의 개구면적은 같은데 반하여 피스톤 전·후부의 단면적이 다르기 때문에 피스톤 최대 변위까지 움직이기 전까지는 같은 시간에 같은 유량이 들어오고 빠져나가지 못하기 때문에 공급 압력보다 로드부의 압력이 높게 나타나고, 실린더 로드부로 압력을 공급할 때는 (b)로드부의 단면적이 작기 때문에 압력 상승은 전술한 상황에 비해 빠르고 헤드부 즉 Return부의 압력이 공급압력보다 낮게 나타난다. 또한, 실린더의 변위가 끝났을때의 Return부의 압력은 매우 빠른 속도로 떨어지기 때문에 빠른 주파수의 피로시험이 가능하다고 판단된다.

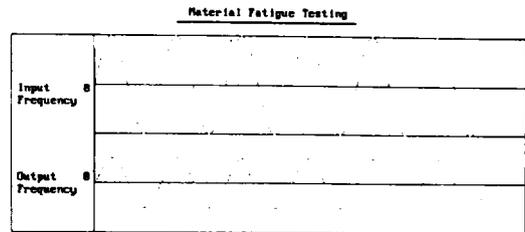
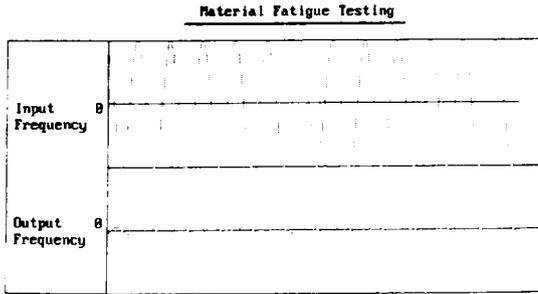


Fig. 6 Typical wave signal at unloading

#### 3.2 시험기 동작 및 출력 파형

자체 제작한 피로시험기의 무부하시의 동작상태의 일례를 Fig. 6에 나타낸다. 컴퓨터로 부터 입력된 양진과 편진의 파형신호(정현파, 삼각파, 사각파)와 그에 의해 동작된 시험기의 로드셀로부터의 출력신호는 양호한 상관성을 나타내고 있다.

Fig. 7은 부하시의 시험기의 동작상황을 나타낸다. 압력을  $10 \text{ kgf/cm}^2$ 로 하고, 실험 주파수를 3.8Hz로 하여 양진하중의 정현파를 입력했을 때 출력 파형을 나타낸 것이다. 여기에서, 컴퓨



Period = 01 (TIMES)  
 Experiment Time = 0.000125 (Sec)  
 Experiment Frequency = 0.000004 (Hz)

Fig. 7 Typical wave signal at loading (Pressure : 10 kg/cm<sup>2</sup>)

터에서 입력된 파형에 의해 시험편의 변위로 주어지는 출력파형이 정상적인 정현파로 나타남을 알 수 있고, 또한 실험 사이클수와 실험 시간 그리고 실험 주파수를 나타내고 있어 시험기의 작동이 정상적임을 나타내고 있다.

### 3.3 실제 피로시험에의 적용

제작된 피로시험기의 성능을 평가하기 위하여 부식피로균열 진전시험을 행하였다. 실험재료는 포항제철주식회사 제품인 열연용융아연도금 강판인 KSD350G SGH41의 판재이며, 재료의 화학적 성분은 Table 2에, 기계적 성질은 Table 3에 나타났다. 시험편은 아연 도금시험편(coated specimen) 과 도금부를 연마하여 제거한 나재 시험편(uncoated specimen)이며 그 형상과 치수는 Fig. 8과 같다. 노치의 길이 10mm, 선단부는 60도로 가공하였으며, 균열성장 길이를 측정하기 위하여 시험편의 양측면을 에머리페이퍼(#2000)로 정세 연마 하였다.

Table 2 Chemical composition(wt.%)

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

Table 3 Mechanical properties

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

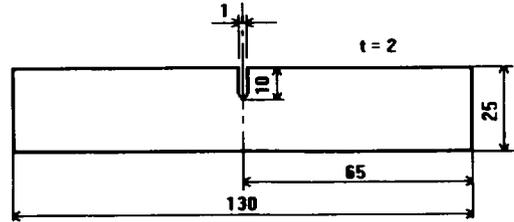


Fig. 8 Test specimen (unit : mm)

실험 환경은 3% NaCl 수용액을 사용했으며, 실험온도는 실온이다. 부식수조는 투명한 아크릴로 제작하여 실험중 이동 현미경을 사용하여 부식수조 밖에서 시험편의 균열 상태를 측정할 수 있게 하였다. 실험용액의 용량은 5ℓ로 하였고, 1주일에 1회 새로운 용수로 교환하였다.

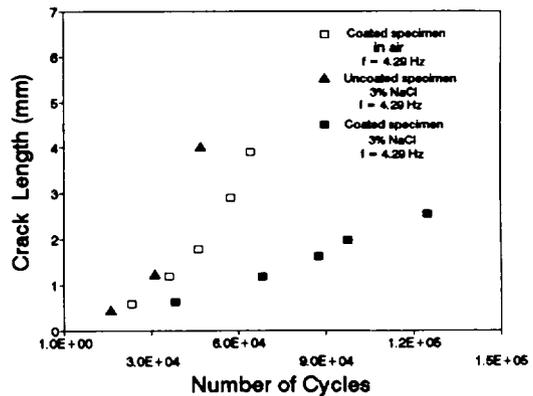


Fig. 9 Results of corrosion fatigue crack growth test

균열 진전 시험에 있어서 먼저 시험편을 공기 중에서 약 0.5mm의 예비균열을 발생시킨 후 본 실험을 행하였다. 본 실험에서의 공기중과 3% NaCl 수용액 중에서 SGH41재의 시험편과 아연 도금부를 제거한 나재시험편의 피로균열 길이와 사이클수와의 관계를 Fig. 9에 나타낸다. Fig. 9에서 균열성장은 3% NaCl 수용액 중의 나재 시험편이 공기중 보다 빠르다. 이것은 부식작용의 영향 때문이다. 3% NaCl 수용액 중에서 코팅 시험편과 나재 시험편의 균열 성장은 코팅 시험편이 나재 시험편 보다 균열성장이 느리다. 이것은 아연코팅 성분이 음극방식 작용 때문으로 생각

된다.

#### IV. 결 론

퍼스널 컴퓨터와 비례전자밸브 및 유압기기 등을 이용하여 염가의 유압 피로 시험기를 제작하여 부식피로 균열 성장에 대해 적용한 결과, 하중파형을 임의로 조정하여 피로시험을 할 수 있으며, 3% NaCl 수용액 중에서의 아연피복강재 SGH41의 부식 피로 균열 성장은 아연의 전기 화학적 부식방지 작용으로 인하여 무피복강재 보다 저하하였다.

#### 참고문헌

1. 김귀식, 1987, Corrosion Fatigue Crack Initiation Behavior of  $80\text{kg/mm}^2$  High-Tensile Strength Steel Weldment in Synthetic Sea Water, Journal of The Society of Materials Science Japan, Vol. 36, No. 401, pp. 141-146.
2. 西見一郎, 1985. 最近の油壓サーボ試験機と油壓装置について, 日本油壓工業會, Vol. 28, No. 4, pp. 29-35.
3. 菊川鎮, 城野政弘, 田中建一, 田畑文天, 村田洋一, 1980, ミニコンヒュータの 利用した疲勞試験機における計測の高精度自動化, 材料, Vol. 29, pp. 1240-1246.
4. 문한규, 방건웅, 김엄기, 1986, 피로시험을 위한 MTS와 Microcomputer의 Interface, 대한기계학회, 1986년도 추계 학술대회 초록집, pp. 29-33.
5. 박준래, 송지호, 김정협, 1988, 퍼스널 컴퓨터에 의한 疲勞試驗自動化 및 疲勞舉動 測定의 精密化, 대한기계학회논문집, Vol. 12, No. 1, pp. 123-130.
6. 송지호, 김종한, 김정엽, 1989, 유사 랜덤 하중 파형 작성과 이를 이용한 랜덤 하중하의 표면 피로 균열 진전에 관한 기초적 검토, 대한기계학회논문집, 13권, 1호, pp. 125-134.